マイクロフィルム用資料

ISSN 0386-5878
土木研究所資料 第3753号

土木研究所資料

平成11年度
土木研究所重点研究プロジェクト成果報告書

平成12年3月

建設省土木研究所

Copyright © (2000) by P.W.R.I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

土木研究所資料
第3753号2000年3月

平成11年度
土木研究所重点研究プロジェクト成果報告書

要　旨

本資料は、平成11年度に実施した土木研究所重点研究プロジェクト12課題について、重点研究プロジェクトを構成する個別課題の研究成果をとりまとめたものである。

キーワード

国土マネジメント　耐震設計　水質リスク管理　自然との共生
社会資本設備（CO_2削減、地域ニーズ）　リサイクル　ヒートアイランド現象
走行支援道路（AHS）　コスト縮減　外部コスト　品質管理

ま え が き

土木研究所は、その研究の計画的かつ的確な遂行を行うため、「土木研究所研究五箇年計画」を策定している。平成11年度は、新しい「第5次土木研究所研究五箇年計画」の初年度にあたる。この五箇年計画では、土木研究所の使命を、21世紀にふさわしい真に豊かな国民生活と社会の実現に貢献することとし、その中で次の三つの活動を謳っている。

① 中核的研究機関として、行政との密接な連携の下、国土マネジメント政策の適切な展開に必要な技術を提示し、研究体制を構築する（研究開発の体系と体制のコーディネーション）。

② この中で関係機関との連携を保ちつつ自ら行うべき研究を実施し、国土マネジメント政策の展開に貢献する（研究活動）。

③ これらの活動によって得られた知識・成果を基に関連機関に対して技術支援を行う（技術支援活動）。

そして、自ら行う研究を

(A) 行政と一体となって重要な社会的課題を解決する政策提言を行うため、ソフト面の対応も含めた総合対応型の研究（重点研究プロジェクト）

(B) 国土・社会資本の整備・利用・保全に係わる技術を高度化し、行政の事業分野・研究部門毎の課題を解決するための研究（基盤研究）

に分類し、今後は重点研究プロジェクト研究を充実していくことを目指している。

重点研究プロジェクトは、① 国土マネジメントの方向性、② 安全で安心できる国土の形成、③ 自然生態系と地球環境の回復・保全、④ 多様性に富んだ社会・快適な地域環境の創出、⑤ 経済活力の維持と効率的な建設行政の執行――の五つの分野からなる。平成11年度は、このような研究分野において、次の12課題を実施しているところである。

1. 先端技術の国土マネジメントへの応用に関する研究
2. 耐震設計の体系化に関する研究
3. 水環境における水質リスク管理に関する研究
4. 河川・湖沼の整備及び管理における自然との共生技術の開発
5. 社会資本整備におけるCO_2削減に関する研究
6. 公共事業におけるリサイクル材利用技術の開発
7. 地域のニーズに反映した社会資本整備技術の開発
8. 都市空間におけるヒートアイランド現象の軽減に関する研究
9. 走行支援道路システム（AHS）に関する研究開発
10. 建設事業のコスト縮減に関する研究
11. 外部コストを組み入れた建設事業コストの低減技術の開発
12. 建設事業の品質管理体系に関する研究

本報告書は、これら重点研究プロジェクトについて、平成11年度の研究成果をとりまとめたものである。本報告書に述べた内容は3～5年の研究期間をもつ重点研究プロジェクトの途中結果であり、必ずしも十分な成果を得ていないものもあるが、今後、それぞれの重点研究プロジェクトの終了とともに、その最終成果が国土マネジメント技術の発展に大きく寄与していくことを切に願うものである。

平成12年3月

土木研究所　研究調整官

上阪 恒雄

重点プロジェクト研究課題　総目次

1．先端技術の国土マネジメントへの応用に関する研究

1.1　ＧＩＳを活用した河川流況予測システムの研究開発……（水文研究室）… 6
1.2　洪水氾濫被害の最小化のための氾濫源管理システムの研究開発……（都市河川研究室）… 8
1.3　総合的な震災対策支援システムの研究開発……（防災技術課）… 10
1.4　震災対策体制の評価技術に関する研究……（防災技術課）… 16
1.5　生態情報の統合化及び活用に関する研究……（緑化生態研究室）… 18
1.6　ＧＩＳを利用した統合情報基盤の開発……（施工研究室）… 22
1.7　人工衛星利用技術を活用した流域水文情報収集技術に関する研究開発……（水文研究室）… 24
1.8　人工衛星による流域の土砂環境把握と危険度評価手法の開発に関する研究……（砂防研究室／地すべり研究室／建設システム課）… 26
1.9　大規模岩盤斜面の長期的変形調査……（急傾斜地崩壊研究室）… 30
1.10　災害復旧作業における高分解能衛星データの利用に関する研究……（機械研究室／施工研究室）… 32
1.11　衛星通信技術の道路分野への適用可能性に関する研究……（道路研究室）… 34
1.12　都市緑地調査における人工衛星技術の活用に関する研究開発……（緑化生態研究室）… 38
1.13　リモートセンシングデータを活用した流域土砂管理に関する研究……（砂防研究室／地すべり研究室）… 40
1.14　数値標高モデル地図を用いた地すべり地の抽出技術に関する調査……（地すべり研究室）… 42

2．耐震設計の体系化に関する研究

2.1　活断層の客観的認定および伏在断層による地表変位に関する研究……（地質研究室）… 50
2.2　大規模地震を想定した設計地震動の設定手法に関する研究……（振動研究室）… 52
2.3.1　地震ハザードマップの作成手法の開発に関する研究（その１）……（地質研究室）… 54
2.3.2　地震ハザードマップの作成手法の開発に関する研究（その２）……（振動研究室）… 56
2.4.1　耐震設計の性能規定化に関する研究（その１）……（基礎研究室）… 58
2.4.2　耐震設計の性能規定化に関する研究（その２）……（耐震研究室）… 64
2.5　地盤－基礎系を含む全体系を考慮した構造物の耐震性能の実験的検証技術に関する研究……（振動研究室）… 66
2.6　公共土木施設の耐震性水準の横断的整合に関する研究……（防災技術課）… 68

3．水環境における水質リスク管理に関する研究

3.1　環境ホルモン生成物質の水環境中での挙動に関する研究……（水質研究室）… 80
3.2　下水中の微量化学物質の新しい検出技術に関する調査……（水質研究室）… 86
3.3　下水汚泥中内分泌かく乱物質の消長に関する調査……（汚泥研究室）… 88
3.4　生態系から見た下水処理水の評価方法に関する調査……（水質研究室）… 90
3.5　水循環健全化のための環境ホルモン等リスク対策の調査検討……（三次処理研究室）… 96
3.6　内分泌かく乱物質等の発生源と処理対策手法の調査……（三次処理研究室）… 98
3.7　下水道での有害化学物質の管理に関する調査……（水質研究室）…104
3.8　病原性微生物の下水処理過程での制御に関する研究……（汚泥研究室）…108
3.9　病原性微生物の発生源および対策に関する調査……（三次処理研究室）…110
3.10　下水中病原性微生物の同定方法に関する研究……（汚泥研究室）…116
3.11　水系における病原性微生物の挙動に関する研究……（三次処理研究室）…118
3.12　下水処理水の安全性向上に関する研究……（三次処理研究室）…122

4．河川・湖沼の整備及び管理における自然との共生技術の開発

4.1　水系土砂動態変化に伴う河川の自然形成システムの変質とその再生手法に関する調査……（河川研究室）…134
4.2　河川のハビタットに関する調査……（河川環境研究室）…136
4.3　自然作用を活用した共生型川づくりに関する研究……（河川環境研究室）…140
4.4　新素材・新工法を用いた防御工の開発（総論）……（河川研究室／河川環境研究室／緑化生態研究室／コンクリート研究室）…142
4.4.1 新素材・新工法を用いた防御工の開発（その１）……（河川研究室）…144
4.4.2 新素材・新工法を用いた防御工の開発（その２）……（河川環境研究室）…156
4.4.3 新素材・新工法を用いた防御工の開発（その３）……（河川環境研究室）…158
4.4.4 新素材・新工法を用いた防御工の開発（その４）……（コンクリート研究室）…162
4.4.5 新素材・新工法を用いた防御工の開発（その５）……（緑化生態研究室）…164
4.5　渓畔林を活用した流路整備に関する調査……（砂防研究室）…168
4.6　中小河川における天然河岸の保全手法に関する研究……（河川環境研究室）…172
4.7　ダム湖における生物生息空間の整備技術の開発……（緑化生態研究室）…174
4.8　魚類の生息空間の保全・創出手法の開発……（河川環境研究室）…176
4.9　水域のネットワーク保全手法に関する研究……（河川環境研究室）…184
4.10.1自然共生実験施設を用いた河川の自然環境の保全に関する基礎調査（その１）・（河川環境研究室）…186
4.10.2自然共生実験施設を用いた河川の自然環境の保全に関する基礎調査（その２）・（河川環境研究室）…188
4.11　変動を加味した正常流量に関する基礎調査……（河川環境研究室）…190
4.12　浮島による湖沼の自然回復と水質浄化に関する研究……（河川環境研究室）…192
4.13　人工生態礁による富栄養化対策に関する調査……（環境計画研究室）…194
4.14　湿地帯における栄養塩収支の把握と水質浄化能力の評価に関する研究……（環境計画研究室）…196

5．社会資本整備におけるCO_2削減に関する研究

5.1　都市型総合廃棄物を原料とした環境負荷低減型セメントの建設事業への適用技術に関する研究……（化学研究室）…204
5.2　省エネルギー型セメントを用いたダム用コンクリートの利用技術に関する調査……（ダム構造研究室）…206
5.3　都市域の交通部門における温暖化防止施策の総合評価に関する研究……（交通環境研究室）…212
5.4　低公害大型車等の導入が都市交通環境に与える影響に関する調査……（交通環境研究室）…231
5.5　戦略的環境アセスメントに関する研究……（交通環境研究室）…233
5.6　都市内緑地による温室効果ガス削減に関する検討その他……（緑化生態研究室）…237
5.7　下水道システムのＬＣＡに用いる原単位に関する調査……（汚泥研究室）…243
5.8.1 建設事業におけるCO_2算定評価システムの開発に関する研究……（機械研究室）…245
5.8.2 建設事業におけるCO_2算定評価システムの開発に関する研究……（化学研究室）…247

6．公共事業におけるリサイクル材利用技術の開発

6.1　リサイクル新材料の利用技術に関する研究……（新材料開発研究官）…256
6.2　他産業リサイクル材利用のマニュアル検討調査……（新材料開発研究官）…258
6.3　一般廃棄物の焼却灰溶融固化物の舗装用骨材としての利用に関する調査……（舗装研究室）…260
6.4　廃木材を活用した大気汚染対策用舗装の開発……（化学研究室）…262

7．地域のニーズを反映した社会資本整備技術の開発

7.1.1 地域のニーズを反映した社会資本整備手法に関する研究（その１）…… （建設ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ技術研究室）…270
7.1.2 地域のニーズを反映した社会資本整備手法に関する研究（その２）…… （都市河川研究室）…272
7.2 地域特性を活かした地域計画及び施設設計の手法に関する研究…… （環境計画研究室）…276
7.3 河川に関する歴史・文化資源を活用した川づくりに関する調査…… （都市河川研究室）…278
7.4 地域社会特性の分析による社会資本整備の評価に関する研究…… （建設ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ技術研究室）…282

8．都市空間におけるヒートアイランド現象の軽減に関する研究

8.1 都市気候の動植物への影響に関する調査…… （緑化生態研究室）…290
8.2 都市気候の数値シミュレーションに関する研究…… （都市河川研究室）…294
8.3 都市気候緩和と地下水涵養に効果的な環境共生型舗装に関する研究…… （都市河川研究室）…296
8.4 社会基盤等を活用した省エネ及び都市の気候緩和に関する研究（１）…… （化学研究室）…298
8.5 社会基盤等を活用した省エネ及び都市の気候緩和に関する研究（２）…… （都市河川研究室）…300
8.6 都市内緑地による温室効果ガス削減に関する調査…… （緑化生態研究室）…304

9．走行支援道路システム（ＡＨＳ）に関する研究開発

9.1.1 ＩＴＳ全般に関する調査（その１）…… （高度道路交通ｼｽﾃﾑ研究室）…316
9.1.2 ＩＴＳ全般に関する調査（その２）…… （高度道路交通ｼｽﾃﾑ研究室）…320
9.2 コンセプト及びアーキテクチャの設計と評価に関する調査…… （高度道路交通ｼｽﾃﾑ研究室）…322
9.3 道路状況把握道路システムに関する調査…… （高度道路交通ｼｽﾃﾑ研究室）…324
9.4 路面状況把握道路システムに関する調査…… （高度道路交通ｼｽﾃﾑ研究室）…326
9.5 車両誘導制御支援道路システムに関する調査…… （高度道路交通ｼｽﾃﾑ研究室）…328
9.6 走行車両位置検出支援道路システムに関する調査…… （高度道路交通ｼｽﾃﾑ研究室）…330
9.7 最先端の通信方式を利用した道路システムに関する調査…… （高度道路交通ｼｽﾃﾑ研究室）…334
9.8 システムの設計に関する調査…… （高度道路交通ｼｽﾃﾑ研究室）…338
9.9 システムの評価に関する調査…… （高度道路交通ｼｽﾃﾑ研究室）…342

１０．建設事業のコスト縮減に関する研究

10.1.1 建設事業のコスト構造の分析に関する調査（その１）…… （建設システム課）…350
10.1.2 建設事業のコスト構造の分析に関する調査（その２）…… （建設システム課）…352
10.2 軽量盛土材の活用に関する調査…… （土質研究室）…354
10.3 擁壁構造物の設計合理化に関する調査…… （施工研究室）…358
10.4 シールド工事の設計合理化に関する調査…… （施工研究室）…362
10.5 橋面舗装の合理化に関する調査…… （舗装研究室）…364
10.6 深層混合処理工法の合理化に関する調査…… （土質研究室）…366
10.7 管渠システムの設計合理化に関する調査…… （下水道研究室／建設システム課）…368
10.8 揚排水機場の設計合理化に関する研究…… （機械研究室）…374
10.9.1 プロジェクトマネジメント手法の検討に関する調査（その１）…… （建設ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ技術研究室）…376
10.9.2 プロジェクトマネジメント手法の検討に関する調査（その２）…… （建設ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ技術研究室）…378
10.9.3 プロジェクトマネジメント手法の検討に関する調査（その３）…… （建設ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ技術研究室）…380

１１．外部コストを組み入れた建設事業コストの低減技術の開発

11.1　外部コストの概念整理、計測、評価手法の開発……（環境計画研究室）…388
11.2　内部コストの実態把握、外部コストの内部化手法調査……（建設システム課）…390
11.3　道路事業における外部コストの実態把握、評価手法の開発……（道路研究室）…392
11.4　維持補修事業における外部コストの実態把握、評価手法の開発……（施工研究室）…396
11.5　トンネル施工法における外部コストの実態把握、評価手法の開発……（トンネル研究室）…402
11.6　建設汚泥、建設発生木材等リサイクル促進技術の開発……（施工研究室）…404
11.7　低品質骨材・再生骨材の利用用途拡大技術の開発……（コンクリート研究室）…406
11.8　環境にやさしい塗料技術の開発……（化学研究室）…408
11.9　民間技術活用の入札契約手法の提案に関する調査……（建設ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ技術研究室）…410
11.10　建設技術情報流通システムの構築に関する調査……（建設ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ技術研究室）…412

１２．建設事業の品質管理体系に関する研究

12.1　要求性能と品質レベルの相関性の検討
（構造物の性能に与える品質の影響度）……（構造研究室）…420
12.2　要求性能と設計・材料・施工・維持管理の品質管理レベルの相関性の検討……（橋梁研究室）…422
12.3　品質規格の性能規定化手法の開発……（化学研究室）…424
12.4　コンクリート材料・構造物の品質検査技術の開発
（非破壊検査・高知能検査等）……（コンクリート研究室）…426
12.5　鋼構造物の品質検査試験技術の開発（非破壊検査・溶接検査・塗膜検査等）……（橋梁研究室）…430
12.6　鋼構造物の品質検査試験技術の開発（非破壊検査・溶接検査・塗膜検査等）……（化学研究室）…432
12.7　土構造物の品質管理技術の開発……（施工研究室）…434
12.8　施工情報活用による品質管理・検査の合理化技術の開発（シールド工）……（機械研究室）…436
12.9　公共土木工事の発注体系に関する調査研究……（建設ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ技術研究室）…438
12.10　公共土木工事の性能発注に関する調査研究……（建設ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ技術研究室）…440

先端技術の国土マネジメントへの応用に関する研究

1．先端技術の国土マネジメントへの応用に関する研究

研究期間：平成 11～14 年度
プロジェクトリーダー：情報技術総括研究官
森重　卓雄

1. 研究の背景：

多発する自然災害や地球規模での環境問題、社会経済活動の構造変化などに対応し、少子高齢化や財政構造問題からの投資余力の制約の下で、豊かで安全、快適な国土を構築するためには、従来までの個別事業の整備水準の向上を目指した「国土建設」から社会資本ストックの有効活用や自然環境の保全などを含めた国土を総合的に整備・利用・保全する「国土マネジメント」への政策転換が求められている。

国土マネジメント施策の展開においては、国土の自然環境、国民の生活環境、災害の発生状況や被災の状況、さらには我が国の社会・経済活動など国土の現状を広範囲にわたって的確、迅速に把握する必要がある。そのためには先端技術を応用して広範囲な国土情報の収集技術、収集・蓄積された情報を一元的管理して利用・提供する技術及び防災・環境保全・国土計画などに利用・応用する技術等の研究開発が不可欠である。

2. 研究の目的：

本研究は、国土マネジメントの主要課題である防災・環境保全などを事例に、先端技術として情報通信、リモートセンシング、GIS（地理情報システム）などを活用した応用技術の研究開発を行い、その成果を国土マネジメント施策の展開に資することを目的とする。

①情報の利活用技術の研究として、国土情報を迅速に収集し、情報の解析・シミュレーション技術などを応用したシステムの開発により防災計画、災害対策支援計画、環境管理計画などに利活用する。

②情報システム構築手法の研究として、国土管理データの一元的整備、ネットワーク上での共用・利用を目的とする GIS を利用した統合情報基盤技術を開発する。

③人工衛星利用技術に関する研究として衛星リモートセンシングデータなどによる広域的な国土情報の収集技術及び環境監視、危険度評価、道路交通分野などへの適用技術に関する研究開発を行う。

3. これまでの研究成果：

①情報の利活用技術の開発としては河川流況予測システム、氾濫源管理システム、震災対策支援システム、生態情報統合化などの課題において GIS の活用手法、衛星データ利用手法の検討、関連技術の調査およびモデル地域でのデータ整備などを行った。

②情報システム構築手法の研究としては空間データの評価手法の調査、メタデータ作成・検索手法の検討などを行い、GIS をプラットホームとする国土管理情報基盤の概念、構想、標準化方針などを提案した。

③人工衛星利用技術に関する研究としては流域水文情報収集、土砂管理、斜面管理、災害復旧、道路交通及び都市緑化調査などへの適用に関する課題において、既存の衛星データに加えて高分解能光学センサーおよび合成開口レーダ（SAR）を含む衛星データの評価、モデルサイトにおけるデータ解析などを行い利用の可能性、適用性の検討を行った。

－先端技術の国土マネジメントへの応用に関する研究－

個別研究課題目次

1.1　ＧＩＳを活用した河川流況予測システムの研究開発……（水文研究室）… 6

1.2　洪水氾濫被害の最小化のための氾濫源管理システムの研究開発……（都市河川研究室）… 8

1.3　総合的な震災対策支援システムの研究開発……（防災技術課）… 10

1.4　震災対策体制の評価技術に関する研究……（防災技術課）… 16

1.5　生態情報の統合化及び活用に関する研究……（緑化生態研究室）… 18

1.6　ＧＩＳを利用した統合情報基盤の開発……（施工研究室）… 22

1.7　人工衛星利用技術を活用した流域水文情報収集技術に関する研究開発……（水文研究室）… 24

1.8　人工衛星による流域の土砂環境把握と危険度評価手法の開発に関する研究……（砂防研究室／地すべり研究室／建設システム課）… 26

1.9　大規模岩盤斜面の長期的変形調査……（急傾斜地崩壊研究室）… 30

1.10　災害復旧作業における高分解能衛星データの利用に関する研究……（機械研究室／施工研究室）… 32

1.11　衛星通信技術の道路分野への適用可能性に関する研究……（道路研究室）… 34

1.12　都市緑地調査における人工衛星技術の活用に関する研究開発……（緑化生態研究室）… 38

1.13　リモートセンシングデータを活用した流域土砂管理に関する研究……（砂防研究室／地すべり研究室）… 40

1.14　数値標高モデル地図を用いた地すべり地の抽出技術に関する調査……（地すべり研究室）… 42

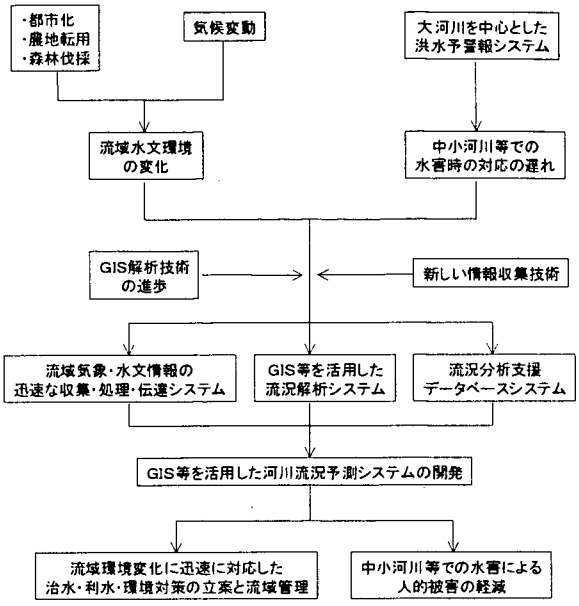
1.1　ＧＩＳを活用した河川流況予測システムの研究開発

研究期間：平 11 ～平 14

担当：水文研究室

【要旨】

近年頻発する中小河川での洪水水害を軽減・防止するためには、気象・水文現象の現況を迅速かつ的確に把握し、それによる出水規模がどの程度既往の事例と比較して危険なものであるか、どの支川筋が危険なのかを迅速かつ的確に判断するための河川流況予測支援システムが必要である。また、従来の治水・利水に対し健全な水循環系の確保の概念を取り入れるために、低水や中小洪水も含む河川流況の精度の高い予測と管理が必要とされる。本研究は、GIS技術やリモートセンシング等の先端技術を活用して河川流況予測技術の高度化を図るとともに、河川管理の視点から見た国土管理統合情報基盤への要件を明らかにすることを目的とする。



１．研究目的

本研究は、ＧＩＳ技術や地上レーダ・衛星によるリモートセンシング情報等の先端的な情報とその処理技術を活用することによって、㈠流域気象・水文情報の迅速かつ有効な収集・処理・伝達システム、㈡流域気象・水文環境の変化に迅速に対応できる流況解析システム、㈢既往の気象・流況と迅速かつ的確に比較分析を行うための流況分析データベースシステム、の３者から構成される高度な河川流況管理支援システムの基盤技術を開発することを目的とする。また、河川管理支援に必要となるGIS等の先端技術へのニーズを明らかにし、河川管理の視点から見た国土管理のための統合情報基盤への要件を明らかにする。

２．研究方法

11 年度は、地上水文観測ネットワークや過去の水文資料が必ずしも十分でないことが多い中小河川での利活用を念頭において、流況予測システム構築に関する初期検討を実施する。定量的な雨量情報収集手段として、レーダ雨量計の利用を検討する。また、水文資料の無い流域で洪水流出解析モデルを構築するために、国土数値情報や人工衛星画像情報等をベースにしたGIS技術の利活用を検討する。GISによりパラメータを推定できる流出解析手法としては、集中定数型の最も簡便な合理式から、流域を区分した細分メッシュごとに流出素過程をモデル化した物理的な分布定数型モデルまで多様なレベルがある。一般的には、流出解析手法の簡便さや適用範囲の広さと精度とはトレードオフの関係があるものと推定されることから、11年度は、最も適用が容易と考えられる修正合理式、及び比較的大きな流域への適用を考慮して河道網を利用した修正合理式について検討を始めることとした。対象流域は、上記の種々の検討のための水文資料が揃っている必要があることを考慮し、人為的流量調節の影響が小さく種々の流域スケールを検討できる遠賀川流域及び同水系の各支川流域を選定した。

3．研究結果

遠賀川流域内の種々のスケールの流域に対し、流量資料がない地点でもレーダ雨量情報を活用して最も簡便に構築できる修正合理式（時々刻々の流域平均雨量を洪水到達時間内で移動平均してハイドログラフを算出）、ならびに、500m メッシュの標高データをもとに作成した河道網図（図１）を用いて各メッシュ毎に洪水到達時間を評価し、その時間内の移動平均メッシュ雨量（レーダ雨量）から求められた流出量を各河道毎の流下時間を加味しながら全メッシュについて加算してハイドログラフを作成する「修正合理式＋疑似河道網」システムの２つのモデルを適用した。図２に、50km^2 から 700km^2 スケールに至る遠賀川流域内での適用結果を示す。流出係数は 0.5 とし、洪水到達時間は Kraven 式を用いた。実測流量と比較すると、いずれのモデル・スケールにおいても一山目の出水ピークでは明らかに過大評価となっているが、より大きなピーク二山目では生起時刻・流量ピーク値ともに実測値に漸近している。これまでに試算した他の４降雨事例でも、流域平均総雨量でレーダ雨量が地上雨量と離れている１事例を除き、ほぼ同様の結果となった。このことは、適切に初期損失量を評価・設定することの重要性を示す一方で、今後の改良と使い方次第では、レーダー雨量計と修正合理式を組み合わせたシステムを用いて、水文観測資料のない中小河川で、真に危険な出水を見分ける一つの情報ソースとして役立てる可能性を示している。２つのモデルの再現特性を比較すると、300km^2 以上のスケールで疑似河道網を活用したモデルの方が単純な修正合理式よりも適合性が良い。一般に、合理式適用の限界とされる面積（おおむね 200km^2）以上の流域で修正合理式を適用する場合に、河道網による流量波形合成手法が有効となる可能性を示すものと言える。但し、これらの考察の妥当性については、さらに適用事例を増やして検証する必要がある。また、他の代表的な流出解析手法も含めて、種々の特性を持つ流域において追加検討を行う必要がある。

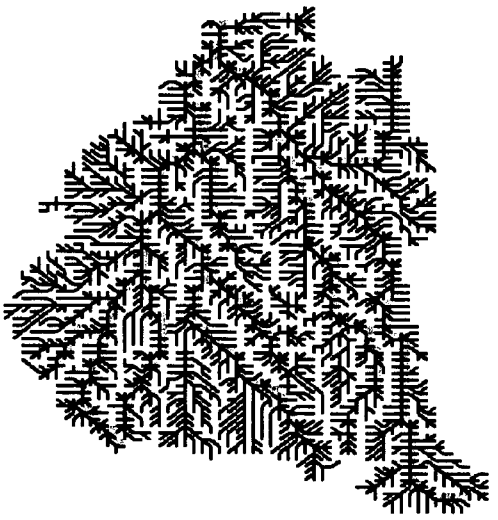
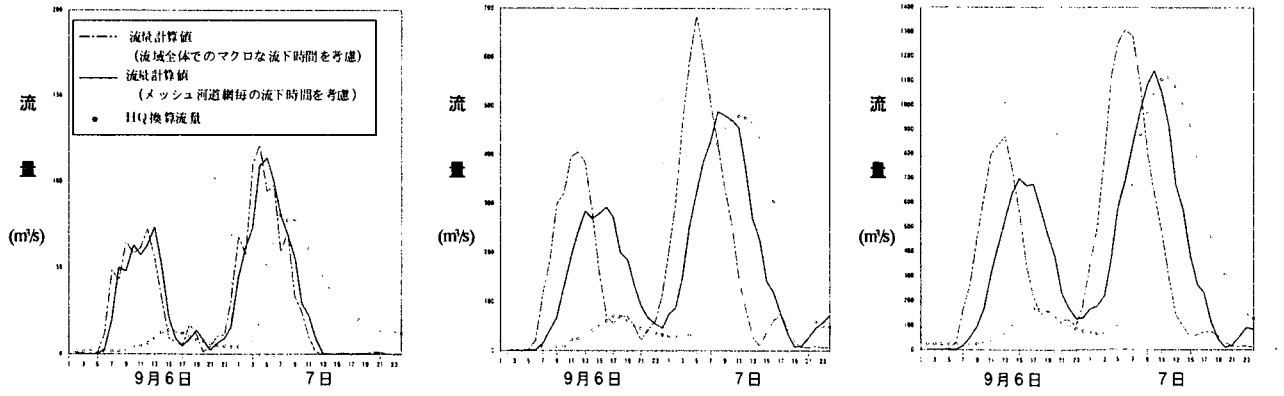


図１　遠賀川（日の出橋上流）河道網図
（500m メッシュ）
※白色部が流域。流域内灰色部が現実に河道が存在するメッシュであり、河道網と良く合致している。

4．主な研究成果物　なし



（a）遠賀川水系金辺川夏吉観測所（流域面積 52km^2）　（b）遠賀川水系彦山川中島観測所（流域面積 315km^2）　（c）遠賀川日の出橋観測所（流域面積 706km^2）

図２　「修正合理式＋河道網」による洪水流出波形算出結果（1997 年９月６～７日）
※各流域面積は、1/50,000 地形図からプラニメータにより測定した値。

（金木、深見、松浦直）

1.2　洪水氾濫被害の最小化のための氾濫源管理システムの研究開発

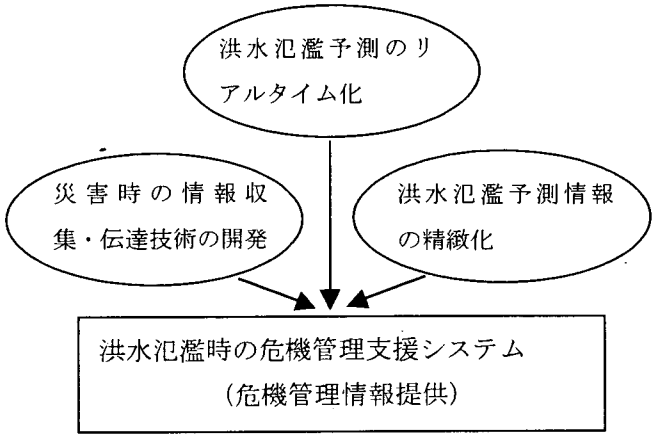
研究期間：平 11～平 14
担当：都市河川研究室

【要旨】

本研究では、リモセン等を用いた（特に氾濫）情報の収集・伝達技術、収集した情報に基づく洪水氾濫被害予測システムの開発を行うことを目的としている。11 年度は、氾濫発生時の危機管理利用を目的とした情報収集プラットフォームとして、人工衛星の利用可能性を検討した。現在利用可能な人工衛星に関する情報収集及び整理を行い、衛星による地上のデータ取得が可能な日時を調べて、データ取得頻度からみた利用可能性についてとりまとめた。

1．研究目的

水害ポテンシャルを有する洪水想定氾濫区域には、現在人口の約 5 割、資産の約 8 割が集積しており、一旦破提災害が発生すれば壊滅的な被害を被る可能性がある。一方、近年地方中核都市において中小河川の氾濫に伴って、都市機能を損なう水害も頻発している。



このような水害の発生に対して、危機管理的な観点から迅速な水防避難活動を行って人的被害を最小化するには、迅速かつ的確な情報の収集・伝達が必要不可欠であり、特に予測情報の伝達が重要となる。

本研究ではリモセン等を用いた（特に氾濫）情報の収集・伝達、収集した情報に基づく被害予測システムの開発及び予測情報の伝達に関する研究開発を行うことを目的とする。

2．研究方法

ここでは、氾濫発生時の危機管理への利用を目的とした情報収集プラットフォームとしての、人工衛星の利用可能性の検討について述べる。現在利用可能な人工衛星に関する情報収集・整理を行い、また、衛星による地上のデータ取得が可能な日時を調べて、利用可能性をまとめた。

3．研究結果（氾濫情報収集への衛星の利用可能性検討について）

氾濫発生時の氾濫状況（氾濫水の拡散区域）を把握するための情報収集プラットフォームとして、人工衛星の利用可能性を検討した。人工衛星による氾濫情報の取得には、①多くの洪水氾濫が降雨に伴って発生し、また、昼夜を問わず発生するため、悪天候や夜間でもデータ取得する必要がある点、②日本の洪水氾濫の場合は洪水継続時間が短いうえ、危機管理的な利用のためには観測頻度が高い必要がある点（衛星の回帰日数）、③危機管理的利用のためには、詳細な氾濫域情報が必要な点（解像度）などの制約があげられる。

現在供用されている人工衛星は、光学センサと合成開口レーダ（ＳＡＲ）に分けられる。既往の人工衛星を用いた洪水観測事例等を参考に、利用を考慮した場合の適用性は **表-1** のようになる。

また、衛星画像の危機管理利用を考えるうえでは、観測頻度及びデータ取得・解析の迅速性が求められる。利用可能性が高いと考えられるＳＡＲのなかで、観測頻度や波長の点から有利であると考えられる RADARSAT

表-1　データ特性からみた衛星の利用可能性

	光学センサ	合成開口レーダ（ＳＡＲ）
水域に対するデータ特性	可視光では、波長が短いほど水中の情報を多く含む（例えば、水域の濁度を見るには緑色が適している）。 近赤外は水による吸収が大きいため、黒く写ることで判別可能。	滑らかな水面から反射されるマイクロ波エネルギーはＳＡＲセンサの感知面を逃れる傾向を持つが、より粗度の高い陸域から多量のエネルギーが感知面に反射される。したがって、水面の後方散乱係数は小さくなる。
観測時刻・天候	地表面からの放射や反射を感知する受動センサなため、夜間や悪天候時には使用できない可能性がある。	マイクロ波合成開口レーダは雲を透過するため天候によらずデータ取得可。能動センサなため、昼夜によらずデータ取得可。
解像度	LANDSAT TM では、熱赤外 120m、それ以外 30m。 IKONOS ではパンクロマチックで 0.8～1m。	RADARSAT では 6.8～100m。
評価（洪水氾濫時の危機管理情報収集に関して）	マルチバンドの場合、氾濫水の特性も含めた詳しい検討が可能と考えられるが、観測時刻や天候による制約が大きいため、適用可能性は低い。	単バンドなため、解析可能な情報量は小さいが、昼夜・天候によらずデータ取得可能なため、利用可能性は比較的高い。

を対象として、1999 年 8 月の日本付近でのデータ取得頻度について調査した。RADARSAT は、回帰日数 24 日であるが、ポインティング機能を有しているため、データ取得可能頻度は比較的高い。また、分解能も比較的高い 7 つのモードを有している（Fine Beam Mode で分解能 10m、観測幅 50km、ScanSAR Wide Beam Mode で分解能 100m、観測幅 500km）。

観測地点として、札幌（北緯 43° 8′～9′、東経 141° 26′～27′）、久留米（北緯 33° 18′～19′、東経 130° 32′～33′）を想定し、1 回帰に当たる 24 日間（1999 年 8 月）のデータ取得可能時刻（事前にポインティングのリクエストをした場合）を示したのが**図-1** である。同図では、同期間での RADARSAT 以外の衛星（Landsat、SPOR-2、IRS-1C、IRS-1D）によるデータ取得可能日も示している。

札幌では、24 日間に解像度に関わらずデータ取得可能な回数は 21 回（平均で 1.1 日に 1 回）、久留米では 19 回（平均で 1.3 日に 1 回）である。

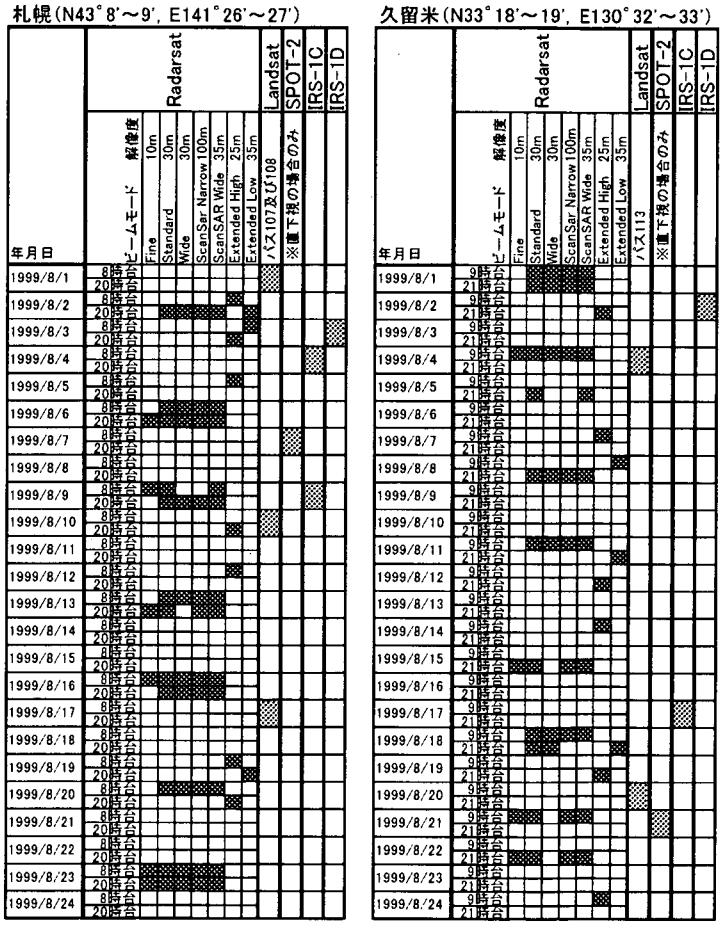


図-1　札幌と久留米における衛星によるデータ取得可能日
データ可能日（時）が塗りつぶされている。

現在のデータ入手体制では、観測開始の 30 時間前までに観測要求を出す必要があり、また、データ処理にも少なくとも数時間かかるため、洪水氾濫時の危機管理情報としての利用は困難である。ただし、今後の衛星打ち上げ、データ配布体制の充実が進めば、衛星の利用可能性も向上するものと考えられる。

（末次、舘、岡部、武富）

1.3　総合的な震災対策支援システムの研究開発

研究期間：平 11～平 14
担当：防災技術課

【要旨】

本研究は、国土管理の主要課題である所管施設の震災対策について、震前・震後の対策活動を支援する震災対策支援システムの検討を行うものである。システムの検討に際しては、情報通信技術や航空宇宙技術等の先端技術を活用する方法、及び、対策活動に即して要素技術に要求される機能・性能・精度等を明らかにすることに重点を置く。平成１１年度は、震災予防と危機管理に関する要素技術の現状調査、分散・共有型情報システムを構築するための技術の調査、及び、リモートセンシングデータに基づく被害検知技術の調査を実施した。

１．研究目的

円滑な国土管理を進めるためには、状況モニタリング、施設計画と構築、施設管理が適切に行われる必要がある。特に公共土木施設の地震防災対策に際しては、耐震補強等の震前対策により施設被害を最小化するための震災予防と、地震後に施設被害が発生した場合の迅速な対応により被害の拡大・影響を抑止する危機管理を適切に組み合わせる必要があり、国土管理に必要な諸活動が最もクリティカルな形で現れる。一方で、近年の情報通信技術や航空宇宙技術は、震災予防や危機管理に係る対策活動に適用することが可能と考えられる。このため本研究では、先端技術を活用した震災対策支援システムの考え方、及び、システムが備えるべき要素技術の要求機能・性能・精度等を調査検討し、震災対策組織が震災対策支援システムを整備・拡充する際に有効なガイドラインを提示する。

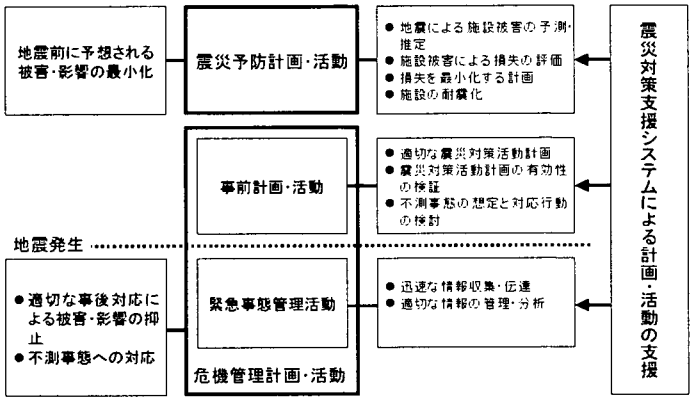


図１　震災予防と危機管理

２．研究方法

２．１　震災予防と危機管理に関する要素技術の調査

震災予防とは、震前に所管施設の耐震性を向上することで、地震発生時の損失を最小化するための計画・活動をいう。震災予防を円滑に進めるためには、１）地震及び地震による施設被害の推定、２）地震被害に起因する社会経済的損失の評価、３）損失を最小化するための震災予防計画の最適化、を行う必要がある。

一方、危機管理とは、地震により施設被害が発生した場合をあらかじめ想定し、施設被害の拡大や施設被害による影響を抑止するための計画と、地震発生後に行う活動をいう。危機管理を円滑に進めるためには、１）迅速な情報収集及び情報伝達、２）迅速な意思決定、３）混乱時における震災対策体制の管理、４）不測の事態に対する震災対策体制の有効性の事前評価、を行う必要がある。

これらの活動は、従来から人間あるいは情報通信機器等を活用して行われてきたところであるが、近年の情報通信技術や宇宙技術等の支援によって、これらの活動はより効率化することが可能と考えられる。そこで、震災予防と危機管理に関する諸活動を支援する震災対策支援システムの要素機能を実現するために現状

で活用可能な要素技術を調査する。

２．２　分散・共有型情報システムの構築に関する調査

震災予防計画の策定・実施にあたっては、施設管理情報のほか、地域の社会経済に関する情報等広範なデータが必要になる。また、危機管理活動においては、多数の機関との間で地震被害状況等に関する情報を効率的に交換する必要がある。このため、震災対策支援システムは様々な種類のデータを柔軟に利活用できる形で整備する必要がある。分散・共有型情報システムはその一つの形であり、このようなシステムを構築することによって、進歩が早い先端技術を柔軟に取り入れることが可能となり、システムの陳腐化や情報の重複整備を防ぐことも可能となる。そこで、分散共有型の震災対策支援システムに必要な情報通信技術の現状調査を行う。

２．３　リモートセンシングデータに基づく被害検知技術に関する調査

高解像度衛星の打ち上げ等により、広域にわたる正確データを取得することが可能となりつつあるが、これまでそれらのデータの一般利用は環境モニタリング等の分野に限られてきた。したがって、公共土木施設の観点から、リモートセンシングデータからの被害発見方法およびそのために要求されるデータの精度等を明示する必要がある。そこで、衛星画像のシミュレーション画像に基づいて、道路・河川堤防等の施設の震災や液状化等の変状を発見する技術を調査した。これらの技術には、ディジタルカラー画像データの目視、エッジ強調による直線性被害の強調、色調強調による地盤変状の強調などが含まれる。被害対象としては、地震による道路橋および道路路面の被害、護岸の被害、液状化等の地盤変状が含まれる。

３．研究結果

３．１　震災予防・危機管理に必要な要素技術

震災予防・危機管理に必要な要素技術としては様々なものが考えられるが、そのいくつかの例を図２～４に示す。図２は大規模な橋梁のような重要な箇所の地震被害を、被害発生直後に検知するためのセンサーである。また、広域にわたって分布する施設のすべてにセンサーを設置することが可能でない場合、オンライン型地震計のデータに基づいて地震発生直後に施設被害を概略推定する技術も有効である。一方、GIS 技術の活用により、震災予防計画の策定や危機管理活動の管理などをより効率的に行うことが可能となる(図３)。また、複数の情報通信技術を組み合わせ、現場の点検活動等をより効率的に行うサブシステムを構築することも可能である（図４)。

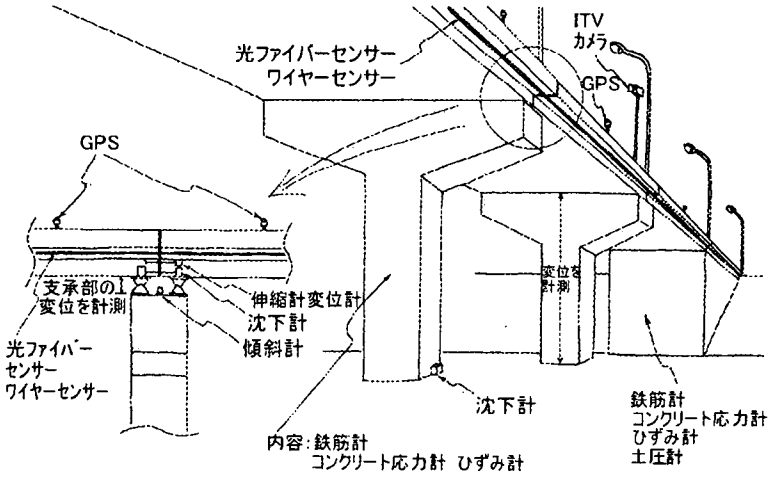


図２　道路橋の地震被害検知センサーの設置イメージ

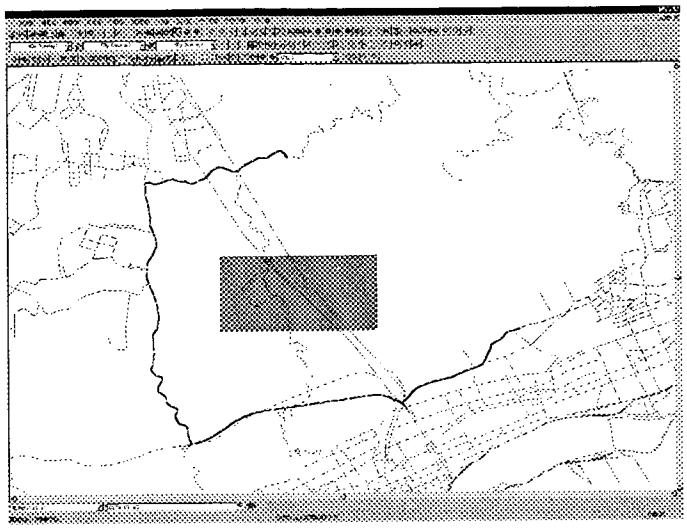


図３　GIS による迂回路探索の例

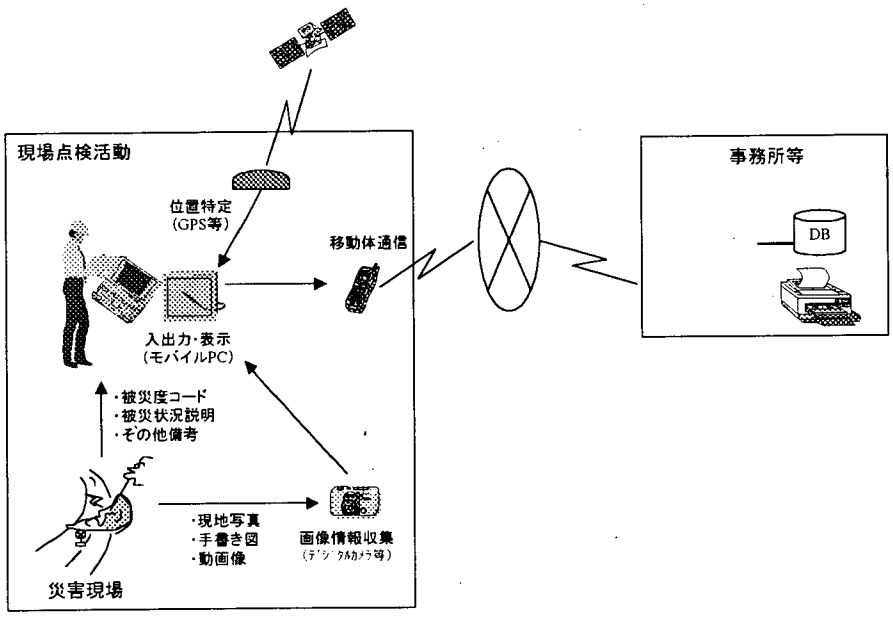


図４　モバイルコンピューティングによる地上点検サブシステムのイメージ

３．２　分散共有型情報システム構築の考え方と適用可能な技術

震災対策支援システムは、所管施設の被害情報や管理情報のみならず、地図データ、社会経済データなど様々な種類の情報を扱う。特に危機管理活動にあっては、組織間の異なる情報を交換し、効果的な震後対策を講じる必要がある。このため震災対策支援システムは、異なる組織に分散して存在する情報を互いに共有し、活用できる分散共有型のシステムである必要がある。さらに、分散共有型システムとして整備することにより、システムの要素機能に用いている技術が高度化された場合や新たな技術を利用する要素機能を付加する場合に、柔軟にシステムを拡張することが可能となる（図５）。このような分散共有型システムを構築するために利用可能な情報・通信技術は現時点でも急速に進歩しつづけており、これらの技術によって有効な震災対策支援システムを構築することが可能となる。この場合重要なこととして、震災対策活動に用いられ

る情報を、活動内容に沿って整理し、共有しやすい形で構造化し整理することがあげられる。たとえば、道路橋の地震被害については、道路橋を構成する属性を構造的に整理し、道路橋が存在する路線や被害を発生させた地震等のデータと相互参照させることにより、データの独立性と相互関係が維持される（図６）。

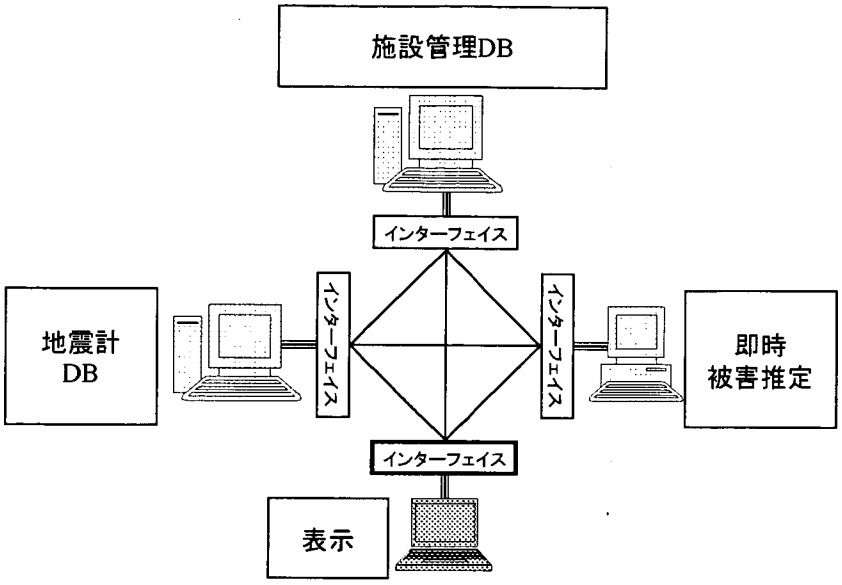


図５　情報伝送のインターフェイスを統一した分散共有型システム

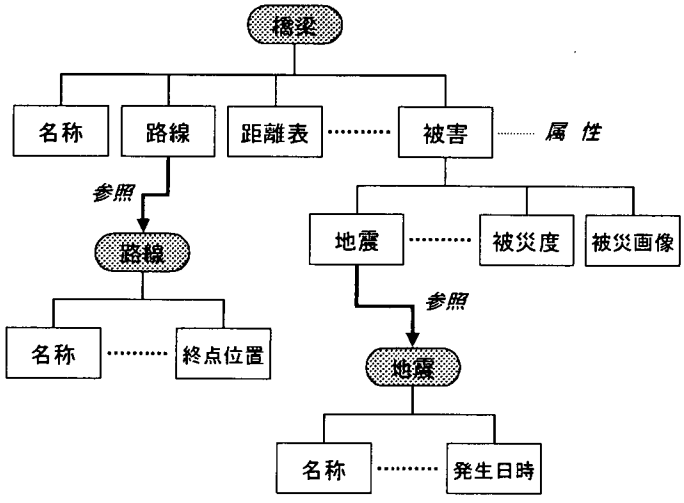


図６　情報の構造化

３．３　リモートセンシングデータに基づく被害検知

地上解像度１ｍのセンサー等を搭載するIKONOS衛星が１９９９年９月に打ち上げられたほか、合成開口レーダ(SAR)、レーザープロファイラ等、地上の状況を広範囲にわたって取得できるリモートセンシング技術の開発、利用が盛んになっている。これらの技術を用いて、広域に存在する公共土木施設の地震による被害を検知することができると考えられる。本研究では、地震等の災害によって被災した構造物や液状化等の変状のリモートセンシングシミュレーション画像データに基づき、被害の視認性、被害抽出技術等について調査した。

図７および８は、兵庫県南部地震による阪神高速道路５号湾岸線西宮港大橋の落橋被害および神戸港埠頭

の液状化および護岸被害のシミュレーション画像である。これらの写真における被害の目視による判読性を調査した結果、大規模な構造物被害は概ね地上解像度１～２ｍの間に判読の限度があることがわかった。

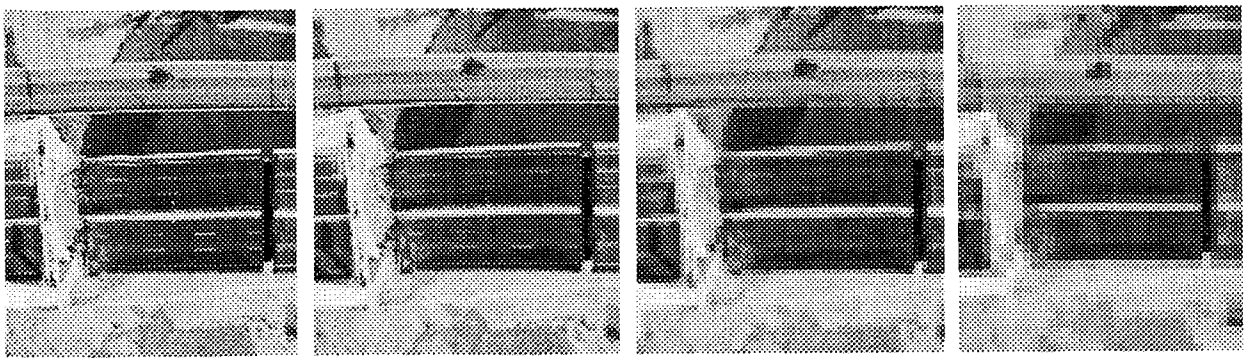


図７　カラー画像：大規模な落橋被害（左から地上解像度０．５ｍ、１ｍ、２ｍ、１０ｍ）

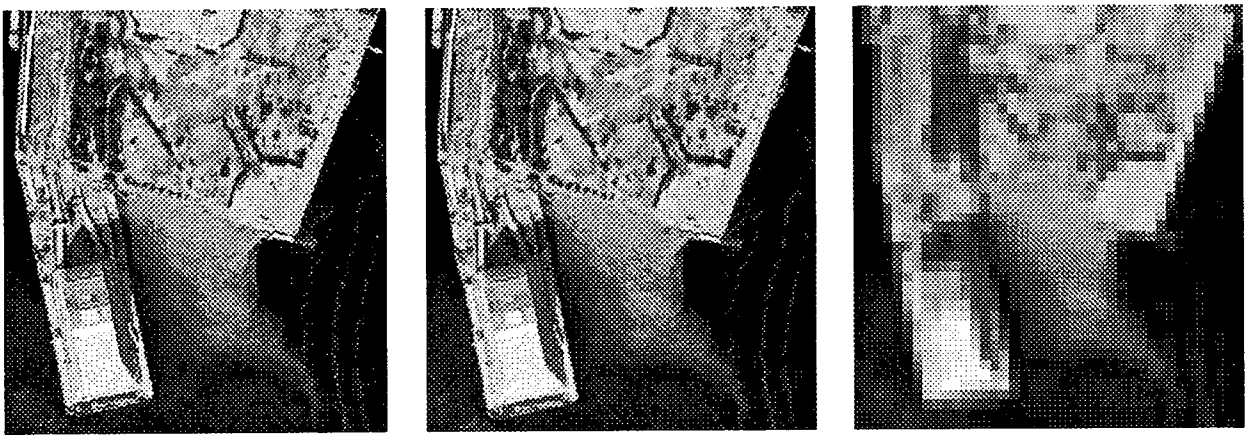


図８　カラー画像：液状化および護岸被害（左から地上解像度１ｍ、２ｍ、１０ｍ）

図９は図７のデータにエッジ強調処理を施したものである。この場合も目視判読と同じく、地上解像度１～２ｍ の間に大規模被害を判読できる限度があることがわかった。ただし、若干の桁のずれといった比較的規模が小さい被害を検出するためには、より高い解像度が必要となる。図１０は、図８のデータのうち液状化や土砂流出に対応する色調のセルを赤色で強調したものである。土砂災害、液状化等の変状の規模にもよるが、大規模な被害の場合は解像度 2m 以上でも変状が存在するエリアを発見可能である。

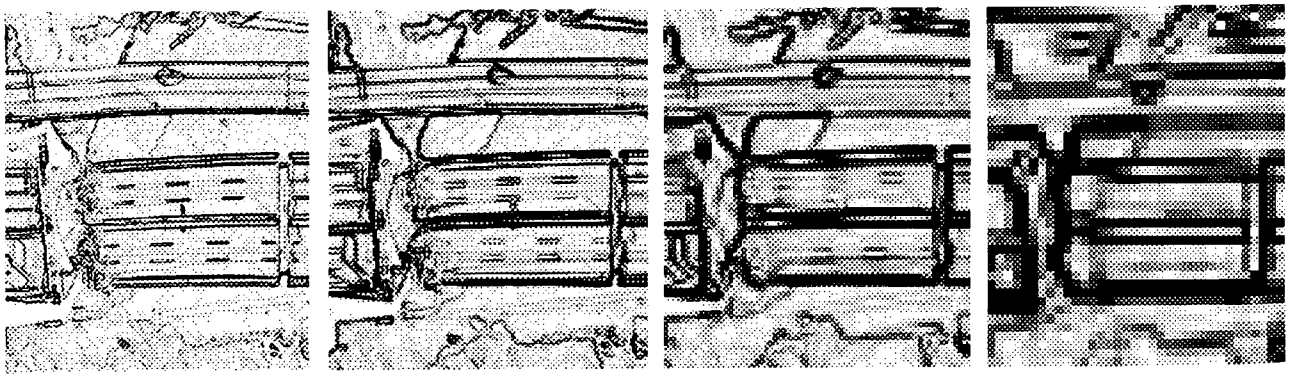


図９　エッジ強調画像：大規模な落橋被害（左から地上解像度０．５ｍ、１ｍ、２ｍ、１０ｍ）

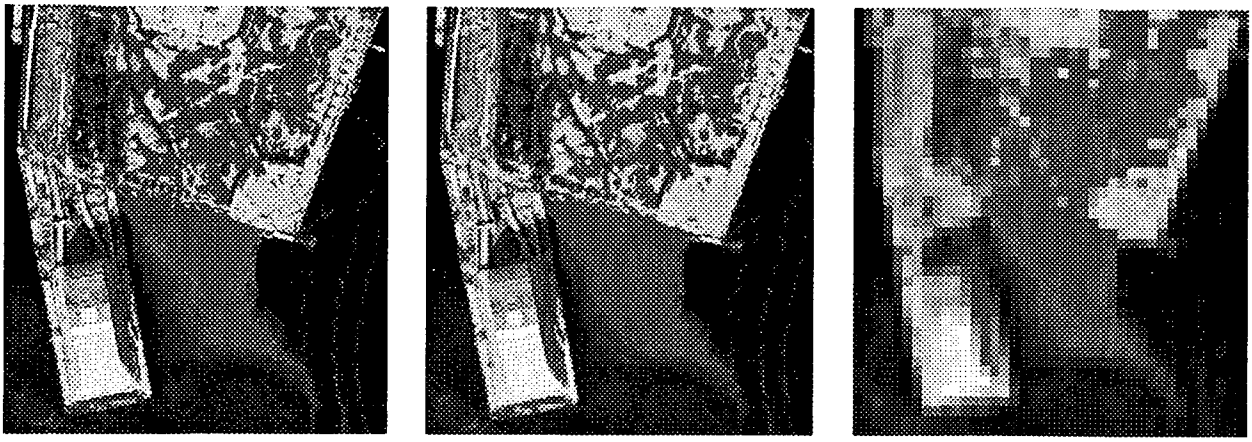


図１０　色調強調画像：液状化および護岸被害（左から地上解像度１m、２m、１０m）

４．主な研究成果物

特になし

（杉田秀樹、野崎智文）

1.4　震災対策体制の評価技術に関する研究

研究期間：平 11～平 14
担当：防 災 技 術 課

【要旨】

公共土木施設を管理する建設省工事事務所、地方公共団体において、地震発生時に所管施設等に関する被害・点検・復旧情報を迅速に収集し処理することは、震災対策にとって必須の事項である。本研究では、震災対策体制をネットワーク表現し、仮想の地震被害を発生させ、その情報収集をシミュレーションすることで、体制システム全体としての情報収集・処理・集約に関するパフォーマンスを定量的に評価することを目指している。そのため、防災計画に基づく震災対策体制の活動をシミュレートし、体制の参集方法、点検ルート、班構成等を変化させながら、迅速かつ的確に活動可能な体制計画を立てることができるツールを開発し、その結果によって、事務所等が行う震災対策体制の妥当性の評価を行うことを目的としている。平成 11 年度には、震災対策体制のネットワーク表現手法および活動時間の表現手法の研究を行った。

1．研究目的

本研究では、現在定量的な評価が難しい震災対策体制について、その体制をネットワーク表現し、仮想の地震被害を発生させることで、その体制の情報収集・処理・集約に関するパフォーマンスを定量的に評価する技術について研究している。その中で、建設省工事事務所等の震災対策活動において、大規模地震時に想定される危機的状況を具体化するとともに、体制整備、情報機器導入などソフト的な防災対策に関してもその投資効果を明示することができるようなツールを作成し、体制の定量的評価を行うことを目的としている。

2．研究方法

2．1　震災対策体制の表現方法の検討

震災対策体制の評価の視点は、初期に行われる緊急点検において、被災情報を早期にかつ効率的に収集できるかという点をである。そのため、評価を行うためには、「被災情報」が「時間経過」に伴いどのように収集されたかを明らかにする必要がある。そこで、震災情報収集体制を表現する方法として、「要員の参集」、「現場への移動」といった時間を要する個々の活動を「ゲート」として表現し、これらのゲートを接続したネットワークによって体制全体を表現することにした。そのため、「ゲート」には活動の処理時間の設定が必要であり、特に点検の「ゲート」には点検により得られる情報の設定も必要である。

2．2　活動時間の表現手法の検討

各ゲートで表される活動について、地震時には被災等により連絡や移動などに必要な処理時間が通常時とは大きく異なるため、その設定手法について検討した。

3．研究結果

3．1　震災対策体制の表現方法の検討

震災対策体制のネットワーク表現を検討するにあたり、図１に示す４つの点検ルートを３つの出張所で管理している事務所を仮定し、具体例として用いることにした。この事務所の震災時の活動をゲートを用いたネットワークで表現したものが図２である。図２では、地震発生後、地震計からの情報

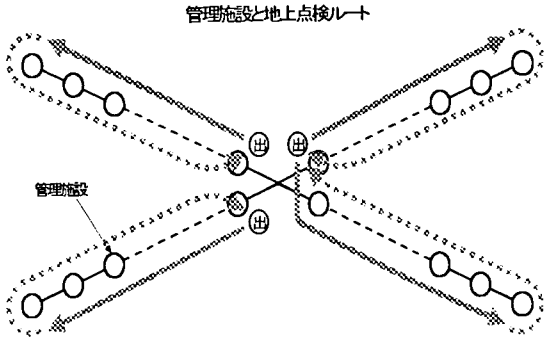


図１　モデル事務所の点検ルート

や体感、報道等により地震を感知した職員が参集し、準備を行い、施設の点検を行うことを表現している。また、点検後には、被災情報が本部に集約されている。

図２は、震災時の計画をそのまま表現したものであり、実際に起こりうる表１に示すような不測の事態は表現していない。そこで、例として移動経路の閉塞に対応したネットワーク表現手法を図３に示す。(a)は図２で示したネットワーク表現であり、つながりが１つのため、移動不能になる状況をシミュレートできない。(b)は移動経路が閉塞した場合に備えて、迂回路を移動するゲートを追加して、ネットワークを作成したものである。このネットワークは、本来の移動経路を利用できる場合には（確率 1-p）これを利用し、移動経路が閉塞した場合は（確率 p）迂回路を通ることを表現可能としている。

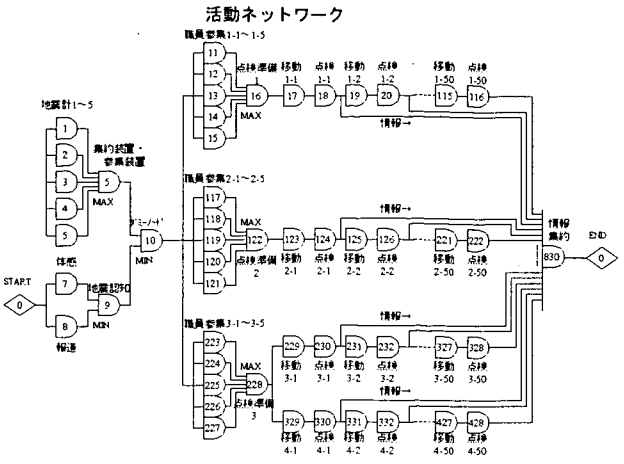


図２　震災対策体制ネットワーク

表１震災時に発生しうる不測の事態

ゲート	不測の事態
職員参集	要員の被災による参集不能
地上移動	移動経路の閉塞
情報集約	専用連絡施設の被災

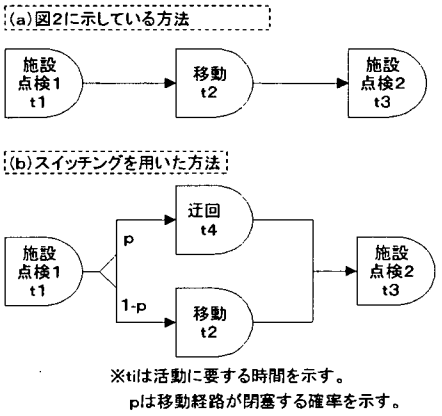


図３　分岐を考慮したネットワーク

３．２　活動時間の表現手法の検討

ゲートには、前述のように活動に必要な処理時間を設定する。各活動の処理時間の中で、特に移動の処理時間は、平常時においても一定の時間ではなく、ある程度のばらつきを持っている。地震時においては通行経路の被災や渋滞等で平常時以上の時間を必要とし、ばらつきも大きくなる。表２に、ネットワークに用いる処理時間を持つゲートとその処理時間設定法について検討した結果を示す。この活動の処理時間を設定するために、事例調査を行った。調査結果の１例を示すと、移動時間については、震災直後の神戸市内の走行所要時間についての調査結果が示されており、その分布は図４に示すとおりであった [1]。この調査では、震災時の移動時間は平常時に比べて平均で 6 倍程度の時間を要していた。これらの資料が時間設定の基礎資料となるが、同じような調査で中規模の地震である昭和 62 年の千葉県東方沖地震では、震災時の移動時間が平常時の 1.3 倍程度との結果もあり [2]、地震規模、発生場所等の違いを考慮する必要が明らかとなった。（大谷）

表２　ゲートの処理時間の設定法

ゲート	影響する事象	処理時間の設定法
参集装置	連絡手段の輻輳	連絡手段の不通確率pを設定し、それより遅延時間を設定する。
職員参集	通勤路の被災、渋滞等	平常時の通勤時間に、被災事例から求めた増加係数とばらつきを適用し、関数を設定する。
点検準備	なし	平常時の点検準備時間を設定を用いる。
地上移動	点検路の被災、渋滞等	平常時の移動時間に、被災事例から求めた増加係数とばらつきを適用し、関数を設定する。
地上点検	被災箇所の詳細点検による時間増	被災度に応じた点検時間の増加係数とばらつきを調査より求め、適用する。
情報集約	連絡手段の輻輳	報告手段の不通確率pを設定し、それより遅延時間を設定する。

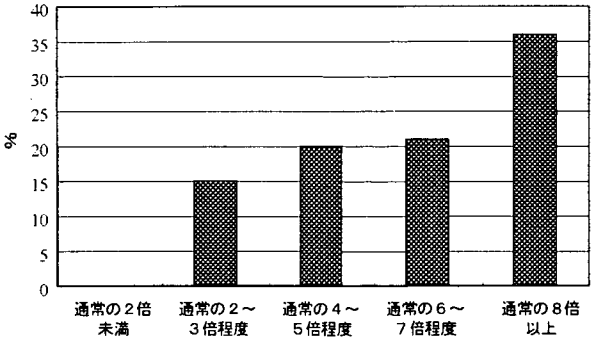


図４　神戸市における震災時の走行所要時間

参考文献：1)阪神・淡路大震災兵庫県災害対策本部、「阪神・淡路大震災－兵庫県の１ヶ月の記録」1995.7
2)土木研究所、「地震時の被災調査及び情報連絡体制-昭和 62 年千葉県東方沖地震の場合-」、土木研究所資料第 3587 号.1998.6

1.5　生態情報の統合化及び活用に関する研究

研究期間：平11～平14年
担当：緑化生態研究室

【要旨】

本研究は環境アセスメントの効率化のため、既存自然情報やリモセン技術等により把握した地域の自然概況をGISデータベースとして整備し、アセスの各段階で必要な情報を提供するシステムの開発を目的としている。１１年度は、栃木県宇都宮市周辺をモデル地域として、植生・地形・土地利用・気候等の環境情報をGISデータとして整備した。また、アセスの動植物・生態系に関する手続きを整理し、必要な情報の種類や処理手順の概略について検討した。

１．研究目的

環境アセスメントを効率的に実施するためには、法令で定められた地域の指定状況に関する情報や植生、動物の分布などの環境情報を一元的に管理・活用することが必要である。しかしながら、現在このようなシステムが存在しないため、公共事業などの各現場において広域かつ基礎的な調査を行うことを余儀なくされており、調査期間の長期化や調査コストの増大といった問題を生じている。本研究では、自然基礎情報（生物の生息や環境に関する情報、自然関係地域指定情報等）を、リモートセンシング技術及びＧＩＳ（地理情報システム）を活用して一元的に提供するシステムの開発を目的としている。

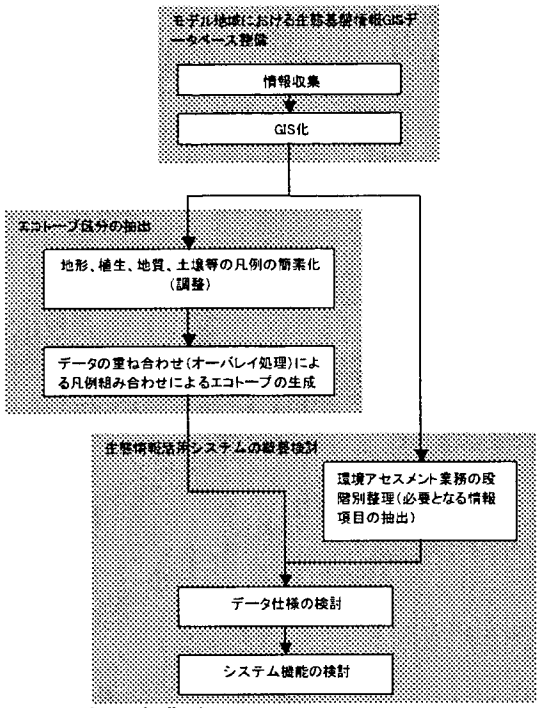


図1 本年度業務のフロー

２．研究方法

２．１ モデル地域の生態情報GISデータ整備

本研究を進めるためのモデル調査地として、栃木県宇都宮市から東部に広がる東西約29km、南北約11kmの地域（面積約320k㎡）を選定した（図２）。この地域内の自然環境に関わる各種情報（表１）を収集し、GISデータベースを整備した。このうち地形に関するデータは国土庁土地分類基本調査の地形分類図（5万分の1）から手入力によってデータを整備した。また、植生に関しては環境庁自然環境GISの植生図（5万分の1）を基に、空中写真判読と現地踏査をもとに改変部分を修正してＧＩＳデータとした。

２．２　生態情報活用システムの検討

環境アセスメント（動植物・生態系分野）の段階毎に必要な情報を整理し、そのために必要な自然環境に関わるデータの種類や要件、データ処理の流れなど、アセスメント支援のための生態情報活用システムの仕様概要の検討を行った。

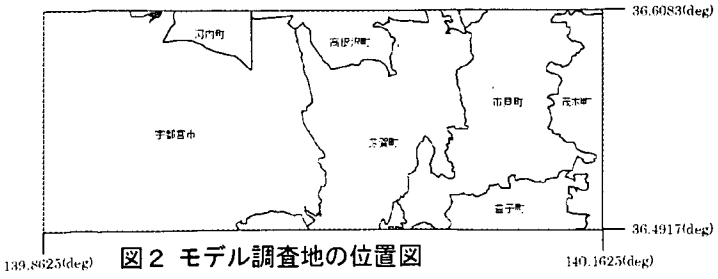


図２ モデル調査地の位置図

表1 モデル地区において整備したGISデータ

	項目	情報源	備考
生物生息基盤	標高	数値地図50mメッシュ（標高）	標高値から計算
	傾斜		
	斜面方位		
	河川	国土数値情報W02－52L	
	地形	土地分類基本調査（紙図面）	データ入力は図面のディジタイジング作業による。
	地質		
	土壌		
生物分布	現存植生	環境庁自然環境GIS	
	特定植物群落		
施設	道路	全国デジタル道路地図データベース	
	鉄道	国土数値情報N02－07L	
地域指定	自然環境保全地域	環境庁自然環境GIS	（領域内になし）
	鳥獣保護区		
	世界遺産		
その他	行政界	数値地図25000（行政界・海岸線）	場所により1／2分割メッシュとする。
	人口	国勢調査地域メッシュ統計	
	土地利用	細密数値情報L03－03N	
	気候値メッシュ	国土数値情報G02－62M	降水量・気温・積雪

３．研究結果

３．１　モデル地区の生態情報GISデータベース整備

本研究で整備したデータは、生態情報活用システムで取り扱うために、取得したデータに対し必要な修正・変換を施し、カバレッジ及びシェープファイル形式（米ESRI社Arc/Info及びArcViewの標準データ形式）で１項目１レイヤーのGISデータベースとして整備した。なお、いずれのデータも緯度経度座標系により整備した。

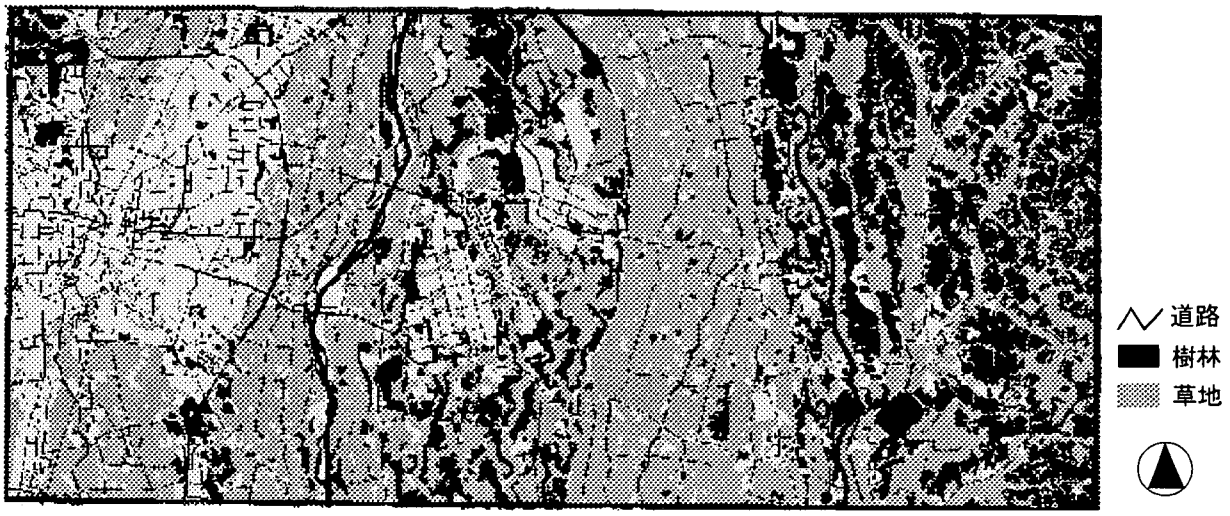


図３ モデル調査地で整備したGISデータの例

整備したＧＩＳデータベースの例として、植生図（凡例を簡略化して、各種樹林と草地に分けたもの）に、道路（ベクトルデータ）を重ねたものを図３に示す。

３．２　生態情報活用システムの検討

まず、環境影響評価法に基づく環境アセスメント（以降、「法アセス」と称する）の手続きにおいて、GISによる情報の活用範囲を検討した。法アセスの作業とそこで取り扱われる情報を簡単にまとめたのが、図４である。図４の各ステップのうち、既存資料収集、現地情報収集作業によってデータを収集し、蓄積していくのは主に「準備書作成」までの段階である。そこで、図４の各ステップごとに、必要とされる情報の種類およびステップの実施目的を整理したのが次ページの表２である。

法アセスでは、第二種事業に関する判定（スクリーニング）を地域特性及

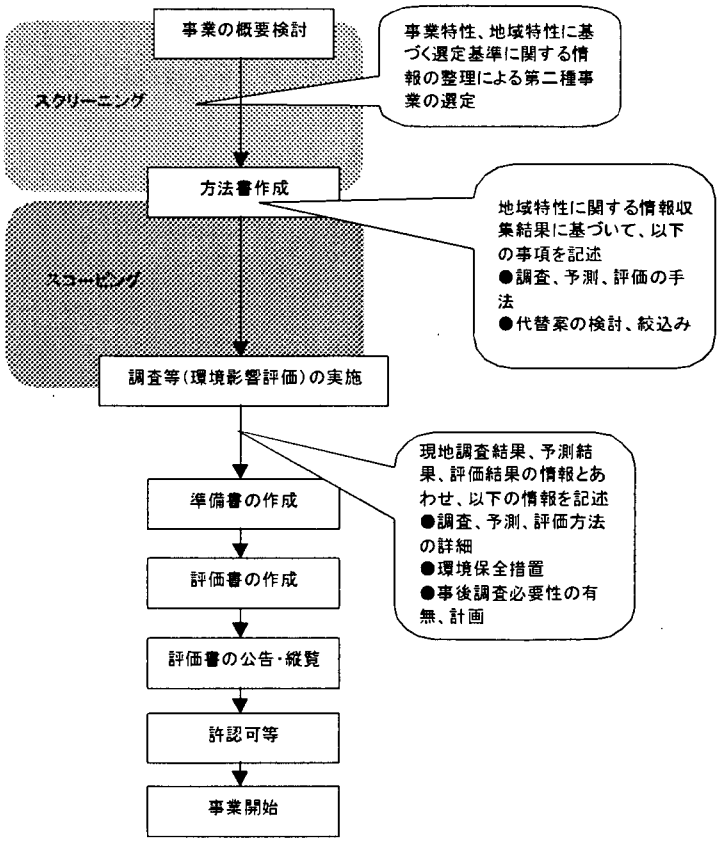


図４ 法アセスの作業フローと各段階での情報の取り扱い

表２　法アセスの各段階で必要となる情報の概要

	必要とする情報	情報の区分	目的
スクリーニング	地域特性による判定基準に関する情報	既存資料	・第１種事業の選定
	事業特性による判定基準に関する情報	〃	
方法書作成	地域特性に関する情報	既存資料 現地観査 ヒアリング	・代替案の検討、絞込み ・調査、予測、評価手法の選定（環境影響評価実施方法の決定）
準備書作成	現況調査による情報	現地収集	・評価 ・事後調査計画策定
	関係者意見	〃	
	予測・評価結果に関する情報	作業成果	
	事後調査結果に関する情報		

表３　地域特性把握段階で必要となる生態関連情報

区分	項　目
動物	主な動物の生息の状況
	学術上または貴重性の観点からの動物の重要な種および注目すべき生息地の概況
植物	主な植物の生育の状況
	学術上または貴重性の観点からの動物の重要な種および注目すべき生育地の概況
	植生の状況
生態系	地域を特徴付ける生態系および注目種等の状況

表４　調査段階で必要となる生態関連情報

区分	項　目
動物	重要な種および注目すべき生息地
植物	重要な種および重要な群落
生態系	地域を特徴づける生態系

び事業特性に基づいて行う事とされている。この内地域特性情報は、地域概況調査における資料収集に加え、現地での概略調査、有識者へのヒアリング等を経て、方法書に記述しなければならないとされている。

この地域特性情報に基づいて、代替案の検討（道路事業ならば複数ルートの検討）、さらに方法書に記述する調査・予測・評価手法の検討も行われることになる。このために収集すべき情報項目から、自然環境情報すなわち動植物についての情報に着目すると、建設省令では「生息または生育、生態系の状況」という事項として、表３に示す項目が挙げられている。また、表３の実際の調査段階における標準調査項目では、生態情報として表４に示す項目を調査すべきとしている。

これらの情報を、GISを用いたアプリケーションシステムで利用することを前提として、必要と

表５　生態関連情報の種類とGISで取り扱うためのデータ要件

	データ項目	GIS上での表現		データの属性
			データ形式	保有すべき属性
動物	動物相	種の分布	点で表現	種名
	重要な種等の生態	重要な種の生息領域	面で表現	生息する種の名称
	重要な種等の確認位置	種の分布	点で表現	種名
	重要な種等の生息状況	種の行動範囲	面で表現	種名、行動内容
	重要な種等の生息環境の状況	微地形	点、メッシュで表現	標高値、傾斜度、傾斜方向
		水系	面で表現	流域面積、水系名称
		植物群落	面で表現	群落名
植物	植物相	植物群落	面で表現	群落名
	重要な種・群落の生態	植物群落	面で表現	群落名、群落の特性
	重要な種・群落の分布	種の確認地点	点で表現	種名
		植物群落	面で表現	群落名
	重要な種・群落の生育状況	植物群落	面で表現	群落構成種の生育状態
	重要な種・群落の生育環境の状況	微地形	点、メッシュで表現	標高値、傾斜度、傾斜方向
		水系	面で表現	流域面積、水系名称
		植物群落	面で表現	群落名
生態系	注目種・群集の生態	注目種の生息領域	面で表現	生息する種の名称
		植物群落	面で表現	群落名、群落の特性
	注目種・群集とその他の動植物の食物連鎖上の関係および共生の関係	注目種の生息領域	面で表現	・当該種の食物連鎖上の上位種名 ・当該種の食物連鎖上の下位種名 ・当該種と共生関係にある種
		植物群落	面で表現	群落を構成する種を餌とする動物の種名 共生関係にある動物の種名
	注目種・群集の分布	注目種の確認地点	点で表現	種名
		植物群落	面で表現	群落名
	注目種・群集の生息・生育の状況	注目種の行動範囲	面で表現	種名、行動内容
		植物群落	面で表現	群落構成種の生育状態
	注目種・群集の生息環境または生育環境	微地形	点、メッシュで表現	標高値、傾斜度、傾斜方向
		水系	面で表現	流域面積、水系名称

なると考えられるデータの種類及び要件（仕様）をとりまとめたのが前ページの表５である。具体的には、GIS上で各種情報を取り扱えるように、それぞれの情報を電子地図上で表現するための図形（点、線、面のいずれか）、さらに属性としてどうような内容の情報を付加しておくか、といった観点でまとめたものである。

本研究で検討している、アセスメント支援システムは、これらのデータをまとめたGISデータベースを活用して、予測・評価に活用しようとするものである。このシステムの、データベースを中心とする活用イメージをまとめたのが図５である。また、同システムに求められる基本的なデータ図示機能を、動植物・生態系に関する部分についてまとめたのが表６である。

国土管理の基盤となるべき情報インフラとして、今後整備されることになる各種の環境ＧＩＳ情報を活用し、それらに事業ごとに必要となる情報を加えて一元的に整備・活用することで、環境アセスメントを効率よく実施することができるようになると考えられる。また、各事業で蓄積された自然情報を集約・整理することで、広域の生物分布把握や自然情報の一般への提供など、二次的な活用も行えるようになると期待される。

（藤原宣夫、
木部直美、
百瀬　浩）

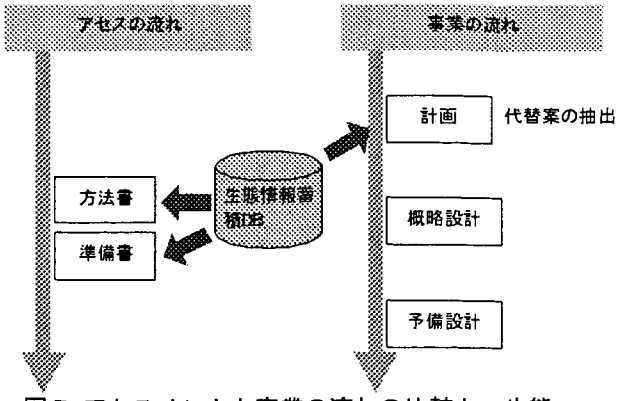


図５ アセスメントと事業の流れの比較と、生態情報蓄積DB（データベース）の活用イメージ

表６　予測項目に対応したシステムの具体的機能

		用いるデータ（レイヤ）	システムが自動生成するデータ（レイヤ）	システムが自動生成する属性データ
動物	生息地が消失・縮小する区間の予測	・種の分布（点） ・種の生息領域（面） ・対象事業の構造物の位置（面）	・構造物内となる領域に存在する種の分布点（点） ・構造物と生息領域のラップ部分（面）	・種の分布点のうち、構造物内となる点の数、種名リスト ・種の生息領域のうち、構造物内となる領域の種名および面積
	重要な種等の移動経路が分断される区間の予測	・種の行動範囲（面） ・対象事業の構造物の位置（面）	・構造物と行動範囲とのラップ部分（面）	・ラップ部分の規模により、移動障害の可能性を推定
植物	生育地が消失・縮小する区間の予測	・種の確認地点（点） ・植物群落（面） ・対象事業の構造物の位置（面）	・構造物内となる領域に存在する種の分布点（点） ・構造物と既存群落のラップ部分（面）	・種の確認地点のうち、構造物内となる点の数、種名リスト ・植物群落のうち、構造物内となる領域の群落名および面積
	改変面積	・植物群落（面） ・対象事業の構造物の位置（面）	・構造物と既存群落のラップ部分（面）	・事業によって喪失される群落の種名、面積と、消失割合
生態系	生息・生育基盤が消失・縮小する区間	・種の分布（点） ・種の生息領域（面） ・植物群落（面） ・微地形（メッシュ） ・水系（面） ・土壌水分（メッシュ） ・対象事業の構造物の位置（面）	・生息、生育基盤領域（エコトープ）（面） ・構造物と生息・生育基盤領域のラップ部分（面）	・生息、生育基盤領域を、植物群落、生息領域等の一次情報から自動生成し、これを対象事業の構造物の面データと重ね合わせてラップする部分を抽出する。 ・ラップした部分の生息、生育基盤領域とその面積、焼失割合
	注目種・群集の移動経路が分断される区間	・種の行動範囲（面） ・対象事業の構造物の位置（面）	・構造物と行動範囲とのラップ部分（面）	・ラップ部分の規模により、移動障害の可能性を推定

1.6　ＧＩＳを利用した統合情報基盤の開発

研究期間：平 11～14

担当：施工研究室

【要旨】

地図、社会資本の整備状況、土地利用状況、環境や生態系、地形や地質などの国土管理情報は地球上の位置と関連していることから、国土管理情報を表現、蓄積・管理するための情報基盤として、GIS をベースとした情報基盤が有効であると考えられる。国土管理に CALS 的な考え方を導入すると、電子化された情報は必要な場所で、必要な時に、必要とする人が利用できること、また特定のアプリケーションに依存しない標準的なデータ形式であることが求められる。このため、国土管理情報全般のシステムの整合性を図るための、分散環境下における国土管理情報の共有化・統合化、さらには国土管理の GIS 空間情報の標準化が必要である。本研究では、GIS を基盤とした国土管理情報システムを活用し、ネットワーク上で国土管理に関わる各種情報を統合化するための仕組みや、情報の標準化に関する検討を行うものである。

１．研究目的

本研究では、以下の成果を得ることを目標としている。

①GIS を基盤とした国土管理情報システムの基本構想、全体像、運用方法の提案

②利用、運用面を考慮したメタデータの標準化方法の提案

③国土管理情報のデータモデル（データ項目等）の標準化方針と標準作成手法の提案

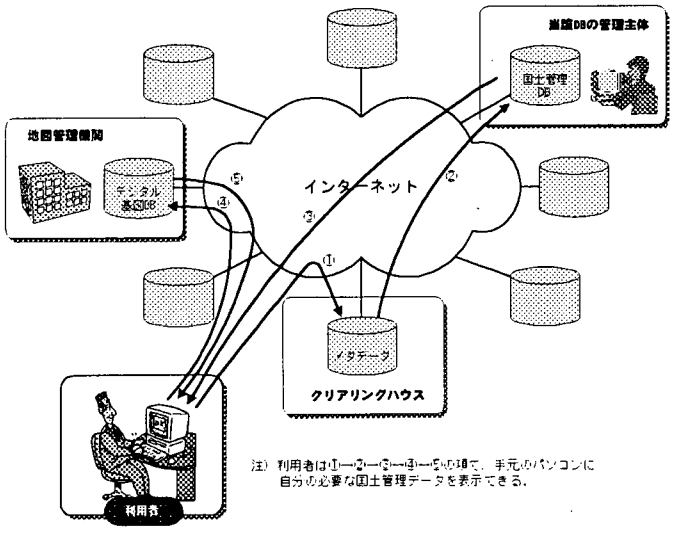
２．研究方法

本研究は、GIS 空間情報の特徴や標準化動向の調査を行うとともに、CALS における情報の共有化・統合化に関するこれまでの検討を踏まえて、GIS のプラットフォームにおける国土管理情報の統合化・共有化について検討した。

３．研究結果

３．１　検討のあり方国土管理情報基盤の概念

国土管理を実現するための情報化の課題として、「国土情報化新時代」（国土情報化研究会）では、観測網、ネットワーク、情報拠点のハードを整備するとともに、国土管理情報を共有、相互流通するための情報基盤を整備し、国民との情報交流を促進することが必要であることを述べている。CALS の考え方を導入すると、その情報基盤としては図－１に示すような分散環境下の国土管理情報を情報ネットワークで結び、情報の検索や入手などが自由にできるシステムが考えられる。また、国土管理に関する情報は、そのほとんどが地球上の位置と関係していることから、国土管理情報を表現し、蓄積・管理するための情報基盤として、GIS をベースとした情報基盤が有効である。このため、国土管理情報基盤は図－２に示すような GIS のプラットフォーム上に国土管理情報が統合化されて管理、蓄積されたものが概念として考えられる。国土管理情報基盤の構成要素はまだ確立さ



図－１分散環境下にある国土管理情報の利用イメージ

れておらず、「国土管理情報基盤WG」（主査：柴崎亮介東京大学教授）において検討頂いているところであるが、当研究室では以下の６つの要素を提案している。

①基盤的空間データ（基盤地図データ、国土管理のための基本台帳や基本的な統計情報、基本画像データ（航空写真、衛星画像等）、道路、河川、都市、環境、防災などの分野別基盤情報などで、情報項目の定義、品質等が設定されたもの）

②交換モデル（情報の交換方法に関する交換モジュール構成、データ構成、記述方法など）

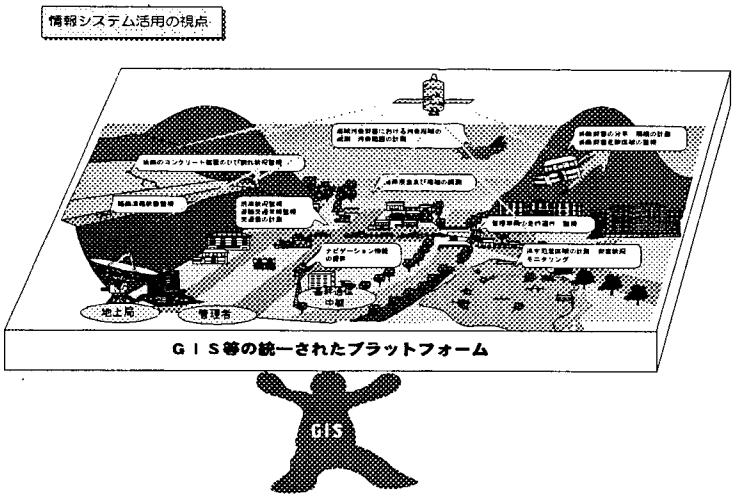
③メタデータ（基盤的空間データの整備主体、整備項目、整備区域、精度、入手方法などに関する参照情報）

④運用ガイド（基盤的空間データの保守・利用・メンテ等の標準的手順、方法を定めたガイド）

⑤データ開発モデル（基盤的空間データの作成及び追加、標準類への登録のやり方を定めた方法論）

⑥統合利用システム（統合利用のための各種DBのインターフェイスやクリアリングハウスなど）

このうち①は、位置データと基本属性データで構成されるGIS空間情報であるが、その要件としては国土管理を推進していく上で特に重要で、各分野において共通利用頻度が高く、品質が確保されメンテナンスが確実に実施される情報で、各整備主体から様々な電子媒体やネットワークを通じて利用者に提供されるものである。



図－２　ＧＩＳ上で国土管理情報が統合されるイメージ

３．２　国土管理情報基盤の標準化の方針

国土管理情報基盤の標準化方針についても先の「国土管理情報基盤WG」において検討頂いているところであるが、当研究室では以下の提案を行っている。基盤的空間データは、GISを利用することから技術的には国内外の地理情報標準に準拠していくことが必要である。ただし、国土管理に関わる情報項目、定義、属性、コードなどは、地理情報標準に準拠しつつ国土管理の視点での具体的な標準を定めて行かなければならない。また、基盤的空間データの標準化を行う上で、標準化の対象範囲と標準化レベルを考慮しなければならない。対象範囲については、個別の国土管理業務まで対象を拡大し、その全体情報を標準化することは多大な時間と費用がかかることから困難と判断される。このために、国土管理業務の対象を明確化せず、各分野で共通に利用でき、利用頻度の高いと思われる情報を当面の標準化対象とすることを方針としたい。

次に、データモデル構築手法については、一般的なSTEPの標準化では現行の業務プロセスをベースとして将来業務モデルとその中でのデータ項目の洗い出しによるデータモデルの構築手法がとられるが、国土管理では対象とする業務が広範であることから、分野毎の適用システム、データ等を類型化することにより共通するデータ項目に着目して進めることにし、一般的なSTEPの構築手法によるデータモデル化は補助的な位置づけとして最小限の範囲で行うことを方針としたい。さらに、標準化されていない国土管理情報であってもこれを入手し、利用していくことは当面は有効であるために、分散環境下にある国土管理情報の所在や内容等を効率よく検索するためのメタデータについて、ユーザーの利用性を考慮した作成標準を整備することが早急に必要であると考えられる。

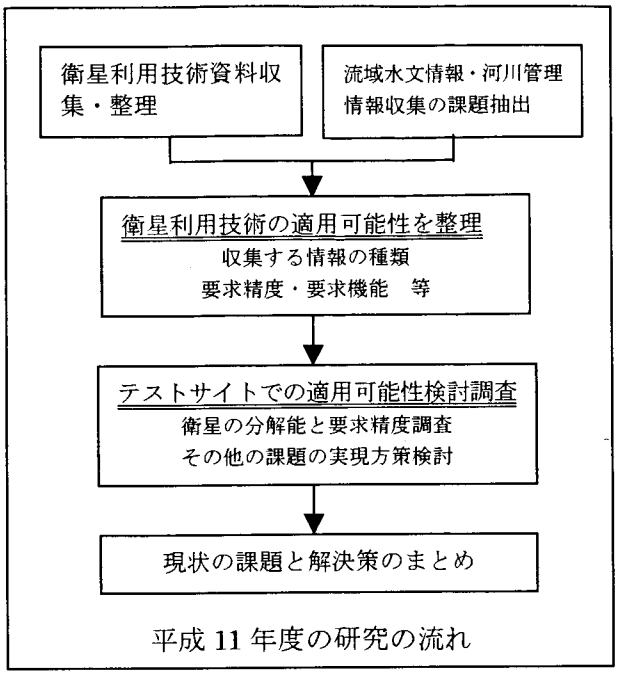
（大下、青山、光橋）

1.7　人工衛星利用技術を活用した流域水文情報収集技術に関する研究開発

研究期間:平１１～平１３
担当：水文研究室

【要旨】

本研究は、国土マネジメントにおいて重要な、流域全体を対象とした効率的・効果的及び迅速な流域水文情報や河川管理情報の収集技術開発を目的として、人工衛星利用技術の有効活用に関する検討を行うものである。平成11年度は、流域水循環現象の監視及び河川管理情報の把握において現状での課題の抽出及び、文献収集等を通した航空宇宙技術の技術現況調査から、衛星利用技術の現状での適用可能性を整理した。また、テストサイトでの衛星及び航空機によるリモートセンシング情報と河川管理情報（土地被覆、地形・被覆の高さ）との関連に関する現地予備調査を行った。その結果、衛星利用技術の河川管理への適用性についての課題と、解決策をとりまとめ、平成12年度以降の研究の基礎的な資料を作成した。



平成11年度の研究の流れ

１．研究目的

本研究は、流域水文情報や災害対応を含めた河川管理に必要となる情報を把握する技術の研究開発を行うことを目的とするものである。平成11年度は、文献収集・整理やテストサイトでの予備調査を通じて、河川流域内での水循環や河川管理レベルの現況を監視するために必要となる航空宇宙技術の要求水準を明らかにすることを目的に研究を行った。

２．研究方法

２．１　リモートセンシングの現状と水文関連情報への適用可能性

リモートセンシングは現在、超高分解能やレーダ技術など新たな性能を持ったデータの普及により、取得できるデータの精度や利用技術が急速に変わりつつある。そこで、衛星リモートセンシング及びその他の先端情報収集技術の現状を、文献及び資料に基づいてとりまとめた。一方、多岐の分野にわたる水文関連情報は、グループ分けしてそれぞれの項目についての要求精度を整理した。水文情報分野の区分は、平常時と災害時に大別し、平常時は河川管理と河川調査に細分した。衛星リモートセンシングやその他の先端情報収集技術の現状と水文関連情報の要求精度とを踏まえて、水文関連情報への適用可能性を検討した。

２．２　テストサイトでの予備調査

ここでは荒川下流区間を対象として、水文関連情報の要求精度に対して、現在利用できるデータの精度・性能の予備調査を行った。予備調査では、高分解能衛星データを用いた河川水辺の国勢調査（植生）の地物判別を想定し、２種類の縮尺の航空写真との比較及び現地調査によって判別可能性を検証した。また、高さ情報を取得するための先端技術のうち、航空機搭載のレーザー測距機器（レーザープロファイラ）による現地計測を行い、現状での精度の限界と今後の課題をとりまとめた。

３．研究結果

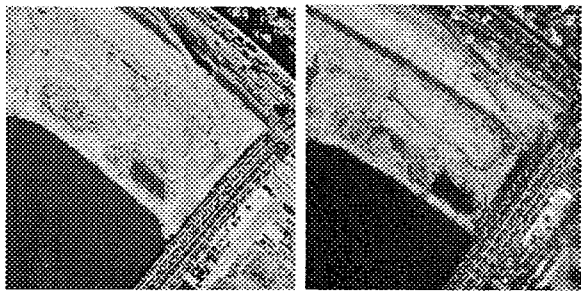
３．１　衛星リモートセンシングの現状と水文関連情報への適用可能性

衛星リモートセンシングの現状調査は、現行の衛星データの精度等の整理とともに、衛星データ利用技術の現状についても、文献に基づいてとりまとめた。利用可能性を検討した衛星データは、LANDSAT/TM、SPOT/HRV、IRS/PAN、ERS/AMI、RADARSAT/SAR、IKONOS 等、現在データを観測しているものとした。分解能が 10m～30m の LANDSAT、SPOT では流域単位での土地被覆状況調査に利用可能性が限られるが、10m 以下の分解能を持つ IRS や IKONOS では河川空間の利用実態や河川敷の不法占拠、不法係留船の監視などへの利用の可能性もあると考えられる。これらの現状を踏まえた上で、河川情報収集に衛星データを実利用するための課題として、空間分解能、取得頻度の向上、データ取得時刻、データの迅速な配信、データ利用のコスト等が挙げられた。

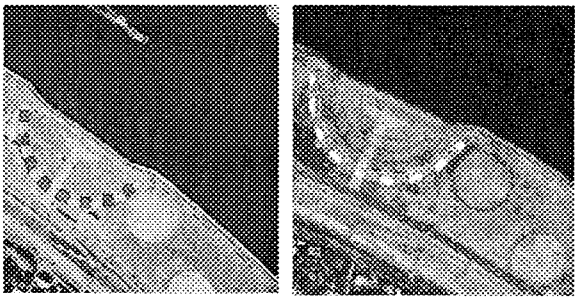
３．２　水文関連情報への適用と可能性

ここでは荒川下流区間をテストサイトとして、リモートセンシングで効果的に情報収集ができると考えられる項目について、現地事前調査を行った。調査の項目は、超高分解能衛星（IKONOS）の河川敷土地利用判別精度の検証と、航空機搭載レーザープロファイラによる河川敷の高さ情報の検証とした。

河川敷の土地利用判別は、IKONOS の１ｍ分解能のマルチデータ（リアルカラー合成画像）と、航空写真の分解能を 0.5m、0.25mにしたシミュレーション画像の３種類を用い、図－１に示すような比較を行った。比較した項目は、表－１に示したとおりである。IKONOS のリアルカラー合成画像の判別結果は、「利用可能」又は「概ね可能」の項目が多く、利用可能性は高いといえる。しかしながら、２種類の解像度の航空写真に比べると細部のテクスチャを見分けることは困難であり、利用目的によってはその使用方法を考慮する必要がある。IKONOS データでは、近赤外バンドを合成することによって植生を強調して表現できることから、新たな観点からの植生情報の把握も期待される。バンドの合成、画像強調については、さらに検討が必要と考えられる。レーザープロファイラは、垂直方向の精度 10 数 cm～30 数 cm の機材を用いて河川敷の計測を行い、DEM を作成した。地上測量による測定値と比較した結果、植生がある箇所では、レーザープロファイラによる計測値の方が実測値より 30～60cm 程度高い値となっていた。現地の植生状況と比較すると、葉密度が高い植物については、植生の高さを計測する可能性があると考えられる。



(1) ワンド（左：航空写真、右：IKONOS 画像）



(2)護岸（左：航空写真、右：IKONOS 画像）

図－１ IKONOS 画像と空中写真の比較

表－１　超高分解能衛星と航空写真の判別比較

判別項目	IKONOS（１ｍリアルカラー）	航空写真（0.5m）	航空写真（0.25m）
早瀬（航跡）	船の航跡から判別	可能	可能
ワンド	概ねの輪郭は判別可能	概ね可能	概ね可能
浅瀬	画像強調により可能性あり	可能	可能
自然護岸	概ね判別可能	可能	可能
人工護岸	判別可能	可能	可能
流入支川・排水の位置	判別可能	可能	可能
高木群	画像強調により被覆物の判別は可能、高さの判別は困難	概ね可能	概ね可能
低木群		概ね可能	概ね可能
高い丈草本群		概ね可能	概ね可能
低い丈草本群		概ね可能	概ね可能
裸地群		可能	可能

４．主な研究成果物

なし

（金木、深見、松浦直、廣瀬）

1.8　人工衛星による流域の土砂環境把握と危険度評価手法の開発に関する研究

研究期間：平11～平13
担当：砂防研究室・地すべり研究室

【要旨】

本研究では人工衛星等航空宇宙技術を活用した①土砂災害に伴う地形変化の予兆段階での把握、②土砂流出に関与する山地環境の変化の広域的かつ迅速な把握、③常時の維持管理及びその効率化、④水系一貫した土砂管理に必要となるマクロな情報の把握、⑤土砂災害の危険度評価、⑥地上系センシング情報との連携による新たな国土管理、危機管理手法の提案、及び上記①～⑥を実現するために必要となる人工衛星等航空宇宙技術に対する要求仕様の明確化を目的として実施する。

11 年度は主に②について、平成 7 年 7 月 11 日に発生した姫川豪雨災害を対象として、人工衛星による土砂災害発生状況把握手法の検討を行った。

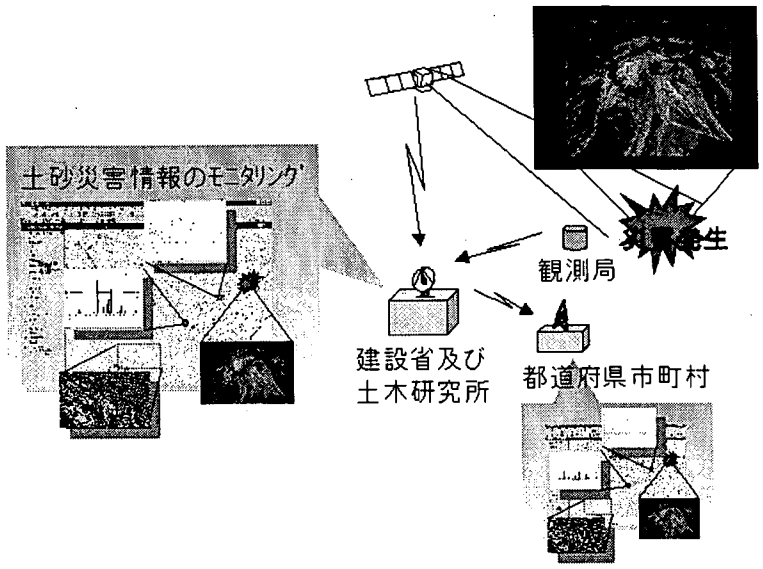


図-1　人工衛星技術を利用した土砂災害情報システムのイメージ

1. 研究目的

豪雨や大地震によって広域にわたって同時多発的に土砂災害が発生した場合、2 次災害の防止、復旧作業の支援等の観点から、土砂災害の発災状況をなるべく早く把握することが重要である。従来は、航空写真の判読しか状況把握手段が無かったため、平成 7 年 7 月 11 日に発生した姫川豪雨災害の時のように、数百 km^2 にも及ぶ範囲で斜面崩壊が数多く発生したような場合、その斜面崩壊の全容を把握するのに膨大な時間と労力を要した。

そこで、本研究では、高分解能化やマルチスペクトル化等技術進歩の著しい人工衛星リモートセンシング技術を応用し、土砂流出に関与する山地環境の変化に広域的かつ迅速に把握する手法の開発を行う。観測範囲の広い人工衛星画像を利用することによって、広範囲のデータ取得にかかる費用と労力を削減することが可能になると期待される。

人工衛星のセンサには、大きく分けて光学系とレーダ系があり、前者は受動系センサとも呼ばれ、地表の電磁波（主として太陽光）の反射強度を観測する。この観測においては、視覚的に分かりやすい画像が得られるものの、天候等に左右され、雲の影響を受ける。一方、後者は能動系センサとも呼ばれ自ら照射したマイクロ波が地表面から反射する強度等を観測するもので、マイクロ波が雲を透過して地表に到達することから対象地域が雲に覆われていても観測が可能であるが、レイオーバ、ダイヒードラル等、レーダーに特有の現象を生じ、データの取り扱いが難しい。本研究では、それぞれに長所をもつ光学系、レーダ系の両センサーのデータについて土砂災害概況把握への適用性の検討を行う。

2. 研究方法

2.1 調査地の概要

今回対象としたのは長野県北部に源を発し、新潟県南西部を貫いて日本海に達する姫川流域である。姫川流域は糸魚川-静岡構造線に沿っているため構造運動が活発であり、地形及び河床勾配が急であることから土砂の流出が著しい河川である。また、この地域には中・古生層、第三紀層が入り組んで複雑に分布しており日本有数の地すべり地帯でもある。

近年では、平成 7 年 7 月豪雨により流域内で 1,000 万 m^3 以上の崩壊土砂量が発生したほか、平岩地区においては支流からの土砂流入により河床が約 10m上昇するなどの地形の変化が起こっている。

2.2 調査方法

2.2.1 合成開口レーダデータによる調査

本調査では、JERS-1（1998 年観測ミッション終了）に搭載された合成開口レーダのデータの、パス・ロー番号 68-239 のシーンを使用した（表-1）。このシーンには姫川流域全体が含まれている。このパス・ローの JERS-1/SAR データは 30 シーンあり、そのうち積雪期を除く、基線長 600m以下になるペアにおいて初期インタフェログラムを作成した。

上記で作成した画像を用い次のような 2 つの手法により検討した。①干渉 SAR 処理を行う際の 2 枚のＳＡＲ画像間の干渉性の高さを表すコヒーレンス画像(図-2)を利用するもので、地表面の状態が著しく変化した場合コヒーレンス値が低下することが予想されるため、そのような箇所を土砂移動現象発生域として抽出する。②地表面のマイクロ波に対する後方散乱特性が変化する可能性を考え、SAR 強度画像のペア同士でその除算演算を行い、強度が変化している領域を抽出する(図-3)。

①、②は土石流やがけ崩れといった急激な地形変化を伴う現象はコヒーレンスの低下域、後方散乱特性の変化として処理画像に表現されると考えられる。

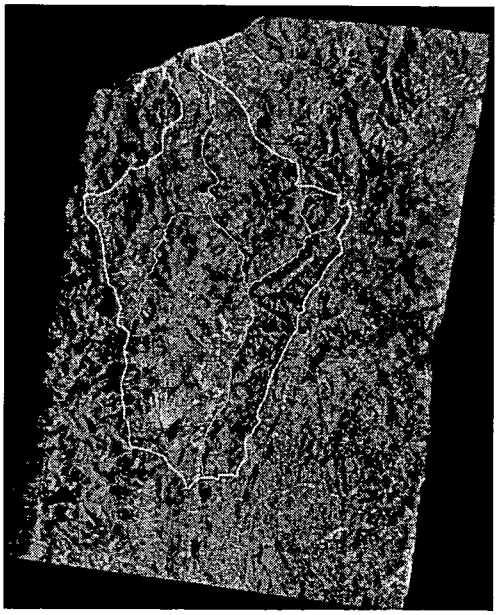
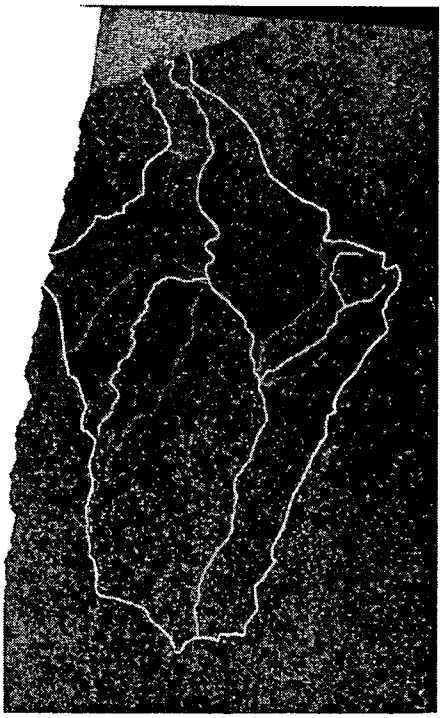


図-2　コヒーレンス画像(1993/07/09-1993/08/22)
図中の黄線は姫川の流域界を示す



図－3　平成 7 年姫川豪雨災害をはさんだペアによる除算処理画像　(1995/9/9 ÷ 1993/8/22)

2.2.2 光学センサデータを用いた調査

1995 年 7 月に姫川流域で発生した豪雨災害前後の衛星データ(LANDSAT5/TM:1994.8.26, 1995.8.29)を地上の経時的な変化を表すレーヤーとして山地流域の崩壊地抽出を試みた。

崩壊地は衛星データより植生指標を利用して植生指標二値化図より無植生地を抽出した。この抽出結果図、DEM(国土地理院発行 50m メッシュ数値標高図)より作成した傾斜区分図、1/25,000 数値地図の３つのレイヤーのオーバーレイ処理により崩壊地分布図を作成し、航空写真による崩壊地分布図との比較検討を行った。

3. 研究結果

3.1 合成開口レーダデータを用いた調査結果

この手法によって、明確に斜面崩壊地等を衛星データから抽出することはできなかった。これは、干渉処理を利用した手法（①）の場合、処理を実施した 10 ペアのうち干渉したのは 2 ペアのみ（表-1）であったためであると考えられる。しかも、それらのペアは平成７年度の姫川災害を間に挟む観測日のペアではなかった。

表-1 SAR データ解析に使用した各ペアのコヒーレンスと干渉結果

No.	マスター画像観測日	スレーブ画像観測日	基線長(m)	コヒーレンス	干渉結果
①	1992/10/18	1995/9/9	543.67	0.18	非干渉
②	1993/7/9	1993/8/22	107.36	0.36	干渉
③	1993/7/9	1998/7/8	493.84	0.16	非干渉
④	1993/8/22	1998/7/8	481.6	0.17	非干渉
⑤	1995/9/9	1998/9/13	586.06	0.17	非干渉
⑥	1996/5/30	1998/6/17	332.12	0.18	非干渉
⑦	1996/5/30	1996/10/9	147.35	0.21	干渉
⑧	1996/8/26	1996/11/22	396.73	0.19	非干渉
⑨	1996/10/9	1998/6/17	454.59	0.17	非干渉
⑩	1996/11/22	1997/5/17	555.41	0.2	非干渉

今回干渉画像が得られたペアはいずれも基線長 200m以下の画像ペアである(図-4)。日本のように、国土の大部分が急峻な山地で占められている場合、干渉 SAR 技術を活用するためには、軌道情報を厳密に管理し、基線長をなるべく短縮する必要がある。

また、SAR 画像上のデジタル値の変化を利用する方法（②）では、平成７年７月 11 日姫川豪雨災害の前後の画像によって除算処理画像を作成したが、崩壊発生地を明確に判別することはできなかった。これは、姫川災害で発生した斜面崩壊が比較的小規模(数十 m)であったことが原因の一つと考えられる。また、JERS-1 の L バンド SAR では、波長が 23.5cm と長いため、崩壊に伴う地被状態の変化を反映することができなかった可能性も考えられる。

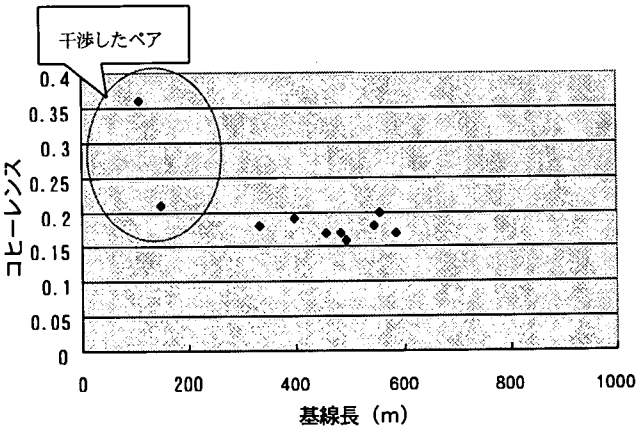


図-4 コヒーレンスと基線長の関係

3.2 光学センサを用いた調査結果

まず衛星データより抽出された無植生図と傾斜区分図を用いて傾斜 20°、及び 30°を閾値としてそれ以下の緩斜面に存在する無植生地を除去し、1/25,000 数値地図と重ね合わせた。

その結果、30°を閾値とした場合には現地調査等で確認された崩壊地、崩壊土砂堆積地等の無植生地の多くが除去される結果となった。一方、20°を閾値とした場合ではそれらがほぼ表示された。このことから、当地区の 20 30°の斜面において崩壊地の分布が見られることが確認された。得られた崩壊地分布図の一例を図-5 に示す。

次に、確認された崩壊地の規模を崩壊地の発生部位（渓岸部と山腹部）で比較検討した。この結果、地上の調査で同規模と確認された崩壊が衛星データによる崩壊地分布図では渓岸部の崩壊の方が大きく判定される傾向

にあることが分かった。これは、衛星のセンサは地表上の事物の分光反射特性をとらえる際に、受光素子単位で地物の反射特性の複合値を観測していることから、崩壊発生場所周辺の環境の波長特性を含んでいるものと考えられる。

今回の場合、渓岸部の崩壊では河川沿いの無植生地に発生した崩壊を、一方山腹部の崩壊では植生地内もしくはそれに隣接して発生した崩壊を抽出し、受光素子単位の観測数値が各々周辺環境の違いによる影響を受けた結果と考えられる。

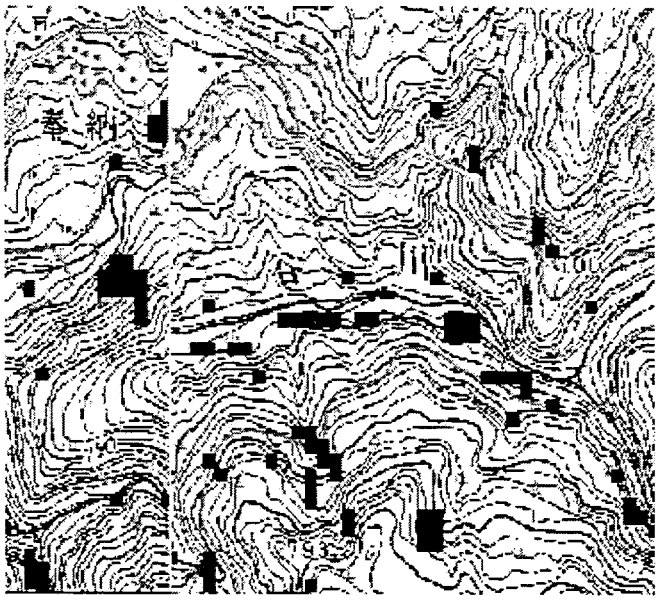


図-5 崩壊地分布図（姫川水系土谷川流域） 30m メッシュ

4. まとめ

合成開口レーダデータの干渉処理による調査では、斜面崩壊状況を観測することができなかった。このことは、干渉 SAR 技術そのものの限界ではなく、偶然、姫川流域において干渉可能な画像が少なかったことが原因であると考えられる。したがって、干渉 SAR 技術が土砂災害モニタリングに使用できるか否かを検証するまでには至らなかった。

また、SAR 画像のデジタル値の変化によって崩壊地を抽出することはできなかった。これは、崩壊地の規模が衛星画像の空間分解能に対して充分に大きくないことと、地被状態の変化に比較的鈍感な L バンド SAR のデータを用いたためであると考えられる。

12 年度は、人工衛星の合成開口レーダを用いた土砂災害情報の収集手法の検証を行うため、姫川以外の場所で適切に干渉する（JERS-1/SAR のデータでは基線長 200m以下）ペアによる解析を引き続き行い、姫川においては、今回検討を行った L バンドより地被状態の変化に敏感な、波長の短い C バンド SAR による検討を行って行きたいと考えている。

光学センサデータの利用に当たっては、データ取得条件の他にも土砂災害監視に用いるうえでの課題がある。多時期の衛星データを蓄積し、流域の変化状況を監視するには地理、地形情報との統合が適正に行われる必要がある。そのためには、高精度な位置情報が要求されるが、土砂災害が予想される山地流域においては、位置情報を与える GCP(Ground Control Point)の取得が容易ではない。画像の解像度が粗いため、渓流に施工されている砂防ダムでも分解能 10m オーダーでは判読することは不可能である。

12 年度は、平成 11 年に打ち上げられすでに運用が開始されている IKONOS 等、空間分解能の高い人工衛星や、ASTER 等スペクトル分解能の高い人工衛星の画像を用いた検討を行う予定である。

（南、綱木、清水、山越、福嶋）

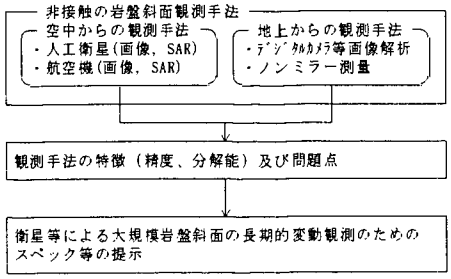
1.9　大規模岩盤斜面の長期的変形調査

研究期間：平11～平13年
担当：急傾斜地崩壊研究室

【要旨】

大規模岩盤斜面は、地形の急峻さや規模の大きさから、計測機器による経年的な監視は困難を伴い、長期観測が可能な非接触方式の観測手法の開発が必要である。

しかしながら光学センサーの場合、天候によって撮影や観測ができないといった気象条件の影響を強く受ける。そこで、岩盤斜面の変状を把握するための観測手法として、衛星データ等を用いた岩盤斜面の変状の計測を試み、課題等について検討を行った。



研究イメージ

1．研究目的

大規模岩盤斜面の崩壊は、発生の頻度は低いものの崩壊が発生した場合には甚大な被害が生じる。このような大規模岩盤斜面に対しては、その地形の急峻さや規模の大きさからハード的な対策を実施することには困難を伴い、斜面監視等のソフト的対策も併せて実施していく必要がある。

しかしながら、大規模な岩盤斜面の経年的な変状の調査を行うに当たり、計測機器による変状の監視は計測機器の設置やその管理が困難であり、長期観測が可能な非接触方式の観測手法の開発が望まれている。

このことから、岩盤斜面の変状を把握するための観測手法として、衛星データ等を用いた岩盤斜面の変状の観測手法について検討を実施するものである。

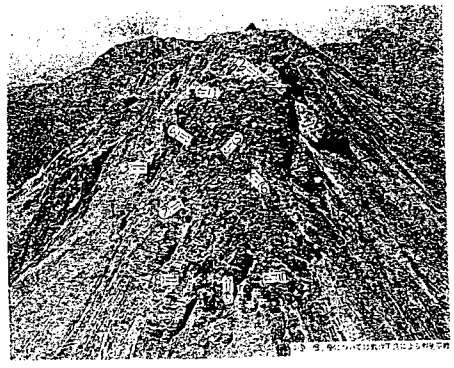
2．研究手法

非接触方式による岩盤斜面の変状の把握手法として、人工衛星（合成開口レーダー・衛星画像）や航空写真測量、地上からのデジタルカメラ等による画像解析、ノンミラー測量等の観測手法が考えられる。しかしながら、これらの内、光学的な手法の場合、天候によって撮影や観測ができないといった気象条件の影響を強く受けること等の問題点もある。そこで、平成11年度は、天候の影響を受けず、分解能が良いと思われる人工衛星InSAR(干渉SAR)に注目し、光波測量による変状変異計測結果と航空写真、衛星データ（InSAR）による変動量計測結果の比較を行い、光波測量値を真値とした場合の岩盤斜面の変状把握の程度を整理し、問題点等について検討を行った。モデル岩盤斜面としては光波測量や航空写真撮影が実施されており周辺に樹木が無く、規模が大きいことから、雲仙普賢岳溶岩ドームを選定した。今回、使用したデータ及び時期を表－１に示す。

表－１　使用したデータ及びその時期

計測手法	1995	1996	1997	1998	1999	備　　考
人工衛星(SAR)	(①8/9)	②6/12	③3/3			JERS-1(SAR) 1998/10運用停止
航空写真			①2/27 ②10/11		②2/17	ステレオペア1/8000
光波測量結果			3/18より２週間～１ヶ月おき			９地点

人工衛星(SAR)については、①②(基線長:1262m)、①③(基線長：1456m)、②③(基線長：261m)の組み合わせについてInSARを試みたが、良好な干渉結果が得られたのは②③のペアのみである。



図－１　モデル岩盤斜面の光波測量箇所

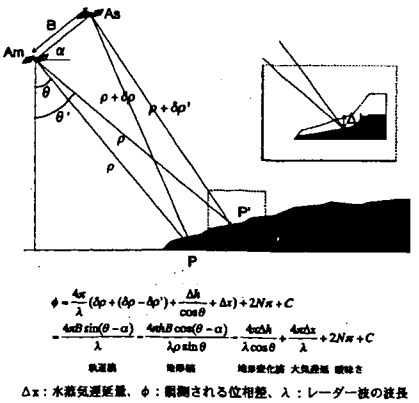
図－１に光波測量箇所を示すが、概ね600ｍ×400ｍの範囲にわたり、モデル岩盤斜面に設置されている。また、人工衛星SARはJERS-1のデータを用いた。JERS-１(SAR)にはＬバンド(24cm)，Ｃバンド(6cm)の２種

類の波長があるが、今回は、樹木の影響が受けにくいＬバンドを用いている。

２．１　干渉ＳＡＲの概要

地表に照射し、地表からの散乱してきたエコーは振幅と位相を持つ画像として記録される、この位相情報を基にＳＡＲを干渉計として用いるのがInSARである。InSARは図－２に示すように同じ地域で時期をずらして観測した２つの画像(As，Am）における取得画像を干渉させてその位相差から地形変化量（軸方向の距離変化）を計測する。

位相差には、地形変化量、軌道縞、地形縞、大気遅延、曖昧さ(波長)等の影響が含まれており、これらの情報を除いていく必要がある。



$$\phi=\frac{4\pi}{\lambda}(\delta\rho+(\delta\rho-\delta\rho')+\frac{\Delta h}{\cos\theta}+\Delta x)+2N\pi+C$$

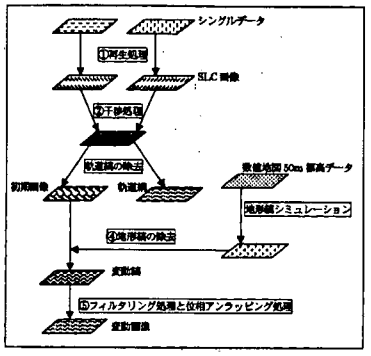
$$=\frac{4\pi B\sin(\theta-\alpha)}{\lambda}-\frac{4\pi hB\cos(\theta-\alpha)}{\lambda\rho\sin\theta}-\frac{4\pi\Delta h}{\lambda\cos\theta}+\frac{4\pi\Delta x}{\lambda}+2N\pi+C$$

軌道縞　地形縞　地形変化量 大気遅延 曖昧さ

Δx：水蒸気遅延量、φ：観測される位相差、λ：レーダー波の波長

図－２　InSAR(干渉SAR)の原理

今回、ＳＡＲのデータ再生処理、干渉処理及び変動抽出の一連の解析にはVexcel社が開発した3dSARプロセッサを使用した(図－３)。



図－３　InSAR解析の流れ

２．２　空中写真による

ＳＡＲによる解析結果と比較を行うため従来の航空写真によるステレオペア画像からＤＥＭを作成し、２時期のＤＥＭを比較することにより、面的な変動量が把握できる。

用いた航空写真はH9.2.27(３枚)，H9.10.11(３枚)，H11.2.17(17枚)であり、H11.2.17では外部評定要素まで遠距離であるため多くの枚数を使用している。このデータを基準にしてH9.2.27，H9.10.11のＤＥＭを作成している。ＤＥＭ作成では、航空写真を20μでアナログデータからデジタル化し、約１ｍ／ﾋﾟｸｾﾙのメッシュを作成した。

３．研究結果

今回の検討の結果、航空写真によるＤＥＭでは地上基準点が充分に取得できないため等によりメートルオーダーの計測結果となったのに対し、InSARでは、光波測量と同程度の数cm～数十cmオーダーの計測結果が求められた。

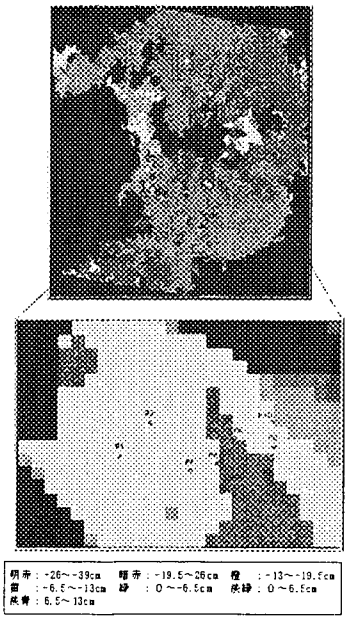
しかしながら、今回の解析からInSARの以下の問題点も明らかとなった。

①今回、1,000m以上の基線長のものは干渉性が悪く解析が出来なかった、また基線長の短い261mでも、基線長の情報は正確でなく誤差が生じる。

②基線長を短いものでも、アンラッピング処理が不能な区域があり、変動量を把握できない部分もあった。

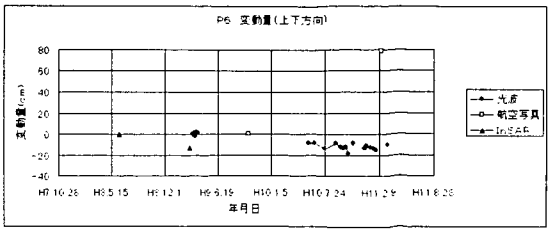
③光波測量結果では、南北方向の移動も認められるが、衛星では、移動方向である南北方向の移動量は把握できない。また、軸方向の変動も東西方向の変位によるものか上下動によるものか明らかでない。

④地形縞の影響を除くために用いる地形データの正確さや分解能の影響解析を受ける。



図－４　InSAR解析結果(上下)

また、InSARでは計測値が影響を受ける範囲や規模、フィルター処理による結果への影響度合い等、今回検討していない部分もあり、地上からの監視手法等も交えて今後検討をしていく必要がある。



図－５　各手法による結果の比較

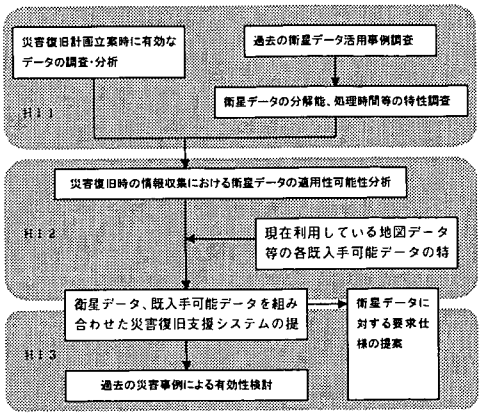
（門間，小嶋）

1.10　災害復旧作業における高分解能衛星データの利用に関する研究

研究期間：平11～平13
担当：機械研究室・施工研究室

【要旨】

土砂災害等の災害発生時には、被災規模など様々な情報を短時間で収集・把握し、復旧作業を安全かつ速やかに行う必要がある。また、最近では衛星リモートセンシングデータの精度が向上し、広範囲かつ高精度な地表のデジタル情報が取得可能となってきた。このため本研究では、現在用いられている現場写真などに加え、衛星データを利用することで、より的確に現場状況を把握し、二次災害を防止するともに効果的な災害復旧計画を立案することが目的である。11 年度は、過去の災害事例および衛星データについての文献調査を行い、各復旧段階で要求される情報特性を整理した。今後は現在の取得情報と衛星データを絡めた効果的な情報の提案、衛星データへの要求手法をとりまとめる予定である。



1．研究目的

近年、衛星リモートセンシング技術の向上により、高精度の衛星データが取得可能となったが、災害復旧対策への利用はほとんど無い。本研究では、過去の災害事例および衛星データの精度等について調査を行い、衛星データの利用方法や有効性の検証、および衛星データに対する要求仕様をまとめることを目的とする。

2．研究方法

2．1災害の事例調査

災害白書より過去5年間の災害を抽出し、発生年月日、災害名、概要、公共インフラ関連の被災、建設省の対応、被災規模としてまとめた。また、災害発生から初期対応までの情報の流れを、建設省土木構造物の震災復旧技術マニュアル（案）等の文献をもとに、衛星データの利用を考慮し時系列に合わせて整理した。

2．2衛星データに関する調査

災害復旧時における地図データ等としての利用可能性を検討するため、現在運用されている衛星で、分解能が100m 以上の衛星 20 機種について、解像度やデータ入手期間等の調査を行った。

3．研究結果

3．1災害事例調査

過去 5 年間に 43 件の災害が掲載されており、特に公共インフラへの被害が甚大になる可能性の高い災害は、土砂災害、地震災害、津波被害や河川氾濫などの水害に集約されることが得られた。

災害発生時の情報の流れを図-1 に示す。災害発生直後で取り扱われるデータは被災状況・規模、公共施設の被災状況、死傷者の有無等が主となる。現状では、これらの情報収集に現場管理事務所から

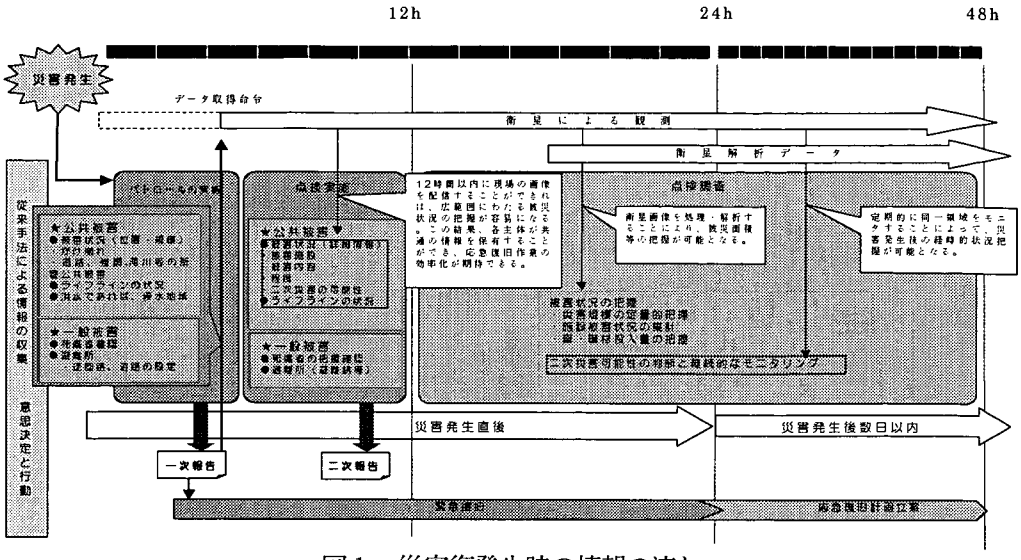
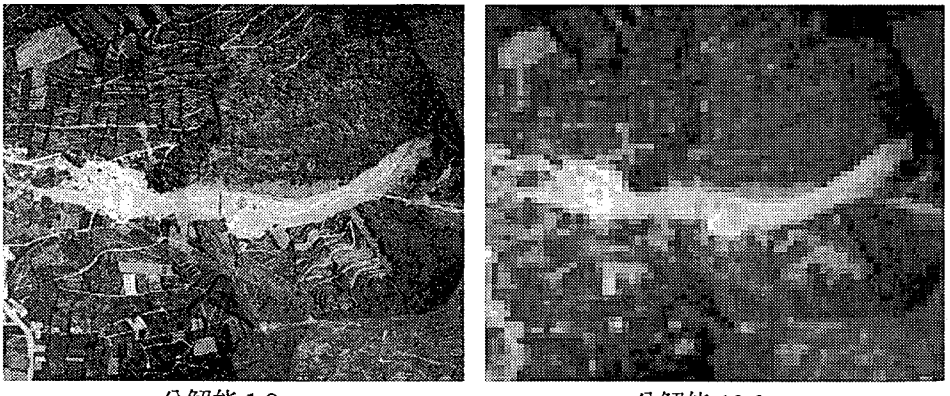


図1　災害復発生時の情報の流れ

派遣された視察者が撮影した写真等を用いることが多い。ここへ、衛星データを用いることで、広域な地形図が得られ、より正確な被災規模の把握に効果がある。次に災害発生後数日以内で取り交わされているデータは、被災地のより正確な被災規模や被災内容、2次災害発生の危険性有無等が主となる。現状では、現場写真の他、航空写真等も用いられている。ここへ、衛星データを用いることにより、3D 地形図や流出土量・道路状況が得られ、復旧工法や資機材運搬の選択に効果がある。

3．2衛星データに関する調査

現在用いられている衛星では可視・赤外域を用いた光学センサとマイクロ波を用いた合成開口レーダで地球を観測している。光学センサは、分解能が現在 1.0m 以下の詳細なデータが得られ、図-2 に示すように、土石流の全体像や道路・橋梁の大まかな状況の把握が可能である。データの納入期間も最短で2時間と比較的短く、複数のデータ提供会社が存在している。しかし、光学センサであるため、地表上の雲など観測条件がある。一方、合成開口レーダは、マイクロ波を利用しており雲等の影響は受けないため、夜間や荒天時の影響無く撮影が可能であり、災害復旧時の利用を想定すると有効である。しかし、分解能が現在 10.0m と荒く、図-2 に示すように概略の被災規模把握程度までしか行えない。また、データ納入期間も光学センサに比べて複雑なデータの解析が必要なため2週間程度と長く、データ処理機関が国内に1カ所であるため危険分散の面からも問題がある。



分解能 1.0m　　分解能 10.0m

図2　航空写真からのコンピュータシミュレーション結果

（村松、新田、服部、水上）

1.11　衛星通信技術の道路分野への適用可能性に関する研究

研究期間：平１１～平成１３
担　当：　道路研究室

【要旨】

今年度は、道路分野の新しい局面を拓く高解像度衛星からのデータを中心に、１ｍの解像度の画像を、道路分野へ適用した場合、どのような応用が可能か、基礎的なことを調査し、今後の航空宇宙技術の発展によって、どのようなことが可能となるのか、その概要を取りまとめた。

その結果、高解像度衛星によって、車両の判別が少なくとも小型車・大型車の区別はつき、車両占有面積や駐車場における車両台数のカウントなどが、広範囲に行えることや、衛星によって得られる GIS によって、道路の防災面での危険度のクラス分けが可能であること、また、成層圏プラットフォームについては、高精度な GIS の構築や道路管理の面において多大な役割が期待できること等が判明した。

１．研究方法

道路の場合、GPS による車両の位置判別以外は、航空宇宙技術と馴染みが深い分野ではなかった。特に、リモートセンシングによる画像処理との関わりにおいては、車両が判別できるような解像度ではなかったため、道路分野においては、殆ど応用されていなかった領域である。

しかし、１ｍの高解像度衛星によって、車両の判別が可能となってきており、画像の領域での道路面での応用が試みられるようになった。また、衛星のみならず、成層圏プラットフォームのプロジェクトも推進しつつある。

このような背景のもと、本研究は、衛星通信技術等の道路分野への適用可能性について調査を行うものである。研究方法としては、まず第１に、航空宇宙技術に関する文献調査や動向調査によって、現在の航空宇宙技術がどの程度展開しているのか、基礎的把握を行った。

そして、基礎的な事柄を整理しつつ、基本的な研究の方向性について検討を行った。

次ぎに、高解像度衛星については、１９９９年１０月に民生部門の商業衛星打上げが成功したことにより、その画像を得るとともに、画像処理によって、道路分野において、どのような応用が可能なのか、実際の画像や模擬画像を使用しながら、検討を行った。

２．研究結果

２．１　高解像度衛星及び成層圏プラットフォームの位置について

優れた解像度を有するセンサでも、距離が離れていれば、解像度は落ちてしまう。また、衛星は、軌道高度によって、周回期が違ってくる。そこで、まず、高解像度衛星等の軌道高度の整理を行った。

図－１に、①静止気象衛星、②GPS 衛星、③高解像度衛星の軌道高度を図化したものを示す。高解像度衛星は、高度約６８０ｋｍの高さを約９０分で、地球を周回する軌道上にある衛星であり、日本上空を約１．５日～２．９日で周回する。従って、常時観測は不可能である。

周回性を有する衛星に比べ、成層圏プラットフォームは、高度約１０ｋｍ～５０ｋｍに及ぶ成層圏内に滞在するプラットフォームであり、今のところ飛行機タイプと飛行船タイプの２つ

のタイプが研究されている。

成層圏域であれば、対流圏のように気象の影響がないため、常時晴天であり、太陽エネルギーも使用可能となり、通信基地として、期待が高まっている。

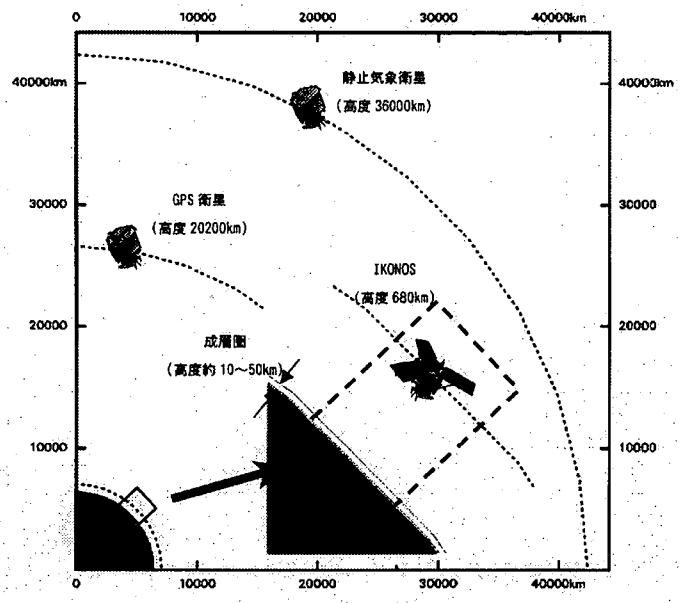


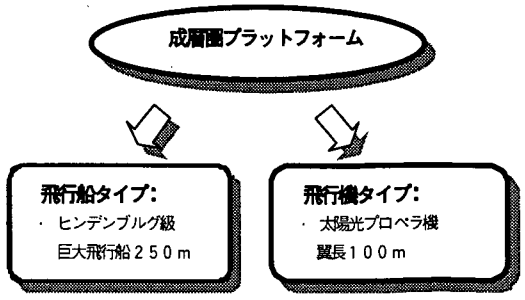
図1 高解像度衛星の軌道高度

成層圏 PF としては、PF のタイプとしては、①飛行船タイプ②飛行機タイプの２つがあり、①は定点に停留する方式②は飛行する方式である。(図―２)

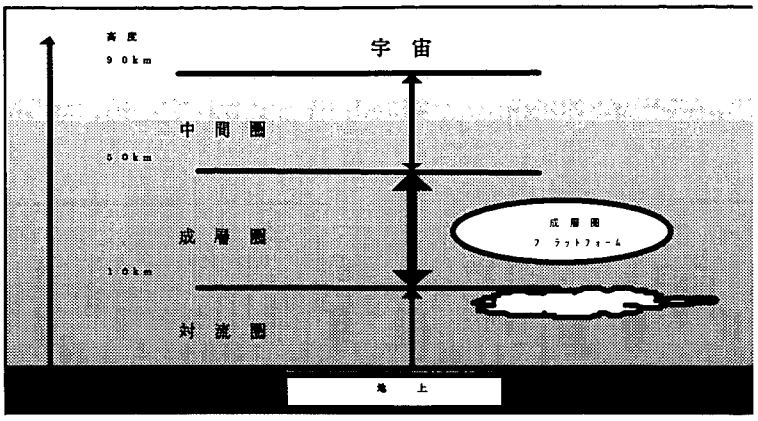
①の飛行船タイプは、ヒンデンブルグ級の２５０ｍの巨大な容積が必要とされており、太陽パネルも外壁に貼りつける必要性があり、技術的には困難な課題が多いとされるが、ペイロードは数トンが予定されており、浮上滞空が成功すれば、様々な機材が積みこめるので、地球観測のみならず、情報の上空拠点として期待されている。

②の飛行機タイプについては、NASA のドライデン研究センターが、ハワイ沖において、既に、ソーラープレーンを飛ばし、成層圏の飛行に数週間滞在を成し遂げており、既に、技術的課題を克服しつつあるが、ペイロードのキャパシティが飛行船タイプに比べ、約１０の１程度なので、機材積み込みが限定されるという課題を抱えている。

いずれの方式においても、衛星の打上げコストが非常に高いこと、衛星では高度が高すぎて、解像度を上げるのが困難であること、衛星では電波の使用領域も限られていることなどを勘案すれば、成層圏域に拠点を構築することが可能となれば、情報通信や観測技術の革新となり得るので、欧米諸国も成層圏 PF に力を入れ始めたところである。



図―２　成層圏ＰＦのタイプ



図—3 宇宙空間までの空間の構成と成層圏プラットフォームの位置

2．2　成層圏 PF(プラットフォーム)の概要

（1）概要

成層圏プラットフォームの場合、約 20ｋｍの高度を有しているため、直径 20ｋｍ程度の直接的交通流観測は可能であるし、通信の面でも、伝播遅延が殆どなく、未利用域の準ミリ波やミリ波が使用できる。成層圏の位置関係を図—3 に示す。

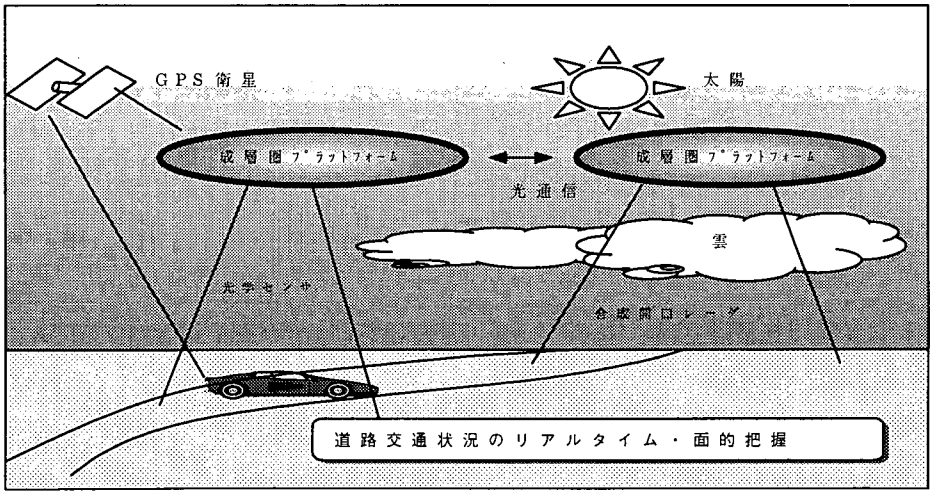
また、成層圏プラットフォームの道路交通に適用した場合のｲﾒｰｼﾞを図－4 に示す。

（2）上空の空間構成

空気は約地上数百 km～1000ｋｍ程度まで存在するが、成層圏は、対流圏のような雲はできない常時快晴の領域である。軍事・気象以外の分野では、こうした成層圏域のような超高空からのリモートセンシング情報は、今まで民生用では殆ど利用されていなかった。

（3）成層圏プラットフォームの開発状況

ところが、近年の高分子・化学材料の発達は、炭素繊維等を生み出し、非常に軽量な飛行構造物が造れるようになった。また、CAD・CAM による高度な機体設計が可能になったことに加え、情報通信技術の発達によって、ロボット技術による UAV（Unmanned Air Vehicle:無人飛行機）も造れるようになって来た。



図—4　成層圏 PF の道路交通分野への適用イメージ

3．考察及び検討結果

以下に考察及び結論を示す

1）高解像度衛星の画像処理（図―5）によって、車両の台数の判別はほぼ可能である。模擬的に行った結果を図―6に示す。

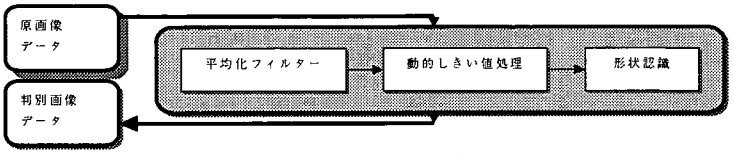
2）駐車場の台数の判別や、道路の車両面積率など交通工学の基礎データの獲得が可能となる。

3）また、画像処理の範囲はワンショット10キロ四方であるが、カメラの制御次第では、移動速度を算出するような取り方も可能である。

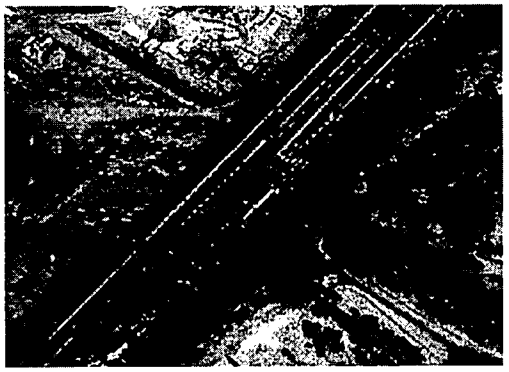
4）高解像度衛星データによるDEM（Digital Elevation Model）が構築することができれば、約1m解像の道路空間データ基盤の構築が図れるようになる。

5）航空宇宙技術を活用し得られる3次元のDEMは、CALS等にも使用でき、高精度のDEMによって、コンピュータベースの土木設計、工事、管理が可能となる。

6）成層圏プラットフォームは、機体が完成すれば解像度が非常に高く設定でき、歩行者の判別や個別車両の判別が可能となり、道路交通の面で多大な影響を及ぼす。（表―1）



図―5　解像処理ステップ



図―6　車両判別例（模擬）

表―1　高解像度衛星と成層圏PFの比較

	高解像度衛星	成層圏プラットフォーム
地上からの距離	約700km	約20km
解像度	約1m	数センチ
DEMデータ	約1m	数センチ
車両の判別	台数、 大型車・小型車の判別	車種別認識 個別車両認識
歩行者の認識	困難	十分可能
観測周期	約1～3日	常時滞空
雨天の場合の対応	合成開口レーダー	合成開口レーダー

4．将来展望

高解像度衛星によるデータは、土砂災害や河川管理においては、多大な貢献が予想されている。道路の場合、車両台数の認識は、可能である。広範囲に把握し、他分野との整合を図っていくことによって、例えば、道路防災に役立つことが可能であり、今後の展開が期待される。

（濱田、水上）

1.12　都市緑地調査における人工衛星技術の活用に関する研究開発

研究期間：平１１～１３
担　当：緑化生態研究室

【要旨】

本研究は、都市における緑地総量の把握や緑地の活力度評価、CO_2 固定量算定など、都市緑地の様々な調査・解析における人工衛星データの活用手法を開発することを目的として実施するものである。

平成 11 年度は、東京都練馬区をｹｰｽｽﾀﾃﾞｨｴﾘｱとして、高分解能及び従来型人工衛星のﾘﾓｰﾄｾﾝｼﾝｸﾞ画像により、都市内緑地総量（緑地面積等）を把握した。さらに、航空写真により把握したものと比較することにより各ﾘﾓｰﾄｾﾝｼﾝｸﾞ画像の精度等を検証した。その結果、都市内緑地のうち樹林地、草地については、高分解能及び従来型人工衛星とも航空写真により把握したものと同様の結果を示したが、農地については、高分解能及び従来型人工衛星では、農地として分類された土地被覆分類に緑の多い住宅地が含まれるため、過大算出する傾向にあることが判明した。

１．研究目的

都市緑地保全法に基づく「緑の基本計画」の策定における都市緑地調査では、主として航空写真を用いて行われてきた。人工衛星画像を用いる方法は、広域的撮影とコンピューター処理が可能であり、効率的なものとして期待されるが、従来の人工衛星画像は分解能が低いため、精度の点において問題があるとされてきた。しかし、最近になって、航空写真に匹敵する高分解能の衛星画像の入手が可能となっており、高分解能人工衛星画像を用いた都市緑地調査手法の開発が求められている。

本研究は、都市における緑地総量の把握や緑地の活力度評価、CO_2 固定量算定など、都市緑地の様々な調査・解析における人工衛星データの活用手法を開発することを目的として実施するものである。

平成 11 年度は、東京都練馬区をｹｰｽｽﾀﾃﾞｨｴﾘｱとして、高分解能及び従来型人工衛星のﾘﾓｰﾄｾﾝｼﾝｸﾞ画像を、航空写真により把握したものと比較することにより各ﾘﾓｰﾄｾﾝｼﾝｸﾞ画像の精度等を検証することを目的とした。

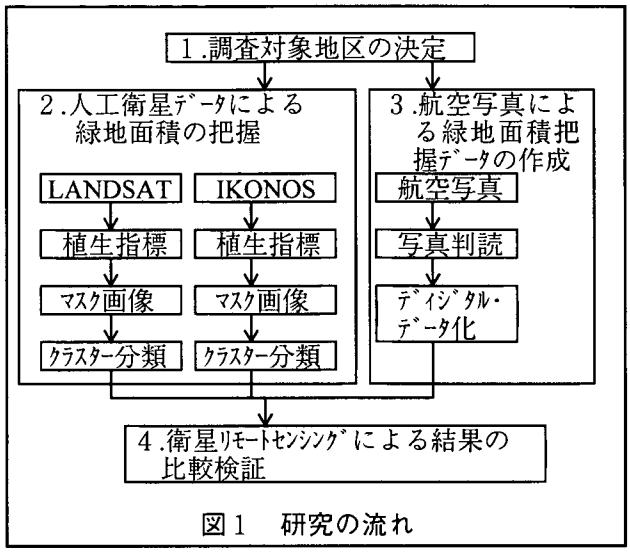


図１　研究の流れ

２．研究方法

本研究の流れを図１に示す。本研究では、東京都練馬区石神井公園周辺の 1km × 1km の範囲を対象とした。図２に(株)アルプス社の画像ソフトプロアトラスによりその範囲を切抜きしたものを示す。

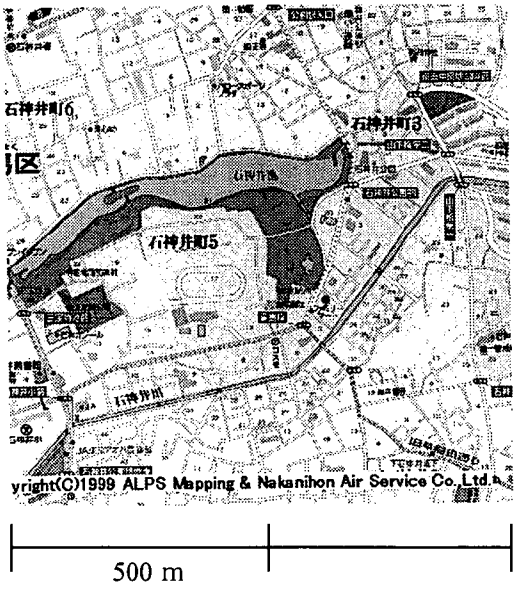


図２　調査対象範囲図

２．１　従来型人工衛星による緑地抽出

従来型人工衛星より、バンド数が多く、植生域判別に有効な近赤外波長を持つ LANDSAT TM を利用し、緑地抽出を行なった。分類手法は、植生指標（NVI）用いて、植生域・非植生域・水域の３つの画像に分割し、さらに、バンド６(熱赤外)を除く６バンドで、クラスター自動分類により、土地被覆分類を行った。

2．2　高分解能衛星 IKONOS による緑地抽出

分類手法は、植生指標（NVI）用いて、植生域・非植生域・水域・影の画像に分割し、さらに、可視～近赤外域の4バンドで、クラスター自動分類により、土地被覆分類を行った。

2．3　航空写真による緑地抽出

約1万分の1で撮影された航空写真を用いて手動の判読により緑地抽出を行なった。判読項目は、①常緑樹、②落葉樹、③草地、④農地の4項目である。

3．研究結果

図3に示す航空写真の判読結果を基準に衛星データの分類結果を検証した。

LANDSAT の分類結果を図4に示す。空間分解能が 30 mと低いため、対象地域には多数のミクセル（複数の土地被覆の混在するピクセル）が存在する。ミクセルには、街路樹や屋敷林などの小規模な緑地が含まれており、これらの単体としての抽出は困難であった。

IKONOS の分類結果を図5に示す。空間分解能が 4m と高いため、街路樹、屋敷林、草地、農地などが比較的適切に抽出されている。一方、影の影響が大きいことと、建築物の屋根等も農地として土地被覆分類さ



図3 航空写真判読結果

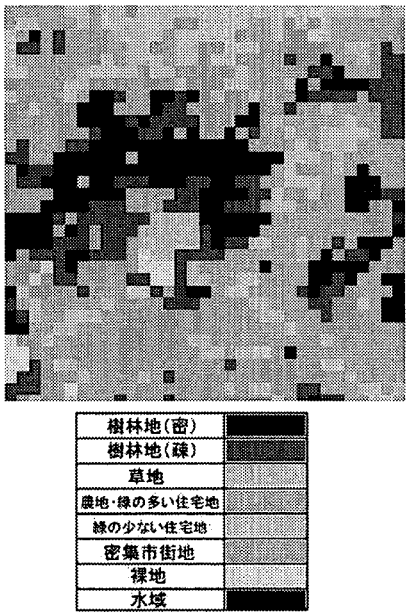


図4 LANDSAT 分類結果

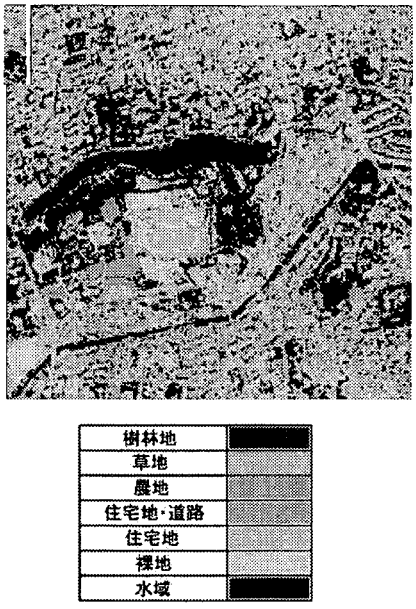


図5 IKONOS 分類結果

れたものと同様のｽﾍﾟｸﾄﾙ特性を示すものがあり、これらの箇所では分類精度が落ちた。また、使用したデータが冬季のデータであったため、落葉樹林が裸地あるいは農地と誤分類されている箇所があった。

各手法より対象地域の植生被覆率を植生被覆率1（樹林地と草地の比率）と植生被覆率2（樹林地、草地、農地の比率）の2とおりで算出し、比較したものを図6に示す。植生被覆率1は各手法とも近い値を示し、差が小さいことがわかる。一方、植生被覆率2の値は大きく異なる。これは農地の抽出精度が手法によって大きく異なることに起因する。衛星データを用いた場合、緑の多い住宅地や建築物の屋根等も農地として土地被覆分類されたものと同様のスペクトル特性を示すものがあり、農地と認識するため、過大算出する傾向にあることがわかった。

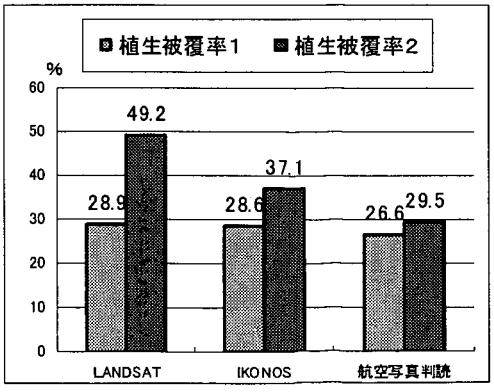


図6　植生被覆率の比較

1.13　リモートセンシングデータを活用した流域土砂管理に関する研究

研究期間：平11～平13
担当：砂防研究室・地すべり研究室

【要旨】

本研究は、大規模土砂災害発生時における崩壊の位置、範囲等の迅速な把握、また平常時における斜面情報の把握とそれらを利用して土砂災害危険度を評価するために、リモートセンシングデータの利用手法の確立をめざすものである。平成 11 年度は、長野県、新潟県にまたがる 1 級水系姫川流域において、JERS-1 の合成開口レーダ(SAR)画像の差分干渉技術を利用することにより滑動地すべり地の抽出を試みた。

1. 研究目的

土砂災害による被害を最小限にとどめるには、予測理論の研究や現場での詳細な調査に加えて、地表面の変化を広域にモニタリングすることも重要である．そこで，広域の情報を定期的に取得することが容易な衛星リモートセンシングデータを活用し，土砂災害危険度の把握手法の開発が必要とされている．本研究で開発目的とする土砂災害危険度の把握方法としては，従来，光学系センサー画像の解析による方法が多く提案されてきた．しかし，これらの手法は，植生活性度等を通して土砂災害の予兆を間接的に捉えるというものであり，信頼性に問題があった．そこで，本研究では，合成開口レーダー画像の差分干渉技術(以下，InSAR と呼ぶ)を応用し,土砂災害の予兆である地表面の微小な動きを直接捉えることを目的とする．InSAR は，地震による地殻変動等，広域にわたる数 cm 程度の微小変位を測定することが可能な技術として近年注目されているが，土砂災害危険度評価への応用例はほとんどない．また，InSAR によって解析するには，その対象とする現象の規模がレーダー画像の分解能(現在の商用衛星では 6m が最小)に対して十分に大きいとともに，その変位量がレーダー波の波長(5.7cm～23.5cm)に対して過大もしくは過小であってはならない．そこで本研究では，国内で生起する様々な土砂災害の内，これらの条件を比較的満たし易いと考えられる地すべりのみを対象として検討を行うこととする．

2. 調査方法

2.1　調査対象地の概要

今回対象としたの姫川は長野県北部に源を発し、新潟県南西部を貫いて日本海に達する（図－1)。姫川流域は糸魚川－静岡構造線に沿っているため構造運動が活発であり、地形及び河床勾配が急であることから土砂の流出が著しい河川である。この地域には第三紀層が広く分布しており日本有数の第三紀層地すべり地帯である．大所地すべりを初めとする大規模な地すべりが多数存在している．

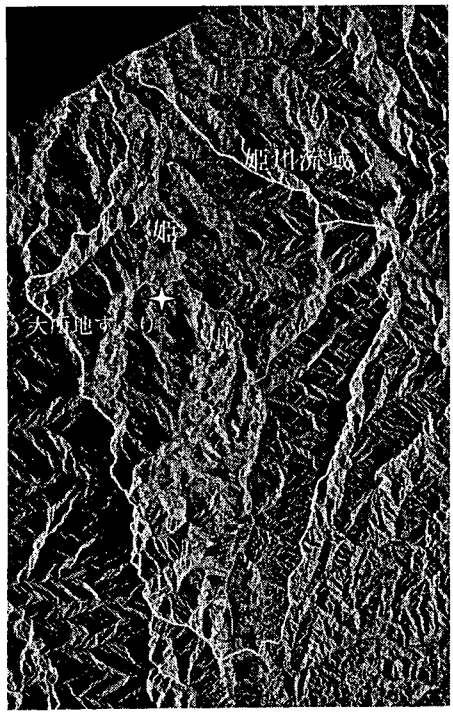


図-1　調査対象流域の SAR 画像(1993/07/09)

2.2　解析手法

本研究では、JERS-1（1998 年観測ミッション終了）に搭載された合成開口レーダデータの内、パス・ロー番号 68-239 のシーンを使用した。このシーンには姫川流域全体が含まれている。このパス・ローの JERS-1/SAR データは 30 シーンあり、そのうち積雪期を除き，なるべく基線長が短くなるペアにおいて初期インタフェログラム及びコヒーレンス画像を作成した。ここで，本研究において，JERS-1 の SAR データを使用した理由は，同衛星が

波長 23.5cm の L バンド SAR を搭載しており，植生を透過して地表面を測定することが可能であるため，森林で覆われた日本の山地において InSAR を適用するにあたり好適であると考えられたからである．

上記で作成した画像を用い，次のような手法により滑動中の地すべり地の抽出を試みた。すなわち，干渉 SAR 処理によって地表の変位分布画像を作成し、変位量の大きい箇所を土砂移動現象発生域として抽出するものである．本研究で対象とする姫川流域内には，前述の通り，幅，奥行きとも数百 m を超すような大規模な地すべりが多数存在し，その中には，毎年数 cm 程度滑動しているものがある．JERS-1 の SAR 画像の分解能は 18m×24m であり，波長が 23.5cm であることを考慮すると，InSAR によって滑動中の地すべり地を抽出できる可能性は十分あると期待される．

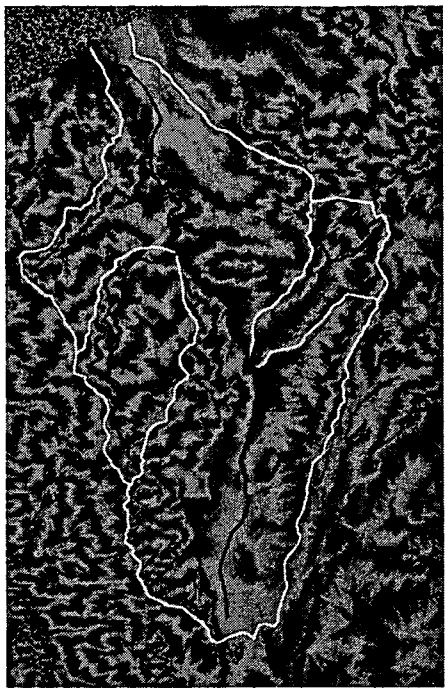


図-2　初期干渉画像(1993/7/9 - 1993/8/22)

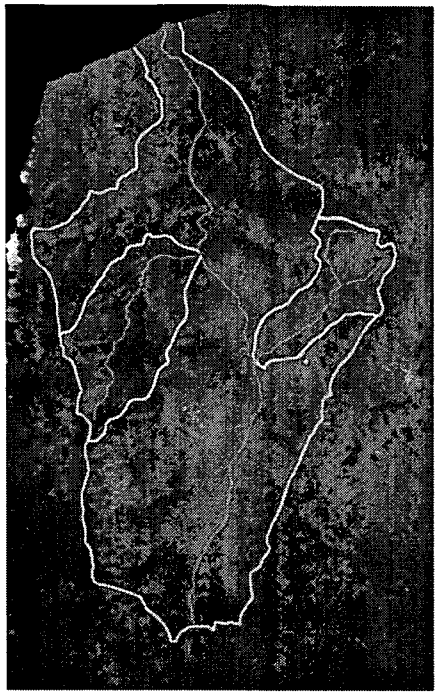


図-3　地表変位量図(1993/7/9 - 1993/8/22)

3. 調査結果

解析を行った 10 ペアのうち干渉したのは 2 ペアのみであり、地表変位画像まで作成できたのはわずかに 1 ペアのみであった。干渉したペアによる初期干渉画像の一つを図-2 に示し，その地表変位画像を図-3 に示す．しかし，地表変位図中には，滑動地すべり地と考えられる変化領域は認められなかった(図-3)．

今回の調査では、地すべりの変位を観測することができなかった．このことの原因としては，地表変位画像の作成を行った画像ペアの観測間隔が軌道 1 周期（44 日）と短いものであったため，画像範囲内の大規模な地すべりがほとんど滑動していなかったためであると考えられる．また，干渉性の良い画像ペアがほとんど得られなかった理由としては，①地形が急峻であること，②積雪期の画像が解析に供せないこと，そして，③JERS-1 の軌道のふらつきによる基線長の長大化，等が挙げられる．特に，今回干渉画像が得られたペアは，いずれも基線長 200m以下の画像ペアであり、InSAR を活用するためには軌道情報を厳密に管理し、確実に干渉できる SAR データが取得できる必要がある。今後の SAR 搭載衛星（たとえば 2002 年打ち上げ予定の ALOS）への要求仕様の一つとなることが考えられる。

現時点では，L バンド SAR を搭載した衛星が存在しないので，今後も JERS-1 の過去のデータによって検討を続ける予定である．平成 11 年度の検討では大規模な地すべり地が密集した姫川流域を調査対象範囲とした．その結果，前述の通り，基線長がきわめて短い画像ペアでなければ解析不能であることが判明した．今後は，基線長が 200m を下回る画像ペアを選び出し，InSAR によって滑動地すべりの抽出を試みて行きたいと考えている．

4. 主な研究成果物

平成１２年度砂防学会研究報告会発表予定

（南、清水、山越、福嶋）

1.14　数値標高モデル地図を用いた地すべり地の抽出技術に関する調査

研究期間：平 11～平 13
担当：地すべり研究室

【要旨】
地すべり研究室では平成 11 年度から数値標高モデル（DEM）を用いた斜面の危険度評価技術に関する調査を行っている。平成 11 年度は、DEM を用いて地すべり地を自動抽出することを目的として、対象範囲をグリッドで区切って地すべりを含むグリッドを抽出する方法と、地形分類を行って地すべり地形を抽出する方法を試みた。その結果、地すべりを含むグリッドを抽出する方法では、傾斜とラプラシアンの組み合わせが地すべり地形抽出の指標となりうることが示唆された。また、地形分類によって地すべり地形を抽出する方法では、滑落崖と緩斜面の区分をすることができた。

１．研究目的

地すべり地形の分布図は、災害予防や合理的・経済的な防災・開発計画の基礎資料のひとつとなるものである。現在、地すべり地の抽出は、熟練した技術者が空中写真を判読して行っている。しかし、この方法は、判読者の熟練度や経験によって結果が異なり、また、広域を対象とした場合に膨大な時間と労力が必要となる。一方、最近のコンピュータの性能向上によって、数値標高モデル(DEM)の作成と取り扱いが容易となり、DEM による地形解析を行う環境が整ってきている。地形解析に DEM を用いた場合、地形を定量的に扱うために客観性が高く、また、一度アルゴリズムを作成すれば広範囲を自動で解析できる利点がある。平成 11 年度は、DEM を用いた地すべり自動抽出手法の検討を目的として、対象範囲をグリッドで区切って地すべりを含むグリッドを抽出する方法と、地形分類によって地すべり地形を抽出する方法を試みた。

２．研究方法

２．１　地すべりを含むグリッドの抽出手法の検討

滑落崖、移動土塊の緩斜面などは地すべり地の特徴的な地形であり、DEM から計算する地形量によって表現することができると考えられる。平成 11 年度は、基本的な地形量である傾斜とラプラシアンの組み合わせによって、地すべり地形を抽出することを試みた。

調査対象地域の岩手山周辺地域の松川地すべりを含むように 5000m×5000m の区域を設定し、500m×500m のグリッドに切った（図１）。さらに、各グリッドについて 10m メッシュの DEM から傾斜とラプラシアンを計算し、傾斜を縦軸、ラプラシアンを横軸にして散布図（図２）を作成し、地すべり抽出手法の検討を行った。。

２．２　地すべり地抽出のための地形分類

一般的に地形分類は、まず形態によって地表面を区分し、地形学的な知見によってその区分を統合し、類型を整理して地形分類とする、といった手順をとることが多い。形態による地表面区分の方法の一つとして、「地表面は、形態的特徴を等しくする部分がさまざまな程度の形態的不連続を持って接することにより構成される」という morphological mapping の考えがある。平成 11 年度は地形分類の基礎的部分の形態による地表面区分試みることとし、DEM の処理に morphological mapping の考えを適用することによっておこなった。

調査対象地域の 10m メッシュ DEM の各メッシュ点における法線ベクトルを計算し、隣接するメッシュ点との法線ベクトルのなす角がしきい値より小さい場合、それらの点は同一の地形単位に属するとし、大きい場

合、異なる地形単位に属するとして地表面を区分した。

3．研究結果

3．1　メッシュに区切っての地すべり地判定

図2のグラフは、図1に示された 10×10 のグリッドについて、傾斜を縦軸、ラプラシアンを横軸とって散布図を作成したものである。

左（西）から1列目の下（南）から6グリッド、及び下（南）から6行の左（西）から5グリッドは、傾斜が50ー60° と急な値が多く、かつラプラシアンの分散が大きく、散布図の形状が逆三角形をなすような分布を示している。これらは、松川地すべりの滑落崖部であり、特徴的な分布をなしている。また、滑落崖部の上（北）側には、傾斜が10ー30° と緩い範囲にあり、ラプラシアンの分散も±0.1内外におさまるような、散布図の形状でいうとグラフの原点付近に集中するものが連続するエリアがある。この範囲は非地すべり地域に該当する。それに対し、松川地すべりのブロック内では、傾斜は10ー40° と比較的緩い範囲にあるが、ラプラシアンの値は非地すべり域と比較してややばらついており、傾斜とラプラシアンを用いた解析が地すべり地形の指標となりうることが示唆される。今後は、他の地区への適用や、メッシュ間隔の妥当性などについて、検討していく必要がある。

3．2　地すべり地抽出のための地形分類

図1の調査対象地域全域について morphological mapping を行った結果の例を図3に示す。調査地域が多数の細かい地形単位に区分され、それぞれの地形単位を8階調に塗り分けて表示した。松川地すべりでは、滑落崖と緩斜面の区分ができているが、地すべりの緩斜面と溶岩流地形の緩斜面がつながっており、しきい値の設定が難しいことが明らかになった。今後の地すべり抽出のためには、各地形単位に地形学的な情報を与えて統合を行い、地形分類を行う必要がある。

（綱木、山越、杉本）

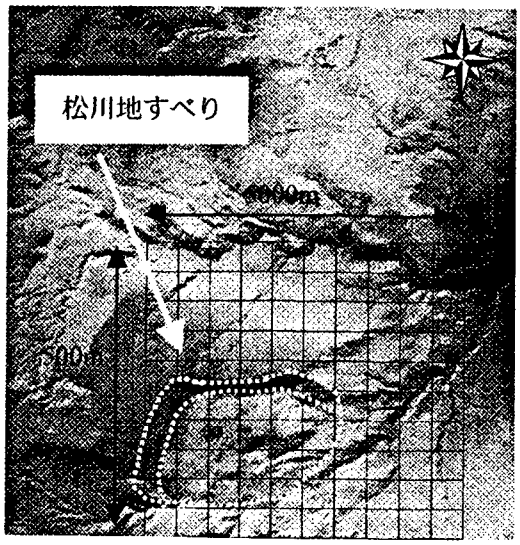


図.1　岩出山周辺地域


図2　傾斜-ラプラシアン図


図3　morphological mapping 結果の例

耐震設計の体系化に関する研究

2．耐震設計の体系化に関する研究

研究期間：平成 10～14 年度
プロジェクトリーダー：構造橋梁部長
岡原美知夫

1. 研究の背景：

わが国は世界でも有数の地震国であり、これまでに関東大震災（1923 年）、新潟地震（1964 年）、宮城県沖地震（1978 年）、日本海中部地震（1983 年）、阪神淡路大震災（1995 年）を始めとする数多くの大きな地震被害を受けてきている。そして、これらの地震被害の経験に基づいて、国土形成の基幹となる社会基盤については、耐震設計基準の整備、地震防災計画の策定等に資する研究開発が積極的に進められ、耐震性あるいは防災性の向上が図られてきている。しかし、近年、阪神淡路大震災、トルコ地震（1999 年）あるいは台湾地震（1999 年）で活断層の重要性が再認識され、このため、活断層の影響を考慮した上で大規模な地震に対して安全な社会基盤を構築していくことが求められている。また、経済性を考慮した公共構造物の震後の効果的な運用のためには、個々の構造物の耐震性向上のみならず、各種の構造物間の防災機能の連携がとれた都市あるいは地域としての防災機能の向上が求められている。

しかしながら、現在の公共構造物の耐震設計においては、活断層の影響（地震動、断層変位等）を定量的に予測して、設計に反映するまでには至っていない。また、各構造物間においても、設計で考慮すべき地震動さらには構造物の重要度に応じた耐震性能の水準について横断的整合がとられていないため、地域的な防災の観点から統一的な取り扱いが困難となっている。さらに、社会基盤の整備におけるコスト縮減等の行政ニーズも高く、それに対応した合理的な耐震設計基準への展開が必要とされている。

このため、本重点研究プロジェクトでは、各種の公共構造物の耐震設計において、工学的な視点から活断層を認定すること、また設計地震動に対する活断層の影響を評価すること、さらに配筋方法などを細かに規定している現在の仕様規定型の設計基準をコスト縮減や技術者の創意工夫を考えて設計の自由度を高めた性能規定型の基準に発展させることといった各種の構造物の耐震設計における共通的な課題を体系的な視点より解明することが必要である。また、各種の構造物の耐震性の水準を同じ視点で評価できるようにするといった各種の土木構造物の耐震性水準の横断的かつ体系的な整合を図ることが必要である。

2. 研究の目的：

①活断層の定量的認定基準を提示し、これに基づいて活断層の特性等を考慮した設計地震動の設定手法を提示するとともに、歴史地震と活断層の両者を考慮した地震ハザードマップの作成技術を提示し、試案を提示する。

②道路橋における性能規定型の耐震設計基準の試案を提示し、さらに国際整合化を図った耐震設計基準の試案を提示する。

③各種構造物の耐震性能の水準を横断的に評価する手法を提示し、これに基づいて構造物の重要度に応じて耐震性能の水準の横断的整合を図る手法を提示する。

3. これまでの研究成果：

(1)活断層を考慮した地震動特性および地震危険度（ハザードマップ）

①活断層の客観的認定および伏在断層による地表変位に関する研究

山間部の断層地域を対象にした客観的線状模様抽出法を開発し、断層位置の客観的認定を目的とした空中写

真判読の留意点と記載方法をとりまとめた。

②大規模地震を想定した設計地震動の設定手法に関する研究

断層を直接的に考慮した地震動の推定手法を開発し、将来発生する地震を想定した場合に予測できないパラメータについて種々の断層モデルを系統的に設定することにより、推定地震動の変動特性を明らかにした。

③地震ハザードマップの作成手法の開発に関する研究

深部地盤の物性把握の手法として、S波微動探査法が有効であることを確認した。また、地盤深部までの沖・洪積層の堆積形状(基盤の形状)と物性分布によって、地震動の振幅分布が大きく変化することが判明した。また、活断層の最新活動時期、活動間隔の情報を考慮した地震危険度解析を行い、活断層に起因する地震の発生確率の評価方法が地震危険度に及ぼす影響を明らかにした。

(2)耐震設計の性能規定化

①耐震設計の性能規定化に関する研究

構造物に求められる耐震設計上の要求性能ならびに限界状態を安全性、修復性および使用性の観点から明確にする方法を検討するとともに、限界状態を照査するための指標を明らかにした。

②地盤－基礎系を含む全体系を考慮した構造物の耐震性能の実験的検証技術に関する研究

上部構造を数値モデル、地盤及び基礎構造を実際の模型とするハイブリッド振動実験を実施することにより、弾性域を対象として、上部構造の応答の影響を考慮した地盤－基礎構造系の地震時挙動を系統的に明らかにした。

(3)耐震性水準の横断的整合化および合理的設定（パフォーマンスマトリクス）

①公共土木施設の耐震性水準の横断的整合に関する研究

道路・河川管理施設等についてパフォーマンスマトリクスの具体化を図ることを目的に、社会基盤施設の耐震性水準の概念整理、及び各種構造物の耐震設計体系(入力地震動、計算モデル、性能評価パラメータ等)の横断的な比較分析を行った。

－耐震設計の体系化に関する研究－

個別研究課題目次

2.1　活断層の客観的認定および伏在断層による地表変位に関する研究…… （地　質　研　究　室）… 50

2.2　大規模地震を想定した設計地震動の設定手法に関する研究…… （振　動　研　究　室）… 52

2.3.1 地震ハザードマップの作成手法の開発に関する研究（その１）…… （地　質　研　究　室）… 54

2.3.2 地震ハザードマップの作成手法の開発に関する研究（その２）…… （振　動　研　究　室）… 56

2.4.1 耐震設計の性能規定化に関する研究（その１）…… （基　礎　研　究　室）… 58

2.4.2 耐震設計の性能規定化に関する研究（その２）…… （耐　震　研　究　室）… 64

2.5　地盤－基礎系を含む全体系を考慮した構造物の耐震性能の実験的検証技術に関する研究…… （振　動　研　究　室）… 66

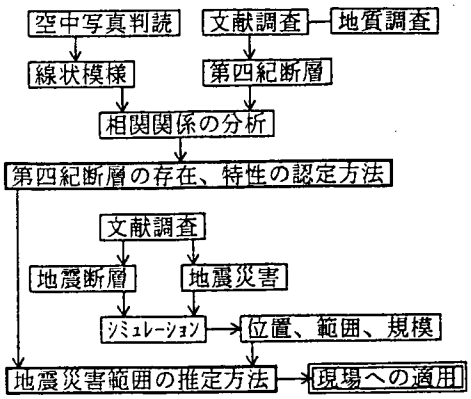
2.6　公共土木施設の耐震性水準の横断的整合に関する研究…… （防　災　技　術　課）… 68

2.1　活断層の客観的認定および伏在断層による地表変位に関する研究

研究期間：平８～平１１
担　　当：地質研究室

【要旨】
本研究は、活断層の地盤変位に対する土木構造物の防災を目指している。１１年度は活断層詳細位置の客観的認定を目的にした空中写真判読結果の記載法および、写真判読上の留意点をとりまとめた。また伏在断層の活動に伴い生じる地表変位の大きさの把握を目的に、１０年度に作成した阪神地区における沖・洪積層地盤物性値モデルおよび、１１年度に作成した単純な水平構造をもつ仮想沖・洪積層地盤物性値モデルについて、伏在断層が運動した場合の地表面に現れる変位量を２次元有限要素法により計算した。いずれのモデルにおいても弾性変形を仮定した場合と弾塑性変形を仮定した場合の結果に大差がなかった。

全体計画のイメージ図



１．研究目的

活断層は内陸直下型地震の震源となるため、地震防災の観点からその活動性、詳細な分布位置、活動した場合の影響等に関する検討を行う必要がある。内陸直下型地震に伴う土木構造物の災害としては、地盤振動によるものと地盤変位によるものに分けることが出来る。地盤振動による災害に対しては耐震設計によって対処がなされるが、地盤変位による災害に対しては、活断層の直上への建設を避ける以外に対処方法がない。

そこで本研究は、活断層の地盤変位に対する土木構造物の防災を目指し、具体的には断層が活動した場合に地盤変位が生じる詳細位置、および変位の大きさの把握を目的にしている。

２．研究方法

2.1　活断層を対象にした空中写真判読法

活断層の空中写真判読においては、断層変位に起因する疑いがある地形に注目し、その連続を「リニアメント」として線状に図に記載することが多い。このリニアメントが活断層である疑いの度合いは様々で、かつ判読者によってその判断の基準は異なる。活断層の客観的な認定基準を作成するにあたって、現時点においては判読者が何を拠り所にしてリニアメントを認定したのかを明確に図示し、認定の根拠を第三者が追認できる成果図が望まれる。そこで、８年度から１０年度の研究などをふまえて、活断層詳細位置の客観的認定を目的にした空中写真判読結果の記載法および、写真判読上の留意点をとりまとめた。

2.2　伏在断層の活動に伴う地表面変位シミュレーション

１０年度に作成した阪神地区における沖・洪積層地盤物性値モデルに対する弾塑性変形を考慮した計算では、新たに粘着力と断層摩擦角を計算し、２次元有限要素法による計算に使用した。次に、仮想沖・洪積層地盤物性値モデルの作成は次のように行った。まず、日本各地に存在する沖・洪積平野の物理探査の文献をできるだけ収集し、S 波速度の深度分布についてその全データを深度で正規化する処理を行った。それらの結果をもとに平均的な S 波速度分布を決定し、仮想モデルを作成した。結果として S 波速度構造は基盤を含め５層に分けることができた。地表面変位量の計算に必要なその他の物性値は経験式を用いて求めた。また、阪神地区のモデルとの比較を行うために、仮想モデルの厚さを 2,000m とした。阪神地区のモデルは弾塑性有限要素法、仮想モデルについては弾性有限要素法、弾塑性有限要素法を使用した。地表面変位の計算を実施するに当たって、伏在断層を逆断層とし、傾斜角を 50°、70°、90°、強制変位を 1.5m、3.0m、6.0m の全部で９ケースの計算を実施した。

３．研究結果

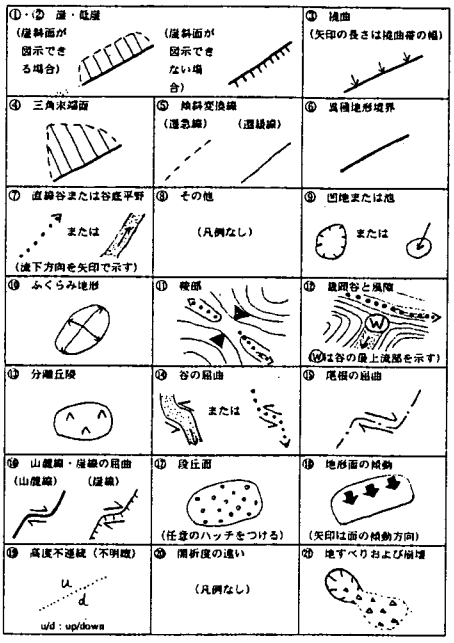
3.1　活断層を対象にした空中写真判読法

空中写真判読において注目される、断層変位に起因する疑いのある地形を、リニアメントを構成する線的な地形（表１の①～⑧）とその他の地形（表１の⑨～⑳）に分類し、記載用の凡例を作成した（表１）。そし

て典型的な横ずれ断層である丹那断層と典型的な逆断層である市之瀬断層において、凡例に従った空中写真判読を行った結果、凡例は妥当なものであることがわかった。丹那断層の判読結果を図１に示す。またこれまでの判読経験を基に、活断層の空中写真判読における留意点をとりまとめた。以下に主なものを列挙する。

・空中写真の縮尺は経験的に、1/40,000 および 1/20,000 程度を用いると良い。
・リニアメントの認定においては、通常の地形発達では説明しにくい地形あるいは変位基準のずれの存在に注意する。断層トレースは著しく湾曲する場合もあるので、（文字通り）直線性にとらわれすぎない。
・地震断層の出現位置（すなわち実際の断層位置）とリニアメントとの位置関係を検討した結果、空中写真判読による活断層位置の推定には誤差が存在し、位置の推定が困難な事例もある。また一般に横ずれ断層に比べて縦ずれ断層の方が、推定誤差が大きい傾向がある。

表１　空中写真判読結果の記載用凡例.



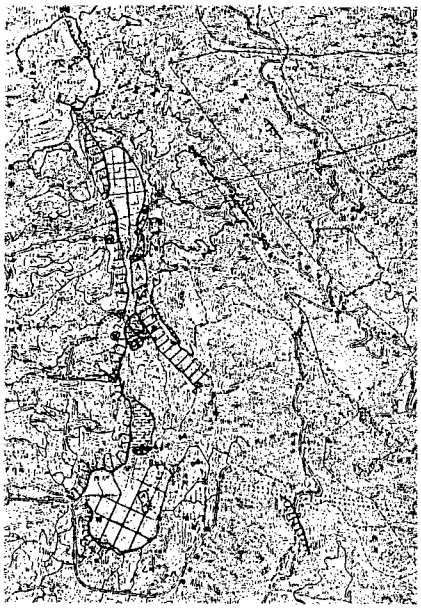


図１　判読結果記載例（丹那断層周辺）.

表２　地表面変位計算結果
（強制変位量 6.0m を与えた場合）.

モデル	解析	傾斜角度	合成変位(m)
阪神地区モデル	弾性解析	50° 逆断層	3.470
		70° 逆断層	3.893
		90°	3.849
	弾塑性解析	50° 逆断層	4.008
		70° 逆断層	4.212
		90°	4.114
仮想モデル	弾性解析	50° 逆断層	4.136
		70° 逆断層	4.370
		90°	4.077
	弾塑性解析	50° 逆断層	4.273
		70° 逆断層	4.466
		90°	4.164

3.2　伏在断層の活動に伴う地表面変位シミュレーション

日本各地の沖・洪積平野の S 波速度分布は深度で正規化するとばらつきが少なくなることから、S 波速度分布は絶対深度で決まっているわけではなく、相対深度で規定されていることが言える。地表面変位の計算の結果（表２）、次のようなことがわかった。仮想モデルでは、弾塑性変形を考慮しても 6.0m の強制変位をかけると最大で約 4.5m の変位量が現れること、阪神地区のモデルでも弾塑性変形を考慮しても 6.0m の強制変位をかけると最大で約 4.2m の変位量が現れ、弾性変形だけを考慮した１０年度の結果と比べて若干変位量が大きく、当初の予想と逆の結果となった。今回の弾塑性解析では時間項を考慮しておらず、これが差の見られなかった原因だと考えられる。また、弾塑性変形を考慮した解析で仮想モデルの結果と阪神地区の結果を比べると、仮想モデルの方が変位量が大きく出る結果となった。これはモデルの形状に影響されているものと考えられる。

４．主な研究成果物

松崎達二，黒木貴一，品川俊介，脇坂安彦：第四紀断層の地形的特徴と地質的特徴との比較，日本応用地質学会平成９年度研究発表会講演論文集，57-60, 1997.10.

黒木貴一，品川俊介：活断層起源の線状模様の認定方法－鞍部と地形境界線に着目した空中写真判読より－，土木技術資料，40-7, 62-67, 1998.7.

黒木貴一，品川俊介，脇坂安彦：活断層起源の線状模様の空中写真判読による認定方法の検討，土木研究所資料，3577 号，51p., 1999.2.

原田久也，脇坂安彦，品川俊介：活断層の構成地形の特徴，日本応用地質学会平成 10 年度研究発表会講演論文集，1-4, 1999.10.

梶川昌三，脇坂安彦：沖・洪積層下の伏在断層の運動による地表面変位の解析，日本応用地質学会平成 10 年度研究発表会講演論文集，5-8, 1999.10.

（脇坂、梶川、品川）

2.2　大規模地震を想定した設計地震動の設定手法に関する研究

研究期間：平 10～平 14
担当：　振動研究室

【要旨】
東京湾口、伊勢湾口等において超長大橋の建設が計画されているが、これらの地域は過去の大地震の震源近傍に位置し、極めて厳しい地震環境下にあるため、大規模地震を想定して設計地震動を設定する必要がある。一方、震源断層の破壊過程をモデル化して強震動を合成する、断層モデルを用いた地震動推定手法（以下、断層モデル手法）が提案されてきており、大規模地震の震源近傍で発生する強震動についてもその有効性が認識されつつある。本課題は、断層モデル手法の実用性を高め、その推定地震動に基づく設計地震動の設定手法を提案することを目的としている。１１年度は、断層モデル手法の実用性の向上を図るとともに、断層モデルの震源位置及びくい違い量分布を変化させて種々の断層モデルを系統的に設定することにより、推定地震動の変動を把握した。

１．研究目的

構造物の設計地震動は、計画地点において将来生じる可能性がある地震動に基づいて設定されるべきであるが、将来発生する地震がどのような震源特性を有しているのかを完全に予測することは困難である。１１年度は、予測できないパラメータについて種々のパターンを想定した断層モデルを設定し、それらの断層モデルを用いた場合の推定地震動の変動を把握することを目的とする。

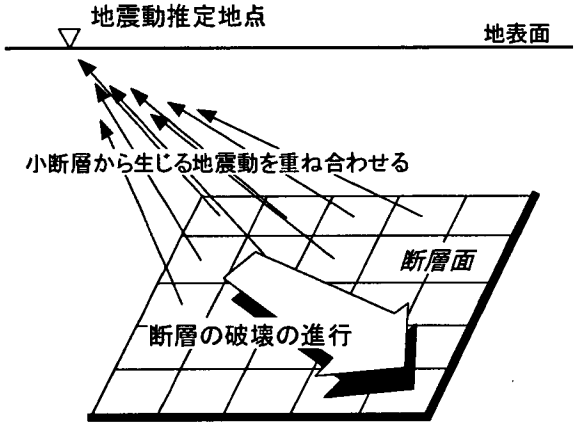


図-1　断層モデルを用いた地震動の推定

２．研究方法

２．１　断層モデル手法

地震動の推定には、比較的必要なデータが少なく任意の地点に適用できる手法として、統計的グリーン関数法を用いた。この手法は、地震記録の統計解析から、中小規模の地震による平均的な地震動（統計的グリーン関数）を作成し、それを重ね合わせることによって大規模地震の地震動を合成するものである。ここでは 1923 年関東地震（以下、単に関東地震とする）の断層モデルをもとに、観音崎地点における地震動を合成する。

２．２　関東地震の断層モデル

関東地震の断層モデルとしては、測地学的データと遠地の地震記録から逆解析で求められたものを用いた。このモデルでは、図-2 に示すように断層の長さ方向（東西方向）に 10、幅方向（南北方向）に 7 の合計 70 の小断層におけるくい違い量が求められており、破壊

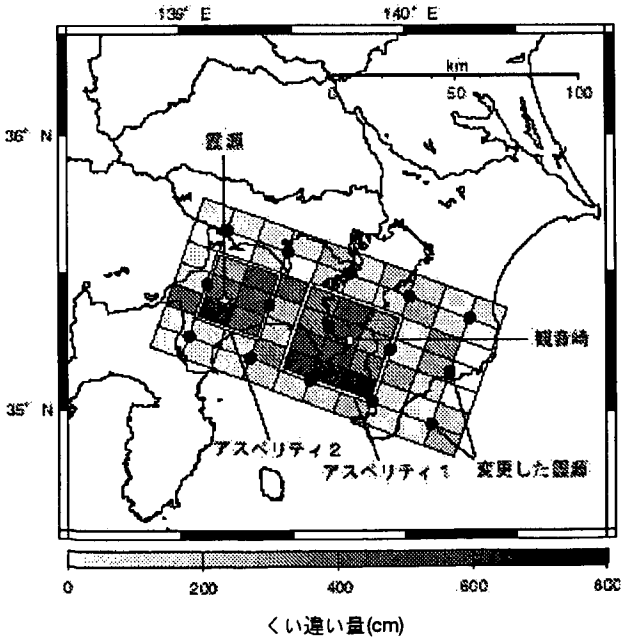


図-2　1923 年関東地震の断層モデルから抽出した矩形アスペリティと変更した震源位置（●）

は震源（図中の☆）から 3km/s の速度で同心円状に広がるとしている。

２．３　震源特性による推定地震動の変動

断層面の位置や大きさは図-2 に示したものと同一として、震源位置とアスペリティ（断層面の中でも特にくい違い量が大きい領域）の位置を系統的に変更した断層モデルを設定し、推定地震動の変動について検討を行った。

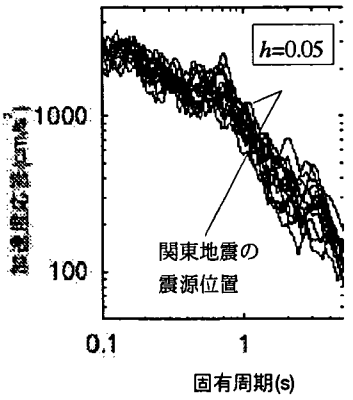


図-3　震源位置を変更した計算結果

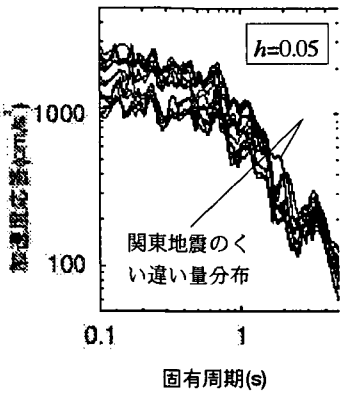


図-5　アスペリティ位置を変更した計算結果

３．研究結果

３．１　震源位置による推定地震動の変動

図-2 に●で示した震源から同心円状に破壊が進行する 15 ケースを想定した。ただし、くい違い量分布は関東地震のものを用いている。このときの推定地震動の加速度応答スペクトルを示すと図-3 のようになる。この図によると、短周期側よりも長周期側の方がやや変動幅が大きいものの、同じ固有周期で比較するとその変動幅は 3 倍程度である。また、関東地震の震源位置を用いた結果は、短周期側では変動幅の上限近くの応答値を示しているが、長周期側では 15 ケースの平均程度である。

３．２　アスペリティ位置による推定地震動の変動

各小断層によってくい違い量が異なる断層モデルから矩形のアスペリティを抽出する手順が提案されており、図-2 にはその手順に従って抽出した矩形アスペリティが示されている。この場合は大小 2 つのアスペリティが抽出されたため、大きい方のアスペリティをアスペリティ 1、小さい方をアスペリティ 2 と呼ぶことにする。予備的な検討の結果、アスペリティ 1 を断層幅方向（北北東－南南西方向）に移動させる影響は小さいことが明らかになったため、図-4 に示すように、アスペリティ 1 の断層幅方向の位置は固定した上で、系統的にアスペリティの位置を変化させた 18 ケースを想定した。これらのアスペリティ分布を用い、震源を関東地震の震源位置として推定した地震動の加速度応答スペクトルを比較したものが図-5 である。この図には、関東地震の不均一なくい違い量分布を用いた結果も示してあるが、これが他の 18 ケースをほぼ包絡していることが分かる。これは図-2 からも明らかなように、関東地震の際に断層面上でくい違い量の大きい領域が観音崎地点の周辺に集中していたことを意味している。矩形アスペリティを用いた 18 ケースの計算結果は、短周期側での変動がやや大きいが、全体的には同じ固有周期で比較するとその変動幅は 3 倍程度である。

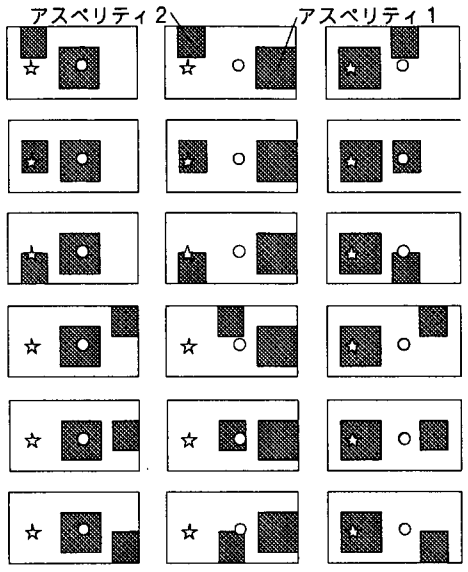


図-4　変更した矩形アスペリティ、震源(☆)、観音崎(○)の位置

４．主な研究成果物

1) Tamura, K., Nakao, Y. and Kataoka, S.: Developing seismic design ground motions for super long-span bridges, 土木研究所資料第 3694 号, 233-246, Nov. 1999.

2) Nakao, Y., Tamura, K. and Kataoka, S.: Effects of earthquake source parameters on estimated ground motions, 12th World Conference on Earthquake Engineering, No. 1985, Jan. 2000.

（田村、片岡、中尾、松本）

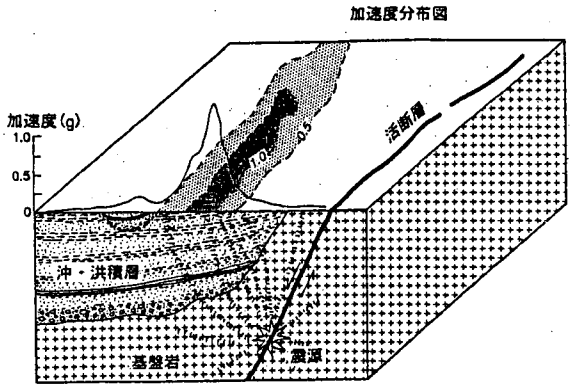
2.3.1　地震ハザードマップの作成手法の開発に関する研究（その１）

研究期間：平１１～平１４
担当：地質研究室

【要　旨】

本研究は地震防災対策に必要な地震ハザードマップの作成手法の確立を目指して行っている。１１年度は、地震ハザードマップ作成の基本情報となる地盤のモデル化を実施するため、比較的簡易で安価な手法である S 波微動探査法の特性および限界等を検討した。その結果、本探査法のアレー半径と探査深度限界の関係、および既存の深層ボーリングの検層結果等との比較により、本探査の精度、分解能等が明らかとなった。また、深部の地盤構造・物性構造が、エッジ効果・焦点効果などの地震波の増幅にどのような影響を及ぼすのかを二次元の地盤モデルを用いて地震応答計算により検討した結果、基盤の形状により、地震動の振幅分布が大きく変化することが明らかとなった。

地震ハザードマップのイメージ



１．研究目的

地上構造物や地下埋設物に対する地震防災対策を的確に実施するためには、あらかじめ、災害因子となる地震動が、どのように分布するのかを想定しておく必要がある。従来より過去に発生した地震の記録に基づくハザードマップは種々提案されているが、現在のところ、起震断層としての活断層の評価法、深部地盤のモデル化手法、活断層の活動度の評価法等が確立されていないため、活断層を考慮したハザードマップは作成されていない。本研究は、前記の諸要因を明らかにした上で、過去に発生した地震および活断層の両者を考慮したハザードマップ作成手法を開発することを目的とするものである。

２．研究方法

2.1 長周期 S 波微動探査

本研究では S 波微動探査法の特性や限界等を、既存の深層ボーリングの検層結果との比較により検証することを目的とした。今回は既存の深層ボーリングとして神戸市にある K-1 ボーリングを選定し、このポイントを中心として探査を実施した。微動探査法における観測は、地震計を面的に展開したアレー観測で行われる。アレーの形状は正三角形で、中心点と頂点に地震計とデータレコーダーを設置する。配置するアレーは１０点の観測点からなる３重の多重三角形アレーで、アレーの規模を変えて次の三種類を設定した。KBL アレー：半径＝1,600m、800m、400m、KBM アレー：半径＝400m、200m、100m、KBS アレー：半径＝100m、50m、25m。観測したデータを使って、分散曲線を計算し、得られた曲線から地下構造を S 波速度の深さ分布として推定した。

2.2 地震応答計算

地震応答計算を行う際の基盤モデルの構造（形状）としては、鉛直型、逆断層型、正断層型、階段型などを設定し、堆積層の構造としては、水平、盆状、堆積構造（地層の枚数）を考慮した。

3．研究結果

3.1 長周期S波微動探査

S 波速度構造を推定したところ図１のような結果となった。この結果をもとに次の評価を行った。１)アレー半径と探査深度の関係、２)層区分の分解能、３)S 波速度の分解能、４)S 波速度構造の探査精度、５)低速度層検出の分解能・精度。これらの評価の結果、次のようなことが明らかとなった。まず、アレー半径が大きくなるに従って波長・探査深度は大きくなる傾向にはあるが、必ずしも比例関係にはなく、最大でもアレー半径 1,600m に対して探査深度は約 1,300m 程度となることがわかった。層区分の分解能は、浅層部（0～200m）でその場所の深さに対して約 20%～35%、中層部（200～1,000m）で約 15%、深層部（1,000～3,000m）で約８%であった。S 波速度の分解能は浅層部、中層部、深層部ともにその場所の S 波速度に対して約 10%であった。S 波速度構造の探査精度は K-1 ボーリングの検層結果との比較から、浅層部はその場所の S 波速度の３～26%、中層部は１～12%であった。深層部では検層に現れている低速度層を微動探査では検出できていないが、浅部の数 m の低速度層は小規模アレーで検出できることが明らかとなった。1995 年兵庫県南部地震以来、深部の地下構造のモデル化が緊急の課題となっているが、微動探査では、低速度層が検出できなかったという不利な点はあるものの、分解能・精度ともに、十分実用に耐えうる結果が出たものと考えられる。

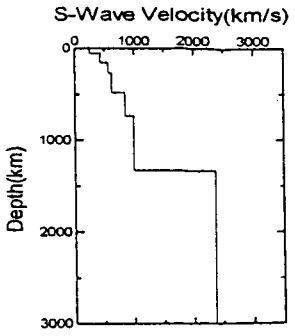


図１　微動探査によって推定された S波速度構造.

3.2 地震応答計算

研究の結果、堆積盆地端部（エッジ）で生じる２次生成波と下方からの入射波による干渉により、基盤の形状にかかわりなくエッジの近傍で顕著な増幅効果を生むが、エッジから遠ざかる部分での振幅分布はその形状に大きく左右されることが明らかとなった。また、基盤変曲部による波線の焦点効果は基盤の形状により現れるものと現れないものが見られた。また、エッジ効果、焦点効果の両方が異なる場所で現れる場合もあることが明らかとなった（図２）。また、震源距離の違い、下方からの平面波入射、点震源、線震源など断層モデルによる違いでも異なった結果が出てくることが明らかとなった。

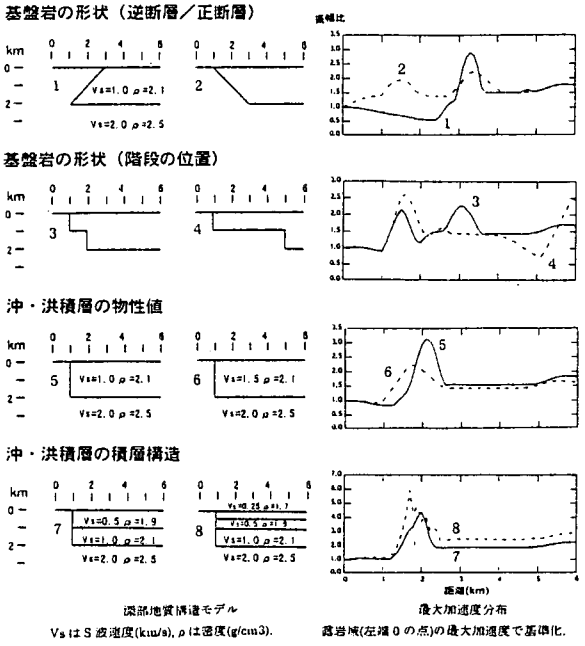


図２　２次元モデルの違いによる地震応答計算結果.
（グラフの実線は左，破線は右のモデルによる結果.）

4．主な研究成果物

1)久保田・趙・脇坂・梶川，深部および表層地質特性と地震動，土木学会第２５回地震工学研究発表会講演論文集，pp.193-196，1999 年７月.

2)久保田・趙・脇坂・梶川，地震応答特性と地質構造探査の精度について，物理探査学会第 101 回学術講演会論文集，pp.64-68，1999 年.

（脇坂、梶川、品川）

2.3.2　地震ハザードマップの作成手法の開発に関する研究（その２）

研究期間：平１０～平１４
担　当　：振動研究室

【要旨】

合理的な地震防災計画の策定や設計地震動の設定のためには、地震動特性の地域性を適切に考慮する必要がある。現行の各種耐震設計基準類では、既往のハザードマップにより地震動特性の地域性を考慮し、設計地震動を定めている。既往のハザードマップ作成に用いられてきた地震情報は、計器観測による過去百年程度の地震情報及び過去千数百年の歴史地震情報であるが、数百年から数千年以上とされる活断層の地震発生間隔を考慮すれば、十分な期間の情報が用いられてきたとは言えない。本課題は、既往の地震情報とともに、近年、蓄積されつつある活断層の情報を考慮した合理的なハザードマップ作成手法を開発することを目的とする。１１年度は、活断層の最新活動時期、活動間隔等の情報を考慮した地震危険度解析を行い、活断層に起因する地震の発生確率の評価方法が地震危険度に及ぼす影響を明らかにした。

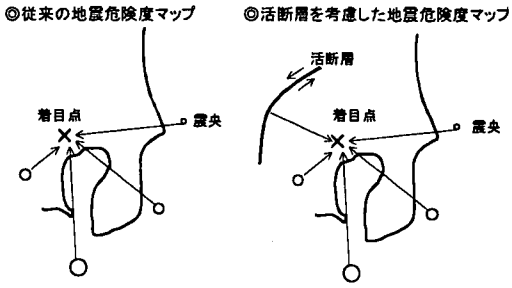


図-1　過去の地震情報と活断層情報を考慮した地震危険度解析

１．研究目的

１１年度は、活断層に起因する地震の発生確率の妥当な評価方法を開発するために必要な、地震発生確率の評価方法の特性の把握を目的として、２種類の代表的な評価方法を用いた地震危険度の試算を行うことにより、評価方法の違いが試算結果に及ぼす影響について検討を行った。

２．研究方法

本研究では、図-2 に示す地点の地震危険度を試算するものとし、活断層としては試算地点から半径 300km 以内に位置する松田（1995）による起震断層を考慮した。起震断層に起因する地震の発生確率の評価方法としては、次に示す（１）及び（２）の方法を用いた。

（１）　起震断層の活動間隔と最新活動時期を用いて対数正規分布により地震の発生確率を評価

（２）　起震断層に起因する地震の発生確率を、地震の年平均発生確率を用いてポアソン分布で評価

ここで、（１）及び（２）の方法により地震発生確率を算定する際に用いた起震断層の情報の例を表-1 に示す。表中の起震断層の活動間隔及び最新活動時期は、松田（1995）によるものである。また、試算地点に生じる地震動強度の推定には安中ら（1988）の距離減衰式を用い、距離減衰式を導出した際の対数標準偏差をばらつきとする対数正規分布を仮定することにより、距離減衰式に含まれるばらつきを考慮した。

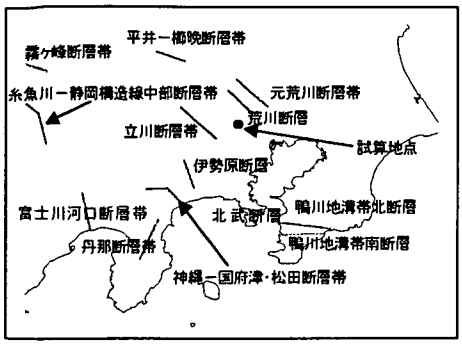


図-2　危険度試算地点と起震断層

表-1　起震断層の活動間隔と最新活動時期（松田 1995）

起震断層名	地震規模	活動間隔 $Tr\times10^3$	最新活動時期 $Td\times10^3$	Td／Tr
鴨川地溝帯北断層	7.3	2.3	10.0	4.35
鴨川地溝帯南断層	7.2	2.1	6.0	2.86
平井－櫛曉断層帯	7.0	3.2	10.0	3.13
富士川河口断層帯	7.0	0.3	6.0	20.0
神縄・国府津－松田断層帯	7.2	0.4	6.0	15.0
伊勢原断層帯	7.0	3.2	6.0	1.88
立川断層帯	7.3	4.8	1.4	0.29
丹那断層帯	7.3	0.5	0.06	0.12
北武断層帯	6.6	0.2	1.0	5.0
元荒川断層帯	7.2	4.1	5.0	1.22
荒川断層帯	7.0	3.2	80.0	25.0
糸魚川－静岡構造線中部断層帯	8.2	1.8	1.8	1.0
霧ヶ峰断層帯	7.0	0.3	130	433

3．研究結果

図-3 に試算地点における地震動強度と年超過確率、再現期間の関係を示す。また、図-4 に、算出された年超過確率に対する、起震断層ごとの貢献度を示す。図中には貢献度の大きな起震断層について、その名称を示した。ここで、貢献度とは、試算地点において起震断層ごとに算出される年超過確率が、起震断層の年超過確率の総和に占める割合であり、試算地点の危険度に対する起震断層ごとの影響の度合いを表す指標である。

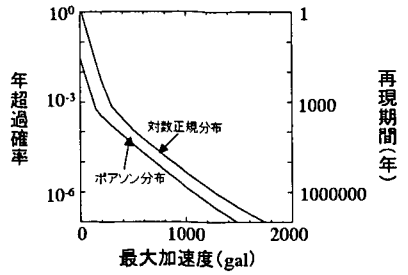


図-3　対数正規分布とポアソン分布

図-3 から、起震断層の地震発生確率に対数正規分布を仮定した場合は、ポアソン分布の場合に比べ、年超過確率が大きくなっており、再現期間が1000年程度以下と短い領域では、その差が大きくなっていることがわかる。

また、図-4 から、対数正規分布とポアソン分布を仮定した場合の貢献度を比較すると、対数正規分布を仮定した場合には、起震断層ごとの貢献度の差が大きく、特定の起震断層が試算地点の危険度に大きな影響を及ぼしていることがわかる。それに対し、ポアソン分布を仮定した場合は、多くの起震断層が試算地点の危険度に同程度の影響を及ぼしていることがわかる。起震断層の地震発生確率に対数正規分布を仮定した場合には、元荒川断層帯、立川断層帯の貢献度が特に大きい。ここで、起震断層の地震発生確率に対数正規分布を仮定した場合の、最新活動時期からの経過時間と年地震発生確率の関係を図-5 に示す。図から、活動間隔が小さいほど地震発生確率が大きく、最新活動時期からの経過時間が活動間隔の１～４倍程度となる領域で地震発生確率が大きくなっていることがわかる。元荒川断層、立川断層の活動間隔は他の起震断層に対して小さくないが、最新活動時期からの経過時間が大きな地震発生確率を与える領域にあり、また、試算地点の近くに位置するため、貢献度が大きくなったことがわかる。一方、起震断層の地震発生確率にポアソン分布を仮定した場合には、活動間隔が短い北武断層帯、神縄－国府津・松田断層帯、富士川河口断層帯等が比較的大きな貢献度を与えていることがわかる。以上から、ポアソン分布を仮定した場合には、活動間隔が評価される危険度に大きな影響を及ぼしているのに対し、対数正規分布を仮定した場合には、最新活動時期からの経過時間が活動間隔の１～４倍程度の領域にあり、試算地点に近い起震断層の危険度が大きく評価される試算結果を得た。

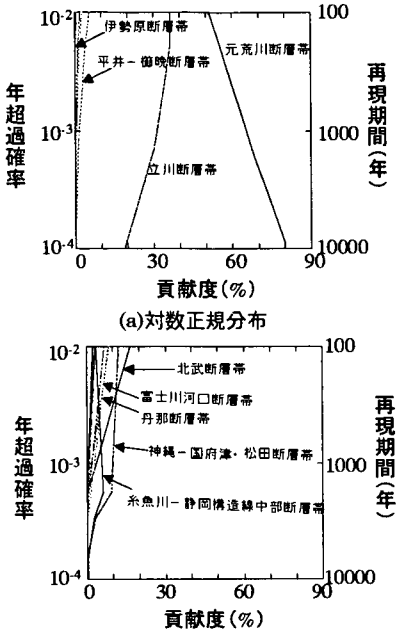


図-4　起震断層ごとの貢献度

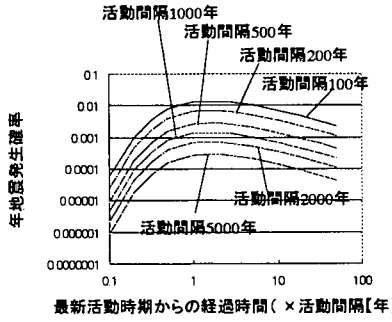


図-5　対数正規分布を仮定した地震発生確率

今後は、このような地震発生確率の評価方法の特性や、起震断層に対して推定されている活動間隔や最新活動時期の精度等に配慮し、妥当な地震発生確率の評価方法について検討する予定である。

4．主な研究成果物

- 松本俊輔他：メッシュ状の地震活動域を用いた関東地方の地震危険度の試算（１）（投稿中）、第 55 回年次学術講演会概要集、平成 12 年９月
- 中尾吉宏他：メッシュ状の地震活動域を用いた関東地方の地震危険度の試算（２）（投稿中）、同上

【参考文献】１）松田時彦：陸上活断層…、活断層研究、13、1995、２）Annaka, T. et al : A Probabilistic Model …, Proc. of 9th World Conference on Earthquake Engineering Vol. II , 1988

（田村、片岡、中尾）

2.4.1　耐震設計の性能規定化に関する研究（その１）

研究期間：平11～平14

担当研究室：基礎研究室

【要旨】

本研究は，橋梁基礎に対する耐震設計の自由度を高め，新しい技術や設計者の創意・工夫を反映することが可能な基準体系の導入するために，橋に要求される耐震性能を安全性，修復性，供用性の観点から明確にし，性能を照査する手法として国際標準となりつつある性能照査型設計法を導入することを目的とするものである．また，基礎の場合は荷重に対する抵抗要素に部材と地盤の両者を持つため，両者の材料の設計定数のばらつきをバランス良く部分安全係数に反映させる手法の開発を併せて行う．11年度は，現在の道路橋示方書の条文，解説を耐震性能の観点から分析，整理するとともに，海外における構造物の設計基準，規格における耐震性能や部分安全係数設計法や荷重抵抗係数設計法の書式に関して整理を行った．

1．はじめに

現在，道路橋示方書も，世界的な流れである性能照査への移行と，限界状態設計法の導入を目指して検討が行われている．性能照査においては，構造物の要求性能が明示され，それを検証するための，いくつかの適した照査法や構造細目が提示されることになる．したがって，各国の橋梁に関する基準がどのようなことを要求性能とし，どのような照査法や構造細目を規定しているのかを比較分析することは，その作業を進めるにあたって有意義なことと考えられる．そこで，各国の橋梁下部構造に関係する規格・基準類（以下，コードという）を対象として，耐震設計上の規定および要求性能の比較分析を行った．ここでは，以下に示す5基準を比較の対象とした．以下，本文では，[　]内に示す略称で呼ぶこととする．

- United States of America : AASHTO LRFD Bridge Design Specifications　(1998, 2nd Edition) [AASHTO]
- State of California, US : Memo to Designers 20-1/ Seismic Design Methodology (1999), Caltrans Bridge Design Specifications (1990), Seismic Design Criteria, version1.1 (1999) [以上Caltrans]
- European Union : Draft prEN1990: Basis of Design (1999), Preliminary Draft EN1997-1: Geotechnical Design, Part 1 General Rules (1999) [以上, Draft EN], ENV1998: Design provisions for earthquake resistance of structures (1994) [ENV1998]
- New Zealand : TNZ Bridge Manual for Design and Evaluation (1994) [TNZ]
- Japan : 道路橋示方書 (1996) [道示]

2.　耐震設計における性能性能の比較

表-1に比較表を示す．比較表は，おもに，各コードの章，節のタイトルに着目して整理した．

2.1　耐震設計の基本（表-1, g）

AASHTOでは，中地震と大地震の2段階の耐震性能を明記している．Caltransは，崩壊の防止とじん性の確保を基本としている．ENV1998とTNZでは震後の交通機能をもって耐震設計の基本としている．一方，道示では，2段階に設定される橋の重要度に応じて要求される耐震性能が異なることを「耐震設計の基本」としている．

2.2　限界状態（表-1, h）と照査式（表-1, f）

ここでは，耐震性能を中心に，各コードの限界状態の比較を行う．

AASHTOでは，「Design Philosophy」として，4つの限界状態と，じん性，冗長性(リダンダンシー)および重要度を挙げている．ここに，限界状態は，供用限界状態，疲労限界状態，強度限界状態，極限事象限界状態である． 4つの限界状態のうち，地震の影響は，極限事象限界状態の照査のみに考慮されるため，要求される耐震性能としては，極限事象限界状態のみと解釈できる．一方で，AASHTOは，2.1に示したように2段階設計法を採用しているが，中地震と大地震のいずれもこの極限事象限界状態に対して照査をするのかどうかの実務上の運用は明らかではない．

また，AASHTOは，限界状態の照査に荷重抵抗係数設計法を採用しており，照査式は次式のように記述される．

$\Sigma \eta_i \gamma_i Q_i \leqq \phi R_n = R_f$，ここに，$\eta_i = \eta_D \eta_R \eta_I \geqq 0.95$，または $\eta_i = 1/(\eta_D \eta_R \eta_I) \leqq 1.0$

ここに，

Q_i ： 荷重効果，γ_i荷重係数
η_D ： じん性に係わる係数，η_R：冗長性に係わる係数，η_I：重要度に係わる係数
R_f ： 係数をかけられた抵抗力(設計抵抗力)，R_n：公称抵抗力
ϕ ： 抵抗係数(公称抵抗力にかける係数)

であり，じん性に係わる係数η_Dおよび冗長性に係わる係数η_Rは強度限界状態の照査に，また，重要度に係わる係数η_Iは極限事象限界の照査に用いられる．じん性と冗長性の効果をコードのなかに係数化していることは非常に優れていると考えられる．

Caltrans SDCはもともと「耐震規定」であるために，ここで記述されている設計思想は耐震的なものである．限界状態としては唯一「Collapse Limit State」を設定している．その意味するところは表-1，gに示すとおりである．じん性および冗長性を重視している点ではAASHTOと同じである．

Draft ENでは，EC0 (basis of Design)に「耐震設計」を除く設計思想が記述され，「耐震」に関してはEC8 (Design provisions for earthquake resistance of structures)に規定されている．Eurocodeは，部分係数設計法を採用しており，限界状態として使用限界状態と終局限界状態の二つを基本としている．地震に関しても，そのコンセプトに準じて，2つの限界状態を照査するものとしている．ただし，これに関しては，本城らの調査によれば[1)]，EC8のコードライターには，大地震に対して終局限界状態の照査を行えば中地震に対する使用限界の照査をする必要はないとの認識もあるようだ．

TNZは，Bridge Manualには明記されていないが，再現期間475年の終局限界状態対応の地震を考えているとされており，この1段階地震で想定した地震動より小さい場合と大きい場合に分けて耐震性能を明記している．

道示では，表-1，hに示すように，震後修復限界状態，安全限界状態の3つの限界状態を，橋の重要度A，Bの2種と組合せている．レベル1地震動に対しては，橋の重要度によらず無損傷であることとし，震後供用限界状態に対して照査している．レベル2地震動に対しては， B種の橋では，震後修復限界状態に対して，A種の橋では，安全限界状態に対して照査するものとしている．ここに，各限界状態のイメージを示すと，震後供用限界とは震後に橋は通常の供用が可能な限界，震後修復限界とは震後に橋の機能は速やかに回復可能であるとともに，部材等は修復して再利用が可能である限界，安全限界とは落橋が生じない限界といえる．

2.3 重要度（表-1，i）

橋の重要度の定義はそれぞれ異なるものの，Caltransを除き，いずれのコードでも2～3に区別されている．この重要度による区別をAASHTOでは設計用荷重算定式の中に重要度に関する係数として反映させている．ENV1998やTNZでは，重要度は「普通の橋」に対して想定する地震動の再現期間を増減することにより考慮しているが，設計実務上は「普通の橋」の設計地震力を増減することにより考慮している．Caltransはコード自体が「普通・標準橋」を対象にしているため，重要度に関する記述が無いと思われる．

これに対して，道示は，大地震時の設計地震力は橋の重要度よらず同一であるが，重要度に応じて照査すべき限界状態が異なっており，重要度ごとに許容塑性率の差をつけている．

2.4 地盤種別（表-1，j）

各コードとも2～6種類の地盤種別を設定している．これらは応答加速度スペクトルの違いとして設計地震力の評価に用いられる．

2.5 地域区分（表-1，k）

AASHTOでは，475年再現期待値ハザードマップ(供用期間50年の超過確率10%)に応じて地域係数(Seismic Zone)を1～4に区別している．この地域係数は要求される解析法や橋脚の細部設計や橋台や橋脚基礎の設計手順における違いとして利用される．Caltransでは，地域区分は特に記されていないが，活断層からの距離に応じて，設計に用いる標準加速度応答スペクトルを割り増すものとしている．これは，州の設計基準であるためとともに，過去の地震被害により活断層が把握されているためと考えられる．ENV1998では特に地域係数は設定されていないが，設計地盤加速度の中に，各国の地震危険度が反映される．TNZでは，ゾーン係数Zとして，0.4～0.8のコンター図が与えられている．

2.6 考慮する地震動（表-1，i）

AASHTOでは２段階の地震動が設定されている中地震は再現期間475年（設計供用期間50年として超過確率10%値）に基づくものであり，また，大地震は設計地震より再現期間の長い地震であり，例えば再現期間2,500年の地震は最大生起地震（MCE）と考えられている．Caltransもほぼ同様であるが，実務上は大地震に対する一段階設計である．ENV1998では，475年の再現期間の地震を大地震と設定，中地震については単に「適正な再現期間に対する地震活動を評価する」と述べられているだけである．これは前述のように，一般には大地震のみ考慮することで中地震の照査を省略できると考えているものと思われる．TNZの条文の中には，2.5に示したゾーン係数Zのコンターマップの根拠となる地震動の特性については明記されていないが，Park(1996)[2]によれば，「475年の再現期間」の1段階地震動と考えられている．しかし，リスク係数R=1.0の場合の再現期間RPは150年，R=1.3のときRP=250年となり，Parkのいう再現期間475年と一致せず，明らかでない．

道示では中地震，大地震の定義をそれぞれ橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動と，発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動としており，具体的な再現期間は明記されていない．

2.7 荷重低減係数（表-1，k）

じん性部材の非線形応答を考慮して弾性地震力を低減する方法として，AASHTOやENV1998では下部構造のタイプと橋の重要度より低減係数R値またはq値を定めている．これらの根拠は今後調査する必要がある．TNZでは許容塑性率(=1～6)を関数するとした非線形応答スペクトルを設計値としているため，荷重低減係数は設定されていない．また，Caltransは変位ベース設計法を採用しているため、荷重低減係数は設定されていない．一方，道示の場合はエネルギー一定側を適用して，荷重低減を設計水平震度の低減として評価している点が他のコードと異なっている．

荷重低減係数の設定法の差は，同一の設計地震力に対する応答の差に直接関係するため，各限界状態を定める工学指標とともに今後調査を進める必要がある．

2.8 Capacity designにおける過強度係数（表-1，l）

設計者が意図したじん性部材にのみ非線形挙動を生じさせるためには，非じん性部材とじん性部材の間に適切に強度の階層性を確保する必要がある．この必要な耐力比を規定する係数の1つに過強度係数がある．過強度係数とは，設計に用いる材料の強度と実際の構造物における材料強度の差が断面の耐力に与える影響を評価した係数で，代表的な例としては，基礎の設計に用いる荷重を設定する際に，橋脚の耐力に乗ずるも

のが挙げられる．この係数は，ENV1998では荷重低減係数q値と定量的に関連付けている．TNZではNZS4203:1992のcapacity design principlesを参照しているだけで，具体的な係数値は示されていない．AASHTOやCaltransでは，公称耐力を定数倍している．

道示では基礎の設計に用いる外力モーメント，および，水平力の評価において「橋脚の終局水平耐力の1.1倍」という規定があるものの，これは，橋脚耐力のばらつきや橋脚耐力の算出にかぶりコンクリートの負担分を無視していることを補正するために定められたものである．したがって，一般に，道示にはCapacity Designは導入されていないと理解されている．今後は基礎耐力と橋脚耐力のばらつきやおのおのの材料過強度を検討していく必要がある．

3．まとめ

性能規定の観点から，各国の構造設計に係わる規格・基準類を対象として，橋梁の耐震設計上の規定を比較し考察した．

(1) 「耐震設計の基本」としては，震後の供用性や，安全性，検査性に着目した例が多い．今後はそれをどう工学的指標で定量的に表現するかが課題である．

(2) AASHTO規定のように，これからの橋梁設計においては，じん性と冗長性の効果は，何らかの形で係数化されることが良いと考えられる．

(3) 「重要度」種別については，道示は耐震性能の違いに反映させているのに対し，その他の基準では設計地震力の大きさの違いに関連づけている．

(4) TNZを除き，いずれも2段階の地震動を設定している．しかし，現実に2段階の設計を実施しているのは道示のみで，その他は大地震時の照査により，中地震時の照査は実質省略していることが多い．2段階設計が1段階設計に比べて合理的ではあるが，実務上必要かどうか，橋の重要度も勘案して検討する必要がある．使用限界の照査が必要か否かは，使用限界の照査項目に依存すると考えられる．

(5) 道示を除き，いずれも再現期間を考慮しているという意味で，地震動を確率論的に評価している．ISO3010では，さらに一歩進んで，確率論に基づき地震動の不確定性を荷重係数に考慮している．国際的に見ると，従来のMCEによる確定論的危険度解析から確率論的解析の研究が進められているところから，設計地震動の評価に確率論を導入する動きが一層加速するものと思われる．また，最近の地震被害から既知の活断層の取り扱いが問題提起されているが，Caltransでは，活断層の影響を距離に応じて加速度応答スペクトルを割り増すことで反映している．

(6) AASHTOとDraft ENでは荷重低減係数それぞれ(R値，q値)を用いて弾性応答値を低減する方式を採用している．特に後者ではCapacity designのための過強度係数もq値の関数表示したところに特長がある．耐震分野での限界状態設計法導入にあたっては，荷重低減係数の評価，合理的な過強度係数の評価が必要である．

参考文献

1) 本城勇介：限界状態設計法による基礎構造物モデル設計コードの提案最終報告書，平成11年科学研究費補助金基盤研究（B）(1) 課題番号10555163，2000.

2) Park，R．：New Zealand Perspectives on Seismic Design of Bridges，Proceedings of 11WCEE，1996.

(福井，西谷，白戸)

表-1 耐震基準の比較

地域・国	The United States of America	State of California	European Union	New Zealand	Japan
a) 基準名称[略称]	AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (1998, 2nd Edition) [AASHTO]	Memo to Designers 20-1/ Seismic Design Methodology (1999) Caltrans Bridge Design Specifications (1990) [Caltrans BDS] Seismic Design Criteria, version1.1 (1999) [Caltrans SDC] [以上まとめて，Caltrans]	ENV1998: Design provisions for earthquake resistance of structures (1994) Part1-1: General rules [1] Part2: Bridges [2] [ENV1998]	TNZ Bridge Manual for Design and Evaluation (1994) [TNZ]	道路橋示方書（1996）： V耐震設計編
b) 機関	American Association of State Highways and Transportation Officials	State of California, Department of Transportation (Caltrans)	CEN (European Committee for Standardization)	Transit New Zealand	日本道路協会
c) 規格種別	国内任意規格	州強制規格	地域規格	国内強制規格	国内強制規格
d) 構造物種類	高速道路橋	道路橋(普通・標準橋に適用)	道路橋	道路橋	道路橋
e) 対象地域	北アメリカ（アメリカ・カナダ）	カリフォルニア州	欧州	ニュージーランド	日本
f) 設計法(照査式)	LRFD：Load Resistance Factor Design (荷重抵抗係数設計法)	[Caltrans BDS] Service Load Design＋Load Factor Design	Partial Factor Design (部分安全係数設計法)	Service Load Design＋Load Factor Design	許容応力度設計法 （震度法・地震時保有水平耐力法）
g) 耐震設計の基本	[3.10.1 General] 中地震：被害なしに部材の弾性範囲で抵抗すること． 大地震：橋梁の部分あるいは全体が崩壊しないこと．また，被害が予想される箇所は検知が可能で，接近が容易であり，検査や補修が容易に行えること．	[Collapse Limit State] Caltransの耐震設計の基本理念は，変形を中心に組み立てられている．すなわち，耐震設計は地震によって生じる変形に耐えることを目的としている．崩壊限界状態とは，それ以上の変形が起こると自重に耐えられなくなる点と定義される． すべての橋は，設計地震によって生じる変形に抵抗できるように設計しなければならない．構成部材は，MCE(i項参照)に対して崩壊を避けるために，十分な強度とじん性を確保できるように設計しなければならない．	[2. Basic Requirements and Compliance Criteria] [2] 設計地震が来た後でも緊急車両を一定の信頼性を持って確保できるという一般的な要求が満たされることを設計理念とする．	[5.1 Design Philosophy] 橋が地震後に交通機能を安全に保持できることを保証すること． そのために，橋は重要度によって区分され，地震再現期間に関連したリスク係数(R値)が割り当てられる．	[2章 耐震設計の基本方針] 道路種別および橋の機能・構造に応じて，橋の重要度が標準的な橋（A種の橋）と特に重要度が高い橋（B種の橋）に区分し，それぞれに応じた耐震性能を確保することを目標とする．
h) 限界状態	[3.4.1 Load Factors and Load Combinations] 極限事象限界(Extreme Event Limit State)： 地震・洪水・船舶衝突等に対し，橋の構造の残存を保証．	[Seismic Performance Criteria] [Seismic Design Philosophy] 1) Collapse Limit State（g項参照） 2) Ductility	[2.2 Basic requirements] [2] ① 被害の最小化 =使用限界状態（変位で評価する） ② 崩落防止規定 =終局限界状態（耐力・じん性で評価）	[5.1.1 Objective] ①橋は地震によって損傷は生ずるが，緊急車両は通れること． ②設計で想定したものより小さな地震では，損傷はわずかで，交通に支障をきたさないこと． ③設計で想定したものより大きな地震では，損傷は広範囲にわたるものの，橋の崩壊は防止できること．また，応急対策で緊急車両は通過でき，恒久対策も可能であること．	[2章] 橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動 ①震後供用限界状態(に相当するもの) =健全性を損なわない(A/B種の橋) 橋の供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動 ①震後修復限界状態(に相当するもの) =限定された損傷にとどめる(B種橋) ②安全限界状態(に相当するもの) =致命的な被害を防止する(A種の橋)

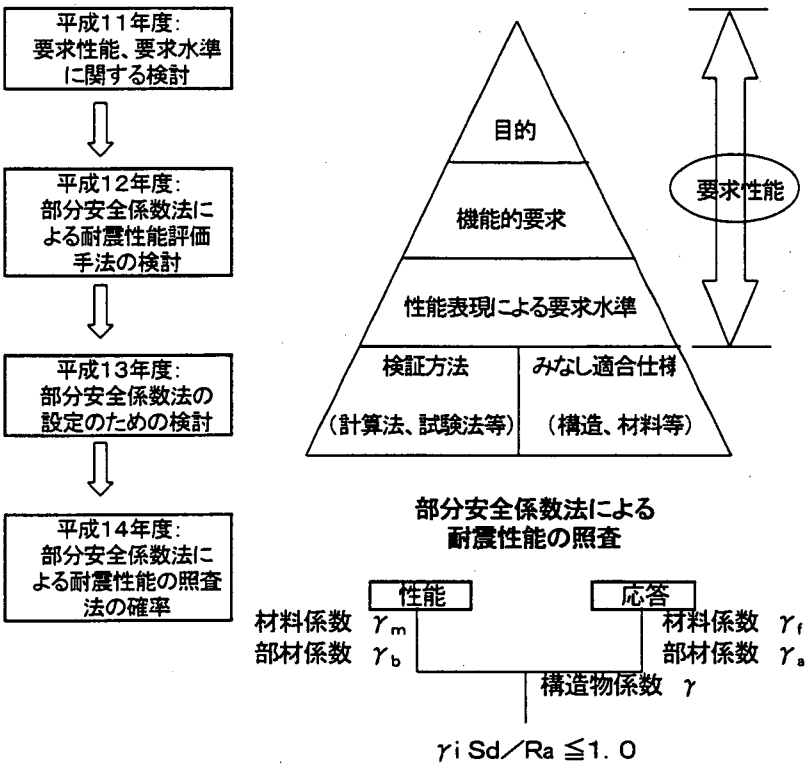
i) 重要度	[3.10.3 Importance Categories] 耐震設計において橋梁をcritical, essential, otherに区分. 設計用荷重Qの算定式($Q=\Sigma \eta_i \gamma_i Q_i$)中の，荷重変換定数$\eta_i$を構成する係数の一つとして，重要度に関する係数$\eta_I$(=0.95-1.05)を規定.	規定されていない．ただし，「普通・標準橋」をコード自体の適用範囲としている.	[2.1 design seismic event] (2) 重要度係数 γ_I は下記の３種類. ①Greater then average(γ_I= 1.30) ②Average(γ_I= 1.00) ③less than average(γ_I= 0.70) [4.4 Combinations of the seismic action with other actions] γ_Iは，設計地震荷重A_{GD}に乗ずる.	[5.2.3 Risk Factor, R] 交通量，道路機能や代替路の有無などから決まる橋の重要度によって，3種類のR値で区別する. それぞれのR値が表す地震の再現期間は，次のとおり. R=1.3: 再現期間250年 R=1.1: 同，150年 R=0.9: 同，110年	[3.4 重要度の区分] A種の橋，およびB種の橋 橋の重要度の違いは，橋の耐震性能の違い，およびタイプIとタイプII地震動の安全係数の違いに反映される.
j) 地盤種別	[3.10.5 Site Effects] 地盤種別(Soil Profile Type)は，I, II, III,IV の4種類に分け，サイト定数(S)を設定.	A～Fの6種類の地盤種別に対して，標準の加速度応答スペクトルが定められている．1994年の地盤種別の分類は，NEHRP Provisionsと同様のものを採用.	[3.2 Classification of subsoil conditions] 地盤種別(Subsoil class)は，A,B,Cの３種類.	[5.2 Design Earthquake Loading and Ductility Demand] Normal SoilsとFlexible Soilsの2種類. この地盤種別は，i項の2つの所要降伏震度スペクトル（パラメータ：変位塑性率μ）に反映される.	[3.6 耐震上の地盤種別] I種，II種，III種の３種類
k) 地域区分	[3.10.4 Seismic Performance Zones] 475年再現期待値ハザードマップより求まる. A値(Acceleration Coefficient)に応じて，1～4の4種類に区分.	特にない．ただし，活断層からの距離に応じて，標準加速度応答スペクトル曲線を割りましている.	[4.1 Seismic zones] (1) 各国のNAD(National Application Document)のなかで，設計地盤加速度agを個々に設定.	[5.2 Design Earthquake Loading and Ductility Demand] ゾーン係数Zとして，0.4～0.8を設定.	[3.5 地域別補正係数] A, B,Cの3地域区分に．それぞれ，補正係数C_Zとして1.0, 0.85, 0.7が与えられる.
i) 考慮する地震動	[C3.10.2 Acceleration Coefficient] 中地震（設計地震）： 再現期間475年（供用50年，超過確率10%）の地震 大地震： 設計地震より再現期間の長い地震. 再現期間が約2,500年の地震は最大生起地震(Maximum Credible Earthquake)と呼ばれる.	①機能性評価地震動（Functionality Evaluation Earthquake）：この地震動は，決定論的あるいは確率論的に評価される. ②安全性評価地震動（Safety Evaluation Earthquake）：この地震動は，決定論的あるいは確率論的に評価される. 決定論的な評価は，最大生起地震（MCE）に相当する．確率論的な安全性評価地震動は，一般に長期の再現期間をもつ（約1000～2000年） ③最大生起地震（Maximum Credible Earthquake, MCE）：最大生起地震は，1996年CALTRANS地震災害地図に基づいた，地震断層に沿って起こり得る最大の地震である.	[2.2.3 Serviceability limit state] (1) 中地震： 適正な再現期間に対する地震活動を評価する. [4.1 Seismic zones] (9) 大地震： 475年の再現期間(reference return period)	（特に，本基準では明記されていない）	[2章] ①橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動 ②橋の供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動（タイプIおよびII） タイプIは大正12年の関東地震のようなプレート境界型地震，タイプIIは平成7年の神戸地震のような内陸直下型地震を想定．再現期間の概念は与えられていない.
k) 荷重低減係数	[3.10.7 Response Modification Factor] 下部構造のタイプと橋の重要度により，R値(Response Modification Factors)（1.5～5.0）を表より選択する.	変位ベース設計法であるため示されていない.	[4.1.6 Behavior factors for linear analysis] (2) 下部構造のタイプと部材の要求じん性より，q値(behavior factor)（1.0～3.5）をTable 4.1より選択する.	[5.2.2 Displacement Ductility Factor] j項に示す非線型応答スペクトルの基本値（C_μ）のもとになる，変位塑性率μの値は，1～6が設定されている.	[5.3.1 保耐法に用いる等価水平震度(k_{he})] 設計水平震度k_{hC}を橋脚の許容塑性率μ_aに応じて，等価水平震度k_{he}として低減する. $k_{he} = k_{hC} / [2\mu_a - 1]^{1/2}$
l) 過強度係数	[3.10.9.4.3 Inelastic Hinging Forces] コンクリート部材：公称耐力の1.3倍 鋼部材：同，1.25倍	[4.3 Component Overstrength Factors] [4.3.1 Column Overstrength Factor] 橋脚柱の公称耐力(塑性モーメント)を1.2倍したものを上部構造，フーチングの設計に用いる.	[5.3 Capacity design effects] (1) 塑性モーメント係数（γ_o）： $\gamma_o = 0.7+0.2q$（q=3.5のとき，$\gamma_o = 1.4$） ここに，q：behavior factor	[5.4.1 Ductile Structures] NZS4203におけるCapacity Design Principlesによる.	[5.2 安全性の判定] 基礎設計の場合，基礎の耐力が支持する橋脚の終局水平耐力Puの1.1倍と設定.

2.4.2　耐震設計の性能規定化に関する研究（その２）

研究期間：　平１１～平１４
担　　当：　耐震研究室

【要旨】

現行の道路橋示方書は、設計法を詳細に規定した仕様規定型の構成となっているが、このことが設計の自由度を抑制する結果となり、新しい技術の開発導入や建設コスト縮減、ＶＥ制度の普及推進が図りにくくなっていうことが問題となっている。このような背景から、設計の自由度を高め、設計者の創意・工夫を出来るだけ反映することが出来るような設計規準体系の導入が強く求められている。１１年度は、道路橋示方書Ⅴ耐震設計編の設計体系の階層化を行い、橋に要求される耐震性能を明確にするとともに、耐震性能を満足する限界性能について検討を行った。



１．研究目的

本研究では構造物に要求される性能を明確にし、要求性能を設計に反映させるための限界状態を設定するとともに、部分安全係数法による耐震性能の照査式を導入し、次世代型の耐震設計規準の整備を行うことを目的とする。

２．研究方法

平成８年の道路橋示方書Ⅴ耐震設計編に規定された耐震設計で考慮する地震動と目標とする橋の耐震性能の関係を基本として、橋の耐震性能の中に考慮されている様々な観点をより明確にするとともに、規定された要求性能を満足させるための橋全体系としての限界状態ならびに各部材毎の限界状態について検討を行った。

３．研究結果

３．１　橋の耐震性能

表－１は、平成８年の耐震設計編に規定された耐震設計で考慮する地震動と目標とする橋の耐震性能を示したものである。ただし「健全性を損なわない」性能を「耐震性能１」、「橋としての機能の回復をより速やかに行うために限定された損傷にとどめる」性能を「耐震性能２」、また「致命的な被害を防止する」性能を「耐震性能３」とそれぞれ定義する。ここで、例えば耐震性能１の定義は「健全性を損なわない」であるが、性能照査型基準において重要なのは、「健全性を損なわない」ことの具体的な内容を明確にすることである。すなわち、耐震性能には、安全性、供用性、修復性の３つの観点があり、さらに修復性には短期的な修復と長期的な修復の観点があるここに、安全性とは、地震による上部構造の落下によって人命を損なうことのないようにするための性能、供用性とは地震後の避難路や輸送路としての機能を維持できる性能、修復性とは地震によって生じた構造部材の損傷を修復することの出来る性能を示す。それぞ

表－１　設計地震動と橋の要求性能

設計地震動		A種の橋	B種の橋
レベル１地震動		健全性を損なわない（耐震性能１）	
レベル２地震動	タイプⅠ	致命的な被害を防止する（耐震性能３）	橋としての機能の回復をより速やかに行うために限定された損傷に留める（耐震性能２）
	タイプⅡ		

れの耐震性能に対し、安全性、供用性、修復性の観点から要求される性能を整理すると表－２に示すとおりである。すなわち、耐震性能１には、落橋に対する安全性を確保するのはもちろんのこと、地震直後においても地震前と同じ橋としての機能が確保でき、かつ地震直後に機能回復のための修復が必要とならず、また、長期的に必要な修復もひびわれ補修程度の軽微な修復で対応できるようにすることが要求性能として盛り込まれている。耐震性能２には、落橋に対する安全性を確保するとともに、地震後において橋としての機能が速やかに回復でき、かつ地震直後に機能回復のために必要な修復が応急修復で対応でき、また、長期的に必要な修復もより容易に行うことができるようにすることを要求性能として盛り込んでいる。また、耐震性能３には、供用性や修復性の観点からの耐震性能は考慮せず、落橋に対する安全性だけを確保することを要求性能としたものである

表－２ 耐震性能の観点

橋の耐震性能	安全性	供用性	修復性	
			短期的修復	長期的修復
健全性を損なわない（耐震性能１）	落橋に対する安全性を確保する	地震前と同じ橋としての機能を確保する	機能回復のための修復を必要としない	ひびわれ補修程度の軽微な修復でよい
橋としての機能の回復をより速やかに行うために限定された損傷に留める（耐震性能２）	落橋に対する安全性を確保する	地震後橋としての機能が速やかに回復する	機能回復のための修復が応急修復で対応できる	より容易に恒久復旧を行うことが可能である
致命的な被害を防止する（耐震性能３）	落橋に対する安全性を確保する	（速やかな機能回復は困難な場合もある）	（応急復旧だけでは機能回復が困難な場合もある）	（撤去・再構築となることも想定する）

３．２　耐震性能の照査において考慮すべき橋の限界状態

性能照査型基準では、表－１に示される耐震性能を達成するために、地震時の橋の挙動をどのような状態までに抑える必要があるかを明確にすることが重要である。そこで、耐震性能１～３の照査において考慮すべきと考えられる橋の限界状態をまとめると表－３の通りである。耐震性能１に対する照査で考慮している橋の限界状態は「基本的に損傷が生じず、橋全体系としての力学特性や振動特性が地震の影響によって変化しない状態」と言える。また、耐震性能２に対しては、部材の塑性化を考慮するか否かで限界状態が異なるが、塑性化を考慮した設計を行う場合には、「塑性化を考慮した部材に生じている塑性変形が、その部材が保有する塑性変形能に対してはまだ余裕があり、修復が困難な残留変形が生じない状態」、塑性化を考慮しない設計を行う場合には、「脆性的な破壊が生じない状態」が限界状態と考えられる。

なお、例えば耐震性能２の照査において部材の塑性化を考慮した設計を行う場合には、塑性化させる部位としては、確実にエネルギー吸収を図ることができ、かつ修復を行うことが容易な部位を選定するとともに、キャパシティデザインの概念を踏まえ地震時に確実にその部位のみが塑性化するようにすることが必要と考えられる。

表－３ 橋の耐震性能と考慮する限界状態

	橋の限界状態	
耐震性能1	基本的に損傷が生じず、橋全体としての力学特性や振動特性が地震の影響によって変化しない状態とする。	
耐震性能2	塑性化を考慮した設計の場合	塑性化を考慮しない設計の場合
	塑性化を考慮した部材に生じている塑性変形が、その部材が保有する塑性変形性能に対してはまだ余裕があり、修復が困難な残留変形が生じない状態とする。	橋に脆性的な破壊が生じない状態とする。
耐震性能3	塑性化を考慮した設計の場合	塑性化を考慮しない設計の場合
	塑性化を考慮した部材に生じている塑性変形が、その部材が保有する塑性変形能を越えない状態とする。	橋に脆性的な破壊が生じない状態とする。

４．主な研究成果物

1)運上茂樹：性能設計および限界状態設計による橋梁の耐震設計体系について、橋梁構造等の耐震設計法に関する講習会、土木学会、pp.1-27、1999年10月
2)運上茂樹：道路橋の鉄筋コンクリート橋脚の耐震性能と配筋構造、橋梁と基礎、1999年8月
3)運上茂樹：第25回地震工学研究発表会パネルディスカッション、1999年7月

なお、本検討成果は、平成１２年度に改訂される予定の道路橋示方書Ⅴ耐震設計編に反映していく。

（運上、足立、星隈、大住）

2.5　地盤－基礎系を含む全体系を考慮した構造物の耐震性能の実験的検証技術に関する研究

研究期間：平 11～平 14

担当：振動研究室

【要旨】

従来、橋梁などの土木構造物では、上部構造と地盤－基礎構造系を分離して、それぞれが十分な安全性を有するように耐震設計がなされてきた。これは主として、上部構造の応答を考慮に入れた基礎構造の地震時挙動については解明されていないことによるものである。構造物全体系として十分かつ合理的な安全性を有するような設計体系を指向するためには、上部構造と地盤－基礎構造系の一体としての地震時挙動を把握することが必要である。そこで、11 年度は、上部構造を数値モデル、地盤及び基礎構造を実際の模型とするハイブリッド振動実験を実施することにより、弾性域を対象として、上部構造の応答の影響を考慮した地盤－基礎構造系の地震時挙動を系統的に明らかにした。

1．研究目的

地盤及び基礎構造を含めた構造物全体系としての地震時挙動については未解明の部分も多く、従来より構造物の耐震設計では、上部構造及び基礎構造がそれぞれ十分な安全性を有するよう配慮されてきたが、今後の合理的な耐震設計を確立するためには、上部構造と地盤－基礎構造系の一体としての地震時挙動を把握することが必要である。このような観点から、11 年度は、弾性域を対象として上部構造の応答を考慮に入れた基礎構造の地震時挙動を把握することを目的に、以下の振動実験を行った。

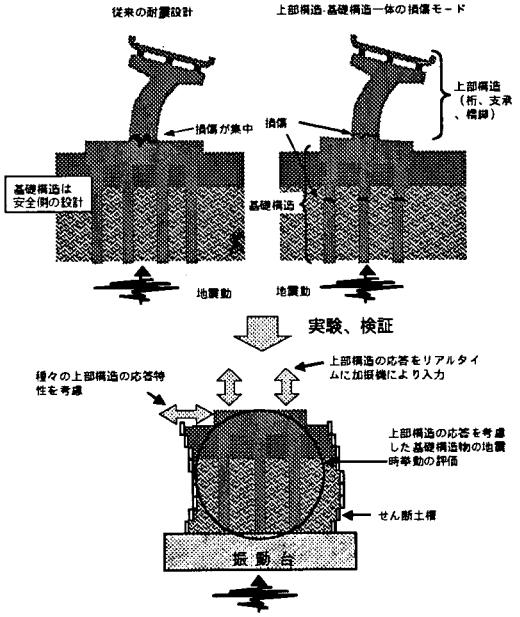


図-1　研究の概要

2．研究方法

2．1　ハイブリッド振動実験の概要

図-1 に示すようにハイブリッド振動実験では、振動挙動を明らかにする必要がある部分のみを模型化し、それ以外の部分は数値モデルで置換えるため、大縮尺で精度の良い模型を作成することが可能である。

2．2　実験対象とする実橋梁

実験対象とした橋脚は、30m×3径間連続橋中間部の橋脚であり、橋梁の設計は平成 8 年道路橋示方書に準じた。支承にはゴム支承（弾性支持）を採用し、地震時水平力分散構造とした。また、基礎は場所打ち杭、地盤はII種地盤である。

2．3　実験対象模型及び数値モデル

前述した実橋梁をスケールダウンした実験模型の形状寸法及び地盤条件を図-2に示す。ここでは幾何学的縮尺を1/4とした。これは、実験装置の制約から決定される最大の縮尺である。また、フーチングと土槽壁間の距離をできるだけ大きくすることを目的に、加振方向（橋軸方向）に対しては 2 列の配置となる杭配置を選択した。それに伴い、加振方向（橋軸方向）に作用する曲げモーメントによって引抜き力が生じやすくなるため、杭間隔を 2.5D（D：杭径）よりも広げた。図-3に示すようにハイブリッド振動実験では、加振直角方向に対して配置される杭4本の内2本分を取り出し、2列×2本の地盤－杭基礎系の部分模型を対象とした。そのため、フーチング底面へ作用させる外力は、2列×4本の杭基礎に載荷するフーチング底面の地震力の1/2となる。また、今後、塑性域

における構造物の挙動解明を予定していることを考慮して橋梁基礎模型はRC構造とした。模型杭の鉄筋は、鉄筋の断面積比が実杭と模型杭で同じになるように径及び本数を決定した。地盤模型には乾燥硅砂7号を使用し、表層の2mをN値4、それ以深をN値10の2層構成とした。

本研究で行うハイブリッド振動実験では、図-4に示すように地盤、杭基礎及びフーチングの一部を実験模型、実験模型化しない部分のフーチング、橋脚、支承及び桁を数値モデルとした。具体的には図-5に示すように、振動台上にせん断土槽を据付け、地盤模型及び杭基礎模型を作成した。ここで、杭先端部とせん断土槽底面の接続部はヒンジ構造とした。

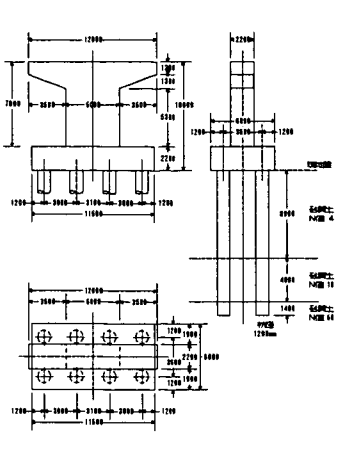


図-2　実規模橋脚－基礎の形状と地盤条件

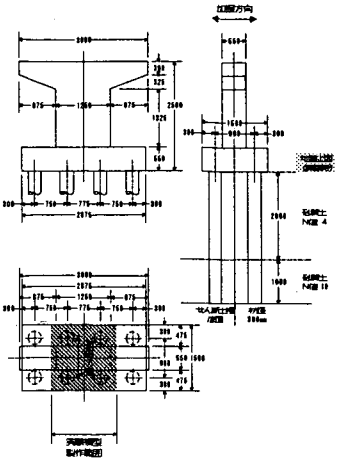


図-3　模型橋脚－基礎の形状と地盤条件

杭基礎模型の上部にはフーチング模型及び取付治具、ウェイトを取付け、水平方向にハイブリッド振動実験用のアクチュエータと接続するとともに、せん断土槽を所定の入力波形で水平方向に加振する。鉛直方向には、上部構造の死荷重と橋脚及びフーチングの自重に相当する荷重をウェイト、取付治具、フーチング模型で調整し、杭基礎模型に死荷重として作用させる。加振時には、フーチング上面のアクチュエータ先端に設置されているロードセルからフーチング上面の反力を測定し、その値を入力として桁－支承－橋脚－フーチングで数値モデル化された振動応答数値解析を行う。次に、計算されたフーチングでの応答変位をアクチュエータで入力し、橋梁全体系の応答を再現する。なお、回転成分に関しては、系の応答に及ぼす影響が小さいことが確認されたため、無視した。

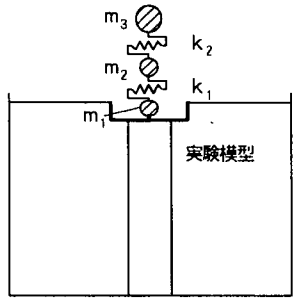


図-4　数値モデル部

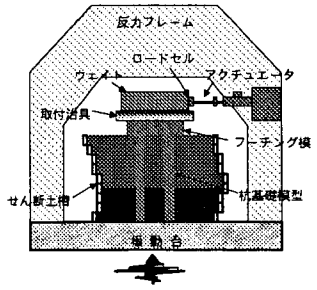


図-5　地盤－基礎系模型を用いたハイブリッド実験

3．研究結果

実験模型の特性を把握するため、地盤と橋梁全体をモデル化した FEM 解析を行った。橋梁全体系の 1 次、2 次及び 1 次+2 次の固有振動数に相当する正弦波 50gal をそれぞれ入力したときの各部の最大応答値を表-1 に示す。これによると、1 次入力では、支承部の上、すなわち桁のみが振動し、支承から下の部分はほとんど振動しないモードとなっている。2 次の入力では、橋脚とフーチングの応答が大きな値を示している。さらに、1 次固有振動数と 2 次固有振動数の正弦波を重ね合わせたものを入力した結果では、桁、橋脚、フーチングの応答は一様に大きな応答を示している。

表-1　橋梁各部の応答解析結果（最大値）

		1 次入力	2 次入力	1 次+2 次
上部構造慣性力作用位置	応答変位 (mm)	117.2	1.0	59.0
	応答速度 (kine)	122	2	61
	応答加速度 (gal)	1261	40	653
橋脚天端	応答変位 (mm)	2.7	3.1	3.6
	応答速度 (kine)	3	17	14
	応答加速度 (gal)	57	966	717
フーチング重心	応答変位 (mm)	2.1	2.9	3.1
	応答速度 (kine)	2	16	13
	応答加速度 (gal)	56	901	681

4．主な研究成果物

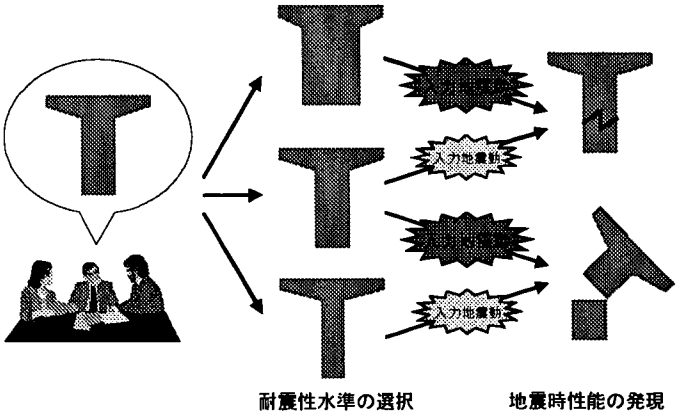
・小林 寛、田村 敬一：地盤－基礎系模型を用いたハイブリッド振動実験，第 1 回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム，2000.3

（田村、東、小林）

2.6　公共土木施設の耐震性水準の横断的整合に関する研究

研究期間：平 10～平 12
担当：防災技術課

【要旨】



道路・河川管理施設等の社会基盤施設の耐震対策に際しては、地域で想定される地震動に対する地震時性能が国や地域の要求を満たすとともに、適切な投資配分のもとでリスクが最小化される必要がある。しかしながら、現在のところ各施設の耐震設計には施設毎に異なる基準が用いられており、また、各々の基準では構造物の重要度等を与件として地震時性能の目標が設定されているため、地域全体として耐震対策投資が最適化されているかどうかが不明確である。本研究は、地域に存在する複数の社会基盤施設の耐震性水準を、相互の整合性を明確にしながら、合理的に設定するための手法について検討するものである。これまでに、耐震性水準のパフォーマンスマトリクスによる表現方法、及び、耐震性水準と対策コストを勘案しながら耐震対策を選択するための IOC カーブ(Input-Output-Cost Curve)の概念を提案している。平成１１年度は、道路・河川管理施設等についてパフォーマンスマトリクスの具体化を図ることを目的に、社会基盤施設の耐震性水準の概念整理、及び、各種構造物の耐震設計体系（入力地震動、計算モデル、性能評価パラメータ等）の横断的な比較分析を行った。

１．研究目的

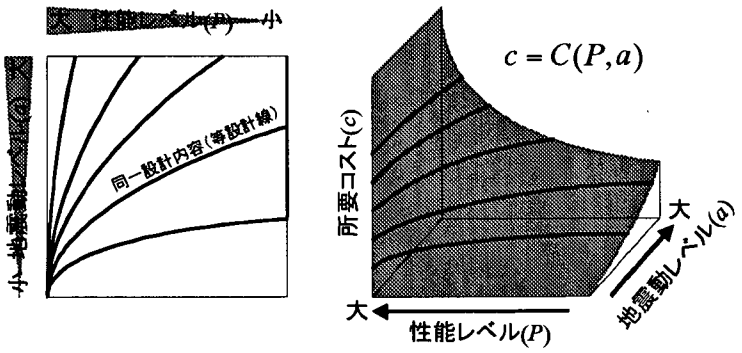


図１　パフォーマンスマトリックス（左）と IOC カーブ（右）

社会基盤施設の耐震対策では、適切な投資配分のもと、地域で想定される地震動に対して各種施設の地震時性能が整合している必要がある。本研究は、複数の社会基盤施設の耐震性水準を、相互の整合性を明確にしながら、合理的に設定するための手法を検討するものである。これまでに、様々な入力地震動に対する施設の地震時性能や耐震対策コストを表現する方法(パフォーマンスマトリックス、IOC カーブ）を提案している。各種施設についてこれらの表現方法を適用し、耐震性水準の横断的整合性を確認するためには、各種施設間で共通化された地震動レベルと性能レベルの表示方法を具体化する必要がある。このため、平成１１年度は、社会基盤施設の耐震性水準の概念を整理するとともに、道路施設、河川施設、鉄道施設、港湾施設、下水道施設等について、入力地震動、計算モデル、性能評価パラメータ等の耐震設計体系を横断的に比較分析した。

２．研究方法

２．１　社会基盤施設の耐震性水準の概念整理

各種社会基盤施設は、多種多様な要素構造物が組み合わされてシステムとしての機能が発現される。このような施設システムとしての耐震性水準は、要素構造物毎に用意された耐震設計基準に基づいて、要素構造物の耐震性水準によって左右される。しかしながら、要素構造物毎の耐震設計基準では、構造物毎の構造特性や地震被害事例を背景に入力地震動や地震時性能が定められており、相互の整合性が明確でない。このため、施設システム（例えば道路ネットワーク）全体としての耐震性や、異なる種類の施設システムが複数存在する地域の耐震性を評価するためには、要素構造物毎に異なる耐震設計の表現方法を統一あるいは比較可能な形で整理する必要がある。

ここで、施設システムの耐震性水準の概念を図２のように表現する。図中の網掛け部分は、施設システムを構成する要素構造物の耐震設計を表現している。要素構造物に地震動が入力した場合、構造物はこれに応答し、変形・損傷等の地震時性能が発現する。地震時性能は、例えば道路橋の場合には桁間の開きや段差の発生など要素構造物毎に固有の構造的な性能であるが、施設システムの地震時性能を検討する際には、これを施設システムの地震時性能に結びつけることが可能な機能的な性能に翻訳する必要が生じる。例えば道路橋を例にとれば、段差等の構造的な性能は、道路ネットワークの通行可能性、走行速度、交通量等の機能的な性能に結びつく。本研究では、要素構造物の構造的な性能と施設システムの地震時性能を結びつける機能的な性能を“機能基本量”と定義する。機能基本量は、要素構造物毎の地震時性能とは異なり、施設システム内（地域の施設システム間）で共通化された表現となる。また、任意の地震動に対する施設システムの地震時性能は、要素構造物毎の機能基本量の組合せにより定まることとなる。

本研究では、各種施設システムを対象にして、施設システムの地震時性能～機能基本量～要素構造物の地震時性能の関係を整理した。

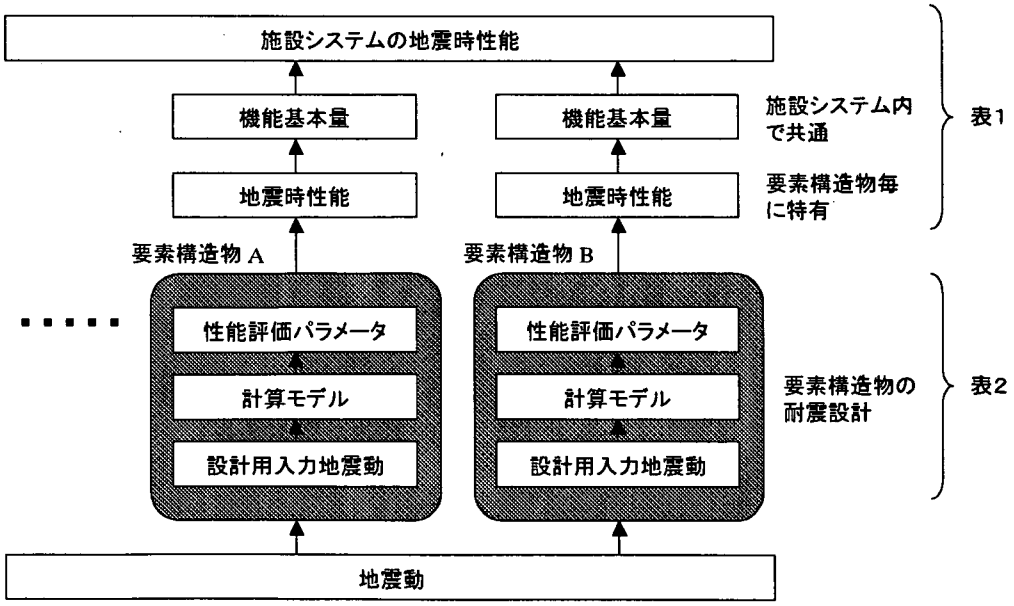


図２　施設システムの耐震性水準の概念

２．２　要素構造物の耐震設計体系の横断的整理

地域で想定される地震動に対して施設システムがどの程度の地震時性能を発現するか、すなわち、地震動と施設システムの地震時性能の定量的な関係を導くためには、①地震動～設計用入力地震動の関係、②性能

評価パラメータ～地震時性能の関係、③地震時性能～機能基本量の関係、が明確にされる必要がある。これらの関係を定量化できれば、要素構造物毎の耐震性水準に基づく施設システムの耐震性水準の特定、また、施設システムの目標耐震性水準を合理的に実現するための要素構造物の耐震性水準の選択、が可能になる。

本研究では、上記の関係を導く根拠資料を得ることを目的として、各種要素構造物の耐震設計体系を横断的に比較可能な形式で調査・整理した。耐震設計の整理は、図１の網がけ部分で示した、設計用入力地震動の設定、計算モデル、性能評価パラメータのコントロールの視点で行った。

３．研究成果

３．１　社会基盤施設の耐震性水準の概念整理

施設システムとして、道路（橋梁、盛土、擁壁、開削トンネル）、鉄道（橋梁、盛土、擁壁、開削トンネル）、河川（堤防、ダム）、下水道（管路、マンホール）、港湾（係留施設）、斜面・のり面（対策工）を選定し、施設システムの地震時性能～機能基本量～要素構造物の地震時性能の関係を整理すると表１の通りである。表１によれば、以下の点が指摘される。

１）道路、鉄道、河川、港湾、下水道、斜面・のり面等の社会基盤施設の地震時性能は、各々単一の機能基本量を想定することで表現可能である。これら機能基本量をパフォーマンスマトリクスの性能軸に導入することで、施設システムを構成する要素構造物の耐震性水準を横断的に比較可能な形式で表現できる。

２）機能基本量は要素構造物の地震時性能により変化する。機能基本量を連続量として扱うためには、要素構造物の種類、被害形態、被害程度と機能基本量の定量的な関係を把握する必要がある。

表１　施設システムの地震時性能～機能基本量～要素構造物の地震時性能

施設システム	地震時性能(機能)	機能基本量	要素構造物	地震時性能(被害)
道路 (道路ネットワーク) 、及び、 鉄道 (鉄道ネットワーク)	交通機能	アクセス時間	橋梁 (橋脚、橋台)	段差・補修 (時間増加)
				落橋 (機能停止) (使用者事故) (第三者被害)
			盛土 (擁壁)	段差・補修 (時間増加)
				崩壊 (機能停止) (使用者事故) (第三者被害)
			トンネル (山岳、開削)	変状・補修 (時間増加)
				崩壊 (機能停止) (使用者事故) (第三者被害)
河川 (流水ネットワーク)	治水・利水機能	流量	堤防	崩壊 (溢水の誘発) (洪水被害)
港湾 (物流基地)	運送サービス機能	物流量	係留施設	変状 (物流量低下)
				崩壊 (機能停止)
下水道 (下水ネットワーク)	下水 (流水機能)	流量	管路	漏水 (流量低下) (周辺汚染)
				寸断 (機能停止) (周辺汚染)
			マンホール	漏水 (流量低下) (周辺汚染)
				寸断 (機能停止) (周辺汚染)
斜面・のり面	治山機能	保持土量	斜面・のり面	変状 (周辺施設機能低下)
				崩壊 (機能停止) (第三者被害)

3．2　要素構造物の耐震設計体系の横断的整理

各種施設システムを構成する主要な要素構造物について、耐震設計基準やマニュアル類を調査し、耐震設計体系を整理した。一例として、鉄道と道路の整理結果を示すと表2及び表3の通りである。なお、耐震設計体系の整理は、以下の視点で横断的な比較が可能となるように配慮した。

1）構造物種別の明示

例えば道路橋の場合、対象となる施設システムは道路である。道路はネットワーク全体として機能を発現するが、道路橋を含む要素構造物の被災によって迂回や渋滞など処理交通量の低下を生じ、アクセス時間の増加としてネットワークの地震時性能を低下させる。個別構造物だけでなく施設システムの耐震性水準を検討する必要から、まず対象施設を明示し、次に要素構造物を整理した。

2）構造物と部材との関係

要素構造物の種類や設計法によって、構造物を一体として設計計算を行う場合、また、構成部材毎に設計

表2　要素構造物の耐震設計体系の整理（鉄道）

施設システム	要素構造物	設計用入力地震動と耐震性能			計算方法		
		設計用入力地震	耐震性能		荷重	計算モデル	性能評価パラメータ
鉄道	橋脚	L1 （基盤応答スペクトル適合波形）	耐震性能Ⅰ （地震後も補修せずに機能を保持でき、かつ過大な変位を生じない）		応答加速度による慣性力 （固有周期と地盤種別に基づき弾性応答スペクトルから設定）	一体（支承、躯体、基礎）モデル （耐震性能Ⅰを満足する設計を行うため弾性体モデル化）	許容応力度、許容変位、許容支持力 （弾性挙動をするよう、弾性限界に安全率を考慮した応力度や支持力で性能を照査する）
		L2 （基盤でのスペクトル1or2or3適合波形）	重要度高い	耐震性能Ⅱ （地震後に補修を必要とするが、早期に機能を回復できる）	最大応答震度による慣性力 （構造系の降伏震度と等価固有周期から非線形応答スペクトルにより応答塑性率を推定し、構造系の荷重～変位関係から設定）	一体（支承、躯体、基礎）モデル （構造系の塑性化を考慮して設計するため、各部材の非線形性を考慮したモデル化）	応答変位、応答塑性率 （部材ごとに塑性率に応じた損傷や安定の状態を示し、鉄道機能に及ぼす影響や補修状態と関連づけて耐震性能を規定している）
			その他	耐震性能Ⅲ （地震により構造物全体系が崩壊しない）			
	橋台	L1 （基盤応答スペクトル適合波形）	耐震性能Ⅰ （地震後も補修せずに機能を保持でき、かつ過大な変位を生じない）		設計震度による慣性力と地震時土圧 （地盤応答解析による地表面の最大応答加速度から設計震度を設定）	一体（支承、躯体、基礎）モデル （耐震性能Ⅰを満足する設計を行うため弾性体モデル化）	許容応力度、許容変位、許容支持力 （弾性挙動をするよう、弾性限界に安全率を考慮した応力度や支持力で性能を照査する）
		L2 （基盤でのスペクトル1or2or3適合波形）	重要度高い	耐震性能Ⅱ （地震後に補修を必要とするが、早期に機能を回復できる）	設計震度による慣性力と地震時土圧 （地盤応答解析による地表面の最大応答加速度から設計震度を設定）	一体（支承、躯体、基礎）モデル （構造系の塑性化を考慮して設計するため、各部材の非線形性を考慮したモデル化）	応答変位、応答塑性率 （部材ごとに塑性率に応じた損傷や安定の状態を示し、鉄道機能に及ぼす影響や補修状態と関連づけて耐震性能を規定している）
			その他	耐震性能Ⅲ （地震により構造物全体系が崩壊しない）			
	盛土	L1 （基盤応答スペクトル適合波形）	耐震性能Ⅰ （地震後も補修せずに機能を保持でき、かつ過大な変位を生じない）		設計震度による慣性力 （地盤応答解析による地表面の最大加速度から設計震度を設定）	剛体（円弧滑り）モデル	円弧滑り安全率 （耐震性能Ⅰを満足するため、盛土の変状を小さく抑えるよう曲弦地盤反力による釣合いを確保）
		L2 （基盤でのスペクトル1or2or3適合波形）	重要度高い	耐震性能Ⅱ （地震後に補修を必要とするが、早期に機能を回復できる）	地表面の応答加速度 表層地盤の剛性低下 （地盤応答解析により、地表面の応答加速度や表層地盤の剛性低下を推定）	盛土のせん断変形： 剛体（ニューマークモデル 盛土の沈下： 累積損傷度を仮定 表層地盤の沈下： 剛性低下を考慮した弾性体	盛土の沈下量 （沈下量に応じた鉄道機能に及ぼす影響や補修状態と関連づけて耐震性能を規定している）
			その他	耐震性能Ⅲ （地震により構造物全体系が崩壊しない）			
	擁壁	L1 （基盤応答スペクトル適合波形）	耐震性能Ⅰ （地震後も補修せずに機能を保持でき、かつ過大な変位を生じない）		設計震度による慣性力と地震時土圧 （地盤応答解析による地表面の最大応答加速度から設計震度を設定）	一体（躯体、基礎）モデル （耐震性能Ⅰを満足する設計を行うため、弾性体モデル化）	許容応力度、許容変位、許容支持力 （弾性挙動をするよう、弾性限界に安全率を考慮した応力度や支持力で性能を照査する）
		L2 （基盤でのスペクトル1or2or3適合波形）	重要度高い	耐震性能Ⅱ （地震後に補修を必要とするが、早期に機能を回復できる）	設計震度による慣性力と地震時土圧 （地盤応答解析による地表面の最大応答加速度から設計震度を設定）	一体（躯体、基礎）モデル （構造系の塑性化を考慮して設計するため、各部合の非線形性を考慮したモデル化）	応答変位、応答塑性率 （部材ごとに塑性率に応じた損傷や安定の状態を示し、鉄道機能に及ぼす影響や補修状態と関連づけて耐震性能を規定している）
			その他	耐震性能Ⅲ （地震により構造物全体系が崩壊しない）			
	開削トンネル	L1 （基盤応答スペクトル適合波形）	耐震性能Ⅰ （地震後も補修せずに機能を保持でき、かつ過大な変位を生じない）		地盤変位 （地盤応答解析により構造物位置での表層地盤の変位を仮定）	はりバネモデル （耐震性能Ⅰを満足する設計を行うため、部材は弾性体モデル化、地盤は非線形性を考慮）	許容応力度 （弾性挙動をするよう、弾性限界に安全率を考慮した応力度や支持力で性能を照査する）
		L2 （基盤でのスペクトル1or2or3適合波形）	重要度高い	耐震性能Ⅱ （地震後に補修を必要とするが、早期に機能を回復できる）	地盤変位 （地盤応答解析により構造物位置での表層地盤の変位を仮定）	はりバネモデル （構造物の塑性化を考慮した設計を行うため、地盤とともに部材の非線形性を考慮）	応答変位、応答塑性率 （部材ごとに塑性率に応じた損傷や安定の状態を示し、鉄道機能に及ぼす影響や補修状態と関連づけて耐震性能を規定している）
			その他	耐震性能Ⅲ （地震により構造物全体系が崩壊しない）			

計算を行う場合等の相違がある。例えば、道路橋の設計計算を震度法・地震時保有水平耐力法等の静的手法で行う場合には上部構造を考慮するのは固有周期及び水平方向荷重の算定までであり、動的解析等の動的手法による場合には上部構造を含めた一体系として扱われる。本研究では、要素構造物の設計計算手法を静的手法と動的手法に分類し、各々の計算モデルにおける構造物と部材の関係を整理した。

3）耐震性能の表現方法

要素構造物の耐震設計体系で要求される耐震性水準を、設計用入力地震動と耐震性能の対比により整理した。また、耐震性能が満足されているか否かを照査するための性能評価パラメータを示した。例えば、道路橋の場合には部材毎に性能照査が行われ、橋脚であれば変位と塑性率が性能評価パラメータとなる。

表３　要素構造物の耐震設計体系の整理（道路）

施設システム	要素構造物	設計用入力地震動と耐震性能			計算方法		
		設計用入力地震	耐震性能		荷重	計算モデル	性能評価パラメータ
道路	橋脚	L1 （地表での応答スペクトル）	耐震性能Ⅰ （健全性を損なわない）		設計震度による慣性力 （固有周期と地盤種別より弾性応答スペクトルから設定）	一体（支承、躯体、基礎）モデル （計算は個別に行うが、各々弾性体として順次荷重を伝達するため、結果として一体モデルを仮定）	許容応力度、許容変位、許容支持力 （弾性挙動をするよう、弾性限界に安全率を考慮した応力度や支持力で性能を照査する）
		L2 （地表でのタイプⅠorタイプⅡ応答スペクトル）	B種橋 （重要度高い）	耐震性能Ⅱ （限定された損傷に留める）	支承、橋脚： 設計震度による慣性力 （固有周期と地盤種別に基づき弾性応答スペクトルから設定） 基礎： 橋脚基部の終局耐力、地表面震度によるフーチング慣性力 （地表面震度は地盤種別により設定）	支承：弾性体モデル （上部工の荷重を確実に橋脚躯体に伝達させることを前提として、弾性範囲内で設計を行う） 躯体：非線形モデル （構造物の塑性化を考慮した設計を行う） 基礎：非線形はりバネモデル （降伏の範囲内で設計を行うが、地盤と基礎の両者で降伏を定義するため非線形性を考慮）	支承：せん断ひずみ 躯体：許容応答塑性率、変位 （許容応答塑性率は、地震のタイプや重要度に応じて規定） 基礎：降伏に至らない
			A種橋 （その他）	耐震性能Ⅲ （致命的な被害を防止する）			
	橋台	L1 （地表での応答スペクトル）	耐震性能Ⅰ （健全性を損なわない）		設計震度による慣性力 （固有周期と地盤種別より弾性応答スペクトルから設定）	一体（支承、躯体、基礎）モデル （計算は個別に行うが、各々弾性体として順次荷重を伝達するため、結果として一体モデルを仮定）	許容応力度、許容変位、許容支持力 （弾性挙動をするよう、弾性限界に安全率を考慮した応力度や支持力で性能を照査する）
		L2	B種橋 （重要度高い） A種橋 （その他）	L2レベルの設計を行わないが、靭性に富む構造細目を規定			
	盛土	L1 （地盤種別で規定）	耐震性能Ⅰ （健全性確保）		設計震度による慣性力	剛体（円弧滑り）モデル	円弧滑り安全率 （盛土の変形を小さく抑えるよう極限地盤反力による釣合いを確保）
		L2 （地盤種別で規定）	重要で二次災害の恐れあり	耐震性能Ⅰ （健全性確保）			
			その他	－	－	－	－
	擁壁	L1 （地盤種別で規定）	一般	耐震性能Ⅰ （健全性確保）	設計震度による慣性力と地震時土圧	一体（躯体、基礎）モデル （計算は個別に行うが、各々を弾性体として順次荷重を伝達するため、結果として一体モデルを仮定）	許容応力度、許容変位、許容支持力 （弾性挙動をするよう、弾性限界に安全率を考慮した応力度や支持力で性能を照査する）
			高さ8m以下で復旧が容易	－	－	－	－
		L2 （地盤種別で規定）	重要で二次災害の恐れあり	耐震性能Ⅰ （健全性確保）	設計震度による慣性力と地震時土圧	一体（躯体、基礎）モデル （計算は個別に行うが、各々を弾性体として順次荷重を伝達するため、結果として一体モデルを仮定）	許容応力度、許容変位、許容支持力 （弾性挙動をするよう、弾性限界に安全率を考慮した応力度や支持力で性能を照査する）
			その他	－	－	－	－
	開削トンネル	L1 （基盤の速度応答スペクトル適合波形）	耐震性能Ⅰ （健全性を損なわない）		地盤変位 （地盤応答解析により構造物位置での表層地盤の変位を仮定）	はりバネモデル （部材は弾性体にモデル化し、地盤は非線形性を考慮）	許容応力度 （弾性挙動をするよう、弾性限界に安全率を考慮した応力度で性能を照査する）
		L2 （基盤の速度応答スペクトル適合波形）	耐震性能Ⅱ （限定された損傷に留める）		地盤変位 （地盤応答解析により構造物位置での表層地盤の変位を仮定）	はりバネモデル （構造系の塑性化を考慮した設計を行うため、地盤とともに部材の非線形性を考慮）	耐力、応答変位 （応力度が耐力以下となるのが基本、これを超える場合には橋脚の研究成果より応答変位で性能を評価）

4）設計手順

表２に示す以外に、要素構造物毎の具体的な設計手順を調査した。すなわち、設計計算法の種類（応答スペクトル法、時刻歴応答解析法、地震時保有水平耐力法等）を地震のレベル（Ｌ１、Ｌ２等）と関連づけて整理した。入力地震動の設定法については、例えば道路橋のＬ１地震動に対する加速度応答スペクトルの設定根拠等の経緯や設計への適用手順を整理した。設計計算モデルについては、要素構造物毎の主要モデル（例えば橋梁の固有周期算出、応答スペクトルの具体形）を整理した。また、構造物の挙動と性能評価パラメー

タの関係を整理した。例えば道路橋の場合には、性能評価パラメータとして橋脚天端の変位 ™を定義し、δ と降伏変位δ_y、終局変位δ_u に許容塑性率及び安全率を組み合わせた限界状態における変位を比較して部材の諸元が決定される。構造物の挙動を代表する荷重変位曲線と性能評価パラメータの関係を、要素構造物毎に比較可能な形式で整理した。

要素構造物の耐震設計体系を調査・整理した結果、横断的な視点から以下の点が指摘される。

1） 道路では要素構造物毎に入力地震動の設定法や要求性能の表現が異なるのに対して、鉄道ではこれらの表現が一元化されている。

2） 橋梁等の構造物については地震時挙動のメカニズムがある程度解明されており、設計法も定量的であるが、土構造物については現象の定量的なモデル化が研究途上であり、定量的な設計法に制約がある。

3） 耐震設計の結果が連続的な性能の変化ではなく、ダムの滑動、転倒といった単一のイベントで規定されているものがある。これには、当該施設の耐震安全性がイベントのみで規定される場合と、設計モデルの制約により変位等の定量的な変化を表現できない場合がある。

3．3 今後の方針

本調査の結果、各種構造物の現行設計基準における入力地震動の設定法、設計モデルおよび性能評価パラメータが整理された。実際に同一公共土木施設を構成する各要素構造物の耐震性水準の整合性を検討するためには、各設計法における性能評価パラメータを、施設の機能基本量に翻訳する必要がある。たとえば同一道路ネットワーク上に存在する道路橋、盛土等の構造物に対して想定される地震動を入力した場合、道路橋の性能は変位で、盛土の性能は円弧滑りによる安全率という異なるパラメータで表現されるが、これらを道路交通に影響する共通の機能基本量すなわち通行可能性や走行速度に変換しなければならない。今後、各構造物の性能評価パラメータを各施設の機能基本量に変換する方法について調査する必要がある。

4．主な研究成果物

1）社会基盤施設の耐震性水準の合理的な設定方法に関する基礎的研究、第２５回地震工学研究発表会、1999.7

2）社会基盤施設の耐震性水準の合理的な設定方法に関する基礎的研究、第２２回土木計画学研究発表会、1999.10

3）A method to determine seismic performance of highway network system, 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand, 2000.1

（杉田秀樹，野崎智文）

水環境における水質リスク管理に関する研究

3．水環境における水質リスク管理に関する研究

研究期間：平成 10～14 年度
プロジェクトリーダー：新下水処理研究官
酒井　憲司

1. 研究の背景：

わが国では水の安全性の指標として大腸菌群と 26 の物質が用いられているが、これらでは把握できない新しいタイプの汚染が出現している。平成 8 年に埼玉県越生町でおきた原虫クリプトスポリジウムの集団感染、多摩川のコイなどの異変から問題が指摘されている内分泌かく乱物質（環境ホルモン）などがその好例である。このように公共用水域等において、水質に起因するリスクの増大が懸念されている。

こうした病原性微生物や化学物質は、その検出方法、下水道における処理の可能性、環境水中での挙動、魚類などの生物への影響など分かっていないことが多い。安全で安心して利用できる水域を確保するために、水質に起因するリスクの実態を把握し、リスクのレベルを適切に管理する手法を開発する必要がある。

2. 研究の目的：

本研究は、リスクの原因として、近年になって感染や汚染の実態が明らかにされつつあるクリプトスポリジウムその他の病原性微生物と内分泌かく乱物質をとりあげ、水環境における水質リスクを把握、評価、制御する手法を開発することを目的としており、次の 4 項目から構成される。

① 試験・監視技術の開発
② 処理過程及び自然界における実態の把握
③ リスク評価手法の開発
④ リスク制御技術の開発

3. これまでの研究成果：

クリプトスポリジウムについては、活性汚泥処理により下水中の濃度を 2 桁、凝集剤の使用によりさらに 1 桁さげることができることが分かった。また、脱嚢試験による判定では、不活化率 90%に達するまでの時間は水温 60℃では 5 分であるのに対し、30℃では 42 日と温度の影響を強く受けることが分かった。オーシストに特異的に反応する蛍光抗体染色試薬によりオーシストを検出することができるが、試料中の夾雑物による妨害を抑制する必要であることが明らかとなった。

その他の病原性微生物として大腸菌をとりあげ、処理及び水域における挙動を調査した。その結果、生物処理水を砂ろ過－消毒－活性炭処理を行った場合、活性炭ろ過の過程で 1～2 桁程度大腸菌の濃度が増加すること、及び塩素消毒において塩素の注入量が少ないと大腸菌数が増加することが明らかとなった。処理水を流す水路において大腸菌は 60～90%除去されるが、その多くは生物膜や堆積物への移行である。

内分泌かく乱物質については、抗原抗体法を用いた測定法、組み換え酵母とコイを用いた女性ホルモン作用の測定法について調査した。組み換え酵母法は下水試料には有効であることが示唆された。内分泌かく乱物質の下水処理における挙動について、活性汚泥処理、オゾン処理、活性炭処理について実験を行い、処理特性について調査した。その結果、活性汚泥処理でかなりの部分が分解されている可能性があること、オゾン及び活性炭処理によりかなり除去されることが分かった。実河川の底泥からの内分泌かく乱物質の溶出を調査した結果、ノニルフェノールは溶出の可能性があることが分かった。

－水環境における水質リスク管理に関する研究－

個別研究課題目次

3.1 環境ホルモン生成物質の水環境中での挙動に関する研究…… (水 質 研 究 室) … 80

3.2 下水中の微量化学物質の新しい検出技術に関する調査…… (水 質 研 究 室) … 86

3.3 下水汚泥中内分泌かく乱物質の消長に関する調査…… (汚 泥 研 究 室) … 88

3.4 生態系から見た下水処理水の評価方法に関する調査…… (水 質 研 究 室) … 90

3.5 水循環健全化のための環境ホルモン等リスク対策の調査検討…… (三 次 処 理 研 究 室) … 96

3.6 内分泌かく乱物質等の発生源と処理対策手法の調査…… (三 次 処 理 研 究 室) … 98

3.7 下水道での有害化学物質の管理に関する調査…… (水 質 研 究 室) …104

3.8 病原性微生物の下水処理過程での制御に関する研究…… (汚 泥 研 究 室) …108

3.9 病原性微生物の発生源および対策に関する調査…… (三 次 処 理 研 究 室) …110

3.10 下水中病原性微生物の同定方法に関する研究…… (汚 泥 研 究 室) …116

3.11 水系における病原性微生物の挙動に関する研究…… (三 次 処 理 研 究 室) …118

3.12 下水処理水の安全性向上に関する研究…… (三 次 処 理 研 究 室) …122

3.1　環境ホルモン生成物質の水環境中での挙動に関する研究

研究期間：平 11 ～平 14
担　当：水質研究室

【要旨】

人や生物へ、内分泌攪乱作用を引き起こす化学物質の問題が指摘されているが、それらの物質の中には、ノニルフェノール(NP)のように水環境中での分解により生成する物質もある。このため、効率的な負荷の削減を可能にするために、NP を生成するノニルフェノールエトキシレート(NPEO)等の水環境中での挙動を把握する必要がある。

１１年度は、綾瀬川の水を用いた生分解実験により、NPEO、NP 濃度の経時変化、及び分解生成物の把握を行い、NPEO、NP 濃度は経時的に減少すること、ノニルフェノキシカルボン酸(NPEC)が蓄積する場合があることを確認した。また、綾瀬川の底泥を用いた溶出実験を行い、NPEO、NP が溶出する可能性を明らかにした。

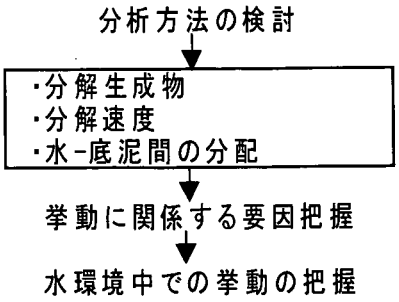


図-1　研究の概要

1.はじめに

人や生物へ、内分泌攪乱作用を引き起こす可能性のある化学物質の問題が指摘され、環境庁では、67 種類の化学物質をリストアップしている[1]。界面活性剤として普遍的に使用されているノニルフェノールエトキシレート（以下、NPEO）は、このような化学物質には含まれていないが、分解によりエチレン鎖が短くなるとともに、エチレン鎖の末端がカルボキシル化された化合物（以下、NPEC）を生成し、これらの物質が嫌気消化により内分泌攪乱作用を有すると疑われるノニルフェノール（以下、NP）を生成することが明らかになっており、また、国内の河川水、底質中でも NP は高い割合で検出されている[2]。このため、発生源や排出源等での効率的な負荷削減対策を図るために、NPEO や NPEC などの水、底泥等の水環境中での挙動を把握する必要がある。

2.既往調査研究のレビュー

11 年度は、研究の初年度であるため、国内外の既往調査研究のレビューを行った。

2.1　河川水中での挙動

複数の河川水を用いた NPEO の生分解実験から、NPEO の最終生分解産物は NP1EC であり、植種源の相違により生分解の速度が異なる場合があるとの報告[3]や、NP、NP1EO、NP2EO、NP1EC、NP2EC を測定した生分解実験結果では、15 日程度までは、NP2EO が卓越するが、それ以降は NP2EC が卓越し、最終的には NP2EC が 60 %以上、残りが NP1EC となり、NP、NP1EO はほとんど検出されないとの報告[4]がある。また、下水処理水が排出される河川での濃度分布は NPEC>NPEO>NP となり、流下にともない、NP1EC+NP2EC が増加、NPEO が減少するとの結果[5]や、季節変動として水温が高い時期に NP、NP1EO、NP2EO の濃度が減少するとの報告[5]がある。さらに、NPEO の分解生成物としては、エチレン鎖だけではなくノニル基の方も酸化された物質(CAPEC)が最終生成物であり、このような物質が下水処理水中でもかなりの割合を占めるとの報告[6]もある。

NP の生分解に関しては、東京湾の海水、底泥、多摩川の河川水、底泥、3 処理場の下水などを用いた生分解実験で、東京湾の底泥及び 1 処理場の下水を用いた場合に分解が確認されたとの報告[7]がある。また、

4-n-NP を分解する菌の単離も行われ、4-n-NP より極性が高いフェノール化合物が分解生成物との推定[8]も行われている。

2.2 下水処理場での挙動

11 の下水処理場の一次処理水、二次処理水を調査した結果、一次処理水では NPnEO(n>3)が大部分を占めるが、二次処理水では NPnEO(n>3)の割合が減少し、NP1EC、NP2EC の割合が飛躍的に増加するとともに、NPnEO(N=1,2)の割合も増加すること、NP、NPnEO(n=1,2)の除去に関しては水温依存性があり、夏期に除去率が高くなること、また、低負荷、硝化促進運転の方が高い除去率が得られるとの報告[9]がある。また、下水処理過程での除去率はモルベースで 59 ± 18%であり、消化汚泥中では NP がほとんどをしめるとも報告[9]されている。また、下水処理によって NPnEC(n=1-3)が増加するとともに、塩素処理により臭素化された BrNPEC が検出されるとの報告[3]もある。さらに、実験プラント（活性汚泥法）を用いた挙動調査でも、水相からの除去率は高く、かつ安定していること、処理水では NPEC(n=1-3)の割合が増加することが報告[10]されている。

3.河川水を用いた生分解実験

3.1 実験方法

東京都足立区を流れる綾瀬川の桑袋橋地点で、平成 12 年 1 月に採水を行い、生分解実験を行った。

実験条件は、室温で、広口摺りガラスに蓋をした条件で行った。測定項目は水温、溶存酸素濃度、NP、NPnEO(n=1-4)、NPnEO(n ≧ 5)、NP1EC、NP2EC 及び NP3EC であり、主な項目の分析方法を表－1 に示す。なお、実験は溶存酸素条件の異なる 2 系列で行い、一方は溶存酸素濃度を高く保つために適宜、曝気を行い(系列 1)、他方は曝気を行わなかった(系列 2)。

表－1 分析方法(河川水)

項目	分析方法
NP	「外因性内分泌攪乱化学物質調査暫定マニュアル」環境庁水質管理課
NPEO	「下水道における内分泌攪乱化学物質水質調査マニュアル」(社)日本下水道協会
NPEC	小玉「アルキルフェノール関連物質の測定方法の検討」第16回環境測定技術事例発表会

3.2 実験結果

図－2 に水温、図－3 に溶存酸素濃度、図－4、図－5 に NPnEO(n=1-4)、NPnEO(n ≧ 5)濃度、図－6、図－7 に NP、NP1EC、NP2EC 及び NP3EC 濃度の経時変化をそれぞれ示す。

図－4、図－5 からは、NPnEO(n=1-4)、NPnEO(n ≧ 5)ともに、河川水中で生分解を受け、質量ベースで減少することがわかり、NPnEO(n=1-4)の蓄積は確認されなかった。図－6、図－7 より、NP の濃度については減少が確認され、NP1EC、NP2EC 及び NP3EC の濃度については、系列 2 では増加する傾向が見られたが、系列 1 では見られなかった。また、NP の減少速度は系列 1 のほうが大きかった。このように、溶存酸素条件の違いにより、分解速度、分解生成物濃度に変化が見られた。

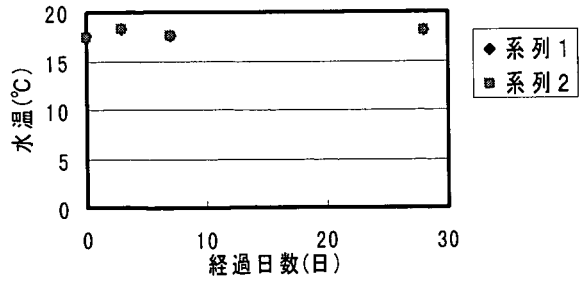


図-2 水温の経時変化

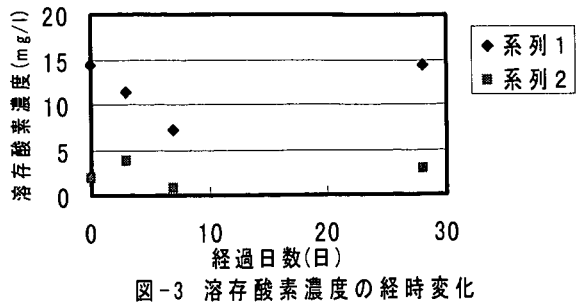


図-3 溶存酸素濃度の経時変化

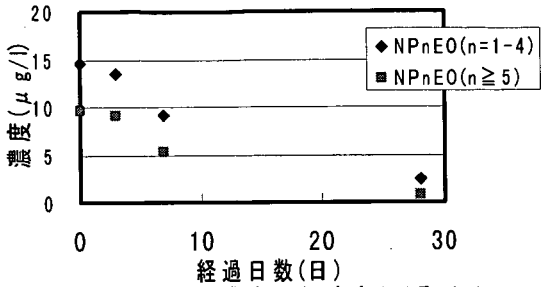


図-4 NPnEO濃度の経時変化(系列1)

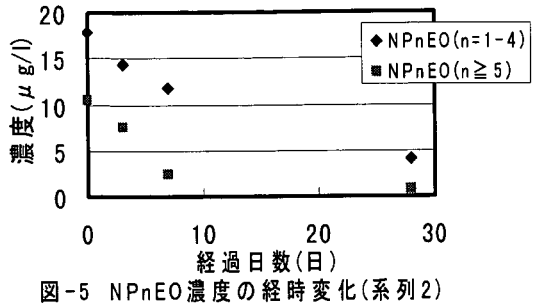


図-5 NPnEO濃度の経時変化(系列2)

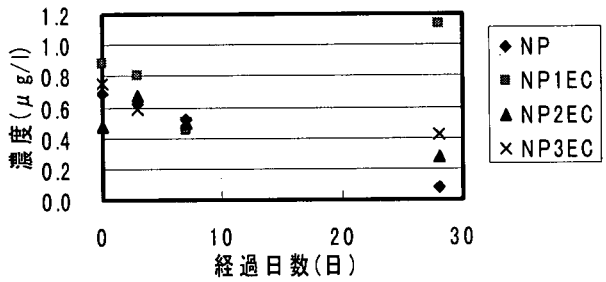


図-6 NP濃度等の経時変化(系列1)

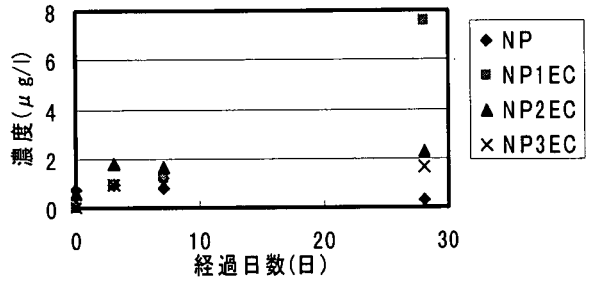


図-7 NP濃度等の経時変化(系列2)

4.底泥からの溶出実験

4.1 実験方法

3.1 で述べた地点で採泥を行い、現地の河川水を直上水として溶出実験を行った。実験条件は 10l のメスシリンダー(φ 17cm)に底泥を 13.5cm 厚に敷き詰めて行った。直上水の測定項目は 3.1 と同様であり、溶存酸素条件は、適宜曝気を行う(系列 1)と曝気を行わない(系列 2)の 2 種類とした。また、3.2 の河川水での実験結果を、底泥が存在しない場合の濃度変化とし、溶出実験で得られた結果との差が、底泥の寄与分とすることにした。

底泥の NP 等の分析方法を表－2 に示す。なお、直上水の分析方法は表－1 にしたがった。

表－2 分析方法(底泥)

項目	分析方法
NP	「外因性内分泌攪乱化学物質調査暫定マニュアル」環境庁水質管理課
NPEO	「下水道における内分泌攪乱化学物質水質調査マニュアル」(社)日本下水道協会
TOC	「JIS K0102.22.1」に準拠したCHNコーダー

4.2　実験結果

実験に供した底泥の分析結果を表－３に示す。また、塩素イオン濃度は底泥間隙水で 40(mg/l)、直上水で 74(mg/l)であった。

表－3 底泥分析結果

	TOC (mg/g-dry)	含水率 (%)	NP (μg/kg-dry)	NPnEO (n=1～4) (μg/kg-dry)	NPnEO (n≧5) (μg/kg-dry)
系列1	2.2	38.0	2,940	7,540	63,800
系列2	5.4	37.4	3,620	6,890	34,800

表－３に示すように、綾瀬川の底泥には、NPnEO(n ≧ 5)が、NP や NPnEO(n=1-4)と比較して多量に含有されていた。

図－８に水温、図－９に溶存酸素濃度、図－１０、図－１１に直上水中の NPnEO(n=1-4)、NPnEO(n ≧ 5)濃度、図－１２、図－１３に直上水中の NP、NP1EC、NP2EC 及び NP3EC 濃度の経時変化をそれぞれ示す。なお、図－１０～図－１３ついては、3.2 に記述した河川水中の濃度変化の結果を除いた値で示している。

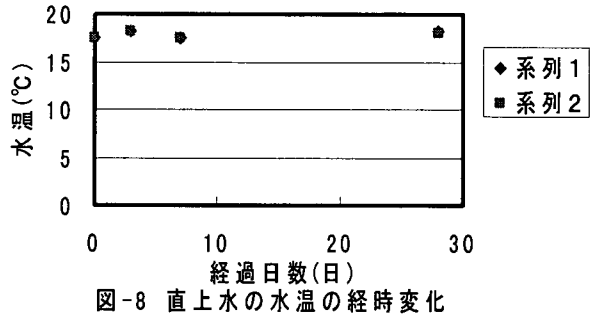


図-8 直上水の水温の経時変化

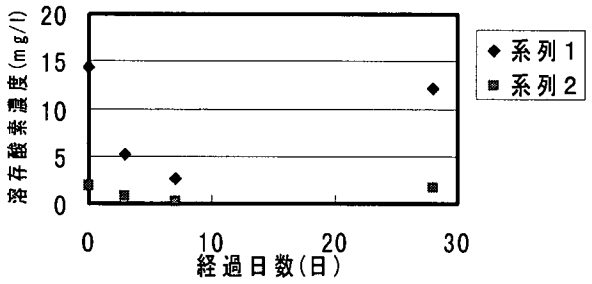


図-9 直上水の溶存酸素濃度の経時変化

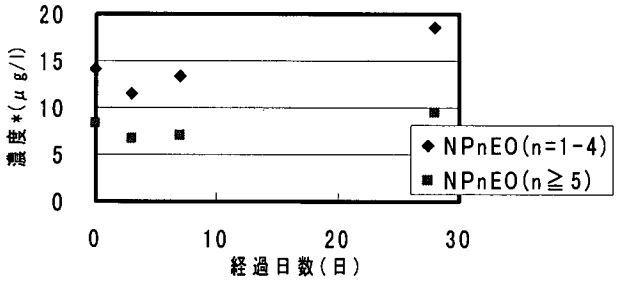


図-10 直上水のNPnEO濃度の経時変化(系列1)

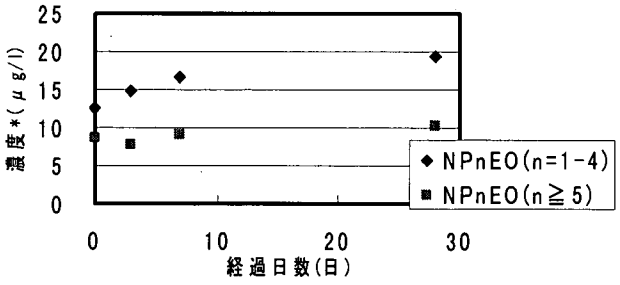


図-11 直上水のNPnEO濃度の経時変化(系列2)

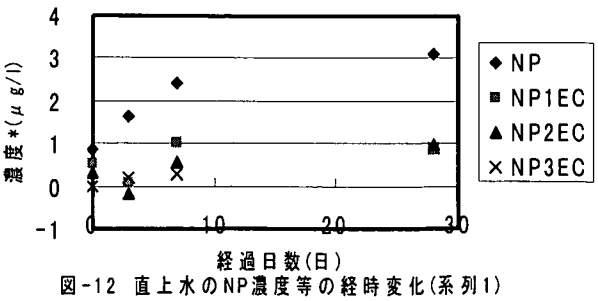


図-12 直上水のNP濃度等の経時変化(系列1)

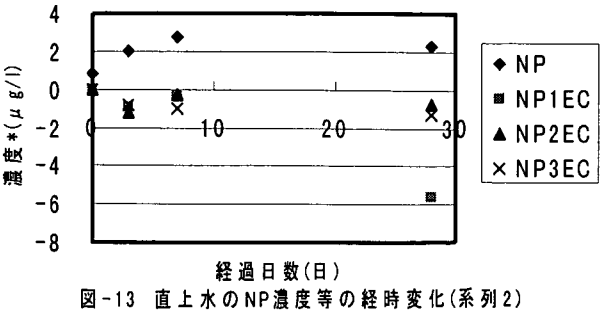


図-13 直上水のNP濃度等の経時変化(系列2)

＊　3.2 の河川水中の濃度変化を除いた値で表示

図－１０、図－１１より、28 日後には、NPnEO(n=1-4)については、底泥が存在することにより濃度が増加する傾向が見られ、NPnEO(n ≧ 5)についてもわずかではあるが増加の傾向があった。また、図－１２、図－１３から、NP についても、底泥が存在することによる濃度の増加が確認されたが、NPnEC については、濃度の変化はほとんどみられなかった。

NP、NPEO は、保存性の物質ではなく、分解・生成による濃度変化が生じるため、厳密な溶出速度の算定は困難であるが、実験開始時から 28 日までの平均的な溶出速度を図－１０～図－１３に示す実験結果より算出すると表－４のようになる。

表－4 各物質の溶出速度

(単位:μg/m2･日)

NP		NPnEO (n=1～4)		NPnEO (n≧5)	
系列1	系列2	系列1	系列2	系列1	系列2
23.8	15.6	45.8	72.4	11.7	16.1

表－３から、底泥中の濃度は NP ＜ NPnEO(n=1-4)＜ NPnEO(n ≧ 5)であり、親水性の大きさは NP ＜ NPnEO(n=1-4)＜ NPnEO(n ≧ 5)であるが、溶出速度は NPnEO(n=1-4)が最も大きいという結果になった。ただ、この結果は質量ベースで評価していることや NPEO については、分析上、単一の物質で評価しているのではないことに留意する必要がある。

また、実験開始時の底泥と河川水中の NP、NPnEO(n=1-4)、NPnEO(n ≧ 5)濃度を用いて、底泥の単位有機炭素量当たりの物質量と水中濃度との比を算出すると表－５のようになった。

表－5 底泥中濃度と水中濃度の比

(単位:(mg/kg-TOC)/(mg/l))

	NP	NPnEO (n=1～4)	NPnEO (n≧5)
系列1	1,900,000	240,000	3,000,000
系列2	960,000	72,000	620,000

底泥の採取方法がエクマンバージを用いた方法であるため、底質の NP 等の濃度が概算値であることに留意する必要はあるが、底泥への分配傾向は、NPnEO(n=1-4)が NP や NPnEO(n ≧ 5)よりも小さかった。疎水性の大きさは、NPnEO(n ≧ 5)＜ NPnEO(n=1-4)＜ NP の順であるため、底泥への分配は、この大きさの順になることが想定された。しかし、NPnEO(n=1-4)が最も小さいという結果は、平衡状態に達していない状態での測定や直上水の濃度変動の影響を受けている可能性があると考えられる。また、NPnEO(n=1-4)の底泥からの溶出速度が比較的大きいことも関連があるかもしれない。

図－１４に、実験期間中の底泥中の NP 濃度の経時変化を示す。図－１４より、実験期間中では底泥中の NP 濃度の大きな変化は見られなかった。

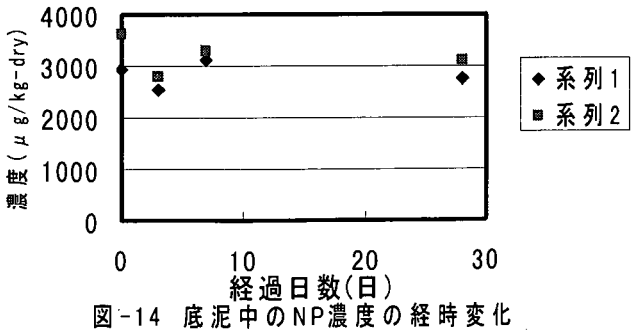


図-14 底泥中のNP濃度の経時変化

5.まとめ

・既存文献のレビューにより、NP、NPEO、NPEC の河川水中、下水処理工程での挙動特性や濃度レベルについて把握した。

・綾瀬川の河川水を用いた生分解実験により、NP、NPEO 濃度は減少し、NPnEO(n=1-4)の蓄積は確認されなかった。また、NPEC 濃度については、経時的に増加する場合があった。
・綾瀬川の底泥を用いた溶出実験により、直上水中の NP、NPEO 濃度が増大し、底泥の影響が確認できた。また、質量で評価した溶出速度は、NPnEO(n=1-4)が NP、NPnEO(n ≧ 5)より大ききいという結果が得られた。
・河川水と底泥中の濃度を用いて水と底泥間の分配傾向を把握したところ、NPnEO(n=1-4)が、NP や NPnEO(n≧5)より小さかったが、この傾向は疎水性の大きさとは整合しない結果であった。
・底泥中の NP 濃度は、28 日間では大きな変化はなかった。

6.今後の課題

平成 11 年度の実験は質量ベースでの評価となっているため、EO 基の数が変化するだけでも実験結果は影響を受ける。このため、平成 12 年度以降は、モルベースでの化合物の挙動の把握、EO 基の数毎の濃度把握などを行う必要があると考えている。

参考文献

1)外因性内分泌攪乱化学物質問題への環境庁の対応方針について－環境ホルモン戦略計画 SPEED'98 －、環境庁、1998
2)例えば、平成 11 年度水環境における内分泌攪乱化学物質に関する実態調査結果（春期・夏期調査)、建設省河川局・都市局下水道部、1999
3)牧　秀明、非イオン界面活性剤アルキルフェノールエトキシレート（APE）の生分解性と水環境中挙動に関する研究、大阪大学博士論文（改訂版)、1998
4)Tomas L. Potter, Kathleen Simmons, Junnan Wu, Mauricio Sanchez-Olvera, Paul Kosteck, and Edward Calabrese, Static Die-away of a Nonylphenol Ethoxylate Surfactant in Estuarine Water Samples, Environmental Science and Technology, Vol.33, No.1, pp113-118, 1999
5)Marijan Ahel, Walter Giger and Christian Schaffner, Behaviour of Alkylphenol Polyethoxylate Surfactants in the Aquatic Environment -Ⅱ. Occurrence and Transformation in Rivers, Water Research, Vol.28, No.5, pp1143-1152, 1994
6)Antonio Di Corcia, Angela Costantino, Carlo Crescenzi, Erica Marinoni and Roberto Samperi, Environmental Science and Technology, Vol.32, No.16, pp2401-2409, 1998
7)Katsuhiko Fujii, Naoto Urano, Shigeru Kimura, Yoko Nomura and Isao Karube, Microbial Degradation of Nonylphenol in Some Aquatic Environments, Fisheries Science, Vol.66, pp44-48, 2000
8)古沢　茂美、中井　智司、細見　正明、ノニルフェノールの微生物分解、水環境学会誌、Vol.23、No.4、pp243-245、2000
9)Marijan Ahel, Walter Giger and Markus Koch, Behaviour of Alkylphenol Polyethoxylate Surfactants in the Aquatic Environment-Ⅰ. Occurrence and Transformation in Sewage Treatment, Water Reseaech, Vol.28, No.5, pp1131-1142,1994
10)藤田　正憲、加来　啓憲、下水処理過程における非イオン界面活性剤ノニルフェノールエトキシレートの挙動解明、第 36 回下水道研究発表会講演集、pp222-224、1999

（田中、小森、白崎）

3.2　下水中の微量化学物質の新しい検出技術に関する調査

研究期間：平１１～平１３
担　　当：水質研究室

【要旨】
現在、下水中には、人や生物に対して、内分泌かく乱作用や毒性作用を示す微量化学物質が含まれている可能性が指摘されている。これらの物質の現行測定法では、特殊な分析機器を必要とし、高度な技術が要求される。本調査では、微量化学物質の検出方法の簡易化、迅速化を図ることで、広範にわたって微量化学物質の挙動を監視することを可能とし、また、下水道の適切な維持管理に応用することが可能となる。

１．研究目的

下水処理プロセスにおいて、活性汚泥中の微生物の生育環境を安定に保つことは非常に重要である。しかし、慢性的または突発的な水質事故等による下水道への有害化学物質の流入は、活性汚泥に対してダメージを与える可能性がある。最近では大量の硫酸の流入により終末処理場の活性汚泥が死滅する事故も起きており、下水道へ流入する有害化学物質が下水処理へ与える影響の評価手法や、有害化学物質の下水道施設への流入に対する連続監視技術の確立が必要である。

活性汚泥中の硝化細菌は、生物学的窒素除去の硝化工程を担うが、有害化学物質の影響を受けやすい。この性質に注目し、下水中の毒性物質の検出への硝化細菌を用いたバイオセンサの利用を検討している。11 年は、バイオアッセイ系の試験について検討を行った。

表－1　バイオアッセイ系の分類

1) 採水などの作業を伴う室内実験方法
① 純粋培養系硝化細菌を用いたバイオアッセイによる硝化阻害影響試験
② 混合培養系硝化細菌を用いたバイオアッセイによる硝化阻害影響試験
2) 自動連続監視システムの開発
③ 硝化細菌を固定化した、固定化微生物膜と溶存酸素電極で構成した毒物検知バイオセンサ（毒物センサ）の開発

また、近年、環境中に排出された種種の化学物質が、生物の内分泌系をかく乱する問題、いわゆる環境ホルモン問題が注目されており。わが国においても環境ホルモンが原因の一つであると考えられる水生生物への影響が報告されている。土木研究所では環境ホルモンの生物影響（女性ホルモン作用＝エストロゲン作用）を評価する目的で、組み替え酵母を用いたエストロゲン活性の測定を行った結果、女性ホルモン 17βエストラジオールの活性値を１とすると、ピル（低用量の経口避妊薬）の成分であるエチニルエストラジオール（合成女性ホルモン）については活性値が 0.4 となり、他の内分泌かく乱作用が疑われている物質に比べて非常に高いことを確認した。従来わが国ではピルの使用が認められていなかったが、平成 11 年 6 月の中央薬事審議会において医師の処方が必要な医療用医薬品として承認されたことを受け、平成 11 年秋より販売されている。ピルの使用が普及している欧米諸国においては、環境水や下水試料からエチニルエストラジオールが検出されている。エチニルエストラジオールについては生分解性が低いとの報告もあり、今後ピルの使用が普及した場合、わが国においても下水道を経由して環境への排出が増加することが予想される。今回の調査では、従来からの GC/MS、LC/MS 等の機器分析に代わり、簡便に測定ができる ELISA 法の、下水道への流入・放流水への適用性について検討した。

２．研究方法

硝化細菌を用いたバイオアッセイ系試験では、流入下水における検出頻度が高いフェノール類について、有機塩素化合物標準溶液の影響を検討した。感受性については、純粋、混合培養系硝化細菌を用いたバイオアッセイによる硝化阻害影響試験では 50%硝化阻害影響濃度、バイオセンサでは 10%硝化阻害影響濃度により評価した。

また、エチニルエストラジオールの測定については、主に生活排水が流入する下水処理場より採取した試料を使用した。試料の抽出方法は、エチニルエストラジオールの化学構造が 17βエストラジオールとほぼ同じであることから判断し、建設省が 17βエストラジオールの実態調査に用いた方法に準じて行った。そして、

抽出試料について、市販の ELISA Kit (RIDASCREEN Ethinylostradiol Kit, r-Biopharme 社製)を用いて濃度を測定した。

3．研究結果

各供試物質に対するそれぞれの硝化細菌バイオアッセイ系の感度の結果を表 2 に示す。室内実験手法の中では、純粋培養系硝化細菌を用いたバイオアッセイ系が最も感度が高い結果が得られた。また、毒物センサでは、室内実験手法に比べて感受性が 1～2 桁程度劣ることがわかった。室内実験手法では、採水を行う必要があり、判定に要する時間が 1 日と長いのに対し、毒物センサでは連続自動採水が行われ、判定に要する時間は 20 分と短い。これらを総合すると、下水道での毒性物質の監視は、慢性的な低濃度の流入に対応する純粋培養系硝化細菌を用いたアッセイ系と、突発的な高濃度の流入に対応する毒物センサを用いた連続自動監視とを組み合わせて利用することが有効であると考えられる。

表－2 各種バイオアッセイに対する化学物質の阻害影響濃度(mg/L)

供試物質	純粋培養系 EC_{50}	混合培養系 EC_{50}	毒物センサEC_{10}
Phenol	7.01×10^{-1}	2.80×10^{0}	2.20×10^{0}
2-chlorophenol	1.10×10^{-1}	6.80×10^{-2}	1.30×10^{0}
3-chlorophenol	4.60×10^{-2}	9.00×10^{-2}	1.40×10^{0}
3-chlorophenol	9.40×10^{-3}	2.30×10^{-1}	4.10×10^{0}
2,3-dichlorophenol	5.40×10^{-2}	8.80×10^{-2}	1.50×10^{1}
2,4-dichlorophenol	1.50×10^{-1}	3.70×10^{-2}	4.00×10^{1}
2,5-dichlorophenol	4.10×10^{-2}	5.80×10^{-1}	7.60×10^{0}
2,6-dichlorophenol	1.10×10^{0}	1.30×10^{0}	5.90×10^{1}

流入下水および放流水中のエチニルエストラジオール濃度の測定結果を表－3 に示す。ELISA 法は、測定対象以外にも構造が類似の物質に反応し、測定値が正の誤差を持つ可能性がある。今回使用した ELISA キットでは、その検出特性から、17βエストラジオールの影響が考えられる。平成 10 年度に行われた下水道における環境ホルモン実態調査での、17βエストラジオールの中央値は流入下水 43ng/L、処理水 14ng/L、最高濃度は流入下水 94ng/L、処理水 55ng/L であり、この濃度で 17βエストラジオールが存在した場合、今回使用した ELISA Kit に与える正の誤差は、中央値では 0.3ng/L、0.1ng/L、最高濃度で 0.7ng/L、0.4ng/L となり、今回の測定値よりも一桁低い値である。今回の検討では、17βエストラジールの測定結果がないため、測定結果に占めるその割合ははっきりしないが、いずれの試験水でもエチニルエストラジオールが含まれていて、ELISA 法による検出が可能であることが類推された。

表－3 流入下水および処理水中のエチニルエストラジオール濃度

処理場	流入下水 ng/L				処理水 ng/L			
	7月	8月	9月	平均	7月	8月	9月	平均
A	4.9	4.3	6.8	5.3	1.5	1.7	2.3	1.8
B	3.9	4.4	5.2	4.5	2.0	2.0	1.8	1.9
C	6.8	7.3	14.3	9.5	1.0	1.0	0.8	0.9
D	9.7	8.7	11.8	10.0	1.4	1.1	1.2	1.2
平均	6.3	6.2	9.5	7.3	1.5	1.5	1.5	1.5

4．主な研究成果物

- 磯部，岡安，小森，田中；硝化細菌を *Nitrosomonas europaea* を用いたバイオアッセイ，下水道研究発表会講演集，**36**, 1038-1040, 1999.6
- 岡安，田中，磯部ほか；硝化細菌を用いた毒物モニタによる河川水質モニタリング，土木学会年次　学術講演会講演集第 7 部，**54**, 108-109, 1999.9
- 岡安，田中ほか；硝化細菌を用いた毒物センサの下水道施設への適用，日本水環境学会年会講演集，**34**, 76, 2000.3

（田中，小森，高橋，岡安）

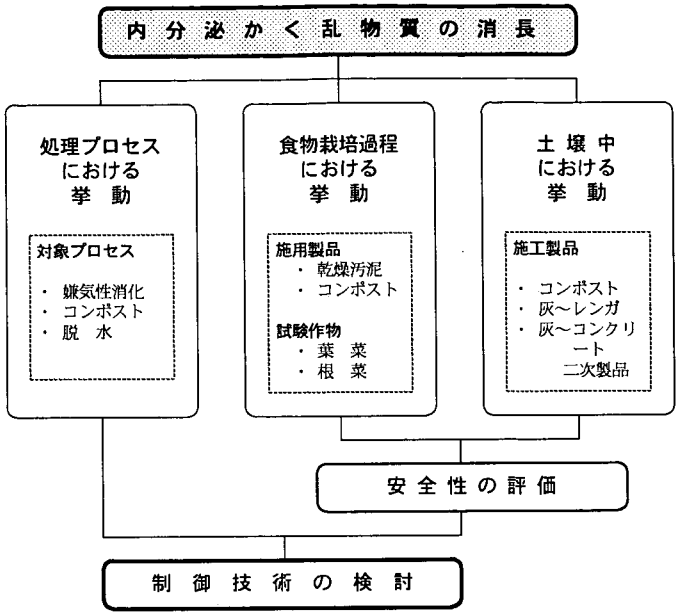
3.3　下水汚泥中内分泌かく乱物質の消長に関する調査

研究期間：平１１～平１３
担　　当：汚泥研究室

【要旨】

我が国の下水処理場にも内分泌かく乱物質の流入が確認されており，それが水処理系から汚泥処理系へ移行した際の挙動・消長を明らかとする必要がある。

１１年度は，分析方法について検討するとともに，挙動を調べる基礎的な実験としてライシメータ実験，嫌気性消化実験及び汚泥製品からの溶出実験を行い次の結果を得た。



①汚泥試料の分析では、試料中の水分を低減することと、分析工程から固相抽出操作を省くことが有効であった。②汚泥製品の施用先土壌における挙動を長期に渡って調べるライシメータ実験に着手した。③ＳＲＴが異なる余剰活性汚泥を対象とした嫌気性消化実験から、ノニルフェノールやノニルフェノールエトキシレート、エストロゲン様活性は投入汚泥中よりも増加する傾向が得られた。④有機質の汚泥製品５種類について溶出実験を行い、ノニルフェノールを初めとする６物質の溶出を調べた結果、中性付近での溶出量が多く、酸性となるほど溶出しずらい傾向を示した。

１．研究方法

１．１　分析方法の検討実験

多量の有機物からなる泥状試料を対象とした内分泌かく乱化学物質の分析方法は確立されておらず、本課題の目的達成のためには分析方法の開発・確立が欠かせない。このために、汚泥試料からの抽出効率を高める必要があり、試料に作用する溶媒濃度の関係を調べる実験を行った。実験では、抽出効果をノニルフェノールとノニルフェノールエトキシレートの測定から調べることとし、試料に余剰活性汚泥粉末を、溶媒に水分含有量が異なるメタノール液を用い、振盪法により抽出時間を変えて効果を調べた。

１．２　ライシメータ実験

下水汚泥製品の緑・農地利用に際して、施用先での挙動・消長を明らかとするために、W:１ m × D:１ m × H:１ m のライシメータ６台を屋外に設置した曝露・長期実験に着手した。各ライシメータの設定条件を**表－１**に示した。実験ではノニルフェノール（NP）と17 βエストラジオール（17 β-E）を強制混合したケースも設定した。気象把握のために気圧、気温、風速、日射量、相対湿度、降雨量及び土壌温度を連続観測するとともに、土壌と浸出液を定期的に採取した。採取した試料は分析方法が確立するまでの間冷凍保存することとした。

表－１　ライシメータの設定条件

ｹｰｽ（1）	土壌のみ⇒＜対照系＞
ｹｰｽ（2）	土壌＋(NP)＋(17β-E)
ｹｰｽ（3）	土壌＋(ｺﾝﾎﾟｽﾄ)
ｹｰｽ（4）	土壌＋(ｺﾝﾎﾟｽﾄ)⇒＜定期耕作＞
ｹｰｽ（5）	土壌＋(ｺﾝﾎﾟｽﾄ)＋(NP)＋(17β-E)
ｹｰｽ（6）	土壌＋(ｺﾝﾎﾟｽﾄ)＋(NP)＋(17β-E)⇒＜定期耕作＞

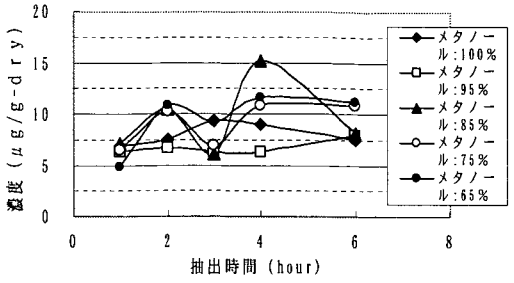
１．３　嫌気性消化実験

実下水を用いた SRT が異なる活性汚泥法の連続

実験より得られた余剰活性汚泥を供試汚泥として、消化温度３５℃、消化日数２０日の条件で５ L の反応槽による９５日間の連続実験を行った。供試汚泥は SRT：５，１０，２０ day の３種と最初沈殿池汚泥の１種である。

１．４　溶出実験

原料と製造方法が異なるコンポスト４種と乾燥汚泥１種を用い、全量を５ mm 以下のフルイを通過させた乾燥重量 400 g に対して４ L のイオン交換蒸留水を作用させ、2N,10N-HCl 溶液を用いて pH を６，５，４，３に自動制御しながら２０℃の恒温室にて２４時間の溶出実験を行った。

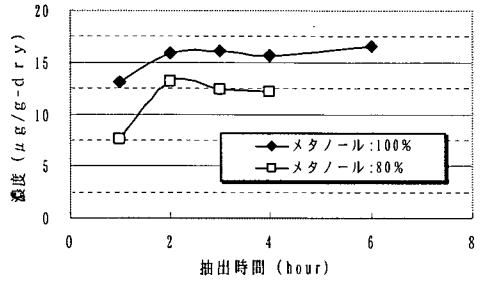


図－１　当初の抽出実験例(NPの例)

２．研究結果

２．１　分析方法の検討実験

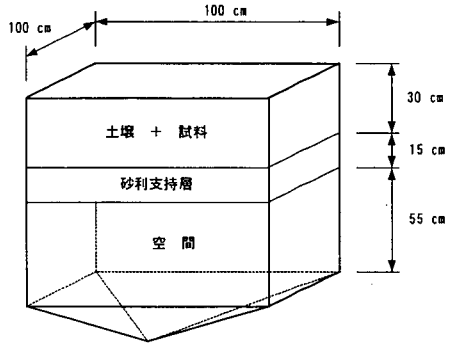
精製水で純度を 100 ～ 65%に調整したメタノール液による抽出効果を調べた結果の一例を**図－１**に示した。結果は不自然な変化を示し、その原因として抽出液のクリーンナップのために行う操作が緻密で繁雑な固相抽出が問題と考えられた。**図－２**は固相抽出操作を省いて行った結果である。これより、分析方法としては試料中水分の低減と合わせて、分析フローから固相抽出を省くことが有効な方法と考えられた。



図－２　固相抽出無しの実験例(NPの例)

２．２　ライシメータ実験

実験は、平成１１年１０月１４日に開始した。装置の概要を**図－３**に示した。



図－３　ライシメータ概要

２．３　嫌気性消化実験

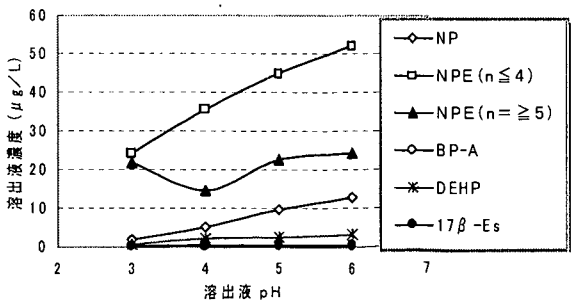
嫌気性消化実験の結果を**表－２**に示した。ここで、最初沈殿池汚泥のケースは実験開始後約１ヶ月から酸発酵が卓越するようになり、本データは完全な酸発酵の結果である。ノニルフェノール（NP）やノニルフェノールエトキシレート（$NP_{n\leq 4}$，$NP_{n\geq 5}$）及びエストロゲン様活性（Es-act）は、投入汚泥よりも消化汚泥の含有量が多い結果が得られた。但し、これらは既存の分析法に基づく結果である。

２．４　溶出実験

有機質汚泥製品からの溶出は、全体的な傾向として、中性近傍での溶出量が多く、酸性となるほどに溶出しずらいものであった。実験結果の一例を**図－４**に示す。

表－２　消化実験の結果　　（μg／L）

			NP	$NPE_{(n\leq 4)}$	$NPE_{(n\geq 5)}$	Es-act
最初沈殿池汚泥		投入	51	260	35	17.1
		消化	164	270	210	85
余剰活性汚泥	SRT = 5day	投入	11.0	50	69	93
		消化	76	117	107	45
	SRT = 10day	投入	13.2	45	109	52
		消化	64	162	230	136
	SRT = 20day	投入	16.1	43	56	36
		消化	138	238	300	90



図－４　生・高分子系コンポストの溶出実験結果

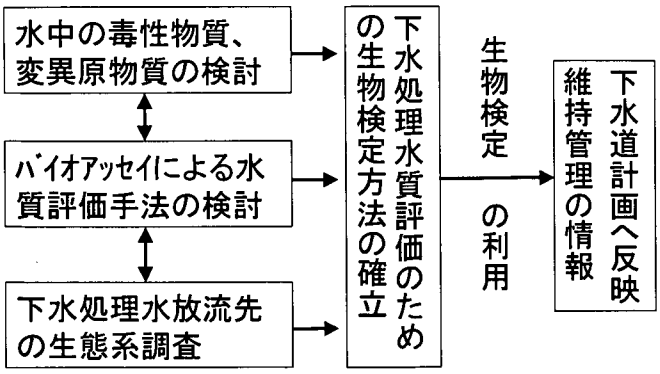
（森田、落、川嶋）

3.4　生態系から見た下水処理水の評価方法に関する調査

研究期間：平８～平１１
担　　当：　水質研究室

【要旨】

近年、化学物質の製造、使用は増加の一途をたどっており、それらの中には有害な物質も含まれるため、水域汚染が懸念される。しかし、従来より用いられている個別物質を対象とした化学分析法では、定量分析が困難な物質や未知の有害物質には対応できない、複合影響を評価できない等の問題がある。そこで、生物を用いて生物に対する影響そのものを評価する手法であるバイオアッセイ(生物検定)が、多種類の物質が含まれる排水や環境水の毒性を総合的に評価する手法として注目されつつある。



本調査は下水や下水処理場からの放流水の毒性をバイオアッセイを用いて評価するための手法を確立することを目的としている。近年化学物質の中に、生物の内分泌系を攪乱する恐れのある物質いわゆる環境ホルモンが存在し、下水からも検出されることが指摘[1]されており、建設省においても河川及び下水道の実態調査を実施[2]していることに鑑み、11年度は環境ホルモンの生物影響を組み換え酵母を用て測定する方法を検討した。また、下水試料の測定を実施した結果、下水処理により女性ホルモン作用が削減されることが推察された。

1.　調査方法

化学物質の環境ホルモン作用を検出する目的で、遺伝子操作により女性ホルモンの受容体産生遺伝子及びホルモンと結合して活性化した受容体により発現が誘導されるレポーター遺伝子等を組み込んだ酵母菌が複数開発されている[3) 4) 5)]。これらは化学物質の女性ホルモン作用（ｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性）を検出するという機能は同様であるが、ホルモン受容体の由来や遺伝子の導入部位が異なるため、ｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性の検出特性が異なる可能性がある。そこで今年度は異なる複数の組み換え酵母株の検出感度や作業性を比較検討するとともに試料の前処理法検討や下水試料の測定を行った。

用いた酵母株は、Brunel大学 Sumpter 教授より譲渡頂いた株（以下 Sumpter 株）、大阪大学薬学部西原教授より譲渡いただいた株（以下 Two-Hybrid 株）、米国の Chemical Industry Institute of Toxicology の Kevin W. Gaidoらの株（以下 CIIT 株）の３種類である。Two-Hybrid 株および CIIT 株については、標準的な試験方法では多数の検体を簡易に測定することが困難と考えられたため、測定方法の簡略化を検討した。また、10年度に測定方法を確立した Sumpter 株を用いて試料の前処理法の検討、測定精度の検討、下水試料の測定を行った。



図－１ Sumpter 株の測定法

1. 1 Sumpter 株を用いた測定法の基礎検討

1. 1. 1 酵母法の測定方法

Sumpter 株の測定法は昨年度の結果から、図－１の方法とした。

1. 1. 2 試料の前処理法の検討

環境ホルモン等の環境中にごく微量の濃度で存在している物質を測定するためには、予め測定する成分を抽出、

表－１ 検討した前処理法の概略

No.	抽出	pH	溶出(抽出)溶媒等	SSの抽出	ｸﾘｰﾝｱｯﾌﾟ*
Ⅰ	固相	無調整	ﾒﾀﾉｰﾙ、5mL	ﾒﾀﾉｰﾙ15mL×2、超音波	－
Ⅱ	固相	無調整	ﾒﾀﾉｰﾙ:酢酸ｴﾁﾙ=1:5、5mL	ﾒﾀﾉｰﾙ:酢酸ｴﾁﾙ=1:5、15mL×2、超音波	－
Ⅲ	固相	pH3	ﾒﾀﾉｰﾙ:酢酸ｴﾁﾙ=1:5、6mL	ﾒﾀﾉｰﾙ、10mL×2、超音波	あり
Ⅳ	溶媒	pH3	NaCl30g、ｼﾞｸﾛﾛﾒﾀﾝ50ml×2	ﾒﾀﾉｰﾙ、10mL×2、超音波	－

*ｸﾘｰﾝｱｯﾌﾟ：抽出物を溶媒留去後、0.15MNaCl溶液に再溶し、ｼﾞｸﾛﾛﾒﾀﾝ抽出×2を行い、水溶性の物質を除去

濃縮する前処理を行う必要がある。

今回は代表的な化学物質の抽出法である固相抽出法と溶媒抽出法の比較検討、使用溶媒の比較検討、毒性物質の除去法検討を目的とし、流入下水及び高度処理水を対象に表－1に示す4種類の前処理方法で処理し比較を行った。

1．1．3 化学物質のｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性及び測定精度の検討

測定法が持つバラツキや測定法の特性を把握する目的で、下水道における環境ホルモン実態調査で調査対象とした化学物質を中心に表－2に示す30物質の測定を繰り返し（測定日を変えて4～6回）行い、各物質のｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性および変動係数を測定した。ｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性は17βｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙのｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性を1としたときの比活性値として求めた。また変動係数は次のように求めた。

$CV = s / x \times 100$ (%)　　CV：変動係数（%）

s：比活性値の標準偏差

x：比活性値の平均値

$s = \sqrt{V}$　　V：比活性値の不偏分散

$V = \left[\sum_{i=1}^{n} (xi - x)^2\right] / (n-1)$　　xi：測定値(比活性値)

n：測定データ数

1．1．4 回収率の検討

1．1．2で選定した前処理法により試料中のｴｽﾄﾛｹﾞﾝ物質が抽出されていることを確認するため、環境ホルモンと考えられる化学物質を精製水、下水流入水、下水処理水に添加後抽出し、GC/MSで測定を行い回収率を確認した。化学物質としては1．1．3 でｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性を検出し、かつ下水道の実態調査[2]において高い頻度での検出が報告されているﾌﾀﾙ酸ｴｽﾃﾙ類、ﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙ、ﾋﾞｽﾌｪﾉｰﾙAと低沸点物質の回収率を確認する目的で2,4-ｼﾞｸﾛﾛﾌｪﾉｰﾙ、ﾌﾞﾁﾙﾌｪﾉｰﾙを選定した。対象とした化学物質と添加濃度を表－3に示す。なお女性ホルモン類については、本方法により充分な回収率が得られることが確認[6]されているので、ここでは検討を行わなかった。

1．2 Two-Hybrid 株の検討

Two-Hybrid 株の標準の測定法[4]は試料への曝露培養をﾏｲｸﾛﾁｭｰﾌﾞで行い、続いて遠心分離、菌の破砕、遠心分離、発色操作を行うため、一度に多数の試料を測定することが困難であった。このため今回は多数の試料を効率よく測定するため、96穴のマイクロプレートを用いて曝露を行い、その後遠心分離を行わずに菌の破砕、発色操作が行える簡易測定法の検討を行った。その後簡易測定法により化学物質の測定を行った。

1．2．1 Two-Hybrid 株の測定方法検討

図－1に示した Sumpter 株の測定方法を Two-Hybrid 株に適用し、17βｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙの測定を行った結果、発色が見られず測定不能であった。このため文献[3)7)]を参考に図－2に示す Two-Hybrid 株の簡易測定法を考案し、対象物質として17βｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙを用いて次の検討を行った。

①培養時間の検討：Two-Hybrid 株の標準的な測定法では培養時間が4時間となっている。今回は測定法の簡略化による検出感度の低下が予想されることと、作業の効率性の確保を考慮し、培養時間として 4 時間、24 時間、48 時間の 3 条件を設定し検討を行った。

②添加菌数の検討：添加菌数は安定した測定結果を得るために重要な要素であり、検出感度にも関係する。今

表－2 化学物質の測定結果（Sumpter 株）

化学物質	比活性値	変動係数%
17βｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙ	1.00	29
ﾋﾄﾞﾛｷｼｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙ	0.012	22
ｴｽﾄﾛﾝ	0.61	23
ﾋﾄﾞﾛｷｼｴｽﾄﾛﾝ	0.0030	23
ｴｽﾄﾘｵｰﾙ	0.0034	29
ｴﾁﾆﾙｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙ	0.93	19
ｼﾞｴﾁﾙｽﾁﾙﾍﾞｽﾄﾛｰﾙ	0.39	16
4-t-ﾌﾞﾁﾙﾌｪﾉｰﾙ	0.000017	19
ﾍﾟﾝﾁﾙﾌｪﾉｰﾙ	0.00068	48
ﾍｷｼﾙﾌｪﾉｰﾙ	0.00061	55
ﾍﾌﾟﾁﾙﾌｪﾉｰﾙ	0.000089	30
4-n-ｵｸﾁﾙﾌｪﾉｰﾙ	0.0000052	86
4-ｵｸﾁﾙﾌｪﾉｰﾙ	0.019	41
4-n-ﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙ	0.0000012	90
4-ﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙ	0.000034	94
ﾋﾞｽﾌｪﾉｰﾙA	0.000090	9
2,4-ｼﾞｸﾛﾛﾌｪﾉｰﾙ	0.0000035	26
ﾌﾀﾙ酸ｼﾞｴﾁﾙ	0.000000055	23
ﾌﾀﾙ酸ｼﾞﾌﾞﾁﾙ	0.000000049	35
ﾌﾀﾙ酸ｼﾞ-2-ｴﾁﾙﾍｷｼﾙ	0.000000017	75
ﾌﾀﾙ酸ﾌﾞﾁﾙﾍﾞﾝｼﾞﾙ	0.00000027	8
ｱｼﾞﾋﾟﾝ酸ｼﾞ-2-ｴﾁﾙﾍｷｼﾙ	0.000000013	55
n-ﾌﾞﾁﾙﾍﾞﾝｾﾞﾝ	0.000000017	20
ﾍﾞﾝｿﾞﾌｪﾉﾝ	0.00000062	73
ﾍﾞﾝｿﾞ(a)ﾋﾟﾚﾝ	0.000000051	37
2,4-ｼﾞﾌｪﾆﾙ-1-ﾌﾞﾃﾝ	0.00000011	33
trans-1,2-ｼﾞﾌｪﾆﾙｼｸﾛﾌﾞﾀﾝ	0.00000025	106
cis-1,2-ｼﾞﾌｪﾆﾙｼｸﾛﾌﾞﾀﾝ	0.00000029	74
1,3-ｼﾞﾌｪﾆﾙﾌﾟﾛﾊﾟﾝ	0.0000023	94
2,4,6-ﾄﾘﾌｪﾆﾙ-1-ﾍｷｾﾝ	0.000000012	57

変動係数：ｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙはabsorbance50%を示す濃度のﾊﾞﾗﾂｷから、化学物質は比活性値のﾊﾞﾗﾂｷから求めた

表－3 回収率の検討結果 回収率%

検討対象	精製水			流入水			処理水		
添加濃度μg/L	0.1	0.5	1.0	0.1	0.5	1.0	0.1	0.5	1.0
化合物名									
2,4-ｼﾞｸﾛﾛﾌｪﾉｰﾙ	0.0	0.0	0.0	8.6	3.1	1.2	0.0	0.0	0.0
ﾌﾞﾁﾙﾌｪﾉｰﾙ	0.0	0.0	0.0	6.8	5.3	0.7	4.1	6.8	1.9
ﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙ	15	2.8	1.8	99	71	69	156	105	85
ﾋﾞｽﾌｪﾉｰﾙA	11	2.2	1.7	140	97	92	110	110	100
ﾌﾀﾙ酸ｼﾞﾌﾞﾁﾙ	92	101	92	138	123	122	91	157	144
ﾌﾀﾙ酸-2-ｴﾁﾙﾍｷｼﾙ	59	72	97	92	77	72	66	87	75

表－4 化学物質の測定結果(Two-Hybrid株)

化学物質	比活性値	変動係数%
17βｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙ	1.00	51
ﾋﾄﾞﾛｷｼｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙ	0.034	59
ｴｽﾄﾛﾝ	0.14	59
ｴｽﾄﾘｵｰﾙ	0.0041	38
ｴﾁﾆﾙｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙ	5.7	58
ｼﾞｴﾁﾙｽﾁﾙﾍﾞｽﾃﾛｰﾙ	3.6	66
ﾋﾞｽﾌｪﾉｰﾙA	0.00014	23
4-ﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙ	0.0037	162

変動係数：17βｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙはabsorbance50%を示す濃度のﾊﾞﾗﾂｷから、化学物質は比活性値のﾊﾞﾗﾂｷから求めた

回は測定に用いる酵母前培養液の濁度（OD 620 nmとして測定）を 0.1、0.2、0.5、1.0の 4 段階に調整し、適した添加菌数を検討した。

③菌の溶解条件：化学的な溶解法としてﾄﾞﾃﾞｼﾙｽﾙﾎﾝ酸ﾅﾄﾘｳﾑ（SDS）＋ｸﾛﾛﾎﾙﾑを用いる方法、生化学的な溶解法として酵素剤 Zymolyase-20T を用いる方法を選定し、両者の比較、添加量および反応時間の検討を行った。

④発色条件の検討：Two-Hybrid 株ではｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性をβ-ｶﾞﾗｸﾄｼﾀﾞｰｾﾞの活性として検出するため、簡易測定法に適したβ-ｶﾞﾗｸﾄｼﾀﾞｰｾﾞの検出方法を検討した。β-ｶﾞﾗｸﾄｼﾀﾞｰｾﾞの検出方法としては、測定方法で分類すると、吸光光度計を用いる方法、蛍光光度計を用いる方法、発光光度計を用いる方法が考えられる。このうち蛍光光度計、発光光度計を用いる方法は高い検出感度が得られる反面、装置が普及していない、使用する試薬のコストが高い等の課題があるため、今回は吸光光度計を用いる方法を検討した。発色試薬として Two-Hybrid 株の標準法で使用している 2-Nitrophenyl β-D-galactopyranoside (ONPG) と Sumpter 株の測定法で使用している Chlorophenolred β-D- galactopyranoside (CPRG) を用い、発色試薬及びその添加量について比較した。

1. 2. 2 簡易測定法による化学物質の測定

1. 2. 1で確認した簡易測定法を用いて表－４に示した８つの化学物質を測定した。化学物質のｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性は次の計算式より求めたβ-ｶﾞﾗｸﾄｼﾀﾞｰｾﾞ活性と化学物質濃度から用量反応曲線を作成し、用量反応曲線の直線部分より一次式を導き、活性が 17βｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙの活性値の50%に相当する化学物質濃度を算出し、17βｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙの50%活性値の濃度との比から、17βｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙのｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性値を1としたときの比活性値として求めた。また、変動係数は **1. 1. 3 化学物質のｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性及び測定精度の検討**と同様に求めた。

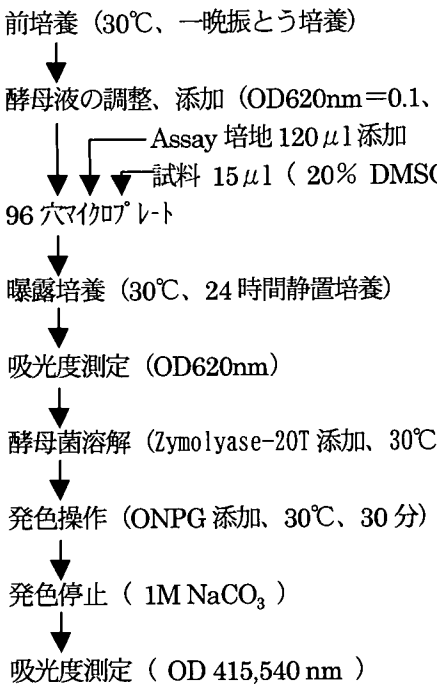
β-ｶﾞﾗｸﾄｼﾀﾞｰｾﾞ活性
＝1000×(OD414－1.75×OD540)/(30×0.05×OD620)

1. 3 CIIT 株の検討

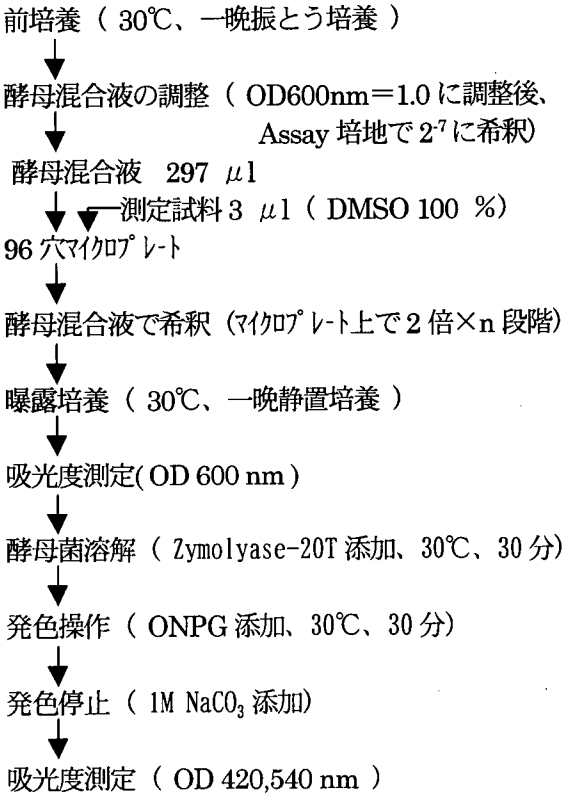
CIIT 株の標準の測定法[5]は試料への曝露培養をﾏｲｸﾛﾃｽﾄﾁｭｰﾌﾞ中で一晩振とう培養により行い、その後培養液の一部と菌の破砕剤、発色基質を 96 穴のﾏｲｸﾛﾌﾟﾚｰﾄに分注し、発色を行う方法であり、一度に多数の試料を測定することが困難であった。このため今回は多数の試料を効率よく測定するため、96 穴のﾏｲｸﾛﾌﾟﾚｰﾄを用いて曝露を行い、すべての操作を 96 穴のﾏｲｸﾛﾌﾟﾚｰﾄで行うﾏｲｸﾛﾌﾟﾚｰﾄ法の検討を行った。その後ﾏｲｸﾛﾌﾟﾚｰﾄ法により化学物質の ｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性を測定した。

1. 3. 1 CIIT 株の測定方法検討

CIIT 株の標準の測定法[5]を参考に、図－３に示すﾏｲｸﾛﾌﾟﾚｰﾄ法を考案した。対象物質として 17βｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙを用いて曝露培養時間及び添加菌数を検討した。検討した条件は、曝露培養時間 4時間の場合は Od600nm＝1.0に調整した酵母培養液を2^{-1}～2^{-6}の割合で添加し酵母混合液を作成する 6条件、曝露培養時間 17時間の場合、同様に2^{-3}～2^{-9}の割合で添加する 7条件の計 13条件である。また酵母菌の破砕以降の操作は基本的に標準の方法と同様としたが、破砕に用いる酵素剤が国内で入手困難なため、測定に支障ないことを標準の方法で確認し、酵素剤を Zymolyase-20T に変更した。



図－２ Two-Hybrid 株の簡易測定法



図－3 CIIT 株の測定法（ﾏｲｸﾛﾌﾟﾚｰﾄ法）

1. 3. 2 ﾏｲｸﾛﾌﾟﾚｰﾄ法による化学物質の測定

1. 3. 1で確認したﾏｲｸﾛﾌﾟﾚｰﾄ法を用いて表－5に示した 12 の化学物質を測定した。化学物質のｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性は1. 2. 2 簡易測定法による化学物質の測定と同様の方法により、17βｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙのｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性値を 1 としたときの比活性値として求めた。また、変動係数は1. 1. 3 化学物質のｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性及び測定精度の検討と同様に求めた。

1. 4 下水試料の測定

1. 1 Sumpter 株を用いた測定法の基礎検討で選定した方法により前処理した後、 Sumpter 株を用いた酵母法によりｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性を測定した。試料は 11 年度に建設省が実施した下水道の環境ホルモン実態調査と同時に採取し、夏期 32 ヶ所、秋期 10 ヶ所の処理場を対象に流入水、処理水の測定を行った。

表－5 化学物質の測定結果（ CHT 株）

化学物質	比活性値	変動係数%
17βｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙ	1	5
17αｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙ	0.1	5
ﾋﾄﾞﾛｷｼｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙ	0.3	20
ｴｽﾄﾛﾝ	0.1	7
ﾋﾄﾞﾛｷｼｴｽﾄﾛﾝ	0.005	10
ｴｽﾄﾘｵｰﾙ	0.004	6
ｴﾁﾆﾙｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙ	0.7	56
ｼﾞｴﾁﾙｴﾁﾙﾍﾞｽﾃﾛｰﾙ	0.4	5
4-ﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙ	0.0002	19
4-n-ﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙ	0.00002	27
4-n-ｵｸﾁﾙﾌｪﾉｰﾙ	0.00002	18
ﾋﾞｽﾌｪﾉｰﾙA	0.00005	45

変動係数：ｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙはabsorbance50%を示す濃度のﾊﾞﾗﾂｷから、化学物質は比活性値のﾊﾞﾗﾂｷから求めた

2. 結果及び考察

2. 1 酵母法の基礎検討

2. 1. 1 試料の前処理方の検討

A処理場の流入水および高度処理水を表－1に示したⅠ～Ⅳの前処理法で処理後 Sumpter 株を用いて測定した結果を次の表－6に示す。測定結果から、前処理法のⅢ、Ⅳに比べⅠ、Ⅱは試料の ｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性の回収が良好と考えられた。また用量反応曲線を比較すると、Ⅱは試料の最大濃度付近で細胞毒性の影響と考えられる ｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性の低下が見られたことからⅠの方法、つまり試料を固相抽出し、溶出溶媒に ﾒﾀﾉｰﾙを用いる方法が酵母法で ｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性を測定する場合の前処理法として適していると判断した。

表－6 前処理法の検討結果

	エストロゲン活性(μg/L ｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙ等量)	
	流入下水	高度処理水
Ⅰ	0.048	0.00036
Ⅱ	0.047	0.00032
Ⅲ	0.029	(0.00013)
Ⅳ	0.024	0.00018

（ ）の数値は測定値が低く、定量性が確保されていない参考値

2. 1. 2 測定精度及び化学物質のｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性の検討

測定結果を表－2に示す。ｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性については ｴｽﾄﾛﾝ、ｴﾁﾆﾙｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙ、ｼﾞｴﾁﾙｽﾁﾙﾍﾞｽﾃﾛｰﾙ等の女性ホルモン類（合成女性ホルモン含む）の比活性値は 0.003～0.93（平均 0.33）と高いのに対し、その他の化学物質は 0.000000012～0.019（平均 0.001）と低く、4-ｵｸﾁﾙﾌｪﾉｰﾙの比活性値が 0.019と高い他はいずれも 17βｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙの 1/1000 以下の比活性値であった。変動係数については、全体では 8～106 %（平均 45 %）であるが、ホルモン関連化合物は 16～29 %（平均 22 %）と比較的良好であった。しかし、この数値は下水道の環境ホルモン実態調査調査で実施している精度管理の値よりも大きく、生物を測定手段に用いる場合、GC/MS等の機器分析法に比べ測定法自体が持つバラツキが大きいことに注意が必要と考えられる。

2. 1. 3 回収率の検討

GC/MSを用いた添加回収実験の結果をまとめて表－3に示す。フタル酸類はｺﾝﾀﾐを防ぐため、d体を用いた結果、ﾌﾀﾙ酸ｼﾞ-2-ｴﾁﾙﾍｷｼﾙ は概ね良好な結果が得られた。ﾌﾀﾙ酸ｼﾞ-n-ﾌﾞﾁﾙ は処理水での回収率が 150 %を超える場合があるが、精製水では良好な結果が得られていることから、試料中に含まれる夾雑物質により測定誤差が生じている可能性が考えられた。ﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙ、ﾋﾞｽﾌｪﾉｰﾙA は流入水や処理水では回収率が良好であったが、精製水では回収率が低くなる傾向が確認された。この原因としては抽出操作の後半に行う溶媒を留去・乾固する操作の際に、夾雑物質のない精製水の試料では、夾雑物質の存在する流入水や処理水の場合に比べ対象物質が蒸発・減少し易くなることが推察される。また、低沸点物質の回収率を評価する目的で検討したﾌﾞﾁﾙﾌｪﾉｰﾙ、2,4-ｼﾞｸﾛﾛﾌｪﾉｰﾙは、いずれの試料においても回収率が低く、今回の方法では回収が充分でないと判断された。ﾌﾞﾁﾙﾌｪﾉｰﾙ、2,4-ｼﾞｸﾛﾛﾌｪﾉｰﾙは酵母法でエストロゲン活性が非常に低いことが確認されており、これらの物質の回収率が低いことが直接酵母法の測定結果に大きく影響するとは考えにくいが、環境中には未知のｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性を持つ物質が存在する可能性もあり、今後は前処理法の改良やｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性の分画などを行う必要があると考えられる。

2. 2 Two-Hybrid株の検討結果

2. 2. 1 測定方法の検討結果

①培養時間を検討した結果、4 時間の培養では測定値のバラツキが大きく、きれいな用量反応曲線も得られなかったが、24 及び 48 時間の培養はバラツキも小さく、同様な用量反応曲線が得られた。測定時間を短縮するため培養時間は 24 時間を選択した。

②異なる濁度の酵母前培養液を用いて Assay 培地を作成し、24 時間 30℃で静置培養後に Well内の培養液

の濁度（OD 620nmとして測定）を測定した結果、酵母前培養液の濁度が 0.1 の場合 0.19、0.2 の場合 0.30、0.5 の場合 0.46、1.0 の場合 0.54 であった。酵母前培養液の濁度が 0.5 以上の場合、培養後の濁度から菌の増殖が飽和傾向にあると考えられたことと、標準法で 4 時間培養後の濁度が 0.15 程度であることから添加する前培養液の濁度は 0.1 が適していると判断した。

③酵母菌の溶解に使用する薬剤を比較した結果、ﾄﾞﾃﾞｼﾙ硫酸ﾅﾄﾘｳﾑ（SDS）＋ｸﾛﾛﾎﾙﾑではバラツキが大きく発色も弱かったのに対し、Zymolyase-20T では標準的な用量作用曲線がえられたことから酵母菌の溶解には Zymolyase-20T を使用することとした。添加量については 15 及び 30 μLを比較した結果、30 μLの方が良好な結果が得られ、反応時間については 15 分と 30 分を比較した結果、30 分の方が良好な結果が得られた。以上の結果から簡易測定法における酵母菌の溶解条件を Zymolyase-20T 30μL添加、30分放置とした。

④発色条件を検討した結果、ONPGは基質添加後速やかに発色が確認されたが、CPRGを用いた場合発色するまでに数日間を要した。添加量は15μLと40μLを比較した結果、40 μL添加した方が最大で約 20 %高い酵素活性を検出した。以上のことから ONPGを 40 μL添加する条件を選定した。発色時間は 30 分で充分な発色が得られた。

2. 2. 2 簡易測定法による化学物質の測定結果

簡易測定法による測定結果を表－４に、Two-Hybrid 株で測定した化学物質のｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性を Sumpter 株の測定結果と比較したものを図－４に示す。ｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性についてはｴﾁﾆﾙｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙ、ｼﾞｴﾁﾙｽﾁﾙﾍﾞｽﾃﾛｰﾙ、4-ﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙの比活性値が Sumpter 株の測定結果よりも高く、ｴﾁﾆﾙｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙ、ｼﾞｴﾁﾙｽﾁﾙﾍﾞｽﾃﾛｰﾙについては 17βｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙよりもｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性が高いことが確認された。このことから酵母株により測定結果が異なることが推察された。

変動係数については 23～162 %（平均 65 %）であり、同じ化学物質おける Sumpter 株の変動係数が 9～94 %（平均 30 %）であることから Two-Hybrid 株の簡易測定法は Sumpter 株の測定法よりもバラツキが大きくなると考えられた。特に標準物質として測定する 17βｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙの変動係数が 51 %と高いことから、測定方法としての安定性が不十分であり、今後改良が必要と思われる。

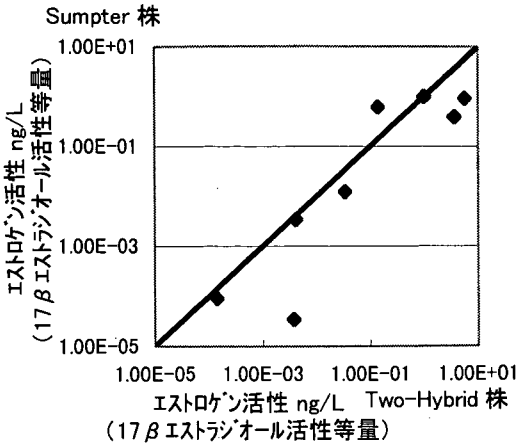
2. 3 CIIT株の検討結果

2. 3. 1 測定方法の検討結果

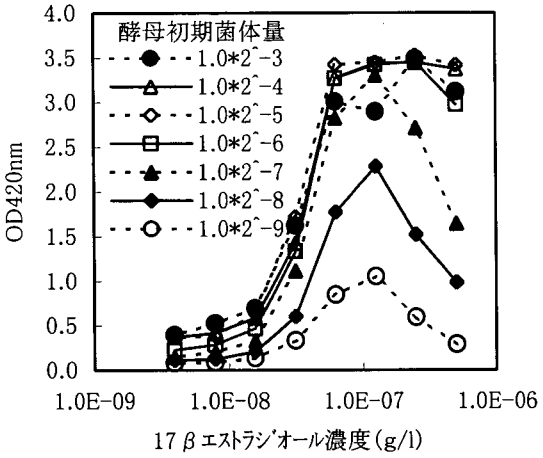
17時間曝露培養を行った時のｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙに対する用量反応曲線を図－５に示す。図中 OD 420値で示されるｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙの検出反応は、すべての添加酵母濃度においてｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙの濃度増加に伴って増大した。OD 420値の極大値は 2^{-7}～2^{-3} 倍量の範囲ではほぼ同じであったが、2^{-8} 以下まで少なくすると極大値も低下した。また、OD 420値の基底値は添加濃度に伴い増大していた。一方曝露培養時間を4時間とした場合は得られたOD 420値の極大値が17時間曝露培養を行った場合の半分以下であった。測定に際してはｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性を測定するための OD 420値の測定範囲が広い条件が有利と判断し、曝露培養の時間を17時間、添加する前培養液の菌体濃度を OD 600nm＝1.0に調整後 2^{-7} に希釈する条件を選択した。

2. 3. 2 ﾏｲｸﾛﾌﾟﾚｰﾄ法による化学物質の測定結果

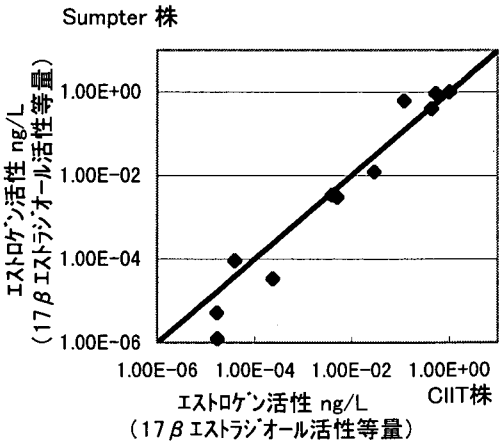
ﾏｲｸﾛﾌﾟﾚｰﾄ法による測定結果を表－５に、CIIT 株で測定した化学物質のｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性を Sumpter 株の測定結果と比較したものを図－６に示す。ｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性についてはｴｽﾄﾛﾝの比活性値が Sumpter 株の測定結果よりも低く、



図－４ 化学物質のｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性の比較 ①



図－５ 17時間曝露培養の結果（CIIT 株）



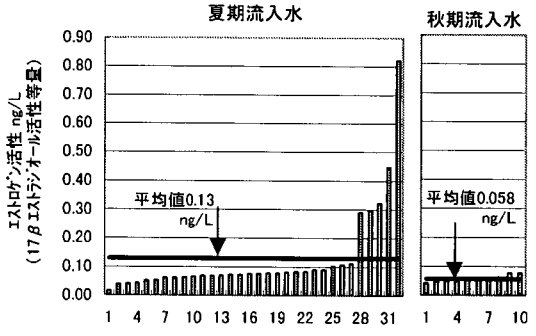
図－６ 化学物質のｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性の比較 ②

4-ﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙ、4-n-ﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙの比活性値はSumpter 株の測定結果よりも高くなっている。この結果は **2. 2. 2 簡易測定法による化学物質の測定結果**と同様、使用する酵母株により測定結果が異なる可能性を示唆している。

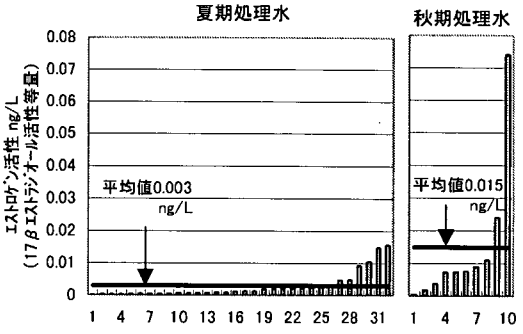
変動係数については 5～56 %（平均 19 %）であり、同じ物質における Sumpter 株の変動係数 9～94 %（平均 40 %）よりも良好であり、標準物質の 17βｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙの変動係数も 5 %と低い値である。変動係数が低い要因としては曝露培養時間が短いことが有利に作用しているものと考えられる。

2. 4 下水試料の測定

Sumpter 株を用いて下水試料の ｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性を測定した結果（単位：ng/L 17βｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙ活性等量 ）を流入水について図－7 に、処理水について図－8 にそれぞれ示す。数値のである。平均値及び範囲は、夏期調査・流入水：0.13 ng/L、0.017～0.82 ng/L、秋期調査・流入水：0.058 ng/L、0.042～0.0077 ng/L、夏期調査・処理水：0.003 ng/L、0.0001～0.016 ng/L、秋期調査・処理水：0.015 ng/L、0.00039～0.074 ng/Lであり、流入水のｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性は夏期調査時の方が秋期調査時よりも高く、逆に処理水のｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性は秋期調査の方が夏期調査よりも高いという結果となった。また、下水処理によるｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性の削減率%：（1－処理水のｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性／流入水のｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性）×100を求めると、平均値及びその範囲は夏期調査：95 %、64～＞99%、秋期調査：76 %、0～99 %であり、調査時期により ｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性の除去率に差が見られた。この原因としては、水温が低いため、下水処理過程における化学物質の生物分解率が低下することや、下水に含まれるｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性の組成が変化する等が考えられるが、はっきりした原因については不明である。今後エストロゲン活性の測定と同時にその活性の由来を分画等により把握することで、下水の ｴｽﾄﾛｹﾞﾝ活性について情報が得られると考えられる。



図－7 流入水の測定結果(Sumpter 株)



図－8 処理水の測定結果(Sumpter 株)

＜主な研究成果物＞

矢古宇靖子，高橋明宏，東谷忠，田中宏明：組み換え酵母を用いた下水中のエストロゲン活性の測定，環境工学研究論文集，Vol.36，199-204，1999

矢古宇靖子，高橋明宏，東谷忠，田中宏明：組み換え酵母を用いた環境エストロゲンの測定方法の検討，第2回日本内分泌攪乱化学物質学会研究発表会要旨集，84，1999

矢古宇靖子，高橋明宏，東谷忠，田中宏明：組み換え酵母を用いた環境エストロゲンの測定，第2回日本内分泌攪乱化学物質学会研究発表会要旨集，85，1999

矢古宇靖子，高橋明宏，東谷忠，田中宏明：下水処理場内でのエストロゲン活性の測定，第34回日本水環境学会年会講演集，419，1999

＜参考文献＞

1) Environment Agency ; The Identification and Assessment of Oestrogenic Substances in Sewage Treatment Works Effluents, 1997

2) 建設省河川局河川環境課，下水道部流域下水道課；平成 10 年度水環境における内分泌攪乱化学物質に関する実態調査結果，1999.3

3) Routledge,E.J and Sumpter,J.P ; Estrogenic activity of surfactants and some of their degradation products assessed using a recombinant yeast screen, *Environ. Toxicol. Chem.*,Vol.15,No.3, pp.241-248, 1996

4) Nisikawa, J.et al.; New screening methods for chemicals with hormonal activities using interaction of nuclear hormone receptor with coactivator, *Toxicology and applied pharmacology*,Vol.154,pp.76-83,1999

5) Kevin W.gaido et.al.; *Toxicology and applied pharmacology*, 143, p205-212, 1997

6) 建設省都市局下水道部；下水道における内分泌攪乱化学物質水質調査マニュアル，(社) 日本下水道協会，1999

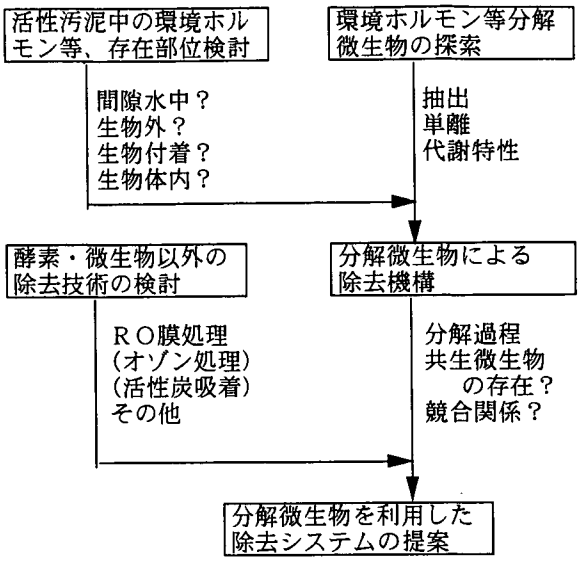
7) Y.Oda, et al., Evaluation of the new system (umu-test) for the detection of environmental mutagens and carcinogens, *Mutation Research*,147,219-229, 1985

（田中，高橋）

3.5　水循環健全化のための環境ホルモン等リスク対策の調査検討

研究期間：平11～平12
担当：三次処理研究室

【要旨】　環境水中で女性ホルモン作用を発現する物質のうち、ノニルフェノールと女性ホルモンである１７βエストラジオールは、下水処理水中でも検出頻度が高く、除去が十分に行われていない可能性がある物質である。これらの２物質を対象として下水処理過程における除去機構を明らかにし、処理条件の改善によって除去率を向上させる手法や分解能力の高い微生物等を用いてより効率的な除去を行う方法の基礎的検討を行っている。平成１１年度は、
1）６カ所の下水処理場の活性汚泥から、これらの２質を資化する能力が高い微生物の分離を試みた。
2）２物質の活性汚泥中での集約部位について抽出試験等による検討に着手した。
3）逆浸透膜による環境ホルモン物質の除去特性について検討を行った。



1．女性ホルモン様物質等資化微生物の探索

1．1　調査方法

女性ホルモン或いはノニルフェノールの流入濃度が比較的高い６カ所の下水処理場活性汚泥を、これら２物質の何れか一方を単一基質とする２種類の集積用培地各々に接種し、28℃で培養した。一代の培養日数を３～４日とし、順次植え継いで５代まで繰り返し培養した。次に、５代目の集積培養液を従属栄養細菌用平板培地に塗布し、28℃で培養後出現したコロニーから単一株を分離した。各単離株について集積培養液中での増殖曲線を計測し対象物質の資化性を確認した。資化性が確認された株については再び従属栄養細菌用平板培地上で単一性を確認した。最終的に単離された菌株について対象物質の資化特性を検討した。

1．2　調査結果

1．2．1　女性ホルモン資化細菌

女性ホルモン資化能力が高い菌として分離されたものは２種類有り、そのうち１種類は女性ホルモンの主要構造を分解していると推定されたが、他方は、幾分か女性ホルモンの一部が変換されたエストロンまで分解するものであった。

1．2．2　ノニルフェノール資化細菌

ノニルフェノール資化能力が高い菌として分離されたものも２種類有り、何れもノニルフェノールの一部を分解するものであった。

2．活性汚泥中の環境ホルモン等の集約部位に関する検討

2．1　調査方法

活性汚泥法で運転されている下水処理場から返送汚泥を採取し、遠心分離によって間隙水と汚泥に分離

した。汚泥については5種類の抽出液（0.1N 塩酸、0.1N 水酸化ﾅﾄﾘｳﾑ、ﾒﾀﾉｰﾙ、n-ﾍｷｻﾝ及びｼﾞｸﾛﾛﾒﾀﾝ）による30分間の浸透抽出を行って再び遠心分離し、抽出液と汚泥を分離した。間隙水及び抽出液を分析機関に冷蔵状態で送付し、液中の17βｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙ、ﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙ及びﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙｴﾄｷｼﾚｰﾄの濃度を測定した。

2．2　調査結果

汚泥間隙水中の各物質の濃度はどの汚泥抽出液中の濃度よりも大きく、活性汚泥に移行した物質の多くは汚泥粒子から容易に解離する状態にあると考えられる。

抽出液中に定量下限値以上の濃度で溶出した物質はﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙｴﾄｷｼﾚｰﾄで、ﾒﾀﾉｰﾙ抽出或いはｼﾞｸﾛﾛﾒﾀﾝ抽出を行った場合に定量下限値以上の濃度で検出された。抽出液中のﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙと女性ホルモンは定量できなかった。図はﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙの分析結果を示したものである。

表－1　活性汚泥間隙水中の環境ホルモン等物質

Plant No.	ノニルフェノール	17β エストラジオール	ノニルフェノールエトキシレート
1	3.48	0.0539	12.2
2	1.18	0.0205	20.3
3	1.07	0.0489	11.2
4	1.09	0.1587	1.2
5	0.48	0.0515	0.4
6	0.55	0.0859	38.7

（単位は全てμg/l）

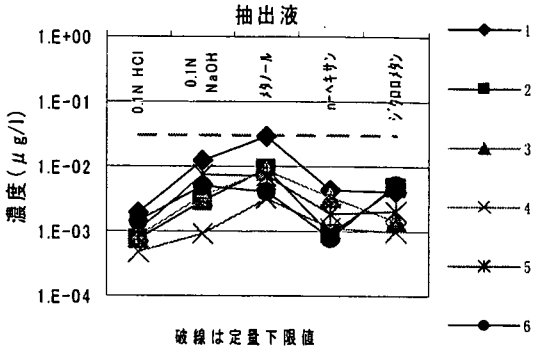


図　活性汚泥中のﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙの抽出結果

3．逆浸透膜による環境ホルモン等物質の除去特性

3．1　調査方法

日東電工㈱製 RUA-5W 型逆浸透膜実験装置に同社製 NTR7250型ルーズ逆浸透膜モジュールを装着して純水に１種類の環境ホルモン等物質を添加した溶液を通じた。膜透過前後の溶液を各々10000倍に濃縮し、段階的に希釈した後エストロジェンレセプタに対する競合結合反応を利用し蛍光偏光度で検出する試験方法によってエストロジェン活性を測定した。

3．2　調査結果

ﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙの阻止率は圧力依存性を示し、操作圧力0.5MPa で30～40％であるのに対し操作圧力1MPaでは75～80％に向上した。17βｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙの場合は阻止率は操作圧力に関係なく95～99％であった。

4．まとめと今後の課題

環境ホルモン様物質の多くは下水処理場の活性汚泥処理工程で除去されていることが明らかにされているが、それらのうち、ﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙと17βｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙは比較的除去率が低い。これらの分解菌の抽出分離を試みたところ、比較的高い資化能力を有するものを見出すことができた。これらを用いて効率の良い環境ホルモン除去が下水処理場で可能かどうか、次年度に検討を行う予定である。一方、活性汚泥中の環境ホルモン様物質の多くは、汚泥間隙水中に容易に解離してくる様な形態で存在するものと考えられた。この結果は一回の抽出によるものであり、次年度に段階的な抽出法によって検討する予定である。逆浸透膜による環境ホルモン物質の除去は膜の種類と除去対象物質の性質によって違いがあり、今回検討したルーズ逆浸透膜ではﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙは17βｴｽﾄﾗｼﾞｵｰﾙより膜を透過しやすいことがわかった。

5．主な研究成果物

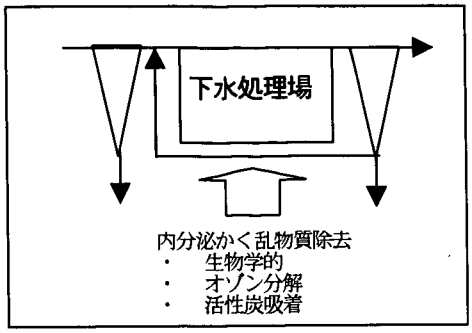
金、小越、鈴木　低圧逆浸透膜による内分泌攪乱化学物質の除去特性　第３４回日本水環境学会年回講演集　p406

（鈴木、小越、畑津、重村）

3.6　内分泌かく乱物質等の発生源と処理対策手法の調査

研究期間：平10～平13
担当：三次処理研究室

【要旨】
近年、内分泌かく乱物質による人の健康や生態系への影響が危惧されており、社会的な問題にもなっている。下水道施設においても、処理水中に大量の内分泌かく乱物質が含まれることのないよう、下水処理場内での挙動などの実態調査が必要となる。11 年度は、標準活性汚泥法および嫌気－無酸素－好気法パイロットプラントを用いて、内分泌かく乱物質濃度の挙動を調査した。また、物理化学的な内分泌かく乱物質除去法として、二次処理水中の内分泌かく乱物質の、オゾン分解および活性炭吸着による除去を検討した。



1．はじめに

近年、内分泌かく乱物質による人の健康や生態系への影響が危惧されており、社会的な問題にもなっている。下水道施設においても、処理水中に大量の内分泌かく乱物質が含まれることのないよう、下水処理場内での挙動などの実態調査が必要となる。

本年度は、標準活性汚泥法および嫌気－無酸素－好気法パイロットプラントを用いて、内分泌かく乱物質濃度の挙動を調査した。また、物理化学的な内分泌かく乱物質除去法として、二次処理水中の内分泌かく乱物質の、オゾン分解および活性炭吸着による除去を検討した。

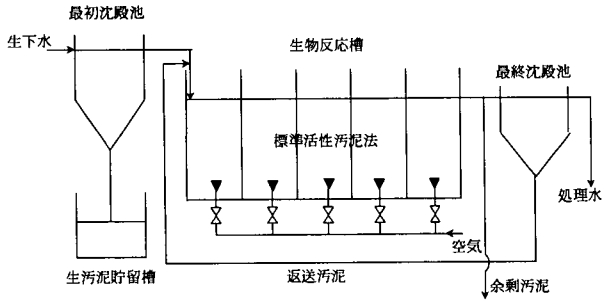
2．水処理系内のでの挙動

下水処理場内では、様々な物質が流入してきており、その中には内分泌かく乱物質が混入している可能性がある。その際、内分泌かく乱物質をの公共用水域への流出を可能な限り抑制しなければならない。本実験では
、標準活性汚泥法（以下、標準法）および嫌気－無酸素－好気法（以下、A²/O 法）パイロットプラントを用いて、内分泌かく乱物質濃度の処理成績および挙動を調査した。

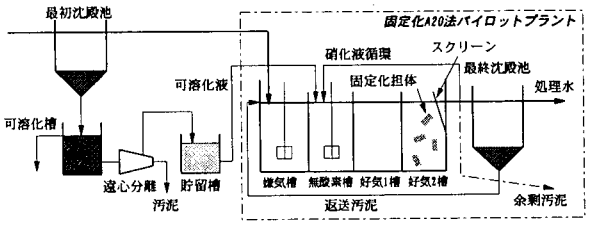
2．1　実験方法

2．1．1　実験プラントの概要

図－1に実験プラントの概要を示す。標準法プラントは好気タンクを５区画に分けた構造で、A²/O 法プラントは、脱窒促進のために、可溶化された最初沈殿池汚泥の遠心脱水濾液を無酸素槽に投入していた。また、表－1に実験プラントの運転条件を示す。



(a)標準活性汚泥法



図－15　パイロットプラントの概要

(b)A²/O 法

図－1　実験プラントの概要

表－1　プラントの運転条件

処理法	標準法	A²/O 法
反応槽容量(m³)	10	10
流入水量(m³/d)	27.0	24.1
水理学的滞留時間(h)	8.9	10.0
返送汚泥比	0.73	0.55
硝化液循環比	－	1.4
汚泥可溶化液流量(m³/d)	－	0.58
水温(℃)	13.2-14.9	11.6-17.0

表－2　各物質の測定法および定量下限値

物質名	測定法	検出下限値[1] (μg/L)
NP	ガスクロマトグラフ質量分析計	0.03
NPE	高速液体クロマトグラフ法	0.1(n=1～4) 0.2(n≧5)
ベンゾフェノン	ガスクロマトグラフ質量分析計	0.01
17βE	ELISA 法	0.0002

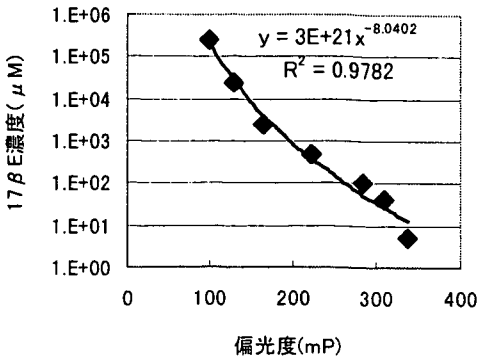
化担体を好気槽に投入した。表－１に実験プラントの運転条件を示す。なお、汚泥可溶化槽の HRT は３０h である。

２．１．２　試料の採取を分析

図－１のプラントの最初沈殿池流出水や反応槽からサンプルを採取し、混合液について水と汚泥に遠心分離により分離して、それぞれの中に含まれる内分泌かく乱物質の濃度を測定した。なお、標準法プラントについては３回、A^2/O 法プラントについては４回調査を行った。

内分泌かく乱物質の測定項目は、ノニルフェノール（以下、NP）、ノニルフェノールエトキシレート(以下、NPE、n=１～４ および n≧5 の２種類)、ベンゾフェノン、17β-エストラジオール（以下、17βE）とした。各物質の測定法および検出下限値を表－２に示す。なお、17βE は天然の女性ホルモンであり、内分泌かく乱物質とは異なる。

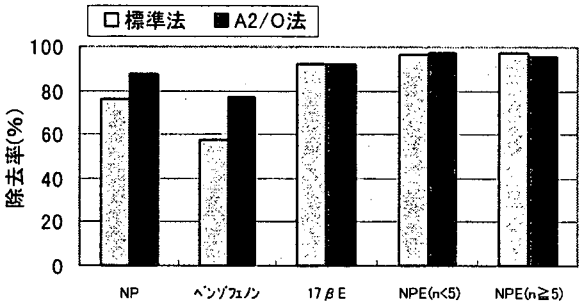
また、物質を限定せずに、サンプル中の内分泌かく乱作用の強さの測定のために、エストロゲンレセプターとの結合の強さを測定する分析装置を用いて、エストロゲン活性を測定した。本分析装置では、結合の強さを偏光度で検出しエストロゲン活性を評価する。サンプルは、固相抽出などにより、10000 倍に濃縮した。17βE を標準物質として測定した例を図－２に示す。17βE濃度が高いほど、偏光度が低く検出される。



図－２ 17βE と偏光度の関係

表－３ 最初沈殿池流出水等の内分泌かく乱物質濃度(単位：μg/L)

物質名	NP	ベンゾフェノン	17βE	NPE (n<5)	NPE (n≧5)
標準法 初沈流出水	1.57	0.13	0.0436	18.0	23.4
A^2/O 法 初沈流出水	1.66	0.13	0.0419	11.3	12.4
A^2/O 法 可溶化液	3.03	0.23	0.0493	16.3	14.2



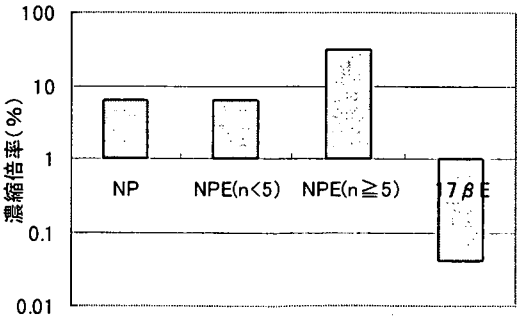
図－３ 内分泌かく乱物質の除去率

２．２　実験結果

２．２．１　内分泌かく乱物質濃度の測定

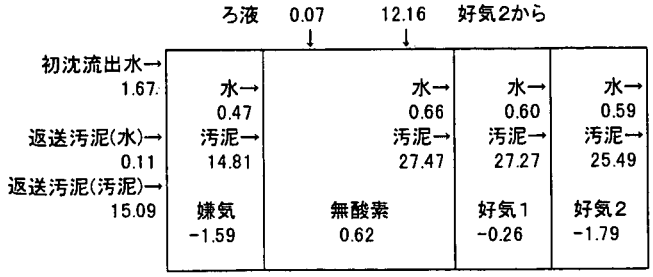
表－３に、各パイロットプラントの最初沈殿池流出水（反応槽流入水）および A^2/O 法プラントの汚泥可溶化液[(2)]についての内分泌かく乱物質濃度（平均値）を示す。NP およびベンゾフェノンで、可溶化液中の濃度が高くなっていたが、その他の物質では、大差はなかった。

図－３に、各パイロットプラントの内分泌かく乱物質の除去率を示す。示されたデータは、調査した３回の平均値を用いている。除去率は、最初沈殿池流出水濃度と生物反応槽流出水濃度を用いて計算した。A^2/O 法プラントについては、汚泥可溶化液も流入しているが、初沈流出水と比べて物質流入量が 1/10 以下であったので、計算の際考慮しなかった。

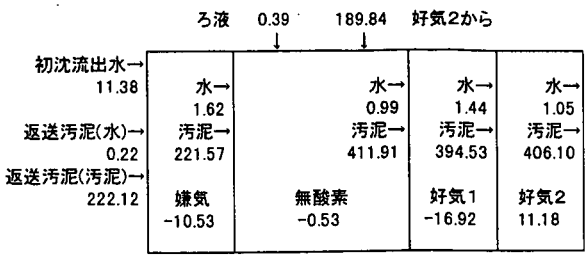


図－４ 内分泌かく乱物質の汚泥への濃縮状況（標準法パイロットプラント）

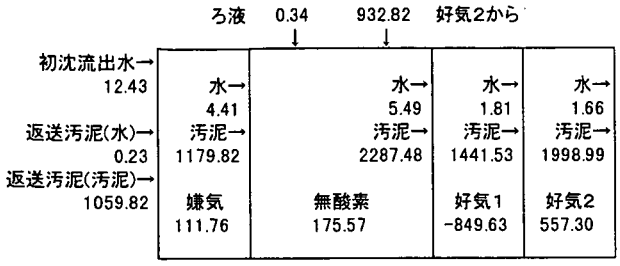
17βE と NPE の除去率はかなり高く、処理法によっても差がなかった。ベンゾフェノンの除去率が悪い点については、これまでの知見と同じであるが、17βE の除去率が９０％を越えたことについては、生物処理における除去率を７０％台としているこれまでの知見[(3)]と異なっている。NP とベンゾフェノンについては、A^2/O 法の方が標準法よりも処理成績が高かった。



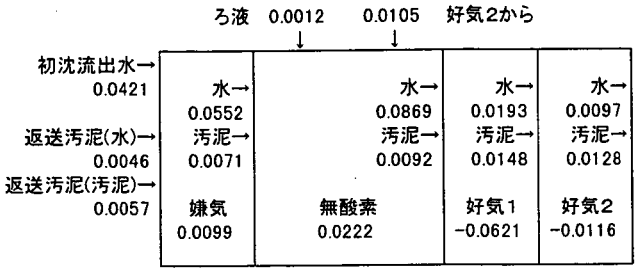
(a)ノニルフェノール



(b)NPE（n＜5）



(c)NPE（n≧5）

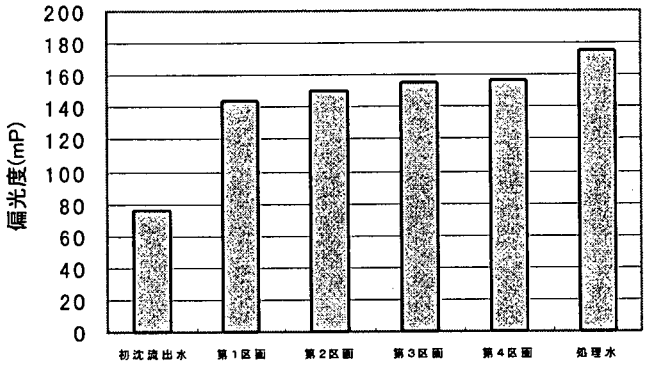


(d)17β－エストラジオール

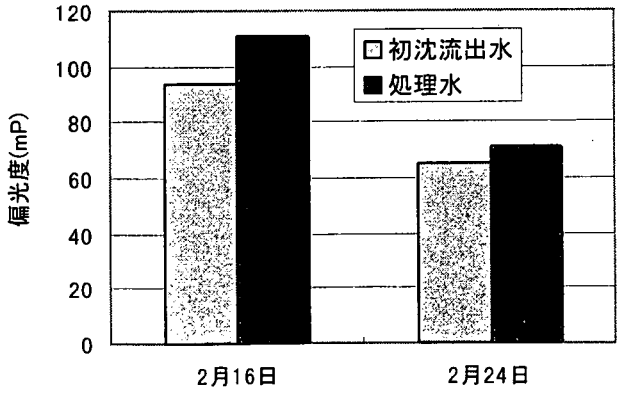
図－5 A^2/O 法パイロットプラントにおける内分泌かく乱物質等の物質収支

図－4に、標準法プラントにおける内分泌かく乱物質等の汚泥への濃縮状況を示す。示されたデータは、調査した3回の平均値を用い、反応槽流出部の汚泥中の内分泌かく乱物質濃度を、最初沈殿池流出水中の物質濃度で割って求めたものである。NP と NPE、特に NPE(n≧5)の汚泥への濃縮がかなり大きかった。逆に、17βE は汚泥中にはほとんど含まれていなかった。なお、ベンゾフェノンについては、汚泥中の濃度が検出下限値以下であったので、測定できなかった。

図－5に、A^2/O 法プラントにおける内分泌かく乱物質の物質収支を示す。A^2/O 法プラントについても、ベンゾフェノンについては、汚泥中の濃度が検出下限値以下であったので、測定できなかった。示されたデータは、調査した4回の平均値を用いている。標準法プラントと同様に、NP および NPE については、ほとんど汚泥中に含まれていた。NP については、嫌気槽および好気槽で除去されていたが、原因については検討の必要がある。NPE については、好気1槽で減少した後、好気2槽で増加していた。これについては、ほとんど汚泥中での物質量の増減が影響している。原因については不明だが、今回は4回しか調査を行っていないので、今後継続調査により、原因を追及する必要がある。また、17βE については、好気条件において、やや汚泥に蓄積される傾向はあるものの、除去されているのがわかった。いずれの結果においても、原因の解明にまで至っていないので、除去機構の解明に的を絞った研究が必要と思われる。



(a)標準法プラント

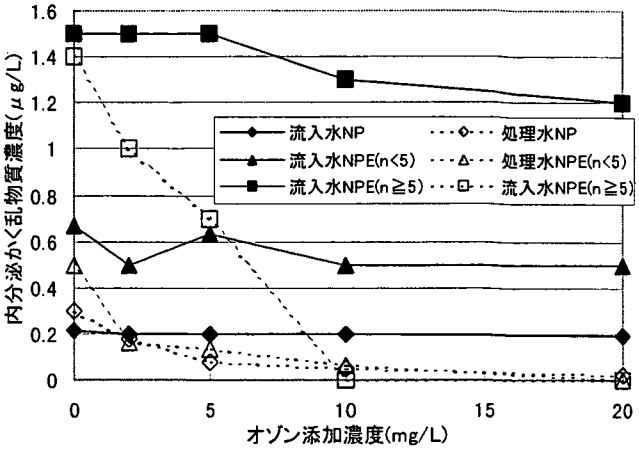


(b)A^2/O プラント

図－6 生物処理におけるエストロゲン活性の低減化

2．2．2　エストロゲン活性の測定

図－6に標準法および A²/O 法プラントのエストロゲン活性の測定結果を示す。どちらのプラントについても、処理後に偏光度が増加しており、エストロゲン活性の低減化が認められた。また、標準法プラントにおいて、第1区画でかなり偏光度が増加しており、反応タンクのはじめの部位でかなりエストロゲン活性が減少していることが認められた。



図－7　オゾン分解による NP および NPE の除去効果

3．オゾンを用いた処理

オゾンには強い酸化作用があり、内分泌かく乱物質の酸化分解に有効と考えられている。ここでは、オゾン反応塔を用いて、オゾン処理による内分泌かく乱物質の除去効率とオゾン添加濃度の関係について、検討を行った。

3．1　実験方法

オゾン反応塔（直径 12cm×高さ 415cm、容量 47L）に、前章の標準法もしくは A²/O 法プラントの処理水を 3L/min の流量（滞留時間 16 分）で流し、オゾン添加濃度を 0、2、5、10、20mg/L の5段階に設定して、3回ほど実験を行った。各オゾン添加濃度の実験では、1時間以上処理を継続したのち、試料を採取した。

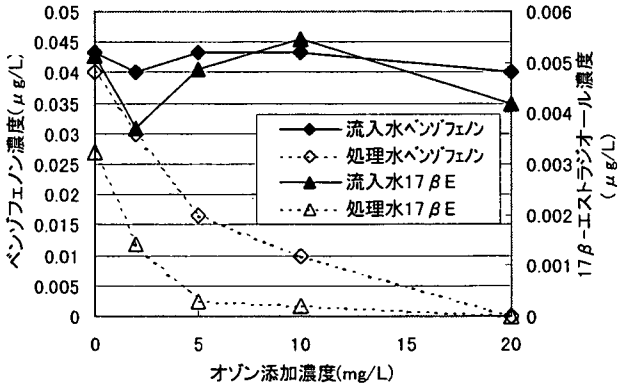
測定した内分泌かく乱物質の種類は、前章と同じであり、また、前章と同様にエストロゲン活性も測定した。

3．2　実験結果

3．2．1　内分泌かく乱物質の測定

図－7に、オゾン添加濃度と、NP および NPE の除去効果の関係を示している。すべての物質において、オゾン添加濃度が高いほど、内分泌かく乱物質が良好に除去されており、特に、オゾン添加濃度が 10mg/L 以上になると、処理水中の NP および NPE 濃度が不検出になった。この結果から、オゾン添加によりこれらの物質を極低濃度まで除去するには、10mg/L 以上のオゾン添加濃度が必要と考えられる。

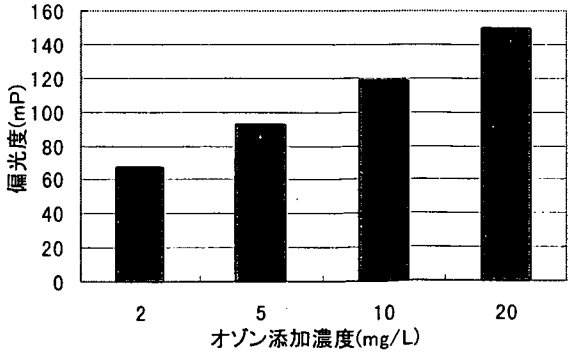
図－8に、オゾン添加濃度と、ベンゾフェノンおよび 17βE の除去効果の関係を示している。これらの物質についても、オゾン添加濃度が高いほど良好に除去されており、オゾン処理が内分泌かく乱物質除去に有効に機能する結果が示された。



図－8　オゾン分解によるベンゾフェノンと 17βE の除去効

3．2．2　エストロゲン活性の測定

図－9に、オゾン添加濃度と処理水の偏光度の関係を示す。オゾン添加濃度の増加とともに偏光度が増加しており、NP や NPE 等の結果と同様に、エストロゲン活性も、オゾン添加濃度の増加とともに減少していることがわかった。



図－9　オゾン添加濃度と処理水の偏光度の関係

4．活性炭を用いた処理

活性炭には有機物質の吸着作用があり、これを用いた内分泌かく乱物質の吸着除去が期待されている。ここでは、活性炭吸着塔を用いて、活性炭吸着による内分泌かく乱物質の除去効率の検討を行った。

4．1　実験方法

活性炭吸着塔（直径 15cm×充填高さ 100cm、充填容量 17.7L）に、第2章の A^2/O 法パイロットプラントの処理水を 2L/min の流量（滞留時間9分）で通水した。また、この吸着塔は塩化ビニル製であり、内分泌かく乱物質の溶出の影響が考えられたため、活性炭を充填していない対照実験系の吸着塔を一つ設けて実験を行った。なお、本実験は19日間行った。

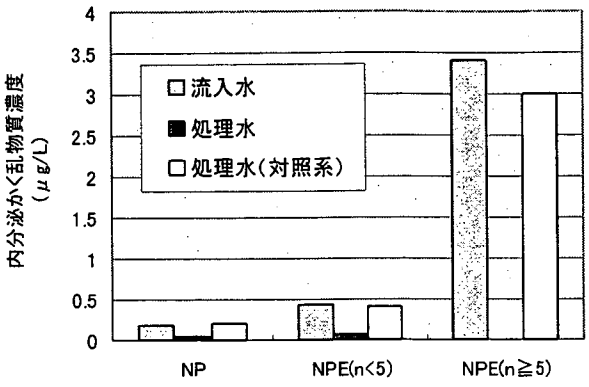
測定した内分泌かく乱物質の種類は第2章および第3章と同じである。

4．2　実験結果

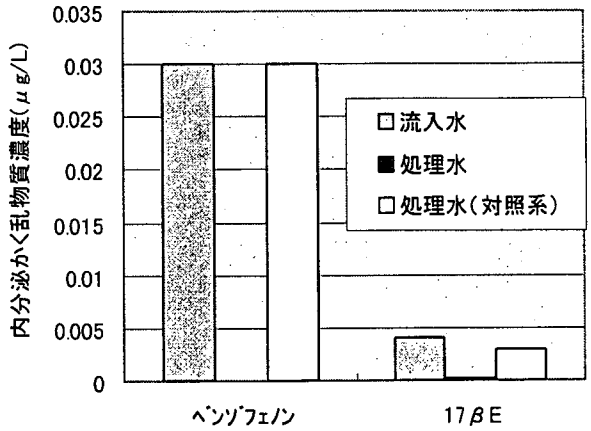
4．2．1　内分泌かく乱物質の測定

図－10 に活性炭吸着による NP および NPE の除去効果を示す。活性炭吸着を行った系については、すべての物質で良好に除去されていた。また、対照系において、内分泌かく乱物質濃度が増加していないことより、塩化ビニル製の吸着塔からの内分泌かく乱物質の溶出はなかったことがわかった。また、図－11 に活性炭吸着によるベンゾフェノンおよび 17βE の除去効果を示す。NP および NPE 同様に、良好に除去されていた。

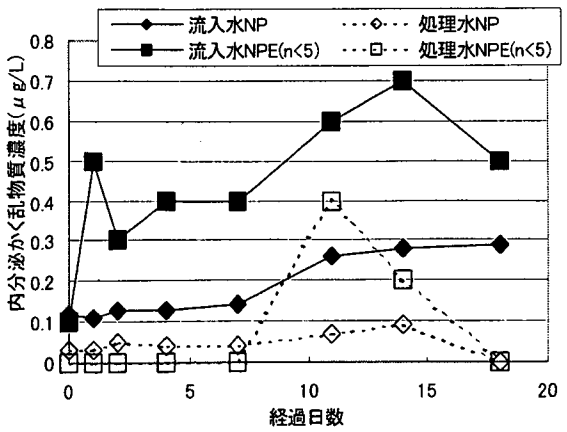
図－12 に活性炭吸着実験による NP および NPE(n<5) の除去状況の経日変化を示す。これらの物質においては、一時的に処理水濃度の上昇しているときがあったものの、実験期間中ずっと良好に除去されており、本実験の条件では、3週間程度は良好に除去できると考えられた。また、図－13 に活性炭吸着実験によるベンゾフェノンおよび 17βE の除去状況の経日変化を示す。これらの物質は、実験期間中常時良好に除去されていた。



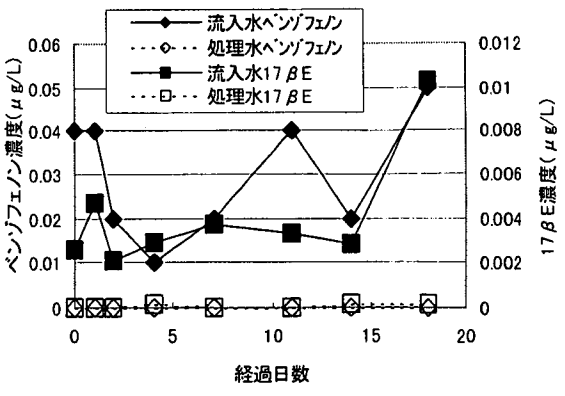
図－10　活性炭吸着による NP および NPE の除去効果



図－11　活性炭吸着によるベンゾフェノンおよび 17βE の除去効果



図－12　活性炭による NP および NPE 吸着実験の経日変化



図－13　活性炭吸着によるベンゾフェノンおよび 17βE 除去の経日変化

5．まとめ

（1） 17β－エストラジオールおよびノニルフェノールエトキシレートは、標準活性汚泥法および A²/O 法のどちらでも、90%以上の高い割合で生物処理により除去されていたが、ノニルフェノール及びベンゾフェノンについては除去率が６０～８０％ほどであり、A²/O 法の方が標準活性汚泥法よりも除去率が高かった。17β－エストラジオールについては、７０％除去率というこれまでの結果よりも高い除去率が得られた。

（2） 標準活性汚泥法および A²/O 法において、内分泌かく乱物質等の挙動を調査した結果、ノニルフェノール及びノニルフェノールエトキシレートは汚泥中に濃縮されていたが、17β－エストラジオールについては汚泥中に濃縮されていなかった。

（3） オゾン処理についてはオゾン添加濃度を高くすることにより、今回調査した全ての物質において、かなりの高い効率で除去できることが明らかになった。

（4） 活性炭吸着についても、全ての物質において高効率で除去できることが明らかになった。

参考文献

（1）日本下水道協会：「下水道における内分泌攪乱化学物質水質調査マニュアル」、１９９９年８月、p.11

（2）建設省土木研究所：「下水処理・資源回収のための最適システムの開発に関する調査」、平成９年度下水道関係調査研究年次報告書集、pp.183-195、平成 10 年 10 月

（3）月刊生活排水社：「下水道の環境ホルモンの調査結果まとむ」－建設省・環境ホルモン対策検討委員会－」、生活排水、2000 年５月１日、pp.12-16

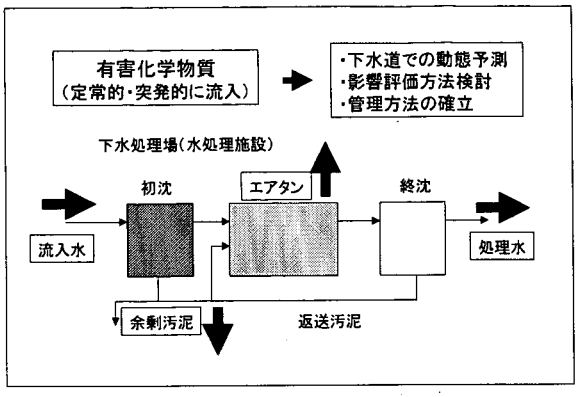
（鈴木，重村）

3.7　下水道での有害化学物質の管理に関する調査

研究期間：平8～平11
担　当：水質研究室

【要旨】

本調査は、下水道に定常的・突発的に流入する恐れのある種々の有害化学物質について下水道での動態予測、処理への影響、人の健康に与える影響評価方法の検討等、有害化学物質の管理方法を確立することを目的としている。



11 年度は、内分泌攪乱化学物質（いわゆる環境ホルモン）に関する問題が顕在化し、社会問題となっていることから、10 年度に引き続き環境ホルモンを調査対象物質とした。ノニルフェノール（NP）と前駆物質のノニルフェノールエトキシレート（NPEO）の活性汚泥処理プロセスでの挙動調査を行い、その実態を明らかにした。また、17β－エストラジオールの LC/MS を用いた機器分析について検討し、良好な結果が得られたので分析方法の提案を行った。

1．研究方法

1．1　活性汚泥処理プロセスにおける NP、NPEO の挙動

NP は、非イオン界面活性剤の一つである NPEO が下水処理過程での好気・嫌気処理を受け生じることが知られていることから、本調査では、NP に加え NPEO も調査対象物質とし、活性汚泥処理プロセスでの挙動調査を行った。また、NPEO の生分解性試験を行った。

①NP、NPEO の挙動調査

NP、NPEO の挙動調査は、初沈（50L）、エアタン（100L）、終沈（50L）から構成される活性汚泥処理実験装置を用いて行った。装置の運転条件は、流入水として実下水を用い標準活性汚泥法に準じた。流入水、初沈流出水、処理水を 2 時間間隔で 24 時間（13 検体）、生汚泥、余剰汚泥を 12 時間間隔で 24 時間（3 検体）採取し分析に供した。

②NPEO の生分解性試験

NPEO の生分解性試験は、東京化成のポリエチレングリコールモノ-4-ノニルフェニルエーテル（酸化エチレン鎖の重合度が平均で 10、NPn≒10EO）を試験物質とし、「化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律」による方法に準じて行った。密閉ガラス容器内に NPn≒10EO のみを有機物として加え、活性汚泥を植種（30mg/L）して密閉容器内で起こる酸素消費量を測定した。

1．2　下水試料の 17β－エストラジオールの分析

17β－エストラジオールの定量法として酵素抗体法（ELISA 法）を用いる方法が一般的であるが、ELISA 法は交差反応性があり、類似の物質も合わせて測定するなどの問題があるため、新たな方法の開発が望まれている。ここでは、下水試料を対象とした 17β－エストラジオールの分析について、LC/MS を用いた方法の検討を行うとともに、主に生活系排水が流入する 5 ヶ所の下水処理場の流入下水と二次処理水の分析を行った。

2．研究結果

2．1　活性汚泥処理プロセスにおけるNP、NPEOの挙動

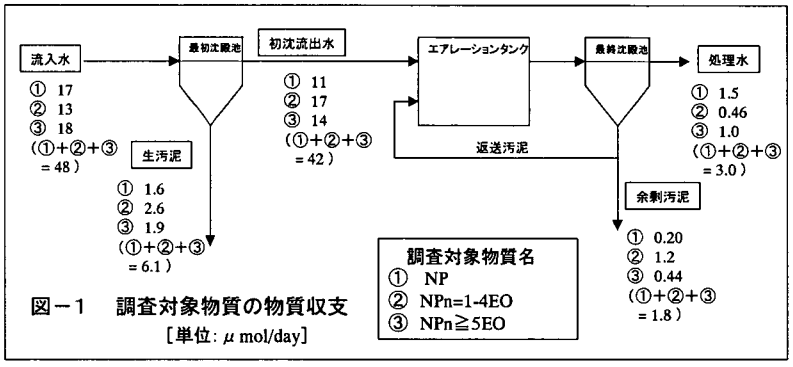
①NP、NPEOの挙動

活性汚泥処理プロセスにおけるNP、NPEOの挙動調査結果を表－1に示した。BOD、SS、D-TOCの除去率はそれぞれ87%、92%、76%であり、有機物除去は良好であった。また、処理水中の窒素は、ほとんどがNO_3-Nであり十分硝化が起こっていた。流入水中のNP、NPn=1-4EO、NPn≧5EO濃度は、それぞれ13μg/L、14μg/L、42μg/L、初沈流出水のNP、NPn=1-4EO、NPn≧5EO濃度は、それぞれ8.8μg/L、18μg/L、32μg/L、処理水中のNP、NPn=1-4EO、NPn≧5EO濃度は、それぞれ1.2μg/L、0.5μg/L、2.4μg/Lであった。NPは活性汚泥処理により91%が除去されていた。同様にNPn=1-4EOは96%、NPn≧5EOは94%が除去されていた。引き抜き汚泥混合液中のNP濃度は、生汚泥が150μg/L、余剰汚泥が18μg/Lであった。生汚泥は、余剰汚泥に比較し高濃度で検出された。NPn=1-4EOは、生汚泥が340μg/L、余剰汚泥が160μg/Lであった。NPn≧5EOは、生汚泥が530μg/L、余剰汚泥が120μg/Lであった。ここで、上記の調査結果を基に活性汚泥処理プロセスでのNP、NPn=1-4EO、NPn≧5EOのフラックスを計算しその結果を図－1に示した。NPn≧5EOは順次分解しNPn=1-4EO、NPとなるが、分解するに従い分子量が小さくなることからフラックスを計算する段階ではmol濃度に換算して行った。

表－1　分析結果一覧表

	単位	流入水	初沈流出水	処理水	生汚泥	余剰汚泥
NP	μg/L	13 (7.1-17)	8.8 (5.6-12)	1.2 (0.8-1.6)	150 (52-230)	18 (15-20)
NPn=1-4EO	μg/L	14 (10-19)	18 (12-25)	0.5 (0.2-0.7)	340 (140-480)	160 (130-200)
NPn≧5EO	μg/L	42 (17-78)	32 (16-54)	2.4 (1.1-3.5)	530 (280-670)	120 (110-150)
BOD	mg/L	170 (110-220)	110 (80-140)	22 (16-25)	－	－
SS	mg/L	130 (60-250)	43 (27-57)	11 (8-16)	－	－
D-TOC	mg/L	45 (28-53)	45 (35-53)	11 (11-12)	－	－
NH_4-N	mg/L	22 (16-32)	22 (18-27)	1.5 (0.2-3.7)	－	－
NO_2-N	mg/L	0.05 (0.01-0.10)	0.02 (0-0.05)	0.96 (0.84-1.2)	－	－
NO_3-N	mg/L	0.10 (0-0.1)	0.03 (0-0.05)	13 (11-14)	－	－
MLSS	mg/L	－	－	－	8300 (3700-11000)	4700 (4400-5100)
MLVSS	mg/L	－	－	－	7400 (3300-10000)	4100 (3900-4400)

注：上段は平均値、下段の（ ）内は範囲。また、－は未測定。



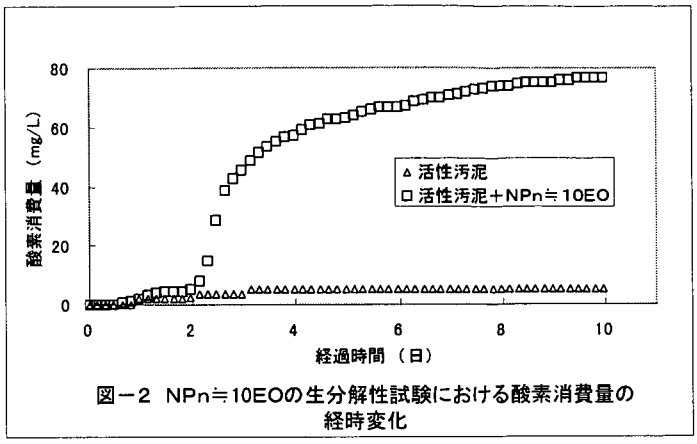
図－1　調査対象物質の物質収支
[単位：μmol/day]

②NPEOの生分解性試験

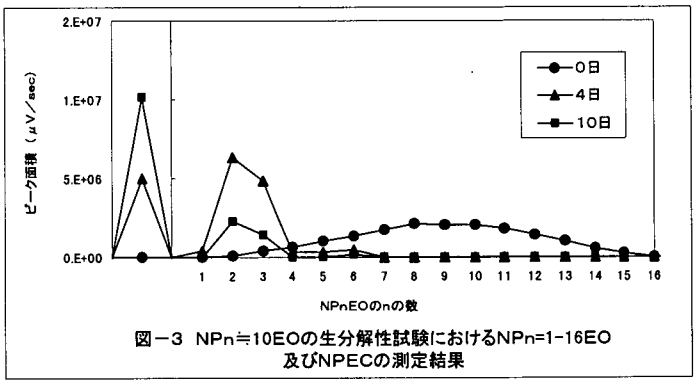
NPn≒10EOの生分解性試験における酸素消費量の経時変化を図－2に示した。酸素消費量の変化は2日目までは、活性汚泥のみのコントロールとほぼ同じ変化を示しているが、2日目以降急激に酸素消費が増えている。これは、活性汚泥中の微生物によりNPn≒10EOが酸化分解を受けていることを示唆している。NPn≒10EOの生分解性試験において生分解試験前の0日目、生分解試験4日目、10日目にNPn=1-16EO

とNPECを測定した。測定結果を図－3に示した。なお、NPn=1-16EOはエチレン鎖の重合度が単独の標準物質の入手が困難、NPECはNP1EC、NP2ECの分離が困難などの理由により、両者とも濃度を算出することができないため、HPLCで測定したピーク面積値で示した。

試験に用いたNPn≒10EOは酸化エチレン鎖の重合度が8～10のものを中心に重合度が3～15の混合物であることが分かる。試験開始後4日目では、酸化エチレン鎖の重合度が2、3のものとNPECとになっている。また、10日目では酸化エチレン鎖の重合度が2、3のものが減少し、NPECが増えている。本試験より、NPn≒10EOは活性汚泥中の微生物により酸化分解を受け、酸化エチレン鎖の重合度が小さいものに分解され、更にNPECとなることが示唆された。



図－2 NPn≒10EOの生分解性試験における酸素消費量の経時変化



図－3 NPn≒10EOの生分解性試験におけるNPn=1-16EO及びNPECの測定結果

2．2 下水試料の17β－エストラジオールの分析

下水試料を対象としLC/MSによる分析方法の検討を行った結果、固相抽出後フロリジルカラム及びシリカゲル薄層クロマトグラフによるクリーンアップが必要であることが分かった。試料前処理方法及びLC/MS分析条件は、以下のとおりである。

①試料前処理方法

試料1Lをガラス繊維ろ紙（孔径1μm）でろ過する。ろ紙に残った浮遊物質（SS）は、アセトン5mLを用い2回抽出（超音波利用）し、抽出液をろ液に合わせる。ろ液は、メタノールでコンディショニングした固相抽出用カートリッジ（C18）に通し、17β－エストラジオールをカートリッジに吸着させる。ろ液を通したカートリッジは、遠心分離と窒素ガスを通すことにより脱水を行う。次に、酢酸エチル／メタノール（1:5）5mLを通し溶出させ、溶出液に内標準物質を添加した後、窒素吹き付けにより濃縮乾固する。次に、ヘキサン5mLを加え溶解（超音波利用）し、溶解したヘキサンは無水硫酸ナトリウムを充填したカラムに通し脱水する。脱水後、無水硫酸ナトリウムカラムをヘキサン1mLで2回洗浄する。脱水後のヘキサンを窒素吹き付けにより濃縮乾固する。次に、ヘキサン／ジクロロメタン（1:1）1mLに溶解（超音波利用）し、この溶解液をフロリジルカートリッジに通しクリーンアップする。溶解液の入っていた容器はヘキサン／ジクロロメタン（1:1）1mLで洗いフロリジルカートリッジに通す。次にフロリジルカートリッジをヘキサン／ジクロロメタン（1:1）10mLで洗浄する。フロリジルカートリッジに吸着した17β－エストラジオールは、アセトン／ジクロロメタン（5:95）6mLで溶出させる。溶出液を窒素吹き付けにより濃縮乾固した後、約0.2mLのメタノールで溶解（超音波利用）し、シリカゲル薄層クロマトグラフにより、クロロホルム／アセトン（9:1）を用いて展開する。移動率（Rf）が0.35～0.55をかき取りメタノール約4mLで抽出（超音波利用）した後、遠心分離を行う。この抽出・遠心分離を2回繰り返す。抽出液を窒素ガス吹き付けにより濃縮乾固し、メタノール1mLに溶解後、遠心分離し上澄液をLC/MSで測定する。

② LC/MS 分析条件

・装　　置 ： TSQ 、HP1100
・カ ラ ム ： HP Zorbax Eclips XDB-C18、2.1×150mm
・移 動 相 ： アセトニトリル／水（60:40）、0.2mL/min
・注 入 量 ： 10μL
・イ オ ン化 ： AP-ESI Negative、Collision Energy 40eV、Argon 2.2-2.3 mTorr
・測定質量数 ： 271（Parent）、145（Daughter）

精製水、二次処理水、一次処理水を用いて行った添加回収試験の結果を表－2 に示した。なお、本試験方法での定量下限値は、0.001μg/L である。精製水では、100%の回収率が得られ、良好な結果であった。また、二次処理水、一次処理水での試験においても 64～84％の回収率が得られた。

5ヶ所の処理場において調査した結果を表－3 に示した。流入水中の 17β－エストラジオールは、0.007～0.015μg/L であり、二次処理水では、C処理場とE処理場で各 1 回、0.001μg/L で検出されているが、ほとんどが定量下限値以下であった。

表－2 添加回収試験結果

	添加濃度（μg/L）	測定値（μg/L）	回収率（%）
精製水	無添加	ND	—
	0.01	0.010	100
	0.02	0.020	100
二次処理水	無添加	ND	—
	0.01	0.007	70
	0.02	0.014	70
	0.03	0.023	77
一次処理水	無添加	0.015	—
	0.05	0.057	84
	0.05	0.048	66
	0.08	0.079	80
	0.08	0.066	64

表－3 下水試料の17β－エストラジオール測定結果

処理場	流入水（μg/L）			二次処理水（μg/L）		
	7月	8月	9月	7月	8月	9月
A	0.011	0.012	0.007	<0.001	<0.001	<0.001
B	0.011	0.010	0.009	<0.001	<0.001	<0.001
C	0.007	0.007	0.011	<0.001	<0.001	0.001
D	0.014	0.008	0.011	<0.001	<0.001	<0.001
E	0.015	0.007	0.013	<0.001	0.001	<0.001

3．主な研究成果物

・小森行也、田中宏明、高橋明宏、矢古宇靖子「活性汚泥処理実験装置を用いた内分泌攪乱物質の実態調査」第 8 回環境化学討論会、pp.138-139、日本環境化学会、1999.7
・小森行也、田中宏明、竹歳健治「活性汚泥処理プロセスにおける非イオン界面活性剤の挙動」第 36 回下水道研究発表会講演集、pp.700-702、日本下水道協会 1999.7
・田中宏明、小森行也、岡安祐司、竹歳健治、矢古宇靖子、東谷忠「下水道での有害化学物質の管理に関する調査」土木研究所資料第 3661 号平成 10 年度下水道関係調査研究年次報告書集、pp.229-234、建設省土木研究所、1999.8
・小森行也、田中宏明、竹歳健治「活性汚泥処理プロセスにおける NP、NPEO の挙動」第 2 回日本内分泌攪乱化学物質学会研究発表会要旨集、p.236、日本内分泌攪乱化学物質学会、1999.12
・小森行也、田中宏明、竹歳健治、磯部健介「非イオン界面活性剤（NPnEO）の生分解」第 34 回日本水環境学会年会講演集、p.318、日本水環境学会、2000.3
・小森行也、高橋明宏、田中宏明「LC/MS による下水試料中の 17β－エストラジオールの分析」第 9 回環境化学討論会（印刷中）

（田中、小森、岡安、竹歳、矢古宇、東谷）

3.8　病原性微生物の下水処理過程での制御に関する研究

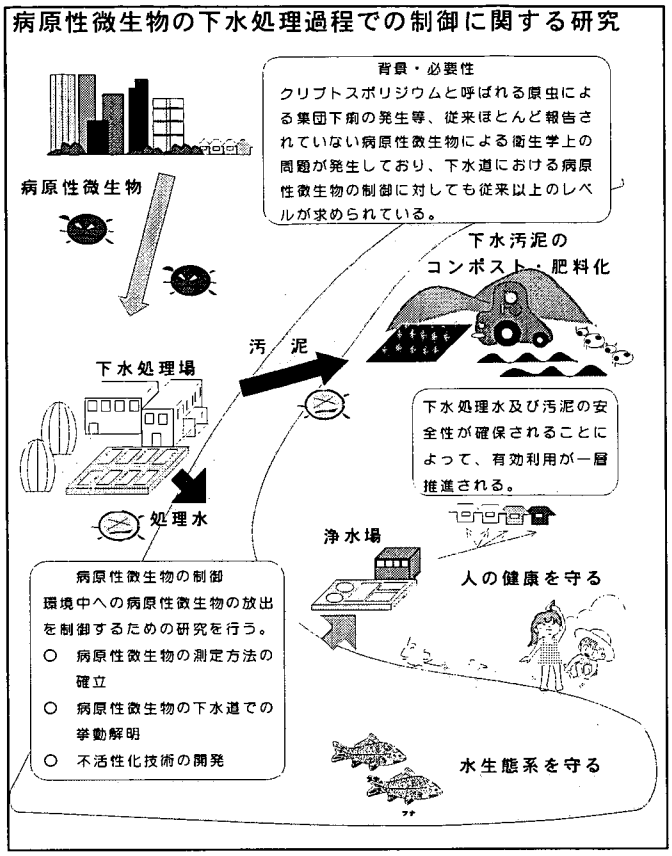
研究期間：平9～平12
担　　当：汚泥研究室

【要旨】

クリプトスポリジウム原虫による集団下痢の発生が大きな社会問題となっている。こうした病原性微生物は、下水道施設に流入してくることが懸念されるが、下水処理過程での病原性微生物の挙動は十分に解明されていないため、その挙動の解明と対策に関する研究を行う必要がある。下水処理過程でのクリプトスポリジウムオーシストの不活化効果を確認するためには、オーシストの不活化を判定する方法が必要となる。そこで、１１年度は、オーシストの不活化を簡便に判定できると考えられている脱嚢試験の至適脱嚢条件を検討した。さらに、至適化した脱嚢試験から水温を20，30，40，45，50，55，60℃に制御した条件下でのオーシストの不活化効果を経時的に探った。

至適脱嚢条件は、pH2.75, 37℃, 30分間の酸前処理を施した後、37℃の脱嚢液中で2時間以上保温することであった。

各温度条件下においてオーシストの不活化率が90%に達するまでの時間は、60℃では約5分、55℃では60分、50℃では190分、45℃では1日、40℃では14日、30℃では42日となった。20℃は、100日経過後においても不活化率は40%程度であった。



1．実験方法

1．1　脱嚢条件の至適化

オーシストの脱嚢率が最も高くなる脱嚢条件を探った。検討した項目は、脱嚢液の種類、前酸処理の有無、脱嚢時間である。検討条件を表-1に示した。

脱嚢操作は次の通りである。10^8/10mlに調整したオーシスト液から1mlを1.5mlのﾁｭｰﾌﾞへ入れ、4℃、11,000G,1分の条件で遠心分離を行い、底部0.1mlを残し上澄水を吸引除去した。この操作を行ったﾁｭｰﾌﾞを12本用意し、このﾁｭｰﾌﾞにそれぞれの脱嚢液を1ml加え、37℃に設定したウォーターバスにより2,4,8時間保温した。酸前処理を行う場合は、オーシストを0.1mlに濃縮した1.5mlﾁｭｰﾌﾞに酸前処理液を1ml加え、37℃に設定したウォーターバスにより30分間保温した後、4℃、11,000G,1分の条件で遠心分離を行い、底部0.1mlを残し上澄水を吸引除去した後、脱嚢液を1ml加え、37℃に設定したウォーターバスにより2,4,8時間保温した。

表―1　脱嚢条件

前酸処理	脱嚢液の組成	脱嚢液保温時間
○　酸性HBSS*pH2.75,37℃	0.1%ﾃﾞｵｷｼｺｰﾙ酸ﾅﾄﾘｳﾑ+0.2%炭酸水素ﾅﾄﾘｳﾑ/HBSS*	2,4,8時間
×　－	0.1%ﾃﾞｵｷｼｺｰﾙ酸ﾅﾄﾘｳﾑ+0.2%炭酸水素ﾅﾄﾘｳﾑ/HBSS*	2,4,8時間
○　酸性HBSS*pH2.75,37℃	0.25%ﾄﾘﾌﾟｼﾝ+0.75%ﾀｳﾛｺｰﾙ酸ﾅﾄﾘｳﾑ/HBSS*	2,4,8時間
×　－	0.25%ﾄﾘﾌﾟｼﾝ+0.75%ﾀｳﾛｺｰﾙ酸ﾅﾄﾘｳﾑ/HBSS*	2,4,8時間

1．2　様々な温度条件でのオーシストの不活化効果

様々な温度条件下でのオーシストの不活化率を把握するために次の実験を行った。水温を20，30，40，45，50，55，60℃に制御した条件下でのオーシストの不活化率を経時的に探った。

2．実験結果

2．1　脱嚢条件の至適化

図-1 は脱嚢液にﾃﾞｵｷｼｺｰﾙ酸ﾅﾄﾘｳﾑと炭酸水素ﾅﾄﾘｳﾑの混合液を使用した場合のオーシストの脱嚢率を示した。図-3 は脱嚢液にﾄﾘﾌﾟｼﾝとﾀｳﾛｺｰﾙ酸ﾅﾄﾘｳﾑを使用した場合である。酸前処理を行わない場合におけるﾃﾞｵｷｼｺｰﾙ酸ﾅﾄﾘｳﾑと炭酸水素ﾅﾄﾘｳﾑの混合液とﾄﾘﾌﾟｼﾝとﾀｳﾛｺｰﾙ酸ﾅﾄﾘｳﾑの混合液について脱嚢率を比較すると、若干、ﾄﾘﾌﾟｼﾝとﾀｳﾛｺｰﾙ酸ﾅﾄﾘｳﾑの混合液を使用した場合の方が高くなった。しかし、8時間の脱嚢処理でも脱嚢率は 50%以下と低かった。一方、酸前処理を行うことにより、ﾃﾞｵｷｼｺｰﾙ酸ﾅﾄﾘｳﾑと炭酸水素ﾅﾄﾘｳﾑの混合液とﾄﾘﾌﾟｼﾝとﾀｳﾛｺｰﾙ酸ﾅﾄﾘｳﾑの混合液とも、脱嚢率は顕著に向上することが分かった。脱嚢率は、保温処理 2 時間で 90%、4 時間で 95%となった。

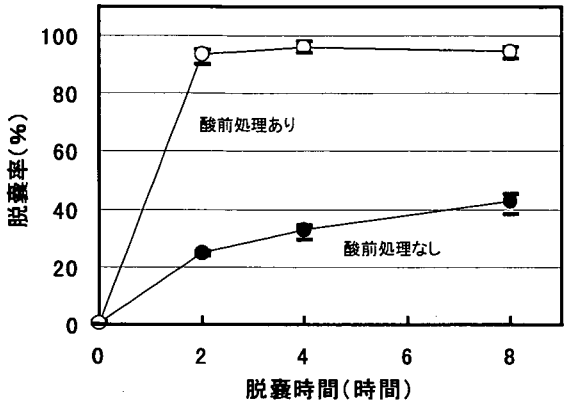


図-1　ﾃﾞｵｷｼｺｰﾙ酸ﾅﾄﾘｳﾑと炭酸水素ﾅﾄﾘｳﾑの混合液を使用した場合の脱嚢率に及ぼす酸処理の影響

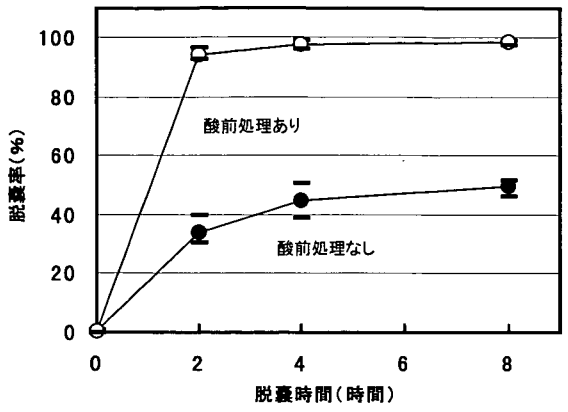
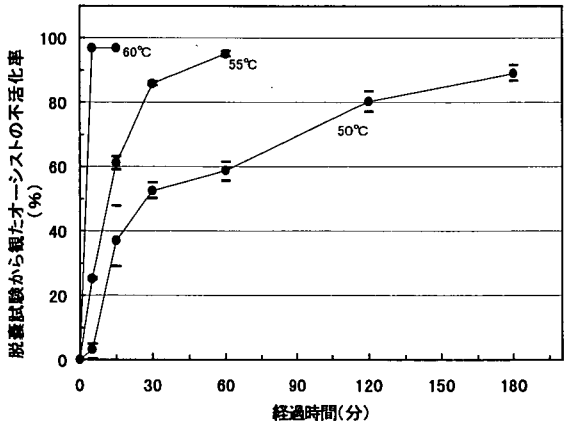


図-2　ﾄﾘﾌﾟｼﾝとﾀｳﾛｺｰﾙ酸ﾅﾄﾘｳﾑの混合液を使用した場合の脱嚢率に及ぼす酸処理の影響

2．2　様々な温度条件でのオーシストの不活化効果

図-3,4 に各温度条件での経過時間とオーシストの不活化率の関係を示した。各温度で不活化率が 90%まで達する時間を図より読みとると 60 度では約 5 分、55 度では 60 分、50 度では 190 分、45 度では 1 日、40 度では 14 日、30 日では 42 日となった。20℃では、100 日経過後においても不活化率は 40%であった。



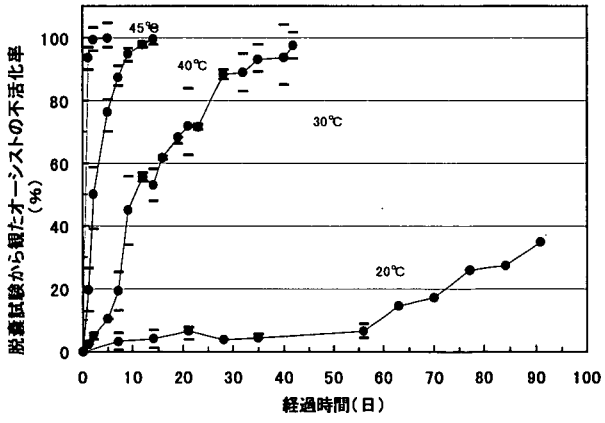


図-3 50, 55, 60℃における経過時間と不活化率の関係　図-4 20, 30, 40, 45℃における経過時間と不活化率の関係

3．主な研究成果物

(1)北村友一，尾崎正明：下水汚泥中のクリプトスポリジウムオーシストの検出方法に関する基礎的検討,下水道協会誌，Vol.35，No.431,pp.136～145,1998

(2)北村友一，尾崎正明：下水汚泥からのクリプトスポリジウムオーシストの回収方法に関する検討,第 35 回日本水処理生物学会講演要旨集,p.20,1998

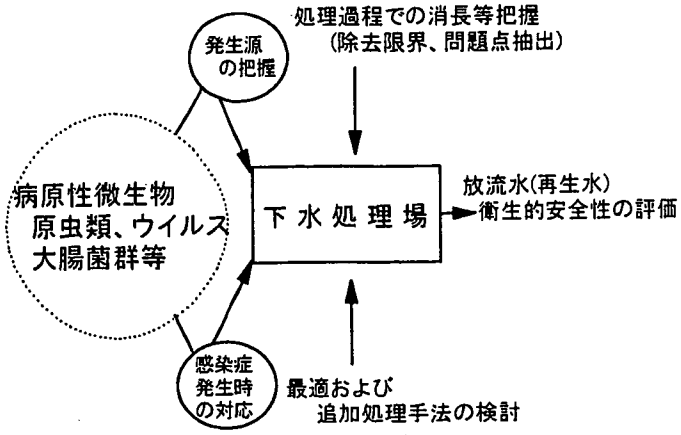
(3)北村友一,尾崎正明：下水処理におけるクリプトスポリジウムオーシストの諸特性,下水道協会誌，Vol.36，No.444,pp.127～136,1999

（森田、落、北村）

3.9　病原性微生物の発生源および対策に関する調査

研究期間：平１０～平１３
担　　当：三次処理研究室

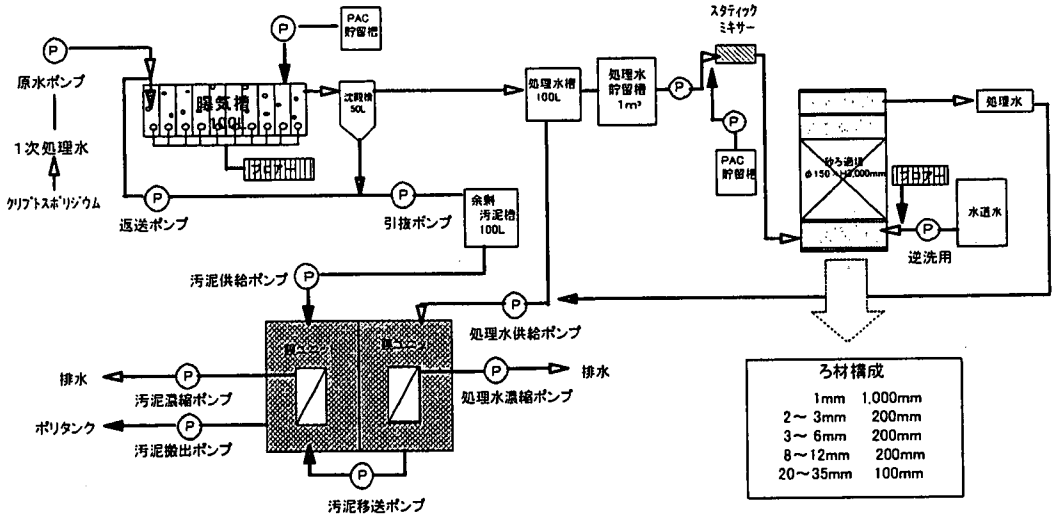
【要　旨】
近年、我が国においても病原性原虫類のｸﾘﾌﾟﾄｽﾎﾟﾘｼﾞｳﾑ等による大規模な集団感染事例が発生[1]し、新たな感染症として注目されている。本調査においては、このような病原性微生物等に関して発生源を明らかにするとともに、その対策さらには、集団感染症発生時における除去能力の向上を目的として負荷削減手法の検討を行うものである。今年度は、ﾊﾟｲﾛｯﾄﾌﾟﾗﾝﾄ等を用いてｸﾘﾌﾟﾄｽﾎﾟﾘｼﾞｳﾑに関する活性汚泥処理法の除去能力の把握および、凝集剤添加ならびに砂ろ過による除去効率の向上に関する検討を行った。



1．実験方法

1.1　連続除去実験

活性汚泥処理法の連続除去実験では、曝気槽(槽内容量100ℓ)、沈殿槽(槽内容量50ℓ)、砂ろ過塔(D150×H3,000mm)、凝集剤添加装置、膜処理装置等より構成されているﾊﾟｲﾛｯﾄﾌﾟﾗﾝﾄ(概略を図-1に示す)を用いた。膜処理装置は、添加したｵｰｼｽﾄが系外へ排出されないようを設けたものであり、分析に供した試料以外の処理水や余剰汚泥等については、全て膜処理を行った。

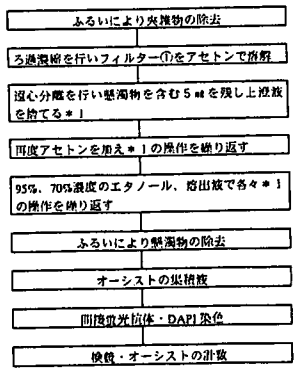


図－1　パイロットプラントの概略図

実験条件は、ｵｰｼｽﾄを添加したA浄化ｾﾝﾀｰ内の一次処理水を連続的に流入させ、曝気槽内のMLSS濃度を2,000mg/ℓ程度に設定、曝気槽内の滞留時間(HRT)を8時間、汚泥返送比を約50％とした。ｵｰｼｽﾄの添加濃度は約4.0×10⁴個/ℓとし、処理水中のｵｰｼｽﾄの分析は、一次処理水にｵｰｼｽﾄを添加した直後から行った。ｵｰｼｽﾄの測定方法は、試料を濃縮したﾌｨﾙﾀｰをｱｾﾄﾝで溶解する方法であり、概略ﾌﾛｰを図-2に示した。本実験でのｵｰｼｽﾄの回収率は約50.7％であった。

なお、実験に使用したｵｰｼｽﾄはﾎﾙﾏﾘﾝ固定された市販のものであり、ﾘﾝ酸緩衝生理食塩水で洗浄を行った後に実験に使用した。

活性汚泥処理法による除去実験での水質分析項目は水温、



ﾌｨﾙﾀｰ-①：直径90mm、ｾﾙﾛｰｽ混合ｴｽﾃﾙ製、公称孔径3μm
遠心分離、濃縮は1,050G・10分間、ふるいの目開き22μm

図－2　オーシストの測定方法の概略フロー

pH, SS, 濁度, CODcr, 大腸菌群数, MLSS, MLVSS, DO, BOD, N, Pとした。

1.2 凝集剤添加活性汚泥処理法による連続除去実験

実験装置の運転条件や水質分析項目等は, 上記1.1の実験と同一である。凝集剤はﾎﾟﾘ塩化ｱﾙﾐﾆｳﾑ(PAC)を使用し, 添加量はA ℓ 濃度で10mg/ ℓ, 添加位置は第9槽の曝気槽(槽内滞留時間：第9槽から10槽で約50～100分)とした。なお、凝集剤は処理水のオーシスト濃度がほぼ安定した段階で添加した。

1.3 砂ろ過によるオーシストの除去実験

実験装置の概略は, 図-1に示したとおりである。ろ過塔は内径150mm, 高さ3,000mmであり, ろ過材は, 通常急速ろ過法で使用されている硅砂を用い, 充填厚や粒径の構成等は“高度処理施設設計資料”(建設省・高度処理会議, 平成6年2月)を参考とした。ろ過速度は100, 200m/日の2段階とし, 上向流ろ過方式とした。使用した原水は、1.1連続除去実験で生成された二次処理水を用いた(凝集剤を添加した処理水は使用していない)。また、凝集剤添加砂ろ過は, 配管ﾗｲﾝに凝集剤(PAC)を注入しｽﾀﾃｨｯｸﾐｷｻｰで原水と凝集剤を混合させた後、砂ろ過を行った。凝集剤の注入濃度は3mgA ℓ / ℓ とした。

1.4 流入下水の凝集沈殿処理

流入下水の凝集沈殿処理では, ﾃﾞｨｽﾎﾟｶｯﾌﾟ内(容量1 ℓ)に, A浄化ｾﾝﾀｰの流入下水とｵｰｼｽﾄを入れ、A ℓ 濃度が0～20mg/ ℓ の範囲になるよう凝集剤(PAC)を添加した。ｵｰｼｽﾄの添加濃度は約1.0×10^{4}～1.0×10^{6}個/ ℓ とした。ｼﾞｬｰﾃｽﾀｰにより120rpm・1分間急速撹拌実施後, 静置沈殿時間を90分とし, その上澄液中のｵｰｼｽﾄ数を測定し除去能力を評価した。急速撹拌時間の1分は, 下水処理場の沈砂池の設計滞留時間、静置沈殿時間の90分は, 最初沈殿池の設計滞留時間である。上澄液中のｵｰｼｽﾄ数の測定方法は、試料を濃縮したﾌｨﾙﾀｰをｱｾﾄﾝで溶解する方法であり、図-2に示したとおりである。本実験でのｵｰｼｽﾄの平均回収率は約80％であった。

また, これとは別に比較対照(ｵｰｼｽﾄの沈降性確認)として, 流入下水にｵｰｼｽﾄを添加した直後のものと凝集剤を添加していない90分後の上澄液についてｵｰｼｽﾄ数を測定した。0.1～0.2m ℓ の試料を直接, 染色用ﾌｨﾙﾀｰに通水・染色しｵｰｼｽﾄ数を測定した。本測定法によるｵｰｼｽﾄの平均回収率は約100％であった。

各々の実験によりｵｰｼｽﾄの回収率は異なるが, これは濃縮および夾雑物との分離操作の有無、測定水量の多少に起因するものである。

なお、流入下水にｵｰｼｽﾄを添加した直後のものと90分静置後の上澄液中のｵｰｼｽﾄ数はほぼ同一であり、90分程度の沈殿時間ではオーシストは沈降しないと考えられる。

流入下水の凝集沈殿処理実験での水質分析項目は, 水温, pH, SS, 濁度, CODcr, 大腸菌群数とした。

1.5 ｵｷｼﾃﾞｰｼｮﾝﾃﾞｨｯﾁ法のｵｰｼｽﾄの除去効果

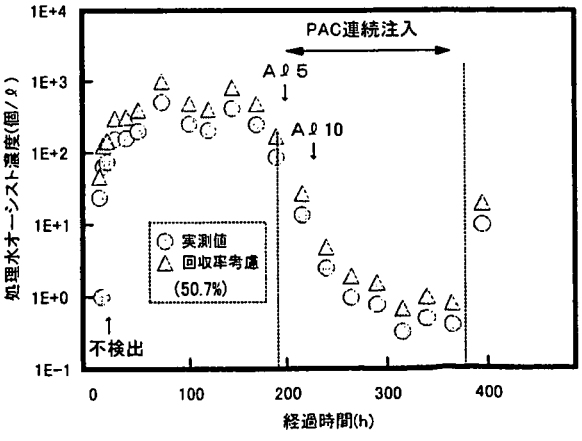
基本的には, 10年度に行った活性汚泥処理法の回分実験の方法とほぼ同一である。水槽内(H200xW200xD200mm, 槽内容量5 ℓ)に, B浄化ｾﾝﾀｰのｵｷｼﾃﾞｰｼｮﾝﾃﾞｨｯﾁ法の活性汚泥を入れ、ｵｰｼｽﾄを添加し曝気混合を行った。24時間曝気混合後, 活性汚泥を2時間沈殿させ, 上澄液のｵｰｼｽﾄ数を測定し除去効果を評価した。

なお, B浄化ｾﾝﾀｰのｵｷｼﾃﾞｰｼｮﾝﾃﾞｨｯﾁ内の平均滞留時間は48時間であった。

2 実験結果

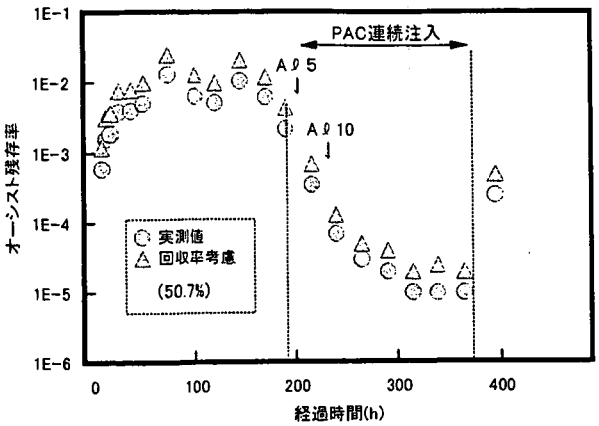
2.1 連続除去実験

活性汚泥処理法による連続除去実験結果を図-3、4に示す(凝集剤添加活性汚泥処理法による連続除去実験結果含む)。図-3は処理水ｵｰｼｽﾄ濃度の推移, 図-4はｵｰｼｽﾄ残存率(ともに対数表示)の推移を示したものである。添加開始直後の処理水からはｵｰｼｽﾄは検出されていないが, 8時間後の処理水からは24個/ ℓ (実測値)のｵｰｼｽﾄが検出され除去率は99.9％であった。その後, 処理水のｵｰｼｽﾄ濃度は上昇し72時間後にﾋﾟｰｸに達し514個/ ℓ (実測値)のｵｰｼｽﾄが検出され、除去率は98.7％(回収率考慮:97.5％)となった。ｵｰｼｽﾄ濃度がﾋﾟｰｸに達した72時間後から凝集剤を添加するまでのｵｰｼｽﾄの平均除去率は99.3％(回収率考慮:98.6％)であり, 回収率を考慮したｵｰｼｽﾄの除去効率は２log程度であった。この除去効率は, 10年度の回分による除去実験をもとに計算した値とも, 良く整合していた。



図－3 処理水オーシスト濃度の推移

既存の研究結果[2) 3)]では、活性汚泥処理法の除去効率は80～98.6％という報告もあり、本実験結果の方が若干高い除去率を示した。



図－4 オーシスト残存率の推移

2.2 凝集剤添加活性汚泥処理法による連続除去実験

凝集剤添加活性汚泥処理法による連続除去実験結果を図-3,4に示す。凝集剤の添加は、活性汚泥処理による処理水のｵｰｼｽﾄ濃度がほぼ安定した段階の経過時間が約192時間後とした。図中のＡℓ５と記してあるのは注入ﾎﾟﾝﾌﾟの設定ﾐｽによるものであり、それ以降の注入濃度はＡℓ濃度で10mg/ℓである。凝集剤添加から24時間後(この時のＡℓ濃度は5mg/ℓ)には、ｵｰｼｽﾄの除去効率は３log程度であり、凝集剤添加による除去効率の向上は１log程度であった。その後、処理水のｵｰｼｽﾄ濃度は徐々に低下し、凝集剤を添加してからほぼ5日後に安定した。5日後からの処理水の平均ｵｰｼｽﾄ濃度は約0.4個/ℓであり、除去効率は５log程度(回収率考慮:4.7log)となり、凝集剤添加による除去効率の向上は３log程度であった。両図中の最終ﾌﾟﾛｯﾄのｵｰｼｽﾄ濃度・残存率の上昇は、凝集剤添加を止めた時のものであり、この時の処理水ｵｰｼｽﾄ濃度は10個/ℓとなった。

10年度の回分実験結果では、凝集剤添加(10mgＡℓ/ℓ)による除去効率の向上は１log程度であり、今回の実験結果と比較した場合２log程度の除去効率の違いが見られた。これは、連続運転によってＡℓが汚泥中に蓄積することにより、除去効率が向上したものと推定される。

2.3 ﾊﾟｲﾛｯﾄﾌﾟﾗﾝﾄ除去実験での流入・処理水質

他の主な水質項目の分析結果を表-1に示す。本ﾊﾟｲﾛｯﾄﾌﾟﾗﾝﾄのBOD,CODなどの有機物の平均除去率はともに約85％であり、凝集剤を添加したことにより、除去率は90％以上となった。SS、濁度の除去率に関しては、ともに当初90％程度であったが、凝集剤を添加したことにより、除去率は98％程度と向上した。冬季に実験を行ったことから、曝気槽内の平均水温は8.8℃と低水温であった。また、凝集剤の添加により曝気槽内の平均pHは6.91から6.77に推移した。平均MLSS濃度は2,100mg/ℓ(MLVSS：1,600mg/ℓ)であり、2,000mg/ℓの設定濃度に対し若干高めの値であった。

なお、本実験期間中のﾊﾟｲﾛｯﾄﾌﾟﾗﾝﾄのSRT(Solids Retention Time)は約７日であった。

表－１　水質分析結果

試料 / 項目	流入水		二次処理水		凝集剤添加処理水	
	範囲	平均	範囲	平均	範囲	平均
BOD(T) (mg/ℓ)	104～159	124	7～30	18	8	8
BOD(D) (mg/ℓ)	44～143	83	－	－	－	－
CODcr(T) (mg/ℓ)	130～240	189	23～38	28	14～26	18
CODcr(D) (mg/ℓ)	65～155	108	15～30	24	12～19	15
ＳＳ (mg/ℓ)	73～126	94	5.8～11.0	8.5	0.9～2.3	1.7
濁度 (度)	57～98	78	4.4～11.7	8.6	1.0～1.8	1.4
大腸菌群数(個/mℓ)	1.2E+5～4.4E+5	2.6E+5	2.0E+3～3.0E+4	1.6E+4	3.8E+1～3.4E+2	1.8E+2

2.4 砂ろ過によるオーシストの除去実験

砂ろ過の実験結果を表-2に示す。砂ろ過によるｵｰｼｽﾄの除去率は、ろ過速度100,200m/日ともに約70％(除去効率:約0.55 log)であり、ろ過速度の違いによる除去率の差は見られなかった。また、この時のSS除去率は約50％、濁度除去率は約20％であった。

表－２　砂ろ過の実験結果

項目 / 試料	ｵｰｼｽﾄ濃度(個/ℓ)	ｵｰｼｽﾄ除去率(％)	ＳＳ (mg/ℓ)	濁度 (度)
ろ過原水	１２４	－	13.5	9.3
ろ過水(100m/d)	３４	７３	6.0	7.6
ろ過水(200m/d)	３６	７１	6.5	7.7

凝集剤添加砂ろ過の実験結果を表-3に示す。凝集剤添加砂ろ過によるｵｰｼｽﾄの除去率は、ろ過速度100、200m/日ともに99.7%(除去効率:2.6log)であり、ろ過速度の違いによる除去率の差は、砂ろ過の時と同様に見られなかった。

表－３ 凝集剤添加砂ろ過の実験結果

項目 / 試料	ｵｰｼｽﾄ濃度(個/ℓ)	ｵｰｼｽﾄ除去率(%)	ＳＳ(mg/ℓ)	濁度(度)
ろ過原水	１９９	－	8.0	7.5
ろ過水(100m/d)	0.5	99.7	3.0	1.9
ろ過水(200m/d)	0.5	99.7	3.9	2.7

上記実験結果より、凝集剤を添加することにより除去効率を２log程度向上させることができることが明らかになった。また、この時のSS除去率は約50～60%、濁度除去率は約60～70%であり凝集剤を添加することにより、ともに除去率は向上した。

２.５ 流入下水の凝集沈殿処理実験

２.５.１ ｵｰｼｽﾄ添加濃度の異なるｹｰｽにおけるＡℓ添加濃度とｵｰｼｽﾄ残存率

ｵｰｼｽﾄ添加濃度の異なるｹｰｽにおけるＡℓ添加濃度とｵｰｼｽﾄ残存率の関係について図-5に示す。Ａℓ添加濃度を12.5mg/ℓ以上とすることにより、ｵｰｼｽﾄの除去効率は３log以上となった。また、Ａℓ添加濃度が2.5mg/ℓの場合には、ｵｰｼｽﾄ添加濃度が1.0×10^4個/ℓで１log程度、1.0×10^6個/ℓでは0.2log程度の除去効率であった(各々のSS濃度が200mg/ℓ程度の場合)。Ａℓ添加濃度が低濃度の場合には、ｵｰｼｽﾄ添加濃度の多少により、除去効率に違いが見られた。

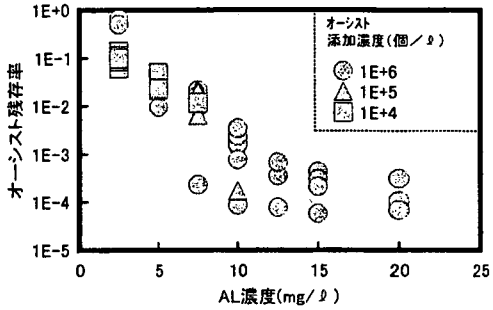


図-5 Ａℓ添加濃度とオーシスト残存率の関係

２.５.２ 流入下水のSS濃度とＡℓ添加濃度の違いによるｵｰｼｽﾄの残存率

図-5に示したＡℓ添加濃度が同一でのｵｰｼｽﾄ残存率の変動は、流入下水のSS濃度の違いによる影響が大きいものと考えられる。流入下水のSS濃度とＡℓ添加濃度の違いによるｵｰｼｽﾄ残存率の関係を図-6に示す。各Ａℓ添加濃度とも若干のﾊﾞﾗﾂｷがあるものの、右上がり傾向を示しており、流入下水のSS濃度が低ければｵｰｼｽﾄ残存率も低くなっている。なお、流入下水のSS濃度が200mg/ℓ以上でのｵｰｼｽﾄの除去効率は、Ａℓの添加濃度５mg/ℓで１log以上、同様に7.5mg/ℓで２log程度、10～20mg/ℓで３～４log程度であった。

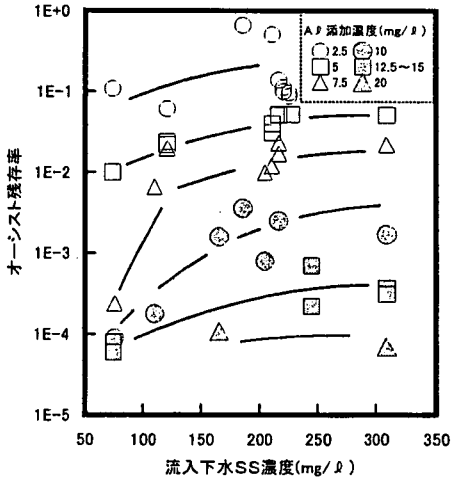
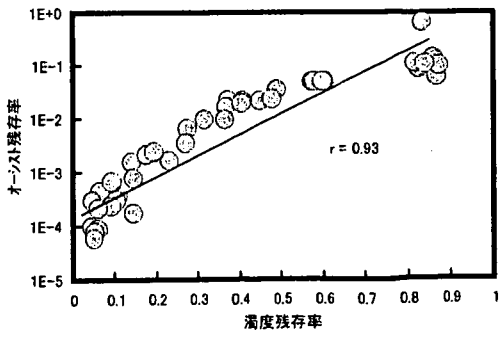


図-6 SS濃度とAl添加濃度の違いによるオーシストの残存率

２.５.３ ｵｰｼｽﾄと濁度残存率の関係

ｵｰｼｽﾄ残存率と濁度残存率の関係について図-7に示す。比較的高い相関関係であり、ほぼ直線関係が得られているようである。この結果から、流入下水の凝集沈殿によるｵｰｼｽﾄの除去では、その除去効率を把握する上で濁度が有効な指標になるものと考えられた。ｵｰｼｽﾄの除去効率が２log程度の場合、濁度除去率は約55%、３log程度の場合には約80%であった。

また、参考に各添加濃度毎の上澄液中のｵｰｼｽﾄ濃度と濁度の関係について図-8に示す。濁度の変動に対する上澄液中のｵｰｼｽﾄ濃度は、ｵｰｼｽﾄの添加濃度が多くなるほど変化の程度が大きくなる傾向を示した。さらに、ｵｰｼｽﾄ添加濃度の低い1.0×10^4個/ℓのｹｰｽについて、ｵｰｼｽﾄ濃度が対数表示でないものについて図-9に示すが、濁度との間に直線関係が見られた。



図－７ オーシストと濁度残存率の関係

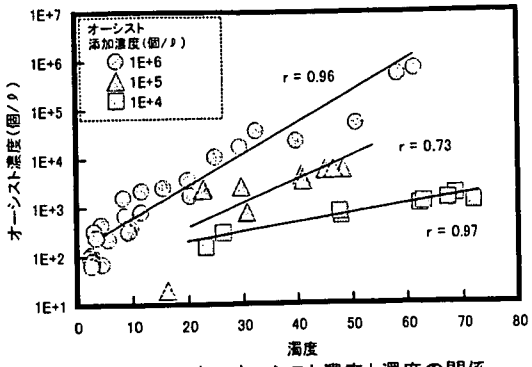


図-8 上澄液のオーシスト濃度と濁度の関係

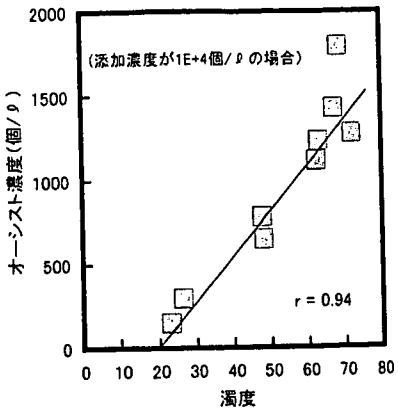


図-9 上澄液のオーシスト濃度と濁度の関係

2.5.4 オーシストとCODcr残存率の関係

オーシスト残存率とCODcr残存率の関係について図－10に示す。比較的高い相関関係であり、ほぼ直線関係が得られている。濁度指標と同様にオーシストの除去効率を把握する上で、CODcrも有効な指標になるものと考えられた。オーシストの除去効率が２log程度の場合、CODcr除去率は約40％、３log程度の場合には約50％であった。

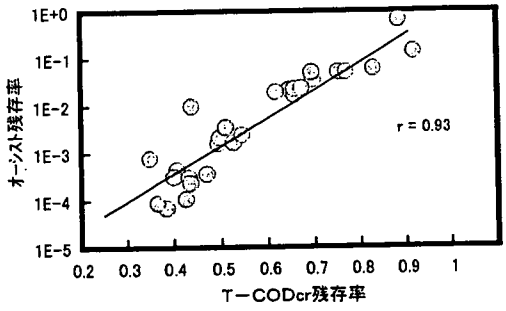


図-10 オーシストとT－CODcrの残存率の関係

2.5.5 オーシストと大腸菌群数残存率の関係

オーシスト残存率と大腸菌群数残存率の関係について図－11に示す。オーシストの除去効率が１log程度までは大腸菌群数の減少傾向は見られないが、それ以降よりほぼ直線に近い関係が得られた。しかし、流入下水の凝集沈殿処理によるオーシストの除去効率を把握する上で、濁度やCODcr指標と測定の容易さや測定に要する時間などを比較すると、大腸菌群数指標は課題が残されるものと考えられる。

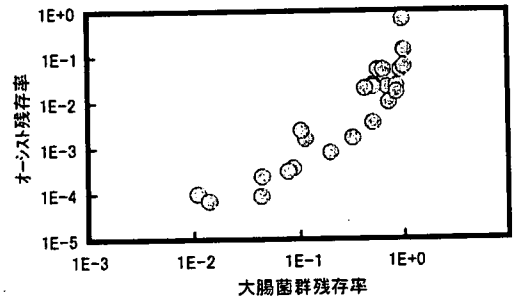


図-11 大腸菌群数とオーシストの残存率の関係

2.5.6 Aℓ添加濃度とCODcrの残存率の関係

Aℓ添加濃度とCODcrの残存率の関係について図－12に示す。Aℓ添加濃度が５mg/ℓの場合には、CODcr濃度の除去率は約30％、10mg/ℓで約50％であった。よって、流入下水の凝集沈殿処理法を適用する場合には、凝集剤添加により有機物負荷が低下するため、活性汚泥処理ﾌﾟﾛｾｽに与える影響を今後検討しなければならない。

2.6 ｵｷｼﾃﾞｰｼｮﾝﾃﾞｨｯﾁ法のｵｰｼｽﾄの除去効果

実験結果を図－13、14に示す。各々、MLSS１ｇ当たりのオーシスト除去量と処理水オーシスト濃度の関係を示したものである。図-13の図中のﾌﾟﾛｯﾄは、通常の活性汚泥を用いた10年度の回分実験結果と、ｵｷｼﾃﾞｰｼｮﾝﾃﾞｨｯﾁ法の活性汚泥を用いた実験結果を合わせたものである。曝気混合処理時間は、通常の活性汚泥が８時間、ｵｷｼﾃﾞｰｼｮﾝﾃﾞｨｯﾁ法の活性汚泥は24時間である。図-14のﾌﾟﾛｯﾄでは、各々の活性汚泥とも曝気混合処理時間は24時間である。両図の結果とも、ほぼ同一線上にﾌﾟﾛｯﾄされていることから、活性汚泥性状等が異なってもオーシストの除去能力に大差がないと考えられる。

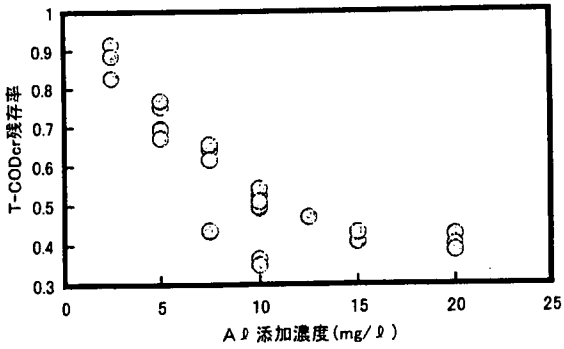


図-12 Aℓ添加濃度の違いによるT－CODcrの残存率

10年度の活性汚泥処理法の回分実験結果（式

(1)) およびSS濃度150mg/ℓの流入下水に対して、汚泥転換率を75%として、処理水濃度および除去率を計算すると、表－4のようになる。流入ｵｰｼｽﾄ濃度が低濃度の場合は約99%の除去率が得られ、流入濃度が高くなると除去率は98%(回収率考慮：97%)になることが計算される。

以上の実験結果から、ｵｷｼﾃﾞｰｼｮﾝﾃﾞｨｯﾁ法の場合もｵｰｼｽﾄの除去効率は、最大で２log程度であると推定される。

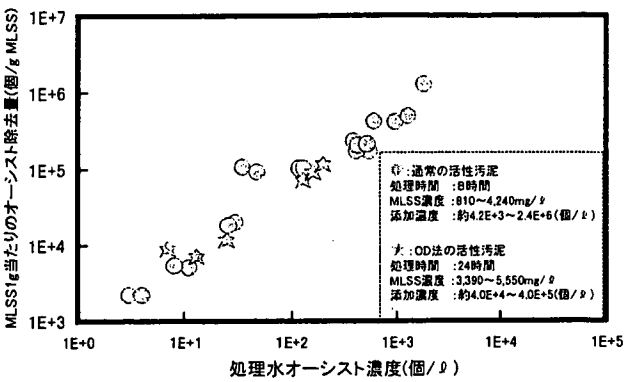


図-13 MLSS1g当たりのオーシスト除去量と処理水オーシスト濃度の関係(1)

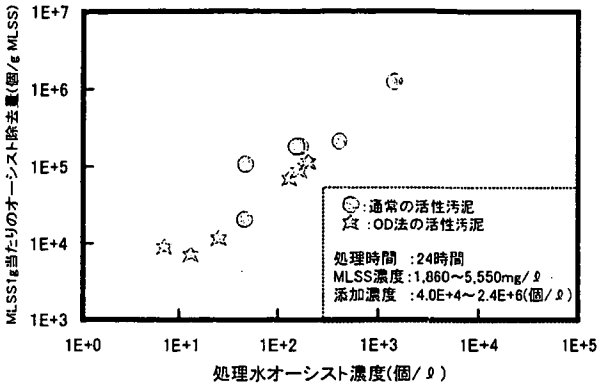


図-14 MLSS1g当たりのオーシスト除去量と処理水オーシスト濃度の関係(2)

$$Ro = 1{,}039 \cdot C^{0.90} \quad \text{式 (1)}$$

(636 ,回収率考慮：57.6%)

Ro：除去(吸着)ｵｰｼｽﾄ量(個/g MLSS)
C：処理水平衡ｵｰｼｽﾄ濃度(個/ℓ)

表－４ 流入ｵｰｼｽﾄ濃度に対する処理水濃度と除去率

流入ｵｰｼｽﾄ濃度 (個/ℓ)	処理水濃度（個/ℓ）と除去率（%）			
	定常			
	実測値	除去率	回収率考慮	除去率
10^1	6.5E-2	99.3	1.1E-1	98.9
10^2	8.4E-1	99.2	1.4E+0	98.5
10^3	1.1E+1	98.9	1.9E+1	98.1
10^4	1.4E+2	98.6	2.4E+2	97.6
10^5	1.8E+3	98.2	3.1E+3	96.9

３．主な研究成果物

①土木技術資料,「活性汚泥処理による病原性原虫類－ｸﾘﾌﾟﾄｽﾎﾟﾘｼﾞｳﾑの除去－」,Vol.41,No.9 (1999)
②第42回 高度処理会議資料,「活性汚泥処理および流入下水の凝集沈殿によるｸﾘﾌﾟﾄｽﾎﾟﾘｼﾞｳﾑの除去」,(2000)
③第５回 下水道におけるｸﾘﾌﾟﾄｽﾎﾟﾘｼﾞｳﾑ検討委員会資料、日本下水道協会、平成12年3月
④諏訪守,鈴木穣,「活性汚泥処理によるｸﾘﾌﾟﾄｽﾎﾟﾘｼﾞｳﾑの除去実験」,第34回日本水環境学会年会(2000)
⑤土木研究所資料、下水道関係調査研究年次報告書集 (平成11年度)
⑥土木研究所資料第3733号,「下水処理過程におけるｸﾘﾌﾟﾄｽﾎﾟﾘｼﾞｳﾑの除去効果等」,平成12年６月
⑦Y.Suzuki and M.Suwa, COUNTERMEASURES TO *CRYPTOSPORIDIUM* IN WASTEWATER TREATMENT PLANTS,日米政府間上下水道協議資料,(1999)

【参考文献】

1) 例えば,埼玉県衛生部,「ｸﾘﾌﾟﾄｽﾎﾟﾘｼﾞｳﾑによる集団下痢症報告書」 (1997)
2) Stadterman,K.L.,Sninsky,A.M.,sykora,J.L.,Jakubowski,W., Removal and inactivation of *Cryptosporidium oocysts* by activated sludge treatment and anaerobic digestion, *Wat.Sci.Tech.*, 31(5-6),97-104,1995
3) de Maturana,I.V.-M.,Arez-Mazas,M.E.,Duran-Oreiro,D.,Lorenzo-Lorenzo,M.J., Efficacy of activated sludge in removing *Cryptosporidium parvum oocysts* from sewage, Appliedn and Environmental Microbiology,Vol.58,No.11,pp.3514-3516, 1992

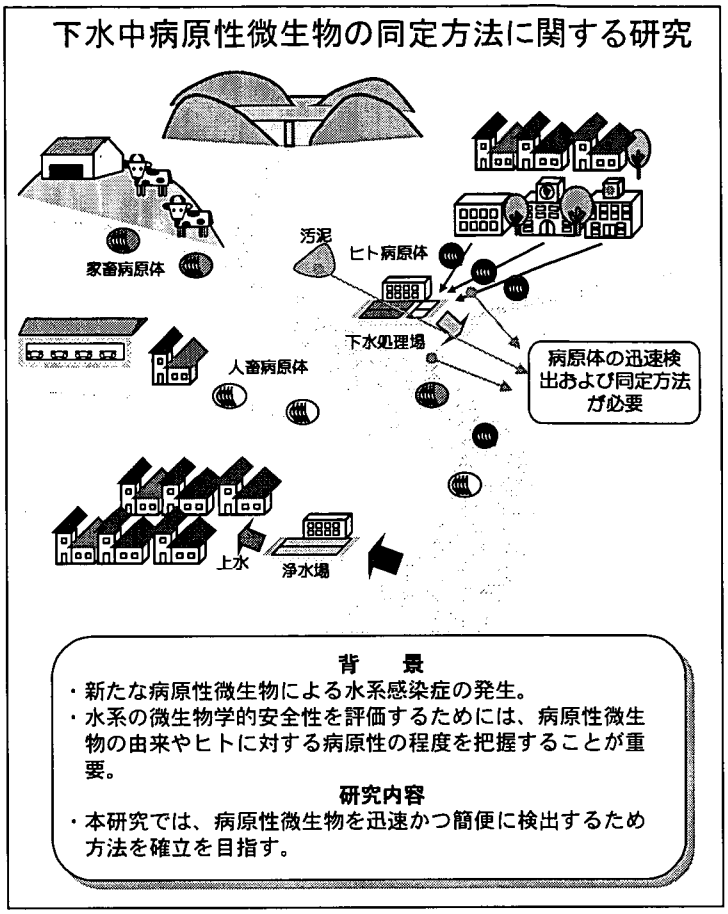
(鈴木、小越、諏訪)

3.10　下水中病原性微生物の同定方法に関する研究

研究期間：平 11～平 14
担　　当：汚泥研究室

【要旨】 水系の微生物学的安全性を評価する上で、下水や下水処理水及び汚泥中の病原性微生物を確認することは重要で緊急を要する。下水処理が不完全な場合、病原性微生物は下水処理水とともに、河川、湖沼、海域に放流され、ヒトに対して重大な健康影響を及ぼす可能性がある。このことから病原性微生物を常にモニタリングする必要があるが、病原性微生物の迅速測定方法は未だ確立されていない。本研究では、迅速かつ簡便に極微量の病原性微生物を検出するための方法を確立することを目的とする。11年度は、免疫学的同定法によるクリプトスポリジウムオーシストのフローサイトメトリーによる迅速検出法の開発を行った。

その結果、クリプトスポリジウムオーシストのフローサイトメトリーによる検出は、クリプトスポリジウムのオーシストに特異的に反応する蛍光抗体染色試薬によりオーシストを染色することにより容易になることが分かった。しかし、試料に夾雑物が多く含まれる場合は、非特異反応を抑える方法を開発する必要があった。



1．実験方法

クリプトスポリジウムオーシストが含まれる試料をフローサイトメーターで分析するとどのような情報が得られるのか、また、オーシストは検出可能かどうかを検討した。

1．1　測定方法

オーシストをフローサイトメーターで検出する場合、オーシストを蛍光抗体染色する必要があるが、オーシストの蛍光抗体染色は、図－1に示した手順により行った。この染色手順により蛍光抗体染色を施したオーシストと蛍光抗体染色していないオーシストをそれぞれ解析することにした。次に、汚泥中にオーシストを添加し、オーシストの含まれる汚泥に蛍光抗体染色を施した場合の分析も行った。なお、使用した汚泥は、フローセルの目詰まりを防ぐため目開き 22μm のフルイを通した。対照系として蒸留水にオーシストを同濃度添加した場合も検討した。

フローサイトメーターの励起光のレーザーには、FITCの付いた2次抗体試薬の吸収波長である 495nm に近い、アルゴンレーザー(中心波長 488nm)を用いた。　このレーザー光線に照射されたオーシストの前方散乱光と側方散乱光及び FITC 蛍光強度の違いから、オーシストの情報を解析した。

１％牛血清アルブミン液を１分間作用させ、遠心分離(1,050×G，5 min)後，上澄水を取り除く。
↓
１０％ヤギ血清を５分間作用させ、遠心分離(1,050×G，5 min)後，上澄水を取り除く。
↓
１次抗体試薬を２５分間作用させる。
↓
リン酸緩衝生理食塩水を加え撹拌し、遠心分離(1,050×G，5 min)後、上澄水を取り除く。(この操作を３回行う)
↓
２次抗体試薬を２５分間作用させる。
↓
リン酸緩衝生理食塩水を加え撹拌し、遠心分離(1,050×G，5 min)後、上澄水を取り除く。この操作を３回行い、３回目は、底部１ｍｌを残し、上澄水を取り除く。
↓
フローサイトメーターによる測定

図－1　オーシストの間接蛍光抗体染色の手順

2．実験結果

2．1　測定結果

オーシストを蛍光抗体染色した場合の側方散乱強度と前方散乱強度のヒストグラムを図－2(a)に、側方散乱強度と蛍光強度のヒストグラムを図－2(b)に示した。また、オーシストを蛍光抗体染色しなかった場合の、側方散光強度と前方散乱強度のヒストグラムを図－3(a')に、側方散乱強度と蛍光強度のヒストグラムを図－3(b')に示した。図－2(a)と図－3(a')を比較すると、ヒストグラムのパターンに違いは見られず、側方散乱強度と前方散乱強度の関係からオーシストを識別することは、困難であることが分かる。図－2(b)と図－3(b')を比較するとヒストグラムに顕著な違いが見られる。違いが見られた領域を解析画面上で目視で囲み、この領域をA領域とした。このA領域内にプロットされている点を分取し、顕微鏡観察した結果、オーシストであることが確認された。以上のことから、側方散乱強度と蛍光強度の関係からオーシストを自動検出できることが分かった。

しかし、オーシストの外に夾雑物が多くが含まれる試料を蛍光抗体染色すると、蛍光抗体試薬と汚泥粒子が非特異反応が生じることが分かった。オーシストを特異的に検出するためには、非特異反応を抑えるブロッキング剤を検索する必要があった。

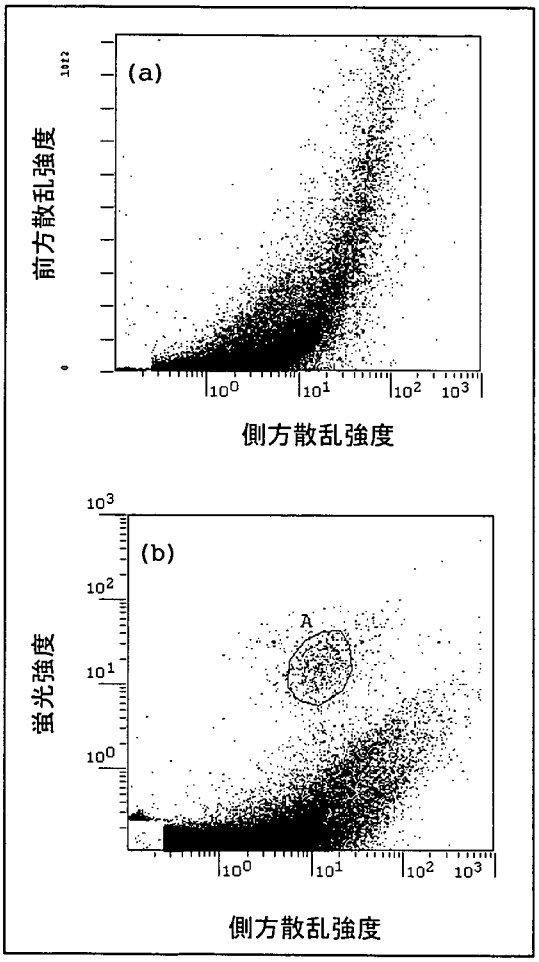


図-2　蛍光抗体染色後のオーシストのフローサイトメトリー分析結果

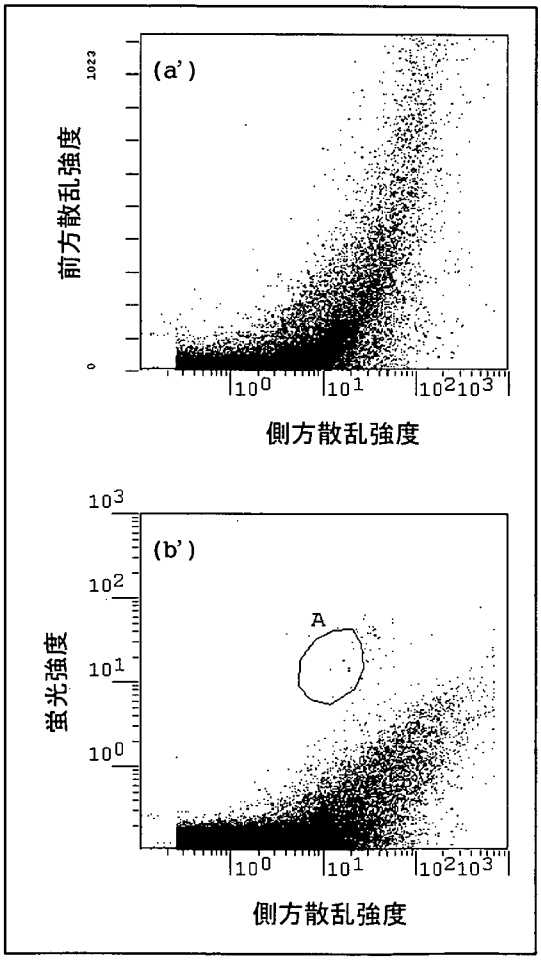


図-3　蛍光抗体染色前のオーシストのフローサイトメトリー分析結果

3．主な研究成果物

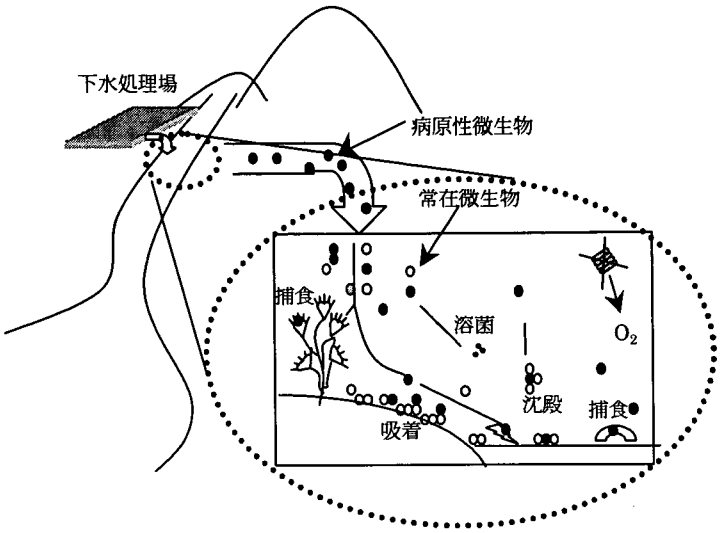
1）北村友一，森田弘昭：フローサイトメトリーセルソーターによる汚泥中のクリプトスポリジウムオーシストの迅速検出方法の開発，土木技術資料，Vol.41，No.9，pp32-37，1999

（森田，落，北村）

3.11　水系における病原性微生物の挙動に関する研究

研究期間：平１０～平１３
担　　当：三次処理研究室

【要　旨】
上水道取水源上流域での下水道普及の進展や国民の水辺回復要求の高まり、水の循環・再生利用の必要性増大等の現状を受けて、水系の衛生学的基準のあり方について再検討する必要が高まってきている。しかし、放流先水系での病原性微生物の挙動についてはいまだ不明な部分が多い。本研究は、このような衛生学的基準についての判断資料とすべく、消毒方法や水系状況の相違に伴う下水処理水中の病原性微生物の水系での挙動について調査を行うものである。11年度は消毒レベルと細菌再増殖の関係や接触酸化水路における指標細菌の挙動について検討を行った。



1．研究方法

1．1　塩素処理レベルと細菌再増殖の関係

大腸菌および大腸菌群を指標とした塩素消毒実験により、損傷菌の存在および塩素処理レベルと細菌再増殖の関係を把握することを目的として実験を行った。

（1）指標細菌および測定方法の検討

細菌の測定方法としては、通常、培養法が用いられる場合が多いが、本来培養可能な細菌が、飢餓条件や塩ストレスなどにより、生きているが培養できない（Viable but nonculturable、VBNC）状態になる現象が、コレラ菌や大腸菌O157などの病原菌においても認められている[1)]。そこで、VBNC状態の細菌測定の一方法として検討されているDVC（direct viable count）法の適用を検討した。

指標細菌としては、現行基準および下水中での存在量を勘案し大腸菌群を候補とし、以下の５つの保存株を比較した。①*Escherichia coli*(JCM 1649)、②*Enterobacter cloacae*(JCM 1232)、③*Klebsiella pneumonia*(JCM 3317)、④*Citrobacter freundii*(JCM 12681)、⑤*Enterobacter aerogenes*(YIT 6042)。

なお、DVC法は上水試験方法における全細菌および生菌の測定方法を基本としたが、菌の伸長性に問題があったため、以下の通りとした。

1）全細菌の測定方法

試料に20%グルタルアルデヒド（和光純薬製）および10倍濃度リン酸緩衝液を試料の各10%量を添加し、4℃で1時間以上固定。固定後、蛍光染色剤のDAPI(4'、6-diamidino-2-phenylindole)により染色、蛍光顕微鏡下で観察、計数した。

2）生菌の測定方法

試料に0.2%ナリジキシン酸(NA、 sigma社製)液を1%および2倍濃度TSBを1%添加し20℃で20時間培養後、全菌数と同様に固定後蛍光染色、蛍光顕微鏡下で観察し、肥大または伸長した細胞数を計数した。

本法は、DNA合成阻害剤であるナリジキシン酸を栄養基質とともに加えることにより、細胞分裂は阻害されるがタンパク質合成は生じるため肥大・伸長する細胞数を死菌とは区別して測定するものである。

（2）塩素処理レベルと細菌再増殖の関係

生理食塩水および人工下水に①*E.coli*(JCM1649)を添加、所定量の次亜塩素酸ナトリウムを注入し15分間攪拌を行った後、残留塩素をチオ硫酸ナトリウムで中和処理した。塩素処理した試料を20℃で静置保存し、経時的に大腸菌数の測定を行った。

実験に用いた人工下水は土木研究所資料[2)]を参考とし、二次処理水程度のBOD濃度となるように、デキストリン2.3mg、牛肉エキス4.9mg、酵母エキス5.6mg、ペプトン0.9mg、NaCl0.5mg、$MgSO_4$0.3mg、KH_2PO_4 1.4mg、

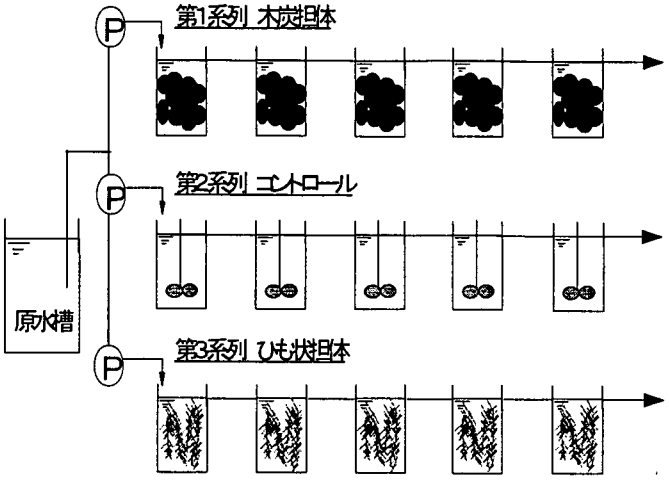
KCl 1.0mg を 1L の精製水に溶解し 121℃·15 分高圧蒸気滅菌した。なお、滅菌後の人工下水は TOC 7.4mg/L、BOD 7.6mg/L であった。

1．2　接触酸化水路における細菌の挙動

接触酸化水路による汚濁物の除去機構は、汚濁物の下水中から生物膜への移動と生物膜への吸着、そして生物膜微生物による分解・消費から成り立っており、BOD、SS の高い除去が期待できる。また、大腸菌群も高い除去率を示すという報告がある [3]。しかしながら、その実態についてはほとんど解明されていない。そこで、接触酸化水路内に流入した細菌がその後生物膜に対してどのような挙動を示すのかを明らかにすることを目的として実験を行った。

（1）実験装置の概要

実験は、A下水処理場内に設置した接触酸化方式の水路を用いて行った。水路は 3.14L の円筒状の槽を 6 槽をつなげたものを 3 系列有し、3 系列のうち 2 系列にそれぞれ異なった接触担体を投入した（系 1：木炭担体、系 3：ひも状担体）。残りの一系列（系 2）はコントロールとして、接触担体のない状態とした。原水は、同下水処理場内に設置されている硝化促進型の活性汚泥処理プラントの二次処理水を用いた。なお、原水の細菌数は、大腸菌 5.1×10CFU/mL、大腸菌群 3.7×10^3CFU/mL、一般細菌 5.1×10^3CFU/mL であった。実験水路概略図を図－1、接触担体の概要を表－1に示す。



図－1　接触酸化水路実験装置フロー

表－1　接触担体の概要

接触担体種	大きさ
木炭担体	粒径 約10～20mm
ひも状担体	直径 45mm

処理流量は、担体を充填していない状態において SS の沈降が少ないとともに、一般的な接触酸化方式の流速（0.01～0.05m/sec 程度）を考慮して、0.05m/sec（300mL/min）とした。測定項目は、細菌指標として大腸菌群、大腸菌および一般細菌を測定し、一般水質項目として水温、pH、ORP、DO、DOC、SS、各態窒素およびりんを測定した。

（2）水路内堆積物の定量

約 2 ヶ月間の通水実験において堆積した生物膜と沈殿物について、細菌数および生物膜量の定量を行った。なお、堆積物中の細菌測定は、超音波による前処理を行った。また、生物膜と沈殿物の区別は、接触担体を水路内で軽く揺すりながら取り出した時に、接触担体上に残ったものを生物膜、水中に残ったものを全て沈殿物とした。

2．研究結果

2．1　塩素処理レベルと細菌再増殖の関係

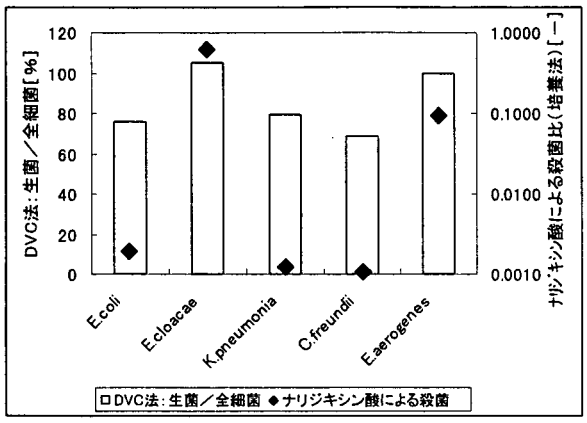
（1）ナリジキシン酸の試験菌への影響

図－2 はナリジキシン酸培養後の生菌数／全細菌の割合とナリジキシン酸培養による殺菌率を示す。*E.coli* と *K.pneumonia*、*C.freundii* に対しては殺菌性が高く、次いで *E.aerogenes*、*E.cloacae* の順で殺菌性が弱くなった。図－3 はナリジキシン酸培養前後の平均菌体面積と標準偏差（サンプル数 100～200）を示すものである。ナリジキシン酸培養前後での菌体の伸長は、*E.coli* が最も伸長し、非伸長菌体との識別が容易であった。その他の試験菌株は菌体の伸長が悪く、伸長菌体と非伸長菌体の識別が難しかった。ナリジキシン酸処理しない菌体の面積の標準偏差は小さくどの菌体もほぼ同じ面積であったが、ナリジキシン酸処理後の菌体面積の標準偏差は大きく、感受性が高い菌種ほど標準偏差が大きくなる傾向が見られ、ナリジキシン酸感受性が細菌種や細胞により異なることが示唆された。

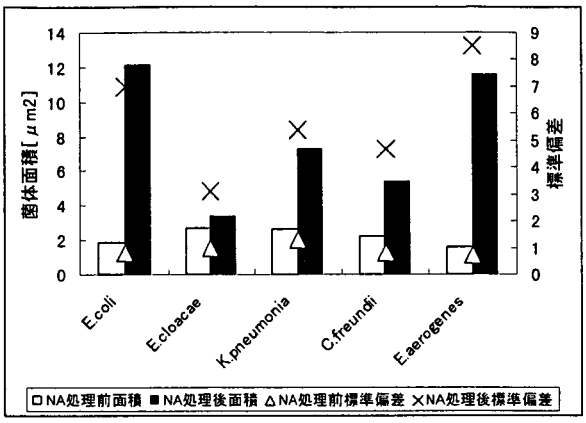
E.coli、*K.pneumonia* のように試験菌がナリジキシン酸に感受性で殺菌的に作用すればナリジキシン酸培養後

のコロニー数が減少し、伸長した細胞が DVC 法で生菌数として計数され、ナリジキシン酸感受性細胞と非感受性細胞の判別が容易であった。しかしながら、*E.cloacae* のようにナリジキシン酸が静菌的に作用する場合はナリジキシン酸培養後のコロニー数の減少は見られず、ナリジキシン酸による細胞の伸長も顕著でなく、細胞の大きさではナリジキシン酸感受性細胞と非感受性細胞の判別が困難であった。*E.aerogenes* はコロニー数で比較するとナリジキシン酸培養後のコロニー数が 9.3%の減少に留まっていたが、DVC 法の生菌の菌体面積は *E.coli* に次いで大きかった。このことから *E.aerogenes* は試験した他の細菌株より細胞毎のナリジキシン酸感受性の差が大きいことが示唆された。

以上の理由により塩素消毒作用試験には *E.coli*（以下、大腸菌）を供試することとした。



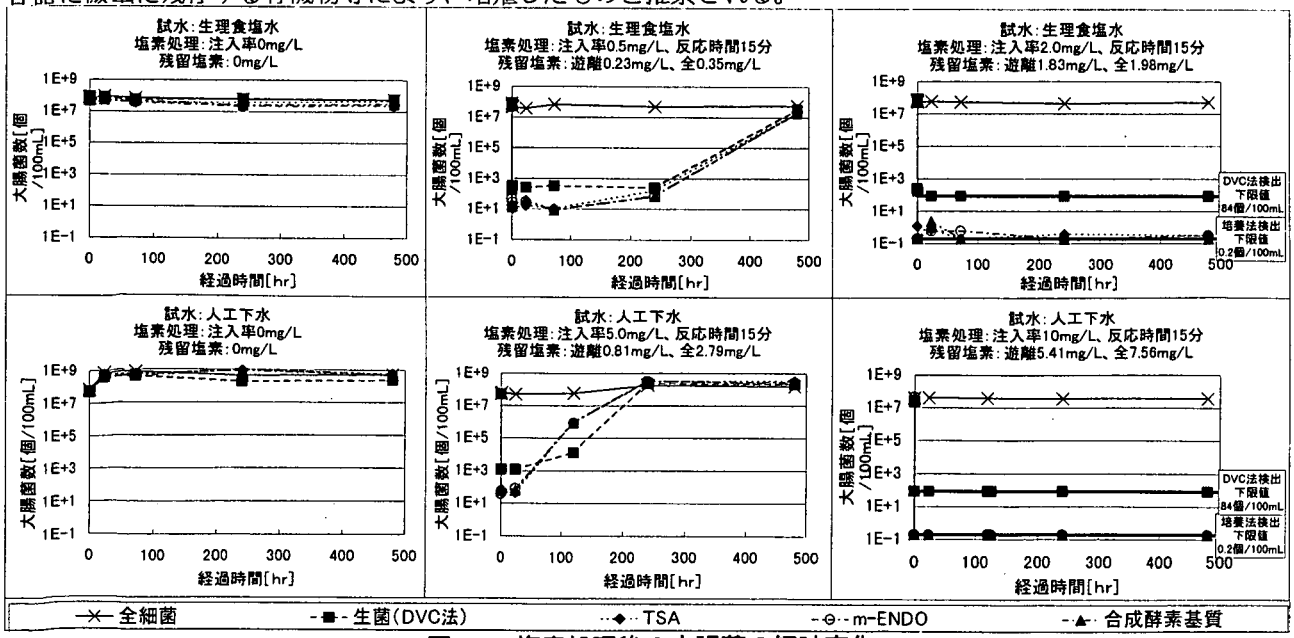
図－2　ナリジキシン酸の殺菌性



図－3 ナリジキシン酸処理による菌体面積の変化

図－4 は大腸菌を添加した生理食塩水および人工下水の塩素処理後の大腸菌濃度の経時変化を示す。

塩素処理を行わない場合は、菌数はほとんど変化なく添加濃度である 10^7 個/100mL 程度の濃度を維持した。塩素処理を行った場合、高い塩素注入率での大腸菌は、消毒後 数個/100mL（生残比-6log 以上）となり、塩素中和後 480 時間での生菌数の増加はみられなかった。一方、低い塩素注入率では消毒後の大腸菌が数十個/100mL（生残比-4log 程度）となり、塩素中和後は時間経過とともに生菌数が増加し 480 時間後には塩素処理前の添加菌数と同等である 10^7 個/100mL となった。また、生菌数が増加するまでに要する時間は、生理食塩水で 200 時間程度、人工下水で 100 時間程度であった。本結果は、塩素処理後の細菌であっても残留塩素が存在しない状況にあれば増加しうることを示し、特に栄養源となる物質が残存する場合は、増加しやすいことを示している。また、本来であれば生理食塩水には有機物等が含まれないため菌数が増加するとは考えられないが、精製水や実験容器に微量に残存する有機物等により、増殖したものと推察される。



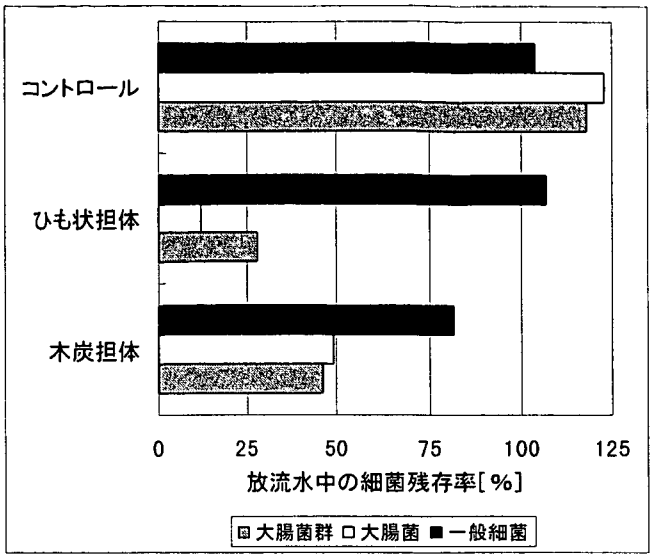
図－4　塩素処理後の大腸菌の経時変化

2．2　接触酸化水路における細菌の挙動

（1）接触担体による細菌の除去効率の違い

水路に新しい担体を投入した直後は、水路内での細菌の増減がほとんど見られなかったため、接触担体が新しく生物膜が全く生息していない状態では、接触担体による細菌の吸着や捕捉作用は無視しうるものと考えられる。

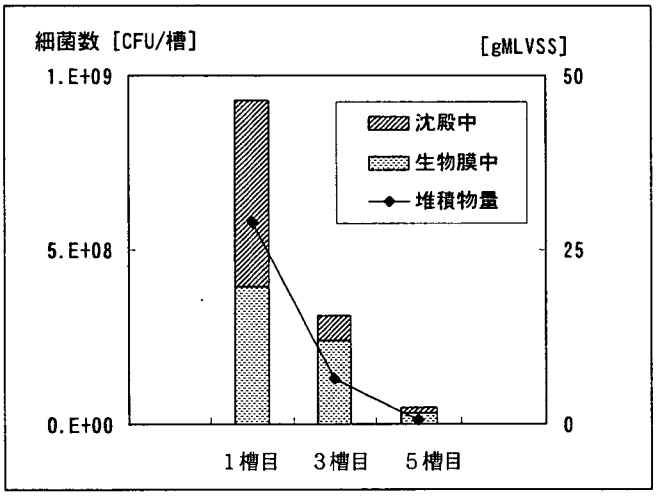
処理時間の経過により、接触担体を入れた水路では細菌が水中から効率よく除去されるようになった。その除去率は、約 60～90％であった。また、この細菌の除去効果は、ひも状担体＞木炭担体≫コントロールの順であった（図－5）。大腸菌と大腸菌群の除去率を比較すると大腸菌の方がやや高いものの顕著な差は認められなかった。



図－5　接触担体による細菌の除去効果の違い

（2）水路内堆積物中の細菌濃度

2 ヶ月の処理の後、ひも状担体系列において、水路内の水、生物膜、沈殿物中の細菌濃度をそれぞれ比較した結果（図－6）、生物膜や沈殿物中には、高濃度の細菌が生息していた。特に、負荷の高い第 1 槽目においては、堆積物が多いこともあり、10^9CFU/槽の大腸菌が検出された。



図－6　水路内での細菌分布状況

（3）接触酸化水路での細菌の除去能力

実験結果より、生物膜や沈殿中には高濃度で細菌が生息していたため、水路における細菌類の収支について検討した。流入水と処理水の細菌数の差より、2 ヶ月間に水路内で除去された細菌数を求め、これを、実際の堆積量と比較した。その結果、2 ヶ月間で水路内で除去された大腸菌のうち 99.72％、大腸菌群数においては 99.07%が不活化されていたことが分かった。

3．主な研究成果物

① 土木研究所資料　下水道関係調査研究年次報告書集（平成 11 年度）

② 岡田香子　他、水路自然浄化施設における病原性微生物除去機構の検討、第 34 回日本水環境学会年会講演集、p.376、2000/3

【参考文献】

1）生きてはいるが培養できない病原細菌に挑む、月刊科学、Vol.69、No.6、pp508-516、1999/6

2）生物学的硝化脱窒処理による窒素の除去、土木研究所資料、第 1664 号、1981

3）矢野洋一郎、自浄作用を応用した河川の浄化、用水と排水、Vol.24、No.1、pp13-24、1982

（鈴木、小越、諏訪、畑津）

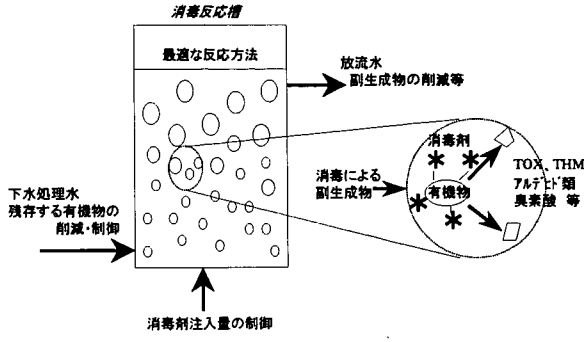
3.12　下水処理水の安全性向上に関する研究

研究期間：平　8～平１１
担　　当：三次処理研究室

【要　旨】

下水道の普及に伴い環境水中に占める下水処理水の割合は増加しており、また、都市域における水資源として下水処理水が再利用されるなど、下水処理水に求められる安全性のレベルは高まっている。しかし、消毒を強化した場合の塩素消毒によるトリハロメタン等の副生成物の問題や新しい塩素代替消毒技術の安全性などは十分に検討されていない。

そこで本研究では、下水処理において現在導入されている、塩素、オゾンおよび紫外線消毒の安全性について消毒副生成物の観点から検討を加え、より安全性の高い消毒方法の検討を行うことを目的としている。



消毒による副生成物の制御（例）

11 年度は、連続実験装置による実証実験、残留薬剤・消毒副生成物の残留性把握および除去方法の検討を行った。

１．研究方法

（１）連続実験

連続実験は、A下水処理場内に設置したパイロット実験装置を用いて行った。消毒実験装置フローを図－1 に示す。

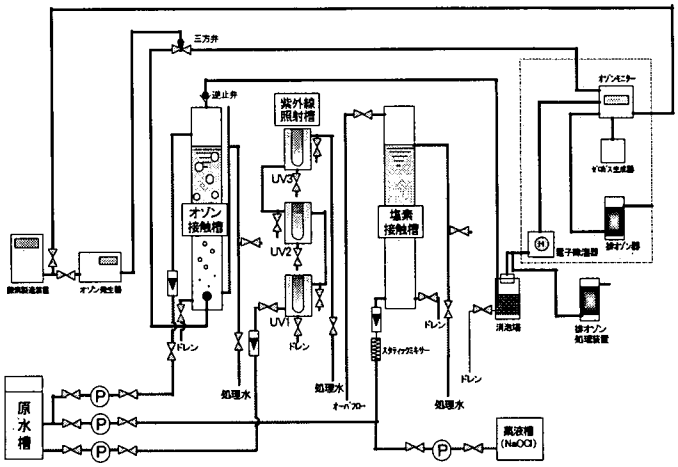
塩素消毒は、消毒剤として次亜塩素酸ナトリウム溶液（約 1000mg-Cl/L）を用い、所定量の次亜塩素酸ナトリウムを原水流入配管の途中に注入し、スタティックミキサーにより原水と混和したのち反応塔へ流入させる方式とした。反応塔における滞留時間は 15 分間で一定とした。

オゾン消毒は、PSA 酸素濃縮器を用いたオゾン発生装置によりオゾンを発生させ、水深 4m の反応塔（有効容量 45L）において、下向流の原水と散気管より流入するオゾンとを対向流で接触させる方式とした。接触時間は 15 分間で一定とし、オゾン注入率は供給オゾン濃度を変えることにより設定した。

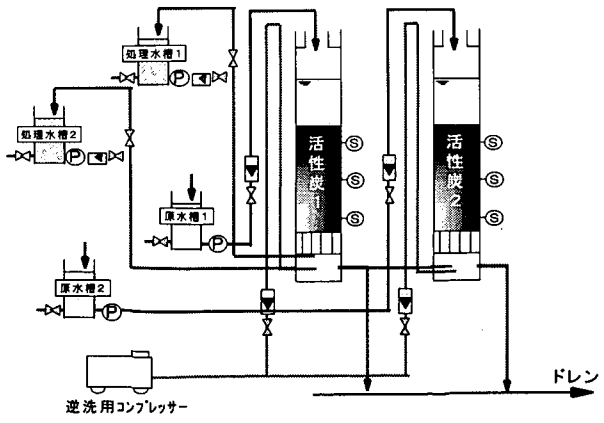
紫外線消毒では、16W低圧水銀ランプを3本設置し、水量および使用ランプ数により紫外線暴露時間を調整した。紫外線照射量は処理水の紫外線（254nm）透過率の測定値により算出した。

なお、塩素およびオゾン処理した試料は、採取時にチオ硫酸ナトリウムを添加して残留塩素を還元したものを分析試料とした。

活性炭ろ過実験装置の処理フローを図－2に示す。



図－1　連続実験装置フロー（消毒）



図－２　連続実験装置フロー（活性炭ろ過）

活性炭ろ過実験装置は、原水槽、活性炭ろ過塔（透明塩化ビニル製　φ150×3000mm）、原水供給ポンプ、逆洗ポンプ、空洗用ブロアーおよび処理水槽から構成されており、ろ過方式は重力式下向流である。活性炭はツルミコール製GL-30S（石炭系破砕炭、10～32mesh、充填高1000m）を用いた。原水は、第1系列：塩素処理水、第2系列：オゾン処理水を流入させた。運転条件は、処理水量2L/分,ろ過速度170m/日,接触時間8.5分,空塔速度$7h^{-1}$とした。

（2）回分実験

回分実験は前年と同様の方法[1]で実施した。塩素消毒については2Lビーカー、オゾン消毒については土木研究所内に設置したオゾン小型実験装置を用いて行った。

（3）実験原水

実験に使用した原水水質を表－1に示す。

実験原水はA下水処理場三次処理水（砂ろ過水）やA下水処理場内に設置されている活性汚泥処理実験プラントの二次処理水を用いた。また、回分実験においては、二次処理水にアンモニア水、海水および流入下水を添加したものも原水に用いた。二次処理水中における消毒副生成物は、TOX（平均値43μg/L）、THM（平均値1.0μg/L）、アルデヒド類（平均値35μg/L）が検出された。アルデヒド類は10種の測定項目の内、ホルムアルデヒド、アセトアルデヒド、プロピオンアルデヒド、ブチルアルデヒド、吉草酸アルデヒドが検出され、検出率はアルキル基が多くなるにしたがって低下した。また、臭化物イオンは0.1～0.2mg/L程度含まれるが、臭素酸イオンは検出されなかった。

表－1　実験原水の水質

	pH	SS	ｱﾙｶﾘ度	全窒素	ｱﾝﾓﾆｱ性窒素	亜硝酸性窒素	硝酸性窒素	CODcr	TOC	TOX	THM	ｱﾙﾃﾞﾋﾄﾞ類
		[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[μg/L]	[μg/L]	[μg/L]
二次処理水	7.3	6.1	69	12.3	1.94	0.32	6.8	26.7	7.3	43	1.01	35
三次処理水	6.5	0.3	60	9.8	0.28	0.04	8.5	10.8	5.1	40	1.97	25

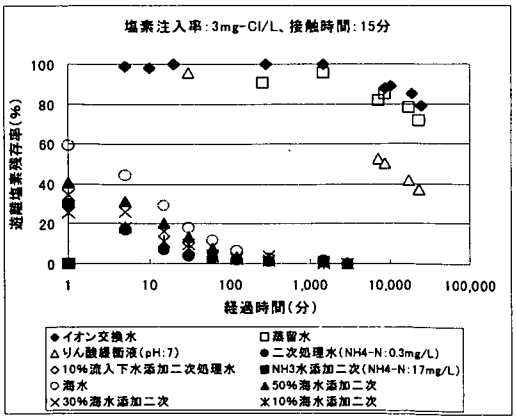
2．研究結果

2．1　残留消毒剤の挙動

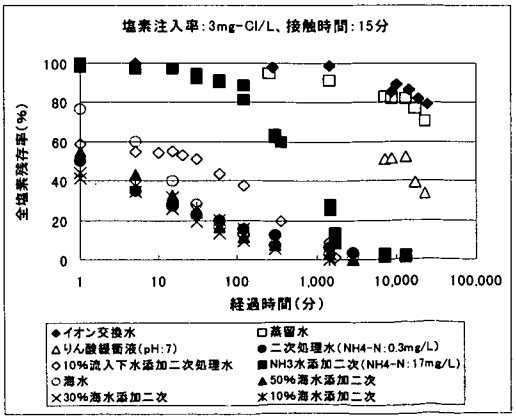
（1）塩素

図－3、4は数種類の試料に対し、塩素注入率3mgCl/L、接触時間15分後の残留塩素残存率の経時変化を示すものである。

イオン交換水や蒸留水のように物質を殆ど含まない場合、塩素の多くは遊離塩素として残存し、また、10,000時間（1週間）を経過しても80%程度の塩素が残存する。一方、二次処理水の場合は、蒸留水等に比較して還元性物質を多く含むため、接触時間15分で50%の塩素が消費され、残存する塩素の内5割程度が遊離塩素であった。また、塩素の減少速度は、蒸留水等に比較して早く、遊離塩素：90分、全塩素：1440分（24時間）で検出下限値以下となった。



図－3　遊離塩素残存率の経時変化



図－4 全塩素残存率の経時変化

アンモニア水添加二次処理水のようにアンモニア性窒素が多く含まれる場合は、塩素は結合塩素となり、初期の塩素消費が少なく塩素の減少速度が遅くなり、7200 時間（5 日）経過後においても 0.1mg/L 程度の塩素が検出された。同様に流入下水が含まれる場合も、消費されなかった塩素の殆どが結合塩素として残存し、7200 時間後まで塩素が検出された。また、海水が含まれる場合は、海水混入の割合により塩素消費量が異なるが、二次処理水における塩素の減少速度とは大差がなかった。

表－2　各水質における塩素残存率の違い

	イオン交換水		蒸留水		りん酸緩衝液（pH：7）		二次処理水（NH_4-N：0.3mg/L）		10%流入下水添加二次処理水		NH3水添加（NH_4-N：17mg/L）		海水		50%海水添加二次		30%海水添加二次		10%海水添加二次	
	遊離	全	遊離	全	遊離	全	遊離	全	遊離	全	遊離	全	遊離	全	遊離	全	遊離	全	遊離	全
注入率［mg-Cl/L］	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
15分後残留塩素濃度［mg-Cl/L］	2.94	2.96	2.82	2.84	2.63	2.66	0.90	1.50	ND	1.76	ND	2.74	1.78	2.30	1.22	1.64	1.04	1.24	0.77	1.32
残存率［%］	98	99	94	95	88	89	30	50		59		91	59	77	41	55	35	41	26	44

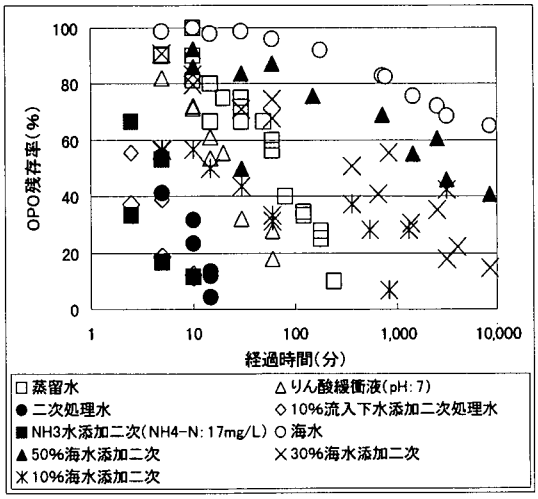
（2）オゾン

オゾンは下水処理水中の物質との反応で大部分が消費され、残りも自己分解するために、残留性はほとんどないとされている。しかし、残留オゾンやオキシダント（Ozone Produced Oxidant：以下 OPO）の毒性は認められている。[2)]

各オゾン処理水中の残留オキシダント濃度の経時変化を図－5 に示す。

残留オゾンは時間経過とともに減衰するが、その減衰速度は水質により大きく異なった。

蒸留水は、オゾンと反応する物質を多く含まないため、残留酸化物質の大部分はオゾンであった。また、蒸留水中の OPO 半減期は 74 分であった。次いでリン酸緩衝液は 30 分程度で OPO 濃度が半減した。これは、pH が高いことや水中に溶解する物質が多いことにより半減期が早くなったものと考えられる。



図－5　残留オキシダント残存率の経時変化

二次処理水では、蒸留水に比較して OPO 減衰速度が大きく数十分の内に検出されなくなった。さらに還元物質を多く含むと考えられる流入下水やアンモニアを添加した二次処理水での OPO は速く減衰した。また、海水を含む場合は、オゾン吸収率およびオゾン消費率が高くなるとともに、オゾンはほとんど残留しなかった。一方、OPO は蒸留水や下水処理水においては 1～3mg-O_3/L であったが、海水が含まれる場合は海水添加量が増加するにしたがい、OPO が多くなり OPO 中のオゾンの割合が減少した。また、OPO の減衰速度は他の供試水に比較して小さくなり、長期にわたり残留することが明らかになった。

通常の下水処理水のオゾン処理において、オゾンは下水処理水中の物質との反応で大部分が消費され、残りも自己分解するために、残留性はほとんどないと考えられるが、海水が含まれる場合は、海水中の臭化物イオンがオゾンによって酸化されて、酸化力を持ちヨウ素滴定法により検出される次亜臭素酸、次亜臭素酸イオン等が生成される。そして、これらの酸化性の物質は比較的安定であり、長期間にわたり残留するものと考えられる。

2.2　消毒剤および消毒副生成物の除去

（1）チオ硫酸ナトリウムによる脱塩素

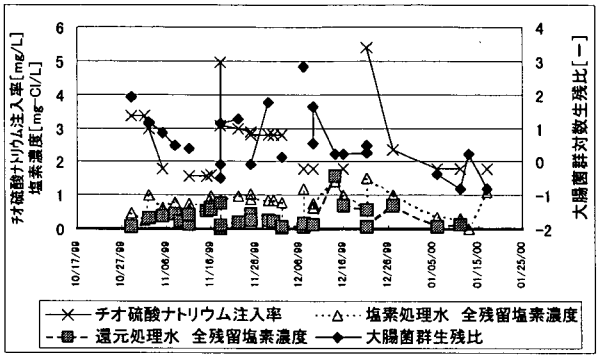
図－6 は、三次処理水（砂ろ過水）を塩素消毒処理水したものについて、チオ硫酸ナトリウムを用いて還元処理した時の塩素濃度の変動を示すものである。塩素剤の還元剤には、チオ硫酸ナトリウム五水和物を水道水に溶解して用

いた。なお、本実験に用いた水道水の塩素濃度は遊離塩素濃度 0.2～0.3mgCl/L、全塩素濃度 0.4～0.5mgCl/L であった。

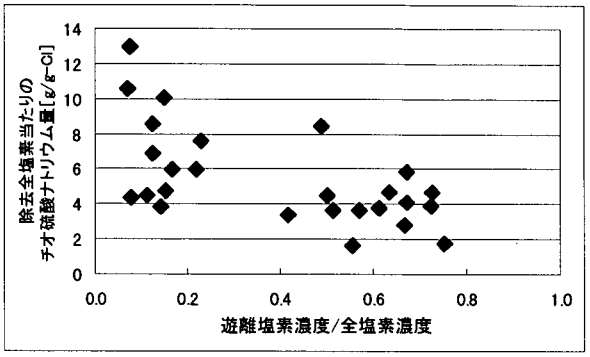
流入する塩素処理水の遊離残留塩素濃度は0.01～0.9mgCl/L(平均0.3mgCl/L)、全残留塩素濃度は0.1～1.5mgCl/L（平均 0.7mgCl/L）であり、チオ硫酸ナトリウムを 1.5～3.0mg/L 程度注入した場合、遊離残留塩素濃度は ND～0.3mgCl/L、全残留塩素濃度はND～1.6mg Cl/L であった。除去率は平均値で遊離塩素 62%、全塩素 51%であり、結合塩素は中和されにくと考えられた。大腸菌群数は 3.3×10^{-1}～8.0×10^{2} CFU/100ml（平均 5.6×10^{1}CFU/100ml）であり、塩素処理水に対する対数生残比は－0.5～2.8 の範囲で変動し、塩素を中和処理することで大腸菌群が増加することが明かとなった。なお、大腸菌においても同様の挙動を示した。

図－7 は上記連続実験における除去塩素量当たりのチオ硫酸ナトリウム量を、原水（塩素処理水）の遊離塩素濃度／全塩素濃度で比較したものである。

遊離塩素濃度／全塩素濃度の割合が高まるにしたがって必要なチオ硫酸ナトリウムは少なくなり、結合塩素の割合が高まるにしたがって、塩素の還元に必要なチオ硫酸ナトリウム量が多くなる結果となった。



図－6 塩素－還元処理における塩素および大腸菌群の変動



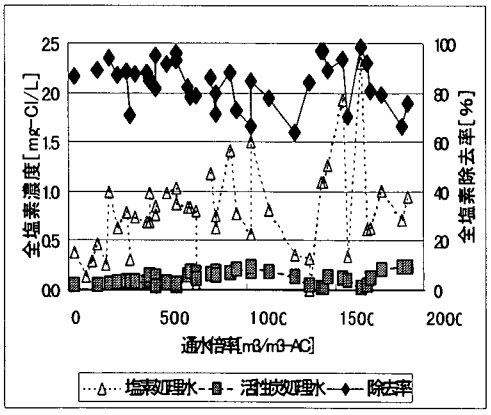
図－7 塩素形態によるチオ硫酸ナトリウム量の変化

（2）消毒処理水の活性炭ろ過

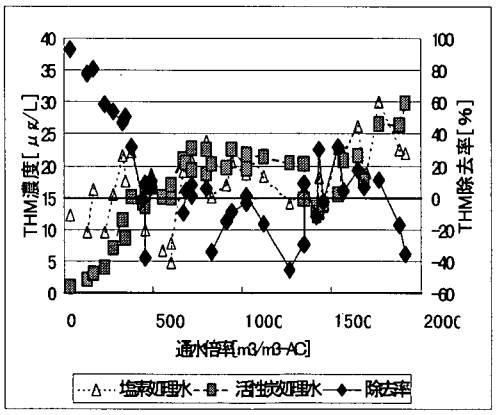
1）塩素処理＋活性炭ろ過

三次処理水（砂ろ過水）の塩素消毒処理水を活性炭ろ過した時の塩素濃度、消毒副生成物および大腸菌群の変動を図－8～11に示す。

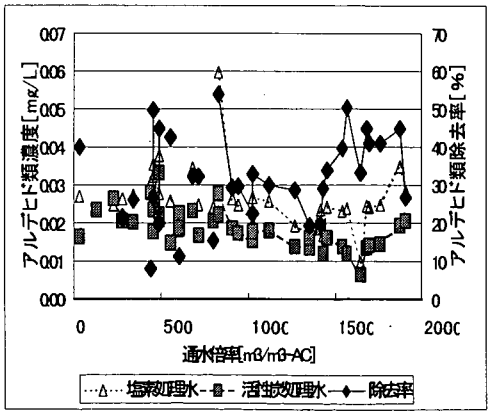
流入する塩素処理水の遊離残留塩素濃度は 0.02～1.55mg-Cl/L（平均 0.33mg-Cl/L）、全残留塩素濃度は 0.06～2.3mg-Cl/L（平均 0.7mg-Cl/L）であり、活性炭ろ過により遊離残留塩素濃度は ND～0.14mg-Cl/L（平均除去率 84%）、全残留塩素濃度は 0.03～0.46mg-Cl/L（平均除去率 82%）となり、活性炭ろ過での高い除去性能が認められた。ただし、



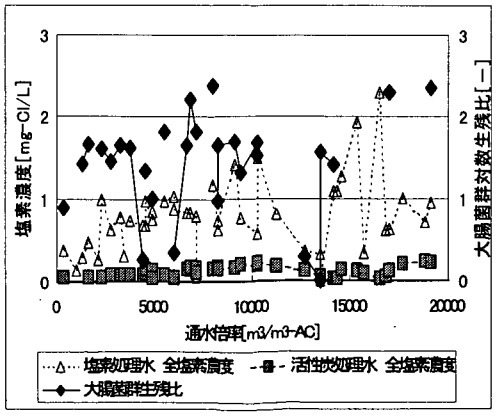
図－8 全塩素の変動



図－9 THM の変動



図－10 アルデヒド類の変動



図－11 大腸菌群生残比の変動

活性炭ろ過での高い除去性能が認められた。ただし、通水倍率の増加とともに若干除去率が低下する傾向があった。消毒副生成物に関しては、THM、アルデヒド類ともに、活性炭ろ過により減少した。しかし、THM については、通水倍率の増加とともに除去率が低くなり通水倍率 50 から 5000m^3/m^3-AC において除去率が 93%から 10%に低下した。

大腸菌群数は塩素処理水 0.3×10^0～1.9×10^2CFU/100ml（平均 2.2×10^0CFU/100ml）であり、活性炭ろ過により、2.3×10^0～6.2×10^2CFU/100ml（平均 8.1×10^1CFU/100ml）、対数生残比は 0.3～2.4（平均 1.5）となった。三次処理水を塩素注入率 1.5～3.3mg-Cl/L の処理条件により、大腸菌群対数生残比は−4 となったが、活性炭処理後は塩素処理後と比較した生残比は 1.5 となり、活性炭処理過程において大腸菌群が増加していることが明かとなった。また、大腸菌においても同様の挙動を示した。なお、活性炭処理での大腸菌群の増加は、通水初期（通水倍率 300m^3/m^3-AC）より認められた。

2）オゾン処理＋活性炭ろ過

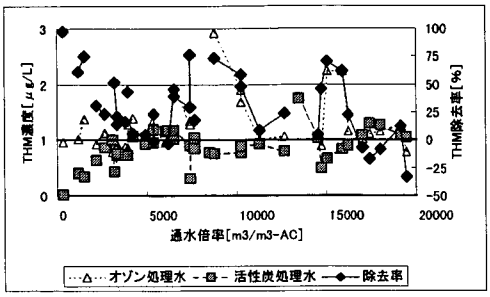
三次処理水（砂ろ過水）のオゾン消毒処理水を活性炭ろ過した時の消毒副生成物および大腸菌群の変動を図−12～15 に示す。

消毒副生成物に関しては、THM、アルデヒド類ともに、活性炭ろ過により減少した。アルデヒド類およびホルムアルデヒドはオゾン処理水 24～99μg/L（平均 63μg/L）、10～58μg/L（平均 32μg/L）であり、活性炭処理により 11～36μg/L（平均 20μg/L）、0.4～4.0μg/L(平均 1.3μg/L)となり、除去率はアルデヒド類 31～82%（平均 66%）、ホルムアルデヒドは 86～99%（平均 95%）と高い除去率を示した。10 年度に行った活性炭吸着実験では、活性炭でのアルデヒド類除去はアルキル基の少ないホルムアルデヒドでは期待できなかったが、本実験では高い除去率を得ることができた。一般に、ホルムアルデヒドは生物分解されやすいとされており、本結果は、活性炭表面に生成した生物膜により、ホルムアルデヒドが分解されたものであり、同効果は吸着能力を有しない担体でも期待できるものと考えられる。

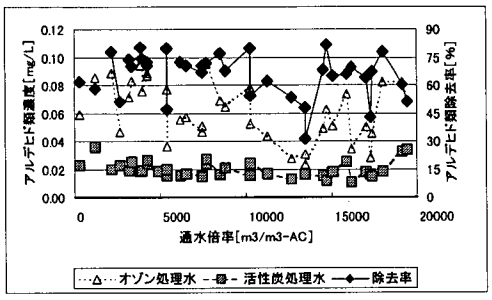
大腸菌群数はオゾン処理水 ND～4.9×10^1CFU/100ml（平均 8.0×10^0CFU/100ml）であり、活性炭ろ過により、1.0×10^0～1.3×10^2CFU/100ml（平均 3.9×10^1CFU/100ml）、対数生残比は−0.04～1.7（平均 0.8）となった。三次処理水をオゾン注入率 1.1～4.5mg-O_3/L の処理条件により、大腸菌群対数生残比は-4 となったが、活性炭処理後はオゾン処理と比較した生残比は 0.8 となり、活性炭処理過程において大腸菌群が増加していることが明かとなった。また、大腸菌においても同様の挙動を示した。

3）逆洗による変化

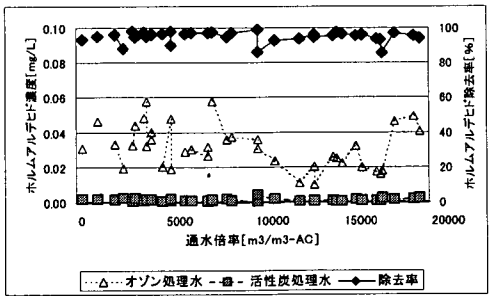
活性炭の逆洗頻度は、通水倍率 13000m^3/m^3-AC 以前は損失水頭の上昇に伴いろ過が困難となった時点で行うこととし、塩素系：約 1000 時間毎、オゾン系：約 600 時間毎で実施した。通水倍率 13000m^3/m^3-AC 以降は、両系：約 170 時間毎に実施した。なお、逆洗方法は、空気洗浄 5 分−水・空気洗浄 10 分とした。逆洗前後での処理性能の変化は、消毒副生成物および大腸菌群ともに明確には見られなかった。



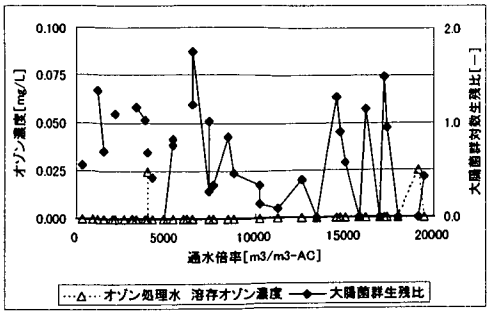
図−12　THM の変動



図−13　アルデヒド類の変動



図−14　ホルムアルデヒドの変動



図−15　大腸菌群生残比の変動

逆洗排水における消毒副生成物および指標細菌数は、大腸菌群が 10^3CFU/ml、大腸菌が 10^1CFU/ml 程度で流出した。逆洗水（活性炭ろ過水）の大腸菌群は数 CFU/ml 以下であるので、活性炭上に付着していた細菌が逆洗により剥離、流出したものと考えられ、活性炭上での保持・増殖が推察された。消毒副生成物に関しては、THM およびアルデヒド類が排水より検出された。オゾン系での排水中の THM 濃度は 1 μg/L 程度であり、塩素系では 25 μg/L であった。ただし、この濃度はほぼ逆洗水中の THM 濃度と一致しており、逆洗排水中の THM は活性炭に吸着されたものではなく、逆洗水を反映したものと考えられる。一方アルデヒド類は、若干、逆洗水より高濃度で検出された。

3．まとめ

① 残留消毒剤の減衰速度は水質により大きく異なり、塩素はアンモニアの残存により、オゾンは海水の混入により残留性が高くなることがわかった。

② 還元剤による脱塩素は、反応する塩素の形態により必要となる還元剤量が異なり、遊離塩素濃度／全塩素濃度の割合が高まるにしたがって必要な還元剤量が少なく傾向が見られた。

③ 消毒処理水の活性炭ろ過処理により、残留塩素は良好に除去された。THM は活性炭での減少が認められたが、通水倍率の増加による除去率の低下が顕著であった。アルデヒド類は、平成 10 年度の回分実験では、活性炭での吸着が期待できなかったが、活性炭表面に生育する生物膜により高い除去性能を有することがわかった。

④ 塩素消毒やオゾン消毒により大腸菌群対数生残比を-4 とした場合であっても、消毒処理水を活性炭ろ過することにより、大腸菌数や大腸菌群数が 1 桁程度増加することが明かとなった。

4．主な研究成果

畑津十四日,鈴木穣、下水処理水のオゾン消毒におけるオゾンおよび消毒副生成物の残留、第 34 回日本水環境学会年会講演集、p.575、平成 12 年 3 月

【参考文献】

1）建設省土木研究所、平成 10 年度下水道関係調査研究年次報告書集、pp.51-58、平成 11 年 8 月

2）三村元：オゾンの魚類に対する毒性、月刊海洋、Vol.30、No.3、pp.164-170、1998

（鈴木、畑津）

河川・湖沼の整備及び管理における自然との共生技術の開発

4．河川・湖沼の整備及び管理における自然との共生技術の開発

研究期間：平成 10～14 年度
プロジェクトリーダー：生態保全技術研究官
佐合　純造

1. 研究の背景：

近年、国民の自然環境に対する関心が高まっており、生物とのふれあいや自然環境の保全に対する要望が強くなっている。建設省では平成 6 年環境政策大綱を発表し、「環境」を建設行政において内部目的化し、さまざまな公共事業において、自然環境の保全に積極的に取り組んできた。特に、河川事業においては平成 9 年度に河川法を改正し、環境の整備と保全をその目的に位置づけ、自然との共生を目指した河川整備を行うことになった。このような中で、河川・湖沼の整備・管理を積極的に進める上で、生物が生息・生育できる環境を備えた空間を確保でき、自然との共生を図ることが可能な技術が必要とされている。

2. 研究の目的：

本研究は、河川・湖沼における自然との共生を図るため、生物生息状況と環境条件との関係や、河川・湖沼の環境条件の変化機構を把握した上で、①河川において自然環境の保全を計画的に行うための「生物の生息生育に適した河川計画・管理技術」、②河川改修・ダム建設・砂防事業等で人為的影響を受ける河川・湖沼に対して、生態系の保全・創出を図る「河川・湖沼での生物の生息生育空間の保全・創出技術」、③生物の生息生育空間にとって望ましい水量や水質を保つための「水環境の保全・制御技術」、の3種類の技術開発を目的としている。

3. これまでの研究成果：

①生物の生息生育に適した河川計画・管理技術

・新しい河道計画手法確立のため、多摩川において河川敷樹林化の要因である河床変動を予測し、河道内自然形成システムを把握した。さらに、河床変動制御の視点からシステム保全のための手法を整理した。
・河川管理の視点から、平常時の中流域での魚類について、ハビタットを分類整理した。
・自然共生研究センターの実験施設を用い、河川形状及び流量と生物の関係、植物やその形状変化が水理量に及ぼす影響等を明らかにした。

②河川・湖沼での生物の生息生育空間の保全・創出技術

・実用可能な 1)侵食防止シートの開発、2)ポーラスコンクリートの護岸防御工への適用、3)開発された防御工の自然環境保全機能等について調査した。
・山腹・渓流において緑豊かな空間創造をめざして、山腹部における整備手法として「山腹保全工の手引き（案）」を策定した。
・ダム湖の生物生息空間の機能向上をめざして、栃木県東荒川ダム湖での環境整備の効果を調査し、ここでの環境整備手法の有効性を検証した。
・魚の生態に合った魚道構造を設計するため、実験魚道内で魚類の遊泳行動を調査して、魚道の勾配、水深、長さの関係が遊泳行動や遡上率に影響することを定量的に把握した。
・天然河岸の保全工法を確立するため、神奈川県内の河川を対象にして、天然河岸が残る区間の地質・植生・生物種等を把握し、天然河岸形状の実態を分析した。

・千曲川において河川内の水域ネットワークと生物の関わりを調査して、特に出水時の出現する流路がワンド内の物理環境や魚類群集の定着に影響を与えることを明らかにした。

③水環境の保全・制御技術

・変動を加味した正常流量設定のため、自然共生研究センター実験河川において、出水規模と河床付着物の剥離の関係を定量化した。

・人工浮島による自然復元・水質浄化の効果把握のため、霞ヶ浦に人工内湖を設置し、流入する河川からの汚濁の除去及び湖岸生態系の回復を調査した。

・土師ダムにおいて、人工生態礁によるアオコ発生抑制の定量的評価を行った。人工生態礁が動物性プランクトンの捕食効果を高め、また、付着藻類が取り込む栄養塩量が増大することが分かった。

・湿地帯における栄養塩収支の把握と水質浄化能力の評価を行うため、富栄養化した浅い貯水池をモデルにして底泥のリン吸着や溶出機構を明らかにした。

－河川・湖沼の整備及び管理における自然との共生技術の開発－

個別研究課題目次

4.1 水系土砂動態変化に伴う河川の自然形成システムの変質とその再生手法に関する調査……（河川研究室）…134

4.2 河川のハビタットに関する調査……（河川環境研究室）…136

4.3 自然作用を活用した共生型川づくりに関する研究……（河川環境研究室）…140

4.4 新素材・新工法を用いた防御工の開発（総論）……（河川研究室／河川環境研究室／緑化生態研究室／コンクリート研究室）…142

4.4.1 新素材・新工法を用いた防御工の開発（その１）……（河川研究室）…144

4.4.2 新素材・新工法を用いた防御工の開発（その２）……（河川環境研究室）…156

4.4.3 新素材・新工法を用いた防御工の開発（その３）……（河川環境研究室）…158

4.4.4 新素材・新工法を用いた防御工の開発（その４）……（コンクリート研究室）…162

4.4.5 新素材・新工法を用いた防御工の開発（その５）……（緑化生態研究室）…164

4.5 渓畔林を活用した流路整備に関する調査……（砂防研究室）…168

4.6 中小河川における天然河岸の保全手法に関する研究……（河川環境研究室）…172

4.7 ダム湖における生物生息空間の整備技術の開発……（緑化生態研究室）…174

4.8 魚類の生息空間の保全・創出手法の開発……（河川環境研究室）…176

4.9 水域のネットワーク保全手法に関する研究……（河川環境研究室）…184

4.10.1 自然共生実験施設を用いた河川の自然環境の保全に関する基礎調査（その１）・（河川環境研究室）…186

4.10.2 自然共生実験施設を用いた河川の自然環境の保全に関する基礎調査（その２）・（河川環境研究室）…188

4.11 変動を加味した正常流量に関する基礎調査……（河川環境研究室）…190

4.12 浮島による湖沼の自然回復と水質浄化に関する研究……（河川環境研究室）…192

4.13 人工生態礁による富栄養化対策に関する調査……（環境計画研究室）…194

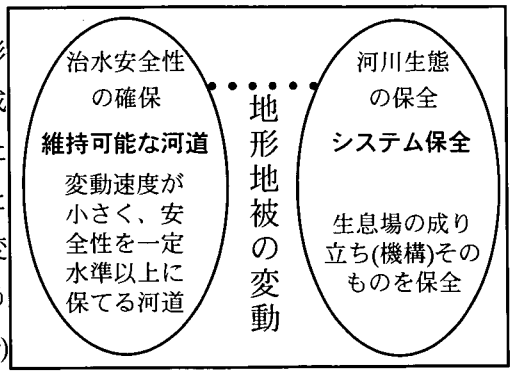
4.14 湿地帯における栄養塩収支の把握と水質浄化能力の評価に関する研究……（環境計画研究室）…196

4.1　水系土砂動態変化に伴う河川の自然形成システムの変質とその再生手法に関する調査

研究期間：平11～平14

担　　当：河川研究室

【要旨】



出水時における河道地形･構成材料の変化と植物群落の形成･遷移との関連が明らかになるのに伴って、河道地形･構成材料の変化がきっかけとなって、河川生態系全体が変質したことがわかってきている。本研究では、変質の直接的原因となった河道地形と地被構成材料の変化を特定するとともに変質のプロセスを明らかにし、その成果に基づき生態系という"システム"を保全するための手法(河道地形･地被予測モデル)と基本構想(流域スケールでの土砂管理、新しい河道計画)を提案する。平成11年度は、近年、礫河原の樹林化が生じた多摩川永田橋地区の事例をとりあげ、樹林化のきっかけとなった河床低下の発生要因と今後の河床変動の動向を予測し、その結果に基づいて河床変動制御の観点からシステム保全のためのキーポイントを整理した。

1．研究目的･方法

李ほか[1]は、多摩川永田橋地区(52～53km区間)の樹林化の要因として、図-1に示すように1)河床の一部が低下して低水路が形成されたこと、2)その結果、もともと礫河原であった場所が高水敷化するとともに、そこに細砂中心の細粒土砂が堆積して地表面に土層を形成したことを明らかにしている。平成11年度は要因1がどのような発生要因･プロセスで生じたかを明らかにするとともに、今後の河床変動の動向を予測することを目的として、既往データの整理と一次元河床変動計算を実施した。また、その結果に基づいて、高水敷化した河道区間において、自然形成･変化"システム"の保全を目的とした河床高復元を行うためのキーポイントを整理した。

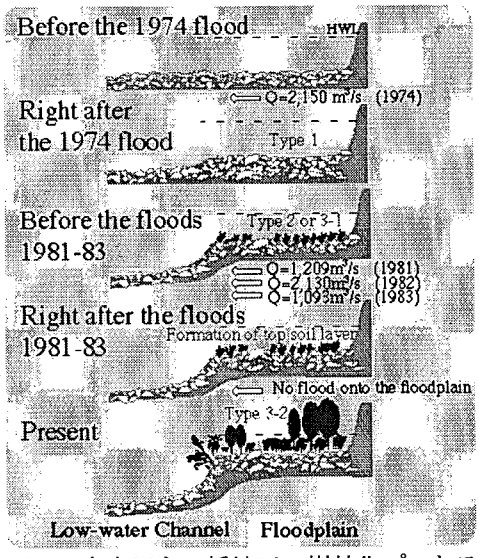


図-1　多摩川永田橋地区の樹林化プロセス

2．研究結果

2.1　永田橋地区における河床低下の発生要因

永田橋地区から上流の河床縦断形の経年変化を図-2に示す。上記した永田橋地区での河床低下と56.2～58.2km区間での河床上昇が顕著な河床変動である。1967年以降は図-2に示した区間で砂利採取が禁止されているため、河床掘削が河床低下の直接の原因ではない。羽村堰下流への土砂供給量が減少したために河床低下したと考えられる。一次元河床変動計算法による河床変動の再現計算結果より、1967年以前に実施した河道掘削によって永田橋地区への土砂供給量が減少し、河床低下が生じたと推定された。

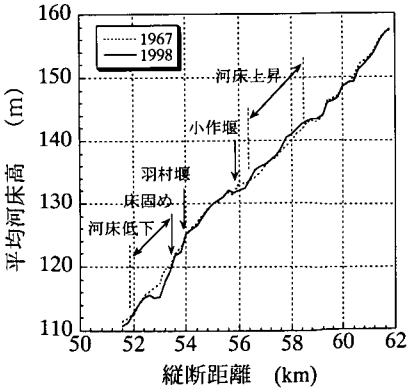


図-2　多摩川の河床縦断形

2.2　河床幅の縮小に伴う河床低下

永田橋地区では、河床低下に伴って低水路が形成された結果(図-1参照)として、川幅が約1/3(250m→80m)に減少した。またその河岸は、洪積年代に属する軟岩で構成されており、難侵食性を有する。したがって、人為的な改変を加えない限りは、長期間にわたって川幅が約1/3になった状態を維持すると考えられる。その場合、河床高は、狭い川幅に対応した新しい動的平衡状態に向かって変化を続ける。動的平衡に達している、またはそれに非常に近い河道では一般に川幅が狭い区間ほど河床勾配が小さくなることが知られている[2]。この変化特性について山本[2]の手法を活用して検討を加えたところ、川幅が縮小した永田橋地区では、河床の緩勾配化のため、動的安定状態に達しても河床低下した状態となる、すなわち図-1に示したように高水敷化した状態を保ち続ける可能性が高いことがわかった。

2.3　河床高復元を行うためのキーポイント

河床高制御の観点から、システム保全手法について検討するためキーポイントを以下に箇条書きする。

◆現状認識

・今後も、河床低下が進行する可能性が高い。

・川幅を増加させなければ河床上昇が生じない、つまり高水敷化した河道形状を是正することができない。

・現時点で河岸に露出している軟岩が、低水路河床にも部分的に露出するようになった。河床の礫層厚さはどれだけか？どのくらいの期間で礫層が失われてしまいそうか？→より詳細な調査が必要

◆基本的な改修方針

・拡幅が必要不可欠

・一回で大きく拡幅するのではなく、複数回に分けて徐々に広げていく(後述する副作用防止のため)

・その場合、下流端から先行的に拡幅するのを基本とする。

・ただし、例外として礫層厚さが薄く、礫層が失われる懸念が高い河道区間では、礫層確保のための対策(例：先行的に拡幅する)を別途、優先的に行う。

◆拡幅量の概略検討(一次元河床変動計算の活用)

・広げすぎると下記の副作用が生じる懸念がある。

1)礫の移動頻度の減少(掃流力の低下)→河床の固定化→拡幅した場所での樹林化

2)永田橋地区より下流の河道区間への土砂供給量の減少→河床低下→樹林化進行

・副作用が顕在化しない程度の拡幅量を一次元河床変動計算によって決める。

◆拡幅量の詳細検討(平面的な流況・河床変動の観点も加えて)

・二次元河床変動計算(場合によって模型実験)を実施して、下記について検討する。

1)一次元河床変動計算結果の検証と概略検討の妥当性の確認(永田橋地区の河床上昇に関して)

2)礫河原が持続的に形成可能な(礫河原が保全できるシステムに改変できる)川幅の検討

例えば、砂州上の礫移動頻度、死水域の有無と河床変動へ与える影響、砂州形態と移動速度など

2)の検討手法については、参考になるものはある(例えば、植物群落の消長モデル[1]、ヨシ群落破壊機構[3])ものの、まだ検討段階である。そのため、経験的な知見も含めて総合的に拡幅幅を設定し、現地に施工するとともにモニタリングを行い、修正を加えるのがよい。

謝辞：本研究の一部は、河川生態学術研究会多摩川グループの調査・研究の一環として実施したものである。横断測量および河床材料調査の成果については、関東地方建設局京浜工事事務所から提供していただいた。また、多摩川の一次元河床変動計算は（財）リバーフロントセンターと共同で実施した。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

1)李　参熙ほか:扇状地礫床河道における安定植生域の形成機構に関する研究，土木研究所資料第3266号，168p.，1999.

2)山本晃一:沖積河川学，山海堂，第4刷，pp.298-299,1997.

3)瀬崎智之・服部　敦ほか:礫州上草本植物の流失機構に関する現地調査と考察，水工学論文集，第44巻，pp.825-830,2000.

(藤田，服部，瀬崎)

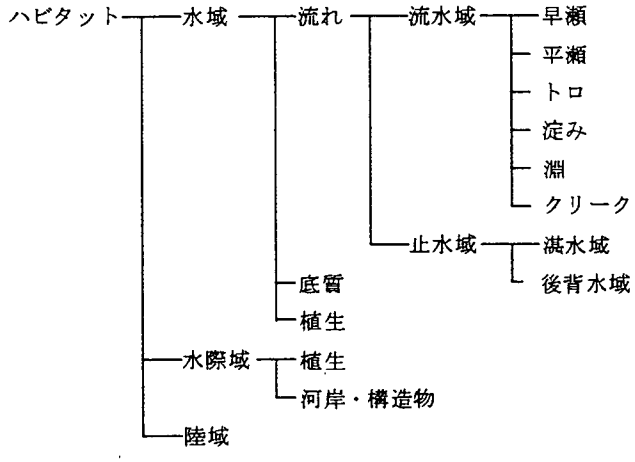
4.2　河川のハビタットに関する調査

研究期間：平７～平14
担当：河川環境研究室

【要旨】
近年ハビタットの語は無機的環境条件を含んだ微地形の単位として示されることが多い。本文でもその定義に沿って河川のハビタットを論ずる。平成 11 年度は、最も一般的な分類として魚類を対象にした河川における平常時のハビタット分類を行い、その分類例を作成した。本作業に当たっては、後述する「既往の分類例」に記した内外の情報を精査し、これらを「流れ」、「植生」、「河床」、「河岸・構造物等」の４つの基本要素と水域と水際域の２つのゾーンを軸に再分類した。

１．分類の方法

河川中流域におけるハビタットは、図－１の様に分類することが出来る。河川中流域は、交互砂州や復列砂州が発生する領域である場合が多い。これらの河床形態が水域～水際域において特徴的なハビタットを形成する。図－１に示すとおり、水域においては、流れ、底質、植生と分類することができる。さらに流れは、流水域と止水域に分類できる。流水域には、平瀬、早瀬、淵、トロ、淀み、クリークがあり、これが次々とつながり川を形成する。川の蛇行点（曲がり角）に淵が存在し、それをつなぐ直線部分は、瀬になっている。そのため、河原が左右交互にあらわれる。水際域においては、植生と河岸・構造物があり、稚魚の生息場やカバーとなっている。



図－１　河川中流域におけるハビタット分類

２．既往の分類例

２．１　流れの分類

水域は大きく流水域と止水域に分類できる。流水域における分類は内外でその事例が多く、古くは可児が早瀬、平瀬、淵の３つの景観単位に分類している。水野は、大きな淵の下流部分に中程度の深さで流れのきわめてゆるい砂泥底の部分を見出し、ここでの底生動物やアユの生息状態が上流部分と明らかに異なるため、この部分を淵から分けてトロと呼んでいる。川那部らは、淵を形態と成因から３つの基本タイプ（M型、R型、S型）に分類し形態や流れ、深さの特徴、分布する位置を述べている。海外では、Hawkins が水域の形態を fast water（速い流れ）と Slow water（遅い流れ）に分類し更に細分して流れの形態を階層化して示した。また、このような分類は Church の文献にも見られる。なお、これらの分類ではM型、R型等流れがある淵は遅い流れに分類されており、単純に流水域では速い流れ、止水域では遅い流れがあると言えない。「速い流れ」では、瀬を Rapid（早瀬）と Riffle（平瀬）に細分するかどうかの違いはあるが、瀬と Glide（トロ）を中下流域のハビタットと挙げているのは共通である。なお、オハイオ州のＥＰＡ（自然保護局）は、魚類に関するハビタットの定量的評価を行うため、ハビタットの関する Quantitative Habitat Evaluation Index（定量的ハビタット評価指標、以下ハビタットインデックス）を作成している。この中では流れを Riffle（早瀬）、

Run（平瀬）、Pool（淵）、Glide（トロ）の４つに分類している。また、分類の観点も水面の波立ちや流速、水深に着目している。Brooker が行った Teifi 川を対象にしたハビタット分類でも流れは、Riffle,Fast Run,Slow Run,Pool の４つに分類されており、流水域の分類には共通点が多い。

止水域の分類は、あまり例がない。日本では川那部らが、ダムの湛水域をＤ型の淵、旧河道で本川とは孤立したものをＯ型の淵としている。海外では、Hawkins が遅い流れの分類の中で Mid-channel pools（急縮部に生じる深み）、Convergence pools（合流点に生じる深み）等を分類している。Ward らは、高水敷（河道内の氾濫原）に見られる止水域の分類を系統的に行っていて参考になる。この分類は、Backwater（通常ワンドやたまりと呼ばれるが、直訳し後背水域としておく。）の分類が詳しく、形態的な特徴と本川との接続頻度という時間的要素も念頭に置き後背水域を３種類に分類している。これは、後背水域のハビタットとしての機能が冠水頻度と密接な関係にあることに起因する。このように、止水域の分類は、それぞれに形態的特徴の差異が見られないため、それぞれの成因や本川との接続頻度等を考慮して分類しているのが特徴である。

２．２　底質及び植生の分類

底質は、付着藻類の生産性を規定するだけでなく、底生動物や底生性の魚類のハビタットとなる。通常粒径と石の状態でハビタットの状態を記述することが多い。日本では可児が石の大きさとはまり具合で底質の状況を記述したのが有名である。竹門らが ベントスの生息条件として、底質の状態に「載り石」を加えている。また、房前らは 50cm × 50cm のコドラートにおいて各粒径が占める面積割合で底質を表現している。海外でも大きさと状態で表現することに大きな差は見られないが、粒径の区分については文献により相違が見られる。また、はまり具合は定量的に測定する手法がないため実地の調査では粒径のみで底質を記述することが多いようである。

植生は、水生生物への食物の供給、産卵場、カバーとしての機能が挙げられている。分類はそれ程多くない。Overhanging vegetation（オーバーハングした植生）、Aquatic macrophytes（大型抽水植物）、Root wad（根茎の塊）、Tree roots（木の根茎）、Grassroots（草の水没している部分）等が分類として見られる程度である。

２．３　河岸・構造物の分類

河岸は植生とともに水生生物にとって水際域を形成する非常に重要なハビタットの基本要素であるが、分類事例は少ない。日本では可児が水際の水面よりの部分を「川岸」としている他はあまり見あたらない。生態学の分野では渓畔林・河畔林の研究が行われているが、これも上流部分を対象とした渓畔林である場合が多い。海外でも形態に基づき河岸を分類した例は少ない。Undercut banks（アンダーカット型河岸、上部が庇状になっている河岸）がカバーとしての機能を有するハビタットとして見られる程度である。

また、川岸に該当するような分類事例も少なく、Brooker や Ward らが分類した Slack（水際の淀み）、オハイオ州の EPA が分類した Shallows（浅瀬）が見られる程度である。構造物に関する調査事例も少ないが、空隙の多い根固工や魚巣ブロック等が良いハビタットとなっている例は多い。今後の研究にもよるが当面ハビタットとして記載すべき例であろう。

以上のことを参考にし、表－１～３にハビタットの分類を示す。分類は水域と水際域についてハビタットの基本要素でもある流れ、河床、植生、河岸・構造物別に示した。また、各分類の形態的特徴、現時点でまとまっている生態的機能の例を付した。なお、ハビタットは４つの基本要素の重ね合わせで表現するが、水際域の植生のように河岸と植生の形態とが一体となり、水際植生や河畔林と呼ばれることがある。

３．主な研究成果

・萱場祐一、島谷幸宏：河川におけるハビタットの概念とその分類、土木技術資料,Vol.41,№７,pp.32-37.、河川環境研究室：河川生態学術研究会多摩川研究グループ論集、2000

表－１　河川中流域におけるハビタットの分類例(1)

水域におけるハビタット分類			形態的特徴	機能的特徴の例
基本的要素	大分類	中分類		
流れ	流水域	早瀬 (rapid,riffle)	水面は白波立ち、水深は小さく、流速が大きい。淵への落ち込み部に生じることが多い。	アユ等遊泳魚の生息、採餌の場となる。
		平瀬 (run)	水面は波立つが白波は立たない。流速も早瀬と比べると小さく、水深は大きい。	オイカワの生息場
		トロ (glide)	水面はほとんど波立たない。流速は平瀬より小さく、水深は大きい。	水深がある場合にはカバーとなる。
		淀み (slack,shallows)	河岸の凹部や砂州の内岸側等に生じる。流速、水深とも小さく、水面は波立たず水面上から河床状況が確認できる。	流速が小さく仔稚魚の生息場や水深が小さいため大型の魚食性魚類からのカバーとしての機能がある。
		淵 (scour pool)	湾曲部の外岸側、砂州の前縁部、構造物周り、床止めの下流等に生じる。生じる場所によりM型、R型、S型の淵等に分類されてきた。一般に水深は大きく、流速は小さい。水面勾配はほとんどなく、水面は波立たない。河川の合流点や川幅縮小部等にも生じる。	魚類の休息の場、水深が大きいためカバーとしての機能がある。
		クリーク (continuously flowing side arm)	高水敷きに見られる川幅数十 cm ～数m程度の細流、ある程度流速があるが水深は小さく、水際は植生帯や河畔林で覆われていることがある。	仔稚魚の生息場、避難場となりやすい
	止水域	湛水域(dammed pool)	堰等の上流や海水面の背水区間、通常流れが遅く、水深が大きい。水面勾配はほとんどない。	カモ類の営巣、採餌の場ボラ等の周縁魚の生息場
		後背水域 (back water)	河道内にある池状の水域で、本川の位況により本川との接続状況が変化する。 海外では以下の示すように本川との接続状況に応じて定性的な分類がされている例が見られる。 ・本川と下流側のみ接続しているもの。(Backwaters connected to main river at downstream only) ・常時本川と接続しておらず洪水の影響を強く受けるもの。(Backwaters without permanent connection to river. Strongly Influenced by flood)、例えば、旧河道(abandoned channels)	濁水流下時や洪水時の避難場、仔稚魚の生息場としての機能がある。 また、このような氾濫原的な環境に依存する魚介類も多い。 例えば、タナゴやタナゴの産卵母貝である二枚貝の生育の場となっている。 本川との接続頻度やワンド内の生態遷移の進み具合により魚類の現存量や生産性が異なる。

表－２　河川中流域におけるハビタットの分類例(2)

水域におけるハビタット分類			形態的特徴	機能的特徴の例
基本的要素	大分類	中分類		
流れ	流水域	後背水域 (backwater)	水面は白波立ち、水深は小さ・本川と常時接続しておらずほとんど洪水の影響を受けないもの。(Backwaters without permanent connection to river. Rarely Influenced by floods)	アユ等遊泳魚の生息、
底質	巨礫、玉石、礫、砂泥等河床材料の粒径と浮き石、沈み石といった状態で分類する。粒径の異なる材料から構成される場合には、各粒径が単位面積に占める割合で表す事がある。また、河床材料とは異なるがここに湧水を底質の中に分類しておく		巨礫は 256mm 以上、256mm ＞玉石＞ 64mm、64mm ＞礫＞ 2mm、砂泥はそれ以上である。また、第４紀沖積世以前の基岩層（岩盤）が露出することがある。玉石以上の大きさは浮き石､沈み石の状態に分類できる。湧水は沈水植物が旺盛に繁茂している場所がある。	魚類の産卵基質として重要。例、マハゼ（泥）、アユ（砂礫）、ヤマメ（礫）、カジカ（浮き石）、玉石や巨礫は魚類のカバー（上位捕食者からの避難場）となる。また、湧水はホトケドジョウ等の重要なハビタットである。
植生	浮葉・沈水植物帯		流れが緩やかで、流量が安定した水域にはコウホネ等の浮葉植物、エビモやヤナギモ等の沈水植物が繁茂することがある。	フナやホトケドジョウ等の産卵基質仔稚魚の生息場 魚類のカバーとなる。
河岸・構造物等			倒木や水中に没した木本類の根茎 空隙の大きい護岸や根固 魚巣ブロック等	魚類のカバーとなりやすい。

表－３　河川中流域におけるハビタットの分類例(3)

水際域におけるハビタット分類		形態的特徴	機能的特徴の例
河岸・構造物	庇状になった河岸(undercut banks)、植生がある場合にはオーバーハングした植生(overhanging vegetation)となる。	河岸の上部が庇状に突き出し、下部がえぐられた形状となっている。セグメントにより構 成材料の粒径は異なる。	魚類のカバーとなりやすい。
	空隙の多い根固、魚巣ブロック等		魚類のカバーとなりやすい。
植生	草地（形態的特徴と一体となって、水際植生、河岸植生等と呼ばれることが多い）	ヤナギダテやクサヨシ等湿性の低茎草地(wet meadow)、ヨシやマコモ等の湿性の高茎草地からなる。冠水頻度や期間により棲み分けている場合が多い。	魚類の産卵場、採餌場、カバー
	樹林地（河岸の特徴と一体となり河畔林、河辺林と呼ばれる）	低木と高木を厳密に区別することは難しいが、樹高２～３mがその目安である。タチヤナギやイヌコリヤナギは代表的な低木林の優占種であり、アカメヤナギ、ハンノキ、エノキは代表的な高木林の優占種である。また、水際に立地するもの。	落下昆虫の供給、日陰の形成、鳥類からのカバー等を形成する。

4.3　自然作用を活用した共生型川づくりに関する研究

研究期間：平１０～平１１
担当：河川環境研究室

【要旨】
中小河川改修における従来型の改修では、河道の直線化等により単調なハビタットを呈することが多く、今後ハビタットの多様性を向上するような復元手法が必要となる。本研究では、この手法を①堆積を促進する手法、②洗掘を促進・維持する手法、③流向・流速を制御する手法、の３つに分類し、これを効率良く組み合わせることで単調化した河川の復元を試みることを目的とした。平成１１年度は自然河岸形成研究ゾーン（自然共生研究センター）で試験的な復元工法の導入を行った。今後、生物相のモニタリングを行い、事前・事後における水理量、生物相の状況を把握する。

１．研究目的

平成２年度より多自然型川づくりが始まりはや１０年の歳月が経過しようとしている。この間技術レベルは年々向上し、河川改修に伴う自然環境への影響は次第に軽減されつつあるようである。しかし、中小河川では直線化や拡幅等過去に行われた従来型の改修により既に自然環境が相当悪化しているケースも多く、今後このような河川でどのように自然環境を復元するかが重要な課題となるだろう。本研究では、このような観点から、堆積、洗掘といった自然作用を利用しながら、中小河川の自然環境を復元する手法について研究を行い、今後の共生型川づくりに資するものである。

２．研究方法

２．１　実験河川を用いた研究

従来型改修による自然環境への具体的なインパクトを把握するため、自然共生研究センター実験河川内にある、自然河岸形成研究ゾーンとハビタット研究ゾーンにおける魚類調査を実施した。自然河岸形成研究ゾーンは平面形状が直線的で、かつ、川幅が広がっている区間であり、蛇行し瀬と淵が設置してあるハビタット研究ゾーンを従来型の方法により改修した状況を模倣したゾーンとなっている。魚類調査は電気ショッカーにより行い、採捕個体の種の同定、体長、湿重量の測定を行い、測定後再度放流した。単位面積当たりの努力量は同一とした。

２．２　ハビタットの復元手法に関する調査

内外の文献から、構造物を用いてハビタットを復元する手法の収集を行った。この際、各工法を３つに分類したハビタットの復元手法から類型化して整理した。３つに分類した手法とは、①堆積を促進する技術、②洗掘を維持・促進する技術、③流向・流速を制御する技術、である。

２．３　実験河川における復元手法の試験的適用

実験河川自然河岸形成研究ゾーンにおいて、２．２で整理した①～③の手法を適用し、復元手法の試験的な施工を試みた。本施工は１１年度末に行ったため、堆積、洗掘の維持等の状況、生物相の回復過程については、１１年度に明らかにすることができなかった。本報告では試みた工法と配置について論じる。

３．研究成果

３．１　改修モデル区間と未改修モデル区間における魚類相の状況

各時期の魚種数と単位面積当たりの湿重量を両区間で整理した。改修前を模した多様な区間では大魚種数が13種類、湿重量が30g/m²に達するのに対し、改修後を模した区間では魚種数が９種類、また湿重量はおよそ3g/m²と非常に低い値となった。

また、この傾向は季節により変わることがなく、１年を通じて単調な区間は多様な区間より低いレベルで推移した。このように改修モデル区間では生物相が単純でかつ生息量が小さい。

表－１　ハビタットの復元手法について

工種	期待されるハビタットの形成機能	概要
水制	流向・流速の制御 洗掘域の維持抑制	河岸から突き出た水制状の構造物で、流向、流速、水深の制御、また、局所洗掘域の形成を促す。この特性を活かして、蛇行流を形成したり、流れを狭くして水深の確保、流速の増加を促すことができる。また、形成される局所洗掘域は岩によるものよりも一般に大きく 淵を効果的に復元することが可能である。目的に応じて水制の設置角度を変える必要がある。
丸太、岩等（単体）	洗掘域の維持・形成	構造物周辺に生じる洗掘現象を利用したものである。洗掘深の大きさは最大で構造物の直径 Dの 2倍と言われるが、水深?粒径比、フルード数、水深?直径比により異なる。特に、水深?粒径比が小さい場合には、河床材料に対する限界掃流力付近で最大洗掘深を与えるのが特徴である。
ベーン工	洗掘域の維持形成 流向・流速の制御	流れに対して20? 30度程度の仰角を持たせて河床から垂直に設置するパネル状の構造物元来湾曲物の洗掘軽減に用いられていた。局所的に流向を変えﾍﾞｰﾝ工周辺に洗掘域を形成することができる。河床付近の流況を制御するため構造物高さは大きい必要がない。また、縦断的に一定の間隔を置いて設置すると洗掘域が縦断的に連続し みお筋の位置を制御することができる。
マウンド及び木杭（群）	堆積域の形成	河岸沿いに設置する人工的な低水敷し マウンド上の流速低減と流水中に浮遊し流下土砂の沈降・堆積を促進する。マウンド上に植物が繁茂する場合にはこの効果が大きい。木杭は群で設置するとマウンド同様流速の低減、土砂の堆積を促進させ、自然河岸の形成を促進する。
早瀬工（クレスト）	流向・流速の制御	河床の縦断方向に設置するクレスト状の構造物、岩や木杭を組み合わせてつくることが多い。上流の水面勾配を低減させ流速の減少と水深の確保、下流では逆に作用し それぞれ、平瀬もしくはとろ、早瀬の形成を促す。

３．２　ハビタットの復元手法について

収集した工法は７種類であった。表－１は各工法の特徴と各工法が３つに分類した手法のどれに該当するかを示している。①堆積を促進する技術、とは出水時に水中を浮遊する微細な土砂を沈降させ、自然河岸を形成する技術である。②洗掘を維持・促進する技術、とは、構造物周辺に洗掘域が生じる特性を利用し、淵を形成する技術である。中小河川においては河川が持つ掃流力に対して河床材料が大きい場合が多く、構造物を設置しても洗掘域の形成が難しい場合がある。この場合には構造物の設置に際して人工的に淵を造成し、細粒土砂による淵の堆積除去を目的とした技術となる。③流向・流速を制御する技術とは、単調で一様な流れに変化を付けるような技術であり、土砂の移動による地形の変化が伴う必要はない。

３．３　実験河川において適用した復元手法について

自然河岸形成研究ゾーンにおいて実施した復元工法の状況を図－１に示す。用いた工法は 1.水制（上向）、2.三角枠工、3.ベーン工、4.丸太工、5.水制工（下向）、6.水制（両岸下向き）7.木杭工（群）、8.マウンド、9.早瀬工、である。1 及び 2 は平水時のみお筋を蛇行させ、7、8 は自然河岸の形成を促すことを目的としている。3～6 は淵の維持のために設置した。ここで、6 は縮流に伴い増加する流速で淵への堆積を抑制する効果を目的として設置した。現在、設置後のハビタットの変化と生物相の変化、そして、出水時の水理量の状況のモニタリングを行っている。

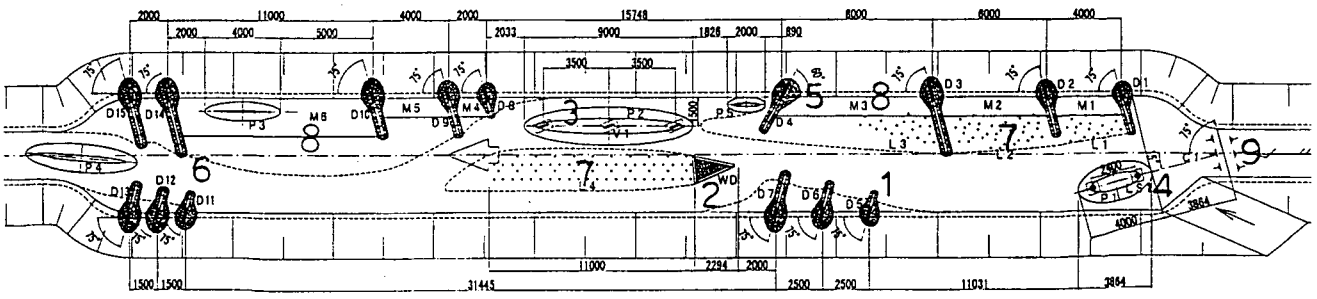


図　1　自然河岸形成研究ゾーンにおける復元工法設置状況

４．主な研究成果物　萱場祐一、つち pp.26-29,No.292、2000.4

（河川環境、萱場）

4.4　新素材・新工法を用いた防御工の開発（総論）

研究期間：　平9～平12
担当：　河川研究室、河川環境研究室、
緑化生態研究室、コンクリート研究室

研究目的：河岸および堤防のり面を侵食・洗掘から守る防御工に対する強い要望として、必要十分な治水機能を持つ一方で、自然環境保全との両立が（ある程度）可能で、しかも施工・維持管理・更新を低コストで行うことのできる工法・素材の開発がある。また、防御工設置を従来以上に計画的に行うことで、より早期かつ効率的な治水効果発現をはかることが求められている。このことは同時に自然河岸を最大限確保することにつながり、治水－自然環境保全のより本質的な両立策となる。本研究は、このような要望にこたえるため、新しい防御工・素材の開発を行うとともに、それらの活用を前提とした対侵食防御計画の立案手法の開発を目指している。工法・素材の主な開発目標は、・侵食防止シート（新規開発）、・ポーラスコンクリート（防御工への適用法）、・ふとんかご（新設計法）であり、あわせて河岸侵食予測を踏まえた対侵食防御計画の立案手法を検討・提案する。それらの１１年度の成果概要を以下に述べる。

侵食防止シートの開発：第一次プロトタイプシートを用いて、シートを設置した模型堤防のり面を実験ヤードとし、草刈り機、車両などの積載による変形･破壊に対する耐久性、およびたき火による耐燃焼性に関する実物実験を実施した。この結果と 10 年度までに得られた知見を総合して、シートが持つべき性能と作成・設計法に関するマニュアル（一次案）を作成し、それに基づいて、第二次プロトタイプシート(全 11 種)の作成を行った。また、植生が繁茂した状態でのシートの侵食防止効果および植生根によるシートの固定効果に関する実大実験を行い、実際と同様の設置条件でシートが発揮しうる侵食防止機能の評価を行い、先に提案していた侵食防止機能に関する設計法の妥当性確認を行った。さらに、自然共生センターの実験河川（河岸開発研究ゾーン）に施工後およそ１年経過した状態でのシート上の植生および覆土活着状況を把握し、活着を確実なものにするための留意点を得た。あわせて、シート設置区間上下流の流水とシート直上の土壌について内分泌撹乱化学物質（いわゆる環境ホルモン）の水質調査を行い、設置した侵食防止シートからの内分泌撹乱化学物質の溶出を示す水質変化が起きていないことを明らかにした。最後に、第二次プロトタイプシートの現地河川への試験施工を開始した。以上から、侵食防止シートの開発が、侵食防止機能、持つべき物性、自然環境保全に関する機能についてほぼ実用段階に近づいたことが明らかになり、12 年度（最終年度）に実施予定のマニュアル一次案改良による第二次（最終）マニュアル作成のめどがついた。なお、植生繁茂制御シートについては、その開発が技術的に困難であることが判明し、その根拠を明示した。

ポーラスコンクリートの防御工への適用：まず、植物生育に関する機能評価については、実河川に施工されたポーラスコンクリート護岸を対象に植生調査を実施し、植生の現状と施工場所の条件等との関係について検討した。その結果、ポーラスコンクリート河川護岸上に植生を維持するためには、冠水による植生の剥離が生じないところでは植生工を実施すること、冠水する場所であれば土砂の堆積が可能な構造・工法を用いることが重要であることを示した。防御工の材料としての機能評価に関しては、まず、ポーラスコンクリートの現場施工時の品質管理法について検討し、フレッシュ性状判定法ならびに空隙率測定法について実用的な手法提案し、ポーラスコンクリートでも普通のコンクリート並の品質管理が可能であることを示した。また、材料の機能評価のうち強度については、巨礫の衝突に対する耐衝撃性を調べ、ひび割れ破壊に対する耐性について、ポーラスコンクリートが普通コンクリートより高いことを実験より明らかにした。この結果と 10 年度の耐摩耗性の検討結果とあわせ、普通コンクリートの代わりにポーラスコンクリートを護岸に用いることが強度面で大きな問題をもたらさないという見通しを得た。最後に、ポーラスコンクリート上にヨシなど背の高い密生草本植物が生育している場合の護岸の安定性照査に必要な流体力の計算手法を開発し、植物生育という普通のコンクリート護岸に無い特性を護岸の力学設計に考慮できるようにした。以上の１１年度までの成果により、ポーラスコンクリートの護岸への使用にかかわる課題と解決法が

概ね把握された。

ふとんかごの新設計法の開発：中込材の石の移動限界をもって設計し、石と金網の変形を許さないとする従来のふとんかご設計法に代えて、金網の性能を考慮し、流水によるかごの変形量をかご材の剛性によって許容量以下に抑えるという新しい設計法を提案することを目的として、11年度は、実物大のふとんかごを用いた金網剛性試験と高流速水路実験を行った。この結果、この新しい設計法の中核である任意の剛性を持つ金網について外力（流速やせん断力）と金網変形量との関係を予測する式が得られ、これにより、所定の金網変形量以下に抑えるために用いるべき中込材の石の大きさや金網剛性を決定する方法を得る見通しがついた。この成果は、ふとんかご設計の合理化、ひいては高剛性金網の利用により中込材粒径を相当程度小さくできることにつながり、条件によっては、遠くから大粒径の中込材を調達せずとも現地発生材料の利用を可能にすること、ふとんかごへの土砂堆積・植物生育を従来型より早めることに道を開くものと期待される。

河岸侵食予測手法の開発と河岸防御計画への応用：予想される河岸・堤防の侵食速度と堤防に隣接する高水敷幅、河道の平面形、その他の河道条件に応じて、どの時期に、どのような強度・信頼性を持つ防御工を設置すべきかを判断する手法を提案した。ここでは、1)河岸侵食の進行速度という時間経過の概念を防御法決定の最重要判断要素としていること、2)侵食が生じていても状況によっては防御工を設置しなくて済む条件を明確にしていること（自然河岸の保全の治水上の位置づけの明確化）、3)侵食進行のモニタリング結果を時々のアクション決定に生かすことにより、侵食予測の困難さを補完するようにしていること、4)防御工に対し侵食防止の有り無し（on-off）という2つの両極の機能を求めるだけでなく、何段階かの侵食防御・抑制機能を求めるようにしており、本開発研究で開発されつつあるような多様で良好な自然環境保全機能を併せ持つ新工法・素材の活用を促すように工夫していること、に特徴がある。本手法の適用は、河岸侵食進行の予測あるいは想定が前提となり、これについて、経験的手法と力学的手法の現況をまとめた。しかし、いずれも改良の余地が少なくないので、10年度に引き続き、侵食進行予測手法の合理化のための研究も並行して行った。対象フィールドは小貝川49.2kmの湾曲部外岸であり、ここで侵食量観測を詳細に実施した。11年7月に比較的大きな出水があり、この出水前後の横断測量結果より、大きいところで1.5m程度の河岸侵食の発生が確認できた。この侵食の特徴は、平水時には水面より上に表れる河岸上部が崩落したが、それに対して水中部では顕著な侵食が確認できなかったことである。これまでの測量結果を総合して、侵食進行パターンとそのパターンが1サイクルするまでの出水回数について推定し、定量解析や侵食予測モデル評価のための基本情報を得た。

まとめ：研究期間4年のうち11年度で3年が終了し、個々の工法・素材の開発について実用化のめどがつき、また、それらの適用も含めた侵食に対する河岸・堤防防御のあり方（計画）について、一定レベルの提案を行うことができた。これらの成果を踏まえ、12年度は、実用化を見据えた対侵食防御計画と新工法・新素材適用に関する最終のつめと総合とりまとめを行う。加えて、開発の過程で得られた工法・素材開発自体の要点をとりまとめ、新たな工法・素材開発を活性化する環境づくりに役立てる。

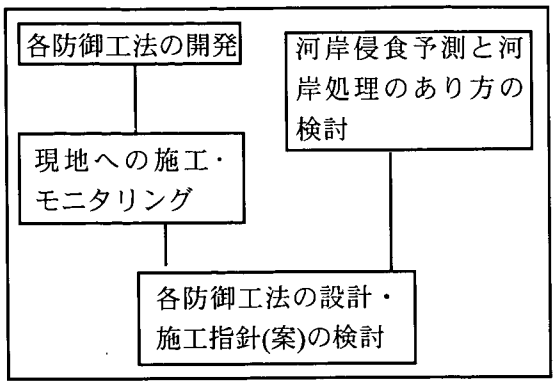
（河川研究室長　藤田）

4.4.1　新素材・新工法を用いた防御工の開発（その１）

研究期間：平９～平12

担　　当：河川研究室

【要旨】



河岸および堤防のり面の防御工に対する最近の要望事項として、従来と変わらない治水安全性を確保しつつ河川環境保全に資する機能を備えていること、かつ低コストであることが挙げられる。また、防御工設置についても、より早期に治水効果が向上でき、かつ必要最小限の設置で済むように計画的に行うことが、従来にもまして強く求められている。本研究は、上記の要望に適合した防御工とともに、防災的観点から設置必要性を説明する際のツールとなる河岸侵食の予測手法を開発することを目的としたものである。11年度には、下記の検討をそれぞれ行った。

侵食防止シート：10年度までに得られた知見を総合して、シート作成マニュアルを作成し、それに基づいて、第２次プロトタイプシート(全11種)の作成を行った。これらのシートについて、強度、耐久性、施工性、侵食防止効果に関して試験･実験を行い、作成マニュアルおよび侵食防止効果の評価方法について再検討した。また、第１次プロトタイプシートを用いて、1)実際と同じ使用形態である植生が繁茂した状態でのシートの侵食防止効果および植生根によるシートの固定効果に関する実大実験と、2)シートを設置した模型堤防のり面を実験ヤードとして、草刈り機、車両などの積載による変形･破壊に対する耐久性、およびたき火による耐燃焼生に関する実物実験を実施した。

ポーラスコンクリート：10年度に引き続き、巨礫の衝突に対する耐衝撃性について検討した。11年度では、ひび割れ破壊に対する耐性については、ポーラスコンクリートが普通コンクリートより高いことを実験より明らかにした。

ふとんかご：中込材の移動限界をもって設計する従来のふとんかご設計法に変えて、金網の性能を考慮した、流水によるかごの変形量をかご材の剛性によって許容量以下に抑える新しい設計法を提案する事を目的としている。11年度は、実物大のふとんかごを用いた金網剛性試験と高流速水路実験により、この新しい設計法について検討を行い、一部課題は残るもののそれが妥当であることを示した。

河岸侵食予測手法：10年度に引き続き、小貝川49.2kmの湾曲部外岸の侵食量観測を実施した。11年7月に比較的大きな出水があり、この出水前後の横断測量結果より、大きいところで1.5m程度の河岸侵食の発生が確認できた。この侵食の特徴は、平水時には水面より上に表れる河岸上部が崩落したが、それに対して水中部では顕著な侵食が確認できなかったことである。これまでの測量結果を総合して、侵食進行パターンとそのパターンが１サイクルするまでの出水回数について推定し、今後の課題を明らかにした。

本研究は、４つの小テーマ(侵食防止シート,ポーラスコンクリート,河岸侵食予測手法,ふとんか

ご)に分割して研究が進められている。そこで小テーマごと章を分けて研究結果の概要をまとめて示す。

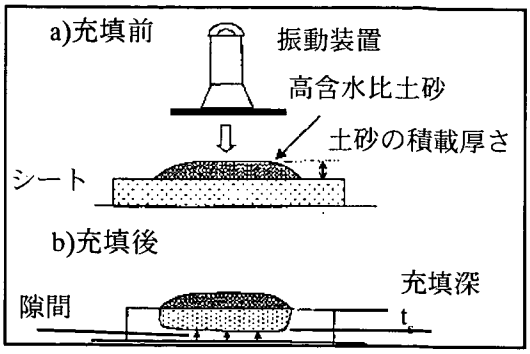
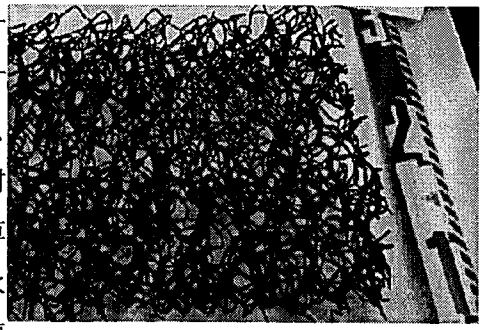


図-1.1　土砂充填実験の概要

1．侵食防止シート

1.1　研究方法

作成マニュアルに基づいて制作した第2次プロトタイプは、侵食防止・施工性・強度・耐久性について良好な改善結果が見られている。ここでは、作成マニュアルをまとめる上での本質的な課題(充填性を優先させると"すかすか"なシートがよいが、その反面、侵食防止効果が低下する)の解決のため、新たに開発した最適な土砂充填工法と、この工法を用いて完全充填が可能となるシート諸元(構成材料の直径、空隙率、厚さ)の設定法について示す。なお、草刈り機などの積載による変形・破壊に対する耐久性、たき火に対する耐燃焼性については、シート内に土砂が十分充填されていれば、侵食防止に支障が生じるような損傷が生じないことがわかった。上記の結果は、シート設置後の損傷防止に対しても、土砂充填が重要な役割をすることを示唆するものである。以下では、土砂充填が完全に行えるシート諸元設定法(1.2.1)と所定の侵食防止効果を得るためのシート諸元設定法(1.2.2)をそれぞれ提案し、これらの設定法を活用して土砂充填性と侵食防止効果の両立という課題について検討した結果(1.2.3)を示す。


写真-1.1　検討対象としたシート

1.2　研究結果

1.2.1　土砂充填性とシート厚さ

シートに土砂を充填する工法として、コンクリートのスランプ試験と全く同様な方法で測定したスランプ値が23～27cmになるように含水比を調整した流動性の高い土砂(以下、高含水比土砂と呼ぶ)をシート上に載せ、土砂に振動を加えて液状化させ、空隙内に"流し込む"方式が最良であることが、他の工法との比較実験から明らかとなった。このスランプ値は液状化すること以外に、"勾配1:2の斜面上に敷設したシート上にシート厚さとほぼ同じ厚さ(単位面積あたりのシートの全空隙を土砂で満杯にするのに必要な土砂量)で容易に高含水比土砂を盛れる"ように流動性を抑えることを条件として実験的に設定した。

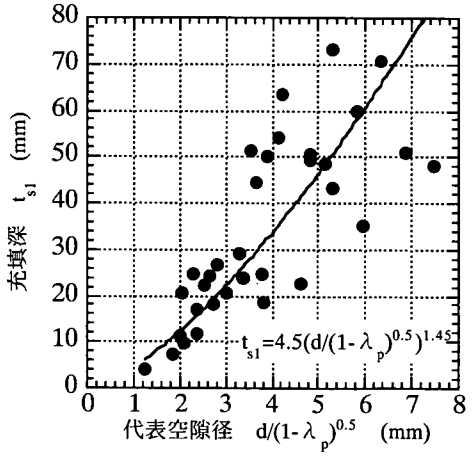


図-1.2a)　充填深と代表空隙径の関係(1回)

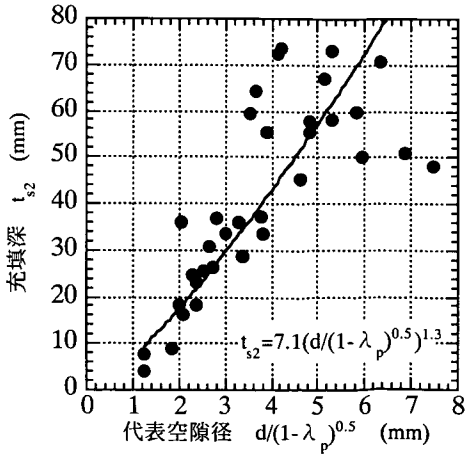


図-1.2b)　充填深と代表空隙径の関係(2回)

液状化した高含水比土砂を"流し込む"と、図-1.1に模式的に示すようにシート表面から深さtsまでは完全に充填されるが、それより下側では土砂充填されない"隙間"が生じる場合があることが

わかった。この隙間の広さを定量的評価法を開発するのを目的として図-1.1に示す土砂充填実験を行った。ただし、室内の小規模実験としたため、実際に施工に用いる充填装置を小型化した振動装置を用いた。この振動装置は、振動板の単位面積あたり重量が施工用のものと同一である。スランプ値25cmの高含水比土砂をシート厚さtと同じ厚さでシート上に載せ、これに振動装置により約5秒振動を加えた後(実際の充填施工とほぼ同じ秒数)、充填深t_{s1}を測定した。この充填作業を続けて2回行った際の充填深をt_{s2}とする。

写真-1.1に示す構造を有するシートを対象として、充填深t_{s1},t_{s2}と代表空隙径$d/(1-\lambda_p)^{0.5}$との関係を整理した結果を図-1.2に示す。ここで代表空隙径とは、シート構成材と同じ直径の直線材を同じ空隙率で正方格子に並べた構造を持つ仮想シートの空隙径(格子間距離)に相当する値であり、仮想シートの空隙径をもって実シートの空隙代表値を表すという考えに基づいて定めた指標である。図-1.2から代表空隙径の増加に伴って充填深も大きくなること、1回より2回の充填作業を行った方が充填深は大きくなるが、$t_{s2}<2\times t_{s1}$であることから充填回数に比例しては充填深が大きくならないことがわかる。

1.2.2　流速低減効果とシート厚さ

シートの形状に関する特徴は、構造、構成材の直径d、空隙率λ_p、厚さtによって表すことができる。シートの流速低減効果は、構造、d、λ_pに応じて変化する。ある一定の構造の場合、dまたはλ_pが小さいシートほど、流速低減効果が大きくなる。この理由を以下に簡単に説明する。流速低減効果はシートの構成材が流体抵抗となるために発揮されるが、このことはシート単位体積あたりに含まれる構成材に作用する流体抵抗の総和が大きいほど、流速低減効果も増加することを意味する。流体抵抗は流れを遮蔽する物体の面積に伴って増加するので、流体抵抗の総和がシートの単位体積あたりに含まれるシート構成材の遮蔽面積に伴って増加するといえる。つまり、シート単位体積あたりに含まれる構成材の遮蔽面積に伴って流速低減効果が増加する。単位体積あたりの遮蔽面積は、dを固定して考えれば、λ_pが小さいほど大きくなる。また、λ_pを固定(シート単位体積あたりに含まれる構成材の体積を固定)して考えると、直径が小さい構成材ほど表面積が多くなり、それに応じて遮蔽面積も増加する。以上より、シートの流速低減効果は、構造が一定であれば、dまたはλ_pの減少に伴って大きくなることが理解できる。また、流速低減効果が大きいと、シート表面の流速が小さくなり、そのため侵食防止効果を得るために必要なシートの最小厚さt_cがより小さくなる。したがって、侵食防止が可能な最大侵食力(流速)が同一のシートであっても、dとλ_pが小さいシートほどt_cも小さくなる。この関係を定量的に評価した一例を図-1.3に示す。図-1.3は、写真-1.1に示す構造を有するシートを対象として、堤防のり面に作用する代表的な侵食力を摩擦速度0.1m/sと想定して、これに対して侵食防止が可能なシートのd,λ_p,t_cの関係を示したものである。dとλ_pの減少に伴ってt_cも小さくなる関係が明確に現れていることが確かめられる。

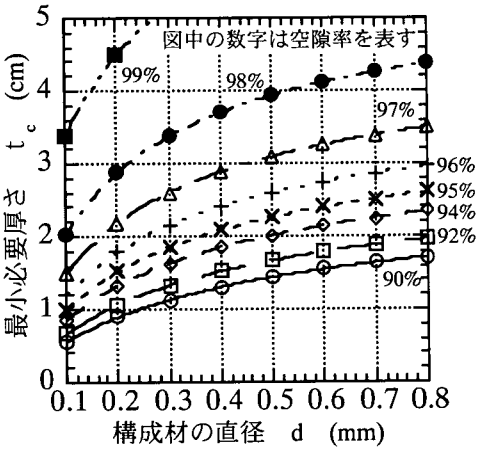


図-1.3　d, λ_p,t_Cの関係図の一例

1.2.3　土砂充填が可能な侵食防止シート

土砂充填が不完全であることに起因する"隙間"の発生防止を行うとともに所定の侵食防止効果

を発揮させるためには、$t_c<t<t_s$という条件を満さなければならない。この条件を満たすシートを製造するには、1.2.1,1.2.2に示した情報を組み合わせればよい。ここでは、写真-1.1に示す構造を有するシートについて、図-1.2,1.3を用いて2回の充填作業を行うこととした場合のシート諸元d, λ_p,tを定めた一例を図-1.4に示す(なお、1回の充填作業では実用的な諸元設定が困難だったので、ここでは省略した)。図-1.4には空隙率95%のシートについて、侵食防止機能を確保でき(図-1.3に示したλ_p=95%の場合に対して、$t_c<t$となる条件)、かつ土砂充填が可能(図-1.2に示した$t_{s2}>t$となる条件)な範囲を斜線でハッチングして示した。このような範囲は、上記と同様な方法で様々な空隙率に対して求めることができる。

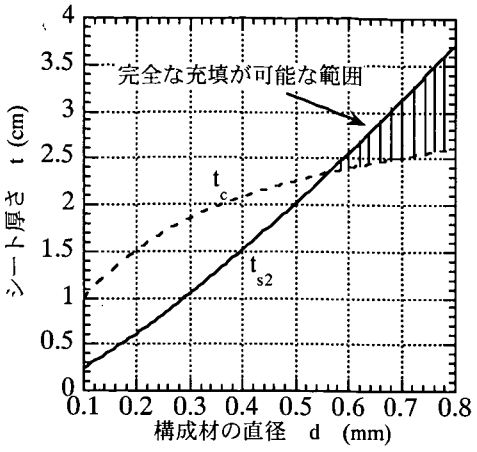


図-1.4 土砂充填可能なシート諸元の設定

2．ポーラスコンクリート

2.1 研究方法

ポーラスコンクリートは、普通コンクリートに比較して圧縮強度が小さいため、礫や流木などの流下物の衝突に対して十分な耐久性があるか懸念がもたれている。11年度は、普通コンクリートとポーラスコンクリートに同じ礫を衝突させて破壊する実験を行い、上記の懸念に対して検討を加えた。実験では、表-2.1に示す種類(ポーラスor普通)、厚さ、圧縮強度のコンクリート平板(1m四方)を砂地盤上に設置し、3種類の重量(106,209,400kgf)の礫を所定の高さから落下させ、1回の衝突で割れる最小落下高さを調べた。なお、ポーラスコンクリートと普通コンクリートの耐衝撃性の比較においては、単位面積あたりの重量が同一となる厚さ同士(Aシリーズ：20cmと15cm、Bシリーズ10cmと7.5cm)で比較することとした。これは、護岸設計においてはまず第一に設計流速より適用限界流速(つまり侵食耐力)が大きい護岸ブロックが選択され、次に耐衝撃性などの強度が侵食防止に対して十分であるかを検討することを反映したためである(注:同じブロック形状であれば単位面積あたり重量が同一にすると、適用限界流速も同じになる)。ポーラスコンクリートについては、設置後の劣化で圧縮強度が低下した場合を想定して、圧縮強度を小さくしたCシリーズについても実験を実施した。

表-2.1 衝撃実験に用いた供試体の諸元

シリーズ	種類	厚さ (cm)	圧縮強度 (N/mm^2)
A	ポーラス	20	12.3
	普通	15	29.9
B	ポーラス	10	12.3
	普通	7.5	29.9
C	ポーラス	20	8.1

注)ポーラスコンクリートは5号砕石、空隙率25%である。

2.2 研究結果

構造物の衝撃破壊については、力積またはエネルギーの保存則に基づいた検討が一般になされている。今回は、比較的実験結果の傾向がまとめやすかったため、礫の衝突寸前の運動エネルギーを破壊外力の指標とした。礫の大きさごとに破壊が生じるまで加えた衝撃の回数と運動エネルギーの関係を、ポーラスと普通コンクリートについて図-2.1,2.2に示す。Aシリーズについて衝撃1回で破壊が生じる最小の運動エネルギーをみると、ポーラスと普通コンクリートとも礫の大きさに応じて値が変化するものの、最小運動エネルギーと礫の大きさに際だった関係は見られない。今回の実験範囲を総合すると、1回の衝突では破壊が生じない運動エネルギーE_{cr}は、ポーラスでは11(kJ)、普通コンクリートでは7.6(kJ)と判断される。BシリーズについてもE_{cr}を調べてみると、ポーラスでは

3.6(kJ)、普通コンクリートでは2(kJ)となる。以上の結果から分かるように、ポーラスが普通コンクリートより高い耐衝撃性を有する。このような結果となった理由として、礫衝突位置での陥没変形の有無が挙げられる。ポーラスコンクリートでは、普通コンクリートに比較して圧縮強度とヤング率が小さいため衝突位置において陥没が生じやすく、陥没形成に衝撃エネルギーの一部が費やされるため破壊しにくいと考えられる。この特徴は圧縮強度を8N/mm^{2}と小さくしたCシリーズについても同様に見られた(CシリーズのE_{cr}はAシリーズと同値となる実験結果が得られた)。以上より、ポーラスコンクリートには、普通コンクリートと比較して衝撃位置で陥没破壊が生じやすいが、コンクリート板が割れるという護岸として致命的な破壊は生じにくい特性があると考えられる。しかし、ポーラスコンクリートの使用形態としては空隙に土砂が充填された状態が一般的であることを考慮すると、土砂充填された場合では陥没の発生を妨げ、破壊が生じやすくなるという新たな懸念が生じる。今後、空隙内に土砂充填したポーラスコンクリートについて上記と同様の衝撃試験を実施して耐衝撃性について確認する必要がある。

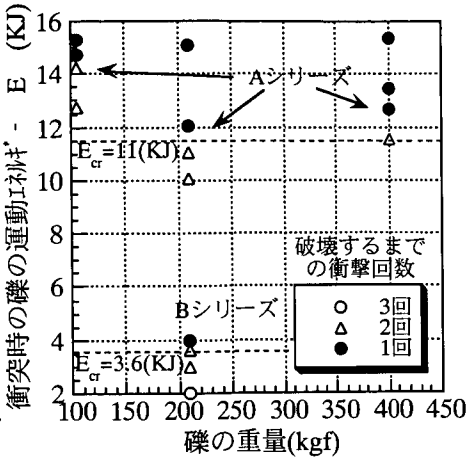


図-2.1　ポーラスコンクリートの衝撃実験結果

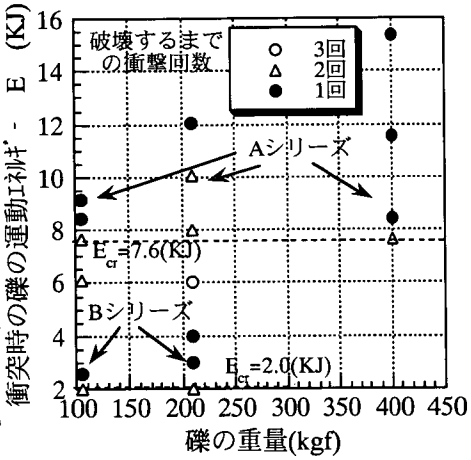


図-2.2　普通コンクリートの衝撃実験結果

3．河岸侵食予測手法

3.1　研究方法

10年度に実施した小貝川49.2km地点の湾曲部外岸における調査(過去30年の定期横断測量および空中写真測量の分析)から、ピーク流量の大きさに応じた侵食速度の増減は顕著ではなく平均的に0.7～1.0m/yearの速度で河岸侵食が進行していること、侵食範囲は河岸法線形の変化に伴って下流へ徐々に移動していることが明らかになっている。11年度では、上記のような特徴を有する河岸侵食がどのようなプロセスで進行するのかを明らかにすることを目的として、出水前後に横断測量を実施し、その結果から侵食進行パターンとそのパターンが1サイクルするまでの出水回数について推定した。

表-3.1　出水年月日，ピーク流量，測量実施年月日

	出水年月日	ピーク流量 (m^3/s)	測量実施年月日
第1回	1999年5月5日	318	1998年12月20日
第2回	6月30日	459	1999年7月8日
第3回	7月14日	942	7月30日
第4回	8月15日	462	8月20日

3.2　研究結果

11年度には、表-3.1に示す4出水によって河岸侵食が進行した。いずれの出水も、河岸侵食調査地点において高水敷が冠水している。横断測量は、表-3.1に示すように、この4出水の前，第2,3,4回出水後の4時期に実施した。それらの測量結果のうち、代表的な侵食パターンが見られる一例を図-3.1に示す。最初と最後の横断形状を比較すると、横断方向に平行移動させれば両者がほぼ一致

する非常に似た横断形状であることがわかる。その間に生じた大まかな侵食パターンは、1)水位以下の部分(以下、河岸下部と呼ぶ)がまず侵食され(最初～第2回測量、崩落も見られる)、2)水位以上の部分(以下、河岸上部と呼ぶ)が崩落し(第2～3回測量)、3)その後また河岸下部の侵食が発生する(第3回～最後測量)というものである。以上より、河岸下部の侵食→上部の崩落を1サイクルとして、このサイクルが一巡する前後の河岸形状がほぼ同じとなることがわかる。崩落が生じた時点をサイクルの開始時点とすると、測量結果から回の4出水の間には少なくとも2サイクル生じた、つまり1サイクルあたり2出水となる。次にピーク流量と河岸下部の侵食量の関係を見てみると、第1,2回出水後には河岸下部が大きく侵食されているが、第1,2回に比較して2倍程度大きなピーク流量である第3回出水後にはほとんど侵食されていないことがわかる。このように流量の規模に応じて河岸下部の侵食量が単純に増加しないことは、上記した侵食速度と出水規模の関係(ピーク流量に応じて侵食速度が増加する傾向が顕著に見られないこと)に深く関係していると推察される。その理由の一つとして、侵食外力とその作用時間が、ピーク流量の増加に応じてそれほど大きくならないためと考えられる。図-3.2は、調査地点における10年9月出水時の水面流速分布(黒子水位観測所での流量637m³/s)であるが、低水路満杯程度の水位では河岸侵食が生じている湾曲部外岸に沿って生じる高流速域が、高水敷に乗り上げて湾曲外岸部はむしろ低流速になっていることがわかる。以上のように、低水路河岸の法線形状や高水敷の広さなどによっては、今回調査した小貝川と同様にピーク流量の大きさに応じて河岸侵食量が必ずしも大きくなることにはならないと考えられる。今後の課題として、出水時の侵食外力とその継続時間から河岸下部の流水による侵食量を推定するとともに、上記したピーク流量と侵食量の関係についても分析可能な河岸侵食モデルを構築することが挙げられる。

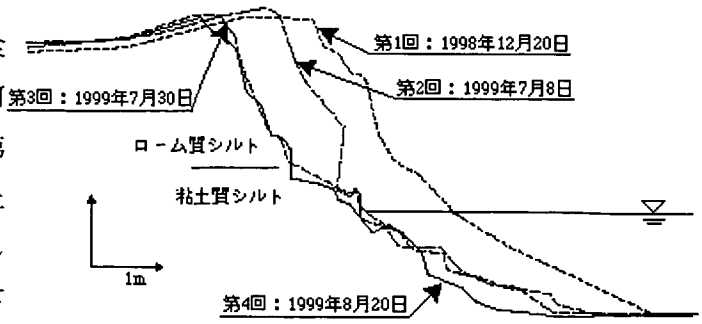


図-3.1　代表的な河岸侵食の進行状況

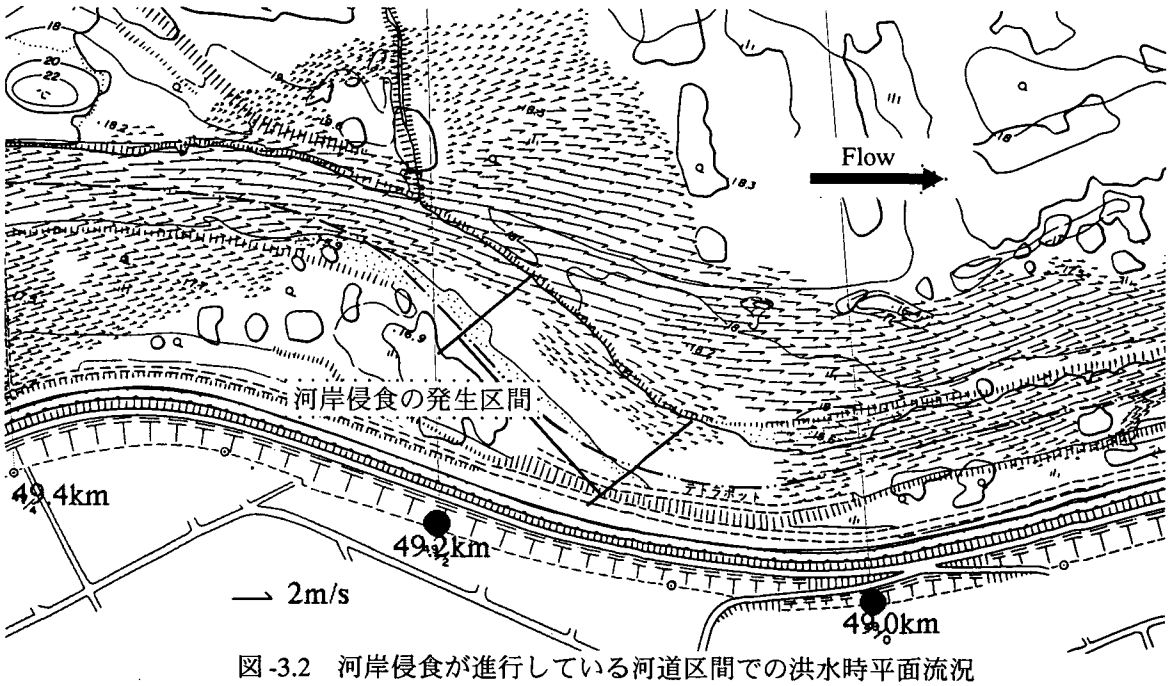


図-3.2　河岸侵食が進行している河道区間での洪水時平面流況

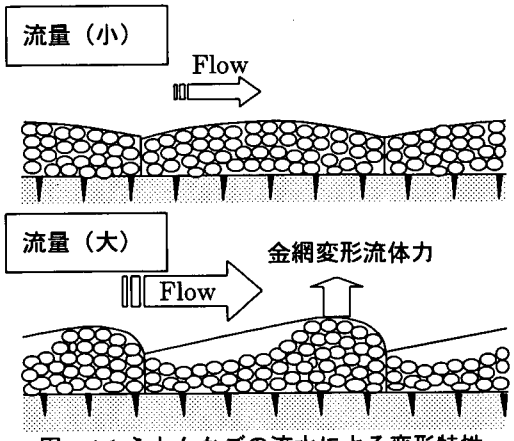
4．ふとんかご

4.1　研究目的

ふとんかごは、金網でできた直方体のかごに中込材を詰めたもので、河岸や河床に設置し、洗掘・侵食を防止するための工法である。この工法は、コンクリートブロック等による工法と比べ中込材の間に空隙がありこれが生物の生育場所となりうるため、近年の多自然型川づくりにおいて使用頻度が高くなっている。

コロラド大学で行われた水理実験等[1), 2)]によると流水中に置かれたふとんかごは、図－4.1 に示すように流量が増加すると中込材に移動が生じて、下流に偏り、金網が中込材の抜けだしを押さえるように袋状に変形することが知られている。

従来の設計法[1), 3)]では、水理実験によって中込材の移動限界掃流力を測定し、この限界掃流力が同じ粒径のルーズなリップラップの約２倍であったことから、設計限界掃流力として、中込材に働く無次元限界掃流力をτ_*=0.10 としている。しかし、この設計法では、金網の性能が反映されていないことから、中込材は大きな粒径が必要となる。このため、山から切り出した割栗石が使用されることが多く、その調達に際し環境面・経済面のコストがかかる要因となっている。そこで本論文では、中込材に働く流体力と金網の剛性特性を考慮して、かごの変形を許容変形量以下に押さえる新しい力学設計法を提案する。この新しい設計法が確立されれば中込材の粒径が小さくでき、河床材料等の現地発生材を使用することが可能になると期待される。



図—4.1 ふとんかごの流水による変形特性

図－4.2 は、今回提案する設計法の概念図である。例えばふとんかご設置現場の設計流速が解っていれば、図－4.2（ａ）を用い流体力を受けた中込材が金網を押し上げる力（図－4.1 参照。以降これを金網変形流体力と呼ぶ）設計金網変形流体力Ｆを算定できる。この設計金網変形流体力Ｆを図－4.2（ｂ）の各種金網の変形と荷重の関係と比較することにより、許容変形量以下に抑える為に必要な金網種類を決定できる。

4.2　研究方法

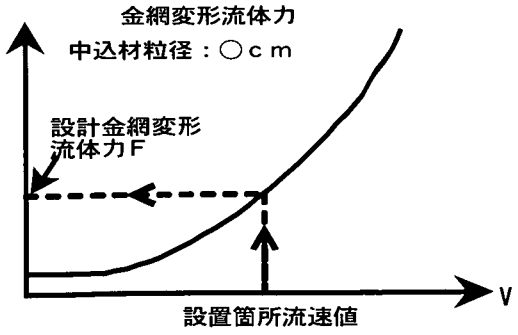
実物大実験によりふとんかご変形の力学的な特性の検討を行った。まず、水理実験に使用する金網の変形特性を把握するために、金網の曲げ剛性試験を行った。次に、これらの金網で作られたふとんかごについて高流速水路実験を行い、流速と中込材の移動・金網の変形量の関係について調べた。

4.2.1　ふとんかご材の曲げ剛性試験

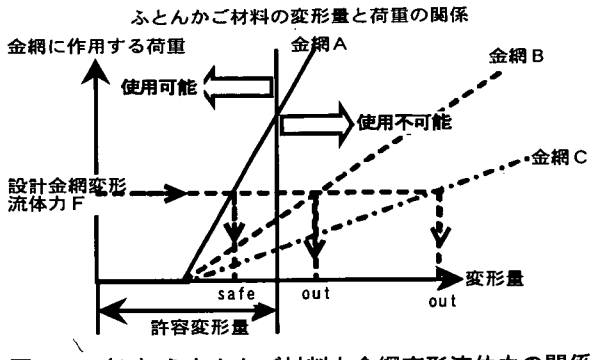
(1)試験方法

水路実験で用いる幅：1.0m、長さ：1.64m、厚さ：0.5m のふとんかごを用いて、線径φ1.6mm、2.5mm、4.0mm、5.0mm の４種類の溶接金網にかかる引張荷重と変形の関係について試験を行った。

(2)試験結果

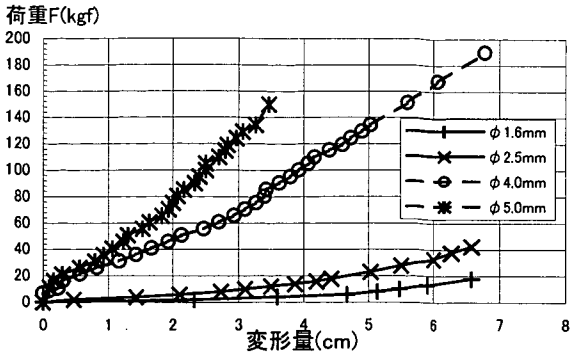


図—4.2（ａ）金網変形流体力と流速の関係



図－4.2（ｂ）ふとんかご材料と金網変形流体力の関係

図－4.3 は、金網の曲げ剛性試験の結果である。この図の線は、傾きが小さいほど金網自体の曲げ剛性が小さく変形しやすいことを示す。この変形量と荷重の関係図を用いれば、水理実験でふとんかごに生じる変形量からその時にふとんかごに作用した、金網変形流体力を算定することができる。



図－4.3 曲げ剛性試験結果

4.2.2 高流速水路実験

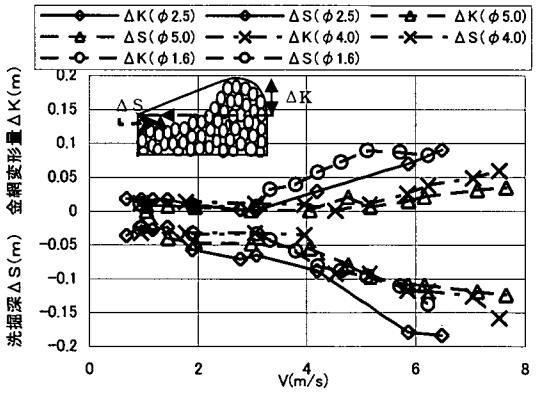
(1)実験方法

実験は、厚さ 20cm 弱で最大流速 7.6m/s までの水脈を出すことができる高流速水路の中央部ピットに、水脈がふとんかご上面を流れるようにふとんかごを設置し、流速と変形の関係を調べた。中込材は、平均粒径 4.0cm の玉石と平均粒径 0.83mm の粗目砂を約３：１の割合で混合したものを用いた。通水は、流速が 1.0m/s から 7.6m/s までの間で、ふとんかご内の中込材の移動状況及び金網の変形状況を見ながら、１０段階に分けて行った。通水中に水面形とふとんかご中央部の（ふとんかご上流端から 80cm 地点）流速鉛直分布を測定した。以降解析では、流速値は、鉛直分布の最大流速値を用いた。無次元掃流力 τ_* は、底面近傍の鉛直分布測定結果より対数則を仮定して算出した値を用いた。また、各通水後に中込材及び金網の変形量を測定した。

(2)実験結果

a)流速と中込材洗掘量、金網変形量の関係

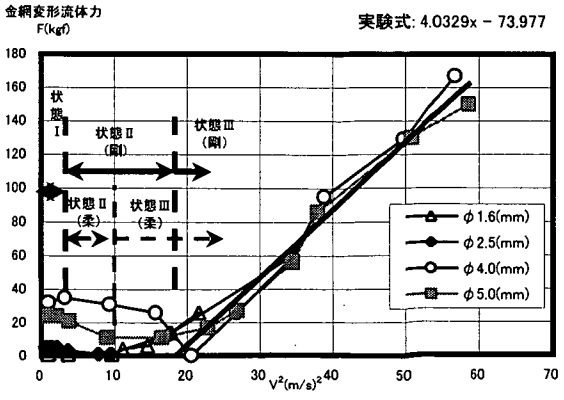
各種類の金網について、流速ｖと金網変形量ΔＫ、中込材洗掘量ΔＳの関係を図－4.4 に示す。この図より、すべての金網種類において流速の増加に伴い中込材の洗掘量、金網変形量が増加することがわかる。また、金網の剛性が強いものほど金網変形量が小さく、金網の剛性が弱くなるほど金網変形量が増加する。なお、φ2.5mm の最終的な金網変形量がφ1.6mm よりも大きいのは、φ1.6mm のケースでは、実験途中から中込材の流出が起こり、金網の変形が増加しなかったためと考えられる。



図－4.4 流速と洗掘量と金網変形量の関係

b)流速と金網変形流体力の関係

各金網の変形量を、曲げ剛性試験により得られた変形量と荷重の関係から金網変形流体力に換算し、その時の流速^{2}との関係を示したものが図－4.5 である。この図から、一定の流速以上になると金網変形流体力と流速^{2}の関係は、一つの直線に集約していく。このことから金網変形流体力は、金網の剛性や変形量に関わらず流速のみで決まることが解る。この線の近似線を入れてみると傾き約 4.0 の直線が引ける。ふとんかご上の流速がわかれば、実験で使用しているかごの諸元及び中込材、金網については、この実験式から、金網変形流体力を算定することができ、許容変形量を決めれば今回提案している設計法の適用が可能である。ただし、ふとんかごの諸元、中込材の大きさ、金網の目合い等が変われば、この実験式をそのまま適用



図－4.5 流速の２乗と金網変形流体力の関係

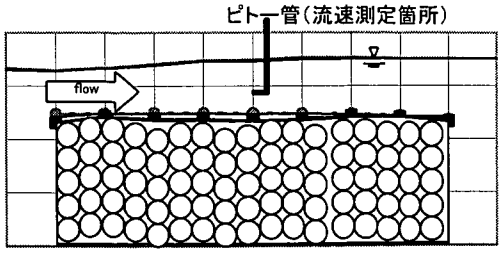
できない。そこで、流速と金網変形流体力の関係を一般化する検討を行う。

4.3 研究結果

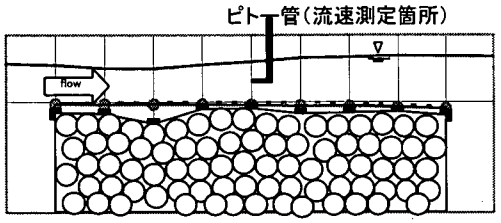
4.3.1 従来の設計法との関係

(1)状態Ⅰ、Ⅱ、Ⅲと無次元掃流力 τ_*

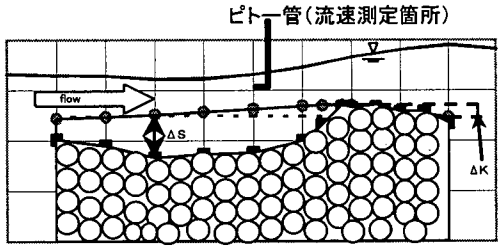
図—4.5 を詳細に分析すると金網変形流体力の推移からふとんかごの変形を状態Ⅰから Ⅲまでの３つに分けることができる。状態Ⅰは図－4.5 に示す流速の範囲であり、中込材を充てんしたことによって金網に作用した力が初期値のまま維持されている状態である。この時かごは、図－4.6 に示すように中込材が移動していない。この時の τ_* を算出すると 0.02 以下となっている。状態Ⅱは、図－4.5 に示す流速の範囲であり中込材を充てんしたことによって金網に作用していた力が中込材が移動し始めたことにより減少して行き、移動した中込材に作用する流体力が再び金網に作用するまでの間の状態であり、かごは図—4.7 のようになっている。金網に力が作用し始める τ_* は柔らかい金網では、0.06、剛なものでは、0.12 となっており、従来の設計法 0.10 前後となっている。状態Ⅰと状態Ⅱを区分する τ_* が、かご無しの中込材の移動限界無次元掃流力 0.047[1] より小さく評価されるのは、中込材に混ぜた粗目砂が抜けたために、中込材の天端高が沈下し、金網に作用する力が減少したものと考えられる。もし、粗目砂を混ぜず、金網から抜けない粒径のみを用いれば、状態Ⅱは、無くなり、状態Ⅰになると推定される。状態Ⅲは、図－4.8 に示すように、中込材が下流に偏って金網を押し上げている状態である。この金網を押し上げる金網変形流体力は、流速の２乗に比例して大きくなる。



図－4.6 状態Ⅰの時のふとんかご形状



図－4.7 状態Ⅱの時のふとんかご形状



図－4.8 状態Ⅲの時のふとんかご形状

4.3.2 金網変形流体力Ｆの理論的考察

流速と金網変形流体力の関係について考察を行う。金網変形流体力は、流体力の作用したふとんかご内の中込材が金網を押し上げる力である。この時の力の釣り合いについて以下の３つの考え方ができる。

第１は、流体力を受けた中込材が、下流側の中込材に乗り上げて回転しようとする運動を金網が押さえ込んで力が釣り合う考え方である。

第２は、流体力を受けた中込材が、下流側の中込材と金網の間等に滑り込むように押し込まれる運動を金網が押さえ込んで力が釣り合う考え方である。

第３は、中込材の移動によって発生した傾斜面に流れがぶつかることによって発生する動水圧が中込材を押し上げる土圧に変換され、その土圧を金網が押さえ込む力の釣り合いの考え方であり、これを土圧に着目した考え方と呼ぶことにする。

(1)中込材の回転運動

図－4.9 の、中込材に働く流体力と金網が押さえる力について P 点周りの力の釣り合いを考えると、

$$F\frac{d}{2}\cos\theta+\mu' F\frac{d}{2}(1+\sin\theta)=$$
$$(D\frac{d}{2}\sin\theta+L\frac{d}{2}\cos\theta)\frac{B}{d} \quad \cdots\cdots(1)$$

ここに、F：金網が中込材を押さえ込む力＝金網変形流体力（kgf)、D：中込材に働く抗力（kgf)、L：中込材に働く揚力（kgf)、μ'：中込材と金網の摩擦係数、B：ふとんかご幅(m)、d：中込材直径(m)
またD、Lは流速との関係より

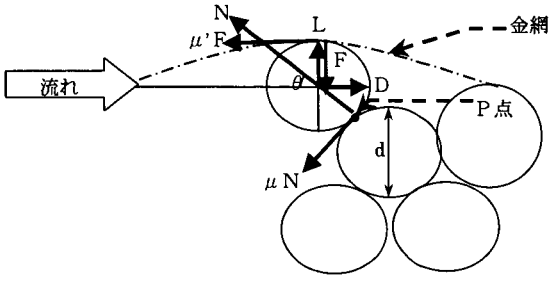
$$D=\frac{1}{2}\rho C_D A_D V^2 \text{、} L=\frac{1}{2}\rho C_L A_L V^2 \quad \cdots\cdots(2)$$

$$A_D=A_L=\frac{\pi}{4}d^2 \quad \cdots\cdots(3)$$

ρ：水の密度、C_D：抗力係数、C_L：揚力係数、A_D、A_L：投影面積(m^2)、V：流速(m/s)と表せる。
（1）式に（2)、（3）式を代入し、Fについて解くと、

$$F=\frac{\pi}{8}\rho dB(\frac{\sin\theta}{\cos\theta+\mu'(1+\sin\theta)}C_D$$
$$+\frac{\cos\theta}{\cos\theta+\mu'(1+\sin\theta)}C_L)V^2 \quad \cdots\cdots(4)$$

となり、金網変形流体力Fと流速Vとの関係式が導かれる。
(2)中込材の滑動運動
図－4.9 の中込材について水平方向の力の釣り合いを考えると



図－4.9　中込材の回転・滑動運動モデル

$$D=\mu' F+\mu N\sin\theta+N\cos\theta \quad \cdots\cdots(5)$$

と表される。また、Nは

$$N=D\cos\theta+F\sin\theta-L\sin\theta \quad \cdots\cdots(6)$$

と表すことができる。ここに、μ：滑動する中込材とそれを支持する中込材の間に働く摩擦係数、N：滑動する中込材間に作用する垂直抗力（kgf）であり、（6）式を（5）式に代入し、（2）式、（3）式を用いてFとVの関係に変換すると、

$$F=\frac{\pi\rho d^2}{8(\mu'+\mu\sin^2\theta+\sin\theta\cdot\cos\theta)}$$
$$\{C_D(1-\mu\sin\theta\cdot\cos\theta-\cos^2\theta) \quad \cdots\cdots(7)$$
$$+C_L(\mu\sin^2\theta+\sin\theta\cdot\cos\theta)\}\frac{B}{d}V^2$$

と表せる。
(3)土圧に着目した考え方
図－4.10 は、中込材斜面に作用する動水圧と金網が押さえつける力の釣り合いを図化したものである。この時中込材の斜面に働く動水圧は、

$$\frac{P_d}{\omega_0}=\frac{(V\sin\psi)^2}{2g} \quad \cdots\cdots(8)$$

で表される。この時P_d：中込材に作用する動水圧(kgf/m^2)、$\omega 0=\rho g(kgf/m^3)$、ψ：流水が中込材に当たる角度である。この動水圧 Pd を受けた中込材が金網を押し上げる力＝金網変形流体力は、ランキンの受動土圧が金網面に及ぼす垂直応力と考えると土圧係数及びモールの応力円による角度補正係数を用いて次式で表すこ

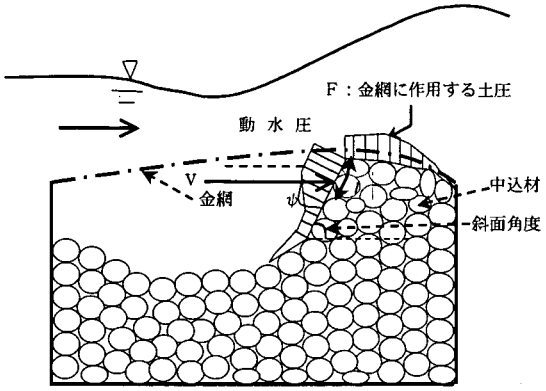
とができる。

$$F = K_p \cdot K_\theta \frac{1}{2} \rho \sin^2 \psi l B V^2 \qquad \cdots\cdots (9)$$

$$K_p = \tan^2 (45^\circ + \frac{\phi}{2}) \qquad \cdots\cdots (10)$$

となる。ここで、K_p：ランキンの受動土圧係数、K_p：モールの応力円による角度補正係数、l：有効斜面長（m）、ϕ：中込材の内部摩擦角である。

以上の３つの考え方とも金網変形流体力Fは流速V^2との関係式で表すことができる。このFと流速V^2の比例係数を金網変形流体力係数と呼ぶことにする（以下、金網変形流体力係数）。



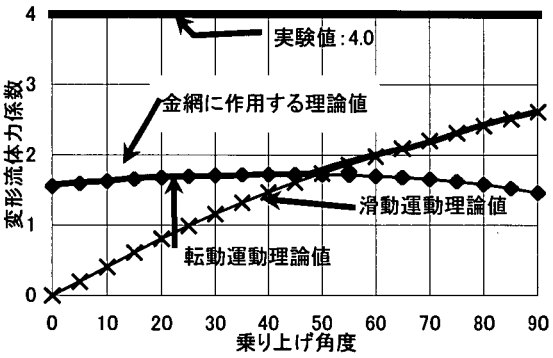
図－4.10　土圧に着目した考え方モデル

4.3.3　理論係数と実験係数の比較

金網変形流体力係数について、上記に示した３つの考え方に基づく理論値と水理実験結果から求まった実験値との比較を行った。

(1)実験値と中込材の回転運動・滑動運動の理論値の比較

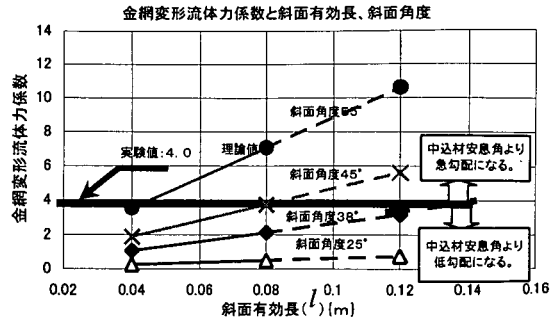
図－4.11 は、（４）式、（７）式の金網変形流体力係数の理論値と中込材の乗り上げ角度の関係を示したものである。理論値の計算にあたっては、ρ：102, d：0.04, B：1.0,μ：0.781、μ'：0.55,C_D：1.0,C_L：1.5 を用いた。この図から、乗り上げ角度が 45° より小さい場合には、金網変形流体力係数は、滑動運動の理論値より回転運動の理論値が大きくなり、乗り上げ角度が 45° より大きい場合には、逆に滑動運動が回転運動より大きくなる。これは、金網を押し上げようと運動する中込材とそれを支持する中込材の角度が小さい場合には、回転運動によって金網を押し上げる運動が起こり、角度が 45° より大きくなると金網と支持する中込材の間に突き刺さるような運動へ移行することを示す。この時の金網変形流体力係数は、1.5～2.6 程度となり、実験結果から算定された金網変形流体力係数より小さく、その３．８割から６．５割程度であることがわかる。



図－4.11　乗り上げ角度と係数の関係

(2)実験値と土圧に着目した考え方の理論値の比較

図－4.12 は、斜面角度ψをパラメータとし、（９）式から得られる金網変形流体力係数の理論値と動水圧が有効に働く斜面長lの関係を示した図である。理論値の計算にあたっては、ρ、B、は中込材の回転運動・滑動運動と同じ値を使用し、ϕ：38° を用いた。この図より、金網変形流体力係数は、斜面角度ψ、有効斜面長lによって敏感に変化する。**図**－4.13 は、中込材が洗掘を受けた状態の金網上下面の流速分布である。この図から金網の下面側は急激に流速が減少しており有効斜面長としては中込材一粒～二粒（4cm～8cm）程度が妥当であることがわかる。また、**図**－4.12 からは、斜面角度が一定でなければ金網変形流体力係数が一定とはならないが、実験値から求めた金網変形流体力係数は流速と関係なく一定となっている。しかし、今回の実験では斜面角度が一定だったかどうかは確認できていない。

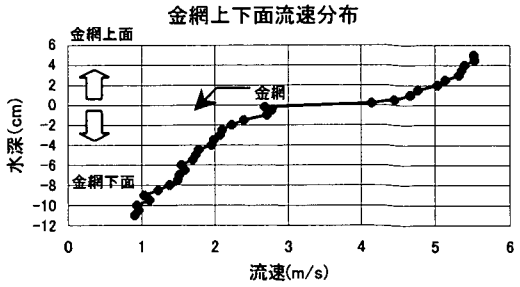


図－4.12　土圧に着目した考え方の理論値

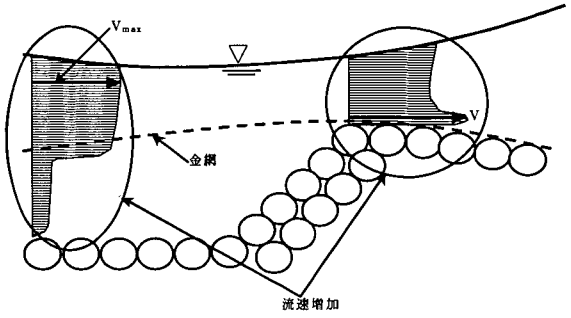
以上を総合的に考えると今回の実験のように、ふとんかごの上を流水が平行に流れる場合の金網変形流体力の評価は、土圧に着目した考え方ではなく、中込材の回転・滑動運動の方が有力な考え方と判断される。

(3)中込材に作用する流速の評価

中込材の回転・滑動運動に基づく金網変形流体力係数の理論値と実験値の違いの原因には、中込材に作用する流速の評価の差違から考えられる。今回の実験値は、**図－4.14**に示す位置の最大流速 V_{max} を流速として評価し、金網変形流体力係数を算定したものである。しかし、実際に金網の変形を起こす中込材に作用する流速は、この図の金網と中込材が接している部分の流速である。通常このような急縮部では流線が集中し、図に示すように、実験で測定した位置よりも流速が増加している可能性がある。このことから、今回の実験値算定に用いた流速は、実際に中込材に作用した流速より過小に評価しているため理論値と合わないと考えられる。



図—4.13　金網上下面の流速分布



図—4.14 金網変形地点の流速分布モデル

4.4　今後の課題

ふとんかごの設計法としてはまだ以下の課題が残る。

◆ふとんかごの許容変形量をどこまでとするのか決定する必要がある。

◆金網と中込材の接している場所の局所流速を測定し、金網変形流体力係数の理論値が妥当であることを確認する必要がある。

◆河川流速から金網変形流体力を算出する設計流速への変換法を示す必要がある。

◆設置するふとんかごの上流端では、ふとんかご前面に直接流水が作用する。そのような場所での中込材の移動、金網の変形について検討する必要性がある。この場合には、土圧に着目した考え方が使える可能性がある。

◆斜面に設置した場合の中込材の移動し易さ等を考慮した設計を行う必要性がある。

参考文献

1）Office Maccaferri S.p.A.:Flexible linings in Reno mattress and gabions for canals and canalized water courses,1985

2）平林桂、望月達也、藤田光一：河床上の球体に作用する流体力の時間変動及び球体の運動解析、水工学論文集、第41巻、pp723～pp728、1997.2

3）（財）国土開発技術研究センター　編：護岸の力学設計法、1999

(藤田,諏訪,服部,瀬崎,東)

4.4.2　新素材・新工法を用いた防御工の開発（その２）

研究期間：平 10～平 11
担当：河川環境研究室

【要旨】
本研究は、土壌が充填でき、かつ植物が生育できる間隙を有した多孔質なシートである侵食防止シートを河岸や堤防に敷設することにより侵食を防御する工法の開発を目的としている。
11年度は、自然共生研究センター実験河川Ｂおよび実験河川Ｃに試験施工した８タイプの浸食防止シート防御工法の施工１年後の覆土活着状況及び植生繁茂状況を把握した。その結果、覆土の剥離や溝状の亀裂から土砂の流出等がみられる等、覆土維持機能が低いものもみられた。植生については、植被率が低く、約60％が1～越年生の植物で、遷移の初期段階であった。帰化率は26%であった。

１．目的
浸食防止シートとは、土壌が充填でき、かつ植物が生育できる間隙を有した多孔質なシートである。このシートを用いた浸食防止工法とは、河岸や堤防に浸食防止シートを敷設することにより浸食をくい止め、かつシート上に植物が生育することにより、成立した植生が持つ浸食防止機能を活用する工法である。従来のコンクリートを使用した護岸に対し、コストもかからずまた景観的にも生態的にも良好な川づくりの推進に役立つことが期待されている。本研究では、これらの開発を目的としている。
11 年度は、自然共生研究センター実験河川Ｂおよび実験河川Ｃに平成 10 年 10 月に設置した８タイプの浸食防止シート防御工法の施工後の覆土の活着状況及び植生の繁茂状況を把握することを目的とする。

２．研究の方法
図-1のように侵食防止シートは１タイプ延長約30mで、Ｂ河川、Ｃ河川ともに両河岸法面に４タイプづつ８タイプ、両河川で合計16の実験区間が設置されている。設置から約１年経過した平成11年10月に覆土の活着状況及び植生の繁茂状況調査を実施した。覆土の活着状況は、崩落の大きさを測定し点数化して評価した（表-1）験河川は、設置後、３m^3/sまでの出水を経験している。覆土の活着状況は、崩落の長さで評価した。植生については、各シートごとに確認された種を記録した。

３．研究結果
３．１　覆土の状況
現地調査の結果、Ｂ河川では左岸・右岸で記録された崩落状況に特に傾向はみられなかったが、Ｃ河川では左岸に比べて右岸の調査区間で崩落が「ほとんどない」と記録された区間が明らかに多かった。また、浸食防止シートのタイプと根固め工の組み合わせに着目してみると、Ｂ河川、Ｃ河川ともに平板コンクリートと繊布型シートＣの組み合わせの調査区間であるB-1、C-1（写真-1）で崩落が非常に多くみられ、平板コンクリートと不織布型シートＣの組み合わせの調査区間である B-1、C-1 で崩落はほとんどみられなかった。このほか、Ｂ河川、Ｃ河川ともにB-3 と-3（ポーラスコンクリートと不織布型シートＡ）、B-4 と C-4（ポーラスコンクリートと繊布型シートＡ）、B-5 と C-5（捨て石と繊布型シートＤ）で崩落がみられた。
Ｂ河川とＣ河川で調査結果が明らかに異なっていたのは、B-6とC-6（捨て石と繊布型シートＢ）、B-7とC-7（ふとん籠と不織布型シートＢ）、B-8とC-8（ふとん籠と繊布型シートＤ）で、B-6、B-8およびC-7で崩落がみられたのに対し、C-6、C-8およびB-7では崩落はほとんどみられなかった。

表-1　評価値の算出方法

崩落状況の概要の記録	評価値
非常に多い	10以上
多い	3～6
ややある	1.5～2.5
ほとんどない	0

評価値＝Σ｛（$l_1 \times n_1$）＋（$l_2 \times n_2$）＋…｝
l：崩落の規模の長さ（最大値：単位m）
n：崩落箇所数

３．２　植生の状況

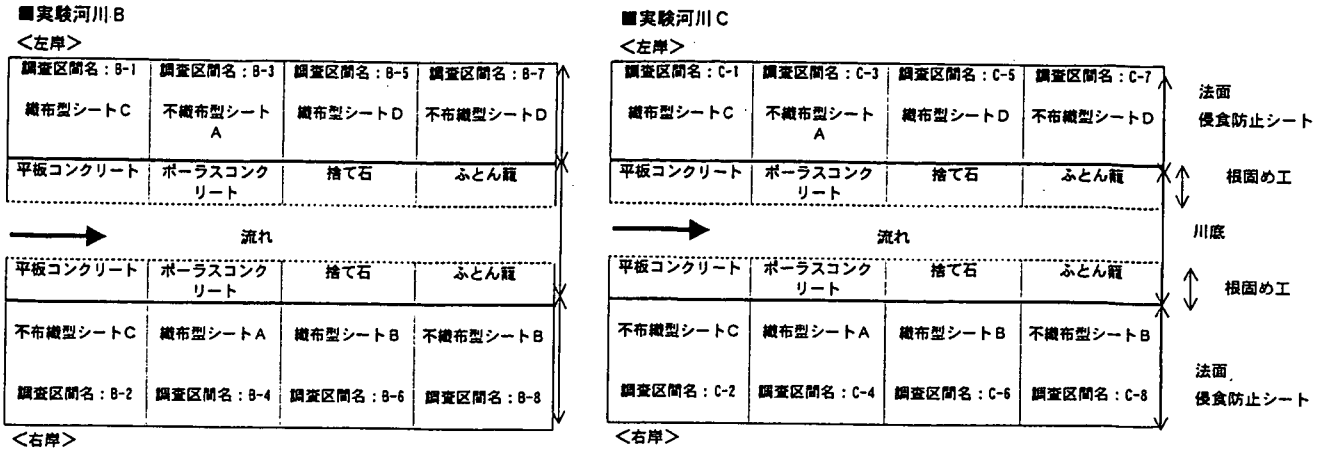


図-1　侵食防止シート施工の状況



写真-1　覆土の崩落状況　（C-1）



写真-2　植生繁茂状況（C-3）

調査対象となる16区間全体における植物の繁茂状況を観察した結果、水際付近には幅約20～100cm程度の帯状に1年生草本であるオオクサキビやヌカキビ、キシュウスズメノヒエ、アメリカセンダングサ、ヤナギタデなどが優占あるいは混生する植生が概ね50～100%の高い植被率で成立していた。浸食防止シーの帯状に1年生草本であるオオクサキビやヌカキビ、キシュウスズメノヒエ、アメリカセンダングサ、ヤナギタデなどが優占あるいは混生する植生が概ね50～100%の高い植被率で成立していた。浸食防止シートを敷設した法面の法面はオオクサキビ、ヌカキビ、コヌカグサが優占あるいは混生する植生が成立し、植被率は概ね10～50%程度と水際に較べて低かった。またB-1（平板コンクリートと繊布型シートC）やB-5（捨て石と繊布型シートD）のように、水際で10～25%、法面では10%以下とほとんど植生の繁茂がみられない区間もあった。

調査区間全体で生育を確認した植物種は27科77種であり、B河川は23科65種、C河川は25科63種であった（同定不能の種を含む）。このうち、44種（57.1%）が遷移の最も初期の段階で植物群落を成立させる1～越年生草本で、28種（36.4%）が多年生草本、木本類が5種（6.5%）であった。なお、造成地などにいち早く侵入する帰化植物は20種（26.0%）であった。調査区間別の出現種数をみると、C-3（ポーラスコンクリートと不織布型シートA）（写真-2）の38種が最も多く、C-5（捨て石と繊布型シートD）が最も少なかった。

4．主な研究成果

・自然共生研究センター：自然共生研究センター報告書Vol.1、2000.

（島谷幸宏、薗田顕彦、皆川朋子）

4.4.3　新素材・新工法を用いた防御工の開発（その３）

研究期間：平10～11
担当：河川環境研究室

【要旨】
自然共生研究センター実験河川Ｂ・Ｃの下流部、河岸開発研究ゾーンには、８種類の侵食防止シートが設置されている。これらのシートの材質はプラスチック及び化学繊維であり、一部には環境ホルモン物質と疑われている物質が含まれており、それが河川水やシート上の土壌に溶出してくる可能性が考えられる。
１１年度は、河岸開発研究ゾーンを挟む上・下流地点で環境ホルモンの水質調査を行うとともに、シート直上の土壌分析を行った。その結果、水質・土壌のいずれにおいても、シートからの環境ホルモン溶出は全く認められなかった。

１．研究目的

侵食防止シートとは、土壌が充填でき、かつ植物が生育できる間隙を有した多孔質なシートである。このシートを用いた侵食防止工法とは、河岸や堤防に侵食防止シートを敷設することにより侵食をくい止め、かつシート上に植物が生育することにより、成立した植生が持つ侵食防止機能を活用する工法である。従来のコンクリートを使用した護岸似たいし、ローコストで景観的にも生態的にも良好な川づくりの水深に役立つことが期待されている。本研究では、これらの開発を目的としている。

１１年度は、侵食防止シートの実用性を評価する一環として、シートの材質に含まれる環境ホルモン物質が溶出し、水質及び土質に影響を及ぼす可能性について検討する。

２．研究方法

２．１　実験河川における侵食防止シートの設置状況

自然共生研究センター実験河川Ｂ及びＣの、最下流部にある河岸開発研究ゾーンの斜面には、表－１に示す８種類の侵食防止シートが設置されている。ここで、実験河川ＢとＣの設置状況は全く同じである。これらのシートはプラスチックまたは化学繊維製であり、環境ホルモン物質（厳密には、その可能性が考えられる物質）を含んでいるものもある。

表－１　河岸開発研究ゾーンに設置されている侵食防止シートの材質（メーカーからのアンケート結果）

シート名	主　材　料	添　加　剤
Ａ－３	ポリプロピレン	着色剤（カーボンブラック）、フタル酸エステル微量
Ａ－４	ポリプロピレン	着色剤（カーボンブラック）
Ａ－８	ポリプロピレン	着色剤（カーボンブラック）
Ｂ－２	ポリ塩化ビニリデン	着色剤（有機系及び無機系顔料） 添加剤（脂肪酸誘導体、エポキシ化植物油）
Ｃ－１	ポリプロピレン	使用せず
Ｃ－３	ポリエチレンテレフタレート（PET）	使用せず
Ｄ－１	ポリプロピレン、ポリエステル	ノニルフェノール（ポリエステルに使用）
Ｄ－３	ポリプロピレン	着色剤（クロム酸鉛黄色顔料、酸化チタン系顔料）

2．2　サンプリング方法

1）採水方法

実験河川Cの河岸開発研究ゾーンの直上流及び直下流の2地点で採水した。雨天・洪水時を避け、1日に付き午前・午後の2回採水し、これを1週間の間隔を置いて3日行った。採水器はステンレス製のバケツ・柄杓を、また試料容器は前日に有機溶媒でよく洗浄後乾燥させた硬質ガラスビンを使用した。これらの作業は、建設省「環境ホルモン調査・分析マニュアル（案）平成10年10月」に準じて行った。

2）採泥方法

実験河川Cの河岸開発研究ゾーンにおいて、表－1に示すシートの内、6種類のシート直上の泥及びシートを設置していない1個所の泥（対照試料）を小型スコップにより採取した。試料の採取・保存等においては、採水同様に周囲からの汚染を避けるよう、最大限の注意を払った。

3）分析項目

水質分析項目を表－2に、また土質分析項目を表－3に示す。土質分析項目は、本研究とは別途行った、有機溶媒によるシート片の溶出試験結果により溶出が認められた物質・シートを分析対象とした。

表－2　水質分析項目・物質

項目（物質）名	略 号	備　　考
pH、導電率、SS、TOC		一般的な水質項目
フタル酸ジ-2-エチルヘキシル	DEHP	プラスチック添加剤（可塑剤）
フタル酸ブチルベンジル	BBP	〃
フタル酸ジ-n-ブチル	DBP	〃
アジピン酸ジ-2-エチルヘキシル	DEHP	〃
4-n-オクチルフェノール	NOP	界面活性剤の原料、分解物
4-t-オクチルフェノール	TOP	〃
ノニルフェノール	NP	〃
ビスフェノールA	BPA	ポリカーボネート樹脂等の原料
ノニルフェノールエトキシレート	NPEO	業務用洗剤（分解によりNPが生成）

表－3　土質分析項目・物質

項目・物質名 ＼ シート名	A－8	B－2	C－1	C－3	D－1	D－3	対照試料
強熱減量	○	○	○	○	○	○	○
4-t-オクチルフェノール			○		○	○	○
ノニルフェノール		○	○	○	○	○	○
ビスフェノールA	○	○	○	○	○	○	○
フタル酸ジ-2-エチルヘキシル		○	○	○	○	○	○
フタル酸ジ-n-ブチル	○	○	○	○	○	○	○
アジピン酸ジ-2-エチルヘキシル		○					○

4）分析方法

環境ホルモン物質は、建設省「環境ホルモン調査・分析マニュアル（案）［水質分析編］及び［底質分析編］」（平成10年10月）により分析した。ただしノニルフェノールエトキシレートのみは左記マニュアルに記載されていないため、建設省「下水道における内分泌攪乱化学物質調査マニュアル（案）」（1999年6月）により分析した。

なお、本調査では全検体を二重測定し、それらの測定値が30%以上食い違う場合は予備試料を使用して再分析し、近い２つの数値を採用した。本調査で設定した環境ホルモン物質の検出下限値を表－４に示す。

表－４　本調査で設定した環境ホルモン物質等の検出下限値

物　　質　　名	水質分析 (μg/l)	土質分析 (μg/kg)
フタル酸ジ-2-エチルヘキシル、フタル酸ジ-n-ブチル	0.5	12
フタル酸ブチルベンジル	0.2	－
4-n-オクチルフェノール、4-t-オクチルフェノール	0.03	0.5
ノニルフェノール	0.03	1.5
ビスフェノールA	0.01	0.1
アジピン酸ジエチルヘキシル	0.01	15
ノニルフェノールエトキシレート	0.1	－

３．研究結果

３－１．水質調査結果

環境ホルモン物質の水質調査結果を表－５に示す。フタル酸系３物質とオクチルフェノール系２物質及びアジピン酸ジエチルヘキシルは全く検出されなかった。少なくとも検出可能なレベルではこれらの物質が水に溶け出さないことは明らかである。これに対して、ノニルフェノールとビスフェノールA及びノニルフェノールは上下流のどちらからも検出された。一見すると上流より下流の方がわずかに濃度が高いようであるが、ノニルフェノールとビスフェノールAの濃度は、大部分のデータが表－４に示した検出下限値と同じか、やや高い程度であることに注意する必要がある。一般に、化学分析においては、検出下限値とはその物質が存在することを確認できる濃度であって、定量可能な濃度のことではない。

ある程度正確な測定が可能な最低濃度を示す定量下限値は、通常の化学分析では検出下限値の３倍程度とされるが、環境ホルモン物質のような超微量分析においては、それよりかなり大きい。なぜなら、表－４に示した検出下限値は、標準物質を蒸留水に添加して繰り返し分析を行い、そのバラツキから算出したものであって、採水時・試料運搬時・試料保管時等に生じうる試料の汚染等の様々な誤差要因を考慮していないカタログデータに過ぎないからである。したがって実試料の定量下限値は、検出下限値の５倍程度（ノニルフェノールで0.15μg/l、ビスフェノールで0.05μg/l）と推測される。

表－５のノニルフェノールで、0.15μg/l以上の測定値は、３回目午前のデータだけであるが、この場合は上流より下流の方が低い値を示している。ビスフェノールについては全て定量下限値をはるかに下回っており、上下流のわずかな濃度差を論ずるのは無理である。つまり、表－５の上下流の濃度差は、完全に分析誤差の範囲内であって、シートからの溶出による影響を示すものとは考えられない。

ノニルフェノールエトキシレートは、全検体でノニルフェノールの10倍以上の比較的高濃度で検出され、下流側が高いケースが４回、逆が２回あり、平均では約8%高い。しかし、これも超微量分析における分析誤差（最善の場合でCV10%程度）の範囲内の差に過ぎない。また、ノニルフェノールエトキシレートは工業用洗剤の一種であるが、これ自体は環境ホルモン物質ではなく、これが加水分解した場合にノニルフェノールが生成するというものであり、今回調査対象とした侵食防止シートに含まれている可能性はなく、実験河川の水源である新境川の河川水から供給されたものと考えられる。

結論として、今回調査した環境ホルモン物質の全項目について、侵食防止シートからの環境ホルモン物質の溶出を示す水質変化は認められなかった。

表－５　侵食防止シート設置区間上下の水質調査結果一覧表（二重測定の平均値）　（単位：μg/l）

物　質　名	地点	１回目（8/25）		２回目（9/1）		３回目（9/8）		平均値*
		午前	午後	午前	午後	午前	午後	
フタル酸ジエチルヘキシル	上流	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
	下流	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
フタル酸ブチルベンジル	上流	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
	下流	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
フタル酸ジ-n-ブチル	上流	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
	下流	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
ノニルフェノール	上流	0.08	0.08	0.10	0.08	0.29	0.11	0.12
	下流	0.12	0.11	0.11	0.11	0.22	0.14	0.13
ビスフェノールＡ	上流	<0.01	<0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.010
	下流	<0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.011
4-n-オクチルフェノール	上流	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03
	下流	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03
4-t-オクチルフェノール	上流	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03
	下流	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03
アジピン酸ジエチルヘキシル	上流	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	下流	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
ノニルフェノールエトキシレート	上流	1.3	1.7	3.7	2.6	7.8	4.7	3.6
	下流	1.6	1.4	3.8	2.3	9.3	5.3	3.9

＊検出下限値未満は検出下限値とみなして計算した。端数は切り捨て。

３－２．土質調査結果

環境ホルモン物質等の土質調査結果を表－６に示す。シートの影響を全く受けない対照試料と、シート直上の試料との間には、有意な差は全く認められない。

表－６　侵食防止シート直上の土質分析結果（単位：μg/l）

項目・物質名＼シート名	Ａ－８	Ｂ－２	Ｃ－１	Ｃ－３	Ｄ－１	Ｄ－３	対照試料
4-t-ｵｸﾁﾙﾌｪﾉｰﾙ	－	－	0.7	－	<0.5	<0.5	<0.5
ﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙ	－	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5	2.3	1.8
ﾋﾞｽﾌｪﾉｰﾙ	0.20	0.15	0.16	0.14	0.15	0.28	0.20
ﾌﾀﾙ酸ｼﾞｴﾁﾙﾍｷｼﾙ	－	12	<12	<12	13	16	16
ﾌﾀﾙ酸ｼﾞﾌﾞﾁﾙ	<12	<12	<12	<12	<12	<12	17
ｱｼﾞﾋﾟﾝ酸ｼﾞｴﾁﾙﾍｷｼﾙ	－	<5	－	－	－	－	<5
強熱減量（％）	3.9	4.1	3.9	3.9	3.9	3.8	4.0

注：強熱減量は１回の測定値、他は二重測定の平均値

３．３　まとめ

水質、土質の調査結果から、実験河川に設置した侵食防止シートから環境ホルモン物質が溶出している形跡は全く認められなかった。

（島谷、薗田、皆川）

4.4.4　新素材・新工法を用いた防御工の開発（その４）

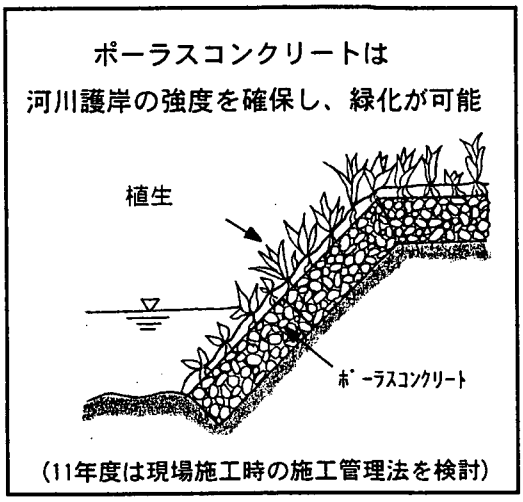
研究期間：平９～平１２
担当：コンクリート研究室

【要旨】

「自然を生かした川づくり」を目指した河川整備事業の推進が求められているが、この実現には治水面での安全性が高く、かつ豊かで多様な動植物の生息・生育の可能な低コストの護岸工法の確立が急務である。

ポーラスコンクリートは比較的高い強度を有し、また空隙部に植生基盤材を充填することで緑化や微小生物の生息が可能となるため、多自然型河川護岸への適応に期待が高まっている。本研究はポーラスコンクリートの基礎性状、河川護岸への適応方法、品質管理法等について検討を行うものである。

11 年度はポーラスコンクリートの現場施工時の品質管理法について検討した。



ポーラスコンクリート

１．品質管理法確立の必要性

ポーラスコンクリートは単粒径の粗骨材とセメントペーストで構成された「オコシ」状のコンクリートである。この特殊な構造のため、従来のフレッシュコンクリートの品質管理試験法が適用できず、現場施工に適応した簡易かつ的確な品質管理試験法の確立が望まれている。特にポーラスコンクリートは乾燥の影響を受け易く、乾燥によってフレッシュ性状が低下すると締固ても十分な結合が得られず、強度が著しく低下する。したがって、良好な締固めが可能なフレッシュ性状であるかどうかを逐次、迅速に判定する必要がある。また緑化のためには適切な空隙率の確保が重要であり、空隙率を迅速に測定する必要がある。

２．フレッシュ性状試験

2.1 実験概要

実験に使用したポーラスコンクリートの配合は表－１の配合を基本として、粗骨材寸法、細骨材の有無、高性能ＡＥ減水剤の種類や添加量、放置条件を変化させ、計 11 ケースとした。各配合ごとに練上り直後、１，２，３時間経過後に以下の試験を実施し、フレッシュ性状を検討した。

(1)ペーストフロー試験：ポーラスコンクリートからセメントペーストを採取し、JIS A 5201 の方法によりフロー値を測定した。

(2)ペースト落下量試験：受け皿を取り付けたフルイ目 10mm、φ 20cm のフルイにポーラスコンクリートを約 2kg 採取し、振動を与えたときに落下するペースト量を測定した。振動の与えかたは段階的に①振動を与えない段階、②JIS A 5201 で使用されるフローテーブルにより 15 打の落下を与えた段階、③フローテーブルによりさらに 35 打(合計 50 打)の落下を与えた段階、④さらに外面バイブレータ(振動板 12 × 15cm、振動数 9,000v.p.m、質量 3.5kg)による振動を試料上面から５秒間与えた段階、⑤外面バイブレータによる振動をさらに５秒間(合計 10 秒間)与えた段階、の計５段階とした。

(3)圧縮強度試験：φ 15 × 30cm の供試体を２本ずつ作成し、材齢 14 日後に圧縮強度試

表－１　ポーラスコンクリートの基本配合

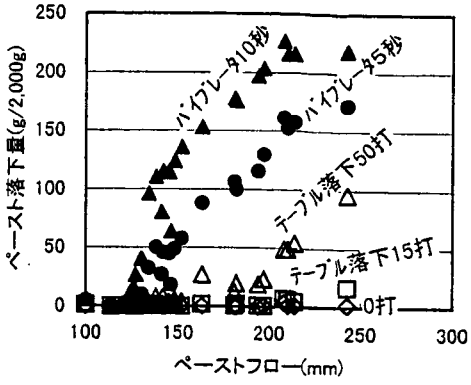
水セメント比（%）	空隙率（%）	粗骨材寸法	単位量(kg/m³)			混和剤の種類
			水	セメント	粗骨材	
25	25	5 号	83	333	1,478	高性能 AE

験を実施した。

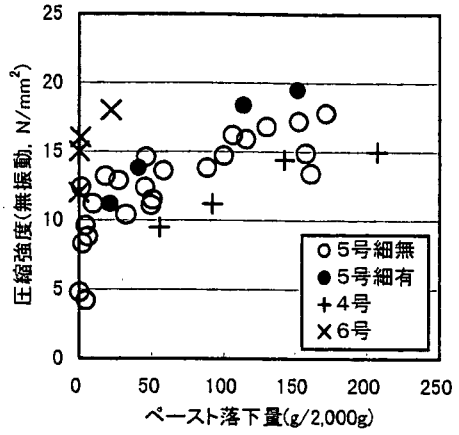
2.2 実験結果

フロー値と圧縮強度は良い相関を示し、フロー値が 150mm 以下になると強度の低下傾向も大きくなる結果となった。この結果から、フロー値によってフレッシュ性状を適切に評価し得る可能性があるが、施工現場においてフロー試験に必要なペーストを採取し、フロー試験を実施するのは容易ではない。

図－1は粗骨材に5号砕石を使用した配合について、フロー値とペースト落下量との関係を示したものである。この図からテーブルフローの落下による試験結果は値が小さく判然としないが、外面バイブレータを使用した結果はフロー値と良い対応を示した。そこで、バイブレータを5秒間使用した場合のペースト落下量と圧縮強度の関係を図－2に示す。両者の間には良い対応関係が認められ、圧縮強度はペースト落下量の減少に伴ってほぼ直線的に減少し、ペースト落下量が 10g/2,000g 以下で大きく低下する結果となった。ただし、配合の条件の違いによって落下量が異なるため、条件に応じた適切なバイブレータの振動時間を設定する必要があると考えられる。



図－1 フロー値とペースト落下量の関係



図－2 ペースト落下量と圧縮強度の関係(バイブレータ5秒)

3．空隙率測定試験

3.1 実験概要

以下の2通りの方法によりポーラスコンクリートの空隙率を測定し、操作性と精度について比較した。

(1)試験法A：フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法(JIS A 1128)に準拠し、エアメータ容器内に試料を詰める。次に試料の空隙に静かに水を注入し、水面が容器上縁に達した時点での注水量を測定する。次にエアメータの蓋を締め、空気量を測定する。注水量に相当する空隙を連続空隙率、これに空気量測定値を加えた値を全体空隙率とする。

(2)試験法B：(1)と同様に容器内に試料を詰めた段階で空隙に水を注水する。注水後に容器側面を木づちで叩き、試料内の気泡を追い出す。気泡が完全に出なくなった状態で、水面が容器上縁に達するまで注水を行い、注水量を測定する。この注水量に相当する空隙を全体注水量とする。ただし空気を完全追い出すことは困難であるため、実験では確認のため蓋を締め空気量も測定した。

3.2 実験結果

実験結果の一例を紹介する。試験法Aでは静かに投入した水の質量から得られる連続空隙率は 21.9 %、空気量測定値は 4.0 %であり、全体空隙率は 25.9 %となった。一方、試験法Bではモールドを叩いて空気を追い出したときの注水量から全体空隙率 24.9 %を得たが、空気は完全には抜け切れてはおらず、空気量を測定した結果 0.8 %が残留していた。このため全体空隙率は 25.7 %となった。

この結果から、試験法の違いによる全体空隙率の差は認められなかった。試験法Bでの気泡の追いだし作業が容易ではないことを考慮すると、試験法Aが優れていると考えられる。

4．主な研究成果物

・片平博,河野広隆：ポーラスコンクリートのフレッシュ性状判定法の検討,土木技術資料,Vol.41,No.9,1999.9

(河野、片平)

4.4.5　新素材・新工法を用いた防御工の開発（その５）

研究期間：平９～平１２

担当：緑化生態研究室

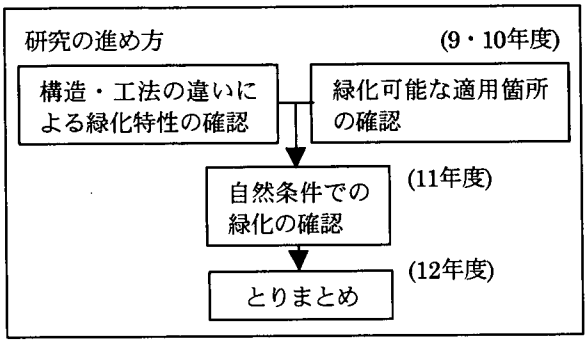
【要旨】

ポーラスコンクリートは緑化可能でかつ比較的大きな強度を有することから、通常のコンクリートに変わる護岸材として期待されている。本研究はポーラスコンクリートを用いた緑化が可能な条件および緑化に適した構造や工法を明らかにすることを目的としている。11年度には、実河川に施工されたポーラスコンクリート護岸を対象に植生調査を実施し、植生の現状と施工場所の条件等との関係について検討した。その結果、ポーラスコンクリート河川護岸上に植生を維持するためには、冠水による植生の剥離が生じないところでは植生工を実施すること、冠水する場所であれば土砂の堆積が可能な構造・工法を用いることが重要であることが示唆された。

１　ポーラスコンクリートを用いた河川の護岸緑化工法の開発

１．１　研究目的

施工後数年が経過したポーラスコンクリート護岸に成立している植生と、ポーラスコンクリートの仕様・施工法、河川における適用箇所、施工以来の洪水等の履歴、周囲の環境条件との関係を把握し、緑化に適した構造や工法を明らかにすることを目的とする。



１．２　研究方法

１．２．１　調査対象地

本研究では平成７～10年度にポーラスコンクリートを使用した河川護岸工事が実施された四国、九州地方の11河川、17箇所を調査対象地とした。調査地を一覧表として表１に示す。

表1.　調査地一覧

地方	水系名	河川名	地先名	施工時期	本稿で用いる箇所名
四国	吉野川	今切川	徳島県徳島市米津	H9.3-10.3	今切川
		穴吹川	徳島県美馬郡穴吹町市場	H9.10-11.3	穴吹川
	重信川	重信川	愛媛県伊予郡松前町八倉	H9.3-10.2	重信川
	肱川	矢落川	愛媛県大洲市五郎五区	H9.11-11.1	矢落川
		肱川	愛媛県大洲市米津	H10.2-10.10	肱川米津
			愛媛県喜多郡長浜町長浜	H9.9-10.3	肱川長浜
			愛媛県喜多郡長浜町田淵	H9.10-10.3	肱川田淵
	仁淀川	仁淀川	高知県吾川郡伊野町伊野	H8.3-8.10	仁淀川伊野
			高知県吾川郡春野町小田	H8.3-9.3	仁淀川仁西
九州	六角川	石原川	佐賀県多久市南多久町牟田辺	H7.3-7.10	石原川
	矢部川	矢部川	福岡県山門郡瀬高町長田	H7.12-8.3	矢部川
	緑川	加勢川	熊本県熊本市美登里町	H7.9-11.2	加勢川
	球磨川	球磨川	熊本県人吉市願成寺町	H10.3-10.10	球磨川
	川内川	川内川	宮崎県えびの市加久藤	H10.3-10.12	川内川加久藤
			鹿児島県姶良郡吉松町中津川	H9.3-9.7	川内川中津川
			鹿児島県伊佐郡菱刈町下目	H9.3-9.7	川内川下目
			鹿児島県川内市久見崎	H9.10-10.3	川内川久見崎

１．２．２　植生の調査

各調査地において、ポーラスコンクリート施工箇所での植生調査を行った。各箇所において、植生の組成が平均的な場所に３×３㎡のコドラートをそれぞれ３つずつ設定し、植物社会学的な方法に準じた方法で植生調査を行った。コドラート内の植物の高さに基づく階層区分では、1.5m以上をH1層（草本１層）、0.8～1.5mをH2層（草本２層）、

0.4～0.8mをH3層(草本３層)、0.4m未満をH4層(草本４層)とした。植生調査の際に、ポーラスコンクリート基盤上に堆積した土砂の厚さについても記録した。調査は、四国地方については平成11年10月４～７日、九州地方については10月18～22日に実施した。

１．２．３　施工条件の調査

施工時期、施工位置、護岸分類、ポーラスコンクリート護岸工の仕様については、財団法人先端建設技術センターによるアンケート調査（平成９～10年度）の調査結果を引用し、不足する部分は所轄工事事務所への聞き取りによって補った。また施工後の冠水の状況等について所轄工事事務所での聞き取り調査を行った。

１．３　研究結果

１．３．１　ポーラスコンクリート護岸における植生

各調査地の平均植被率は、全く植生がみられない０％からコドラート内が完全に植物に被われる100％まで様々だった（表2)。これらのうち平均植被率が20％に満たない場所では、植物は主にポーラスコンクリートの目地の隙間などから生じており、ポーラスコンクリート内の空隙への根の侵入はほとんどみられなかった。またこれらの場所では、「川内川久見崎」を除いて、ポーラスコンクリート上に土砂の堆積していなかった(表2)。

平均植被率が20％以上あった場所について、植生調査の結果に対する群落組成表による解析を行った結果、ポーラスコンクリート上の植生は、主に優占種により表3に示すタイプに分類された。表3の分類において、「アキメヒシバ・アメリカセンダングサ他優占型」以外の場所では、優占種以外の植物がほとんどみられない単調な構成の植生だった。また「アキメヒシバ・アメリカセンダングサ他優占型」の場所では、アキメヒシバとアメリカセンダングサの他にシナダレスズメガヤ、ツルヨシ、オギが高い被度を示した。

表 2.各調査地の平均植被率を値が大きい順に示す。またﾎﾟｰﾗｽｺﾝｸﾘｰﾄ上に堆積していた土砂の厚さを示す。今切川は施工箇所が地下であるため不明とした。

調査箇所	平均植被率	土層厚(cm)
穴吹川	100.0%	5
石原川	90.0%	15-20
矢部川	78.3%	0
川内川加久藤	60.0%	0-13
川内川中津川	48.3%	13-25
川内川下目	41.7%	4-13
球磨川	25.8%	5
加勢川	20.3%	30
仁淀川仁西	8.3%	0
川内川久見崎	6.7%	10
仁淀川伊野	3.0%	0
矢落川	1.0%	0
重信川	1.0%	0
肱川田渕	1.0%	0
肱川米津	0.0%	0
肱川長浜	0.0%	0
今切川	-	-

表 3.　ポーラスコンクリート上に成立していた植生の種組成に基づく分類

A　シバ優占型 …… 穴吹川

B　ギョウギシバ優占型

　　B1　ギョウギシバ単独優占型 …… 加勢川

　　B2　クズ・セイバンモロコシ混生型 …… 矢部川

C　ウシノシッペイ・キシュウスズメノヒエ優占型

　　C1　ギョウギシバ混生型 …… 球磨川(高水護岸)

　　C2　シバ・ヤナギタデ混生型 …… 球磨川(低水護岸)

D　アキノエノコログサ優占型 …… 川内川加久藤

E　アキメヒシバ・アメリカセンダングサ他優占型

　　E1　シナダレスズメガヤ混生型…… 川内川中津川

　　E2　オオイヌタデ混生型 …… 川内川下目

F　セイタカアワダチソウ・アキノノゲシ優占型 …… 石原川

1．3．2　ポーラスコンクリート上の植生に影響する条件の検討

ポーラスコンクリート上での植生の盛衰に影響する事が予測される条件、すなわちポーラスコンクリート設置場所の護岸分類、ポーラスコンクリートの仕様、施工した植生工および覆土工の内容、および施工後の洪水履歴に関する情報を表４にまとめる。

表 4. 各調査箇所の護岸分類、ﾎﾟｰﾗｽｺﾝｸﾘｰﾄの仕様、植生工・覆土工および冠水頻度を示す。ﾎﾟｰﾗｽｺﾝｸﾘｰﾄの「形状」の列において、「平面状」とはﾎﾟｰﾗｽｺﾝｸﾘｰﾄ護岸の表面が平坦になるように打設したもの、「枠工型」とは平面状に打設したﾎﾟｰﾗｽｺﾝｸﾘｰﾄの上に高さ 15cm 程度の枠をﾎﾟｰﾗｽｺﾝｸﾘｰﾄあるいは普通ｺﾝｸﾘｰﾄにより設置した形状をもつもの、「植生ブロック型」とは横断構造が J 字型をした植生ﾌﾞﾛｯｸ製品であることを意味する。冠水履歴は施工後の冠水の程度について所轄事務所に聞き取りをした結果に基づいている。

調査箇所	護岸分類	ポーラスコンクリートの仕様					植生工・覆土工	冠水履歴
		形状	厚さ	空隙率	骨材径	土壌充填材		
穴吹川	高水護岸	平面状	20cm	25%以上	15～20mm	有機質材料	張芝	ほぼなし
重信川	床固・根固	表面は平面状	－	25%	不明	なし	なし	あり
矢落川	低水護岸	平面状	35cm	20%	6号	なし	なし	あり
肱川 米津	高水護岸	平面状	35cm	20%	6号	なし	なし	なし
肱川 長浜	高水護岸	平面状	35cm	20%	6号	なし	なし	なし
肱川 田淵	高水護岸	平面状	35cm	20%	6号	なし	なし	なし
仁淀川 伊野	低水護岸	平面状	15cm	20%	13～20mm	土・砂	覆土に芝等の種子混合	あり (頻繁)
仁淀川 仁西	高水護岸	平面状	15cm	20%	13～20mm	なし	覆土に芝等の種子混合	あり
石原川	低水護岸	普通ｺﾝｸﾘｰﾄによる枠工型	22cm	22%	13～20mm	なし	覆土にイネ科種子混合	あり (頻繁)
矢部川	高水護岸	平面状	8cm	30%	不明	土	土壌充填材にｷﾞｮｳｷﾞｼﾊﾞ他の種子混合	なし
加勢川	低水護岸	植生ブロック型	12.5cm	22%	6号	あり	現場土を30cm覆土	あり
球磨川	高水護岸	平面状	60cm	25%	5～20mm	土	表面の溝に現場土をはめこむ	ほぼなし
川内川 加久藤	低水護岸	ﾎﾟｰﾗｽｺﾝｸﾘｰﾄによる枠工型	35cm	22%	5号	土・肥料・種子	土壌充填材に芝類の種子混合・現場土を客土	あり (頻繁)
川内川 中津川	低水護岸	ﾎﾟｰﾗｽｺﾝｸﾘｰﾄ普通ｺﾝｸﾘｰﾄによる枠工型	21.5cm	20%	不明	なし	現場土を５cm程度客土	あり (頻繁)
川内川 下目	低水護岸	普通ｺﾝｸﾘｰﾄによる枠工型	21.5cm	20%	5～13mm	なし	現場土を５cm程度客土	あり (頻繁)
川内川 久見崎	高水護岸	ﾎﾟｰﾗｽｺﾝｸﾘｰﾄによる枠工型	35.0cm	20%	5～13mm	なし	腐葉土を含む土を表面まで覆土	あり (頻繁)

3．1節で示した結果に基づいて、調査地における平均植被率が20％以上であった場所を「植生成立」、それに満たなかった場所を「植生なし」として、表４に示した各条件の影響を検討したところ、ポーラスコンクリート上で植生が成立・維持されていた場所の条件は図1のように整理された。すなわち植生工を実施しなかった場合、冠水がなければポーラスコンクリートの形状がどのようなものであれ、植生は成立していなかった。冠水があってもポーラスコンクリートの形状が平面状であれば植生は成立していないが、表面に枠をつけるなどの凹凸構造があるところでは植生が成立していた。これは凹凸のある表面形状が植生の維持に必要な土砂の堆積を促進するためと考えられる。また植生工を実施した場合、冠水がなければ植生は維持されていた。しかし植生工を実施しても冠水があった場所では、導入された植物は消失しており、このような場所では表面に凹凸構造があれば植生がみられたが、表面が平面状の場所では植生は維持されていなかった。

以上のことから、ポーラスコンクリート上で植生を維持するためには、少なくとも冠水する場所である場合、土砂の堆積を可能にする形状にするなどの工夫が重要であるといえる。

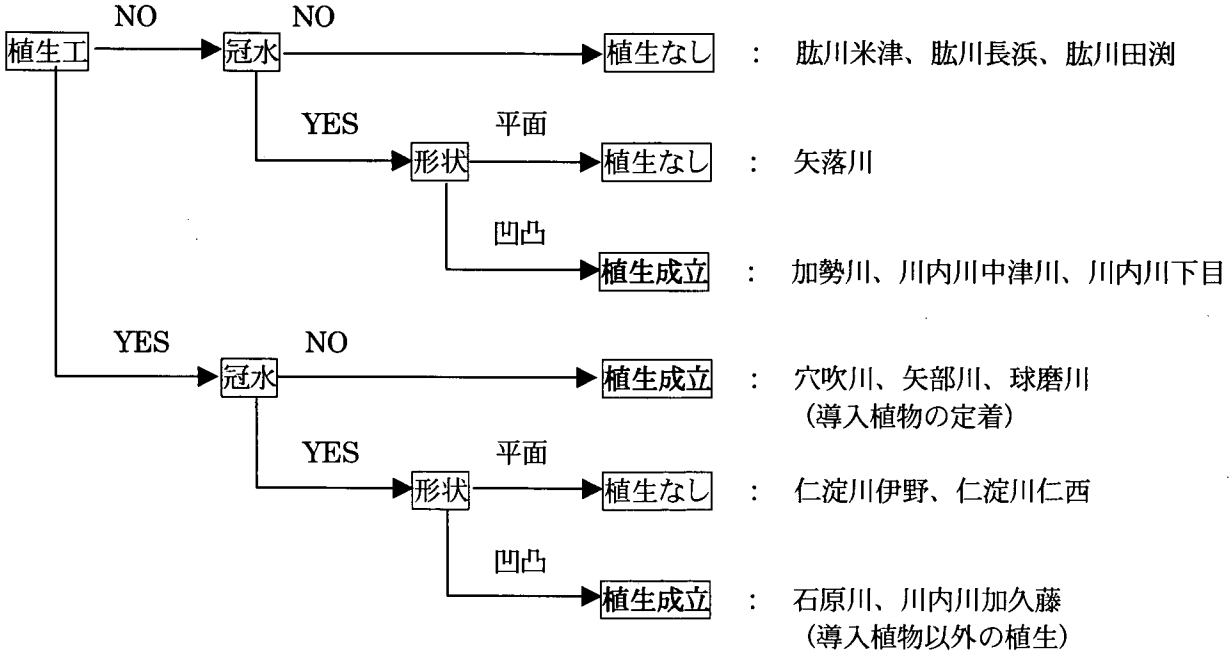


図１　ポーラスコンクリート護岸上での植生の成立と各条件の関係。植生成立は平均植被率が 20％以上に達していた事を示す。

（藤原、西廣）

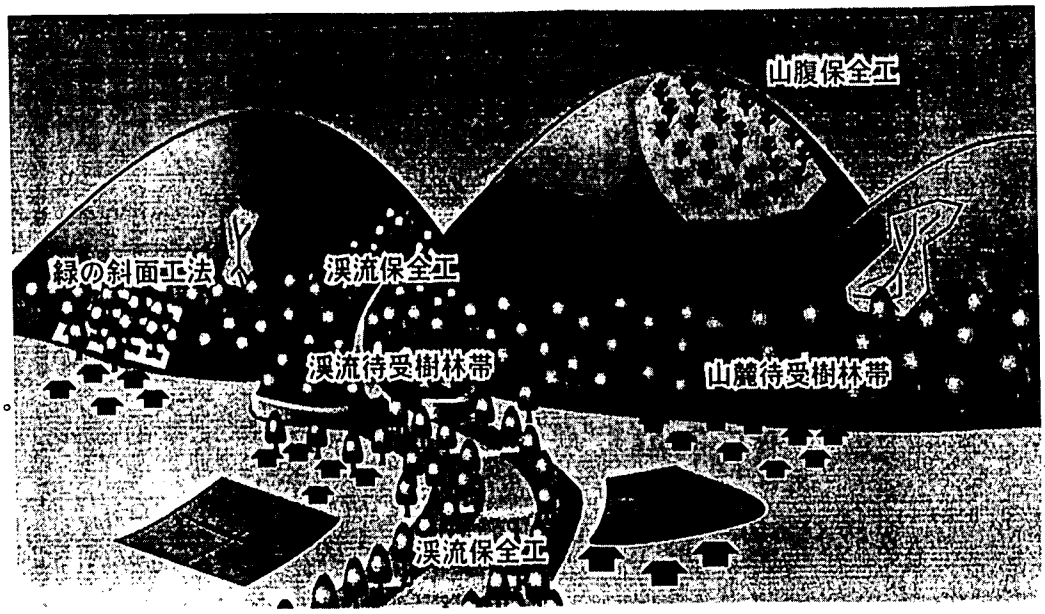
4.5　渓畔林を活用した流路整備に関する調査

研究期間：平成　９年～平成１２年

担当：砂防研究室　　室長：南哲行、研究員：竹崎伸司
地すべり研究室　主任研究員：冨田陽子

【要旨】

生物の種の多様性を保全・維持することが地球的規模で重要な課題となっている。そのため、砂防および河川事業においても災害防止とともに周囲の生態環境と共生する水と緑豊かな渓流・水辺空間の創造を進めている。このような状況の中で、山腹・渓流・山麓の一連の砂防空間の整備に際しても、コンクリート等の堅固な構造物だけではなく、生物の生息環境を形成する渓畔林等の植生を保全・活用した手法を検討することとし、生物とその生息環境に配慮した防災事業の確立を目指すこととした。



砂防空間の総合的な整備イメージ図

平成１１年度は、山腹部における整備手法として、山腹斜面の整備・管理のあり方について検討を行った。

１．　研究の背景および研究方法

土砂の生産を抑制する基本は山腹斜面を植生で被覆することであり、砂防事業においては江戸時代から植生復旧が可能で適切と考えられる裸地斜面においては植生を復旧させる手法を主体として用いてきた。近年は、山地と人間との関わりの変化（エネルギー事情の変化、化学肥料の使用、木工製品よりプラスチックなどの化学製品の供給・需要増、等）等により、裸地化した山は国内ではほとんど見られない。このため大規模な緑化を必要とする山地はごく僅かである。代わって、崩壊地・裸地ではないが表面侵食が著しい、あるいは拡大傾向にある崩壊地の存在など、将来的な荒廃防止のために土砂の生産源対策として山腹工が必要になってきている。また、これらの現象には山腹工でなければ対応できないものである。しかしながら、山腹工は山腹の緑化そのものに総合的な機能[1]を期待しうるものであるが、砂防基本計画の作成[2]において計画超過土砂量の処理方法を決定する際に効果量の算定手法が明確でないこと、山腹工施工後の場の安定性について検証が十分行われていないこと等から、工法選択時に山腹工を選択する動機が弱くなりがちである。また、整備目標が生物体である植生を扱うという点で事業の期間を設定しにくいという問題がある。

そこで本研究では、既往山腹工施工地における実態調査を行い、その結果を整理することで、土砂生産域となっている山腹斜面からの表面侵食および表層崩壊を低減させるという砂防事業としての目標を「荒廃斜面を自然植生の成立している斜面と同等の土砂流出ポテンシャルに近づける」という視点に置き換えて、山

腹斜面の整備・管理の基本的考え方を示した。

2．山腹工の降雨時の安定性の検討

砂防事業においては、山腹斜面が降雨によって表面侵食を受けたり崩壊が発生して、下流にどの程度有害土砂を供給するかは最も大きな関心事である。ところが、斜面上の植生の存在による表面侵食機能防止機能については既に多くの調査報告[3),4)]があるが、山腹工施工地が降雨時に発生する表層崩壊に対してどの程度安定的であるかについては、現地の地形・地質および降雨パターン等の条件が様々であるため絶対的評価は困難である。しかしながら、周辺自然植生における崩壊実態および確率雨量との対比を行うことで安定性をある程度評価することが可能と考えられる。

そこで、まず全国の既往砂防山腹工施工地における被災実態を抽出し、降雨データの分析を行った。

2.1 調査手法

全国の既往山腹工施工箇所について、施工後に被災した全事例、また被災の現象がない箇所については周辺自然斜面で崩壊があったことが確認できた事例または施工後の最も大きな降雨についてデータを所管事務所ごとに１例を収集した。主な調査項目は、工種（基礎工・緑化工）、地質、施工後の主要なまたは被災崩壊事例の場合はその時の降雨データ（以下、降雨データ）、当該地域の 100 年超過確率日雨量、被災実態、等である。

収集した事例のうち、降雨データ等の整理が可能なものは 27 事例であった。これらの事例について、斜面の安定化を目的とする基礎部分の工種ごとに分類した。分類工種は、コンクリート擁壁工またはブロック積工、柵工、法枠工、ふとんかご工、その他、の５種とした。これらの被災・周辺地域での崩壊（以下、被災等）の有無を降雨データとの関係で整理した。

2.2 調査結果と考察

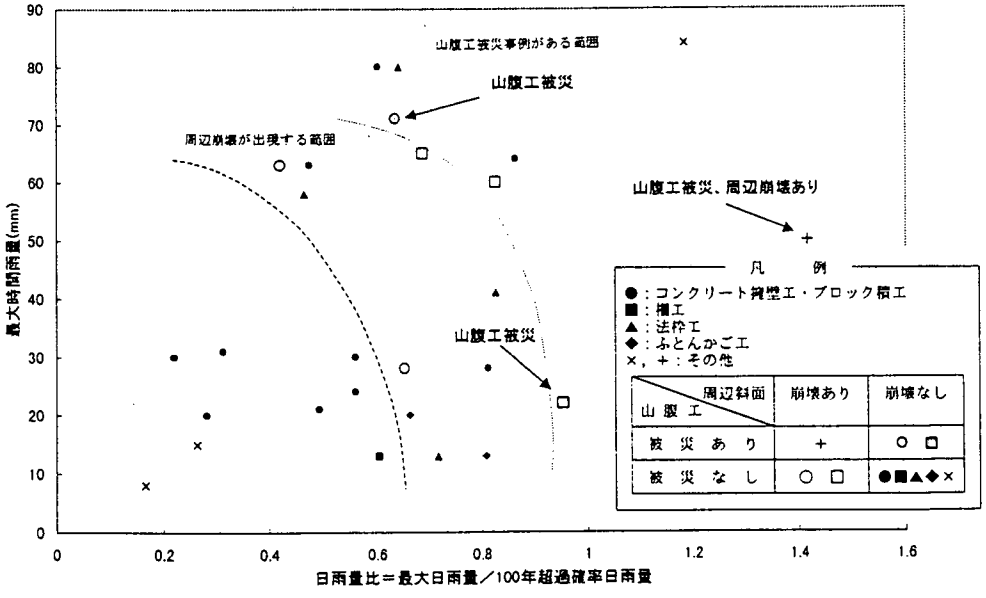


図 2.1　山腹工安定度（最大時間雨量－日雨量比）

図 2.1 は、縦軸に最大時間雨量を、横軸に最大日雨量を 100 年超過確率日雨量で除したもの（以下、日雨量比）をとり、工種毎に被災等の有無を示したものである。これより、以下の調査結果が整理できる。

1)山腹工と周辺斜面両方が被災した事例（１事例）

日雨量比が 1.4、最大日雨量が 300mm を超しており、この地域全体に多数の山腹崩壊・土石流が発生し

た大規模な災害である。

2)山腹工のみが被災した事例（２事例）

いずれも表面排水の処理に起因した被災形態であった。１例は擁壁工の被災、もう１例は柵工の被災である。いずれも施工後１～３年程度であり、植生が十分に回復していなかったために表流水の集中を抑制できなかったことも影響していたのではないかと考えられる。

3)山腹工は被災していないが、周辺斜面が崩壊した事例（４事例）

日雨量比が 0.6 を超した状態、または最大時間雨量が 30mm（多くは 60mm）程度以上で発生しており、一般的に土砂災害が発生し始めると言われる雨量[5]と整合している。

以上から考察すると、日雨量比 0.6、または最大時間雨量 60mm 程度を超すと山腹斜面での崩壊事例が多く見られるようになるが、山腹工では不安定土砂の整形や柵工等の構造物による階段形状の補強を行うことにより、山腹工施工後の斜面の表層崩壊に対する安定性に関して周辺自然斜面と比較して不利なことを示す事例は、表流水処理の問題を除いては見られなかった。なお、日雨量比 1.18、最大時間雨量 84mm で被災等が発生していない事例があるが、この工種は山腹排水工が主体であり、コンクリートまたは張石の水路が集約的に施工されたものであった。

３．山腹工施工地における植生の推移事例

山腹工施工地において、植生による被覆および根系の発達が目標に到達したと考える状態、およびその目的を達成しうる健全な樹林を維持できる基盤条件がどのようなものであるかを整理し、事業形態を区分する判断基準を検討するために、施工後長年月が経過している山腹工施工地を事例として、植生調査（10m × 10m 程度のｺﾄﾞﾗｰﾄ）、土壌調査、根系調査等を実施した。調査対象地は、田上山山腹工（滋賀県）および団子山山腹工（岐阜県）である。ここでは田上山における調査結果を報告する。

3.1　田上山山腹工

1)調査手法

山腹工施工後 30 年、50 年、100 年が経過した区域および自然斜面の中腹部で各１箇所を調査区として選定した。各調査区内で、胸高直径の近似しているアカマツを選定し、その調査木を中心に斜面上方に 80cm、下方に 160cm、側方に各 100cm の範囲内に一辺約 20cm のメッシュを設定し、深さ方向にはおおむね C 層の出現することが確認されている 50cm[6]まで掘削を行った。各メッシュ内での根系の長さ・体積を測定し、根系の成長状況、他の根系との絡み具合、土壌区分、堅密度（山中式土壌硬度計による）等を把握した。なお、体積を測定する根系は直径 5mm 以上のものとした。

2)調査結果

図 3.1 は、田上山の植生調査結果[7]から整理した山腹工施工地の植生遷移および斜面形状の変化状況を示したものである。基礎工（施工方法は積苗工または前面を転石で補強した積石工）部分の状況は、30 年区では段が明瞭でほぼ植栽当時の原型を留めているが、50 年区では一部が崩れ、100 年区では局地的に残っているがほとんど原型を留めていない。

表 3.1 は、調査区における階層別植被率を示したものである。山腹工施工区では樹高 5 ～ 15m の亜高木ないし高木層による植被率は 70%程度以上が確保されており、自然斜面区よりも高密度な植被状況であった。

表 3.2 は根系について、調査地点および調査木の諸元を示したものである。田上山腹工施工地の土壌層厚は施工後経過年数とともに増加する[6]にも関わらず、経過年数や調査木の樹齢が高いことによって根系体積や平面的広がりが増大するといった関係は特に認められなかった。他の根系との絡み合いについては、自然

斜面区ほどではないが、いずれの調査木もおおむね隣接木の根系と接する状況まで平面的成長がなされていた。C 層への根系の侵入状況は、いずれの区域も母岩のクラックに根が到達すれば侵入するというもので、大きな特徴の違いはなく、「地上材積/根系体積」をみると樹齢の高いものの方が大きくなる傾向である。

従って、根系の発達によるせん断抵抗の増加および水平根のネット形成[9]による表層土の安定化機能は、今回調査した胸高直径 15cm 前後の自然侵入したアカマツ程度の樹木が群落を形成していれば、「自然斜面と同等」にするという目標をほぼ達成していると考えられた。

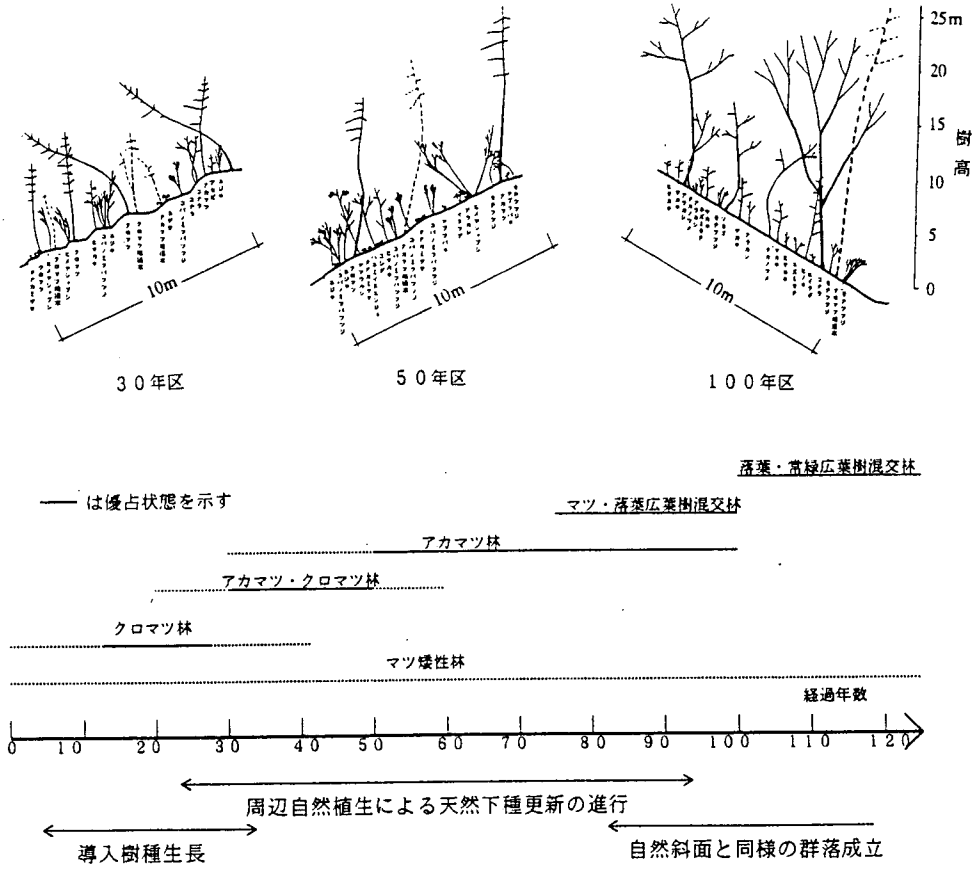


図3.1　田上山植生遷移および斜面形状変化状況図

表3.1　田上山植被状況(斜面中部)(1997)

斜面	階層	高さ(m)	被覆率(%)
30年区	高木層	9.5~14.5	60
	亜高木層	4 ~ 9.5	35
	低木層	1 ~ 4	70
	草本層	0 ~ 1	30
50年区	高木層	10 ~15.5	25
	亜高木層	5 ~10	65
	低木層	1.2~ 5	70
	草本層	0 ~ 1.2	10
100年区	高木層	15 ~20	20
	亜高木層	5 ~15	75
	低木層	1 ~ 5	40
	草本層	0 ~ 1	20
自然斜面区	高木層	8 ~13	40
	亜高木層	2 ~ 8	30
	低木層	1 ~ 2	60
	草本層	0 ~ 1	3

表3.2　田上山調査木諸元(アカマツ)(1997)

	30 年	50 年	100 年	自然斜面
標高 (m)	385	165	180	390
斜面勾配 (度)	35	25	35	32
斜面方位	SW	SSE	WNW	SSE
樹齢 (年)	26	55	75	52
樹高 (m)	11.7	8.9	9.3	6.5
胸高直径 (cm)	16.2	12.4	14.9	13.1
地上材積 (m^3)	0.12	0.06	0.09	0.05
A_0 層厚 (cm)	15	11	12	14
土層厚(cm) A層	6	15	10	10
	(5)	(5)	(6)	(4)
および(堅密度) B層	23	6	50	40
	(10~13)	(13)	(10~13)	(10~13)
計測区内根系体積 ($10^3cm^3/4.8 m^2$)	32.3	15.2	19.4	12.8
地上材積／根系体積	3.72	3.95	4.64	3.91

4.6　中小河川における天然河岸の保全手法に関する研究

研究期間：平11～平14
担当：河川環境研究室

【要旨】
近年都市化が進行した地域では、河川改修に伴い、土や岩などの天然材料で構成された河岸やそれに付随する河畔林が減少・消失している。これら天然河岸は河川周辺に生息・生育する生態系にとって重要な役割を果たしている。本研究は、天然河岸の持つ機能を明らかにすると共にその保全のための手法を研究・開発することを目的とする。
平成11年度は神奈川県を対象地域とし、地質図・地形分類図等既存の資料を用いて県内の地勢を整理し、空中写真を利用して天然河岸の分布を把握する方法を検討した。また、境川をケーススタディ河川として、天然河岸が残されている区間における地質・植生・生物種等を把握し、天然河岸の形状について分析を行った。

1．研究目的

近年、都市化が進行した地域において中小河川改修が進捗し、土や岩などの天然材料で構成された崖地やそれに付随する河畔林が存在する山付き部や堀込み状の河川においても治水事業が行われるようになってきている。
中小河川改修では、疎通能力の増大や河岸の強化を主な目的として、河道の直線化、川幅の拡幅、河床掘削、護岸の設置、河床の敷きならし等が行われる。このような改修により中小河川の環境は大きく改変され、景観は一変し、河川の生物や周辺に生息する生物にとって重要な環境が失われる場合が少なくない。特に河道の直線化や川幅拡幅によって失われる河畔林や崖地等の天然河岸は、魚類や鳥類等の生物の生息場所としても大きな役割を果たしており、消失すると復元が不可能であることから、これらの保全は重要な課題となっている。
しかしながら、天然河岸の保全に対する総合的・実用的研究はこれまであまり行われておらず、その機能や価値については十分に明らかにされていない。また、河川流水による崖地の浸食過程等も把握されておらず、天然河岸を保全することは現在の知見では困難である。そこで、天然河岸の保全手法及び技術について早急に研究を実施し、これを確立する必要がある。

2．研究方法

2．1　天然河岸の機能の整理

本研究で扱う「天然河岸」について定義を明確にし、その構成要素、成立過程等理論的な側面について整理する。また、営巣、採餌、避難のような、天然河岸が果たす機能について生態系学的な観点から情報を整理し、天然河岸の価値について考察する。

2．2　河川の類型化及び天然河岸の分布把握

都市化の進展に伴い天然河岸が消失している中で、天然河岸が残されている地域の分布を把握する。まず、地質図・地形分類図・降雨量分布等の既存資料を利用して中小河川をいくつかの類型に分類する。また、前述の資料に加えて空中写真も利用して天然河岸が残っていると推察される地域を拾い上げ、現地踏査により確認する。

2．3　天然河岸の実態調査

ケーススタディとして実際に天然河岸が残されている区間を調査対象に選定し、現地調査を行う。調査項目としては形状、材質、植生、照度、流水の流速・水質、生物による利用形態、河畔林の構成・樹齢等があげられる。形状は平面・断面形とともに三次元的な把握を行い、これが生物の利用、流水に対する強度とどう関わっているかを詳しく分析する。

2．4　天然河岸の強度の定量化

ケーススタディ河川を対象に河岸を構成する材料、洪水履歴等から浸食スピードや強度を把握する。また、地質別強度に関する資料を収集・整理するとともに、現地材料を用いた浸食スピードの実験的検討等から、天然河岸の強度の定量化を行う。

3．研究結果

3．1　地勢の整理と中小河川の類型化

神奈川県を対象に、前述の資料を用いて県内の地勢を把握し、中小河川について環境要素に基づき分類を行った。神奈川県は大きく西部の起伏の大きい山地、相模川周辺の平坦な段丘と低地からなる中央部、東部の丘陵地帯に分けられる。西部は丹沢山系と箱根火山からなり、地質は火山性の堆積物及び変成岩を特徴とし、この地形の間を酒匂川などが流れている。中央部は相模川両岸に丘陵・大地が発達し、中生代後期から第四期にわたる地層が分布して地質構造が複雑である。段丘は高位のものほどより古いローム層と段丘礫層から構成される。東部は東へ向かって丘陵部～台地～低地となり、多摩丘陵や下末吉台地は後期更新世の段丘堆積物により構成される。

県内の気候は沿海部、内陸台地部、山地の３つに分けられ、降水量は沿海部、内陸台地部では 1,500mm～1,600mm であるのに対し、山地では 2,000mm を超える。県内の中小河川は相模川を境に東西で性格を異にしている。東側の河川は緩流で河川長は短いが、流域の都市化が急激に進んでおり出水時の流量の増大、浸水被害、水質悪化等の問題を抱えている。一方西側の河川は丹沢・箱根の山岳部を水源としており、河川長は短く急流である。地形と降雨量に着目して県内の中小河川を分類すると、表のようになる。

表１　神奈川県内の中小河川

地形		降雨量	河川名
低地	多摩低地	1500～1700mm	矢上川、大熊川、二ヶ領本川
	相模低地	1700～1800mm	小出川、目久尻川、永池川、鳩川、道保川、河内川、渋田川、板戸川
	足柄平野	1900～2000mm	酒匂川、狩川、山王川
台地	下末吉台地	1700～1800mm	平瀬川、早渕川、今井川、帷子川、石崎川、堀川、中村川、堀割川
	相模野台地	1700mm	境川、和泉川、引地川
	愛甲台地	1700～1800mm	中津川、玉川、歌川、鈴川、善波川
丘陵	多摩丘陵	1700mm	平瀬川、鶴見川、恩田川、梅田川、帷子川上流、阿久和川、イタチ川、柏尾川
盆地	秦野盆地	1800～1900mm	葛葉川、水無川、室川、四十八瀬川

3．2　天然河岸の分布の把握

地質図・地形分類図等の既存資料と空中写真を用いて、相模平野周辺で天然河岸が残されていると推察される区間を抽出し、現地踏査を行って分布状況を把握した。その結果、空中写真で抽出された区間は 10 ヶ所程度、実際に現地踏査で天然河岸が確認された区間は 3 ヶ所程度であった。天然河岸の効率的な抽出方法について、さらに資料等を加えて向上させる必要がある。

（田中、萱場、皆川）

4.7　ダム湖における生物生息空間の整備技術の開発

研究期間：平10～平14
担当：緑化生態研究室

【要旨】
野生生物の生息空間創出及び生物多様性の向上を目的としてダム湖畔で行ったビオトープ池の整備について、その効果を検証するための調査を実施した。調査は栃木県の東荒川ダムで行い、整備を実施したダム湖岸と未整備の湖岸において生物の生息状況を調べ、両者を比較した。その結果、未整備の湖岸にはほとんど水生植物が見られなかったのに対して、整備を実施した湖岸では水生植物とともに多種の水生動物が確認された。このことより、未整備のダム湖岸には存在しなかった湿地環境が創出され、湿地に適応した生物の生息が可能となったことが示された。

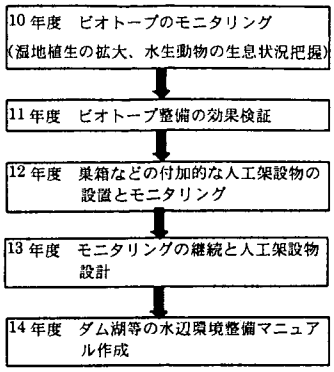


図1　研究のフロー

1．研究目的

ビオトープは、「野生生物の生息や移動に役立つ小面積の空間単位」（武内 1994）や「生物の生息空間」（高橋 1997）を意味し、地域の生態系の質の維持や向上に寄与することを期待して、その保護や創出が各地で試みられている（武内 1994）。なかでも、近年の農地化・都市化の進行で減少が著しい湿地環境の復元・創出が積極的に行われている。ダム湖は人間の水資源利用のために造られた人工的な水辺空間である。しかし、自然湖沼と比較すると、水位変動のため水際の湿地植生が発達しにくいことや、伐採のため湖岸の樹林が少ないことにより、湿地や樹林を利用する鳥類が少ないことが指摘されている（藤原ほか 1998、舟久保ほか 1999）。ダム建設前の森林や渓谷などの環境は復元できないが、ダム湖の水資源を活かしたビオトープを整備して、ダム湖に欠けている生物生息空間の創出を行い、生物多様性の向上を図ることは重要であると考えられる。このような考えから、本研究では、ダム湖におけるビオトープの整備を実際に行い、モニタリングによりその効果を検証することを目的としている。11年度は、ダム湖岸のビオトープ整備の効果検証を目的として、ビオトープ整備を実施した湖岸（以下、整備湖岸という）と実施していない湖岸（以下、未整備湖岸という）とで調査を実施し、それぞれの環境で確認された生物種を比較した。

2．調査地と方法

調査は栃木県塩谷郡塩谷町の東荒川ダムで実施した。同ダムの整備湖岸（図2参照）では、湖岸の小規模な湿地環境（A部分）を保全しつつ、新たに導入された湧水を利用して湿地の面積拡大（上池：8年度造成）とダム湖の水位変動に影響を受けない副ダムの整備（下池：9年度造成）、それをつなぐ水路の整備、池周辺の樹木の植栽が実施された。比較のための未整備湖岸としては、同ダムの比較的傾斜がなだらかな湖岸を設定した。

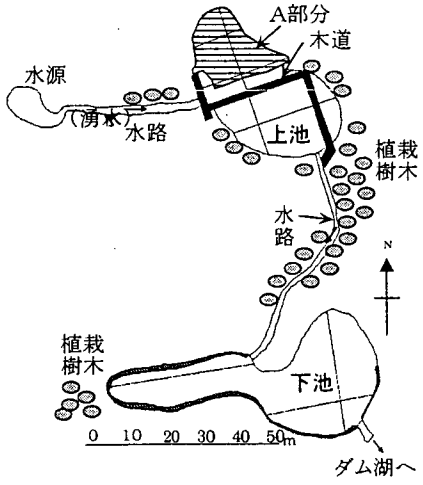


図2　東荒川ダム湖岸で実施したビオトープ整備の内容
（整備湖岸の陸地部分に整備）

調査対象としては、動物の生息環境基盤となる植物と、植物と密着して生息する生物として小動物（主に昆虫類、水生動物には貝類や魚類を一部含む）を取り上げた。調査は、以下の内容で実施した。

(1)湖岸の環境を、夏季制限水位以下（以下、制限水位以下という）、水位変動域（制限水位から常時満水位まで）、陸域（常時満水位から森林のはじまりまで）、の3つに区分した(図3)。

(2)各区分で、相観の異なる植生を把握し、全ての相観植生を網羅するように50cm×50cmのコドラートを設置した。コドラート数は各区分において合計15箇所とした。

2.1 植物

コドラート内に出現する植物の種毎の被度を計測した。結果の整理に際しては、各種の水分条件に対する適性を水生（角野 1994の定義に準拠）、湿生（水生植物ではないが湿ったところに生育する種、生育場所については宮脇ほか 1978を参考にした）、乾生（水生、湿生それ以外の種）に区分した。

2.2 小動物

コドラートが水域にある場合は、たも網で10回すくった。陸域の場合は、各コドラート内にピットホールベイトトラップを設置し小動物を採取するとともに、コドラートの周辺（1m×1mの範囲）でスィーピングを10回実施し、各コドラートで採取した種毎に個体数を計測した。結果は、各種を水生（水中で生活する種）、陸生（陸上で生活する種）に分けて整理した。

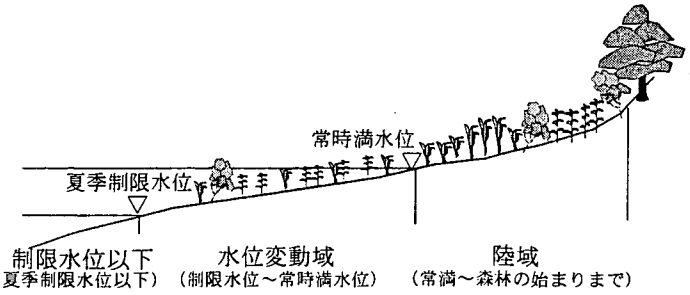


図3 湖岸の環境区分模式図

植物調査およびピットホールベイトトラップ調査、スィーピング調査は11年8月3日から5日にかけて、たも網による水生動物の調査は11年10月15日に実施した。

3．結果と考察

3.1 植物

図4は植物について環境区分別に15コドラートの合計確認種数をまとめたものである。植物の種数は制限水位以下、水位変動域、陸域の順に多くなっていた。ビオトープ整備を行った陸域の場所では、未整備の湖岸には見られない水生植物が確認され、ビオトープ池整備により水生植物の生育場所が創出されたことがわかる。

3.2 小動物

図5に植物と同様に集計した小動物の確認種数を示した。ビオトープ整備を行った場所では、水生の種が多く見られた。これは池の造成とその後の水生植物群落の形成により、水生動物の生息場所が出現したことによるものと考えられる。また、水位変動域では、未整備の湖岸の方が整備湖岸よりも、陸生の小動物の種数が多くなっていた。その要因としては、ビオトープ整備の際に湖岸が造成されたことにより撹乱が起こり、環境が単調なものになってしまったことが考えられるが、詳細は不明である。

以上のように、ダム湖岸におけるビオトープ池の整備によって、水生植物や水生動物といった未整備のダム湖岸には見られなかった生活型の種群の生息する湿地環境が創出され、ダム湖岸全体としてより多様な生物群集が見られるようになったということができる。今後は、制限水位以下や水位変動域に湿地環境を創出するための技術を開発することが課題として考えられる。

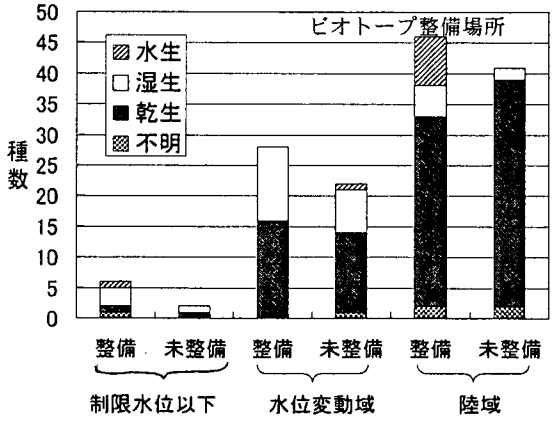


図4 環境区分別の出現種数（植物）

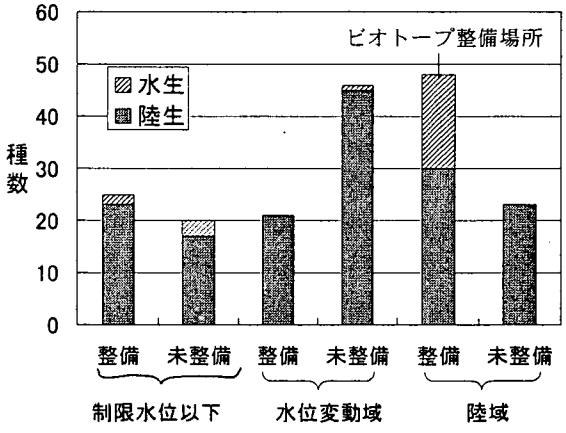


図5 環境区分別の出現種数（昆虫類）

4．引用文献

藤原宣夫・百瀬浩・田畑正敏・半田真理子・田中隆，1998，ダム湖におけるカモ類の行動と環境選択，環境システム研究，26：37-44

舟久保敏・百瀬浩・木部直美・藤原宣夫，1999，鳥類の生息環境としてのダム湖の特性　—自然湖沼との比較—，環境システム研究，27：45-53

角野康郎，1994，日本水草図鑑，文一総合出版，179pp

宮脇昭・奥田重俊・望月陸夫編、北川政夫監修，1978，日本植生便覧，850pp，東京、至文堂

高橋和也，1997，増補　応用生態工学序説，廣瀬利雄監修（株）信山社サイテック，75-84

武内和彦，1994，環境創造の思想，東京大学出版会，198pp

（藤原宣夫、木部直美、百瀬　浩）

4.8　魚類の生息空間の保全・創出手法の開発

研究期間：平成10年～12年
担当：河川環境研究室

（要旨）
平成10年度は全国における堰、頭首工等に設置されている魚道について遡上実態調査事例を収集し、魚道タイプによる魚類の遡上傾向の違いを、各魚道の遡上総数の算出により比較分析した。
平成11年度は様々な魚道が設置されている中から階段式魚道をピックアップし、遊泳魚、底生魚を用いて遊泳行動の観察を行った。その結果、階段式魚道内におけるウグイとヨシノボリの定位と遊泳行動が把握できた。また、今まで、経験的にしか言われてなかった勾配の変化やプール水深・プール延長の変化が遊泳行動、遡上率に影響を与えることがわかった。これらの結果を平成10年度の階段式魚道の結果と照らし合わせることにより、現場での階段式魚道をより効果的に魚類を遡上させることが出来る。

1．研究目的

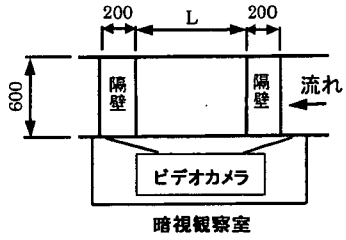
既存の魚道研究の多くは，魚道形状と遡上率との関係[1]，魚道形状と魚道内の流況パターンを扱っており，魚道内に形成される独特の流れに対して魚類がどのような遊泳行動をとるかに関する研究は，十分に行われていない。しかし，魚は魚道内の微妙な流況に対応し，遊泳，遡上するため，魚道内の流況と遊泳行動について十分把握しなければ適切な魚道設計は困難であると考えられる。

本研究では魚道で使用実績の多い，プール式魚道を対象とし，プール内の流況と魚類の遊泳行動との関係を実験的に検討した。

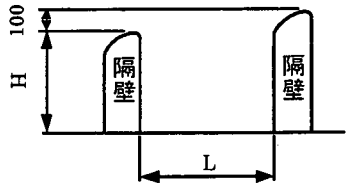
2．研究方法

(1)　実験施設の構造

実験施設は図―1・2に示すように，幅60cmの二次元水路に階段式魚道構造の一部を再現した幅20cmの隔壁2個及び，1つのプールからなる。プール延長（L），水深（H），を変化させることが出来る施設である。水路側面に魚類の遊泳行動が観察できるよう暗視観察室及び観察窓を設けた。魚の遊泳行動を把握するため，観察窓には10cm間隔メッシュを施した。



図－1　実験施設平面図（単位：mm）



図－2　プール部断面図（単位：mm）

(2) 実験内容

a)　実験方法

隔壁間落差は10cmで固定し，プール延長（L），プール水深（H）を変化させ，表―1に示すとおり8ケースの実験ケースを設定した。表におけるプール形状の左・右は隔壁高さを，中央部は延長を示す。それぞれのプール内流況を把握するため，水路中央部の流速を5～10cmメッシュで三次元流速計により計測した。

対象魚種はウグイ（養殖魚）とし，遊泳行動特性は，目視，ビデオカメラ撮影で解析した。

b)　条件の選定

プール式魚道の流況はプール延長・プール水深・隔壁間落差・越流量が重要な要因である。柏井らは階段式魚道の水理学的特性の調査[2]を行い，プール内に形成される流況を定式化している。本研究ではこの定式化した4つの流況パターンが再現できるよう8ケースの実験を行った。又，従来の設計では越流部の流速（水深）が支配要

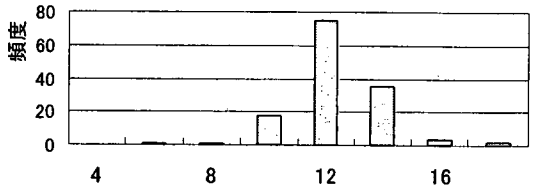
因とされており，越流水深・隔壁間落差を 10cm に設定した。これは，柏井らの実験で越流水脈を比較的安定させる水深であり，また，和田らの実験で比較的遡上率の良かった越流水深、隔壁間落差[9]でもある。

実験に使用した魚の体長は図―３に示すとおりである。各ケース 15 尾程度実験に用いた。観察時間は和田らの実験等による日周期行動報告[9]から 15～19 時の 4 時間とした。

c) 遡上回数

観察時間内に上流隔壁を遡上した回数を遡上回数と呼ぶ。遡上した魚は上流で捕獲していないため，隔壁を下る個体もあり，遡上回数は実験尾数より多くなるケースも見られる。移動のしやすさを遡上回数として定義する。

検討ケース	プール形状	魚道勾配
ケース1	20 50 30	1／7
ケース2	20 100 30	1／12
ケース3	20 200 30	1／22
ケース4	50 100 60	1／12
ケース5	50 200 60	1／22
ケース6	80 50 90	1／7
ケース7	80 100 90	1／12
ケース8	80 200 90	1／22



図―3 ウグイの体長ヒストグラム

3．研究結果

1． 実験結果

(1) ケース１のプール内の流況及び，遊泳特性（図―４）

a) 流況

循環流がプール全体に形成されたが，流速が全体的に速く，低流速域は見られなかった。

b) 遊泳行動

Ａの中を循環流にのって１０秒程度流下する。このケースではウグイはプール内に留まることが出来ず，半強制的に半数が下流に流された。残りの半分はＢの下降流に入り，Ｃ，Ｄあるいはジャンプして Ｆを通過し，遡上した。

(2) ケース２のプール内の流況及び，遊泳特性（図－４）

a) 流況

上流隔壁，底面，下流隔壁に沿って速い流れが形成された。上流隔壁に沿った下降流は底面に激しくぶつかり減勢した。明瞭な循環流は形成されず表層に低流速域が見られた。

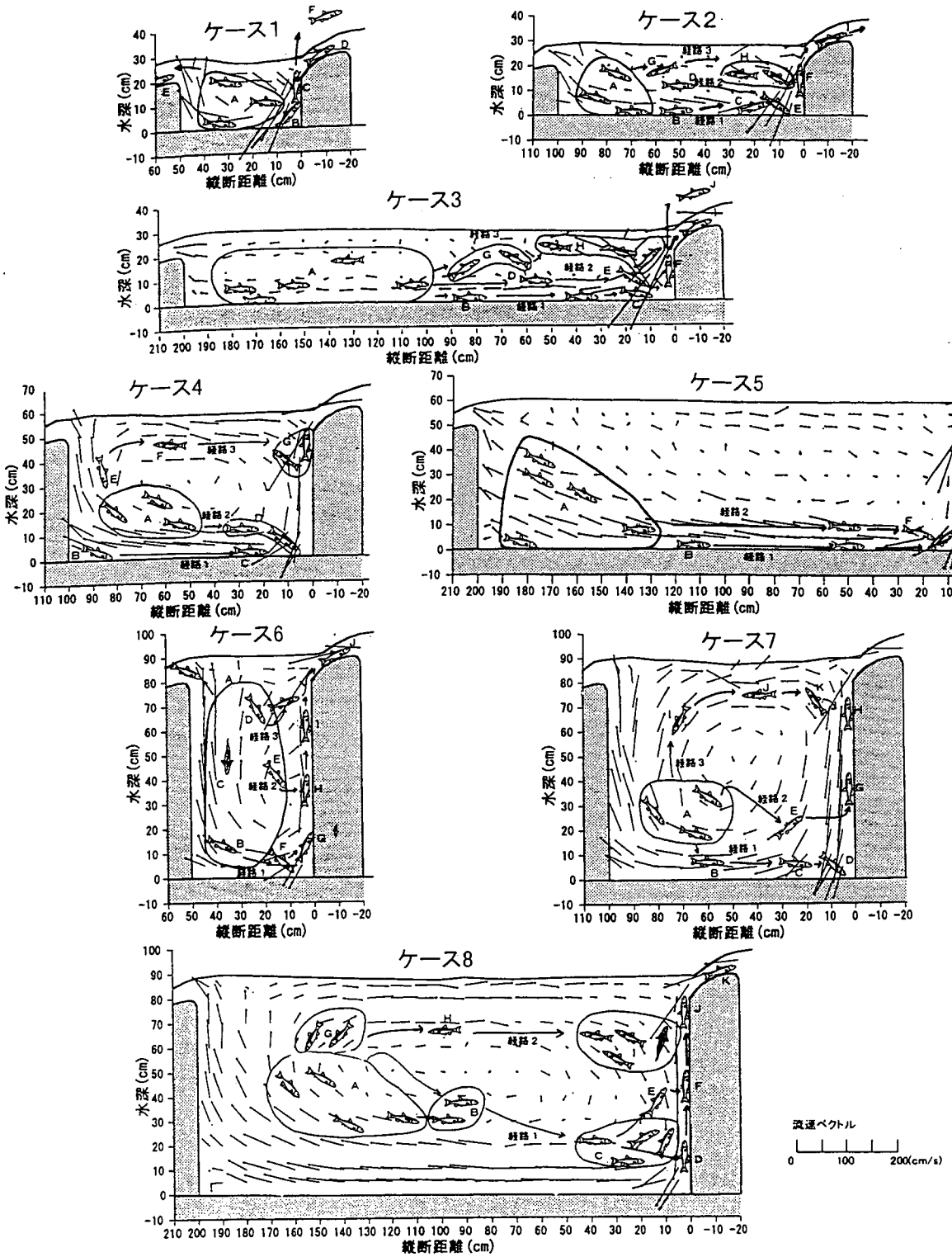
b) 遊泳行動

Ａで群をなし定位した。個体数と比較して定位できる領域が小さいようで，ここから押し出される個体が多かった。以下の３つの経路をたどり遡上した。

経路1 底層Ｂに押し出された個体は底面に腹をつけるようにＣへ移動した。底面からの上昇流で頭部が少し上を向くと，遊泳速度が低下し定位したままＡまで後退，又は流下し，ほとんどが遡上に失敗した。

経路2 中層Ｄに押し出された個体はＥへ移動して隔壁沿いの下降流に遭遇した。頭部を流れに向け定位して隔壁沿いを遡上した。頭部を下降流に押され姿勢を崩して遡上に失敗，流下することがあった。

経路3 表層～中層Ｇで循環流に定位しながら後退した個体は，Ｈで下降流に尾部を押されるように頭部を流れに



図—4　プール内の流況及び、遊泳特性

向け，隔壁沿いを遡上した。流れに押戻されて遡上に失敗，流下することがあった。

(3) ケース３のプール内の流況及び，遊泳特性（図－４）

a) 流況

上流隔壁、底面に沿って流れるが、プール中間で減勢し、プール下手半分では穏やかな一様流が形成された。

b) 遊泳行動

Ａで群をなし自由遊泳した。以下の３つの経路をたどり遡上した。

経路1 ＡからＢに移動した個体は底面に腹部を付けるようにＣへ移動した。Ｃで頭部を下降流に押され姿勢を崩し，定位したままＡまで流下した。

経路2 底面より 10cm 程度の中層ＡからをＤ，Ｅへ移動し隔壁沿いの下降流に遭遇した。流れに頭部を向け定位し隔壁沿いを遡上した。頭部を下降流に押され姿勢を崩し遡上に失敗，流下することがあった。

経路3 表層～中層Ｇで循環流に定位しながら後退した個体は，Ｈで下降流に尾部を押されるように頭部を流れに向け，隔壁沿いに遡上を試みた。流れに押戻され遡上に失敗，流下するケースがあった。

(4) ケース4のプール内の流況及び，遊泳特性(図―4)

a) 流況

プール全体に循環流が形成された。上流隔壁，底面，下流隔壁沿い，表層の流速は比較的速い。また，プール中央に低流速域が見られた。

b) 遊泳行動

Ａ及びＢで群れをなし定位した。以下の３つの経路をたどり遡上を試みた。

経路1 Ｂの底面付近から非常に速い速度でＣまで移動するが，速い流れに定位したままＡ又はＢまで押戻されて遡上に失敗，流下した。

経路2 ＡからＤへ比較的ゆっくりと移動し，隔壁沿いの下降流に遭遇した。下降流に頭部を向けて定位し遡上を試みるが，流れに押し戻され定位したまま後退した。

経路3 Ａから中層Ｅ～表層Ｆで循環流に定位しながら，後退した個体は，Ｇで越流水脈に尾部を押されるように頭部を流れに向け，これに定位して隔壁沿いに遡上を試みた。流れに押戻されて遡上に失敗，流下するケースがあった。

(5) ケース５のプール内の流況及び，遊泳特性（図―４）

a) 流況

上流隔壁沿い，底面沿いの流れは途中で減勢され，プール上手～中間に循環流，下手には比較的一様な流れが下流隔壁に向かって形成された。

b) 遊泳行動

Ａで群れをなし定位した。以下の２つの経路をたどり遡上を試みた。

経路1 ＡからＢに移動した個体は底面に腹部をつけるように短時間でＣまで移動しようとした。多くの個体は遊泳速度が低下し，定位したままＡまで後退，又は流下し，遡上に失敗した。

経路2 底面より 10～20cm 程度上層をＡからＦへ速い速度で移動した。Ｆで下降流に遭遇すると頭部を流れに向け定位し，隔壁に沿ってＤ，Ｅと遡上した。

(6) ケース６のプール内の流況及び，遊泳特性（図―４）

a) 流況

縦長の乱れた循環流が形成された。静水域は殆どないが上層部が比較的緩やかな流れになっている。下降流は,隔壁沿いに強い流れが生じるが,プール全体でみると上昇流が占める空間が大きい。

b) 遊泳行動

B，Cで群れをなし数秒～数十秒定位した。Aの循環流によってBからC，D，Eと流下し再び，B，Cで数秒～数十秒定位する状態を繰り返した。以下の３つの経路から遡上した。

経路1 Bまで流下した個体が，下降流に反応して頭部を流れに向け，下降流に定位しながら隔壁沿いを遡上した。速い流れに押戻され遡上に失敗，流下することがあった。

経路2 Eまで流下した個体が，下降流に反応して頭部を流れに向け，定位しながらHから遡上を試みた。ほとんどの個体は途上で遊泳速度が低下し，循環流に取り込まれて流下した。

経路3 Dまで流下した個体が，越流水脈に反応し，頭部を流れに向け，下降流に定位しながら隔壁沿いを遡上した。速い流れに押戻され遡上に失敗，流下することがあった。

(7) ケース７のプール内の流況及び，遊泳特性（図―４）

a) 流況

プール全体に円形に近い循環流が形成された。循環流のどの位置においても流速が大きく，低流速域はプール中央にわずかに見られるだけであった。

b) 遊泳行動

Aで群れをなし定位した。以下３つの経路から遡上を試みた。

経路1 Aから底面中央下手Bに移動し，一旦定位した後C，Dへ短時間で移動を試みた。ほとんどの個体は途中で遊泳速度が低下し，定位しながら流れに押し戻された。Dに達した個体は速い下降流に頭部を向けることができず遡上に失敗，循環流に取り込まれAまで流下した。

経路2 Aから循環流内Eで一旦定位し，隔壁沿いの下降流に遭遇し頭部を流れに向け，Gで隔壁に腹部を付けてHへ遡上を試みた。ほとんどの個体は途上で遊泳速度が低下し，循環流に取り込まれAまで流下した。

経路3 Aから定位しながらゆっくりと後退した個体がIで頭を斜め下にした状態から下手方向に頭を回転させ，表層Jを通過し，Kまで後退する。越流水脈に尾部を押され，頭部が上を向きHから遡上を試みるが流れに押し戻され遡上に失敗，流下することがあった。

(8) ケース８のプール内の流況及び，遊泳特性（図―４）

a) 流況

プール全体に循環流が形成されるが，中央部の低流速域の占める領域が大きかった。

b) 遊泳行動

Aで群れをなし定位した。以下２つの経路から遡上した。

経路1 AからBに群れながら移動した後，Cを通過して上流隔壁沿いの下降流に反応して頭部を流れ方向に向け隔壁に沿ってDから遡上行動を示す個体と，Cで一旦定位し，頭部を流れ方向に向けEから落下流のFに入り遡上した。ほとんどの個体は途中で速い流れに押し戻され遡上に失敗し，C，Aまで流下した。

経路2 循環流に定位しながら後退した個体がGで頭部を斜め下にした状態で頭部を下手方向に回転させ表層Hを通過し，Iまで後退する。越流水脈に尾部を押され頭部が上を向き遡上を試みた。速い流れに押し戻されてAに戻され流下する場合も多かった。

(9) 各ケースの遡上回数

各ケースの遡上回数を図－５に示す。ケース３が最も多く，次いでケース２，６，８，ケース５，４，７の順番となった。ケース１ではプール内での定位や自由遊泳が全く不可能で遡上したとはみなさず，遡上回数は測定不能とした。

２．考察

定位空間，遡上経路には特徴があり，遡上経路上で遡上失敗する場合にも典型的なパターンが見られた。但し，定位空間におけるウグイの群れ密度等は考慮しない。

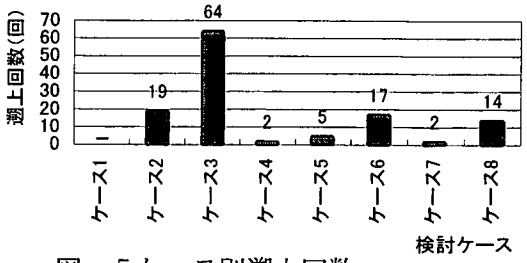
(1) 定位空間の特性

定位空間はプール内の下流域の中層～底層部或いは底層部に分布している。

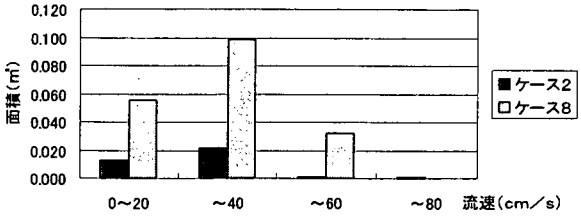
図－６は定位空間内流速別面積ヒストグラムを示したものである。その定位空間は 0～60cm/s の流速範囲に分布していることが分かる。

この定位空間における流速は本実験で用いたウグイの体長の２～４倍程度以下となっており，既往の研究[10]で定義される巡航速度の値とほぼ一致する。

循環流の規模が大きい場合，循環流の内側に低流速空間が分布するが，ウグイはこの空間をほとんど利用しない。これは，流向が空間的に変化し、安定した定位状態が得られないためと考えられる。また，中層～表層付近は比較的流速が小さく，流向も安定しているが，夕方照度の低下する時まで利用されない。言いかえれば，視覚の効く時間帯は鳥類の捕食等の影響により，魚類が潜在的に忌避する空間であると考えられる。



図―５ケース別遡上回数



図―6　定位空間内流速別面積ヒストグラム

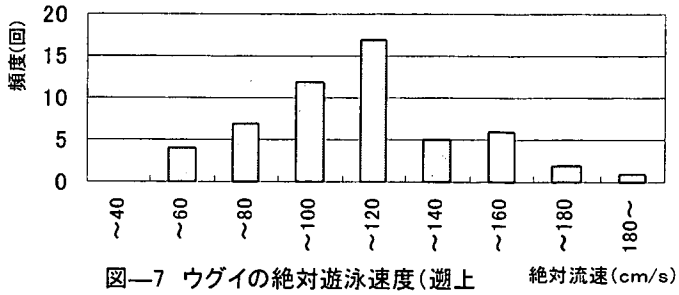
(2) 遡上経路の特徴

プール内で特定の経路が，遡上経路として利用されている。プール内での相対的な位置関係から分類すると以下に示す３タイプに分類できる。

経路1　底面流内を上流に遊泳し，プール上流端で向きを変え，隔壁沿いの下降流に入り遡上する。

経路2　底面流より流速が小さく，流向が空間的に不均一な低層～中層を移動して隔壁沿いの下降流に入り遡上する。

経路3　表面付近の上流隔壁に向かう流れに定位しながら後退し，越流水脈に尾部を押されて反転し，頭部が流れに向き遡上する。



図―7　ウグイの絶対遊泳速度(遡上

各経路の利用頻度は，**経路2**が最も多く，次いで**経路1**，**経路3**の順である。

また，遡上に失敗するケースとしては，以下の２タイプが見られた。①底面流から下降流に向きを変える時の様に頭を流れに向けることができず遡上できない。②乱れによって姿勢が崩され押し戻される。②のケースは，局所的な上昇流，下降流によって姿勢が崩れ，遊泳力が一瞬低下した場合に生じやすい。

ここで，この知見に基づき遡上経路別に流況と遡上に失敗するケースとの関連を見ると，**経路1**は遡上経路が長く，上流隔壁角での流向の変化が大きい。一方，**経路2**は遡上経路が比較的短く，かつ，上流隔壁沿い下降流への突入前流速が小さい。つまり，失敗要因から２つの経路を見ると後者の方が，遡上しやすい経路と言える可能性が高い。**経路3**は流向への反応が自発的でないこと，利用時間帯が限定されたことから経路の良否判断が難しいが，遡上経路が短いという点では有利である。

次にこの点と遡上回数との関連を検討する。(イ)遡上回数の最も多いケース３，(ロ)次に多いケース２，８，(ハ)最も少ないケース５，４，７の３つのレベルに分類できる。(尚，定位が確認されなかったケース１，６はここでは対象としていない。) 利用頻度が少なかった**経路3**を考慮しなければ、(ハ)のケースでは遡上に最も不利と考えられる底層の経路に遡上が集中している。一方，(イ)のケースでは隔壁角付近の流向変化が小さく，また，水脈が減勢されて底面付近の流速が比較的遅くなっていること，から比較的有利な経路となっている。(ロ)のケースでは，ケース８が中層からの遡上経路を利用すること，また、ケース２は隔壁角での流向変化が小さいこと，から比較的有利な経路となっている。このように，各実験ケースの遡上経路と遡上回数には，ある程度関連性があると考えられる。

(3) 遡上速度

ケース２～８までの経路１，経路２の水路底面部及び,隔壁沿いを比較的尾の振りが激しい遊泳行動を取った個体を遡上意志がある個体とみなし，これらの個体全てを対象に絶対遊泳速度を算出した。ビデオにより移動距離と所要時間を測定し，平均速度を求め，その場の流速を加え,絶対遊泳速度とした。結果を図－７に示す。絶対遊泳速度は 100～120cm/s にピークを持ち，180cm/s を超えるものもある。なお，隔壁頂部の移動速度は移動が早く，測定できなかったが明らかに，ここで示した絶対遊泳速度より速かった。底面付近や隔壁沿いの移動は個体の突進速度で遡上していることになる。本実験でも速い流れに押し戻されるケースがかなり見られた。

この結果は僅かな流量や隔壁間落差の増加が遊泳行動,遡上率に影響を与えることを示しており，今後，それらによる流況変化と遊泳行動特性の検討が必要である。

(4) プール形状とウグイの遡上

プール形状が正方形に近いケース４，７では速い循環流が生じ，ウグイが循環流に流され，定位・遡上しにくくなっている。

プール長がプール水深に比して長いケース２，３，５，８ではプール上流部と下流部に異なる流況が生じ，下流部にウグイが定位できる空間が生じる。しかし，プール長が長いケースがウグイにとって遡上しやすいわけではなく，流況の特徴が重要である。強い下降流が生じ，中層に遊泳空間が出来ないケース５ではウグイの遡上回数が少なくなっている。一方，上流部の流れは乱れるがプール底部に越流水脈がぶつかり減勢するケース３では最も遡上回数が多く，遡上しやすくなっている。

プール水深が深いケース６ではプール上部に比較的流れの緩やかな空間が生じ，そこを利用して，ウグイは遡上することが出来る。今回の実験ケースからは勾配が１／７の場合にはプールが深いケース６，勾配が１／１２，１／２２の場合ではプールが浅いケース２，３がウグイにとって遡上しやすい結果となっている。

4. 結論

本研究は，魚道の中でも最も使用実績の多い階段式魚道における遊泳力の比較的強いウグイで流況に対する遊泳行動実験を行った。実験の結果を以下に要約する。

(1) プール水深，プール延長によって遡上回数，遡上経路が大きく異なる。

(2) ウグイの遡上は下降流の水脈に入った時に行われる。

(3) ウグイが下降流の水脈に入るケースは，**経路1**の底面流から下降流に遊泳し入るケース，**経路2**の中層から下降流に遊泳して入るケース，**経路3**の上流で下流に頭を向けながら上流に流され，偶然下降流に入るケースの３ケースがある。

(4) 遡上前には流速が60cm/s以下の定位空間で遊泳し，上記遡上経路に向かう。

(5) 絶対遊泳速度は100～120cm/sにピークを持ち，180cm/sを超えるものもある。

(6) プール内に形成される流速のかなり遅い空間は殆ど定位空間としては利用されない。

(7) 遊泳可能な流速場でも流向の突然の変化には対応できず，遡上できない。

(8) 遡上のしやすさはプール水深，プール延長，越流量，隔壁間落差によって形成される流況と遊泳行動の関係が重要である。

(9) 以上のように２つの隔壁からなる１つのプールという単純な構造であってもウグイの遊泳行動は流況に対して複雑に対応する。

今後，魚道の検討には水理と魚の行動の両面からの研究が必要である。

５．主な研究成果物

・林田寿文、本田隆秀、萱場祐一、島谷幸宏：階段式魚道のプール内流況とウグイの遊泳行動、水工学論文集、第４４号、pp1191～1196、2000年２月

・林田寿文、本田隆秀、萱場祐一、島谷幸宏：階段式魚道におけるプール内流況と魚類の遊泳行動特性、日本水環境学会年会講演集、pp512、2000年３月

・林田寿文、本田隆秀、萱場祐一、島谷幸宏：階段式魚道における魚類の行動と流況特性、日本水環境学会年会講演集、pp513、2000年３月

（島谷幸宏、萱場祐一、林田寿文）

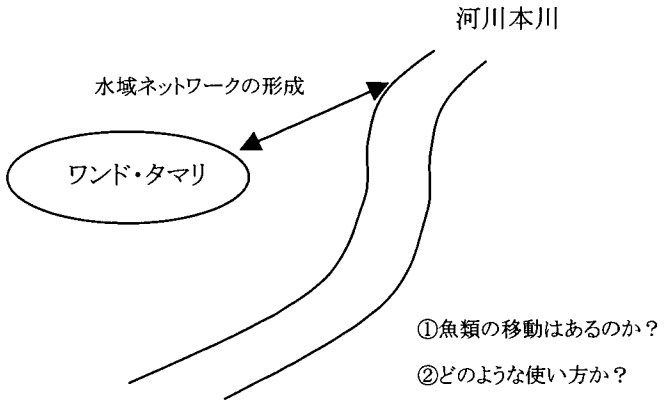
4.9　水域のネットワーク保全手法に関する研究

研究期間:平 10～平 13
担当:河川環境研究室

【要旨】
10 年度は千曲川のワンド・タマリの冠水頻度を算定することにより、水域ネットワーク形成形態の予測と水域ネットワークが魚類群集に与える影響について考察した。11 年度は水域ネットワークの形成形態の検証を行った。また、水域ネットワークが形成された後、ワンド・タマリの魚類調査を行い魚類群集の変化を調査した。その結果、10 年度に予測した水域ネットワークの形成形態は概ね実際の冠水と合致した。また、水域ネットワーク形成中、本川生息魚類のワンド・タマリへの移動が確認できた。また、本川からワンドへ移動しているギンブナの産卵が確認できた。このことからギンブナ等の魚類は出水時に移動しワンド等の空間を産卵場に利用している可能性が示唆された。

1. 研究の目的

近年まで行われてきた河川改修や圃場整備の多くは、魚類の縦断移動や横断方向の移動を阻害し、結果として水域のネットワークに依存する生活史を送る魚類に影響を及ぼしてきた。本研究では、千曲川のワンド・タマリ群を対象に、出水時にワンドと本川の間に形成される出水時流路を水域ネットワークと捉え研究を行い、水域ネットワークの形成を魚類がどのように利用するのかを把握し、水域ネットワークの形成が魚類の生活史の中で果たす役割、機能を明らかにすることを目的する。



2．研究方法

2. 1　水域ネットワークの形成形態の検証方法

10 年度に作成した冠水状態図をもとに、出水後の出水痕跡調査を行った。出水痕跡調査時には痕跡水位、出水時の流向の記録、写真の撮影を行った。

2. 2　水域のネットワーク利用形態の調査手法

千曲川鼠橋地区あるワンド・タマリを対象に直接採捕調査(定置網、電気ショッカー)と潜水観察調査を行った。直接採捕調査は、出水時に形成される出水時流路に定置網を設置しワンド・タマリへ移入する魚類、ワンド・タマリから移出する魚類の魚種を確認した。調査時期は冠水時期、魚類の生活史のサイクルを考慮して、5 月(産卵初期)に調査を行った。

3．研究結果

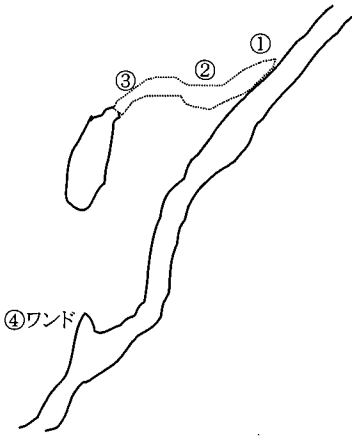
3．1　水域ネットワークの形成形態の検証結果

10年度に作成、予測した冠水状態図は概ね実際の出水流量、冠水状況と一致し水域ネットワークの形成形態も概ね一致した。しかし、冠水状態図は水域のネットワークが完全に形成されている状態のみを示しているが、実際の水域のネットワーク形成前には微妙な水域のネットワークが形成されていることが把握

された。このような微妙な水域のネットワークの形成は、ワンド・タマリ群に生息する魚類に利用されワンド・タマリ群同士の魚類の移動を促すネットワークとして利用される可能性がある。

3．2　水域のネットワーク利用形態の調査結果

千曲川鼠橋地区の本川とワンド・タマリに形成される水域のネットワークの概略図と魚類調査地点を図―1に、水域のネットワークを移動する魚類採捕調査結果（定置網、電気ショッカー）を表―1に示す。



図―1　水域のネットワークの概略図と魚類調査地点

表―1　魚類調査結果水域のネットワークを移動する魚類採捕

	出水時流路			④ワンド
	①上流部	②中流部	③下流部	
ｷﾝﾌﾞﾅ	2	0	23	25
ﾅﾏｽﾞ	0	0	11	1
ｳｸﾞｲ	3	4	4	19
ﾆｺﾞｲ	1	0	3	0
ｱﾌﾞﾗﾊﾔ	0	0	2	4
ｳﾅｷﾞ	0	0	1	0
フナ類	0	5	0	0
ｱｶｻﾞ	0	0	0	2
ﾄﾞｼﾞｮｳ	0	0	0	2
ｼﾏﾄﾞｼﾞｮｳ	0	0	0	3

本川の流量増加に伴い、本川からワンド、タマリへ流入する出水時流路が形成された。ワンドへはギンブナ、ナマズ、ウグイ等の魚類が本川の激しい流れから避難していることが把握できた。また、ギンブナは出水からの避難とともにワンド内で産卵しているのが確認された。また、避難したギンブナ、ウグイの体長は同程度のものが多く、遊泳能力が同程度の魚類がワンドを利用し本川の出水を退避したことが予測される。

出水時流路を移動する魚類の採捕結果をみてみると、上流部及び中流部ではギンブナ、ウグイ、フナ類が確認されている。この地点で採捕されたウグイは体長（SL）が50mm前後の個体が多く遊泳能力が低い個体と考えられ、本川の流量増加と伴に遊泳能力の低い個体が河岸沿いに避難し、流速の遅い方向に移動している途中でワンド・タマリへ流入していると考えられる。また、ワンド・タマリと接続した出水時流路の下流側では、ギンブナ、ナマズ、ウグイ、ニゴイ等が採捕された。定置網の設置方向から推測すると出水時流路による本川との水域のネットワーク形成と伴に、タマリ内に生息するギンブナ、ナマズ、ウグイ、ニゴイ等が本川に向かって移動を開始し採捕されたものと考えられる。出水時流路は本川からワンド・タマリへの魚類の移動を促すだけではなく、ワンド・タマリに生息する魚類が本川へ移動することも可能にしていると考えられる。

一般的にナマズ、ドジョウ等は産卵期に移動し一時的水域で産卵すると言われている。千曲川で確認されたこのような移動が、産卵行動に伴う意図的な移動か流速の早い地点から退避している内に流れに巻き込まれるような非選択的な移動かは不明であるが、今回の魚類調査時に確認された産卵行動から考察すると、水域ネットワークの形成と伴に移動した魚類が産卵を行うことは事実と考えられる。水域ネットワークの形成は、異なるハビタット間の魚類の移動を促すだけではなく、産卵行動など魚類が生活史を送る中で重要な意味を持つことが考えられる。また、単純に水域のネットワークの分断を解消するだけでなく、1年の流況変化が魚類の生活史にどのような影響を持つか把握し、河川生態系の中で水域のネットワークの形成が持つ生態的な機能を復元するような保全手法が求められる。

（担当：萱場、傳田）

4.10.1　自然共生実験施設を用いた河川の自然環境の保全に関する基礎調査（その１）

研究期間：　H10 ～ H14
担当：河川環境研究室

【要旨】
本調査では、自然共生実験施設を用い、河川の自然環境を保全する際に必要となる、河川の形状及び流量と生物との関係、そして、植物や形状の変化が水理量に及ぼす影響を明らかにする。平成１１年度は平成１０年１１月下旬から平成１２年１月上旬までおよそ１年間の通水を実施し、各実験河川における①物理量の把握、②水質、生物相の把握、を実施した。①物理量は植生の繁茂しない冬期と繁茂する夏期で縦断水位の時間変化が大きく異なった。また、実験河川ＡとＢ及びＣでもこれが異なり、植生による水位上昇及び帯水層に伴う河道内貯留が水位に大きく影響することが明らかになった。また、②では、実験河川内で明確な自浄作用が確認された他、魚類の生息がハビタットにより明瞭に規定されること、これが季節により大きく異なることが明らかになった。

１．調査目的
平成１１年度は、①基本的な性能の把握、②物理量、水質及び生物相の把握、③各実験河川間での差異の把握、を目的とした予備実験を実施し、平成１２年度以降の実験を実施する上での基礎的なデータの収集を行う。また、これと並行して個別研究課題として着手できるものについては基礎的な検討を行う。

２．調査方法
通水は平成１０年１１月末より平成１２年１月上旬まで間断なく行った。平常時の流量は非灌漑期（１０月中旬～翌年の４月中旬まで）は0.05m³/s 程度、灌漑期は0.1m³/s 程度である。また、途中、0.2～0.3m³/s 規模の出水実験を合計で１６回行った。平常時及び出水時の流量は３河川で同一である。
物理量の把握は、平常時及び出水時に行った。測定した項目は①流量、②地形、③植生、④底質、⑤水位・水深、⑥流速、⑦流砂量、である。また、水質・生物調査は、①水質、②付着藻類、③底生動物、④魚介類、⑤鳥類である。

３．調査結果
３．１　物理量について
ポテンシャル調査については、特に流量について１年間を通したポテンシャルが明らかになった。まず平常時の流量については、①灌漑期において平常時の実験河川流量 0.1m³/s はほぼ確保できるが、非灌漑期においてこれを下回る。②出水実験時の流量、継続時間は新境川の流況、分派流量等に影響を受ける。灌漑期における小規模出水（0.5m³/s 程度）は長時間の出水が可能と考えられる。また、実験河川Ｂ及びＣにおける差異としては、基本的な特性（水位、流速等）はほぼ同一と考えられた。しかし、植生特に水草の繁茂状態が著しく異なることから、平成１２年度以降実験を行う場合には、この管理が重要であることがわかった。
３．２　水質及び生物相について
（１）水質調査結果
水質調査結果から以下のことがわかった。①実験河川では、ＢＯＤ、総窒素・硝酸態窒素・総リンは冬期に高く、夏期に低い。これは灌漑期に流量が多くなり希釈効果が働いたものと考えられる。②ＢＯＤを指標として実験河川内の自浄作用を見ると、実験河川Ａで明確な傾向が認めにくいが、Ｂ及びＣでは通水が自浄作用は出水後の１～２週間後までは自浄作用を示し、その後は自浄作用と自濁作用が均衡するように見える。

尚、有機物現象速度定数をStreeter-phelpsの式から算出すると、$k=0.047(h^{-1})$ となり、機構の研究報告と同程度となる。

（２） 付着藻類結果

通水から約１ヶ月間の総出現種数及び各綱の種数は、各河川でほぼ同様の傾向を示した。各河川とも珪藻綱が総出現数の70%以上を占め、次に多く出現する緑藻綱は２～20%、藍藻綱は約０～10%で、その他、黄色鞭毛綱、渦鞭毛綱、ミドリムシ藻綱はほとんど出現していない。なお、サンプリング方法がすべて同一でないため、ここでは、種数の増減の経過については議論できない。現存量については、通水10日後ではやや実験河川Ａが他の２河川を上回るが、１ヶ月後では３河川に差は認められない。また。種数、優占種においては３河川で差は認められない。

（３） 底生動物調査結果

実験河川では、16目34科51類、新境川では14目20科25類の底生動物を確認した。実験河川の主な出現種はサカマキガイ科、ミズミミズ科、イトミミズ科、イシビル科、コカゲロウ科、イトトンボ科、シオカラトンボ科、コガタシマトビケラ、ヒメトビケラ属、ユスリカ科等であり、主要な生活型は掘潜型であった。これらの優勢種群は新境川でも同様であった。実験河川間における明確な差は認められないが、１２月の調査結果によると種類数は実験河川Ａで17類、Ｂで24類、Ｃで27類と異なる結果となった。

（４） 魚類調査結果

実験河川Ａで５科20種類、Ｂで４科21種、Ｃで４科20種類の生息が確認できた。新境川では５科22種類の生息が確認されていることから、取水先の河川とほぼ同程度の魚種数となっている。実験開始直後はオイカワが優占し、その後フナ類、タモロコが増加し、これらが優占する上位３種となった。この傾向は実験河川Ｂ及びＣでほぼ同じであったが、実験河川Ａではオイカワの比率が小さい傾向にあった。生息量は、各河川で実施した湿重量推定値によると実験河川Ｂ及びＣで大きく、Ａ河川で少ない結果となった。また、８月、１０月の魚類調査結果に基づき魚類群集の類似度指数を各調査区間間で計算し、各河川間で平均値の差の検定を行った。この結果、ＡＢ間、ＡＣ間の差に比べてＢＣ間の差が小さく、かつ有意であることが明らかになった。

（５） 鳥類調査結果

実験河川を餌場とする主要な鳥類はサギ類である。アオサギ、ダイサキ、コサギがよく見られる、実験河川内で採餌する姿が見られることから、フィールド内に設置してあるＣＣＴＶカメラ及びデジタルビデオカメラによる実験河川の撮影を実施して、サギ類の採餌状況を把握した。結果を表－１に示す。実験河川ＡとＢ及びＣでは⑦単位時間当たりに捕食した回数及び⑧嘴を付けた回数に対する捕食した回数の割合が大きく異なった。このことは餌資源の少ない実験河川Ａにおけるサギ類の行動は他の２河川に比べて多くのコストをかけていることを意味する。

表－１　鳥類捕食状況調査

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
	撮影総時間	滞留時間	嘴を付けた回数	捕食確認回数	②／①(%)	③／②(回/分)	④／②(回/分)	④／③(%)
実験河川Ａ	3056	29	29	1	0.95	1	0.03	3.45
実験河川Ｂ	3432	53	75	9	1.54	1.42	0.17	12
実験河川Ｃ	2598	56	62	10	2.16	1.11	0.18	16

以上、平成１１年度の調査結果の概略を示した。実験河川ＡとＢ及びＣでは物理量、水質、生物相の様々な点で異なることがわかった。また、実験河川Ｂ及びＣの差はＡと比較すると小さく、今後、流量の多少、変動の有無等を両河川で比較することが可能であることがわかった。

（河川環境、萱場）

4.10.2　自然共生実験施設を用いた河川の自然環境の保全に関する基礎調査（その２）

研究期間：　H10 ～ H14

担当：河川環境研究室

【要旨】

魚類調査に基づく実際の生息状況は、魚類の生息環境を考える際の重要な情報である。もう一つのアプローチとしてハビタットに基づく方法がある。ハビタットは魚類の生息状況をある程度反映すると考えられるが、ハビタットと生息状況との関係が明瞭でないため、生息環境を評価する指標にまでは至っていない。本研究では、この点を考慮し、実験河川における魚類調査とハビタット調査を実施、双方の関係について調査を行った。この結果、淵、水際植生が分布する調査区間では生息量が高く、水際及び流れが単調な区間では生息量が小さいことがわかった。

１．調査目的

魚類の生息状況はハビタットや種間関係等の諸条件によって規定される。近年、このような条件をハビタットの物理量から定式化し河川管理に活かしていこうとする調査・研究が多く行われている。しかし、調査時期や場所が限定されている場合が多く、当該調査が時間的、空間的に変化する生息状況を適切に評価しているかがあまり明瞭でない。本研究では、以上を背景とし、実験河川における魚類の生息が季節的にどのように変化するかを、幾つかのハビタットタイプにおいて調査を行ったので、これを報告する。

２．調査方法

調査は岐阜県羽島郡に設置した自然共生研究センター内の実験河川で行った。実験河川は３本あり、長さはおよそ８００m、川幅は標準で３mて程度である。実験河川Ａは平面形状が直線的で河岸にコンクリートを設置し植生の繁茂を抑制している区間を一部設けている。実験河川Ｂ及びＣは双方同一の形状を持ち、瀬と淵を設置してある区間、川幅が広がっている区間、ワンド状の水域を設置してある区間等様々なハビタットタイプが存在する。実験は平成１０年１１月２４日～平成１２年１月６日まで行い、この間通水は間断なく行った。魚類の実験河川への移入は取水先である新境川から、実験河川の上流及び下流から自然に行われる。調査は平成１１年３月～１２月まで２ヶ月に１度程度行った。調査ではまずハビタットが比較的同質と考えられるセグメントに実験河川を分割した。次に、各セグメントから代表的なリーチを設定し、上下流端を網で仕切り電気ショッカーにより採捕した。１リーチの長さは標準で１５m、調査面積に対する努力量は各リーチで概ね同一となるよう工夫した。

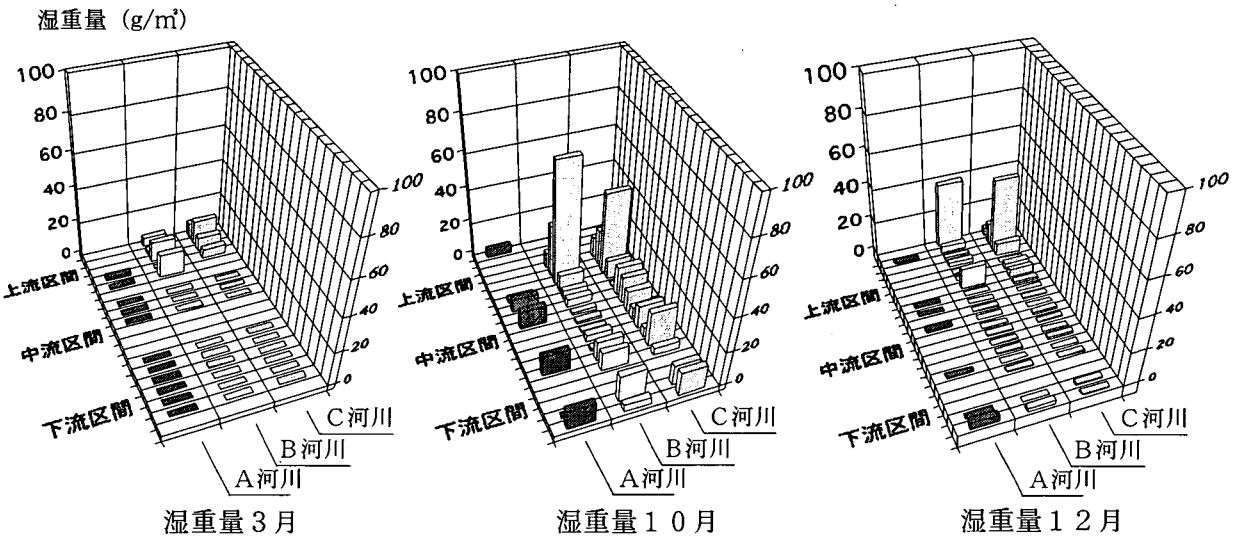
３．調査結果

３．１　生息量の季節変化

生息量を示す指標として、各調査リーチにおける採捕個体の湿重量を全て合計し、これを各リーチの面積で除した単位面積当たりの湿重量を用いる。図－１は３月、１０月、１２月における調査結果を示す。３月と１２月は比較的似通った分布を示す。河川Ｂ及びＣの上流域での生息量が多く、他の区間では生息量が非常に小さい。一方、１０月は河川Ｂ及びＣの上流域では依然として高い生息量を示すが、他の区間における生息量も比較的大きい。１０月におけるこの傾向は７～１０月における３回の調査で共通して見られる現象であることから、実験河川における魚類の生息量の分布は 1)魚類の活性が低下する冬期～春期と 2)活性が高まる②春期～秋期で大きく異なることがわかる。

３．２　生息量に及ぼす水際植生と淵の影響

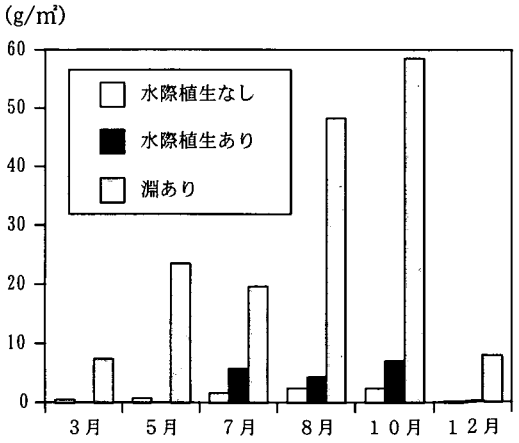
1)冬期～春期において生息量が相対的に大きいリーチは人工的に瀬と淵を設置した区間であり、この期間は実験河川内の水深が大きい場を中心に生息量が増加していた。一方、2)春期～秋期は河岸植生が繁茂し、生息分布は水際植生のあるリーチにも拡大したようである。ここでは、形態的ハビタットとして淵の有無と水際植生の有無に着目し、それぞれのハビタットにおける生息量が季節的にどのように変化したかを検討する。図－２は、河川Ａの①水際植生の繁茂していたリーチ、②水際植生の繁茂を抑制したリーチ、③河川Ｂ及びＣにおいて淵を設置したリーチ、における単位面積当たり湿重量の季節変化を示す。ただし、植生の本格的な繁茂が５月以降であることから、①のデータは７月以降となっている。③での生息量が①、②に比べてどの時期においても大きく、また、①での生息量は７月以降②に比べて全時期で大きい。夏期と冬期を比較すると、③は冬期においてもある程度の生息が認められるが、①は冬期において著しく減少し、冬期におけるハビタットとして機能していないことがわかる。



図－１　各河川の調査リーチ別湿重量季節変化

４．まとめ

本調査結果から、実験河川における魚類の生息状況は、冬期～春期、春期～秋期では異なることがわかった。実験河川では春期にフナ類等の比較的大型の個体が河川内に移入し、産卵、世代交代後成長するプロセスがある程度明瞭になっている。また、冬季には実験河川から新境川及び木曽川本川の深みに多くの個体が移出し生息量が減少しているようである。魚類の生息環境はこのような個別の河川における魚類の生活史と関わっており、各ハビタットの物理環境だけでなく、機能的な側面の理解が不可欠である。



図－２　水際植生及び淵の有無と湿重量との関係

（河川環境、萱場）

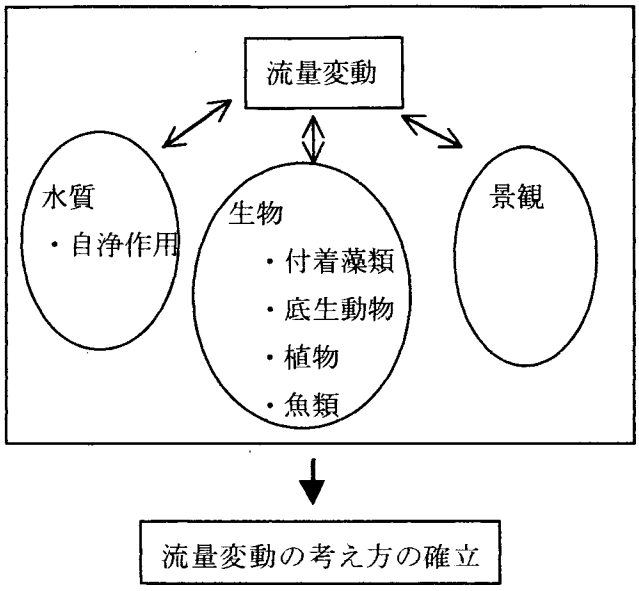
4.11　変動を加味した正常流量に関する基礎調査

研究期間：平10～平12
担当：河川環境研究室

【要旨】
本研究は変動を加味した正常流量のための基礎的知見を得ることを目的としている。
平成11年度は、自然共生研究センターの実験河川において、出水流量規模と河床付着物の剥離に関する定量的把握を行った。対象とした出水は、ピーク流量0.5、1.0、1.5、2.0、3.0m³/s（ピーク継続時間20分）で、出水前後の河床付着物の現存量等を測定した。その結果、現存量（Chl-a量）は、ピーク流量1.0m³/s以上（平常時流量の10倍）で有意に減少し、40～60mg/m²程度まで剥離することが確認された。また、出水前の付着藻類の現存量がある程度大きくないと検討が困難であることが示唆されため、今後、現存量が大きい条件下での出水量0.5m³/s以下での検討を行う予定である。

1．目的

近年、河川生態系や水質の保全の観点から、「流量変動方式」の流量管理の考え方が必要となってきている。しかしながら、河川の流量変動が生態系や水質への寄与や意義や、河川流量・河道・生物の相互関係は明白ではない。そこで、本研究では、水質、生態系などと流量変動の関係、また、人間の景観に対する許容限度などの観点より変動を加味した河川の正常流量に関する基礎的知見を確立することを目的とする。



11年度は、河川生態系における生産者である付着藻類に着目する。一般に、河床の付着藻類は、２～３週間で現存量が最大に達すると言われている。最大値に達すると付着藻類の剥離が生じ、BODやChl-aが増加するいわゆる自濁作用が働くようになる。このような現象は河川の自浄作用を低下させるだけなく付着藻類を餌資源とするアユ等の成長を阻害することが指摘されている。ある程度の流量変動は定期的に付着藻類を更新し、自浄作用と付着藻類の質の維持に寄与していると考えられるが、具体的な規模や頻度は未解明な状況となっている。そこで、11年度は出水と付着藻類の剥離・掃流の関係に関する基礎知見を得ることを目的とする。

2．研究方法

調査は、自然共生センターのＢ河川及びＣ河川において実施した表-1 に示す 5 回の人工出水実験（出水①～出水⑤）を対象とし出水前後の河床付着物を比較することによって行った。出水は平常時流量 0.1m³/s を、それぞれ最大 0.5～3.0 m³/s まで変化させるもので、ピーク流量の継続時間はそれぞれ 20 分間である。調査地点は、河床勾配 1/200～1/400 の瀬とした。サンプリングは 30cm×30cm のコドラートを設置し、その中の石を全て取り出し、河床付着物をブラシで剥離採取した。サンプル数は各河川５サンプルずつとした。

表-1　各出水のピーク流量と継続時間

	出水①	出水②	出水③	出水④	出水⑤
出水日	99.2.3	99.2.24	99.3.17	99.7.21	99.8.19
ﾋﾟｰｸ流量	1.0m³/s	1.5m³/s	2.0m³/s	3.0m³/s	0.5m³/s
ﾋﾟｰｸ継続時間	20 分	20 分	20 分	20 分	20 分

3．研究結果

3．1　現存量への影響

図-1 に出水前後の Chl-a を示す。出水①のＢ河川、出水②のＢ、Ｃ河川、出水③のＢ、Ｃ河川においては出水前後で有意水準 1%もしくは 5%で有意差が認められ、出水による付着藻類の剥離による Chl-a の減少が

確認できた。しかし、出水④及び出水⑤においては、有意差は認められなかった。有意差が認められなかった要因の一つとしては、出水④及び出水⑤の出水前の Chl-a 量が出水①、出水②、出水③と比較して低い値にあったことがあげられる。

次に、出水時のピーク流量の規模と Chl-a 量の減少との関係をみてみる。なお、ここでは、有意差が認められたケースについて考察するものとする。出水後の Chl-a 量は、1.0m³/s（出水①）、1.5m³/s（出水②）、2.0m³/s（出水③）で、ほぼ同様な値である40～60mg/m² まで減少しており、各流量規模による付着藻類の剥離の違いは確認できなかった。また、出水前の Chl-a 量の大小によらなかった。

以上より、付着藻類の現存量（Chl-a量）は、ピーク流量1.0m³/s以上（平常時流量の10倍）で有意に減少することが確認された。しかし、出水前の付着藻類の現存量がそれぞれの出水実験で異なるため、出水前の現存量が少ない場合は検討が難しい。今後、出水前の現存量を同様にする等、同じ条件の下で、出水規模との剥離の検討を行う必要がある。

なお、細胞数、有機物量についても検討したが、出水による影響は Chl-a 量とほぼ同様の結果を示した。種構成については出水前後で大きな変化はみられなかった。

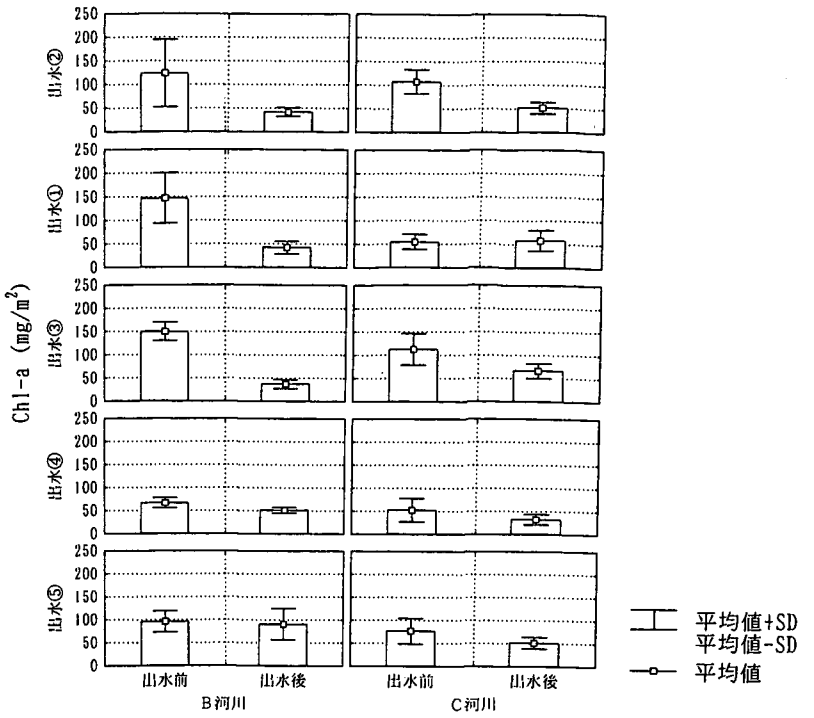


図-1　出水前後の Chl-a の変化

3．2　質への影響

藻類の質の指標として、フェオフィチン率が用いられる。フェオフィチン率は、以下のようにChl-a量の占めるフェオフィチン量の割合で示される。

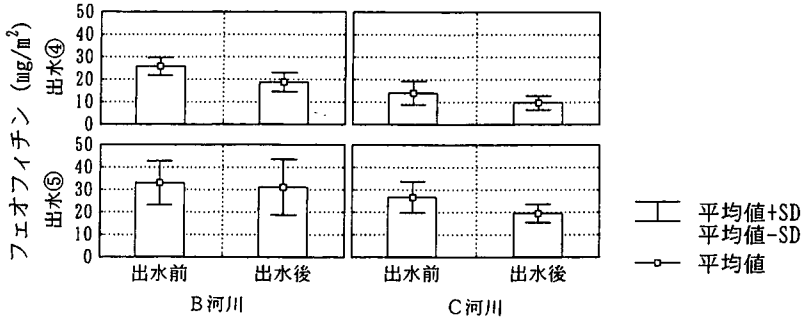


図-2　出水前後のフェオフィチンの変化

フェオフィチン率（%）=フェオフィチン量μg/m²／Chl-a量μg/m²×100

しかし、出水⑤、出水⑥の出水前後のおいて有意差は認められなかった。図-2 に出水前後のフェオフィチン量を示す。出水前後においてフェオフィチンにおいても有意差は認められなかったが、若干ではあるが減少する傾向がみられる。これは、出水が死んだ付着藻類の細胞が流下したことを示すものであると考えられる。

4．主な研究成果物

・皆川朋子・清水高男・島谷幸宏：流量変動が生物に及ぼす影響に関する実験的検討、河川技術に関する論文集、Vol.6、2000.
・島谷幸宏：河川における正常流量設定手法に関する近年の動向と課題－動植物の保全を中心に－、河川技術に関する論文集、Vol.6、2000.

（島谷幸宏、皆川朋子）

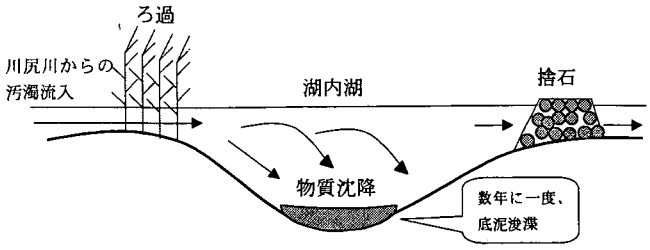
4.12　浮島による湖沼の自然回復と水質浄化に関する研究

研究期間：平９～平12

担当　河川環境研究室

【要旨】

本研究は、水環境技術として近年多用されている人工浮島などを用いて湖沼の自然回復と水質浄化を同時に成し遂げることを目的としている。11年度は、霞ヶ浦に流入する川尻川の河口に湖内湖と名づけた浅い閉鎖性水域を設置し、ここで出水時に流入する河川からの汚濁の除去および湖岸生態系の回復を試みた。出水時調査の結果SS（浮遊物質）の54%、全リンの35%を除去していることが分かった。



1．研究目的

湖沼の環境対策は水質対策を中心に実施されてきた。しかしながら、湖沼環境を保全するためには水質と同時に生物の生息場（ハビタット）を保全する必要がある。湖沼のハビタットの悪化は著しく、たとえば霞ヶ浦では沿岸の植生帯は昭和 40 年代と比較して、面積で 6 分の 1 となっている。そこで、本研究では沿岸帯ハビタットの復元と流入支川の出水時汚濁負荷の削減を目的として、霞ヶ浦に流入する川尻川河口に湖内湖（表－１）と名づけた閉鎖性水域を設置し、その効果を検討している。

表－１　湖内湖の諸元

	沈殿ピット（深場）	一般沈殿域（浅場）
対象水量 max	6 m^3/s（出水時）	6 m^3/s
滞留時間	0.5 hr	1.0 hr
水深	2.0 m	0.5-1.0 m
容量	10,800 m^3	21,600 m^3
面積	7,350 m^3	約 21,600 m^2
幅	平均 45 m	平均 296 m
長さ	165 m	70~165 m

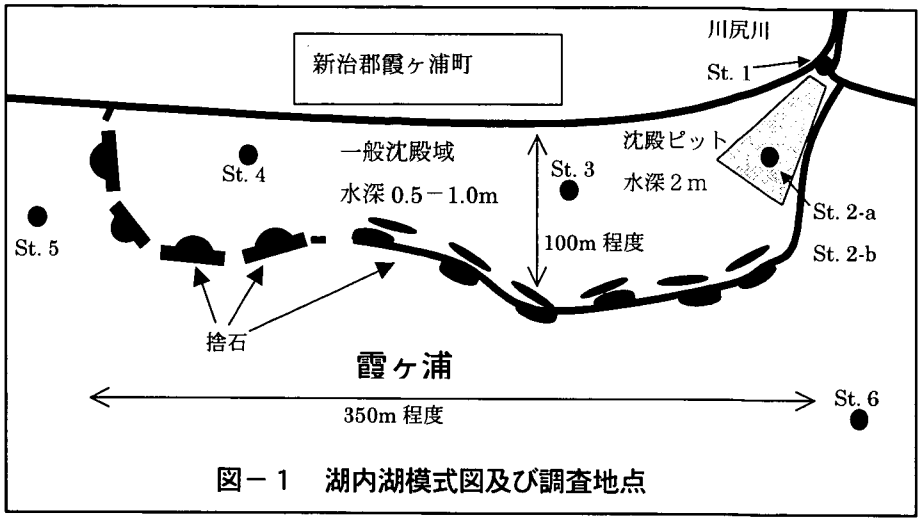
表－２　調査項目と測定頻度

調査項目	測定項目	調査地点	調査頻度	調査時期(期間)
水位・雨量		St.1	毎時（出水期は 10 分毎）	1999 年 8 月～2000 年 3 月
流量観測		St.1	毎月及び出水時	1999 年 8 月～2000 年 3 月
定期水質調査	現地測定：透視度，水温，DO(0.1m 毎垂直分布) 水質分析：DO，pH，EC，濁度，SS，BOD，CODMn，TOC，T-N，粒子性 T-N，DT-N，NH4-N，NO3-N,T-P,PO4-P，chl.a，フェオフィチン，植物プランクトン(定量)，動物プランクトン(定量)＊プランクトンに関しては St.1,St.2b は除く	St.1，St.2a(水深 0.2m)，St.2b(底上 0.5m)，St.3，St.4，St.5，St.6	毎月，計 8 回	1999 年 8 月～2000 年 3 月
定期底質調査（エクマンバージ調査）	現地測定：ORP，泥温 底質分析：TOC,強熱減量，硫化物，T-N，T-P，粒度分布	St.1～St.6	毎月，計 8 回	1999 年 8 月～2000 年 3 月
出水時調査	現地測定：透視度，水温 水質分析：DO，pH，EC，濁度，SS，BOD，CODMn，TOC，T-N，粒子性 T-N，DT-N，NH4-N，NO3-N,T-P,PO4-P	St.1	3 出水(1 出水につき 10 サンプル)	1999 年 8 月～2000 年 3 月
セジメントトラップ調査	SS，TOC，T-N，T-P，強熱減量	St.2(水深 1.0)，St.4(水深 0.2m)	晴天時 3 回，出水時 3 回	1 日：1999 年 8 月～2000 年 3 月の間に 6 回

2．調査方法

2．1　湖内湖の構造

湖内湖の構造は、出水時のピーク流量を 6 m³/s（70mm の降雨に相当）と設定し、全リンの除去率を50%程度になるように設計した(図－1)。大きくは河口の沈殿ピット（水深 2m）と一般沈殿池（水深 0.50 m-1.0 m）から構成される。沈殿ピットは数年に 1 回堆積した汚泥を除去することを前提としており、後段の一般沈殿地は、細粒分を除去するとともに霞ヶ浦で減少著しい浮葉植物や沈水植物の復元の場となることを期待している。



図－1　湖内湖模式図及び調査地点

2．2　調査方法

表－2に示すように川尻川の流量，水質・底質，出水時、ジメントトラップなどの調査を実施した。調査期間は平成 11 年 8 月より平成 12 年 3 月である．出水時調査は 20mm 以上の降水量があると想定される時におこなった．セジメントトラップは出水時と晴天時に 1 日程度設置し，堆積量を推定した．

表-3　出水時の浄化効果

	流入負荷量	堆積負荷量	除去率
	(kg)	(kg)	(%)
SS	4,850	2,601	53.6%
VSS		654	
TOC	624	53	8.5%
T-N	144.4	24.6	17.0%
PT-N	48.3		50.9%
T-P	26.23	9.20	35.1%
PT-P	9.32		98.7%
対象期間	1999年11月15日 16:00 ～ 1999年11月17日 9:00	1999年11月15日 15:00 ～ 1999年11月17日 10:00	

3．研究結果

3．1　出水時の汚濁除去効果

11 月の出水時調査（総降水量 40mm）より、流入負荷量を求め、その時の堆積量をセジメントトラップ堆積量とするして沈殿ピットと一般沈殿域に分けて計算したところ，除去率は SS で 54%，T-N で 17%，T-P で 35%となり，出水時の汚濁負荷削減が大きいことが分かった（表－3）．

4．主な研究成果物

・中村圭吾，島谷幸宏（1999)：人工浮島の機能と技術の現状，土木技術資料，Vol. 41，NO. 7，pp. 26-31.
・中村圭吾，門倉信行，宗像義之，島谷幸宏，宇多高明（1999)：消波浮島による湖岸植生帯の復元に関する研究，環境システム研究-全文審査部門論文-，Vol. 27，pp. 305-314.
・K. Nakamura, N. Sakai, H. Sakamoto, N. Kadokura et al(1999):Restoration of Lake Shore Vegetation by the Artificial Floating Island (AFI), Lake99.
・中村圭吾，山端一浩，鈴木宣人，島谷幸宏(1999)：調整池における水質の季節的変動と水生植物及びその他の要因，土木計画学研究・講演集，No. 22(1)，pp. 251-254.

（島谷、中村）

4.13　人工生態礁による富栄養化対策に関する調査

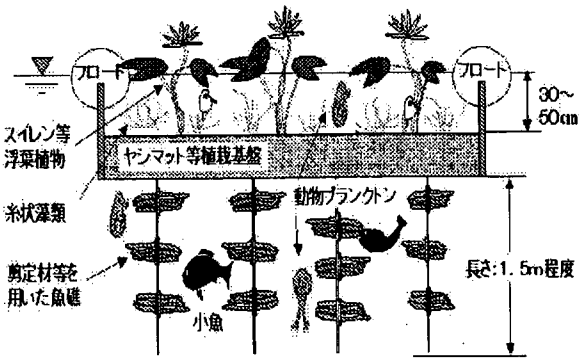
研究期間：平１０～平１２

担当：環境計画研究室　室長：安田　佳哉、　主任研究員：天野　邦彦、　鈴木　宏幸

【要旨】

ダム湖等における富栄養化現象の対策には、大きく分けると窒素やリンのような栄養塩類を直接除去する手法と、富栄養化現象の原因である藍藻類が異常増殖しないように環境を制御する手法がある。

土木研究所では、後者の一手法として人工生態礁を開発し、１１年度は土師ダムでの隔離水界実験を引き続き行うと共に１０年度の実験結果について解析を行った。



図―１　人工生態礁の模式図

１．　研究方法

１．１　人工生態礁

湖沼では、植物性プランクトン、動物性プランクトン、底生動物、付着生物、魚類等の様々な生物が食物連鎖を通して相互に結びついている。人工生態礁は、自然界の生態系のメカニズム（食物連鎖や生物間競争等）をうまく活用することで、植物性プランクトンの大量増殖の抑制をねらいとしたものである。

人工生態礁の概略構造を図－１に示す。構造は、種々の組み合わせが可能であるが、図のものは現地に適用したもののうち最も複雑なもので、上部は、ヤシマット等の植生基盤を水深 30～50cm に沈めたもので、そこにスイレン等の浮葉植物を植え付け、それを基質として付着性藻類が生えるような構造としている。これは、動物性プランクトンの生息空間の創造、付着性藻類と浮遊性植物性プランクトンとの栄養塩競合及び景観の向上をねらったものである。また、下部は街路樹の剪定材等を 1～1.5m に揃えたものを数本束ね、魚類等の新たな生息空間の創造を狙っている。

１．２　現地実験の概要

広島県高田郡に位置する江の川本川に建設された土師ダム貯水池において、防水シートで周囲及び底面を覆った隔離水界（縦横各 10 m、水深４m）を５基設置し、現地実験を行った。

実験は付着性藻類と植物性プランクトンとの栄養塩競合について調査する目的で作成した３基（対照区１基及び人工生態礁設置２基)と動物性プランクトンによる捕食の影響について調べる目的で作成した２基(対照区１基及び人工生態礁設置１基）で行った。

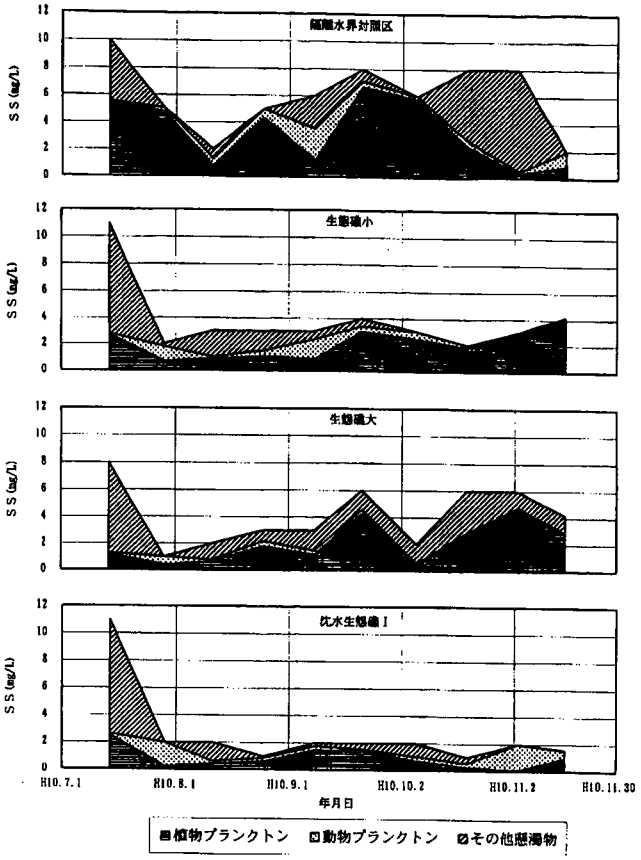
１．３　平成１０年実験結果の解析

平成１０年度に、生態礁の構造として、ポリエチレン製人工生態礁の大きさを３段階（一辺が６m、５m、４m）に変化させたもの、生態礁上部に土師ダム近郊に生息している沈水植物（マツモ、フサモ等）を植えたもの、同浮葉植物（スイレン、ジュンサイ等）を植えたもの、さらに生態礁を入れない対照区の計６基で行った実験結果の解析を行った。

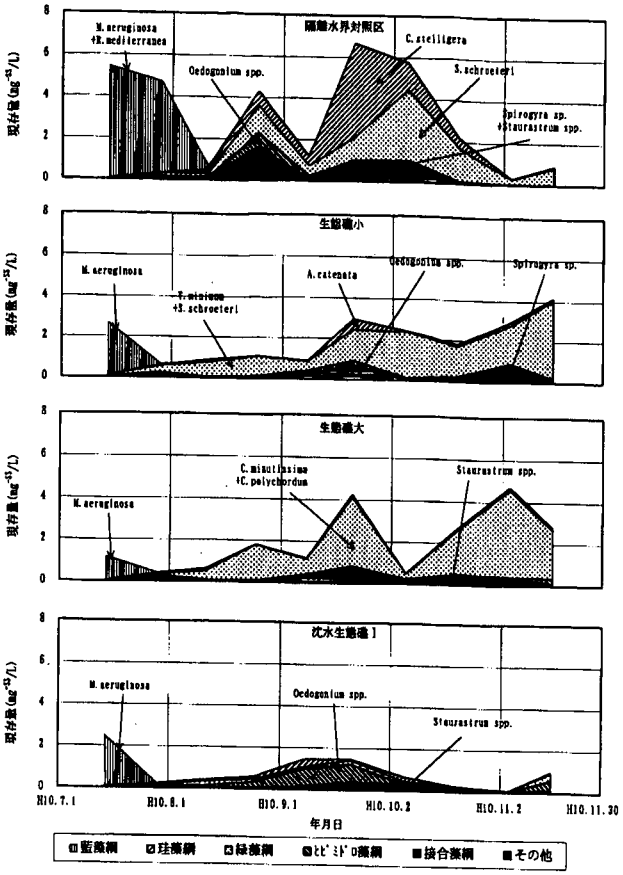
２．研究結果および考察

平成１０年度に６区画で行った実験結果について示す。図―２は、対照区、人工生態礁２種、沈水植物を植えた生態礁の４区画で採水された検体について、植物性プランクトン、動物性プランクトンの調査結果に基づいて試算した懸濁物の内訳（植物性プランクトン、動物性プランクトン、その他）の変化を示している。

沈水植物の区画で懸濁物の量そのものが少ないのが分かる。このため、透明度が高くなり景観上優れていた。



図―2　懸濁物の内訳比較図



図―3　植物性プランクトン種組成比較図

図―3は、同様の区画について、植物性プランクトン種組成別の現存量を比較したものである。沈水植物区以外では緑藻類、珪藻類が多いが、沈水植物区ではヒビミドロ藻類が多くを占めている。これは、大きい藻類で、沈水植物を植えた生態礁に生息していた付着性藻類が剥離して水中に漂っていたものを採取したためであると考えられる。

また、図は割愛するが、動物性プランクトンについては、対照区においてワムシが多く、これはサイズが小さいため緑藻類や珪藻類を捕食できないと考えられるが、沈水植物区ではサイズの大きいミジンコが多かった。このため沈水植物区では、対照区で多く発生した緑藻類や珪藻類が捕食されることが可能と考えられ、沈水植物区における植物性プランクトン量を抑制していたことが考えられる。これに呼応して、沈水植物区では、測定された懸濁物の沈降堆積量が多かった。このことからも、沈水植物区では、動物性プランクトンによる植物性プランクトンの捕食が強く、透明度の向上につながっていた可能性が高い。

さらに、隔離水界を形成するシート上に付着していた付着藻類の量が沈水植物区で多かった。これについては、理由は明確でないが、沈水植物を植えた生態礁上に付着藻類が多かったことから、剥離した付着藻類がシート上に再付着、増殖した可能性も考えられる。

3．まとめ

実験結果からは、沈水植物を植えた人工生態礁を設置した区画において、他の区画に比較して透明度が高かった。一方、沈水植物区においては、植物性プランクトンを捕食するミジンコ（動物性プランクトン）が他区画に比較して多く見られ、ヒビミドロ藻類の付着量が多かった。これらの結果は、人工生態礁が目指す生態系構造の変化（動物性プランクトンによる植物性プランクトン捕食圧の増大、付着性藻類による植物性プランクトンとの栄養塩競合の強化）を示しており、生態礁の水質改善機能の可能性が示されたと言える。

4.14　湿地帯における栄養塩収支の把握と水質浄化能力の評価に関する研究

研究期間：　平１１
担当：　環境計画研究室

１．研究の目的・意義

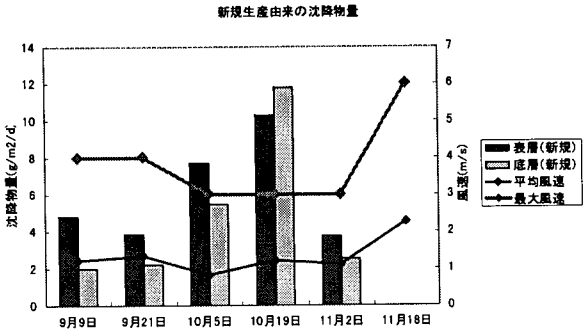
近年、水生生態系を保全し、湖沼等の水域水質管理を行う上で水域と陸域の遷移領域である湿地帯の機能が着目されている。湿地帯は、さまざまな生物の生息空間を提供するとともに、多様性に富んだ環境を有するため、種々の生化学反応が進行することで複雑かつ生態系にとって有用な機能を持つと考えられる。これら機能を評価することは、水生生態系の保全及び湖沼等の水域水質管理を行う上で非常に重要である。このような特性を持つ湿地帯を適切に管理するためには、まず生態系を維持するために必須の湿地帯における栄養塩収支を把握する必要がある。

本研究の目的は、現場実験等により湿地帯における表流水と土壌間での栄養塩収支の把握を行うことを通じて、湿地帯の植生を適切に維持し生息空間を確保すると同時に水質浄化能力をも発揮しうるような適切な水・栄養塩循環量を評価することにある。

２．研究内容・成果

（１）粒子態栄養塩の沈降量の把握

湿地帯における栄養塩除去には、粒子態栄養塩の沈降によるものが重要な役割を果たしていると考えられる。このため、湿地帯を用いて水質改善を試行している貯水池で沈降物量を測定した。沈降物量は、水質の影響を大きく受けるため、水質測定が高頻度に行われている貯水池内にセディメントトラップを設置して測定した。図－１は、



図－１　新規生産由来の沈降物量

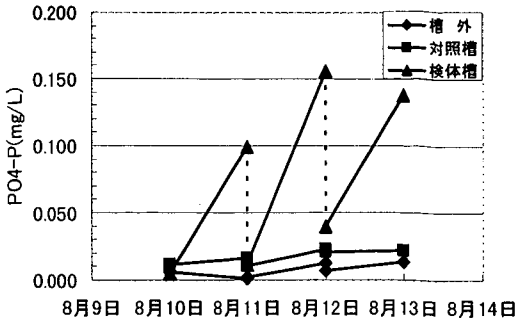
平成１１年９月から１１月に測定された新規生産物由来の沈降物量である。セディメントトラップは表層と底層の２カ所に設置されている。１０月の２回に沈降物量が多くなっているが、これは、１０月に貯水池に河川からの流入があったため、この時、懸濁物量が多く生産されたことを示唆している。湿地帯においては、これら懸濁物が沈降すると考えられ、一旦沈降した物が、溶出、再巻き上げにより水中に回帰しなければ、水質改善に寄与すると考えられる。本貯水池では、懸濁態リンの平均沈降量は7.7(mg/m²/d)と算定された。

（２）栄養塩溶出量の把握

懸濁態として沈降し、底泥に堆積した栄養塩は溶存性の無機態栄養塩に分解を受けると考えられる。特にリンについては、底泥直上水が嫌気的になった場合に、これが溶出することで負荷になることがある。このため、平成１１年６，８月に上記同様の貯水池に溶出量を測定するための機器を設置し、溶出量を測定した。この機器は、底泥と接触する検体

槽と、接触させない閉じた対照槽の２つからなっており、初期水質を同じにして一定時間経過後の２槽間の水質差で溶出量を求めるものである。

図－２に、結果の一例を示す。実験では、検体槽が嫌気化したことで、オルトリン酸態のリンが溶出したことが分かる。８月の実験結果は、嫌気的環境での平均溶出量は31.7(mg/㎡/d)になることを示した。



図－２　リン溶出実験結果

３．考察

湿地帯に水を導入して水質改善を目指す場合、栄養塩のうちでもリンについては、溶出が起これば、沈降・堆積による栄養塩除去を相殺してしまうことが分かる。藻類増殖が問題となる夏期に湿地帯を好気的環境に維持することで、懸濁態除去に期待できると考えられる。また、別途行った実験では、底泥を酸化、乾燥させることでリンの吸着能が減少するという結果が得られている。このため、藻類の問題が軽減される冬期に湿地帯を乾燥させることで、底泥に吸着されたリンを洗い流し、湿地帯のリン除去能力を長期にわたり持続させる手法もあり得ると考えられる。

４．研究成果の発表状況

（１）口頭発表

ア．天野他：土木学会第５５回年次学術講演会（投稿中）、2000、浅い貯水池における底泥からの栄養塩溶出の評価

イ．李他：日本陸水学会第６４回大会講演要旨集、1999、湖沼底泥の吸着能に及ぼす酸化の影響に関する実験的検討

ウ．李他：第３４回日本水環境学会年会講演集、2000、リンの溶出に及ぼす巻き上げの影響に関する実験的解析

エ．Amano 他.:4th Intl. Symp. on Sediment Quality Assessment (投稿中), 2000, Estimation of phosphorus flux between sediment and water column in a shallow reservoir.

オ．Li 他.:4th Intl. Symp. on Sediment Quality Assessment (投稿中), 2000, An experimental study of sediment resuspension effects on the phosphate release from sediment into water column.

（２）論文発表

ア．天野他：環境工学研究論文集（投稿中）、2000、浅い貯水池における懸濁物特性の変化に関する研究

（安田、天野）

社会資本整備における CO_2 削減に関する研究

5．社会資本整備におけるCO_2削減に関する研究

研究期間：平成 11～13 年度

プロジェクトリーダー：環境技術総括研究官

近藤　悟

1. 研究の背景：

・平成 9 年 12 月の地球温暖化防止京都会議において日本の地球温暖化ガスの排出削減目標は 6%とされた。

・温暖化ガスの主体は CO_2 で最終消費ﾍﾞｰｽの発生量は産業、民生、運輸部門の順に多い。

・社会資本整備関連では、道路やダムなどの建設時において使用するセメント等の資材製造時や建設機械等の稼働時などに直接的・間接的に CO_2 が発生するとともに、道路の供用時に運輸部門の道路交通から発生し、その合計量は日本全体の総排出量の約 30%を占めている。

・一方、事業よって植栽された緑化植物により CO_2 は吸収・固定される。

・社会資本の整備の分野においても排出削減目標の達成のために、削減・吸収対策を積極的に推進することが求められている。

2. 研究の目的：

・建設段階における CO_2 の発生量の効率的削減を図るための CO_2 発生量の少ないエコセメントの活用技術の開発

・道路交通から発生する CO_2 を削減するための各種の施策のシナリオ別削減量の推算と評価

・緑地の CO_2 吸収量の算定評価と管理手法の提案

・社会資本の整備・管理・利用段階における CO_2 発生量の把握・評価と発生量のより少ない事業展開を可能にする支援システムの開発及びシナリオ別の削減量の算定

3. これまでの研究成果：

11 年度はエコセメントを用いた一般土木構造物及びダムコンクリートの利用に関する試験、都市交通対策のシナリオ別の効果の検討、低公害車の普及シナリオの整理、緑化樹木による CO_2 固定量の調査、土木事業のライフサイクルの総 CO_2 排出量を評価する手法についての検討、運転時の負荷が大きい下水道施設の CO2 負荷量の算定、及び道路計画に対する戦略的環境アセスメント（SEA）の基礎的検討を行った。

①省エネルギー利用技術の開発

都市ゴミ焼却灰・下水道汚泥等を原料とする環境負荷低減型セメントの一般土木工事への利用技術について、塩分量、硬化速度を改善したセメントの性状の検討、土質固化材としての効果の検討を行い、強度や凝結時間は普通ポルトランドセメント並みの性状を有すること、高炉セメント B 種と比較して優れた土質改良効果を有することが明らかとなった。

セメントの一部をフライアッシュ（FA（Ⅰ種））で置き換えた低負荷型セメントのダムコンクリートへの利用技術について、所要の圧縮強度を満足する FA 置換率（=F/(C+F)）ごとの単位セメント量について比較・検討を行い、脱型時の 3 日材齢で FA 置換率=60%、設計用強度の 91 日材齢で FA 置換率=45%の場合に単位セメント量が最少となることから、このときの FA=0%に対する単位セメント量の概ねの低減率 18～20%より、高さ 100m のモデルコンクリートダム建設工事において発生する CO_2 総排出量を約 13%を削減できることが明らかとなった。

②低 CO2 型交通体系の研究

各温暖化防止施策の総合評価について、10 年度までに作成した都市交通部門における CO_2 排出量の予測モデル

の改善及び交差点の高架化等の対策を評価するためのサブモデルを作成し、試算を行った結果、CO_2 排出量削減施策の効果は、自動車走行台キロの削減による効果に加え、走行台キロの削減に伴う旅行速度の向上による効果も同程度以上あり、道路交通の円滑化施策も CO_2 排出量削減に大きく貢献することがわかった。

低公害車の導入による影響について、専門家の予測評価や自動車メーカーの開発動向の整理、将来のエネルギー需給の見通し等から、低公害車の普及シナリオを整理した。また、10 年度までに作成した予測モデルについて低公害車導入効果の推算等のための改善を行った。

③吸収源対策の技術開発・推進

緑化による CO_2 吸収効果の評価について、代表的な緑化樹木に対し年輪解析を行い、樹齢と成長過程、樹高・幹径との関係を明らかにし、成長予測式を策定し、緑化した樹木の本数と大きさから緑化樹木の CO_2 固定量を算出する方法を検討した。

④社会資本整備における発生 CO_2 最小化支援システムの構築

発生 CO_2 を最少化する支援システム全体について、土木事業のライフサイクルの総 CO_2 排出量の評価に用いる原単位の種類、算定手法、ライフサイクル区分の検討を行った。

建設機械の原単位については、ライフサイクル CO_2 総排出量（$LCCO_2$：製造・稼働・廃棄の総和）の算定方法を策定するため、バックホウの $LCCO_2$ 総排出量を試算した。

また、整備時の発生量が大きい一般的施設に比べ運転時の発生が多い下水道施設、供用後の自動車の通行による発生が多い道路についても検討を進めた。

下水道施設については、ライフサイクルの CO_2 発生量等の算定を行い、設備に関しては、運転が負荷の 8 割程度を占め、規模が大きいほど CO_2 削減効果が大きい可能性があること、土木･建築に関しては管渠の負荷割合が大きく、土被りが大きい場合には管径の影響が小さくなること、ヒューム管より塩ビ管の方が負荷が大きいことが明らかとなった。

道路網等からの CO_2 発生量等に関連しては、道路計画を対象として SEA を行う場合を想定し、その実施時期や CO_2 発生量等の評価すべき環境要素などに関する基礎的な検討を行った。さらに、幹線道のルート比較や道路整備五箇年計画を対象として、一部の評価指標の推定手法について検討を行った。

－社会資本整備における CO_2 削減に関する研究－

個別研究課題目次

5.1　都市型総合廃棄物を原料とした環境負荷低減型セメントの建設事業への適用技術に関する研究……（化　学　研　究　室）…204

5.2　省エネルギー型セメントを用いたダム用コンクリートの利用技術に関する調査……（ダ ム 構 造 研 究 室）…206

5.3　都市域の交通部門における温暖化防止施策の総合評価に関する研究……（交 通 環 境 研 究 室）…212

5.4　低公害大型車等の導入が都市交通環境に与える影響に関する調査……（交 通 環 境 研 究 室）…231

5.5　戦略的環境アセスメントに関する研究……（交 通 環 境 研 究 室）…233

5.6　都市内緑地による温室効果ガス削減に関する検討その他……（緑 化 生 態 研 究 室）…237

5.7　下水道システムのＬＣＡに用いる原単位に関する調査……（汚　泥　研　究　室）…243

5.8.1 建設事業におけるCO_2算定評価システムの開発に関する研究……（機　械　研　究　室）…245

5.8.2 建設事業におけるCO_2算定評価システムの開発に関する研究……（化　学　研　究　室）…247

5.1　都市型総合廃棄物を原料とした環境負荷低減型セメントの建設事業への適用技術に関する研究

研究期間：平 11～平 13

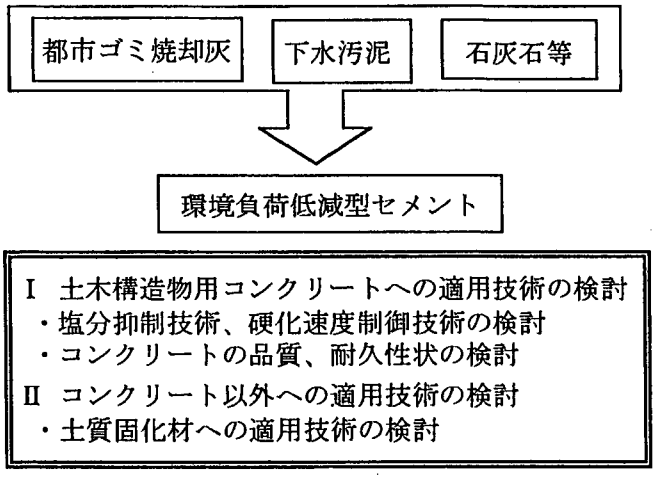
担　当：化学研究室

【要旨】

都市ゴミ焼却灰、下水汚泥等を原料としたセメントの製造技術が開発され、ゴミを資源として有効利用する一方策として期待されている。本研究では、この環境負荷低減型セメントの土木構造物用コンクリートや土質改良用固化材への適用性を検討する。11 年度は、セメント中の塩分抑制、硬化速度制御に関する検討を行い、普通ポルトランドセメント並みの性状を有するセメントを製造可能であることが判明した。また、土質固化材としての効果を検討した結果、高炉セメント B 種と比較して優れた土質改良効果を有することが判明した。

1．研究目的

環境負荷低減型セメントを土木分野において建設資材として活用可能とすることを目的とし、コンクリートや土質固化材としての適用技術の検討を行う。11 年度は、コンクリート構造物への利用に当たって必要となる塩分抑制技術、硬化速度制御技術の検討を行った。また、コンクリート以外の用途として土質固化材を取り上げ、その効果を確認した。



2．研究方法

2．1　土木構造物用コンクリートへの適用技術の検討

セメント中の塩分抑制技術を検討するため、標準的な環境負荷低減型セメントの原料組成となるように試薬を調合し、電気炉を用いてクリンカーを焼成した。このとき、原料中の塩化物イオンをアルカリ金属塩として揮散させるために炭酸ナトリウムを添加し、焼成後のクリンカー中の塩化物イオン量に及ぼす影響を調べた。また、硬化速度の制御技術を検討するため、塩化物イオン量が 500ppm 程度に低減されたクリンカーを用いて、セメント中の SO_3 量（二水石こうにより調整）が凝結時間に及ぼす影響を調べた。

凝結時間が普通ポルトランドセメント並に調整された環境負荷低減型セメントを用いて、モルタル供試体を作製した（JIS R 5201）。モルタル供試体は圧縮強さを測定するとともに、環境庁告示 46 号法により溶出試験を行い、検液中の重金属類（カドミウム、鉛、六価クロム、砒素、総水銀、セレン）を分析した。

2．2　土質固化材への適用技術の検討

環境負荷低減型セメントの土質固化材への適用性を検討するため、高炉スラグ微粉末等の無機材料により成分調整されたセメント系固化材を試作し、土質改良効果を確認した。数種の土質に対し固化材添加量を変えた改良土供試体を作製し、その一軸圧縮強さを測定した。

改良土からの有害物質溶出の有無を確認するため、シルト質砂（含水比 35.0%、湿潤密度 1.789g/m^3）に固化材を 300kg/m^3 添加した改良土を作製し、材齢 7 日後に溶出試験を行った。溶出試験は環境庁告示 46 号法により行い、カドミウム、鉛、六価クロム、砒素、総水銀、セレン、シアン、有機燐、PCB について分析を行った。

3．研究結果

3．1　土木構造物用コンクリートへの適用技術の検討

図1にセメント原料中のアルカリ量がクリンカー中の塩化物イオン量に及ぼす影響を調べた結果を示す。調合原料中の Cl 量は 2.7%であったが、アルカリの添加によりクリンカー中の Cl 量は低減可能であることが判明した。原料中の塩化物イオンは KCl、NaCl として揮散したものと考えられる。アルカリ（Na_2Oeq）量が 2.62%のとき、クリンカー中の Cl 量は 0.046%まで低減された。このときの、(Na+K)／Cl モル比は 1.2 であった。

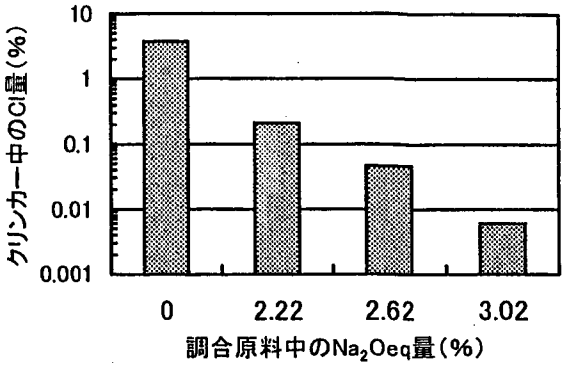


図1．調合原料中のアルカリ量とクリンカー中の塩化物イオン量の関係

図2に塩化物イオン量が低減されたクリンカーを用いて、セメント中の SO_3 量が凝結時間に及ぼす影響を調べた結果の一例を示す。図はクリンカー中の C_3A 量が 16%、ブレーン比表面積が 3300cm^2/g の場合の結果である。普通ポルトランドセメントと同程度の SO_3 量（2.0%程度）では、凝結時間が非常に短いが、3.0%以上に SO_3 量を上げることにより普通ポルトランドセメント並の凝結性状が得られることが判明した。

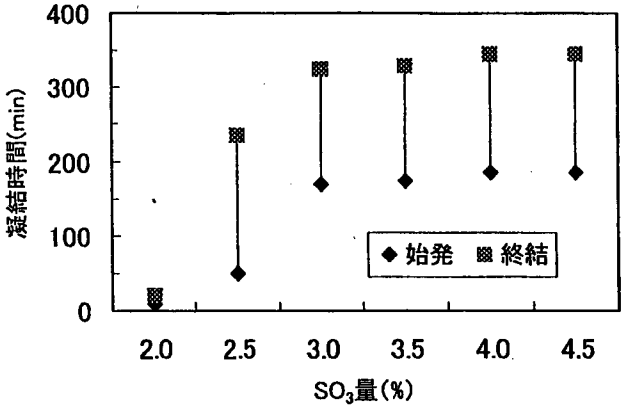


図2．セメント中のSO_3量と凝結時間の関係
（C_3A量；16%、比表面積；3300cm^2/g）

以上の結果をもとに、C_3A 量、比表面積の異なる 3 種類のクリンカーに対して、最適な SO_3 量に調整したセメントを用いてモルタル供試体を作製した。その圧縮強さを測定した結果を表1に示す。普通ポルトランドセメント（NPC）と比較すると若干強度発現性が悪いが、比表面積が大きくなると NPC との差は小さくなった。モルタル供試体を用いて溶出試験を行った結果、重金属類はいずれも検出されなかった。

表1．モルタル圧縮強さ試験結果

クリンカー中のC_3A量（%）	比表面積（cm^2/g）	セメント中のSO_3量（%）	圧縮強さ（N/mm^2）			
			1日	3日	7日	28日
16	3300	3.5	9	23	34	50
20	3300	4.0	14	28	35	51
20	4000	4.5	21	33	44	55
NPC	3300	2.0	15	31	48	60

3．2　土質固化材への適用技術の検討

環境負荷低減型セメントの土質固化材への適用性を調べた結果の一例を図3に示す。環境負荷低減型セメントをベースとした固化材（図中 A）は、高炉セメント B 種（図中 BB）と比較して強度発現性に優れることが判明した。また、溶出試験の結果、有害物質はいずれも検出されなかった。

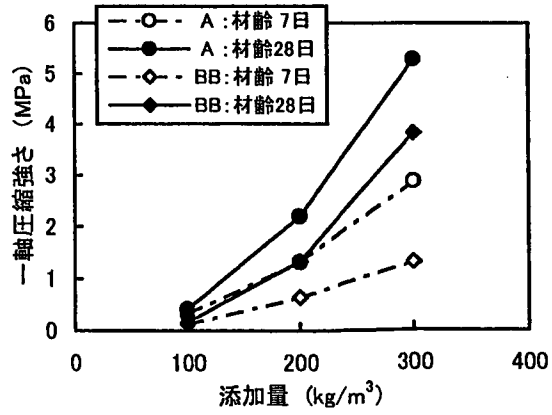


図3．固化材添加量と一軸圧縮強さの関係
（シルト、w=60.1%、ρt=1.602g/m^3）

（明嵐、寺田、中村）

5.2　省エネルギー型セメントを用いたダム用コンクリートの利用技術に関する調査

研究期間：平 11～平 14

担当：ダム構造研究室

【要旨】

近年、地球環境の保全・回復と地球温暖化防止のため、省資源・省エネルギー技術として二酸化炭素（以下、「CO_2」という。）の排出抑制技術の開発が求められている。コンクリートダム建設に伴う CO_2 排出量は、工種別にみれば主にコンクリートによるものであり、その中でもセメントの消費に関わるものが大きな比重を占めている。このため、本調査は、コンクリートダム建設工事における CO_2 排出抑制技術開発の一環として、セメントの一部をスラグ、フライアッシュ（以下、「FA」という。）等の混和材で置換した省エネルギー型セメントを用いたダム用コンクリートの利用技術に関する検討を行うものである。

11 年度は、セメントの一部を FA(Ⅰ種)で置き換えたコンクリートにおいて、所要の圧縮強度を満足する FA 置換率（=F/(C+F)）ごとの単位セメント量について比較・検討した。その結果、単位セメント量が最小となったのは 3 日材齢で FA 置換率=60%、91 日材齢で FA 置換率=45%のときであった。また、このときの単位セメント量の低減率は概ね 18～20%であり、試算によれば、これによりコンクリートダム建設工事において発生する CO_2 総排出量の約 13%を削減できることが明らかとなった。

二酸化炭素の排出抑制技術の開発

▼

省エネルギー型セメントがダム用コンクリートの諸特性に与える影響の把握

▼

省エネルギー型セメントを用いたダム用コンクリートの利用技術に関する検討

▼

ダム建設における二酸化炭素排出量の削減

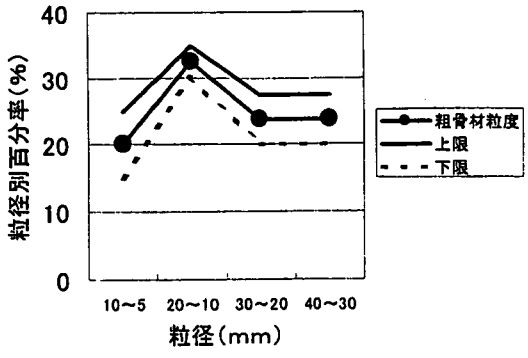
1．はじめに

コンクリートダムの建設において排出される CO_2 は、工事で用いるセメントの消費に関わるものが最も大きな比重を占める。このことから、ダム建設工事における CO_2 排出量を削減するためには、コンクリートの単位セメント量を抑えることが必要となり、その方策のひとつとして、セメントの一部を混和材で置き換える方法が挙げられる。

そこで、11 年度は、セメントの一部を混和材の一種である FA(Ⅰ種)で置換した場合について、所要の圧縮強度を満足するときの FA 置換率ごとの結合材水比（=(C+F)/W）について整理し、このときに必要となる単位セメント量について比較・検討を行った。

表－1　使用材料および物性値

使用材料		種類および物性
セメント		中庸熱ポルトランドセメント (比重=3.21,比表面積=3,200cm²/g)
混和材		フライアッシュⅠ種 (比重=2.41,比表面積=5,900cm²/g, 強熱減量=2.1%)
混和剤		高性能減水剤、ﾌﾗｲｱｯｼｭ用 AE 剤
細骨材		岩種：砂岩 (比重=2.58,吸水率=2.14%, 粗粒率=2.91)
粗骨材 (mm)		岩種：砂岩
	40-30	(比重=2.68,吸水率=0.37%)
	30-20	(比重=2.70,吸水率=0.45%)
	20-10	(比重=2.69,吸水率=0.51%)
	10-05	(比重=2.67,吸水率=0.79%)



図－1：粒度調整後の粗骨材粒度

2. 試験方法

2. 1 使用材料

表－1に試験で用いた材料および物性値を示す。粗骨材粒度は、図－1に示す「コンクリート標準示方書（ダム編）」の標準粒度範囲の平均的な粒度に設定した。

2. 2 試験手順

はじめに表－2に示す配合条件のもと、表－3に示す試験ケースの配合決定試験および圧縮強度試験を行い、このときの FA 置換率ごとの結合材水比と圧縮強度の関係について整理し、所要の圧縮強度（3 日強度(以下、「σ_{3d}」という。)=3.5N/mm² および 91 日強度(以下、「σ_{91d}」という。)=20.0N/mm²）を満足する結合材水比を推定した。つぎに、結合材水比と単位ペースト容積の関係から、推定された結合材水比における単位ペースト容積を求め、このときの単位セメント量について整理した。

表－2 配合条件

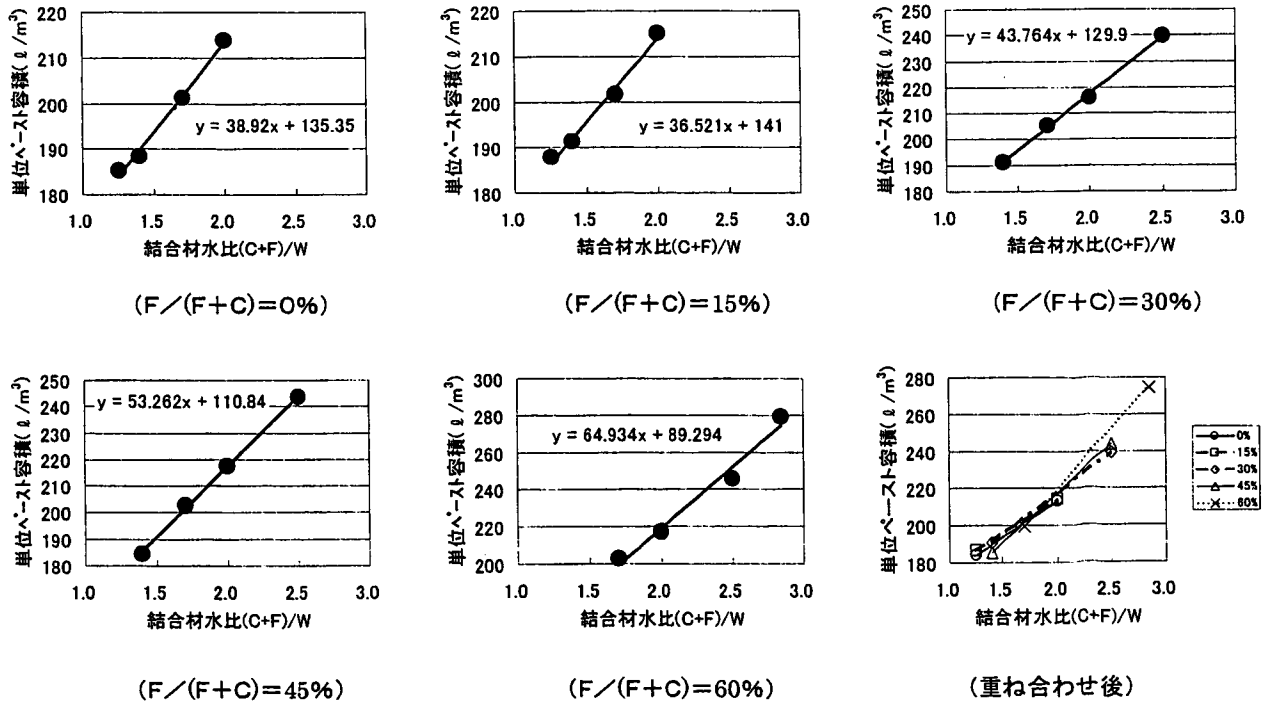
粗骨材最大寸法	40mm
目標スランプ値	4±1cm
目標空気量	4±1%
細骨材率	40%
高性能減水剤	(C+F)×1.0%
ﾌﾗｲｱｯｼｭ用 AE 剤	目標空気量を満足する量

表－3 試験ケース

ﾌﾗｲｱｯｼｭ置換率 F/(C+F)	0,15,30,45,60(%)
結合材水比 (C+F)/W	ﾌﾗｲｱｯｼｭ置換率の 1 試験ケースにつき4種類を設定
圧縮強度の試験材齢	3 および 91(日)

なお、所要の圧縮強度は、3 日強度については型枠の脱型時期を考慮してσ_{3d}=3.5N/mm² とし、91 日強度は一般的な重力式コンクリートダムの設計基準強度を考慮してσ_{91d}=20.0N/mm² とした。

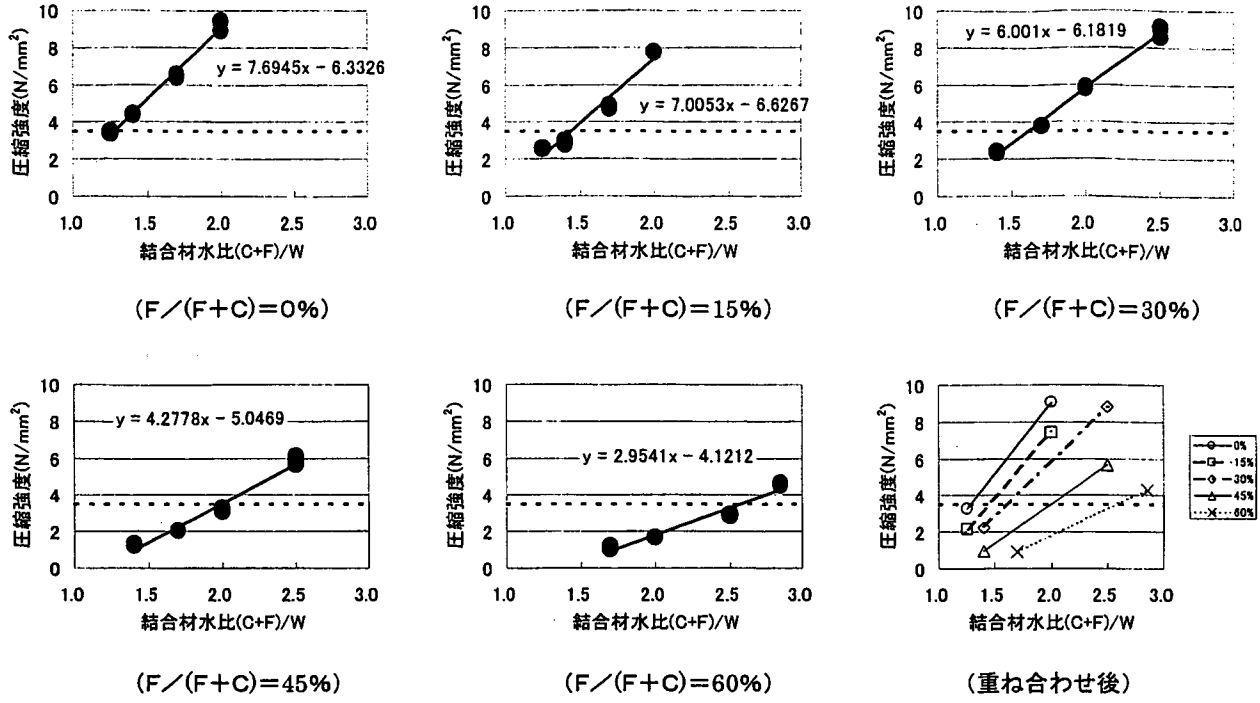
また、圧縮強度試験用の供試体は、1 試験ケースにつき 3 本ずつ製作し、脱型後、試験開始まで 20℃の水中養生を行った。



(F／(F＋C)＝0%)　(F／(F＋C)＝15%)　(F／(F＋C)＝30%)

(F／(F＋C)＝45%)　(F／(F＋C)＝60%)　(重ね合わせ後)

図－2：結合材水比と単位ペースト容積の関係



図－3:結合材水比と圧縮強度(3日材齢)の関係

3. 試験結果

3. 1 結合材水比と単位ペースト容積の関係

図－2に結合材水比と単位ペースト容積(スランプ値=4±1cm、空気量=4±1%となる配合)の関係を示す。図によると、FA 置換率に関係なく、結合材水比に比例して単位ペースト容積も増加する傾向を示し、直線近似できた。

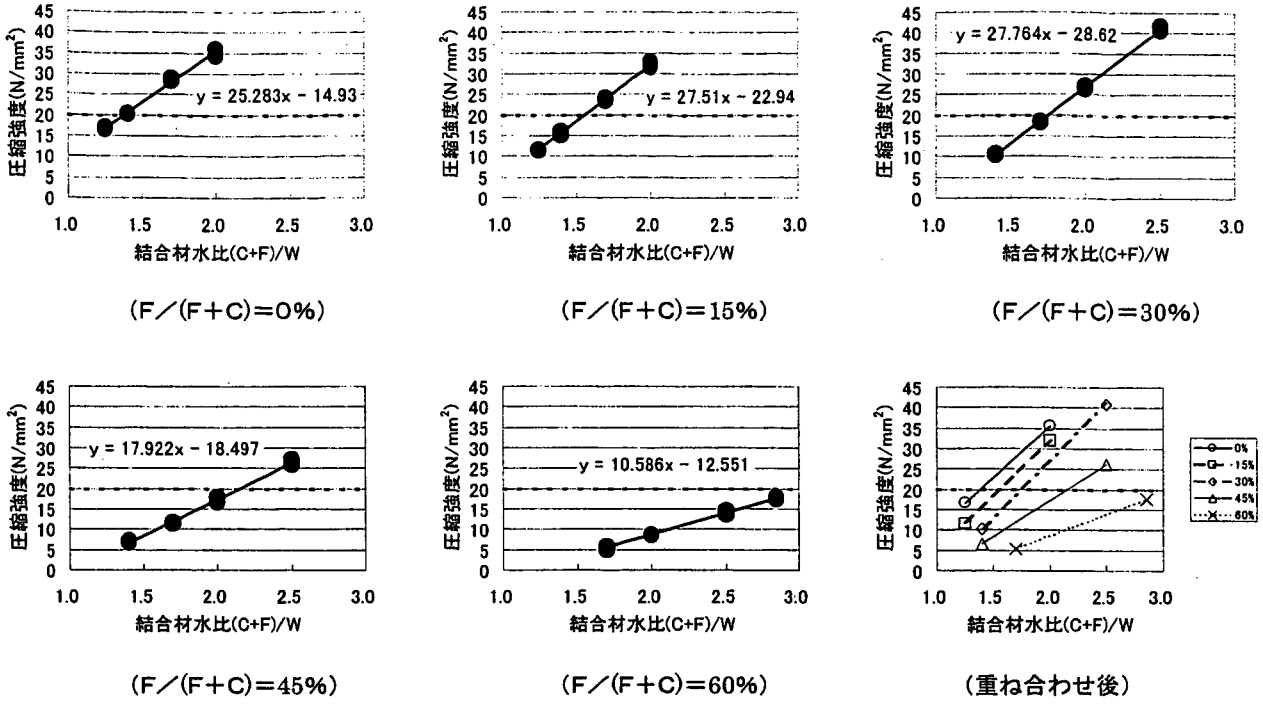
3. 2 結合材水比と圧縮強度の関係

図－3（3日材齢）および図－4（91 日材齢）に結合材水比と圧縮強度の関係を示す。図によると、各試験材齢とも FA 置換率に関係なく、結合材水比に比例して圧縮強度も増加する傾向を示し、直線近似できた。また、圧縮強度の増加割合（各関係式のXの係数）は、3日材齢においては FA 置換率の増加とともに小さくなる傾向を示し、91 日材齢においては FA 置換率が 30%まではほぼ等しいものの、3日材齢の場合と同様に、全体的には FA 置換率の増加とともに小さくなる傾向を示した。

図－5（3日材齢）および図－6（91 日材齢）に同一の結合材水比((C+F)/W=1.70、2.00)における FA 置換率と圧縮強度の関係を示す。図によると、各結合材水比とも材齢に関係なく、FA 置換率が増加するとともに圧縮強度が低下する傾向を示し、直線近似できた。また、結合材水比が大きいほど圧縮強度も大きくなった。

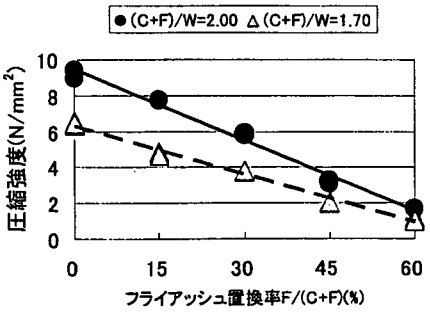
4. 単位セメント量の低減効果の検討

これまでの試験で得られた各関係式を用い、所要の圧縮強度（σ_{3d} =3.5N/mm² および σ_{91d} =20.0N/mm²）を満足する結合材水比および単位ペースト容積を求め、単位セメント量などについて整理すると、表－4に示すとおりとなる。表によると、各試験材齢とも、セメントを FA で置換しない配合(FA 置換率=0%)において、単位セメント量が最も大きくなった。そこで、FA で置換しない場合の単位セメント量を基準に、FA 置

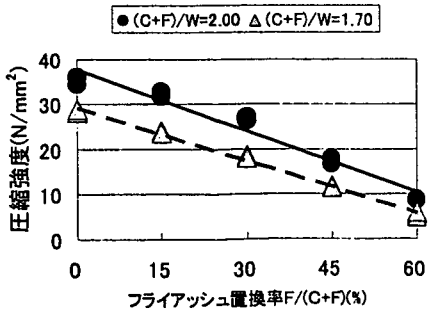


図－4：結合材水比と圧縮強度（91日材齢）の関係

換率ごとの単位セメント量とその低減率について整理すると、図－7に示すとおりとなった。図によると、3日材齢においては、FA 置換率の増加とともに所要の単位セメント量は減少し、置換しない配合(C=169.3kg/m³)と比較した場合、単位セメント量が最小となった FA 置換率=60%の配合(C=134.9kg/m³)で、34.4kg/m³、約 20%の単位セメント量が低減できることが明らかとなった。また、91日材齢においては、FA 置換率=45%までは3日材齢の場合と同様に、FA 置換率の増加とともに単位セメント量が減少する傾向を示したが、FA 置換率=60%においては逆に単位セメント量が増加した。しかし、この場合においても、置換しない配合(C=183.5kg/m³)と比べて単位セメント量が少ない。91日材齢において単位セメント量が最小となった FA 置換率=45%の配合(C=150.5kg/m³)で、33.0kg/m³、約 18%の単位セメント量が低減できることが明らかとなった。



図－5：FA 置換率と圧縮強度の関係
（3日材齢）



図－6：FA 置換率と圧縮強度の関係
（91日材齢）

5. コンクリートダム建設工事における CO_2 削減効果の試算

ここでは、本試験で得られた単位セメント量の低減効果について、実際のコンクリートダム建設工事ではどの程度の CO_2 排出量が削減できるのかを試算してみた。試算にあたっての考え方は、**「コンクリートダム建設に伴って発生する二酸化炭素量の分析」**（土木技術資料,Vol.41-11,pp36-41,1999.11）

表－4：所要の圧縮強度を満足するときの結合材水比、単位ペースト容積および各単位量

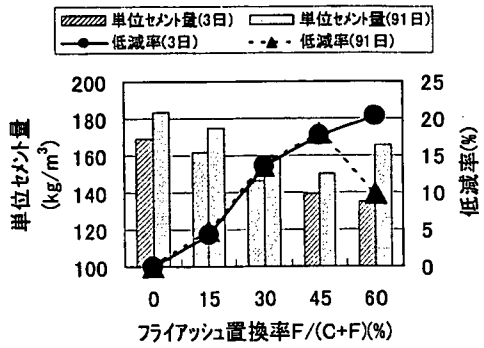
FA置換率 F/(C+F) (%)	3日材齢					91日材齢				
	図－3より算出された結合材水比 (C+F)/W	図－2より算出された単位ﾍﾟｰｽﾄ容積 (ℓ/m³)	単位セメント量 (kg/m³)	単位フライアッシュ量 (kg/m³)	単位水量 (kg/m³)	図－4より算出された結合材水比 (C+F)/W	図－2より算出された単位ﾍﾟｰｽﾄ容積 (ℓ/m³)	単位セメント量 (kg/m³)	単位フライアッシュ量 (kg/m³)	単位水量 (kg/m³)
0	1.2779	185.09	169.3	0.0	132.2	1.3816	189.12	183.5	0.0	132.0
15	1.4456	193.79	162.0	28.6	131.4	1.5609	198.01	174.7	30.8	130.9
30	1.6134	200.51	146.3	62.7	129.0	1.7512	206.54	158.7	60.8	128.8
45	1.9980	217.26	139.3	114.0	126.7	2.1480	225.25	150.5	123.2	127.3
60	2.5799	256.82	134.9	202.4	130.7	3.0749	288.96	165.5	248.2	134.3

に準じた。なお、本報文では試算結果の概要のみを記述する。

5．1 総排出量の試算

5．1．1 試算条件

堤高 100m、堤体積約 51 万m^3の重力式コンクリートダムをモデルとして、柱状工法で施工した場合のCO_2排出量を試算した。表－5に試算に用いた入力データのうちダム諸元およびコンクリート関係に関する主なものを示す。



図－7：FA 置換率と単位セメント量および低減率の関係

5．1．2 試算結果

試算すると、総排出量は 36,100C-t、堤体積 1 m^3あたりの排出量は 71.1C-kg、コンクリート 1 m^3あたりの排出量は 63.4C-kg となった。なお、C-kg は炭素換算 kg を表し、1 C-kg は 3.67kg のCO_2に相当する。

表－5 主な試算条件

項目		単位	数量
ダム諸元	堤高	m	100
	堤頂長	m	250
	堤体積	m^3	508,000
	鋼材量（対堤体積）	%	0.5
コンクリート関係	単位セメント量	kg/m^3	210(外部) 140(内部)
	単位骨材量	kg/m^3	2,100(外部) 2,180(内部)
	外部コンクリート厚	m	2.0
	リフト厚	m	1.5

5．2 CO_2排出量の削減効果の試算

図－8および図－9に、上記の試算で用いた“コンクリートに関わるCO_2排出量”、および“工種別CO_2排出量”のそれぞれの内訳を示す。

これらを参考にCO_2排出量の削減効果を下記のように試算した。また、試算に用いる単位セメント量の低減率は、本試験より得られた FA 置換による最大の低減率を考慮し 20%に設定した。

○セメント低減後のコンクリート1m^3あたりの排出量：

63.4(※1)－ (63.4(※1)×64.8(※2)/100×20(※3)/100)

＝ 55.2C-kg

但し、※1：コンクリート1m³あたりの排出量(C-kg)

※2：コンクリートに関わる CO_2 排出量に占める
セメントの占める割合(%)（図－8参照）

※3：セメントの低減率(%)

○セメント低減後の総排出量

$55.2^{(※1)}/(12.2^{(※2)}+4.7^{(※2)}+72.3^{(※2)})\times 100\times 508{,}000^{(※3)}$

≒ 31,437C-t

但し、※1：削減後のコンクリート1m³あたりの排出量(C-kg)

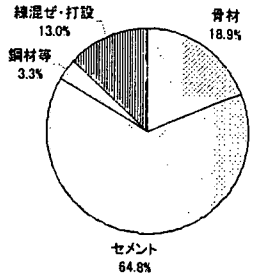
※2：総排出量に占めるコンクリートの製造・打設等に
関わる工種の占める割合(%)（図－9における原石
採取工、骨材製造工、コンクリート工）

※3：堤体積(m³)

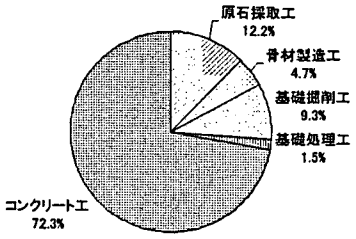
以上より、単位セメント量が 20%低減された場合の CO_2 排出量の削減量および削減率は下記のとおりとなる。

●削減された CO_2 排出量 = 36,100 C-t － 31,437 C-t

= 4,663 C-t（全体の約 12.9%）



図－8：コンクリートに関わる
CO_2 排出量の内訳



図－9：工種別 CO_2 排出量の内訳

6. まとめ

本試験では、コンクリートのフレッシュ性状（スランプ値および空気量）を一定とした条件のもとで、所要の圧縮強度を満足する単位セメント量を、フライアッシュ置換率を変化させて確認した。その結果をとりまとめると以下のとおりである。

①結合材水比と単位ペースト容積の関係は、各試験材齢とも結合材水比に比例して単位ペースト容積も増加する傾向を示し、直線近似できた。

②結合材水比と圧縮強度の関係は、各試験材齢とも結合材水比に比例して圧縮強度も増加する傾向を示し、直線近似できた。また、FA 置換率の増加とともに結合材水比の一定増加量に対する圧縮強度の増加割合が小さくなることが明らかとなった。

③結合材水比が一定という条件での FA 置換率と圧縮強度の関係は、各試験材齢とも FA 置換率に比例して圧縮強度は低下する傾向を示し、直線近似できた。

④所要の圧縮強度を満足する単位セメント量が最小となったのは、3日材齢においては FA 置換率=60%、91日材齢においては FA 置換率=45%のときで、単位セメント量の低減率は概ね 18～20%程度となることが明らかとなった。

⑤単位セメント量の低減率=20%の場合について試算の結果、堤高 100m、堤体積約 51 万m³の重力式コンクリートダムを建設する場合に発生する CO_2 総排出量の約 13%を削減しうることが明らかとなった。

（吉田、佐々木、大滝）

5.3　都市域の交通部門における温暖化防止施策の総合評価に関する研究

研究代表者　建設省土木研究所環境部交通環境研究室　大西博文

建設省土木研究所
環境部交通環境研究室　大西博文・山田俊哉・大城温

平成９～１１年度合計予算額　９，９５５千円
(平成１１年度予算額　３，４８６千円)

[要旨]

本研究では、地球温暖化の原因となる温室効果ガスのうち二酸化炭素（CO_2）について、都市内における交通部門のCO_2排出量の予測モデルを作成し、このモデルを使ってCO_2排出量削減施策の効果を推計するとともに、施策効果の総合的な評価を行った。

初めに、都市の交通部門におけるCO_2排出量削減施策の効果予測モデルの基本的枠組みを検討するとともに、施策のモデルへの導入方法について検討を行った。CO_2排出量削減施策の効果予測モデルについては、様々な施策の効果を簡便に推計でき、かつ操作性のよいモデルとなるようにした。モデルにおいては、渋滞等による旅行速度の低下や渋滞解消施策による旅行速度の向上などの旅行速度の変化を考慮できるモデルとした。また、本モデルに導入する諸施策を体系的に整理し、モデルへの導入方法を検討した。

次に、このCO_2排出量予測モデルの基本的枠組みに基づいて、モデルの詳細検討及び作成を行った。モデルは、４つのサブモデル（交通機関別トリップ推計サブモデル、自動車の旅行速度別走行台キロ推計サブモデル、公共交通車両キロ推計サブモデル、CO_2排出量推計モデル）から構成される。これらの各サブモデルについて、詳細検討及びパラメータの導出などを行うとともに、各サブモデルの感度の検討を行った。

さらに、宇都宮市をケーススタディ対象地として、作成したモデルを用いて都市内交通によるCO_2排出量削減施策の効果予測を行った。自動車からのCO_2排出量削減については、走行台キロの削減によるものと旅行速度の向上によるものとに分けて予測した。

このケーススタディの結果から、これらの施策の効果は自動車走行台キロの削減による効果だけでなく、旅行速度の向上による効果も同程度あるという結果が得られ、道路交通の円滑化施策もCO_2排出量削減に大きく貢献することが明らかとなった。

[キーワード]

交通体系、環境負荷、二酸化炭素、都市交通整備、施策評価

１．序

地球温暖化の原因となる温室効果ガスは、その排出量の大部分をCO_2が占めており、CO_2排出量の削減は喫緊の課題である。我が国では、運輸部門のCO_2総排出量が全体の約２１％を

占めており、その約８８％が自動車からの排出である。産業、民生などの他の部門が省エネルギー化の進展や長引く不況の影響などで横ばい傾向であるのに対し、運輸部門からの排出量は増加の一途をたどっており、運輸部門における温室効果ガスの削減はより重要な問題であると言える。その中でも、社会経済活動の集中している都市地域における排出量が多いことから、より環境負荷の小さい都市の交通体系を形成していくことが必要と考える。１９９０年に閣議決定された「地球温暖化防止行動計画」においても、示された施策のメニューとして「二酸化炭素排出の少ない都市・地域構造の形成」「二酸化炭素排出の少ない交通体系の形成」があげられている。より環境負荷の小さい都市の交通体系を形成していくためには、都市交通部門においてCO_2排出量削減施策を着実に実施することが必要であるが、そのためには、施策のCO_2削減効果を的確に把握し、実現可能性や利便性等も踏まえて施策を評価する必要がある。

２．研究目的

本研究では、都市交通部門におけるCO_2排出量の予測モデルを作成すること、このモデルを使って、種々のCO_2排出量削減施策の効果を定量的に推計すること、推計した効果からその施策を総合的に評価できるようにすることにより、環境負荷の小さい交通体系のあり方を定量的なデータをもとに提案することが目的である。

３．都市交通部門によるCO_2排出量推計モデルの全体構造の検討

本モデルは、都市の運輸部門におけるCO_2排出削減施策の削減効果、利便性、コスト等も含めた総合的な評価を行うための手段として、様々な施策オプションの組み合わせによる削減効果を概括的に把握しようとするものである。

本モデルで対象とする地域は、一定のまとまりをもった都市又は都市圏とする。都市圏の大きさには特に制限を設けないが、ここでは自動車から軌道系交通機関への転換が可能と考えられる中規模の都市（人口５０万人程度）を念頭に置いてモデルの検討を行った。

評価を行うCO_2排出削減施策は、表１のように分類し11施策を取り上げた。

表１　評価を行うCO_2排出削減施策

分類	手段	施策
自動車総走行距離の削減	生成交通量の削減	・中心市街地の高度化 ・在宅勤務の促進
	自動車以外の交通機関への転換	・鉄道のサービス改善 ・バスのサービス改善 ・パークアンドライドの促進 ・自転車道の整備 ・エリアプライシング
自動車走行距離あたりのCO_2排出量削減	自動車単体対策	・低公害車の導入
	道路交通の円滑化	・ボトルネック対策による渋滞の解消 ・幹線道路の整備 ・ピーク時間帯交通量の平準化

CO_2排出量は交通機関別に求める必要があり、特に自動車については旅行速度により大きく排出量が異なることから、旅行速度別の総走行距離（走行台キロ）を推計する必要がある。そこで、モデルは図１に示すとおり、交通機関別トリップ推計サブモデル、自動車の旅行速度別走行

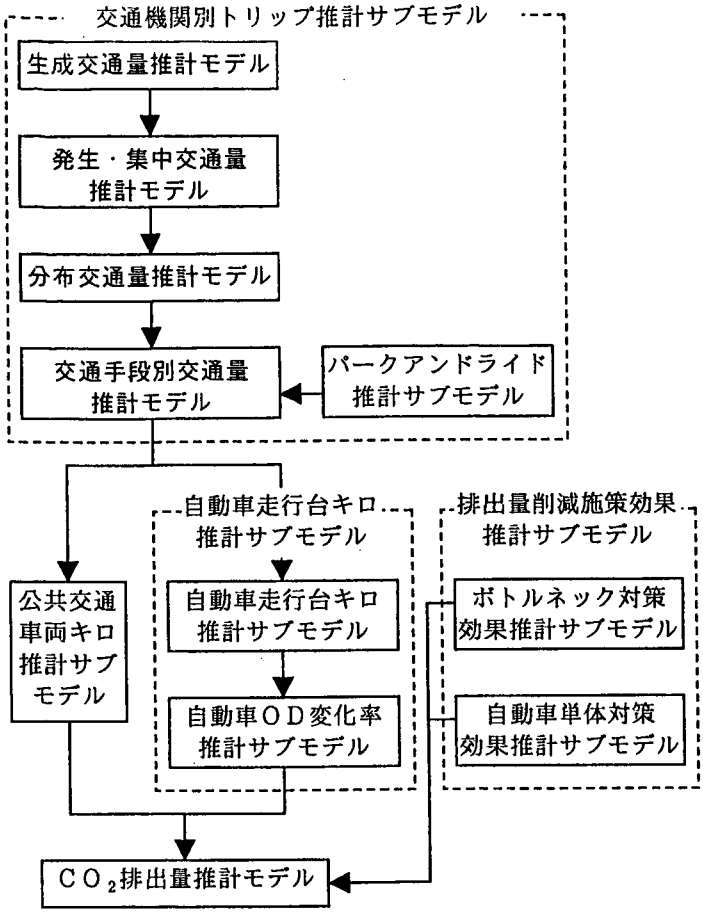


図１　都市交通部門からのＣＯ２排出量予測モデルの全体構造

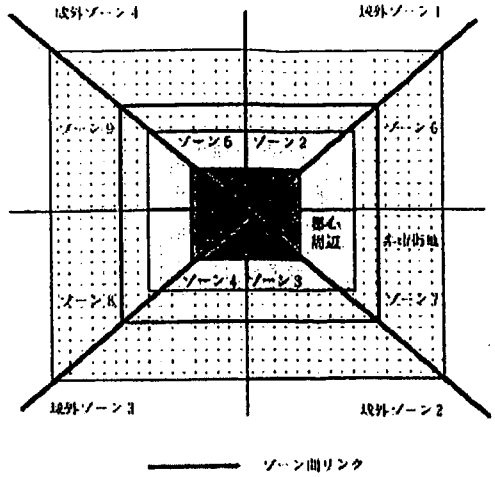


図２　ゾーン区分の概念図

台キロ推計サブモデル、公共交通車両キロ推計サブモデル、ＣＯ２排出量推計サブモデル、排出量削減施策効果推計サブモデルから構成される。

なお、本モデルでは簡便性を考慮しつつ地域的な施策効果の違いを考慮できるようにするため、都市を図２に示すようなゾーンに区分し、ゾーン毎にトリップの推計、ＣＯ２排出量の算出などを行うこととした。なお、実際には対象とする都市構造に合わせて適切なゾーン設定を行う。

４．サブモデルの検討

（１）交通機関別トリップ推計サブモデル

①　サブモデルの概要

本サブモデルは、自動車保有量の変化、産業別従業者数などの社会経済指標や公共交通機関の整備量や旅行コスト、旅行時間などから交通機関別のトリップを推計するモデルである。ここでは、生成トリップの推計、発生・集中トリップの推計、分布トリップの推計、交通機関別分布トリップの推計の順に行った。

②　生成トリップの推計

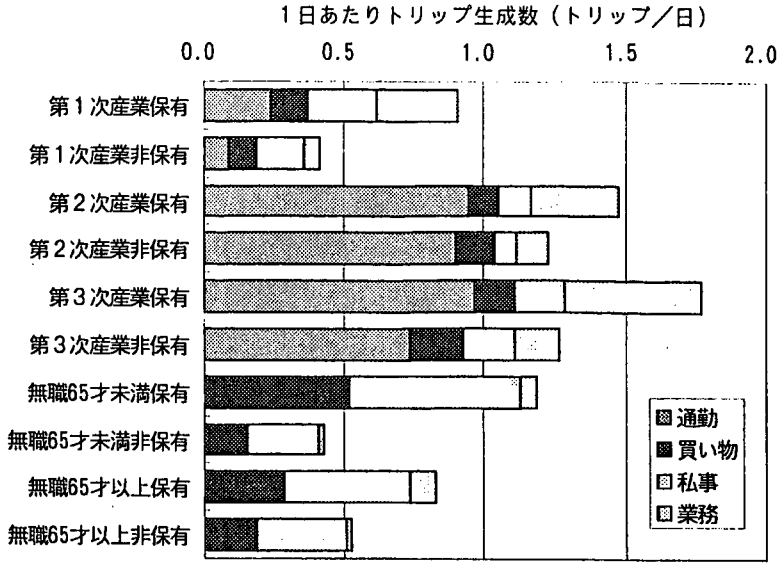
トリップ生成原単位は産業別、年齢別人口や自動車保有量等による影響が大きく、例えば第１次産業では自宅近くで仕事することが多いため、他の産業と比較して通勤トリップが１／４程度しか生成せず、６５歳以上の高齢者は全体のトリップが第３次産業従事者と比較して半分程度である。また、自動車の保有・非保有については目的地や交通手段の選択に影響し、自動車保有者と非保有者ではトリップ生成原単位が大きく異なると考えられるため分けて推計することとした。

このような要因を反映するために、目的別（通勤、買い物、私事、業務の４分類）個人属性別（第１次産業従事者、第２次産業従事者、第３次産業従事者、無職６５才未満、無職６５才以上）

に生成原単位を算出した（図３）。将来の予測を行う場合には、人口の変化量や自動車保有の変化を考慮して生成トリップ数を算出することとした。

③発生・集中トリップの推計

各ゾーンから発生するトリップは、それぞれのゾーンにおける社会・経済活動と密接な関係にある。例えば、夜間人口の多いゾーンでは通勤目的のトリップが多く発生することなどがあげられる。そこで、②で推計した生成トリップ数をゾーン毎に目的別、自動車保有者・非保有者別の発生・集中トリップを推計する。ここでは、産業別人口や昼間人口・夜間人口を指標とした線形回帰式を用いるものとした。



※保有、非保有とは自動車の保有、非保有のことである。

図３　個人属性別の目的別トリップ生成原単位

④分布トリップの推計

③で推計した発生・集中トリップからゾーン間の分布トリップを推計するものである。本モデルでは、現在パターン法の１つであるフレータ法を用いることとした。

⑤交通機関別分布トリップ推計

分布トリップから、交通機関別の旅行時間、コストなどを用いて機関別分布トリップを推計する。

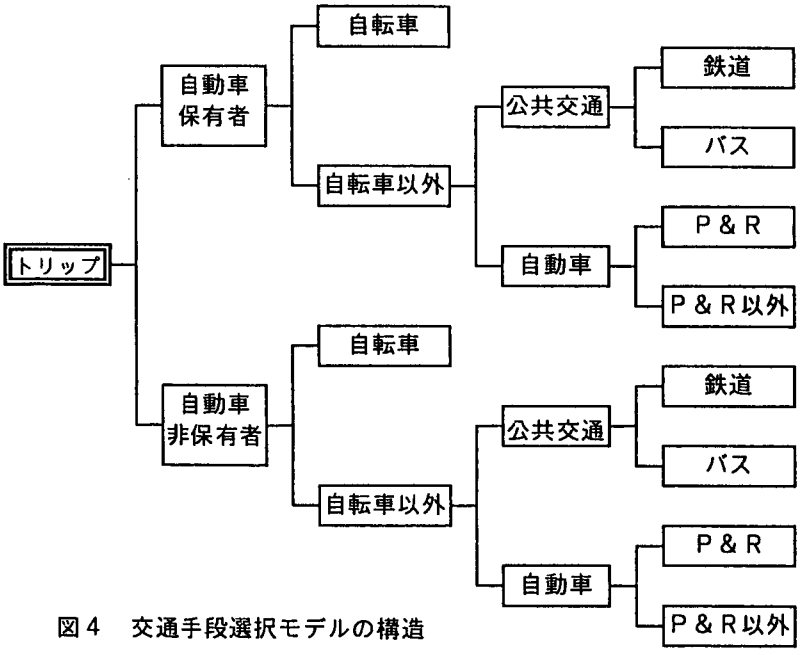


図４　交通手段選択モデルの構造

まず、自動車保有者と非保有者で交通手段の選択行動が大きく異なると考えられるため、それぞれ別に集計することとした。それぞれの手段選択モデルは、バイナリーチョイス型の集計ロジットモデルを用いることとした。既存のパーソントリップ調査の研究より、トリップ長の短いトリップを先取りした形が安定性は良いとされているため、本モデルもそれに従った。また、パークアンドライド（Ｐ＆Ｒ）の手段選択は、主に自動車の利用者が公共交通に乗り換える状況を表現するために、自動車の利用者の中から選択する構造とした（図４）。

それぞれの選択モデルについては、以下の式を用いた。モデルには精度向上を目的として、ダミー変数を導入した。ダミー変数は都心ダミーと鉄道ダミーの２種類を用い、都心ダミーはトリップの出発ゾーンまたは目的ゾーンが都心ゾーンであるか否かを表現しており、鉄道ダミーは出発ゾーンと目的ゾーンが鉄道で結ばれているか否かを表現している。

a．自転車選択モデル

$$自転車選択確率=1/(1+\exp(\alpha\cdot d+\beta\cdot k+\gamma)) \quad (1)$$

d：ゾーン間距離
k：都心ダミー（目的地を都心部に持つ場合k＝1、それ以外k＝0）
α、β、γ：パラメータ

b．自動車／公共交通選択モデル

$$自動車選択確率=\exp(V_{car})/\exp(V_{car})+(V_{pub}) \quad (2)$$

V_{car}：自動車の効用関数
V_{pub}：公共交通の効用関数

ここで、
$$V_{car}=\alpha\cdot t_{cat}+\beta\cdot c_{car}+\gamma\cdot k+\delta \quad (3)$$
$$V_{pub}=\alpha\cdot t_{pub}+\beta\cdot c_{pub} \quad (4)$$

t_{car}，c_{car}：自動車の所要時間、費用
t_{pub}，c_{pub}：公共交通の所要時間、費用
k：都心ダミー（目的地を都心部に持つ場合k＝1、それ以外k＝0）
α、β、γ、δ：パラメータ

c．鉄道／バス選択モデル

$$鉄道選択確率=\exp(V_{rail})/\exp(V_{rail})+(V_{bus}) \quad (5)$$

V_{rail}：鉄道の効用関数
V_{bus}：バスの効用関数

ここで、
$$V_{rail}=\alpha\cdot t_{rail}+\beta\cdot c_{rail}+\gamma\cdot k+\delta \quad (6)$$
$$V_{bus}=\alpha\cdot t_{bus}+\beta\cdot c_{bus} \quad (7)$$

t_{rail}，c_{rail}：鉄道の所要時間、費用
t_{bus}，c_{bus}：バスの所要時間、費用
k：鉄道ダミー
（出発地と目的地が鉄道で結ばれている場合k＝1、それ以外k＝0）
α、β、γ、δ：パラメータ

d．パークアンドライド（P＆R）選択サブモデル

$$P\&R選択確率=\exp(V_{par})/\exp(V_{par})+(V_{other}) \quad (8)$$

V_{par}：P＆Rの効用関数
V_{other}：それ以外の端末交通手段の効用関数

ここで、
$$V_{par}=\alpha\cdot t_{par}+\beta\cdot c_{par}+\gamma \quad (9)$$
$$V_{other}=\alpha\cdot t_{other}+\beta\cdot c_{other} \quad (10)$$

t_{par}，c_{par}：P＆Rの所要時間、費用
t_{other}，c_{other}：それ以外の端末交通手段の所要時間、費用
α、β、γ：パラメータ

（2）自動車の旅行速度別走行台キロ推計サブモデル

①サブモデルの概要

（1）で推計した自動車の分布トリップや道路ネットワークの整備量からゾーン間の走行台キロの変化を推計し、道路ネットワークの各リンクの交通量を推計する。さらに、Q－V式（交

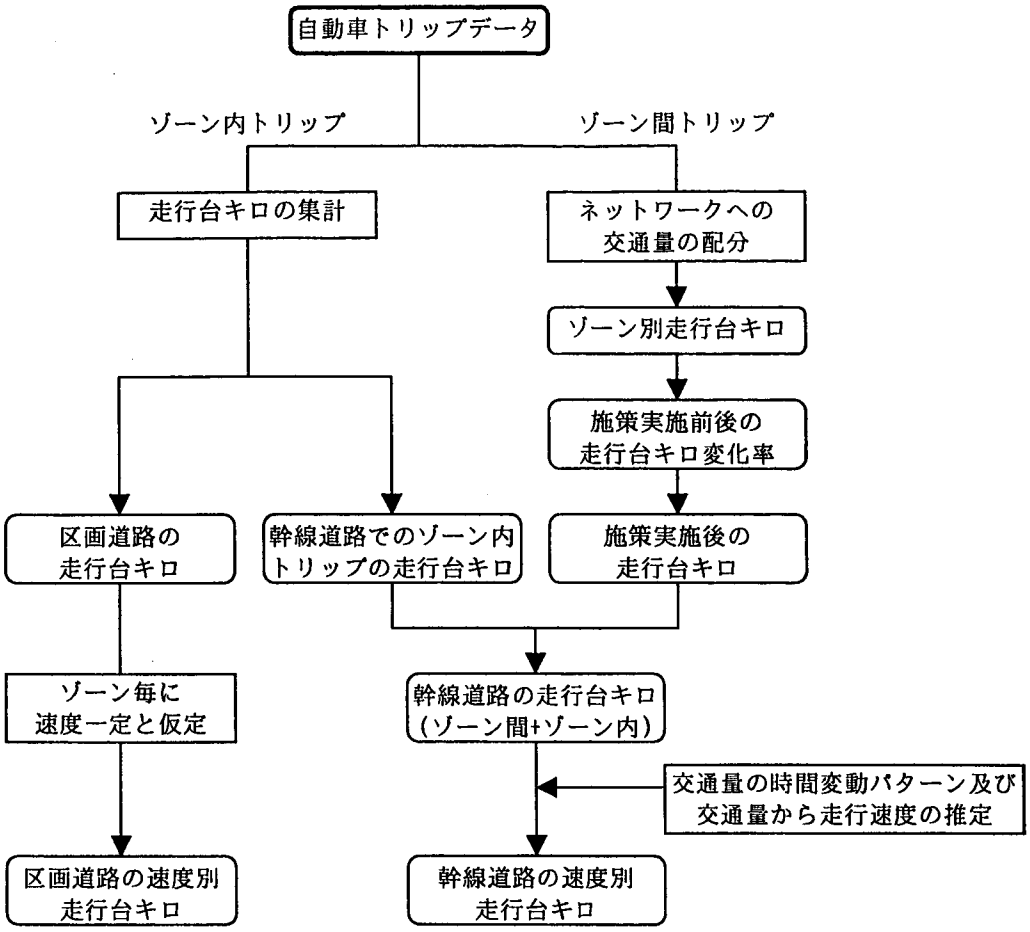


図5　自動車走行台キロ推計サブモデルの流れ

通量と速度の関係を表した式）や交通量の時間変動などを用いて、旅行速度別走行台キロを推計するモデルである。なお、自動車走行台キロは幹線道路の走行台キロと区画道路の走行台キロに分けて推計を行う。ここでいう幹線道路とは、道路交通センサスが実施され車種別交通量やピーク時旅行速度等が実測されている道路である。幹線道路の走行台キロは、簡略化したトリップでのネットワーク配分の結果と、道路交通センサスの交通量データを用いて推計した。区画道路では道路交通センサスが実施されておらず、これらのデータがないため、ゾーン単位の発生・集中交通量とトリップ当たりの走行台キロ推計モデルにより推計した。

②簡略ネットワークの設定

本モデルでは、配分計算を簡略的に行うため、隣接するゾーン間を結ぶ幹線道路（本研究では道路交通センサス対象道路が該当するものとした）を１本のリンクに代表させた簡略ネットワークを設定することとした。なお、ゾーン内で閉じているリンクはゾーン内々交通量として扱うこととした。ネットワークの簡略化の例を図６に示す。

③幹線道路のリンク交通量の推計

分布トリップの変化と現況の分布交通量からゾーン間の分布交通量を推定する。これを簡略化ネットワーク上で配分計算を行い、簡略ネットワーク上のリンクの走行台キロを推定する。なお、配分計算は、モデル上では分割配分法を用いることとした。これと現況の簡略ネットワークの走行台キロを比較して、施策実施前後のゾーン間の走行台キロの変化率を推定する。施

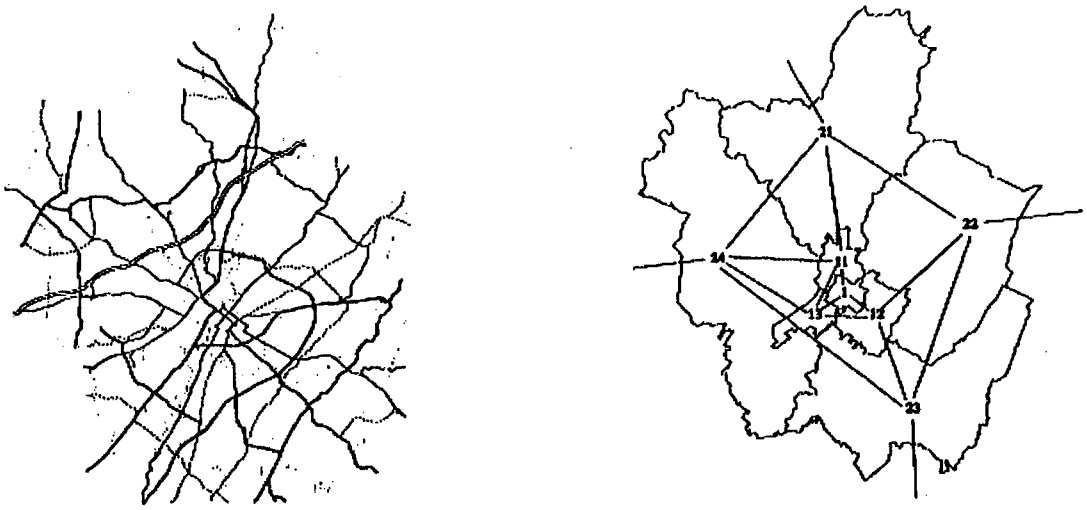


図６　道路ネットワークの簡略化（宇都宮市）

策実施後の各幹線道路の走行台キロは、対応する簡略化ネットワーク上のリンクの走行台キロの変化率を乗じて推定する。

④幹線道路の旅行速度別走行台キロ分布

本モデルでは、各リンクについて年間の時間帯別交通量及び旅行速度を車種別に推計し、それを集計することにより都市圏全体のCO_2排出量を推計する。各リンクの年間走行台キロは、日交通量を設定した後に時間帯別交通量を推計してそれらを集計した。

日交通量は、道路交通センサスの一般交通量調査の値を用いる。２４時間交通量観測地点については、２４時間の観測値を用いるものとし、１２時間交通量観測地点については、昼夜率を用いて２４時間交通量を推計した。

時間帯別交通量は、道路交通センサスの観測値は用いずに、道路交通量の時間変動パターン（図７）と各区間の交通容量より推計した。時間帯別交通量の変動パターンは、全国の道路交通センサス対象区間の時間変動パターンより作成したものを用いた。時間変動パターンは、道路容量に影響されない時間帯別の交通需要の変動を推計するために、渋滞が発生していないと考えられるセンサス区間を対象として作成した。

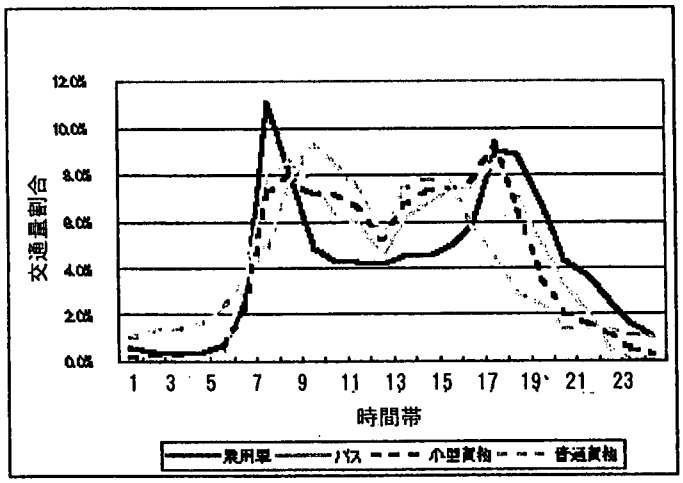


図７　車種別の交通量時間変動パターン

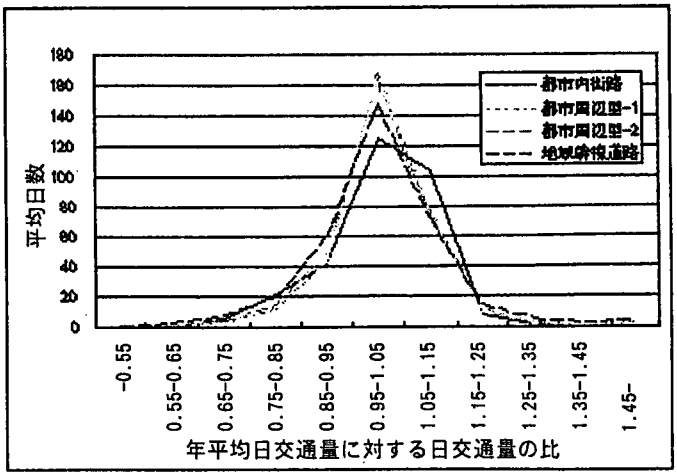


図８　年平均日交通量に対する日交通量の比の頻度分布

道路交通量は、時間帯別に変動するほか、日によっても変動が発生するため、本モデルでは平成６年度の交通量常時観測調査の日交通量変動データ（図８）を用いた。モデルでは、道路交通センサスで観測された交通量が年平均日交通量と一致していると仮定し、日交通量変動データの頻度分布を用いて年間交通量を推計した。ただし、モデルの負荷を軽減するため、出現頻度の低い日交通量比0.75以下の場合と1.25以上については捨象し、日交通量比が0.8～1.2の間で変動するとしてモデルを作成した。

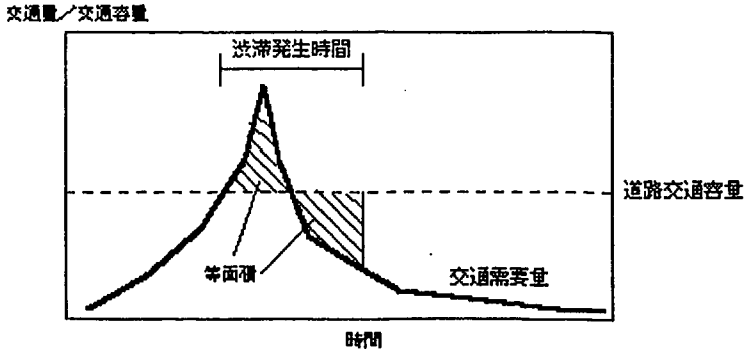


図９　渋滞時間の定義

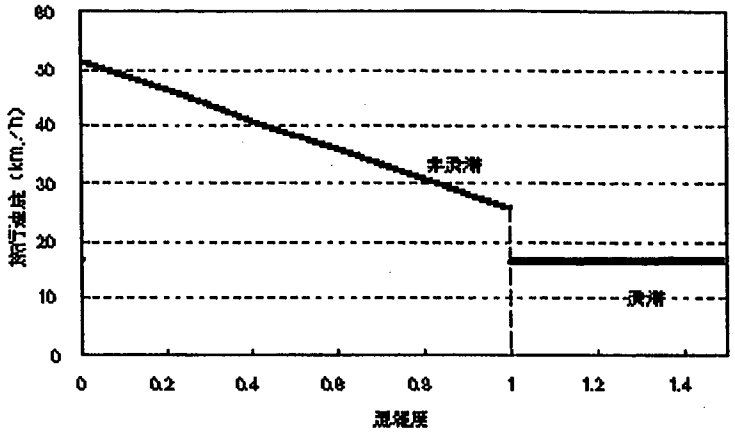


図10　旅行速度と混雑度（交通量／交通容量比）の関係式の例

以上の計算により、各センサス区間の年間時間交通需要量（365×24＝8760時間の時間帯別交通量）を推計した。

次に、旅行速度別に走行台キロを集計した。道路の交通量は、道路の交通容量により制約を受け、道路の交通需要量が道路交通容量を上回った場合には、その道路は渋滞し、旅行速度は著しく低下する。そこで、各センサス区間が渋滞状態にあるか非渋滞状態にあるかの判別は、道路交通容量を用いて行った。

本モデルでは、道路交通センサスの片側ピーク時交通量と片側交通容量を比較し、値の大きいものを道路交通容量として設定している。片側交通容量Ｃは、乗用車換算時間交通容量に対して沿道状況区分別に計画水準による補正を行い、上り下りを２分配（半分）したものとする。ここで、ＤＩＤ及びその他市街地については、

Ｃ＝乗用車換算時間交通容量×0.9／2

とし、平地、山地については、

Ｃ＝乗用車換算時間交通容量×0.85／2

とした。

道路交通容量と時間帯別交通需要量を比較し、時間帯別交通需要量が道路交通容量を上回る時間帯は、渋滞時間帯として処理した。ただし、道路上である時間帯に交通需要量が交通容量を超過した場合には、超過交通量を処理し終わるまで渋滞が続く。そこで、本モデルでは、図９に示すように、ある時間帯で交通需要量が交通容量を超過した場合には、超過交通量を処理するまでの時間を渋滞時間と判定する。

旅行速度の推計は、旅行速度と交通量／交通容量比の関係式（以下Ｑ－Ｖ式という）を用いて行った（図10）。本モデルで用いるＱ－Ｖ式は、渋滞／非渋滞別に分類した。時間帯別交通量を推計する際に判別された渋滞／非渋滞の判別結果と、交通量、道路交通容量のデータによ

り旅行速度を推計した。Q－V式は道路種類別・信号密度別に算出した。

このQ－V式から旅行速度を推定し、旅行速度別に走行台キロをまとめることにより旅行速度別走行台キロの分布を推計する。これを全ての幹線道路について行うことにより、対象地域（あるいはゾーン）別の旅行速度別走行台キロが推計できる。

⑤区画道路の旅行速度別走行台キロの算出

幹線道路以外の道路（ここでは区画道路という）の走行台キロはこれまで述べてきた方法では推計できない。そこで、区画道路については、正方形の幹線道路に囲まれた地区内の街路を仮定し、街路から発生する交通が最短ルートを通って地区外へ移動するものとして、単位発生交通量当たりの走行距離を計算した（図11）。その結果、区画道路の単位発生トリップ当たりの走行距離＝5/16D（D：幹線道路の間隔）となった。

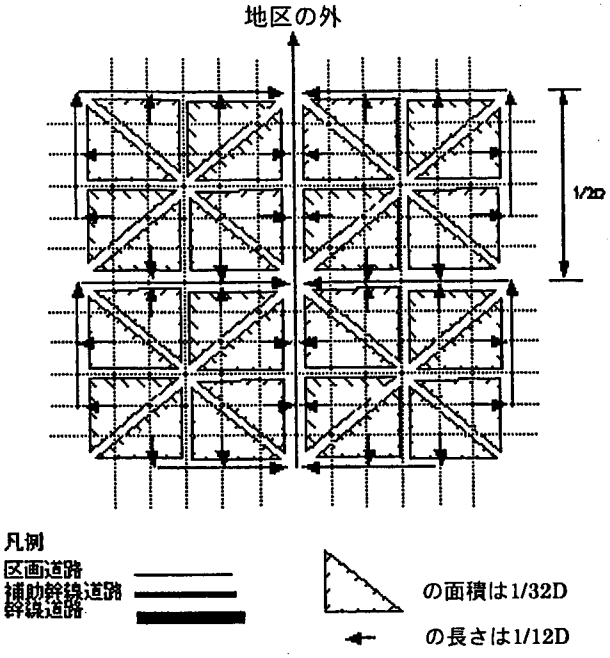


図11　区画道路のトリップあたり走行距離算出の考え方

しかし、実際には仮定のような最短経路で幹線道路に到達できるとは限らないため、誤差が生ずる。運輸省自動車輸送統計年報による全走行台キロと道路交通センサスによる走行台キロ（幹線道路走行台キロ）の差が区画道路の走行台キロと考えると、上記の区画道路走行台キロの推定結果の１．３倍であった。そこで、ここでは区画道路走行台キロの推計の際には、１．３を補正係数として乗ずることとした。

この値に、ゾーンの発生・集中トリップを乗じることにより、区画道路の走行台キロを推計した。

なお、区画道路からのCO_2排出量算出の際の旅行速度は、ＤＩＤ地域内は18km/h、それ以外の地域では28km/hと仮定した。

（３）公共交通機関車両キロ推計サブモデル

公共交通機関（鉄道等）の車両キロについては、都市内路線延長に運行車両数（運行本数に１運行当たり編成車両数を乗じたもの）を乗じることにより推定する。運行車両数は、公共交通機関の分布トリップ（＝公共交通機関の利用者数）に比例するものとし、既存のデータから運行車両数と利用者数の関係を推定するこ

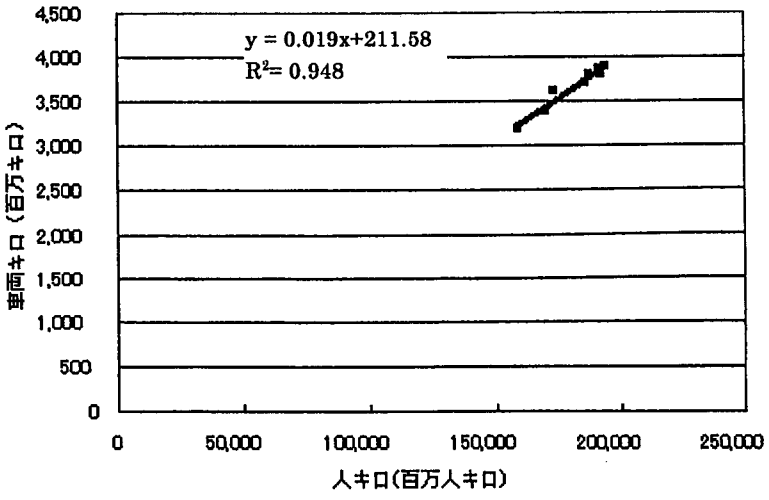


図12　鉄道車両キロと旅客人キロの関係

ととした（図12）。

また、CO_2削減施策実施により公共交通利用者数が増加する場合は、車両キロが利用者数の増加割合と同じ割合で増加すると考え、利用者数と車両キロの回帰式から車両キロ増加割合を求めることとした。

（4） CO_2排出量推計サブモデル

（2）や（3）で推計された自動車の旅行速度別走行台キロや公共交通機関の車両キロに各交通機関のCO_2排出係数を乗じて、交通機関別CO_2排出量を推定するモデルである。自動車については、CO_2排出係数としてシャシダイナモ試験等のデータを用いて推計された旅行速度別CO_2排出係数を用いる（図13）。また、鉄道等の公共交通機関については、統計から得られる路線別の電力消費量に単位電力当たりのCO_2排出量を乗じ、車両走行キロで除すことにより推計する。

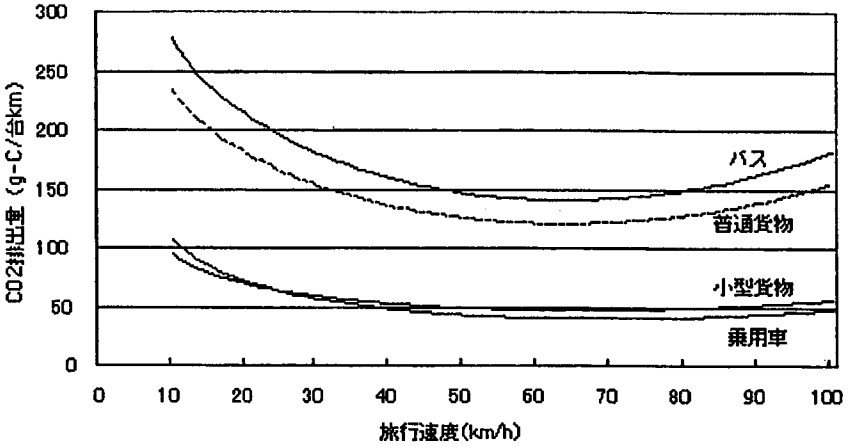


図13 自動車の車種別速度別CO_2排出係数

5．CO_2排出量削減施策の効果の試算

（1）中心市街地の高度化

交通需要は、土地利用と大きくかかわりを持つ。公共交通機関の利便性の高い都心部での土地利用を高度化することにより、公共交通への転換を促進することができる。土地利用によって交通需要をコントロールする施策としては、オランダの「ABCポリシー」や、シアトル（アメリカ）で導入されている「アーバンビレッジ」等がある。

CO_2排出量削減推計モデルでは、中心市街地の高度化による効果を発生・集中交通量推計サブモデルに反映させることとした。例えば、通勤交通の場合、発生交通量は夜間人口の関数であらわされ、集中交通量は昼間人口の関数であらわされる。従って、夜間人口と昼間人口の変化をモデルに反映することにより、中心市街地の高度化による効果を推計する。

表2 中心市街地の高度化による効果の試算結果

	自動車走行台キロ（千台km/年）		平均旅行速度（km/h）		自動車によるCO_2排出量(t-C/年)	
都心	102,996	99.5%	15.1		9,145	99.2%
近郊	390,575	98.9%	14.8		33,791	98.1%
郊外	1,543,360	99.6%	27.3		111,876	99.5%
全域	2,036,931	99.5%	22.4	0.383	154,812	99.1%

交通手段	CO_2排出量（t-C/年）	
自動車	154,812	99.1%
鉄道	5,312	100.0%
合計	160,124	99.3%

※各項目ともに右側の欄は現況との比率（平均旅行速度は変化分）

ここでは、中心市街地の高度化施策の効果を都心ゾーンの第３次産業就業人口の増加で表現することとした。具体的には、都心ゾーンの第３次産業就業人口を現況の１．２倍とし、都心以外のゾーンの第３次産業就業人口を一律に減少させた。

その結果、都市からのCO_2排出量は０．７％とわずかに減少した。これは、都心部に第３次産業が集中することにより、わずかに自動車走行台キロが減少したこと、平均旅行速度がわずかに向上したことによると考えられる。

（２）情報通信の利用による在宅勤務の促進

近年、インターネット等の情報通信技術の普及により、在宅勤務やサテライトオフィスによる業務の可能性が拡大している。

情報通信の利用による在宅勤務が普及した場合には、通勤トリップの削減をはかることが可能となる。ただし、従来の形態では勤務地から発生していた業務トリップや私事トリップが、居住地から発生することになるため、業務目的や私事目的の分布にも影響を与える。そのため、モデル化に際しては、通勤目的のみではなくすべての目的のトリップに対してこの影響を評価する必要がある。

CO_2排出量削減推計モデルでは、情報通信による在宅勤務のモデル化は、生成交通量推計サブモデルあるいは発生・集中量推計サブモデルを用いて行う。

ここでは、在宅勤務を行う業種は第３次産業のみとし、在宅勤務により第３次産業従業者の１０％が通勤を行わないものと仮定し、通勤トリップは発生しないものとした。そのため、都心部での第３次産業従業者人口は減少し、都市周辺部での第３次産業従業者人口が増加する。

その結果、在宅勤務によるCO_2排出量削減効果は０．４％とわずかなものであった。これは通勤トリップが削減された代わりに、私事トリップや業務トリップが居住地周辺のゾーンで増加し、そのゾーンにおける道路の平均旅行速度が減少すること、通勤トリップは鉄道利用者の割合が他のトリップと比較して高いため、鉄道利用者の減少が大きいことなどが理由として考えられる。

表３　在宅勤務の促進による効果の試算結果

	自動車走行台キロ（千台km/年）		平均旅行速度（km/h）		自動車によるCO_2排出量(t-C/年)	
都心	102,013	98.6%	15.4		9,030	97.9%
近郊	396,481	100.4%	14.4		34,691	100.6%
郊外	1,541,922	99.6%	26.6		112,094	99.7%
全域	2,040,416	99.7%	21.9	-0.133	155,815	99.8%

交通手段	CO_2排出量（t-C/年）	
自動車	155,815	99.8%
鉄道	5,013	94.4%
合計	160,828	99.6%

※各項目ともに右側の欄は現況との比率（平均旅行速度は変化分）

（３）軌道系交通機関のサービス改善

軌道系交通機関（鉄道、路面電車、モノレール、新交通システム等）は、１人あたりのCO_2排出量が自動車と比較して少ないため、そのサービスを改善して自動車から軌道系交通機関へ転換させることにより、CO_2排出量を削減することができる。公共交通機関のサービス改善策としては、以下のようなものがある。

・運賃の見直し

・運行頻度の改善
・走行速度の向上
・交通結節点の利便性向上
・新規整備

ここでは、運賃の見直しと走行速度の向上を取り上げる。

CO_2排出量削減推計モデルの中では、これら公共交通機関のサービス改善策のモデル化は、交通手段推計サブモデルにおいて行う。このサブモデルでは、多段型のバイナリーチョイスモデルを用いている。ロジットモデルの変数として所要時間・所要費用・ダミー変数の３つを用いて各交通手段の利用割合を推計している。所要時間と所要費用の２つの変数はそれぞれ独立ではないが、各交通機関の所要時間と所要費用を変更することによる利用への影響を把握するために採用している。

①運賃の見直し

公共交通機関の運賃の変更をモデル上で表現するには、ゾーン間の所要費用を変化させる。一般に、パーソントリップ調査などでは、各トリップの交通手段やトリップの所要時間については調査されているが、費用については調査されない。そのため、CO_2排出量削減推計モデルでは、ゾーン間の交通手段別の平均移動距離より費用を推計する方法をとっている。

②走行速度の向上

快速電車の運行など鉄道の表定速度を上昇させることによりサービスの改善を行う場合には、モデル上でゾーン間の所要時間を変更することにより表現する。

ここでは、鉄道の運賃を２０％割り引いた場合のCO_2排出量削減効果を試算した。しかし、鉄道の利用者は１０％程度増加したものの、CO_2排出量削減効果はほとんどなかった。これは、鉄道への転換の大半をバスからの転換が占めているためである。この原因として、移動に公共交通機関を利用できる人が限られていることや、この程度の運賃の低下では依然として自動車よりトリップ費用がかなり高いということが考えられる。また、交通手段選択モデルが多段型の二者択一モデルで、モデル中の「自動車利用」に対する選択肢が「公共交通利用」であるため、鉄道運賃の低減に対する反応が鈍いことも原因として考えられ、今後の検討課題の一つである。

表４　軌道系交通機関のサービス改善による効果の試算結果

	自動車走行台キロ（千台km/年）		平均旅行速度（km/h）		自動車によるCO_2排出量(t-C/年)	
都心	103,445	100.0%	15.0		9,217	99.9%
近郊	394,933	100.0%	14.4		34,462	100.0%
郊外	1,548,606	100.0%	27.0		112,476	100.0%
全域	2,046,984	100.0%	22.0	0.010	156,155	100.0%

※各項目ともに右側の欄は現況との比率（平均旅行速度は変化分）

交通手段	CO_2排出量（t-C/年）	
自動車	156,155	100.0%
鉄道	5,643	106.2%
合計	161,798	100.2%

（４）バスのサービス改善

宇都宮のような規模の都市圏では、軌道系交通機関がそれほど発達しておらず、鉄道の利用が

可能な人口は限られている。そこで、バスのサービスを改善して自動車からの転換を促進する施策の効果を検討する。

バスサービスの改善施策としては、運賃の低減・運行頻度の増加・基幹バス（ガイドウェイバスを含む）の導入・バスレーンの整備などがある。ここでは、バスレーンの整備や運行頻度の増加などの施策により、都市圏内のバスによる移動時間を２０％短縮した場合の効果を試算した。その結果、CO_2排出量削減効果は１．１％と推計された。交通手段別にみると、バスと鉄道の利用が増加し、自動車の利用が減少している。バスのサービス改善に伴って鉄道の利用が増加する原因としては、バスと鉄道の乗り継ぎ利用が増加することや、（３）で述べたように交通手段選択モデルが多段型の二者択一モデルで、モデル中の「自動車利用」に対する選択肢が「公共交通利用」であるため、鉄道運賃の低減に対する反応が鈍いことが考えられる。

表５　バスのサービス改善による効果の試算結果

	自動車走行台キロ（千台km/年）		平均旅行速度（km/h）		自動車によるCO_2排出量(t-C/年)	
都心	102,331	98.9%	15.4		9,052	98.1%
近郊	392,101	99.3%	14.7		34,040	98.8%
郊外	1,532,834	99.0%	27.1		111,184	98.8%
全域	2,027,266	99.0%	22.3	0.225	154,276	98.8%

交通手段	CO_2排出量（t-C/年）	
自動車	154,276	98.8%
鉄道	5,377	101.2%
合計	159,654	98.9%

※各項目ともに右側の欄は現況との比率（平均旅行速度は変化分）

（５）パークアンドライドの促進

宇都宮都市圏では、自動車で都心に乗り入れるトリップが多く、都心部での旅行速度低下を招いている。そこで、鉄道駅に自動車を駐車して鉄道で都心部へ向かう「パークアンドライド（以下Ｐ＆Ｒという）」に適した環境をつくり、鉄道利用を促進して自動車利用を抑制する方策を検討した。

CO_2排出量削減推計モデルでは、４．で述べたＰ＆Ｒ選択サブモデルを用いて、そのCO_2削減効果を推計する。ここでは、Ｐ＆Ｒ駐車場利用時に鉄道運賃の割引券を配布する等により、Ｐ＆Ｒ利用時のコストが従来Ｐ＆Ｒの利用時の半分になったと仮定して効果を推計した。

その結果、鉄道利用者は２．３％増加したもののCO_2排出量は変化がなかった。これは、宇都宮都市圏では鉄道網が発達しておらず、鉄道駅までの距離が長いＰ＆Ｒ利用者が多いため、自動車走行台キロの削減に結びつかなかったためと考えられる。

表６　Ｐ＆Ｒの促進による効果の試算結果

	自動車走行台キロ（千台km/年）		平均旅行速度（km/h）		自動車によるCO_2排出量(t-C/年)	
都心	103,421	99.9%	15.0		9,214	99.9%
近郊	394,940	100.0%	14.4		34,461	100.0%
郊外	1,548,624	100.0%	27.0		112,477	100.0%
全域	2,046,985	100.0%	22.0	0.011	156,152	100.0%

交通手段	CO_2排出量（t-C/年）	
自動車	156,152	100.0%
鉄道	5,377	101.2%
合計	161,530	100.0%

※各項目ともに右側の欄は現況との比率（平均旅行速度は変化分）

（6）自転車走行空間の整備

自転車走行空間の整備は、自転車の走行性や安全性の向上を目的として行われる。具体的には、自転車道の整備や自転車通行帯の確保、自転車優先信号の設置、駐輪場の整備などがある。自転車の利用しやすい環境の整備により、自動車から自転車への手段変更を促すことができると期待される。

CO_2排出量削減推計モデルでは、自転車道の整備により自転車の走行性が向上し、自転車トリップの所要時間が短縮されるものとしてモデル化を行う。自転車走行空間の整備により自転車の旅行速度の短縮効果は、ゾーン間所要時間を変更することにより表現される。ここでは、自転車道の整備によりゾーン間の自転車所要時間が１０％短縮されると仮定し、効果を試算した。

その結果、自転車を利用するトリップ数が１０％増加し、CO_2排出量は１．２％削減されると推計された。特に、都心ゾーンでの自動車走行台キロが２．７％減少し、大きな効果があることが示された。このことは自転車の利便性向上は、近距離トリップの自転車への転換促進策として有効であることを示している。

表７　自転車走行空間の整備による効果の試算結果

	自動車走行台キロ（千台km/年）		平均旅行速度（km/h）		自動車によるCO_2排出量(t-C/年)	
都心	100,708	97.3%	15.7		8,823	95.7%
近郊	388,826	98.4%	14.9		33,540	97.3%
郊外	1,544,579	99.7%	27.3		111,995	99.6%
全域	2,034,113	99.4%	22.6	0.537	154,358	98.9%

※各項目ともに右側の欄は現況との比率（平均旅行速度は変化分）

交通手段	CO_2排出量（t-C/年）	
自動車	154,358	98.9%
鉄道	5,202	97.9%
合計	159,559	98.8%

（7）エリアプライシング

エリアプライシングとは、都心を中心とした一定の範囲内を走行する自動車に課金する施策である。この施策によるCO_2排出量削減効果については、モデルの簡略化のために以下の仮定により推計する。

・全車一律に課金するものとする。
・１日中、同一金額を課金するものとする。
・エリアプライシングによるトリップの目的地の変更は起こらない。
・課金額は現在の自動車利用コストと同様の扱いとする。

課金後の走行コスト＝課金前の走行コスト（時間コスト＋燃料費用）＋課金額

これらの仮定のもとに、自動車のトリップあたり費用を修正した上で交通手段選択モデルにより、自動車から他の交通手段に転換する量を推計する。このモデルでは、自動車の費用として燃料費のみを計上している。モデル上では、エリアプライシングによる費用を自動車の燃料費に加算して影響を推計している。

ここでは、自動車利用者に対し１トリップあたり３００円の費用が上乗せされると仮定した。その結果、自動車走行台キロは１．３％減少し、CO_2排出量は４％削減されると推計された。また、自動車のトリップあたりコストが約４．５倍に増加し、鉄道やバスよりも高くなっている。それでもあまり自動車利用が減少しないのは、自動車利用の旅行時間が鉄道やバスの半分程度で

あることが原因と考えられ、公共交通の利便性向上が必要であることを示唆している。

表8　エリアプライシングによる効果の試算結果

	自動車走行台キロ（千台km/年）		平均旅行速度（km/h）		自動車によるCO_2排出量(t-C/年)	
都心	103,845	100.4%	16.7		8,912	96.6%
近郊	395,857	100.2%	16.1		33,366	96.9%
郊外	1,519,446	98.1%	29.9		107,697	95.8%
全域	2,019,148	98.7%	24.3	2.314	149,975	96.1%

交通手段	CO_2排出量（t-C/年）	
自動車	149,975	96.1%
鉄道	5,128	96.5%
合計	155,103	96.0%

※各項目ともに右側の欄は現況との比率（平均旅行速度は変化分）

（8）ボトルネック対策

信号交差点や踏切等で発生する交通渋滞は、自動車の走行速度を低下させ、大気汚染物質の排出量を増大させる等の悪影響を及ぼしている。信号交差点や踏切などにおける渋滞を解消するために、交差点改良や鉄道の立体化などが行われている。

自動車走行台キロ推計サブモデルでは、比較的長い区間（数km程度）での道路交通の状態を推計するためのモデルであり、ボトルネック対策のような数百mから１ｋｍ程度の交通状態の変化を推計することができないため、これらの対策については、このモデルで評価することは難しい。そこで、ボトルネック対策によるCO_2削減効果は、新たなサブモデルを作成して推計するものとした。

ボトルネック対策効果推計サブモデルでは、対策前後の渋滞状況の変化よりCO_2排出量の削減効果を推計する。対策前後の渋滞長や渋滞時旅行速度、対策後の非渋滞区間の旅行速度、渋滞時間帯の交通量は観測データを用いるか、データが得られない場合には仮定して効果を推計する（図14）。

このサブモデルで推計されたCO_2削減効果は、メインモデルとは切り離されて推計されたものである。都市圏全体でのCO_2削減効果は、メインモデルで推計されたCO_2排出量から、サブモデルでの推計された効果分を減じることで推計される。ただし、ボトルネック対策効果推計サブモデルはメインモデルとは別構造であるため、対策による自動車の経路選択の変化は表現できない。また、対象地域内の平均旅行速度の推計はメインモデル内で処理されるため、ボトルネック対策による旅行速度の向上効果は反映されないため過小評価になるのが課題である。

交差点改良による渋滞解消効果は、既存の事例を調査し、対策種類ごとに集計して設定した。ここでは、交差点の立体化・道路拡幅・交差点部分の車線数増に分類して、渋滞解消効果を100%、90%、61%と設定した。また、渋滞区間の旅行速度は10km/h、

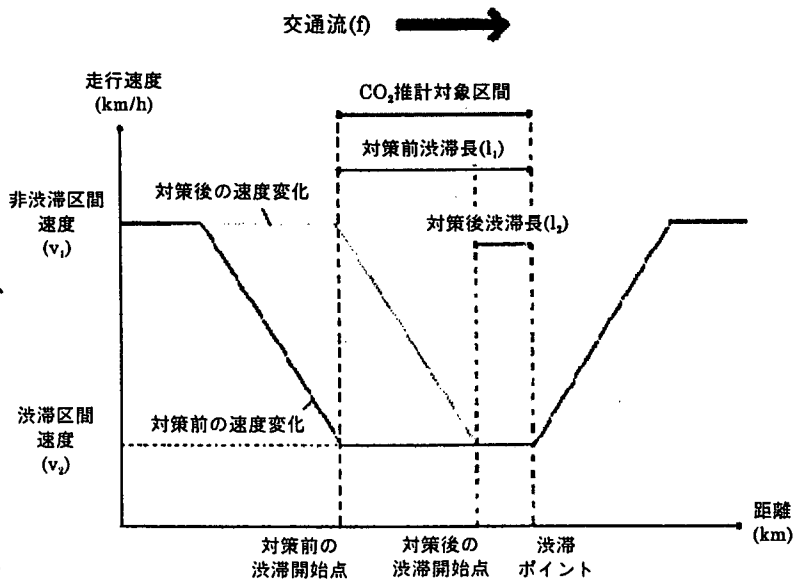


図14　ボトルネック対策による渋滞解消効果推計の考え方

非渋滞区間は25km/hと仮定した。

ここでは、宇都宮都市圏の主要渋滞ポイント15箇所で計画されている立体交差化や道路拡幅を実施した場合のCO_2排出量削減の効果を試算した。その結果、都市圏全体の排出量にはほとんど効果がなかったものの、各交差点でのCO_2排出量は２３～３９％削減された。

（９）幹線道路の整備

幹線道路の整備により、道路容量の増加による旅行速度の向上や、より短い経路への変更による走行台キロの減少によってCO_2排出量が減少する。

自動車走行台キロ推計サブモデルは、「ネットワーク配分」と「旅行速度別走行台キロの推計」の２つのモデルで構成されている。ネットワーク配分については、ゾーン間の簡略ネットワーク上でシミュレーションが行われる。道路の新設・改良が行われた場合、この簡略ネットワークの容量を変更することにより、配分交通量の変化を推計することができる。また、各道路の旅行速度別の走行台キロを推計する際には、モデルシミュレーションの過程で、時間帯別の混雑度を推計している。道路の改良効果を推計する際には、該当する道路の交通容量を変更することにより、旅行速度の向上効果を推計することができる。

ただし、上記のモデルは、都市内交通に対する施策を評価する目的で構築されているため、都市間交通に対象とした大規模なバイパス等を整備するなどの方策を評価することができない。都市間交通については、別途域外交通に対するバイパスをネットワークに追加し、通過交通が都心部を通過しなくなるものとして配分を行う。

ここでは、宇都宮の外環状道路の交通容量が１．５倍に拡大したと仮定して、CO_2排出量削減効果を試算した。その結果、通過交通が環状道路へ経路変更することにより都市圏全域で旅行速度が向上し、CO_2排出量が３．９％削減された。特に都心ゾーンや近郊ゾーンでは１０％程度削減されており、通過交通を都心部から排除した効果が大きいことがわかった。ただし、他の交通機関からの転換は考慮しているものの、平均旅行速度の向上により新たに発生する誘発交通は、現段階では考慮できないためこの点が課題として残っている。

表９　幹線道路の整備による効果の試算結果

	自動車走行台キロ（千台km/年）		平均旅行速度（km/h）		自動車によるCO_2排出量(t-C/年)	
都心	97,943	94.6%	16.6		8,428	91.4%
近郊	375,060	94.9%	15.9		31,467	91.3%
郊外	1,556,759	100.6%	29.7		109,915	97.8%
全域	2,029,762	99.2%	24.7	2.698	149,810	96.1%

※各項目ともに右側の欄は現況との比率（平均旅行速度は変化分）

交通手段	CO_2排出量（t-C/年）	
自動車	149,810	96.1%
鉄道	5,312	100.0%
合計	155,122	96.1%

（１０）ピーク交通量の平準化

フレックスタイムや時差通勤などにより、ピーク時に集中する交通を他の時間帯に分散して旅行速度を向上することにより、CO_2排出量を削減することが可能である。フレックスタイムの効果は、モデル上では対象地域内における交通量の時間変動パターンを変更することにより表現される。交通量の時間変動パターンは、車種別（乗用車、バス、小型貨物車、普通貨物車）別に

作成されている。このうち、フレックスタイムや時差通勤の影響を受けるのは乗用車のみと仮定し、他の３車種については時間変動パターンを変更しない。

ここでは、時差通勤等の普及によりピーク時１時間の交通量を前後１時間の範囲で平準化し、ピーク時をはさむ３時間の交通量が一定になる（図15参照）と仮定して試算を行った。

その結果、旅行速度が都市圏平均で２km/h向上したことにより、CO_2排出量が２．２%削減されると推計された。今回の試算では完全にピークが平準化されると仮定したが、業種によっては時差通勤等が不可能なものもあるため、現実的な平準化のパターンについて今後検討していく必要がある。

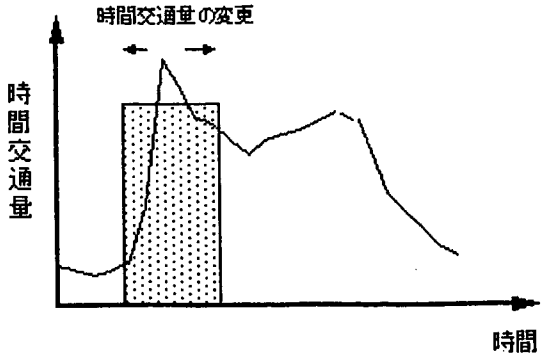


図15　ピーク時交通量平準化の考え方

表１０　ピーク交通量の平準化による効果の試算結果

	自動車走行台キロ（千台km/年）		平均旅行速度（km/h）		自動車によるCO_2排出量(t-C/年)	
都心	103,479	100.0%	16.1		9,001	97.6%
近郊	395,051	100.0%	15.6		33,620	97.5%
郊外	1,548,736	100.0%	29.5		110,203	98.0%
全域	2,047,266	100.0%	24.0	2.007	152,824	97.8%

※各項目ともに右側の欄は現況との比率（平均旅行速度は変化分）

交通手段	CO_2排出量（t-C/年）	
自動車	152,824	97.8%
鉄道	5,312	100.0%
合計	158,136	97.8%

（１１）低公害車の導入

低公害車の導入をした場合には、１台あたりのCO_2排出量が削減される。低公害車には、ハイブリッド車、天然ガス車（ＣＮＧ車）、電気自動車、燃料電池自動車などの代替燃料自動車と在来のガソリン車及びディーゼル車を低燃費化したものがあり、その削減効果はそれぞれ異なる（図16）。

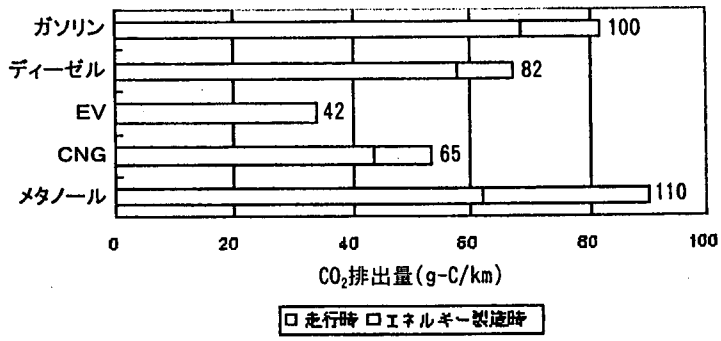


図16　低公害車のCO_2排出量の比較（ガソリン車を100とする）

モデル上では、低公害車が全体の車種の中で占める割合を設定し、CO_2排出量削減効果を推

表11　低公害車の導入による効果の試算結果

	自動車走行台キロ（千台km/年）		平均旅行速度（km/h）		自動車によるCO_2排出量(t-C/年)	
都心	103,479	100.0%	15.0		8,419	91.3%
近郊	395,051	100.0%	14.4		32,657	94.7%
郊外	1,548,736	100.0%	27.0		106,717	94.9%
全域	2,047,266	100.0%	22.0	0.000	147,793	94.6%

※各項目ともに右側の欄は現況との比率（平均旅行速度は変化分）

交通手段	CO_2排出量（t-C/年）	
自動車	147,793	94.6%
鉄道	5,312	100.0%
合計	153,105	94.6%

計する。低公害車の１台あたりの走行台キロは、従来の自動車と同じであると仮定し、低公害車の使用形態（１日の走行距離の違いなど）は考慮していない。また、速度別のCO_2排出量の傾向は在来車と同じと仮定し、一定の低減率を乗じた。

上記の仮定のもとに、ここでは宇都宮都市圏の全てのバスと小型貨物車の３割に天然ガス自動車を導入した場合のCO_2排出量の試算を行った。その結果、CO_2排出量は５．４％削減されると試算された。今回、低公害車の普及割合を仮定して試算したが、今後は低公害車の普及状況をモデル化する必要があると考える。

（１２）CO_2排出量削減施策の比較

（１）～（１１）で試算した施策のCO_2排出量削減効果を「走行台キロの削減効果」と「旅行速度の向上効果」に分けて比較したものが図17である。この図から、走行台キロの削減によるCO_2排出量削減効果は最大１％程度、旅行速度の向上効果は最大３％程度なのに対して、低公害車の導入効果は約５％と、大きいことがわかる。また、宇都宮のように公共交通機関のネットワークが発達していない都市圏では、自動車から公共交通への転換が起きにくく、CO_2排出量削減効果が小さいことがわかった。

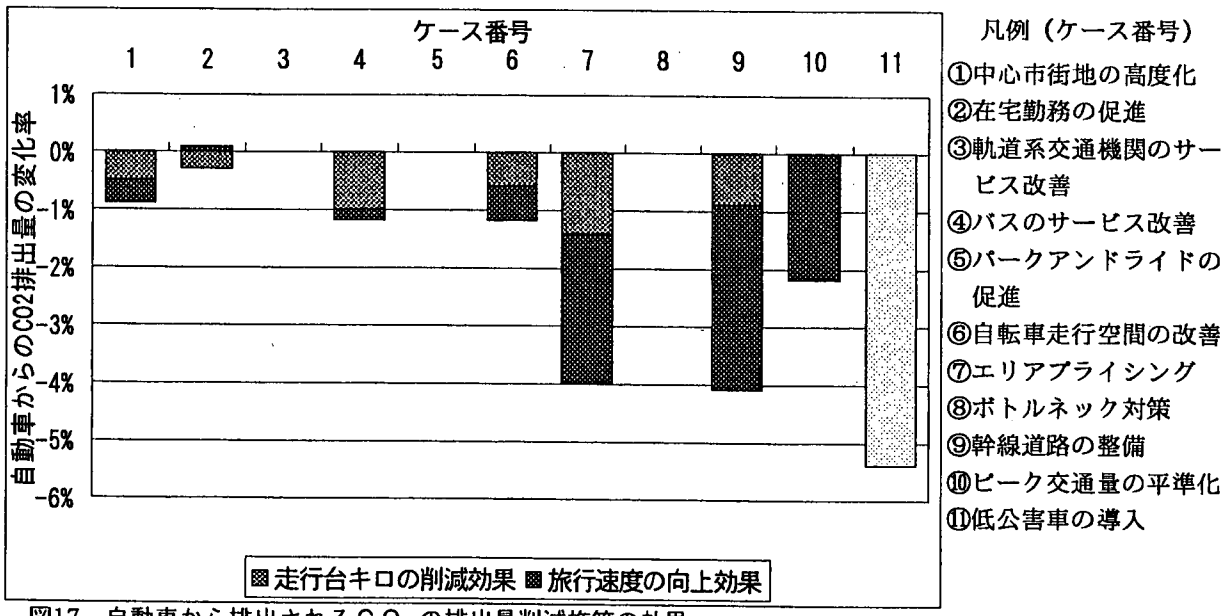


図17　自動車から排出されるCO_2の排出量削減施策の効果

６．まとめと今後の課題

本研究では、地球温暖化の原因となる温室効果ガスのうち二酸化炭素（CO_2）について、都市内における交通部門のCO_2排出量の予測モデルを作成し、このモデルを使ってCO_2排出量削減施策の効果を推計した。

都市交通部門からのCO_2排出量削減施策の効果を予測するため、宇都宮市をケーススタディ対象地として選定し、１１施策の効果を推計した。自動車からのCO_2排出量削減については、走行台キロの削減によるものと旅行速度の向上によるものとに分けて予測を行った。

これらのケーススタディの結果から、自動車走行台キロの削減による効果だけでなく、旅行速

度の向上による効果も大きいという結果が得られ、幹線道路の整備やピーク交通量の平準化など道路交通の円滑化施策も、CO_2排出量削減に大きく貢献することがわかった。

個々の施策では、低公害車の導入は自動車走行台キロの増減なく大幅にCO_2排出量を削減する施策として有効であることがわかった。次にCO_2排出量削減効果が大きかった環状道路の整備の効果は、通過交通の排除による都心部の走行台キロの削減とそれに伴う旅行速度の向上が大きいことによるものである。ただし、ここでは道路容量増加による誘発交通を考慮していないことに留意する必要がある。また、同程度のCO_2排出量削減効果を持つエリアプライシングについては、走行台キロの削減効果が１１施策中で最も大きいが、旅行速度の向上効果はより大きいことがわかった。ピーク交通量の平準化は、走行台キロを減少させずに旅行速度を大幅に向上させるため、CO_2排出量削減が可能である。

他の施策の効果については、中心市街地高度化や在宅勤務の促進等の生成交通量削減施策では、単独ではあまりCO_2排出量削減効果が見られないものの、他の施策（例えば、バスサービスの向上による中心市街地への交通手段の転換）と組み合わせることにより効果を発揮する可能性があると考えられる。公共交通機関の利用促進施策については、公共交通があまり発達していない宇都宮のような都市ではCO_2排出量削減効果が発揮されにくいと考えられるが、鉄道サービスの改善施策と比較してバスサービスの改善施策の効果がかなり大きいことから、面的に公共交通機関が発達している大都市では有効である可能性が示唆される。自転車の走行空間の改善効果については、自動車走行台キロの削減効果が都市全体では小さいものの都心部での効果が大きく、旅行速度の向上効果が大きくなっている。ボトルネック対策は都市全体ではCO_2排出量削減効果が小さいが、対策地点では大幅に効果が現れており局所的には有効であると考えられる。

この結果から各施策の比較を行う際には、各施策の施策量を揃えなければ単純に比較ができないことや、あくまでも宇都宮市における効果の比較で必ずしも一般的な結果でないことに留意する必要がある。

今後の課題としては、今回ケーススタディで取り上げた宇都宮市の他に、より公共交通への転換が容易と考えられる政令指定都市規模の大都市圏等でケーススタディを行い、より一般的なCO_2排出量削減効果の予測を行うことが挙げられる。また、施策量の指標として施策コストを考慮することや、誘発交通を考慮に入れること、各施策の組み合わせによる施策の効果の相殺あるいは相乗作用を考慮することなどが挙げられる。

［研究成果の発表状況］

(1) 口頭発表

① 小根山裕之，大西博文：環境負荷の小さい都市構造・交通体系に関する一考察，第20回土木計画学研究発表会，土木計画学研究・講演集20(2)，pp.129-132，1997.

② 小根山裕之，大西博文：都市の交通部門における二酸化炭素排出量削減効果推計モデル，第21回土木計画学研究発表会，土木計画学研究・講演集21(2)，pp.685-688，1998.

(2) 論文発表

○①小根山裕之，大城温，山田俊哉，大西博文：都市内交通による二酸化炭素排出量の推計モデル，土木技術資料，Vol.41，No.11，pp.24-29，1999.

5.4　低公害大型車等の導入が都市交通環境に与える影響に関する調査

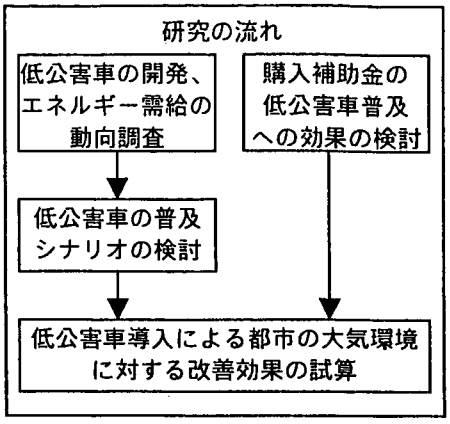
研究期間：平11～平13

担当：交通環境研究室

【要旨】

本研究では、低公害車等の導入により都市交通環境が改善される効果を定量的に把握することを目的としている。

11年度は、低公害車の開発・普及に関する専門家の予測評価や自動車メーカーの開発動向の整理、将来のエネルギー需給の見通し等から、低公害車の普及シナリオを整理した。また、10年度までに作成した都市交通部門におけるCO_2排出量の予測モデルの改善と、新たな削減施策を本モデルで扱えるように、それらのサブモデルの作成を行った。



1．研究目的

近年、窒素酸化物(NO_x)や浮遊粒子状物質(SPM)、二酸化炭素(CO_2)の削減などの環境問題に対応して、発生源対策として低公害車の導入・普及の促進施策が実施されている。本研究は、低公害車の導入による都市の大気環境に対する改善効果を検討し、望ましい都市交通整備手法の提案を行うことを目的としている。

2．研究方法

2．1　低公害車普及シナリオの検討

低公害車の普及による将来の大気環境の改善状況を予測するためには、国内外の自動車メーカーによる低公害車の開発動向や専門家による低公害車、自動車燃料、エネルギー需給の将来展望を踏まえて、今後の自動車の低公害化の現実的なシナリオを作る必要がある。そこで、自動車メーカーの低公害自動車開発動向のヒアリング、専門家の予測の整理、将来のエネルギー需給の見通しから、現実的な低公害車普及シナリオを検討した。

また、低公害車はほぼ同性能の従来型車と比較して車両価格が高いことが普及の妨げとなっていると考えられるため、車両価格と販売台数の関係から低公害車に対する購入補助金と普及率の関係の定量化を試みた。

2．2　低公害車導入による都市の大気環境に対する改善効果

低公害車の導入による都市の大気環境に対する改善効果として、都市交通部門から排出されるNOx、SPM、CO_2の削減効果を推計する。11年度は宇都宮都市圏を対象として、低公害車が普及した場合の大気汚染物質の削減効果を推計した。

3．研究結果

3．1　低公害車普及シナリオの検討

低公害車は、①在来のガソリン及びディーゼルエンジンの改良型自動車、②天然ガス車（CNG車）、メタノール車などの代替燃料自動車（ハイブリッド車含む）、③電気自動車

（燃料電池自動車含む）の３タイプに大きく分けられる。将来的には、③のタイプに移行するものと考えられるが、当面は②のタイプも普及して行くものと考えられる。現在のところ、小型車についてはハイブリッド車やLPG車が、大型車においてはCNG車が、②のタイプとして有力と考えられる(図１)。

低公害車の普及のためには、在来型車との価格差の縮小が必要である。そこで、補助金により低公害車の購入価格を引き下げた場合の普及割合を推計するため、300万円までの車両について、車両価格(x)と販売台数(y)の関係を指数関数で回帰した結果、以下の（１）式を得た（図２）。

$$y = 1.11\times10^{6} + e^{-1.45x} \quad (1)$$

３．２　低公害車導入による都市の大気環境に対する改善効果

宇都宮都市圏で全てのバスと、小型貨物車の3割をCNG車に置き換えた場合の大気汚染物質排出量の削減効果を試算した。

その結果、都市圏全体でNO_xの排出量は3.1%、SPMは16.7%、CO_2は5.4%削減され、都心ではより削減効果が大きい。特に、SPMはCNG車からの排出量が0であるため、33.8%も削減された（図３）。

この削減量は宇都宮都市圏で300円のエリアプライシングを導入した場合より、SPMでは削減量が大きく、NO_x、CO_2ではほぼ同じであった（図４）。

（大西、山田、小根山、大城）

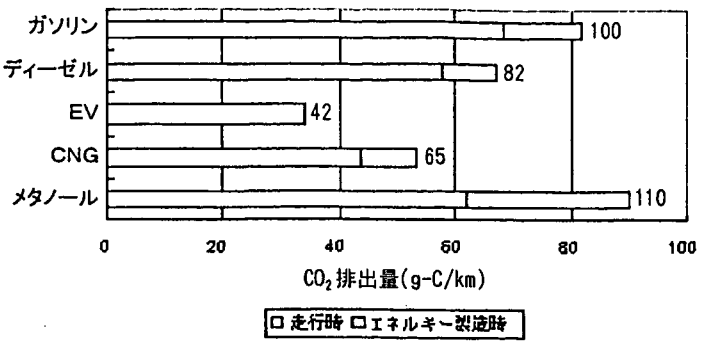


図１　低公害車のCO_2排出量の比較（ガソリン車を100とする）

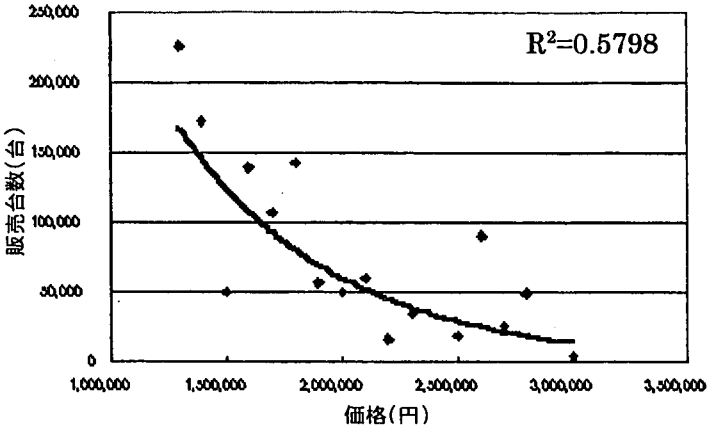


図２　車両価格と販売台数の関係

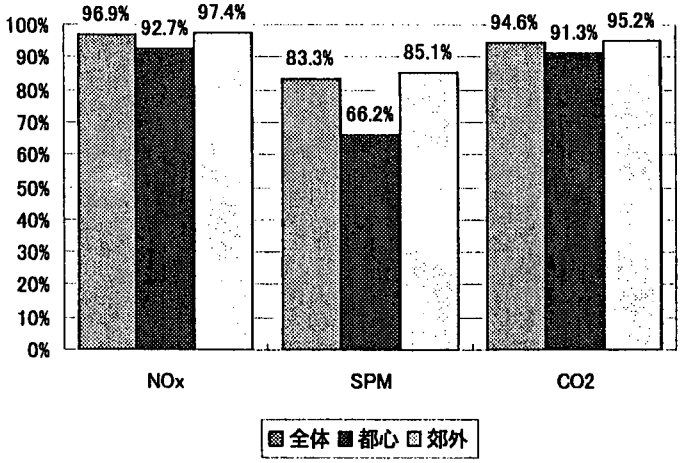


図３　低公害車導入による大気汚染物質排出量削減割合

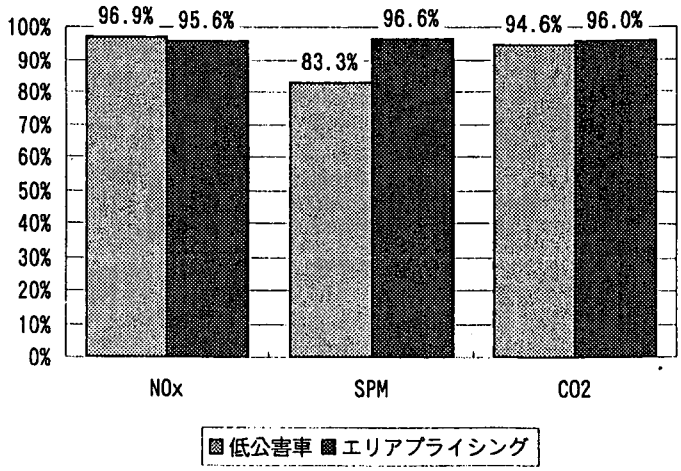


図４　エリアプライシングを実施した場合との削減量の比較

5.5　戦略的環境アセスメントに関する研究

研究期間：平１１～１３
担　当：交通環境研究室

【要旨】
わが国においては平成11年6月より環境影響評価法が全面施行されたところである。一方、欧米諸国においては計画の早期段階における環境影響評価が必要であるとして、戦略的環境アセスメント（以下「SEA」と記す）の検討が始まっている。本研究では、道路計画を対象としてSEAを行う場合を想定し、その実施時期や評価すべき環境要素などに関する基礎的な検討を行った。さらに、個別道路計画や道路整備五箇年計画を対象として、CO2をはじめとするSEAの評価指標について検討を行った。

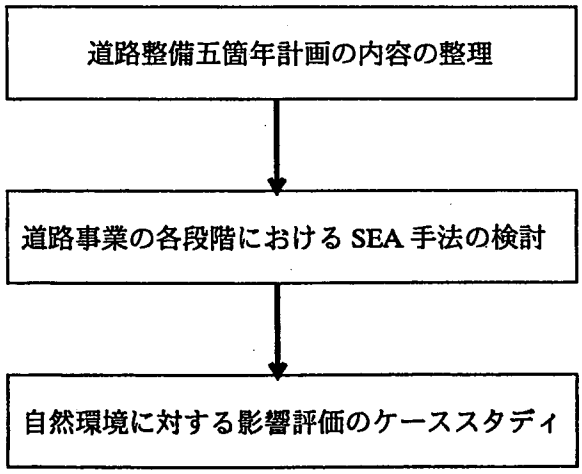
１．研究目的

個別事業の環境アセスメントは，平成９年に制定された環境影響評価法により扱われることになるが，今後は，より早い段階で，長期政策，各種公共事業五箇年計画や広域道路網整備計画等を総合的に取り扱う戦略的環境アセスメント（SEA）の必要性が高まっている。本研究では、道路事業に対してSEAを実施する場合の方法論の基礎的研究を行う。なお、SEAでは温室効果ガス（CO2）は重要な評価対象項目になると考えられる。

２．研究方法

２．１　道路整備五箇年計画の内容の整理

道路整備五箇年計画においては高規格幹線道路網整備をはじめとする各種道路整備事業の他にも、遮音壁設置などの環境対策事業、ＴＤＭなどのソフト施策が含まれている。これらの計画全体に対して環境面からの評価を行うことを想定して、同計画における主要課題と各課題に対応するための各種施策について整理を行った。



研　究　の　手　順

２．２　道路事業の各段階におけるSEA手法の検討

道路計画におけるSEAの実施段階、各段階における評価手法を検討するための基礎資料として、諸外国における研究例、実施事例を収集・整理した。また、我が国の道路整備計画の計画決定手順からSEAの実施段階を検討した。さらに各段階のSEAおよび現在実施されている環境影響評価について、目的、評価対象、評価の前提条件などを整理するとともに、評価項目、評価指標を提案した。次に、全国レベルでの環境アセスメントに対して、環境影響予測に必要なインプット、アウトプット及び評価指標における計算方法の検討を行った。

２．３　自然環境に対する影響評価のケーススタディ

自然環境の改変量として森林消失面積を例として選択し、概略的な評価を試みた。試算ケースは、個別道路事業を対象とした場合及び道路整備五箇年計画を対象とした場合について行った。

3．研究結果

3．1　道路事業の各段階における SEA 手法の検討

（1）海外文献の整理について

諸外国においては、交通政策の決定段階、道路ネットワーク計画、起終点が決定している地点間の交通機関またはルート選定の段階などにおいて SEA が実施され始めている。これまで分かった事例によると、具体的な交通基盤施設の整備位置を計画する段階においては.GIS のテクニックを使って、現在、わが国で実施されているような詳細な環境影響評価が実施されている場合が多い。政策レベルの段階については、経済や社会に与える効果との総合的な評価が必要となり、その手法は一律ではなく、評価結果を全て公開している事例はみられなかった。ただし、いずれの国においても SEA におけるパブリックインボルブメントの重要性を指摘している。

（2）道路事業の各計画段階における SEA 手法の整理

海外文献の調査結果およびわが国における道路整備計画の計画決定手順から、SEA の実施時期としては3段階を提案した。各段階の SEA および現在実施されている環境影響評価について、目的、評価対象、評価の前提条件などを整理した（表1参照）。

表1 道路計画から供用までの流れとSEAと環境アセスメントの実施時期

段階	検討範囲	道路計画から供用までの流れとSEAと環境アセスメントの実施時期		目的(目標)	評価対象
基本計画段階	全国レベル	長期計画、五箇年計画	政策レベル	環境保全に資する道路政策の策定	道路整備5箇年計画による道路環境の変化
	地域レベル	道路網計画	ネットワーク計画	計画地域の環境保全に資するネットワーク計画(優先整備路線の決定)	ブロック、県単位の道路ネットワーク
施設計画段階	検討する図面の縮尺: 1:50,000～ 1:25,000	地域区間の決定 代替路線の設定 起終点、経由地	個別路線の概略ルートの計画	関係地域の環境負荷を最小化するルートの決定	計画路線の整備により影響を受ける全路線
	1:5,000～ 1:2,500 1:2,500～ 1:1,000	概略設計(代替路線選定) 基本路線の選定 路線の決定 予備設計(路線変更含む) 環境アセスメント ・スクリーニング ・スコーピング(方法書) ・準備書・評価書 (事後調査計画含む)	個別路線のルート、構造等の決定段階	沿道の環境負荷を最小化するルート・構造などの決定	計画路線
都市計画決定後		用地測量 詳細設計 工事実施 完成・供用 事後調査(環境アセスメント)			

（3）4段階のアセスメントにおける評価項目と評価指標の検討

既存資料及び諸外国の事例を参考にし、全国レベル、地域レベル、個別計画段階、個別事業段階の4段階での環境アセスメントに対し、必要な評価項目と評価指標を表2に整理した。

表2 評価項目と評価指標の例

	生活環境			自然環境			社会環境	その他		地球環境
	NOx	SPM	騒音	動物	植物	生態系	景観	日照	廃棄物	CO2
全国	市街地面積当り排出量	市街地面積当り排出量	暴露人口基準達成率			森林消失面積				年間排出量
地域	市街地面積当り排出量	市街地面積当り排出量	暴露人口基準達成率			森林消失面積	ランドスケープの変化			年間排出量
個別計画	沿道濃度	沿道濃度	沿道レベル	重要種生息地の回避	重要種生育地の回避	生態環境の改変	主要眺望点、可視領域の回避	住宅密集地、学校などの回避	廃棄物発生量	対象道路年間排出量
個別事業	沿道濃度	沿道濃度	沿道レベル	重要種生息地の回避	重要種生育地の回避	生態環境の改変	主要眺望点、可視領域の回避	日照時間帯	廃棄物発生量	

注:事業アセスにおいては、これ以外に粉じん、振動、水質、地形地質、人と自然のふれ合い活動も標準項目として挙げられているが、SEAとして重要と思われるものを記載した。

（4）道路整備五箇年計画における評価項目と評価指標の検討

上記の検討の上に道路整備五箇年計画における評価項目と評価指標を設定した。評価項目については、個別道路事業に対する環境アセスメント評価項目をベースとして、環境区分ごとに代表的な環境項目を抽出して、道路整備五箇年計画に対してのＳＥＡ評価指標とした。なお地球環境への影響を評価するため、CO2の排出量を評価項目とした。また、環境影響以外も含めた総合的な評価を行うことを想定して、道路整備効果及び事業費も評価項目とした。道路整備五箇年計画におけるＳＥＡの評価項目を表３に示す。

道路整備五箇年計画におけるＳＥＡの対象とする計画項目の設定においては、建設事業と施策事業（ＴＤＭ等のソフトな手段）の両者を考慮して、または、建設事業の中の道路建設事業とその他建設事業を両方とも考慮した。ＳＥＡの対象とする道路整備五箇年計画の計画項目を表４の区分から抽出した。

表3 SEAの評価項目と評価指標の例

評価項目		評価指標
環境項目	騒音	住居戸数からみた環境基準の達成率
	NOx	全国での面積当たりの排出量
	SPM	全国での面積当たりの排出量
	CO2	全国での年間総排出量
	森林面積	道路整備により消失する森林面積
整備効果	走行費用	所要時間の短縮に基づく走行費用の削減効果
	安全性	規格の高い道路への自動車交通の転換による死傷者数の減少
事業費	事業費	五箇年計画における総事業費

表4 道路整備五箇年計画の計画項目の分類例

SEAの対象とする道路整備五カ年計画の計画項目	ハードな事業	道路建設事業	新設
			改良
		維持修繕事業	
	TDM等ソフトな事業		

３．２　自然環境に対する影響評価のケーススタディ

（１）個別道路計画を対象とした環境アセスメントの場合

地方部における幹線道路計画の３つの代替案(Ａルート：市街部から離れつつ水田を極力さけるルート、Ｂルート：市街部に対し河川の対岸を通るルート、Ｃルート：市街部を通過するルート）による森林を消失面積を試算して評価した。評価結果は以下の通りである。

各ルートとも「特定植物群落」及び「巨樹・巨木林」を改変せず、植生自然度６の植生の改変は多いが、植生自然度７の植生の改変は中程度であった。森林消失面積を見ると、代替案Ｃの森林消失面積が最も小さい。

（２）道路整備五箇年計画を対象とした場合

道路整備五箇年計画の計画項目を対象として、道路整備の事業量により森林消失面積を試算した。計算方

法を図１に示す。また、試算結果を表５に示す。試算結果により、３つの五計について森林消失面積のみで比較すると、第１１次道路整備五箇年計画における森林面積改変量が最も大きい結果となった。また第１１次道路整備五箇年計画について発表以前のデータを用いて予測し、その結果を五計終了時点直近に行われた道路交通センサスの結果で検証した。五計事業量から算出した消失森林面積（5,056 ｈａ）は道路交通センサスから算出した消失森林面積（4,774 ｈａ）と比べて、誤差は約６％であった。質的な問題は残るが量的な予測は概ねこの方法で評価することが可能と考えられる。

なお、本来、SEA は代替案を作成して比較評価を行うことが一般的であるが、本調査は、SEA の概念整理の段階でもあることから、過去の３つの五箇年計画を比較検討することとした。

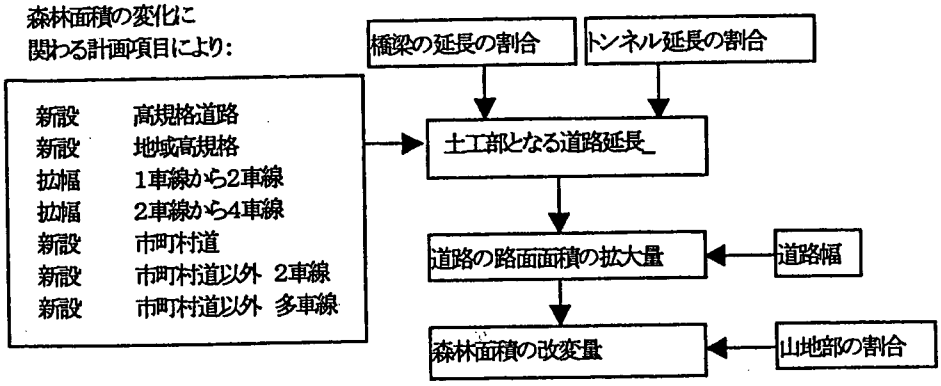


図1 道路整備の事業量による森林消失面積の試算フロー

表5 道路整備による森林消失面積(全国総計)

	事業量:道路整備延長※の合計(km)	森林消失面積(ha)
10次道路整備五箇年計画	59,006	5,040
11次道路整備五箇年計画	60,156	5,056
12次道路整備五箇年計画	42,844	3,726

※道路整備延長の合計とは、全ての道路別の整備延長を合計した値である。

４．今後の課題

以下に、主な今後の課題を示す

（１）評価項目に関する課題

・建設残土などの廃棄物の取り扱い。

（２）評価指標に関する課題

・ＳＰＭ、ＮＯｘを対象とした場合に土地利用を考慮した評価指標の設定及びバックグラウンドを加味した評価方法の検討。

（３）評価指標の計算方法に関する課題

・環境要素間で影響の程度を比較する場合の評価指標の標準化方法。

・騒音を暴露人口で評価する場合の計算方法。

（４）その他

・政策レベルで提示可能な対策（ミチゲーションなど）とその評価方法の検討。

・不足事例（政策レベルのＳＥＡ)の充実。

・ＳＥＡの結果をわかりやすく表現する方法。

（大西、上坂）

5.6　都市内緑地による温室効果ガス削減に関する検討その他

研究期間：平１１～１３
担当：　緑化生態研究室

【要旨】

緑化による CO_2 削減効果を評価するため、緑化樹木の CO_2 固定量の算出方法を検討した。樹木の木質部には乾燥重量比にして 50%程度 C が含まれ、この C はすべて大気中の CO_2 に由来する。したがって、樹木の CO_2 固定量は木質部の成長量を算出することにより得られる。そこで、代表的な緑化樹木に対し年輪解析を行い、樹高・幹径の樹齢と対応した成長過程を明らかとし、成長予測式を策定した。この式を基にすれば、特定の樹齢あるいは大きさの樹木 1 本が、1 年間に固定する CO_2 量を算出できるため、緑化した樹木の本数と大きさが解れば、緑化事業による CO_2 削減効果の評価が可能となる。

1．研究目的

植物による CO_2 の吸収固定は、地球温暖化の防止に少なからず貢献するものと考えられ、京都議定書では、CO_2 排出量の算定に際し、植林による固定量を算入することとされた。しかし、都市化が進み、林業による植林を多く望めない国からは、都市公園や街路樹などの都市緑化による植栽樹木も、CO_2 吸収源として算入されることが要望されている[1)]。

算入のためには、植栽樹木の CO_2 固定量を、広く実行可能な方法で算出できることが前提とされる。森林については、既に IPCC から算出の原単位となる森林面積当たりの年間バイオマス成長量が提示されている[2)]。しかし、都市緑化による植栽樹木は、森林形状を有しない単木や列状のものが多く、森林の原単位を適用できる範囲は限られてしまうため、樹木本数当たりの原単位設定が必要と考えられる。単木の CO_2 固定量算定については、半田らによる研究[3)]があり、樹幹解析により樹木の成長量を明らかにすることにより、CO_2 固定量を算出することが可能であることを報告している。しかし、データの蓄積が少なく、未だ有効な原単位の提示に至っていないのが現状である。

都市緑化には、様々な樹種、大きさ（樹齢）の樹木が用いられるため、原単位はそれらに応じたものである必要がある。著者らは、半田らの手法を参考とし、我が国で都市緑化に多用される樹種を対象に、樹幹（年輪）解析を行うことにより、その成長過程を明らかにし、特定の大きさの樹木が、特定の 1 年間に、あるいはその大きさに達するまでの間に、植物体内に蓄積する CO_2 量を推定する算定式を作成することを目的としている。算定式から得られる CO_2 量は、都市緑化による CO_2 固定量算出のための原単位の一部となるものと考えている。

2．研究方法

2.1　植栽樹木の CO_2 固定量算出の前提条件

2.1.1　算定の対象とする植物体部位

植物は、光合成により大気中の CO_2 を体内に取り込み、炭水化物を生成する。そして、炭水化物は、植物体の形成物質として植物全体に蓄積される。しかし、葉は、落葉により比較的短期間に失われるため、ここでは、木質化することにより長期に渡り固定が継続する幹・枝・根を CO_2 固定量算出の対象とする。

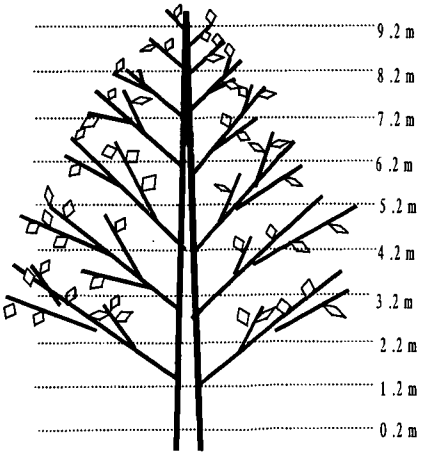


図1　樹幹解析の階層

2.1.2　木質部の C 含有量

植物体に含まれる C は、そのほぼ全てが大気中の、CO_2 に由来する。木質部の C 含有量は、これまでの

多くの分析結果から、樹種に関わらず乾燥重量比にして 50%程度であることが知られている[3]。そこで、ここでは、木質部の乾燥重量を算出までを行うこととする。なお、CO_2 固定量は、CO_2 と C の分子量の比から乾燥重量に 1.83 を乗じたものとなる[注1]。

2.2　木質部成長量（材積増加量）の算出方法

2.2.1　幹の年間材積増加量の算出方法

幹については、樹幹解析により得られる樹齢別の樹高と各高さの幹半径から年間材積増加量を算出し、別途求める乾材比重を用いて乾燥重量に変換する。樹幹解析は一般的な方法 5）に従い、高さ 0.2m から 1.0m 毎の高さの年輪幅を計測する（図 1 参照）。

表 1　樹幹解析供試樹木一覧

樹種		ケヤキ					イチョウ					プラタナス				
植栽地		茨城県東茨城郡小川町下吉影					茨城県鹿島郡鉾田町鳥栖新田					茨城県つくば市福田坪				
樹木No.		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
形状寸法	樹高 m	10.0	9.0	8.0	7.5	7.0	7.3	8.0	6.0	5.5	9.0	8.0	9.0	6.0	7.0	9.5
	幹周(0.2m 高) cm	102.5	92.0	75.0	71.0	78.0	53.5	65.0	47.0	32.0	66.0	66.0	59.0	40.0	51.0	61.0
	幹周(1.2m 高) cm	90.0	74.0	61.5	54.0	64.0	41.0	49.5	36.0	25.5	52.5	55.0	47.0	31.0	41.0	53.0
	枝張り (最大) m	9.3	8.3	7.7	6.2	8.3	3.9	4.9	3.0	3.2	5.2	6.6	6.8	5.3	4.6	6.7
	枝張り (最小) m	7.1	5.5	6.2	5.5	6.5	3.1	4.0	2.2	2.2	4.6	6.2	6.4	4.6	3.8	6.2

2.2.2　枝・根の年間材積増加量の算出方法

枝・根の成長は、年輪による解析は困難であるため、幹と同様の割合で成長すると仮定し、別途求める幹・枝・根の部位別乾燥重量比を、幹の年間材積増加量に乗じることにより、枝・根の年間材積増加量とする。

2.2.3　部位別乾燥重量比および乾材比重の算出方法

樹幹解析供試木の幹・枝・根それぞれの全乾燥重量を測定し、各部位の乾燥重量比を算出する。また、樹幹解析から得られる幹の材積量と幹の乾燥重量から、乾材比重 (g/cm^3) を算出する

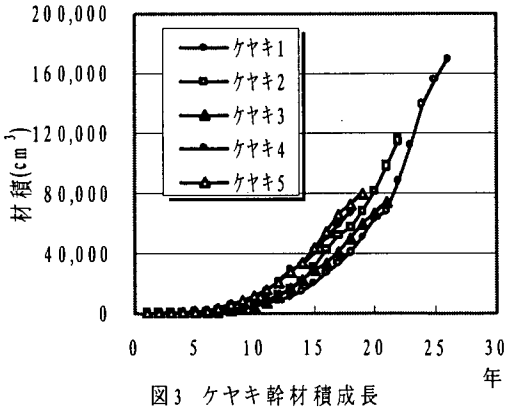


図3　ケヤキ幹材積成長

2.3　樹幹解析供試樹木

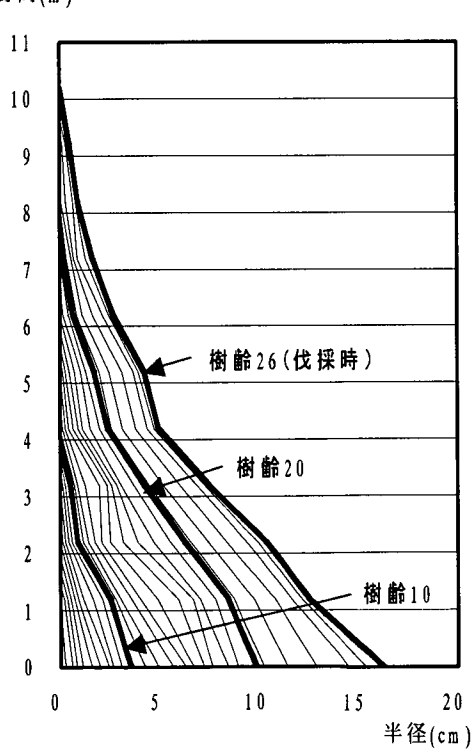


図2　ケヤキ1の樹幹解析図

街路樹としての使用本数の多い樹種から、ケヤキ(Zelkova serrata)、イチョウ(Ginkgo biloba)、プラタナス(Platanus orientalis)の 3 種を選定し[注2]、各 5 本を供試木とした。全供試木の形状寸法を表 1 に示す。

注 1）CO_2 の分子量は 44、C は 12 なので、CO_2 固定量は乾燥重量の 50%の 44/12、すなわち 1.83 倍となる。
注 2）1997 年の全国の街路樹調査で、使用本数の順位はイチョウ 1 位、ケヤキ 3 位、プラタナス類 6 位であり、3 種の合計本数は全街路樹本数の 19.8 %となっている[6]。

3．研究結果

3.1　重量測定結果

全供試樹木の乾燥重量、部位別乾燥重量比、および、乾材比重を表2に示す。

表2 部位別乾燥重量・乾燥重量比・乾材比重の測定・算出結果

樹種		ケヤキ					イチョウ					プラタナス				
伐採解体年月日		1999.11.10-12					1999.11.13-16					1999.11.7-8				
樹木No.		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
乾重(kg)	幹	117.7	82.2	51.8	45.4	55.6	19.9	28.4	12.4	6.3	37.6	49.6	40.5	13.1	26.0	53.8
	枝	259.3	119.7	66.2	46.5	69.7	7.3	11.4	4.4	2.7	18.5	36.5	26.7	9.5	12.5	32.8
	根	70.7	64.8	34.6	30.5	36.0	20.5	11.5	5.7	3.1	23.0	22.2	16.9	7.0	10.8	20.5
乾重比(%)	幹	25.3	30.8	33.9	37.1	34.5	41.6	55.4	55.1	51.6	47.5	45.8	48.2	44.3	52.7	50.2
	枝	58.7	44.9	43.4	38.0	43.2	15.3	22.2	19.6	22.1	23.4	33.7	31.7	32.1	25.4	30.6
	根	16.0	24.3	22.7	25.0	22.3	43.1	22.4	25.3	26.2	29.1	20.5	20.1	23.6	21.9	19.1
乾材比重(g/cm3)		0.66	0.71	0.70	0.68	0.69	0.49	0.47	0.53	0.55	0.50	0.70	0.69	0.61	0.67	0.66

3.2　樹幹解析結果

樹幹解析の結果を、ケヤキ1を例として樹幹解析図の形にして図2示す。図2中の折れ線は各年の年輪であり、ケヤキ1は樹齢26と推定される。また、折れ線と縦・横の軸に囲まれる部分が各樹齢での幹の半分の断面形状を表しており、この断面の縦軸を回転軸とした回転体の体積を算出することにより各樹齢の材積量が算出される。このようにして算出したケヤキ5樹木の樹齢と幹材積量の関係を図3に示す。

3.3　材積成長量算出結果

前項で算出した幹の材積量に、表2の乾材比重を乗じて乾燥重量とし、さらに同表の部位別乾重比から枝・根の乾燥重量を算出し、各樹木の全木質部乾燥重量を算出したものを図4.1に示す。また、同様な操作をイチョウ、プラタナスについて行い木質部乾燥重量を算出したもの図4.2および図4.3に示す。

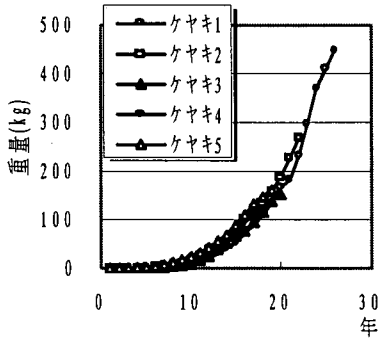


図4.1 ケヤキ木質部成長量

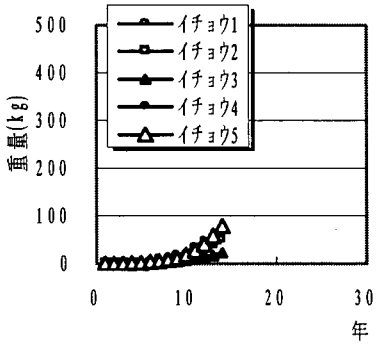


図4.2 イチョウ木質部成長量

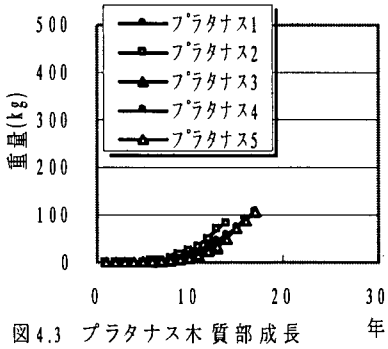


図4.3 プラタナス木質部成長量

3.4　算定式の作成

3.4.1　樹木形状寸法項目と木質部乾燥重量の関係

以上の結果から、植栽樹木の特定の樹齢での木質部の乾燥重量が推定可能となる。しかし、都市に植栽される樹木個々の樹齢を、樹幹解析などの方法で推定することは実質的に困難である。そのため、容易に測定可能な樹木形状データから木質部乾燥重量を導き出す必要がある。

通常、植栽工事において、表示される樹木形状寸法の項目は、樹高、胸高幹周（高さ1.2m）、枝張であり、これらの項目は、計測が比較的容易であり、計測値が、工事記録や各種の台帳として記録されていることが多い。そこで、まず、このような、一般的な形状表示項目と木質部乾重との相関関係を確認する。一般に樹木各部位の重量等の物理量(Y)と、樹木形状寸法(X)との間には、相対成長式 $Y=aX^b$（a と b は定数）が成

り立つことが知られている[7]。そこで、樹幹解析供試樹木15本について、木質部乾燥重量と、樹高、幹周、枝張のほか、いくつかの形状寸法項目との関係を、相対成長式を当てはめ、実測値との相対関係を確認した。結果を表3に示す。

表3　樹木形状寸法項目と木質部乾燥重量の相関関係

	樹高	胸高直径	0.2m幹周	1.2m幹周	胸高断面積	枝張
ケヤキ(n=5)	$y = 0.1914x^{3.3086}$ $R^2 = 0.8243$	$y = 0.0437x^{2.8017}$ $R^2 = 0.9308$	$y = 7E\text{-}05x^{3.3785}$ $R^2 = 0.9865$	$y = 0.003x^{2.6432}$ $R^2 = 0.9833$	$y = 0.0614x^{1.4009}$ $R^2 = 0.9308$	$y = 0.5492x^{3.0362}$ $R^2 = 0.4873$
イチョウ(n=5)	$y = 0.0311x^{3.5998}$ $R^2 = 0.96$	$y = 0.0607x^{2.5625}$ $R^2 = 0.9451$	$y = 0.0027x2.4085$ $R^2 = 0.9185$	$y = 0.0035x^{2.5003}$ $R^2 = 0.9387$	$y = 0.0827x^{1.2813}$ $R^2 = 0.9451$	$y = 2.1212x^{2.2551}$ $R^2 = 0.8886$
プラタナス(n=5)	$y = 0.2439x^{2.7403}$ $R^2 = 0.8341$	$y = 0.1838x^{2.2557}$ $R^2 = 0.9868$	$y = 0.0009x^{2.8006}$ $R^2 = 0.9653$	$y = 0.0076x^{2.3955}$ $R^2 = 0.9788$	$y = 0.2414x^{1.1278}$ $R^2 = 0.9868$	$y = 1.5991x^{2.1605}$ $R^2 = 0.6279$
3樹種 (n=15)	$y = 0.0131x^{4.269}$ $R^2 = 0.6539$	$y = 0.0342x^{2.8603}$ $R^2 = 0.9568$	$y = 0.0003x^{2.9946}$ $R^2 = 0.9266$	$y = 0.0013x^{2.8297}$ $R^2 = 0.9551$	$y = 0.0484x^{1.4301}$ $R^2 = 0.9568$	$y = 1.7936x^{2.3015}$ $R^2 = 0.8142$

表3より、胸高直径など幹の太さに関わる形状が、いずれも高い相関を示していることがわかる。また、枝張はケヤキ、プラタナスでの相関が低く、樹高は個々の種では、良い相関が認められるが、3樹種のデータでは相関が低くなっている（図5）。一方、胸高直径では、各樹種、全樹木でも高い相関が見られる（図6）。このような結果から、乾燥重量を推定する項目として、3樹種に共通の形状寸法項目となりうるという点からは、幹の太さに関わる項目が適していると言える。

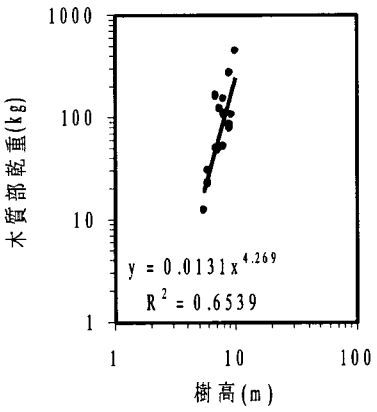


図5　樹高と木質部乾重の関係
（3樹種）

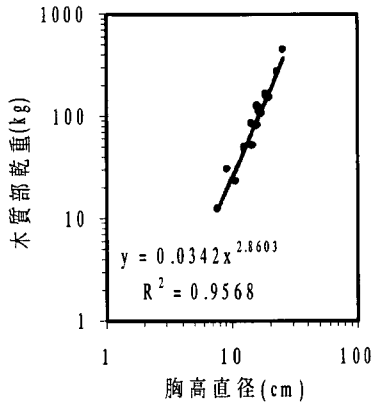


図6　胸高直径と木質部乾重の関係（3樹種）

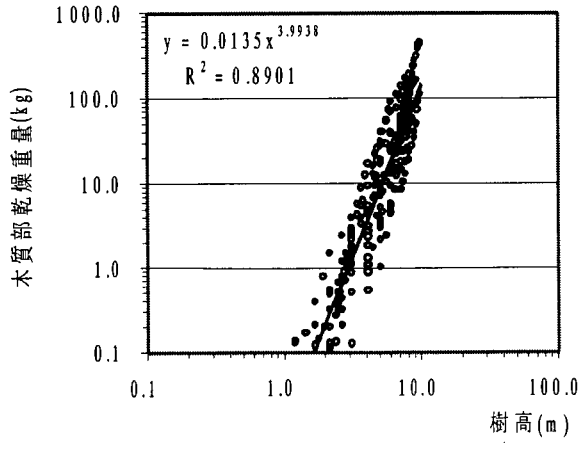


図7　樹高と木質部乾重の関係
（樹幹解析全データ）

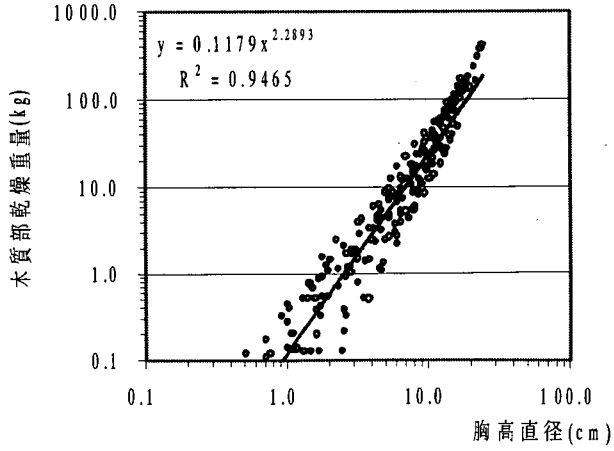


図8　胸高直径と木質乾重の関係
（樹幹解析全データ）

3.4.2　樹幹解析データを用いた相関解析

前項において良い相関が得られた項目である樹高と胸高直径について、樹幹解析から得られた全ての値を用いて相対成長式を求めた。結果を表4に示す。両項目とも、各樹種、また3樹種の全データにおいても、高い相関が得られた。散布図の例として、3樹種全データのものを図7および図8に示す。

これらの式からは、特定の樹高あるいは胸高直径の樹木が、その大きさになるまでに蓄積した、木質部乾燥重量、すなわち CO_2 固定量の算出が可能である。

しかし、この式から、特定の樹高あるいは胸高直径の樹木が、一年間にどのくらい成長するかを明らかにするには、樹高、胸高直径の年間成長量を明らかにする必要がある。

3.4.3　樹高・胸高直径と樹齢の相関関係

樹幹解析の全データを用いて、樹高と樹齢の関係を見たものが図9、胸高直径と樹齢の関係を見たものが図10である。

図9より、樹高は樹種毎に樹齢と直線的な関係があると言える。しかし、3樹種のデータを合わせみると、相関は低くなる。それに対して、図10からは、胸高直径と樹齢との直線関係は、3樹種とも非常に近似したものとなっており、先の15樹木の解析からも示唆されたように、ここでも、一つの回帰式により、3樹種について胸高直径と樹齢の関係を示すことができる。

さて、これらの関係からは、両項目とも一定の速度で成長をしているように見えるが、実際には、毎年の気候の変動などにより、各年の成長量は、違ったものとなる。また、樹齢によってもその成長速度に差があるものと思われる。ここでこの式が意味するものは、解析対象とした樹木のこれまでの成長を、平均的速度で表したものと解釈される。

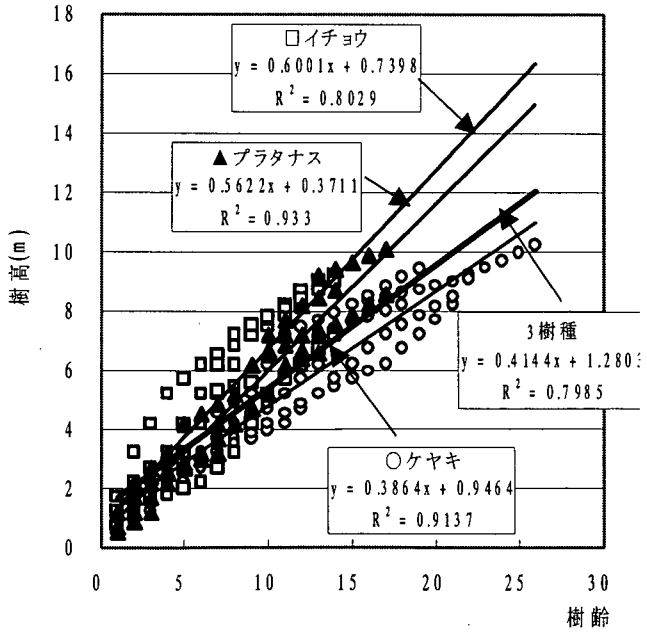


図9　樹高と樹齢の関係

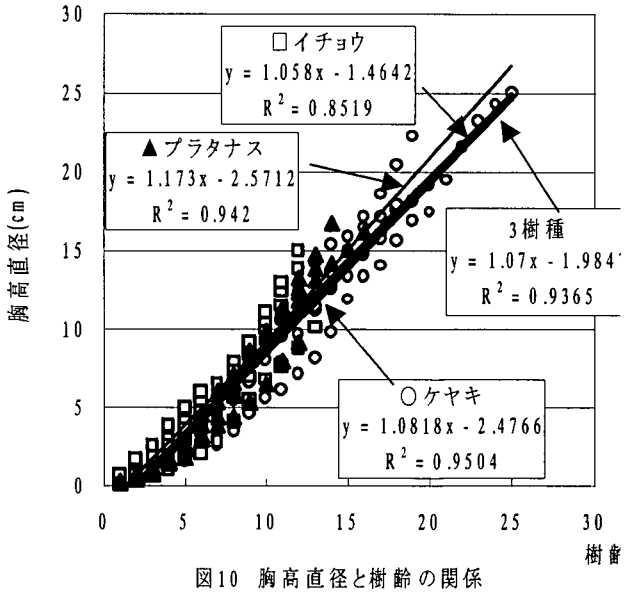


図10　胸高直径と樹齢の関係

3.4.4　CO_2 固定量の推定

以上の解析から、木質部乾重と樹高・胸高直径と樹齢の関係を整理すると次の式で表される。

$Y = a\{(X + c)^b - X^b\}$

Y：木質部乾燥重量　X：樹高（または胸高直径）

a、b：木質部乾燥重量と樹高（または胸高直径）との相対成長式から得られる定数

c：樹齢との回帰式から得られる樹高（または胸高直径）の年間成長量

ケヤキの樹高を例にして述べると、平均的な1本のケヤキが、これからの1年間に平均的な成長をするとした場合、期待される樹高成長量は、図9の回帰式（y=0.3864x + 0.9464）から、0.3864mである。
樹高 X mのケヤキが 1 年間に成長すると期待される木質部成長量は、樹高 X(m)のケヤキと、樹高 X + 0.3864(m)のケヤキとの木質部乾重の差となり、表4のケヤキ樹高の相対成長式 y=0.0192x4.1842 から、その差を求める式は、Y = 0.0192 {(X + 0.3864) 4.1842 − X4.1842} となる。同様にケヤキの胸高直径については、Y = 0.1596 {(X + 1.0818) 2.2961 − X2.2961} が得られる。これらの式を用いて、樹幹解析を行ったケヤキ 5（樹高 7.0m、胸高直径 20.4cm）の木質部乾燥重量を算出すると、樹高からは 16.3kg/年，胸高直径からは 20.4kg/年という値が得られた。ちなみに 1.83 倍し CO_2 に換算すると、それぞれ、30.4kg/年、37.4kg/年となる。

4．おわりに

以上述べてきたように、CO_2 固定量算定の原単位となる、特定の樹高または胸高直径における樹木の年成長量（木質部乾燥重量）を算出した。しかしながら、この原単位については、わずかな樹種と比較的若齢の樹木に限定される、適応の拡大には、他の樹種や大木での解析が必要とされるほか、気候や地域の差による変化などの補足データが必要である。

また、都市内全域の植栽樹木の CO_2 固定量を算出しようとする場合、植栽樹木の樹種や大きさ、総本数をどのように把握するかが重要な問題であり、原単位設定も、測定が可能でなければ、その役割を果たし得ないこととなってしまう。本稿で検討した樹木単位の原単位の設定は、類似の成長特性を有する植物種の統合や、様々要因による差の簡単な補正方法などが整備されなければならないと考えている。

6．参考文献

1)藤原宣夫：COP4 報告-吸収源としての土地利用・森林に関する討議結果について-、土木技術資料 40-1、pp.68-71、1999

2)IPCC：Revised 1966 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories, Workbook(volume 2), pp.5.22, 1996

3)半田真理子ほか：道路緑化樹木の二酸化炭素固定に関する研究、土木研究所資料、3059 号、建設省土木研究所、1992

4)三浦伊八郎、西田吃二：木材の元素組成、「木材化学」、丸善出版、pp.35-38、1933

5)梶原幹弘：樹木の生長量の測定、「森林計測学」大隅眞一ほか共著、養賢堂、pp.118-138、1971

6)藤原宣夫、田中隆、木部直美：わが国の街路樹Ⅳ、土木研究所資料、3666 号、建設省土木研究所、1999

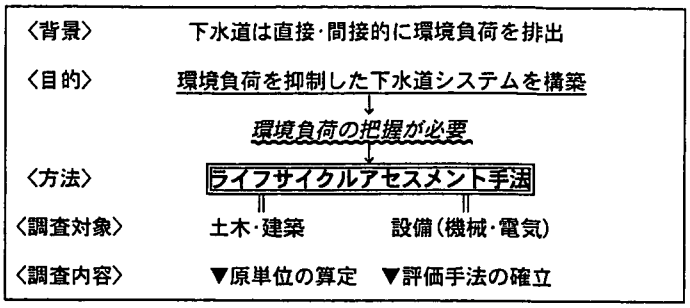
7)佐藤大七郎：陸上植物群落の物質生産Ⅰa－森林－、共立出版、1973

5.7　下水道システムのＬＣＡに用いる原単位に関する調査

研究期間：平 10 ～平 12
担当：汚泥研究室

【要旨】

本研究は、環境に及ぼす負荷をできるだけ抑制した下水道システムの構築を図るため、ライフサイクルアセスメント手法(LCA)を用いて、下水道施設による環境負荷を定量的に把握するとともに、その評価手法を確立するものである。なお、本調査は調査範囲が、実施設の設計・施工など広範囲にわたることから、(社)全国上下水道コンサルタント協会、(社)日本下水道施設業協会、日本下水道事業団と共同で研究を進めている。



１１年度は、前年度に引き続き、施設規模と負荷量との関係を明らかにするため、実際の処理区を対象に積上げ法を用いて二酸化炭素(CO_2)負荷量とエネルギー消費量を算出した。とくに、土木･建築に関しては影響の大きい管渠を中心に検討を行い、設備については負荷の大半を占める運転に関して管理データの詳細な調査を行った。その結果、管渠においては土被りの増加に伴い管径の影響は小さくなり、CO_2 負荷量はヒューム管より塩ビ管の方が大きく見積もられた。また、処理施設においては運転状況の実態を反映させた場合でも、設備が及ぼす負荷のうち運転によるものが８割程度を占め、下水道システムにおける環境負荷の軽減における運転管理の重要性が示めされた。

1. 研究方法

1.1 インベントリ分析

機械設備、電気設備のインベントリとして計上したライフサイクルの各段階における工程を表－１に示す。このうち、建設段階に用いる薬品やユーティリティに係わるものは、一次原単位として産業連関法のデータを採用した。これらを除く各工程のインベントリは、それぞれの工程に対応した換算係数や一次原単位を利用して算出した二次原単位を設定した。

表－１　インベントリに計上した工程

ライフサイクル段階			機械設備 (機械製品)	機械設備 (架台･配管)	電気設備 (盤　類)
建　設	素材製造		○	○	○
	機器製造	加　工	○		○
		塗　装	○		
	搬送(輸送)		○	○	○
	据付工事	据　付	○	○	○
		工　事		○	
		塗　装	(○)	○	
使　用	運　転		○		
	保守管理	機器補修	○		○
		機器更新	不　要　(建設に計上)		
廃　棄 リサイクル	解　体		○	○	○
	廃棄搬送(輸送)		○	○	○
	素材回収		○	○	○
	処分(埋立等)		未　計　上		

1.2 土木･建築

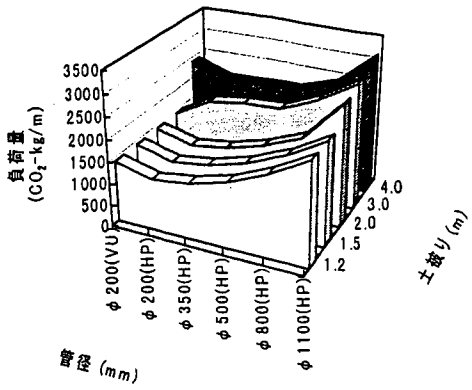
１０年度の調査では、土木･建築のうち管渠の占める割合が最も大きい結果となった。そこで、１１年度は、負荷量をより正確に算出するため、管渠について更に詳細な検討を行った。ただし、すべての管渠を対象として設計図書等を参照する積上げは事実上不可能であるため、１０年度と同様、標準的な工区を設定して処理区全体の管渠にあてはめた。工法は開削、管種はヒューム管とし、管径および土被りをそれぞれ５ケースずつ設定した。また、塩ビ管についても見積もりを行った。

一方、引用する原単位データベースは、１０年度と同じく建設省総合技術開発プロジェクトの報告を基本としたが、管渠建設における負荷量の内訳を精査し、負荷量の計算値に大きく影響を及ぼす項目を抽出したうえで、他の文献値を採用した場合との比較検討を行った。

1.3 設備

１０年度の調査においては、ライフサイクルの間に設備が及ぼす負荷のうち、運転の寄与分が 95%程度に達すると見積もられた。しかし、この試算では、電力などの使用量を左右する設備の稼働率は設計上の値を採用していた。そのため、１１年度は、対象箇所における設備の運転状況を調査し、機器の種類ごとに推計された稼働率を用いて負荷量を算出した。

また、下水道施設の規模に応じた負荷量原単位を明らかにするために調査箇所を追加した。さらに、日本下水道事業団が有するオキシデーションディッチ法の標準設計を適用して負荷量のモデル計算を行い、施設規模と負荷量の関係を検討した。



図－１　管渠の管径･土被りと負荷量の関係

2. 研究結果

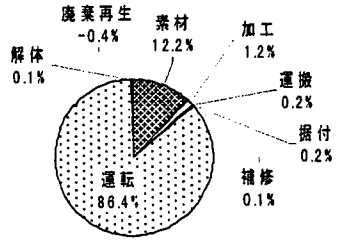
2.1 土木･建築

標準工区を対象に、管渠の建設時に生ずる CO_2 負荷量を算出した結果、管径および土被りの増加に伴い単位延長当たりの負荷量が増大する傾向が確認された(図－１)。CO_2 負荷の増加率は、管径をφ 200mm からφ 1,100mm にした場合、土被り 1.2m では 2.03 倍となるのに対し、4.0m では 1.52 倍となる。これは、土被りが大きくなるにしたがい負荷量に占める管材の割合が相対的に低くなることにあると考えられる。

一方、同一施工条件における管種の影響を調べた結果、建設負荷量はヒューム管(HP)に比べ塩ビ管(VU)の方が１～２割程度大きく見積もられた。

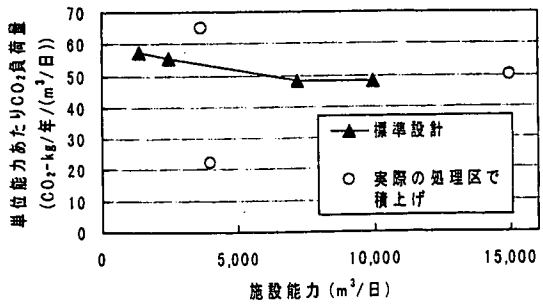
2.2 設備

運転状況の調査結果に基づいて稼働率を設定して設備の CO_2 負荷量を算出した結果、調査対象箇所で運転の占める割合は 74 ～ 93%と見積もられた(図－２)。なお、処理施設や設備によっては十分な運転データが入手できなかったため、トータルの使用電力量から機器ごとの稼働率を推定する方法を取った。段階的整備に起因する設計能力と実際の処理量との差は箇所によって異なるが、設備の CO_2 負荷量のうち運転に係わるものは 8 割程度と考えられる。



図－２　設備負荷量の内訳
(I 処理区;標準活性汚泥法;33,000m^3/日)

一方、オキシデーションディッチ法の標準設計を用いて計算した単位能力あたりの CO_2 負荷量は、平均で 52kg-CO_2/年/(m^3/日)となった。しかしながら実際の処理場において、建設及び運転にかかる CO_2 負荷量を積み上げてみると、その数値には相当なひらきがある（図－３)。これには施設容量と実流入水量の差などによる稼働状況の違いが反映されているものと考えられることから、今後、ＬＣＡの目的に応じた CO_2 負荷の算出方法を検討する必要がある。



図－３　オキシデーションディッチにおける能力と設備負荷量の関係

（森田、原田）

5.8.1　建設事業におけるCO_2算定評価システムの開発に関する研究

研究期間:平成11～13

担当:機械研究室

【要旨】

地球温暖化防止京都会議（COP3）で合意された我が国の削減目標である温室効果ガス６％を達成するには、今後一層の省エネ努力、技術開発が必要である。本研究では、建設事業のライフサイクルにおける総コストと総CO_2発生量を算出し、CO_2削減対策立案を支援するエキスパートシステムの作成を目標とし、平成 11 年度は建設機械の製造・稼働・廃棄におけるライフサイクルCO_2（$LCCO_2$）総排出量の算定方法策定のため、バックホウを例に $LCCO_2$ の試算して排出量原単位を求めた。またこの試算方法による他の建設機械の $LCCO_2$ 算定方法についての課題を整理した。

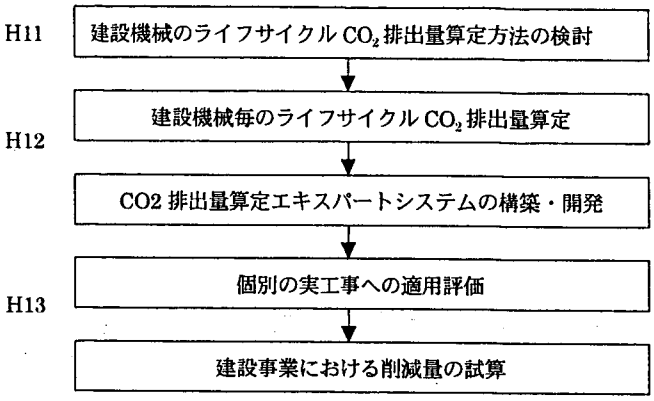


図１　研究フロー

1. 研究目的

現在、建設事業における資材生産から施工までに排出するCO_2排出量の評価手法は数例報告されている。しかし、建設事業における温室効果ガスの計画的な削減を行うためには、製造から廃棄までのライフサイクルの総コストと総CO_2排出量を算出し、評価するシステムが必要とされている。本研究では、建設事業におけるCO_2の排出源である工事材料と建設機械のうち、建設機械の$LCCO_2$総排出量を算定する手法と、排出量原単位を整理するものである。(図-2)。

2. 研究方法

建設機械メーカ、各種団体にヒアリング調査を行うことにより、製造時、廃棄時における使用エネルギー量や部品

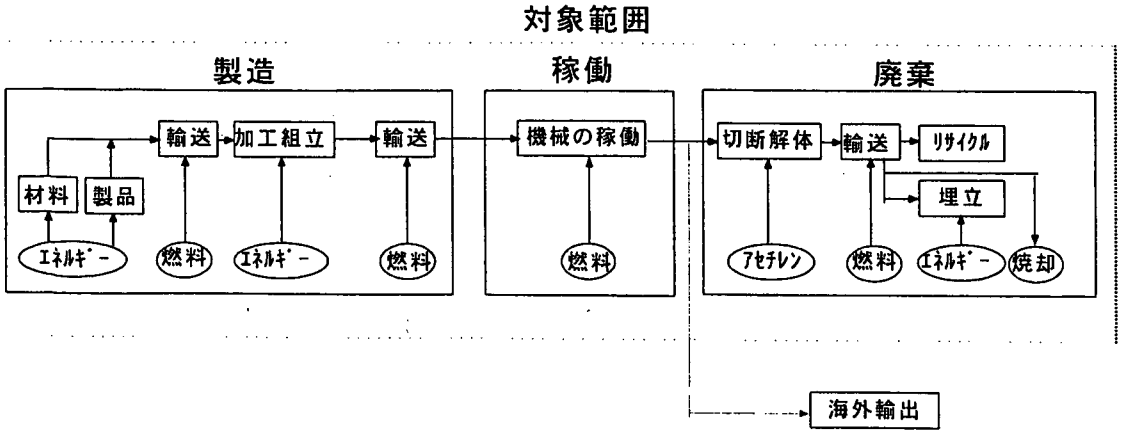


図２　対象範囲

重量・工程を調査し、$LCCO_2$総排出量の算定と原単位の設定を行った。なお、調査対象は 20tクラスのバックホウとし、これより建設機械の $LCCO_2$ 算定方法の課題を整理した。

3. 研究結果

（1）製造によるCO_2排出量

製造におけるCO_2排出は、材料、部品の加工・組立、部品等の輸送の3つから構成される。材料からのCO_2排出量の算定は、対象機種の材料を7種類（①鉄、②非鉄金属、③コンクリート、④ゴム、⑤プラスチック、⑥油脂・塗料、⑦作動油・軽油）に分類し、これら材料の構成重量と材料毎のCO_2排出量原単位から算定した。

加工・組立からのCO_2排出量は、製造工場の使用エネルギーと建設機械製作重量等からCO_2排出量を推定した。また製作工程の一部を外注する部分は、単位製作重量当たりに必要なエネルギーは同等と仮定し、重量比により1台当たりの必要エネルギーを算出した。

輸送は材料・部品・製品の輸送に伴うCO_2排出量は20tトラック（6割積載）で、延べ600km走行すると仮定して算定した。

この結果20tクラスバックホウの重量19.0tに対し、重量の78.5%(24.5t-CO_2/台)が材料からのCO_2排出であり、その約9割は鉄であった。その他では加工・組立が17.9%(5.6t-CO_2/台)、輸送は3.6%(1.1t-CO_2/台)であり製造時CO_2排出量合計は31.2t-CO_2/台となった。

（2）稼働によるCO_2排出量

稼働時のCO_2排出量はISO8178　C1モードの燃料消費率「建設機械等損料算定表」（平成11年度版）の機関出力、原動機燃料消費量、標準使用年数、年間標準運転時間をもとに算出した結果、354.26t-CO_2/台であった。

（3）廃棄

廃棄に伴うCO_2排出は、海外輸出(85%)と国内処分(15%)であり、海外輸出はCO_2排出量をゼロとして算定した。また、国内処分は、材料処分と輸送に分け、材料処分では鉄及び非鉄金属は規定のスクラップに切断するためのアセチレン使用量から発生するCO_2排出量を、コンクリート、ゴム、プラスチックは埋立処分に係るCO_2排出量を、油脂・塗料、作動油・軽油は焼却（燃焼）のCO_2排出量を算定した結果、0.2t-CO_2/台であった。最終処分までの輸送は、中間処理業者を介し20tトラック(6割積載)で延べ80km走行すると仮定してCO_2排出量を算定した結果0.2t-CO_2/台であった。

（4）LCCO_2総排出量

20tクラスバックホウのLCCO_2総排出量は、390t-CO_2/台であり、製造時が8.9%、稼働時が91%、廃棄が0.1%となった。

（5）今後の課題

本研究で得られた製造時の組立・加工のCO_2排出原単位は、自動車の算定例[1)]と比較し約1/3となっているため、今後両者の算定手法を比較し、原因と今後の方策を整理する予定である。また、製造時のCO_2排出原単位については、歩留まりや材料種類に対するCO_2排出原単位への影響についても感度分析等を行い、算定手法に取り込むかを整理する予定である。

参考文献

1）小林紀、「自動車のライフサイクルアセスメントに関する一検討」、エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集、11th,P149-152(1995)

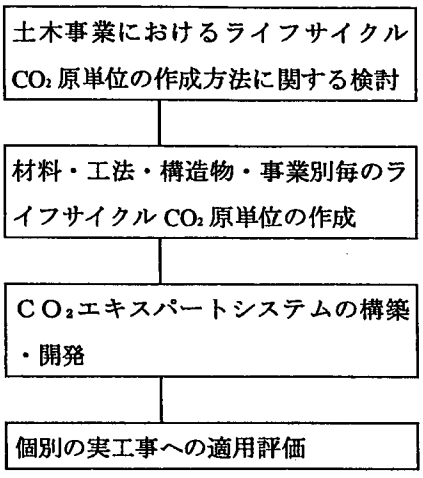
（村松、朝倉、水上）

5.8.2　建設事業におけるCO_2算定評価システムの開発に関する研究

研究期間：平 11 ～平 13
担当：化学研究室

【要旨】

地球温暖化防止京都会議（ＣＯＰ３）で合意された温室効果ガス６％の削減目標を達成するためには、六千万ｔのCO_2削減が必要である。建設事業においてCO_2の計画的な削減を行うため、本研究では、材料・工法・構造物・事業別毎の原単位の作成すると同時に資材生産から運搬・施工・維持管理及び廃棄までのライフサイクル総CO_2排出量を評価する手法を確立する。また、建設事業のライフサイクルにおける総CO_2を把握するシステムの構築を行う。11 年度は土木事業のライフサイクル総CO_2排出量評価手法とライフサイクルCO_2原単位作成方法について検討を行った。



１．研究方法

平成３～７年に行われた建設省総合技術開発プロジェクト「省資源・省エネルギー型国土建設技術の開発」では、資材生産から施工までのCO_2排出量を算定する手法を開発し、各事業、工事、材料毎の算定を行った。本研究では、ライフサイクルCO_2原単位を作成する方法と維持管理及び廃棄まで含めたライフサイクル総CO_2排出量を評価する手法を検討をした。

２．研究結果

２．１　既往文献調査

表－１に示すように建設材料のCO_2原単位の算定方法としては、産業連関法と積上法及び両者を組み合わせたハイブリッド法がある。建設材料のCO_2原単位に関する既往の算定事例を調査した。その代表的な４つの算定事例を表－２に整理した。空気調和・衛生工学会、建設省土木研究所及び大林組の算定事例では、幅広い施工モデルケースを対象としてCO_2排出量の算定を行っている。したがって、数多くの建設材料のCO_2原単位を算定するために、産業連関法を採用している。これに対し、土木学会の算定事例では、産業連関法により算定した空気調和・衛生工学会のCO_2原単位を採用し、そのうち主要材料については精度を上げるために積上法による算定を行っている。いわゆる、ハイブリッド法を採用している。

表－１　算定手法の概要

名称	概要
産業連関法	産業連関表を用いて算定する方法
積上法	材料の製造時に投入する素材・エネルギーをミクロに解析し、積み上げて算定する方法
ハイブリッド法	産業連関法と積上法を組み合わせた方法

表－２　建設材料のCO_2原単位に関する既存の算定事例

実施主体	レポート名	算定方法の分類			算定方法の概要
		産業連関法	積上法	ハイブリッド法	
土木学会	土木建設業における環境負荷(LCA)検討部会調査報告書(96.4)			○	基本的に下記の空気調和・衛生工学会の原単位を採用しつつ、主要材料については積上法により算定した。
空気調和・衛生工学会	地球環境時代における建築設備の課題(95.7)	○			対象とする建設材料が多いため、産業連関法を採用した。
建設省土木研究所	省資源・省エネルギー型国土建設技術の開発(94.3)	○			産業連関法により、百数十種類の建設材料について原単位を算定した。
大林組	建設業の資源消費量解析と環境負荷の推定(92.2)	○			産業連関法により、主要材料について原単位を算定した。

2．2　本課題での算定方法

セメントは窯業・土石産業、鋼材は鉄鋼業、アスファルト混合物は舗装材料産業、砂利が砂利・砕石産業に属するといったように建設材料は多岐の産業分野に渡っている。従って、全産業のCO_2原単位を算定するためには、産業連関法が適している。しかし、産業連関表には特殊材料やCO_2削減材料、リサイクル材料などの新材料は含まれていない。したがって、このような材料には積上法の考え方を取り入れる必要がある。そこで本調査では、産業連関法と積上法を組み合わせたハイブリッド法を採用した。

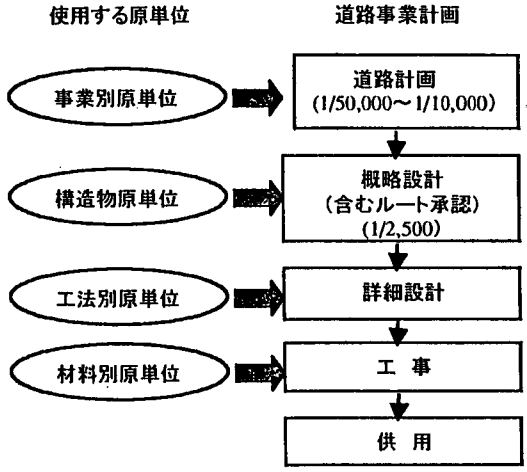
2．2．1　原単位の種類

土木事業におけるCO_2原単位を算定するために、対象となる原単位の種類および内容を検討した。その結果、各工事の個別算出のための材料別原単位・事業計画のためのる事業別原単位・構造物の概略設計のための構造物別原単位及び詳細設計のための工法別原単位を作成する。事業別原単位、構造別原単位、工法別原単位の算定基礎データとしても材料別原単位を使用する。表－3に4種類の原単位の概要を示す。図－1には原単位の利用場所を示す。

表－3　原単位の種類および概要

	(A)事業別原単位	(B)構造物別原単位	(C)工法別原単位	(D)材料別原単位
原単位の定義	河川・道路の建設の事業計画を対象とした原単位	道路の工事の区分（土木、トンネル、橋梁・高架）毎、及びダム形式等を対象とした原単位	工法を対象とした原単位	個別の材料を対象とした原単位
原単位のイメージ（例）	・道路施工1km当たりのC-t ・事業費当たりのC-t	・道路工事の区分（土工、トンネル、橋梁・高架）毎に1km当たりのC-t ・フィルダム堤体1m³当たりのC-t	・硬岩掘削工を行う際のA工法、B工法の1/m³当たりのC-t	・セメント1kg、コンクリート1m³当たりのC-t

(注)C-t（炭素換算トン）は二酸化炭素の数量を表す単位原単位



図－1　原単位の利用場所

2．2．2　原単位の算出資料

4種類の原単位を算出する資料として「新土木工事積算体系」を参考にする。「新土木工事積算体系」は表－4に示すように各工事ごとに7つの階層（レベル）に体系化されている。4種類の原単位に対応するレベルを表－5に示す。

表－4　新土木工事積算体系の区分レベル

レベル	名　称	内容
レベル0	事業区分	予算制度上及び事業執行上の区分、発注時の支出予算科目を示す
レベル1	工事区分	1件の工事として発注される区分
レベル2	工　種	一定の構造を持つ部位を施工するための区分
レベル3	種　別	レベル2とレベル4をつなぐ区分、施工順序に従った構成とする。作業土工や場所打杭工
レベル4	細　別	工事を構成する基本的な単位目的物もしくは単位仮説物であって、単位とともに契約数量を表すレベル
レベル5	規　格	レベル4を構成する材料などの客観的な材質・規格ならびに契約上明示する条件等
レベル6	積算要素	レベル4の価格算定上の構成要素であって、基本的には契約上明示しないもの

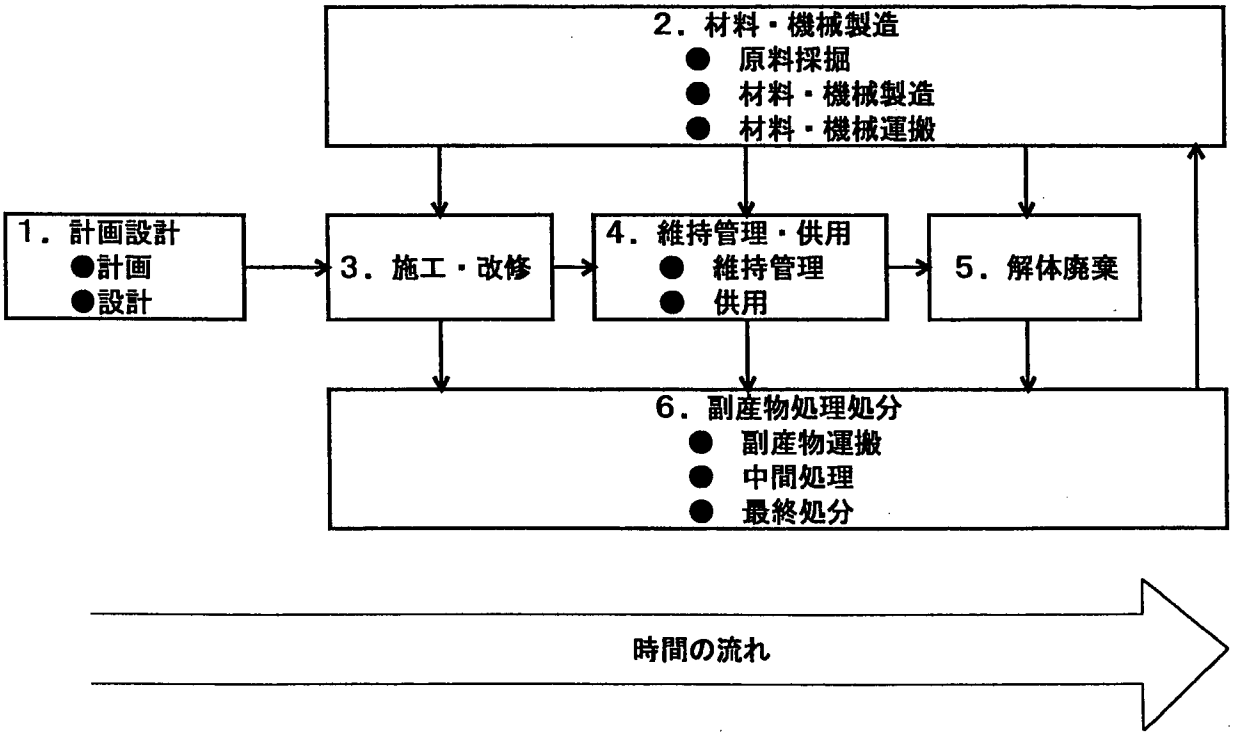
2．2．3　ライフサイクルCO_2排出量

土木事業のライフサイクルCO_2排出量を算出するため、図－2に示すように「計画設計」・「材料・機械製造」

・「施工・改修」・「維持管理・供用」・「解体廃棄」・「副産物処理処分」の６段階に分けて算出する。工事の計画段階で概略のCO_2排出量を考慮できるよう計画設計段階も加えた。副産物処理処分は、CO_2発生場所が中間処理場あるいは最終処分場であり、施工現場とは異なるため、別段階とした。維持管理と供用は概念は異なるが、ライフサイクルの時系列の上の位置が同一であるため、維持管理・供用段階としてまとめた。自動車から排出されるCO_2も対象に含める。材料及び機械の運搬は材料・機械製造段階に、副産物の運搬は副産物処理処分段階に含める。施工現場内での運搬は施工・改修段階に含める。

表－５　原単位に対応する工種レベル

原単位の種類	工事工種のレベル
事業別原単位	事業区分（レベル０）
構造物別原単位	工事区分（レベル１）
工法別原単位	工種（レベル２）
材料別原単位	単価表やコード表に記載されている材料、燃料、機械



図－２　ライフサイクルの工程

２．２．４　原単位算定の基礎データ

（１）CO_2排出データ

CO_2排出及び温室効果ガス関連データは、国として統一データ（「地球温暖化対策の推進に関する法律に基づく地方公共団体の事務及び事業に係る温室効果ガス総排出量算定方法ガイドライン」（環境庁、平成 11 年８月））が制定された。本研究では表－６に示すデータを準拠して使用する。

（２）産業連関表

CO_2原単位の算定に用いる産業連関表データは、「産業連関表（平成７年版）」（総務庁）および「建設部門分析用産業連関表」（建設省、平成 12 年春発刊予定）の２種類を使用してする。

表－6　ガイドラインにおけるCO_2係数

活動区分		固有単位排出係数	発熱量排出係数	発熱量
燃料の燃焼	一般炭(輸入されたもの)	2.3515(kg-CO_2/kg)	3.7928(kg-CO_2/10^4 kcal)	25.954(MJ/kg)
	練炭及び豆炭	2.3887(kg-CO_2/kg)	3.7928(kg-CO_2/10^4 kcal)	25.954(MJ/kg)
	ガソリン	2.3587(kg-CO_2/l)	3.7928(kg-CO_2/10^4 kcal)	25.954(MJ/l)
	灯油	2.5284(kg-CO_2/l)	3.7928(kg-CO_2/10^4 kcal)	25.954(MJl)
	軽油	2.6444(kg-CO_2/l)	3.7928(kg-CO_2/10^4 kcal)	25.954(MJ/l)
	A重油	2.6977(kg-CO_2/l)	3.7928(kg-CO_2/10^4 kcal)	25.954(MJl)
	B重油	2.8325(kg-CO_2/l)	3.7928(kg-CO_2/10^4 kcal)	25.954(MJ/l)
	C重油	2.9393(kg-CO_2/l)	3.7928(kg-CO_2/10^4 kcal)	25.954(MJ/l)
	液化石油ガス（LPG))	3.0065(kg-CO_2/kg)	3.7928(kg-CO_2/10^4 kcal)	25.954(MJ/kg)
	液化天然ガス（LPG))	2.6879(kg-CO_2/kg)	3.7928(kg-CO_2/10^4 kcal)	25.954(MJ/kg)
	都市ガス	1.9914(kg-CO_2/kWh)	3.7928(kg-CO_2/10^4 kcal)	25.954(MJ/m^3)
他人から供給された電気の使用	一般電気事業者その他の電気供給者	0.3845(kg-CO_2/kg)		
他人から供給された熱の使用		0.050(CO_2/MJ)		
土地利用変化に伴う草木の消却		1.650(kg-CO_2/l)		
一般廃棄物の焼却		2.442(kg-CO_2/l)		
産業廃棄物の焼却	廃油	2.933(kg-CO_2/l)		
	廃プラスチック	2.567(kg-CO_2/l)		

(出典) 発熱量：平成10年版総合エネルギー統計を元に設定

(注) LPGについてはkg単位となっているのでm^3で把握している場合は換算が必要となる。

（3）原単位の算出方法

材料のエネルギー原単位及びCO_2原単位は、それぞれ以下の式により求める。ここで用いる原単位、濃度の定義を表－7に示す。

・(材料のエネルギー原単位) ＝ (材料のエネルギー濃度) × (単価)

・(材料のCO_2原単位) ＝ (材料のCO_2濃度) × (単価)

表－7　原単位、濃度の定義

項　目	単　位	内　容
濃度	kg/円	産業連関表に記載されている産業活動1円当たりのCO_2排出量。
原単位	kg/固有単位	コンクリート、鋼材など個別の資材など固有単位（1m^3あるいは1t）当たりのCO_2排出量。

3．まとめ

土木事業におけるライフサイクルCO_2原単位を作成する方法とライフサイクル総CO_2排出量を評価する手法を検討した。ライフサイクルCO_2原単位は新土木工事積算体系のを参考にし、材料別原単位・工法別原単位・構造別原単位及び事業別原単位の4種類を作成する。算出方法としては産業連関法と積上法を組み合わせたハイブリッド法を採用する。土木事業のライフサイクルは、「計画設計」・「材料・機械製造」・「施工・改修」・「維持管理・供用」・「解体廃棄」・「副産物処理処分」の6段階に分けて算出する。今後はこれらの手法を使い原単位の作成及び建設事業のライフサイクル総CO_2排出量を把握するシステムの構築を行う。

(明嵐、寺田)

公共事業におけるリサイクル材利用技術の開発

6．公共事業におけるリサイクル材利用技術の開発

研究期間：平成 11～13 年度
プロジェクトリーダー：新材料開発研究官
猪熊　明

1. 研究の背景：

一般廃棄物、産業廃棄物を問わず廃棄物のリサイクルの推進は、環境破壊等の問題の顕在化から年々重要課題となっている。公共事業においては、建設分野でのリサイクルは当然推進しなければならないが、建設分野以外からの廃棄物についても、製品内でのリサイクルを推進してもどうしても製品内のリサイクルが困難なものについては、安全性等の検討を進めその利用を図ることがリサイクル材の利用促進にとって重要課題となっている。

2. 研究の目的：

本研究は下記を目的とする。

（1） 他分野からのリサイクル材の受け入れに対する基本方針案の策定、制度の提案、他分野からのリサイクル材の経済的特性の把握、価格等経済的な対処案の策定

（2） 他分野からのリサイクル材の機能性、安全環境保全性、耐久性、再リサイクル性等に関する技術的な対処方針案の策定、個別材料・分野毎の試験、評価方法案の策定

3. これまでの研究成果：

11 年度は、建設分野以外からの再生資材の現場適用のためのマニュアル（案）を作成するとともに、これらを用いたパイロット事業（平成 11 年度は全国で約 26 ヶ所）を行った現場から、施工後各種のデータを取り、その結果を用いた再生資材評価手法の検討を行った。その結果、環境安全上は、薬剤処理と焼結による再生資材化処理が溶融処理に次いで有望であることがわかった。また、①他産業再生資材に関する需要と供給の情報を、再生資材のメーカー側と建設省工事事務所など再生資材の利用者側との間でどのように効率的にやりとりするかという情報システムの基本検討、②一般廃棄物の焼却灰を溶融固化して得られるスラグを舗装のアスファルト混合物もしくは路盤材として用いた場合の特性調査、③大気汚染対策用舗装の開発を目的とした炭化骨材の強度試験などを行った。

－公共事業におけるリサイクル材利用技術の開発－

個別研究課題目次

6.1　リサイクル新材料の利用技術に関する研究……（新材料開発研究官）…256

6.2　他産業リサイクル材利用のマニュアル検討調査……（新材料開発研究官）…258

6.3　一般廃棄物の焼却灰溶融固化物の舗装用骨材としての利用に関する調査……（舗装研究室）…260

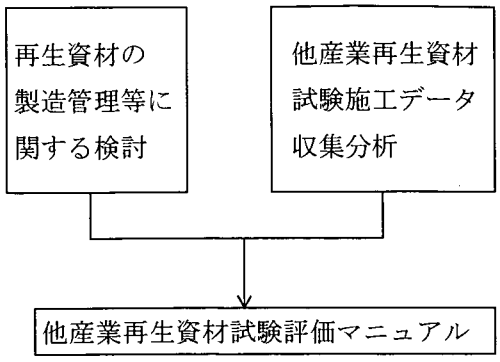
6.4　廃木材を活用した大気汚染対策用舗装の開発……（化学研究室）…262

6.1　リサイクル新材料の利用技術に関する研究

研究期間：平 11 ～平 13
担当：新材料開発研究官

【要旨】

一般廃棄物、産業廃棄物を問わず廃棄物のリサイクルの推進は、資源循環型社会を構築する上から年々重要課題となっている。建設分野以外からの再生資材でも製品の循環過程内でのリサイクルが困難なものについては、環境安全性等の検討を進め公共事業においてその利用を図ることがリサイクル促進にとって必要とされている。



このため平成１１年度は全国で約２６ヶ所の他産業再生資材を用いたパイロット事業を行い、施工後各種のデータを用いて再生資材評価手法の検討を行った。また溶融処理以外の中間処理法の適用可能性について検討した。その結果薬剤処理と焼結による再生資材化処理が環境安全上は溶融処理に次いで有望であると考えられた。

１．研究目的

本研究は、他産業再生資材を公共事業に用いるための評価方法を明らかにするため試験施工とその分析，再生資材の製造管理等に関する検討を行い、最終的に評価マニュアルにまとめることを目的としている。

２．試験施工とその分析

２．１　調査方法

他産業再生資材の公共事業への適用性を調べるため、平成１１年度には２６件の試験施工を行うこととしている。２６件の内代表的な１０件を例として表－１に示す。こうした試験施工において力学的な適合性を調べる試験や重金属の溶出試験などを行い、その施工性の確認とともに資材の公共事業への適用可能性を調査しようとするものである。

表－１　他産業再生資材試験施工の例

ＮＯ	工事内容	再生資材	使用用途
1	国道修繕	溶融スラグ	アスファルト合材の細骨材
2	道路改良工事	古紙等の圧縮材	現場打ちコンクリート型枠
3	園路舗装	ガラスカレット	ブロック舗装
4	歩道舗装	ゴムチップ	歩道舗装の表層材
5	道路補修	超硬質人工骨材	骨材
6	道路改良	生ｺﾝｽﾗｯｼﾞ	路盤材
7	法面防災	古タイヤ	法面保護材
8	国道拡幅	水砕スラグ	盛土材
9	歩行者系舗装	ガラスビーズ	公園内の歩行者系舗装の表層骨材
１０	国道付替	チップ化木材	平板ブロック

2．2調査結果

これらの工事は現時点では、計測データなどを完全には収集できていない。しかし、定性的な評価として表－2のようなことが判明した。今後こうした総合的な所見と併せて試験計測データを収集分析し、再生資材の評価手法を確立したい。

表－2　試験施工結果より判明した事項

再生資材	適用先	得られた知見
溶融スラグ	歩道舗装の表層材	品質性状、施工性とも従来のｱｽﾌｧﾙﾄ混合物と同等である。
	歩道舗装の路盤材	スラグ自体は天然砕石と同程度の力学特性を示す。溶融スラグ100 %の路盤は、施工性や締固め度に課題がある。粒度調整スラグは施工性、締固め度ともに良好であった。
古紙、廃ﾌﾟﾗｽﾁｯｸ	現場打ちｺﾝｸﾘｰﾄ型枠	コンクリートからの吸水による型枠材の膨張・はらみ等がみられた。転用回数は1.6回程度である。
廃ﾀｲﾔ(ｺﾞﾑﾁｯﾌﾟ)	歩道舗装の表層材	ゴムチップの混入量が多くなると耐久性がなくなる。最終的にアスファルト混合物の重量比５%使用した。

3．再生資材の製造等に関する検討

3．1調査法

廃棄物から再生資材を製造する方法として、現在は最も安全性が高い溶融処理が最有視されている。しかしコストの面からは廃棄物の性状に応じてより安価の方法も検討した方が、よりリサイクルが促進されることも考えられる。このため文献調査を行い、それに基づき各種の処理法について評価した。

3．2調査結果

調査結果を表－3に示す。これから焼結もしくは焼結に酸抽出や薬剤処理を組み合わせた処理法が、総合的に溶融処理に次いで適用可能性があると考えられた。今後さらに試験データを収集する必要がある。

表－3　処理技術の比較表

処理方法	溶融	焼結	酸抽出	薬剤処理	セメント固化
現在の技術確立	△	△	△	○	○
処理コスト	×	×	△	△	○
建設コスト	×	×	△	○	○
埋立処分量	○	○	△	△	×
長期安定性	○	○	○	△	×

注）○、△、×は、「廃棄物学会編；廃棄物ハンドブック，オーム社，1998．9」「平岡，酒井；ごみ焼却飛灰の性状と処理技術の展望，廃棄物学会誌，vol.5，No.1，1994」「焼却灰再生品利用技術指針（案）；船橋、1996．3」「堀内，他；発生土および廃棄物の地盤工学的処理と有効利用，土と基礎，４５－６，1997．6」を参考にして決定したが、現段階での相対的判断に基づくものであり、今後の技術開発などにより変化することがある。

4．主な研究成果物

土木研究所資料第３６６７号、公共事業における試験施工のための他産業再生資材試験評価マニュアル案

（猪熊）

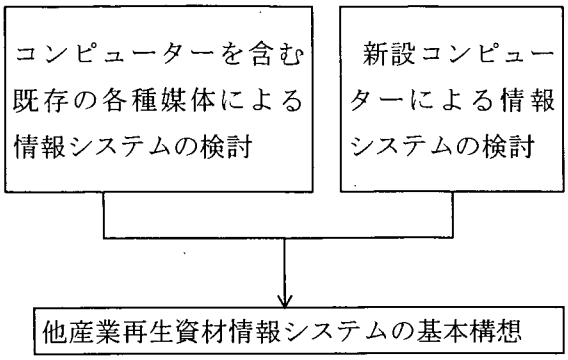
6.2　他産業リサイクル材利用のマニュアル検討調査

研究期間：平11～
担当：新材料開発研究官

【要旨】

建設分野以外からの再生資材でも製品の循環過程内でのリサイクルが困難なものについては、環境安全性等の検討を進め公共事業においてその利用を図ることがリサイクル促進にとって必要とされている。しかしこうした他産業再生資材の需要側と供給側との間で、製品情報等のやり取りは現在ほとんど行われていない。

このため他産業再生資材の情報伝達を効率的に行うためのシステムの基本検討を行った。



1．研究目的

一般廃棄物、産業廃棄物を問わず廃棄物のリサイクルの推進は、資源循環型社会を構築する上から年々重要課題となっている。建設分野以外からの再生資材でも製品の循環過程内でのリサイクルが困難なものについては、環境安全性等の検討を進め公共事業においてその利用を図ることがリサイクル促進にとって必要とされている。このため本研究は、他産業再生資材に関する製品情報や供給量などの情報を再生資材のメーカー側と建設省工事事務所など再生資材の利用者側との間で、どのように効率的にやり取りするかという情報システムの基本検討を行った。

2．研究方法

他産業再生資材の供給側の情報を需要側に伝達する適切なシステムについて、主に文献調査、既存の情報システム、各種制度等に関する調査などから検討を行った。

3．研究結果

3．1　コンピュータを含む既存の各種媒体による情報システム

他産業再生資材に関する既存の情報媒体を表－1に示す。媒体番号の1～4は民間の財団法人が提供しており、媒体2、4はそれぞれ1、3をベースにしてホームページ上に構築されている。しかし表1の「情報内容」から明かなように2、4は各再生資材の製品連絡先しか示しておらず公共事業の適用性を判断するにはこれだけでは情報不足である。情報の更新に関しては、媒体3は平成11年度の時点で将来の更新計画が定まっていないが、一方媒体1に関しては年1回の更新をして有料出版物として販売するとのことであった。媒体1は「情報内容」も豊富であるので、公共事業への適用性の可否の当初の判断に使える可能性がある。ただし媒体1に掲載される製品はしかるべき機関によって審査をされたものとは限らないので、最終的な個別資材の採否の判断にはさらに調査検討が必要と思われる。

媒体5は再生資材に限らず新技術を全般的にデータベース化しており、建設省のイントラネット上で運用される。しかし平成11年時点では「新技術」としての「再生資材」の登録が十件程度と少なく、すぐに再生資材情報システムとしては使い難い。しかし将来的には登録件数さえ増えれば十分有効な情報システムとなり得る。

表－１　既存の再生資材情報媒体

番号	媒体	情報の提供手段		情報の内容			
		印刷物	ｺﾝﾋﾟｭｰﾀｼｽﾃﾑ	生産量	公的評価価格	規格施工事例	連絡先
1	建設用ﾘｻｲｸﾙ資材ﾊﾝﾄﾞﾌﾞｯｸ（物価調査会）	●		●	●	●	●
2	建設資材要覧（物価調査会）		●				●
3	再生建設資材ガイド（経済調査会）	●		●	●		●
4	建設資材データベース（経済調査会）		●				●
5	新技術情報提供システム（ＮＥＴＩＳ）		●		●	●	●

３．２　新設コンピュータによる情報システム構築の検討

他産業再生資材の製品情報を供給側から収集し需要側へ伝達する情報システムをコンピューターで新たに構築する場合、通常建設省工事事務所など需要側にはパーソナルコンピューター（以下ＰＣ）が配備されていると考えられるから、このＰＣをどう連結して情報システムを作るかが主要な検討課題になる。こうした場合ＰＣの連結環境として表－２のように３種類の環境が考えられる。各システムの環境と開発運用の費用も併せて表－２に示した。費用は既に構築されている「建設発生土の情報システム」などを参考に概略を見積もった。ここで調査費は製品情報収集のための費用で、運営管理費はシステム管理のための費用であり、共にランニングコストである。

表－２から新設コンピューターによる情報システムは、開発よりもその維持管理に多額の費用を要することがわかる。

表－２　想定されるパーソナルコンピューター連結システム

	想定されるシステム環境	開発・運用費
スタンドアローン （ﾈｯﾄﾜｰｸによる接続を行わない）	基本的に FD や CD-ROM などの配布用のデーターベースシステムを開発する方法である。電子媒体の配布によるため、運用機関側にデータベースサーバー等の設置は不用となる。	開発費：約 3.200 万円 調査費：約 10.000 万円 合計：　13.200 万円
イントラネット （特定の利用者のみのﾈｯﾄﾜｰｸ）	データベースサーバーの設置とデータベースエンジンソフト等が必要となる。また、セキュリティーを考慮し、ファイアウォールサーバー及び同ソフト等、周辺機器を含めた全体の環境整備の検討が必要となる。	開発費：約 8.000 万円 調査費：約 10.000 万円 運営管理費：約 3.000 万円 合計：　約 21.000 万円
インターネット （原則一般利用者も含めたﾈｯﾄﾜｰｸ）		

４．まとめ

他産業再生資材の製品情報等を主に資材のメーカー側から資材の利用者側に効率良く伝達するシステムとして、定期出版物形式が有効で、補完的に新技術情報提供システム（NETIS）が活用できることを明らかにした。また、コンピューター情報システムを新設する場合ランニングコストが大きいことが判明した。

（猪熊）

6.3　一般廃棄物の焼却灰溶融固化物の舗装用骨材としての利用に関する調査

研究期間：平11

担当：舗装研究室

【要旨】

産業から発生するリサイクル材の一つである、一般廃棄物の焼却灰溶融固化物をとりあげ、舗装用骨材としての適用性について検討した。その結果、アスファルト混合物に混入させた場合、混入量が大きくなるほど性状が低下する傾向を示したものの、大きな影響はなく、使用量を制限することで利用は可能と考えられた。また、再生骨材として利用した場合も、大きな影響がないことが分かった。

1．研究目的

近年、産業から排出される副産物の建設資材としての利用が強く求められている。本検討では、他産業リサイクル材として、一般廃棄物の焼却灰溶融固化物をとりあげ、舗装用骨材としての適用性について検討した。

2．研究方法

2．1　サンプル

サンプルは、表－１に示す性状のものを用いた。溶融固化物は粒径の大きい徐冷スラグであり、粗骨材の代替（以下、スラグ粗骨材）として用いた。

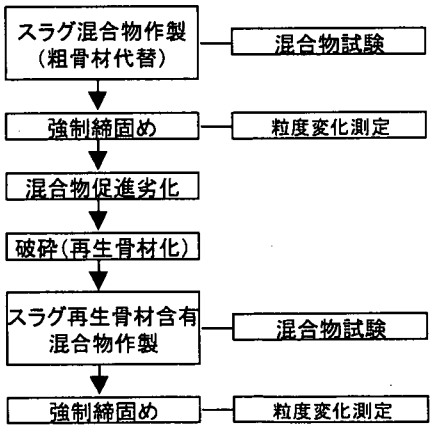
表－１　溶融固化物・天然骨材の材料性状

項目		溶融固化物	天然骨材					
		スラグ粗骨材	6号砕石	7号砕石	ｽｸﾘｰﾆﾝｸﾞｽ	粗目砂	細目砂	石粉
比重	みかけ	2.879	2.681	2.653	2.668	2.686	2.680	2.710
	表乾	2.844	2.634	2.594	2.629	2.578	2.550	
	かさ	2.825	2.606	2.557	2.606	2.513	2.472	
吸水量(%)		0.7	1.08	1.41	0.91	2.60	3.14	
加積通過率(%)	19.0mm		100.0					
	13.2mm	100.0	94.2	100.0		100.0		
	4.75mm	1.1	1.2	97.0	100.0	99.9	100.0	
	2.36mm		0.2	13.6	97.0	91.6	99.8	
	0.6mm			1.7	39.3	39.6	97.0	100.0
	0.3mm			1.5	25.7	19.0	67.7	99.3
	0.15mm				15.6	6.4	27.4	94.3
	0.075mm				10.1	1.9	5.5	82.1
すり減り減量(%)		34.8	15.8					

2．2　試験項目

試験は、図－１に示すフローに従い行った。スラグ粗骨材を用いて混合物（以下、スラグ混合物）を作製し、諸性状を確認した。なお、すり減り減量が比較的大きかったため、製造・締固めで骨材が細粒化しているかを確認するため抽出により粒度の変化を測定した。

さらに、スラグ混合物が再生利用されることを想定して、促進劣化後の混合物を再生骨材化するために破砕し、これを用いて再生混合物（以下、スラグ再生骨材含有混合物）を作製し、諸性状を確認した。



図－１ 試験フロー

2．3　配合

天然骨材を用いた混合物の標準配合は、表－２に示すような比率とした。スラグ混合物は、粗骨材（６号砕石＋７号砕石）の代替として 20, 30, 50 %の比率となるようにスラグ粗骨材を混入させた。従って、混合物全体に対するスラグの比率は、それぞれ 12, 18, 30 %である。

表－２　天然骨材での材料配合比

材料	6号砕石	7号砕石	ｽｸﾘｰﾆﾝｸﾞｽ	粗目砂	細目砂	石粉
配合比	37	22	10	16	10	5

またスラグ再生骨材含有混合物では、スラグ粗骨材 50%のものから作製したスラグ再生骨材を用い、混入量を 20, 30, 50 %とした。

3．試験結果

3．1　粒度分布の変化

締固めによるスラグ骨材の細粒化を確認するために、SHRP ｼﾞｬｲﾚﾄﾚﾘ・ｺﾝﾊﾟｸﾀ（以下、SGC）を用いて締固め、締固め前後の粒度分布の変化を確認した。図-2に天然材料のみでの変化を、図-3 にスラグ粗骨材 50%置換のものの変化を示す。図のように標準材料と比べ、特に著しい細粒化は観察されなかった。

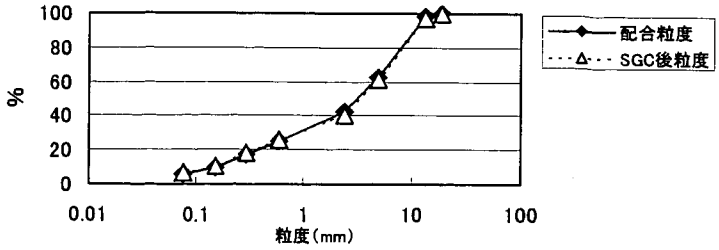


図-2 粒度分布の変化(標準材料)

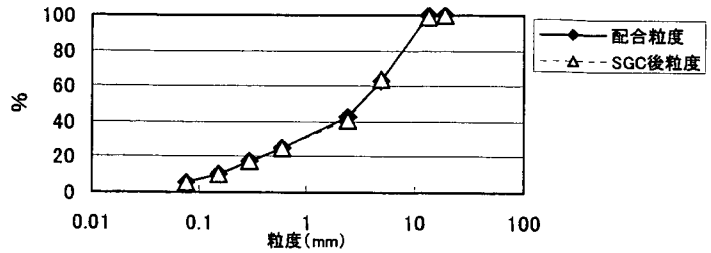


図-3 粒度分布の変化(スラグ粗骨材50%)

3．2　スラグ混合物の性状

スラグ混合物の性状を図-4,5 に示す。マーシャル安定度試験では、粗骨材の置換率が上がるごとに安定度も水浸安定度も低下したが、いずれも規格値（5kN）を満足した。ホイールトラッキング試験でも、置換率が上がることに性状が低下したが、著しい変化は見られなかった。

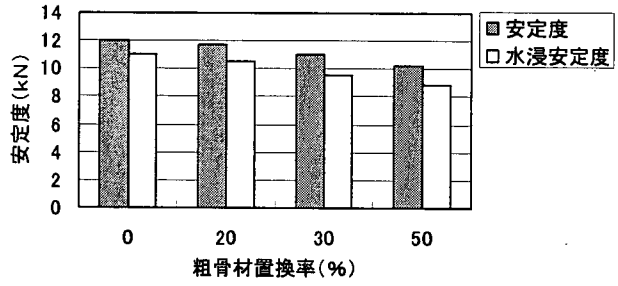


図-4 スラグ混合物のマーシャル安定度試験結果

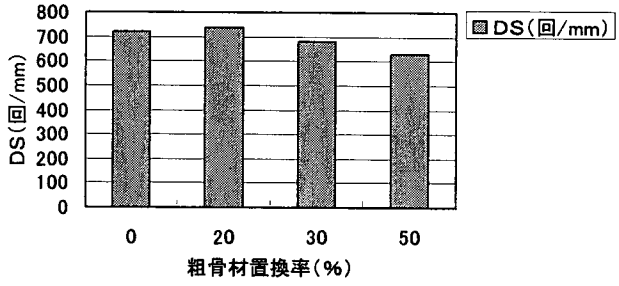


図-5 スラグ混合物のホイールトラッキング試験結果

3．3　スラグ再生骨材含有混合物の性状

粗骨材 50%置換のスラグ混合物から製造したスラグ再生骨材を用いて、再生混合物を作製し性状を確認した。結果を図-6,7 に示す。なお、混入率０％は天然材料の再生骨材で作製した再生混合物である。まず、マーシャル安定度では通常の再生混合物と差はほとんど見られず、水浸安定度が若干低下した。ホイールトラッキング試験では、混入率の上昇により動的安定度（ＤＳ）が小さくなり、影響が見られた。

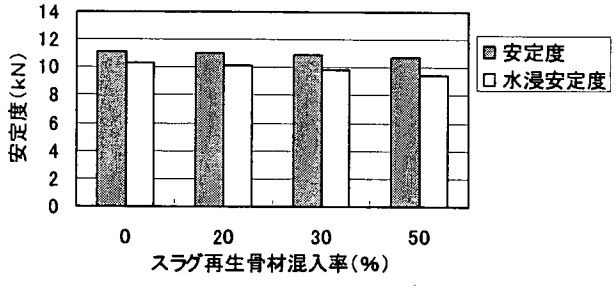


図-6 スラグ再生骨材含有混合物の
マーシャル安定度試験結果

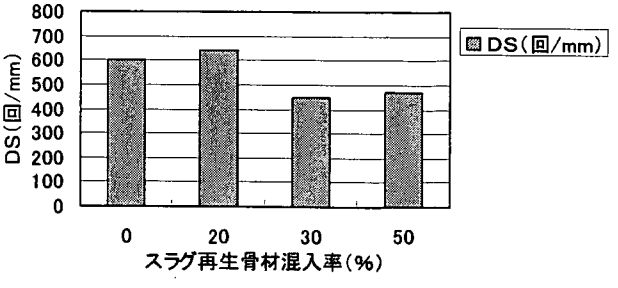


図-7 スラグ再生骨材含有混合物の
ホイールトラッキング試験の結果

4．主な研究成果物

・新田,木村,池田,ゴミ焼却灰溶融スラグの舗装への利用に関する研究,舗装工学論文集,第４巻,
pp151-157,1999.12

（吉田武、新田弘之、木村慎）

6.4　廃木材を活用した大気汚染対策用舗装の開発

研究期間：平 11
担当：化学研究室

【要旨】

建設廃棄物のうち再利用が進んでいないものの一つに、建設廃木材がある。本研究では、廃木材の炭化による舗装骨材への活用を検討している。炭化木材の多孔質な材料特性を有効に活用して、都市部の大気汚染対策用舗装を開発することが目標である。

本報告では、炭化木材の舗装骨材としての室内評価試験結果を行い、比重及び吸水率試験に不合格となった。他の試験では比較的良好な結果が得られた。比重及び吸水率試験は、間接的に骨材の耐久性を検証する。比重及び吸水率試験だけでなく他の試験でも目標値を満足できない場合には、骨材としての適用性が不的確であると判断することが出来る。したがって、木材炭化骨材が、骨材として不的確であるとすることは出来なかった。

1．研究目的

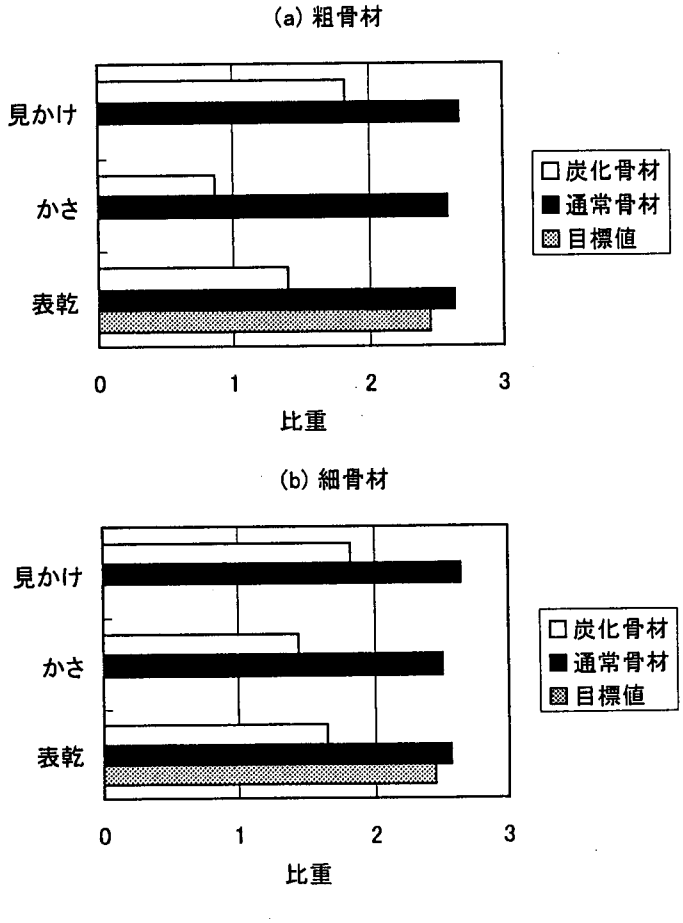
本研究では、廃木材の炭化による舗装骨材への活用を検討している。炭化木材の有する多孔質な材料特性を有効に活用して付加価値の高い舗装とするためである。付加機能としては、窒素酸化物をはじめとする道路交通に起因して発生する大気汚染物質である。

2．研究方法

通常の炭化木材は強度が不十分なので、中質繊維板を 1cm 角程度の立方体として成形した後、フェノール樹脂を含浸させて 800 度で炭化させた。このようにして出来上がった立方体状の試料をローラコンパクタで破砕及び標準骨材としての粒度調整を行った。この標準骨材を対象として、比重及び吸水試験（JIS　A　1109 及び 1110 準拠）、すり減り減量試験（JIS　A　1121 準拠）、静的剥離試験（JPI-5S-27 準拠）、及び骨材損失量試験（JIS　A　1122 準拠）を行った。試験の詳細は、舗装試験法便覧を参照した。

3．研究結果

図-1 に表乾比重を図-2 に吸水率を示す。木材炭化骨材では、それぞれの目標値2.45以上及び3.0%以下を満足することは出来なかった。吸水時間を 24 時間としたが、木材炭化骨材内部の空隙を定められた時間内で完全には置換されないこともわかった。従って、真の吸水率は今回測定された値よりも大きいと推察される。



図—1　骨材の比重

図-3にすり減り減量を示す。結果は、目標値である30%以下となっているので、骨材自身の耐摩耗性が確認された。図-4に剥離面積率を示す。剥離面積率は 5%であった。通常の骨材にストレートアスファルトを被膜した時、剥離面積率が10%以下であれば、骨材としては優れた性状であるとされる。また、骨材に対する被膜特性の高い高粘度改質アスファルトでも 5%以下であれば良好な結果である。したがって、木材炭化骨材はストレートアスファルトによる被膜特性が非常に優れているといえる。なお、木材炭化骨材の多孔質構造が多量のアスファルトを吸収したため、骨材を被膜するには通常の骨材に必要なアスファルト量5.5gの5倍を添加する必要があった。

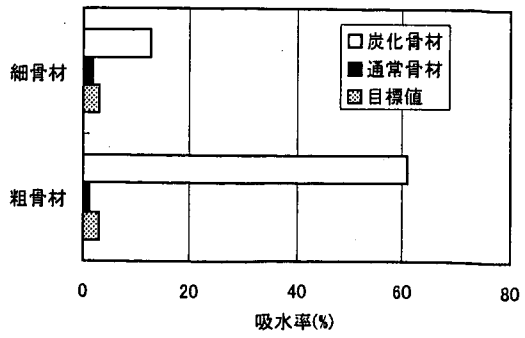
図- 5 に粒度別骨材損失量を示す。骨材損失量はどの粒径においても 7%以下であった。（目標値 12%以下）9.5mm 以上の骨材の骨材損失量が6.69%と他の粒度の骨材に比べて高かった。試験前の骨材には 9.5mm 前後の骨材が多く含まれているので、この骨材にごく僅かの損失が生じてもふるいを通過してしまうためである。4.75～9.5mm の骨材損失量がきわめて少ないのは、9.5mm ふるいを通過した骨材がこの粒度の骨材に混入したために、見かけ上の骨材損失が少なくなったと推察される。

したがって、木材炭化骨材の真の骨材損失量は、2.36～4.75mm の粒度の骨材損失量である2%程度とするのが妥当であろう。

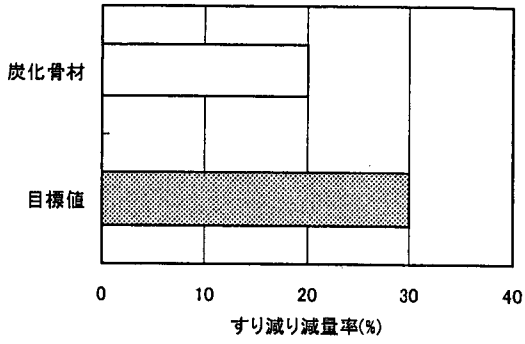
4．主な研究成果物

明嵐政司、廃木材の炭化による建設リサイクル資材の開発に関する研究、第 11 回日本材料研究協会（MRS）学術シンポジウムセッション1「植物系材料の最新の進歩」特別予稿集、pp2-5、1999 年 12 月、日本材料研究協会（MRS）内ウッドセラミックス研究会

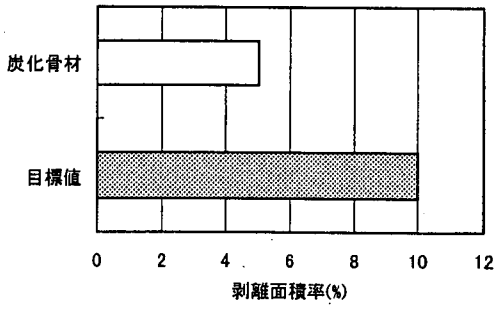
（明嵐）



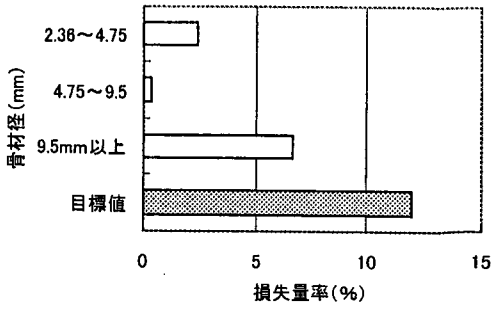
図—2 吸水率



図—3 すり減り減量



図—4 剥離面積率



図—5 骨材損失量

地域のニーズを反映した社会資本整備技術の開発

7．地域のニーズを反映した社会資本整備技術の開発

研究期間：平成 11～14 年度

プロジェクトリーダー：建設マネジメント技術研究室長
山下　武宣

1. 研究の背景：

国民のライフスタイルの変化、価値観の多様化等を背景に、社会資本整備に対し量的充足から質の重視への転換が求められている。これまでも、国民のニーズに配慮し、社会資本整備への反映に努めてきたところであるが、現在の施策制度では対応に限界がある。身近な生活空間を構成する中心的要素である社会資本は、家庭、職場、社会の様々な場面で活動を展開する住民の多様なニーズに対応し、地域の特性を活かした将来に継承されるべきストックとなることが必要である。

このため、施策立案、事業計画策定段階を中心に、住民意向の把握、反映を可能とする新たな事業手法の導入が重要な課題となっている。

2. 研究の目的：

地域特性、住民ニーズの適切な評価を踏まえ、事業プロセスにおける住民とのコミュニケーションの確保を重視し、地域のニーズに対応した新たな社会資本整備手法を確立する。

(1) 地域特性に応じた効率的な社会基盤整備を進めていく上で必要な地域住民等のニーズを反映したり、異なる主体の意見を調整する「合意形成」を適切に行うために、地域特性や事業特性に応じた合意形成手続きのあり方を明らかにする。

(2) 地域の個性を活かした魅力ある地域づくりをすすめる観点から、それぞれの地域の特性を抽出評価し、地域らしさを踏まえた質の高い社会資本整備に地域の特性を総合的に活かしていくための手法を確立する。

(3) 今日の社会資本整備で求められている住民ニーズとの整合性を確保する手段として、国民の実感に沿った社会資本整備効果の評価を行うための手法を開発する。

3. これまでの研究成果：

(1) 事業の段階に応じて合意形成手続きに用いられる各種手法について整理した。また、国内外の先進的な事例を調査することにより各種手法の適用性を検討するとともに、合意形成の具体的場面について調査し、合意形成の円滑化のための要因を分析した。

(2) 地域の個性を活かした魅力ある地域づくりの事例である「手づくり郷土賞」から特に地域特性を活かした 325 事例について基礎的な整理を行い、そのうち 103 事例を取り上げ、市町村に対しアンケート調査を行った。その結果にもとづき、地域特性を活かした地域計画および施設設計の分類ならびに計画づくりおよびデザイン化の過程における地域特性活用のポイントについて整理を行った。

(3) 河川に関わる地域の歴史・文化資源を積極的に活用した河川事業の事例を収集・分析し、地域に密着した川づくり、住民参加の川づくりの素材として歴史・文化資源を活用するための手法を検討した。まず、歴史・文化資源を有する河川の 20 事例を収集し、川づくりの特徴と取り組み過程を整理しし、それをもとに、これらの資源を地域に密着した川づくりに活用する手法についてまとめた。

(4) 社会資本整備に対する住民ニーズを把握するため、まず地域特性構成要素を分析し、モデル地域を設定して、社会資本整備の効果を的確に把握するために地域特性評価モデルの開発準備を行った。さらに、モデル地域に

おいて社会資本整備に対する住民意識調査を行い、住民ニーズの構造及び特性把握を行った。

－地域のニーズを反映した社会資本整備技術の開発－

個別研究課題目次

7.1.1 地域のニーズを反映した社会資本整備手法に関する研究（その１）…… （建設ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ技術研究室）…270

7.1.2 地域のニーズを反映した社会資本整備手法に関する研究（その２）…… （都 市 河 川 研 究 室）…272

7.2 地域特性を活かした地域計画及び施設設計の手法に関する研究…… （環 境 計 画 研 究 室）…276

7.3 河川に関する歴史・文化資源を活用した川づくりに関する調査…… （都 市 河 川 研 究 室）…278

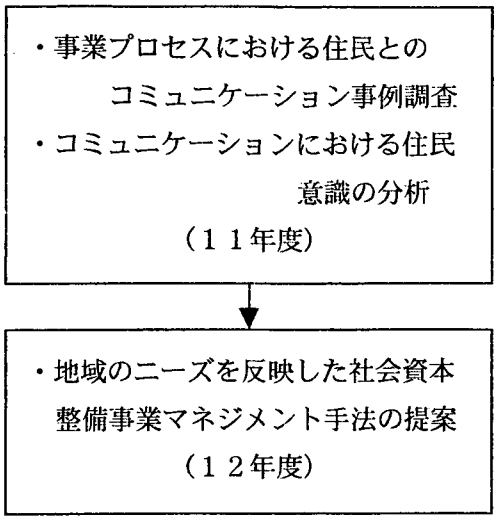
7.4 地域社会特性の分析による社会資本整備の評価に関する研究…… （建設ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ技術研究室）…282

7.1.1　地域のニーズを反映した社会資本整備手法に関する研究（その１）

研究期間：平１１―平１２
担当：建設マネジメント技術研究室

【要旨】H10年度までに行った社会資本整備に係る合意形成への取組状況に関する調査で、公共との関与の中で用いられる手法の中で対話型パブリックインボルブメント（ＰＩ）手法が、最も労力を必要とし、事業計画へ与える影響が大きいと考えられた。

本年度は、その事例を調査・分析することにより、地域住民が求めている情報提供のあり方、対話により得られた成果の事業への反映の予測、合意形成に要する資源を検証し、合意形成の円滑化に資する要因の把握を行った。



図―１　全体研究計画のフロー

１．研究方法

１．１．事業プロセスにおける住民とのコミュニケーション事例調査

直轄工事事務所２カ所（河川及び道路）並びに地方公共団体１カ所が行った対話型ＰＩ事例（計11事例）について、当該事例における議事録等を収集するとともに、可能なものについては実際に開催されている場面の観察を行った。

ここでいう対話型ＰＩとは、社会資本整備に関し、個人の利害や立場を越えて意見交換をすることを目的として設置された、公募や推薦による代表権を持たない参加者による会議である。

１．２．コミュニケーションにおける住民意識の分析

コミュニケーション事例調査において収集した対話議事録における逐語データを整理し、キーワードとコードを付与した。このコードをもとに検索を行い、実際の対話型ＰＩ場面における議長の議事進行、事業者の情報提供、参加者の発言から共通して見られる出来事や異なる結果に至る過程を分析した。

２．研究結果

対話型ＰＩ事例の議事録から抽出された会議時間の制約に関して特徴的な発言の例を表－１に、その分析時に付与したコードの例を表－２に示す。その中で得られた知見は、以下のようなものである。

- 参加プロセスでは、事業スケジュールの持つ期限、住民等参加者の時間的制約が強く意識される可能性がある。
- 上記の時間的制約への対応策が議論の進行に影響を及ぼしている可能性がある。
- ボランティア的参加行為の重みに対する認識が事業者と参加者で異なる場合、対立に至る誤解が発生するケースがある。

・事業者・行政・管理者の区別、国・県・市等の権限範囲、各省庁間の連携状況、組織内部の運営等に関わる説明は市民に伝わらない。また、この説明が困難であることにより発言時の立場が不明確であると取られている可能性がある。
・参加プロセスの成果への期待として会議で議論された結果がどのように活かされたかについての関心が高く見られる。

長期間にわたる対話では、議題に対する参加者の視点や姿勢が多様に変化することが見出された。複雑に変遷する論点を担当者が他者へ整理し伝える手段が重要であり、本研究手法を応用して、対話議事録の重要事項にコード付与し検索するシステムが有効であると考えられる。

表－１　対話型ＰＩ手法議事記録から抽出された会議時間の制約に関しての特徴的な発言の例

会議名	発言者	発言等	付与コード
AI-18	市民委員A	委員A『今まで行政の、特に○○とのいろいろな軋轢もあったのですが、その多くの原因は、大体が補正予算なんです。補正予算が突然来るのですが、恐らく今年も補正予算が出るだろうと、新聞等で言われています。それでまた、寝耳に水の話しになってきてしまうと同じ事の繰り返しに．．．』 事業者『そんな事もあって、早めにこういうことを考えていますと。』 委員A『そうすると補正予算も含めてこの中に入っていると』 事業者『補正予算でこれを一部着工する可能性もあると。』	「時間制約」「補正予算」「急な現実化」
AI-17	市民委員B	委員Cの長い発言の途中にて．．． 委員B『すいません、一人でずっと話を聞いているんですが、何分されるのですか、過去の経緯はわかりにくいんだけれど、お一人の演説を聞きに来たわけではないので是非どこかで整理していただきたいのですが』 委員C『この問題についてはもう少しで終わりますので』	「長話」「演説」「さえぎり」「新参者」「素朴な疑問」「時間の浪費」
AI-17	市民委員D	会議の運営方針の話題にて．． 事業者『先ほど提案のあったお話については、詳細を検討します。』 議長『その辺の内容は、今日は時間がありませんので、委員Dさんどうぞ』 委員D『時間は何時までですか』 議長『９時です』 委員D『．．．何時に終わるかわからないような雰囲気だったんです。このメンバーの物の考え方はどうなのかなと。延々と話が延びているわけです。これは怖いなと思いました。．．．時間通りに、今日もどうですか』 委員C『ちょうど今９時頃でないですか』 委員D『とても終わらないと思います。時間通りに終わるということはとても大事だと思います。．．．』 ： 議長『ではいろいろ意見がおありでしょうが、時間もきましたので終わらせていただきたいと思います。ありがとうございました。』	「会議時間」「長話」「議題数」「終了時刻」「参加者の減少」「委員間の牽制」

表－２　議事記録の分析時に付与したコードの例

「発言ルール」「行政ジャーゴン」「開催ペース」「時間不足→事務局へ丸投げ」「議論に利用可能な時間の限界」
「初期の会議は議論せず捨てるゆとりが必要」「名前先行・中身なし」「放置された話題」「柔軟性の要求」
「行政スケジュール」「物理的条件による公開困難性」「質問状の乱用」「代案無き批判」「論点を戻す力」・・・

（山下、栗原、臼田）

7.1.2　地域のニーズを反映した社会資本整備手法に関する研究（その２）

研究期間：平 11～平 12

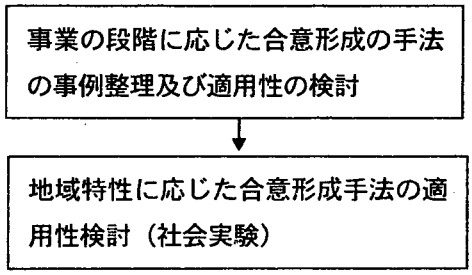
担当：都市河川研究室

【要旨】

地域特性に応じた効率的な社会基盤整備を進めていくためには、地域住民等のニーズを反映したり、異なる主体の意見を調整したりするための「合意形成」が適切に行われなければならない。そのためには、地域特性や事業特性に応じた合意形成手続きのあり方を明らかにする必要がある。11 年度は、合意形成手続きに用いられる事業の段階に応じた各種手法について整理し、国内外の先進的適用事例を調査することで、各種手法の適用性を検討した。

１．研究目的

平成９年の河川法改正に伴い、河川整備計画案の策定にあたっては、必要に応じて学識経験者から意見を聴いたり、公聴会の開催等により住民の意見を反映したりすることとなった。また、河川整備計画の決定に際しては予め地方公共団体の長の意見を聴かなければならないとされた。一方、近年の河川や環境に関する意識の高まりに伴い、住民等が河川に関して意見や要求を出す機会が増えてきている。今後の河川事業の計画策定、実施を円滑に実施するためには、住民等の意見を反映したり、異なる主体の意見を調整したりすること（合意形成）が必要となる。本研究では、地域の特性に応じた合意形成手法について検討する。



２．研究方法

11 年度は、国内外の合意形成マニュアル等を調査し、合意形成の各段階に於いて用いられる手法について整理するとともに、それらが用いられた先進的事例の調査を行い、河川事業等への適用性を検討した。

３．研究結果

本章では、一般的に事業が計画され実現に至るまでのプロセスを想定し、「構想段階」、「検討段階」、「決定段階」、「実施段階」の４段階に分け、それぞれの段階における作業内容と、必要となる合意形成手続き、留意すべきポイントを整理した結果を示す（**図-1参照**）。

(1)構想段階

【概要】

構想段階では、合意形成手続きをとる事業の概要や手続きの進め方についての構想を練る。合意形成手続きには、住民等の意思決定への関与の度合いから、①情報の公開・説明の充実、②住民・専門家の意見聴取、③住民・専門家の意思決定への参加、の３類型に分けられる。合意形成を実施する場合、先ず事業内容（計画期間：中長期計画か短期計画か、受益地：受益地は広いか狭いか、影響を及ぼす範囲等）、地域住民の特性（住民の成熟度、利害関係者等）を考慮して適切な合意形成手続きを決めなければならない。従来の日本の事業では、この合意形成手続きの検討段階にさほど労力がさかれて来なかったと考えられる。しかし、ここで綿密な手続き検討を行うことで、事業計画が進展した段階での手戻りを防ぐことが可能となるものと考えられる。そのための手法として、後述のポリシープロファイリング等の手法の導入が有効である。

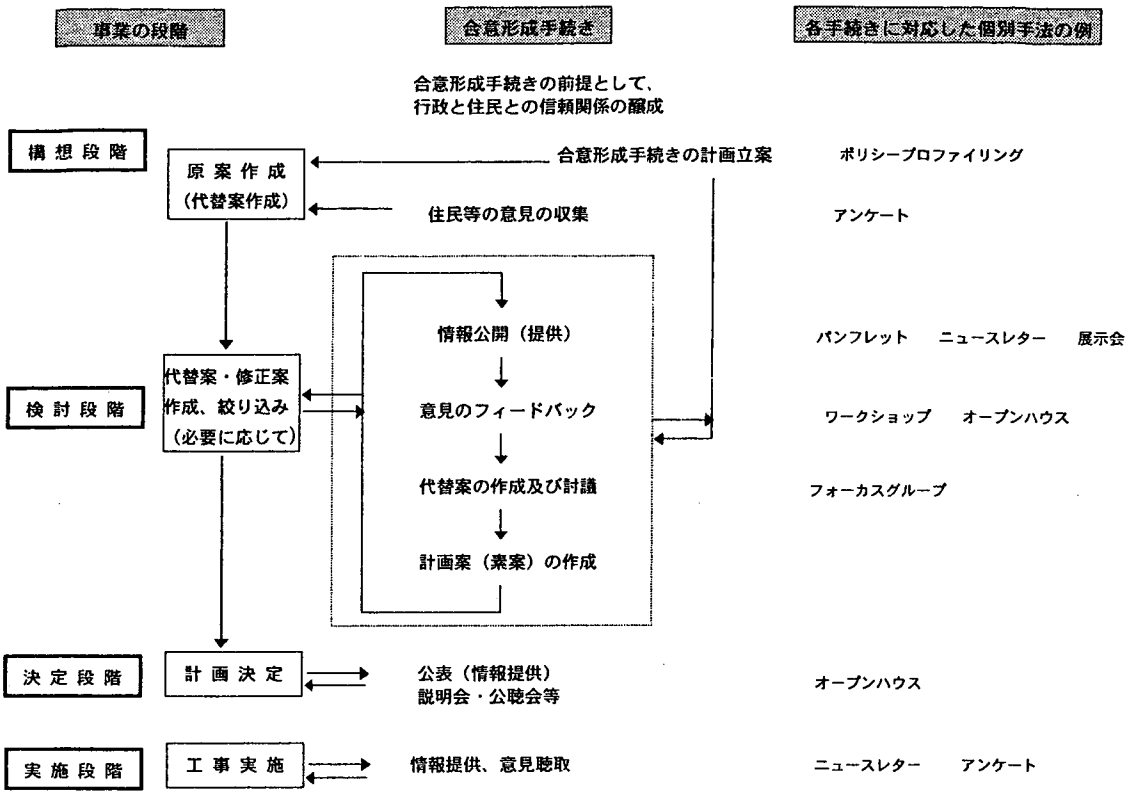


図-1　事業の段階に応じた合意形成の手順

また、この段階において、住民等の意見を参考にして事業原案（必要に応じ代替案）を作成する。

【ポイント】

- 大前提となるのは、住民の誤った認識や行政と住民とのミスマッチが生じないように、行政と住民との信頼関係を醸成しておくことである。
- 合意形成手続きについて、全体像を把握して方針を決定するとともに、行政関係者の意思統一を図る。これには十分な時間を割き、見切り発車しないことが重要である。
- 計画に利害関係を持つ組織や団体の利害・主張と関心のレベル、利害対立の構図をポリシープロファイリング（ステークホルダーアナリシス）等の手法により調査、把握し、手続きの進め方に反映する。
- 原案（代替案）の作成に当たっては、アンケート等により住民の要望を反映させる。

【適用可能な合意形成手法・内容・適用事例】

- 合意形成手続きの計画立案

手法名	手法の内容	適用事例
ポリシープロファイリング（ステークホルダーアナリシス／コンフリクトアセスメント）	計画・事業の内容が公表される前に、計画に利害関係を持つ組織や団体の利害・主張と関心のレベル、利害対立の構図を調査し、整理する	Northern Oxford County Coalition(NOCC)

- 住民等の意見の収集

アンケート	計画の立案時や代替案の絞り込み等の段階で実施し、住民の意見を把握する。	市道恩田・元石川線(横浜市) 東京外郭環状道路(千葉県区間)

(2)検討段階

構想段階で検討した合意形成手続きにのっとり、住民への情報提供、意見聴取を行いながら検討を行い、代替案を絞り込む段階である。この段階でできる限り住民等の意見を反映し、事業計画を実質的に決定する。計画の決定段階（法的手続き）になってからの手戻りをさけるためにも、ここで合意を形成しておくことが大切である。

この段階の合意形成は、概ね、情報公開（提供）、意見のフィードバック、代替案の作成及び討議、計画案（素案）の作成といった手順をとる。

【ポイント】

- 合意形成手続きの進め方は、住民等からの反応に応じて適宜変更することが望ましい。
- 計画決定の法的手続きを開始すると計画の再検討が難しくなるため、この段階で主な関係者間の合意が形成されるのが望ましい。

【適用可能な合意形成手法・内容・適用事例】

- 情報公開（提供）

手法名	手法の内容	適用事例
ニュースレター	タブロイド判程度のサイズの資料を作成し、新聞折込みなどで広く一般に配布することで、計画や事業に対する関心を高め、理解を広める。	適用事例多数
メディア戦略	新聞、ラジオ、テレビは広範囲の一般市民に情報を伝達するための重要な媒体であることから、これらを活用し、積極的に記者に情報を提供することで、記事・番組としてとりあげてもらい、計画や事業の内容を一般市民に伝える。	Ride-finders Network(自動車の相乗り奨励プログラム)
現地見学会	一般市民や行政機関関係者、コンサルタント等が計画の予定地を視察することで、現場の様子や環境への影響などを直接見ることができる。	市道恩田・元石川線(横浜市)

- 意見のフィードバック

ワークショップ	特定の議題のために組織された会合で、20～40人程度の比較的小さなグループで行われる。より大きな規模の会合の一部として行われる場合もある。	丸池復活プランづくり(三鷹市) 市道恩田・元石川線(横浜市)
オープンハウス	図書館や学校などにパネルや自動スライドを設置して、行政機関が住民に情報を提供する。住民は自由に立ち寄り、関心のあるトピックスを見たり、行政担当者に質問したりできる。声の小さな住民の意見を聞け、住民の意見や関心を組織的に収集できる利点がある。	Southtown connector/Buffalo Outer harbor MIS(高速道の総合計画) Big Dig/central Artery(高速道の地下化)

- 代替案の作成及び協議

フォーカスグループ	計画に関連する特定のテーマについて、5～12人を集めて行われる意見聴取や討議。事業や計画に対する反応を予想したり、方針を引き出したりすることができる。	川辺川ダム事業審議委員会
委員会	様々な関心、意見、専門分野を代表する比較的少人数で構成され、提案されている活動や特定の提案について議論し、それをもとに行政機関にアドバイスを行う。技術的な委員会と、住民に関する委員会に大きく分類できる。	荒川市民会議(荒川) 流域懇談会(多摩川)

(3)決定段階

計画の認可・決定を得る段階で、法的に計画決定がなされる段階である。法的手続きにあたっては、アカウンタビリティの確保が重要となる。

【ポイント】

- 検討段階で概ね合意がとられていれば、従来通りの法的手続きを行えばよい。
- 説明会、公聴会等は、オープンハウス等の合意形成手法と組み合わせて実施することで効率的な情報提供が可能となる。

【適用可能な合意形成手法・内容・適用事例】

オープンハウス、メディア戦略等

(4)実施段階

決定された計画に基づいた事業を執行する段階である。この段階では、計画そのものが変更されることはないが、事業実施計画（施工スケジュール等）や詳細設計についての変更はあり得る。

【ポイント】

- 用地取得、事業地周辺住民への対応におけるコミュニケーション、交渉について留意する必要がある。

【合意形成手法】

ニュースレター、アンケート、メディア戦略等

4．主な研究成果物

- 末次，都市・人、そして川（5），－新たな潮流「合意形成」「受益と負担」－，雨水技術資料，第 33 号，pp.47–53，1999.7
- 末次，河川事業における合意形成，平成 11 年河川講習会，建設コンサルタンツ協会，1999.9.10
- 都市河川研究室，住民参加の川づくり，九州地建における一日土研資料，土研資料，第 3673 号，1999.10

（末次、舘）

7.2　地域特性を活かした地域計画及び施設設計の手法に関する研究

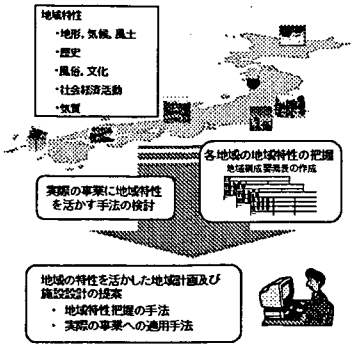
研究期間：平９～平１３

担当：環境計画研究室

【要旨】

魅力ある地域づくりをすすめる上で、地域の個性をどのように活かしていくかが重要な課題となっている。今後、地域らしさを踏まえた質の高い社会資本整備を図っていくためには、それぞれの地域の特性を抽出評価し、それを総合的に社会資本整備に活かしていくための手法を確立する必要がある。

11年度は、「精選　手づくり郷土賞」より、特に地域特性を活かした事例として103事例を取り上げ各市町村にアンケート調査を行い、各事例の計画、デザイン化における地域特性活用のポイントについて整理を行った。



研究イメージ図

１．研究目的

これまでも地域らしさを演出する社会基盤整備が行われているが、短絡的なものであったり、過剰演出となっていたり、必ずしもその地域にとってふさわしいものが整備されてきたとはいえない状況にある。そこで本研究では、地域特性を活かしたまちづくりについての整理及び、各事例の計画やデザインのプロセスについての調査により、現状におけるまちづくりの問題点を明らかにすることを目的とする。

２．研究方法

２．１　地域特性を活かしたまちづくり事例の整理

地域特性を活かしたまちづくり事例の資料として「手づくり郷土賞Part1～14」（監修：建設省建設経済局）を取りあげ、各事例について地域特性活用の視点から再分類を行った。「手づくり郷土賞」の選定基準は、①社会資本の設計、整備または維持管理について、地域の自然的、社会的条件を踏まえ、創意・工夫が行われているもの。②その社会資本が地域の住民に親しまれ、積極的に活用されるなど、地域の魅力を創出し、またはシンボルとなっているもの。③長大橋その他の国または国の機関等の整備に係る大規模な社会資本でないものとなっているが、本研究の目的と照らし合わせ、新たに地域のシンボルとして造ったもの（日本一の～等）、地域の特性を活かしておらず他地域でも全く同じものが造れるもの等、地域特性活用の概念からはずれるものを除いた325事例について基礎的な資料とした。

２．２　地域特性を活かしたまちづくり事例に対するアンケート調査

これらの事例のうち、各事例の紹介文から計画づくりやデザイン化に際して、市民や関連団体などのかかわりが読みとれる事例、委員会や協議会が行われたと読みとれる事例の計103事例について計画づくりやデザイン化のプロセス、事業への評価に関するアンケート調査を行った。また一部の事例について、市町村に対してまちづくりの経緯と地域特性活用のポイント、地域における評価等についてのヒアリングを実施した。

３．研究結果

３．１　地域特性を活かしたまちづくり事例の整理

325事例について事例の内容を検討し、次の3分類に整理を行った。整理結果を表1に示す。

① 地域の自然・歴史・文化のイメージを活かした事例

地域の自然・歴史・文化のイメージをコンセプトまたはデザイン化した整備を行っている事例。「～風の」「～を模した」「～

表１　事例分類表

をモチーフとした」「～にもとづき」整備が行われている。

② 地域の自然や地場の産品を活かした事例

貴重な自然や地域固有の自然そのもの活用している事例、または自然加工品（木材，石等）や地場産品（陶器，金属，瓦等）を施設の一部または全体に活用している事例。

分類項目	ジャンル ＼ 対象	町並み 遊歩道 河川沿道	公園 広場	橋梁	土木構造物（橋梁以外）	建造物	その他	計
地域の自然・歴史・文化のイメージを活かした事例	地域のイメージをコンセプトとした整備	33 (10%)	38 (12%)	4 (1%)	2 (1%)	12 (4%)	0 (0%)	89 (27%)
	地域のイメージを施設デザインに取り入れた整備	31 (10%)	19 (6%)	19 (6%)	1 (0%)	1 (0%)	4 (1%)	75 (23%)
	地域のイメージを施設に絵・碑として取り入れた整備	10 (3%)	10 (3%)	4 (1%)	1 (0%)	0 (0%)	3 (1%)	28 (23%)
地域の自然や地場の産品を活かした事例	地域の自然そのものを活かした整備	3 (1%)	2 (1%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	5 (2%)
	地域の産品を活かした整備	15 (5%)	17 (5%)	6 (2%)	0 (0%)	6 (2%)	1 (0%)	45 (14%)
地域に現存する歴史的・文化的な施設を保存・活用した事例		20 (6%)	14 (4%)	14 (4%)	18 (6%)	14 (4%)	1 (0%)	81 (25%)
その他		1 (0%)	0 (0%)	1 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	2 (0%)
計		113 (35%)	100 (31%)	48 (15%)	22 (7%)	33 (10%)	9 (3%)	325 (100%)

③ 地域に現存する歴史的・文化的な施設を保存・活用した事例

現存する施設の保存・修復、ライトアップや周辺整備を含めた施設の活用、及び過去に存在した施設の復元を行っている事例。

整理の結果、町並み、遊歩道、河川沿道や公園、広場については地域のイメージをコンセプトまたはデザイン化した事例が多い傾向がみられた。これらの対象は空間的な広がりをもっており地域特性の活用が比較的容易であったためだと考えられる。また、歴史的・文化的な施設の活用例がすべての対象について比較的多くみられ、地域に埋もれた施設の再認識などが地域特性の活用につながる可能性も考えられる。

3．2　アンケート調査結果

アンケート調査の対象とした103事例のうち73事例からの回答を得た。調査結果を図1、2に示す。

計画づくりやデザイン化への参加者や形態については、地区住民や関係者への説明を行い、意見を反映させた事例、学識者や関連団体を中心とした委員会形式ですすめる事例が多い。一方でコンサルタントなどの専門機関への委託を行った事例が約半数にのぼっており、それらの専門機関のノウハウや技術レベルが与える影響が大きいと考えられる。

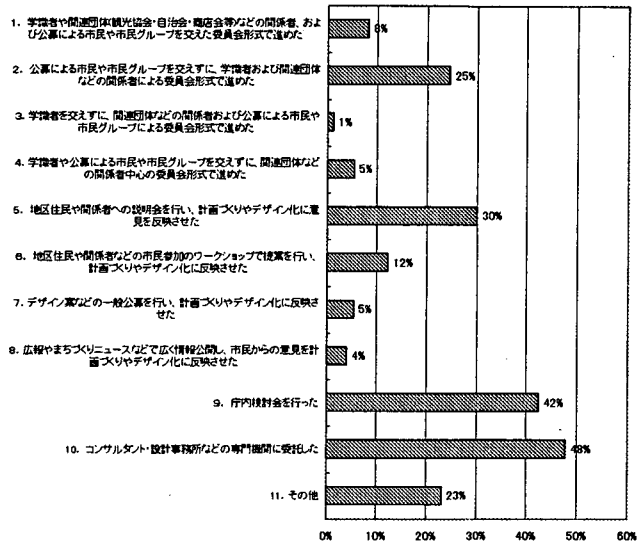


図1　計画づくりやデザイン化への参加の形態

計画づくりやデザイン化のとりまとめにあたっては、景観ガイドラインや景観形成基本計画などを参考としていない事例が多く(52%)、地域らしさの演出が、基本的なデザイン技法を無視した短絡的なものや過剰演出となる要因の一つとなっていると考えられる。

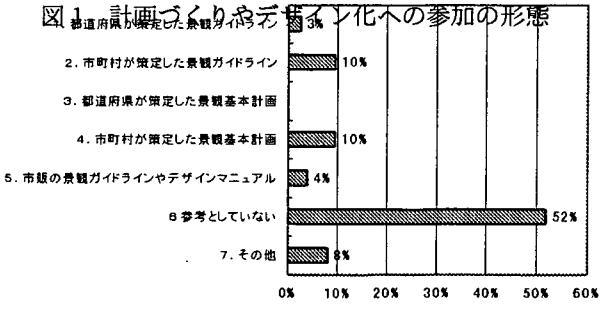


図2　参考とした景観ガイドライン等

また、事例整理であげた 3 分類からそれぞれ 1～3 事例をピックアップして行ったヒアリングの結果、これらの事例においては計画以前から地域住民主体のまちづくり組織が存在するか、あるいは計画づくりの際にまちづくり組織が立ち上がっており、計画づくりやデザイン化に積極的に携わっている。そして、それらの組織や地域住民を交えた検討会などが中心となり、何を地域特性として活用するかについての発想がもたらされ、そのデザイン化は主にコンサルタントなどの専門機関によりなされている。今後はこれらの専門機関の地域特性活用のノウハウやデザイン化技術についての調査を行い、それらを手法として体系化する方策について検討を行う。　（安田、並河、長野、舟橋）

7.3　河川に関する歴史・文化資源を活用した川づくりに関する調査

研究期間：平 11～平 13

担当：都市河川研究室

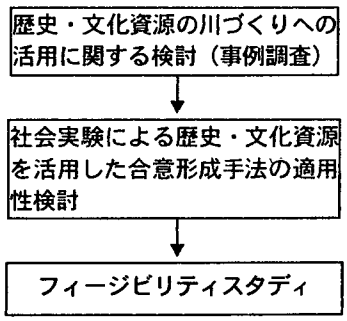
【要旨】

本研究においては、河川を中心とする地域の歴史・文化資源等の発掘、評価を行うとともに、それらに配慮した住民の合意形成手法に関する検討を行うものである。11 年度は、河川に関わる地域の歴史・文化資源を積極的に活用した河川事業の事例を収集・分析することで、地域に密着した川づくり、住民参加の川づくりの素材として歴史・文化資源を活用するための手法を検討した。まず、歴史・文化資源を有する河川を２０事例収集し、川づくりの特徴と取り組み過程を整理した。それをもとに、それらの資源を地域に密着した川づくりに活用する手法についてまとめた。

１．研究目的

歴史・文化・地形などの地域特性は、その地域が長い歳月をかけて作り上げてきた地域独自のものであり、地域らしさを活かした川づくりを行ううえで有効なツールとなりうる。一方、平成9年度に改正された新河川法において、河川管理者は具体的な河川整備の計画である「河川整備計画」案の策定の段階で、必要に応じて地域住民の意見を取り入れるよう明文化され、今後、合意形成手法を確立していく必要がある。

本研究においては、河川を中心とする地域の歴史・文化資源等の発掘、評価を行うとともに、それらに配慮した住民の合意形成手法に関する検討を行うものである。



２．研究方法

歴史・文化資源を有する河川を２０事例収集し、川づくりの特徴と取り組み過程を整理した。それをもとに、それらの資源を地域に密着した川づくりに活用する手法をまとめた。

３．研究結果

３．１　歴史・文化資源に配慮した川づくりの事例収集・整理

川を中心とした街並、構造物（橋、治水施設等）、河川を利用した慣習や行事等の歴史・文化資源を有する河川２０事例を選択し、住民参加型の川づくりへの活用に関する面を中心に、その概要をまとめた。調査内容は、河川及び歴史・文化資源の概要、水辺での楽しみの型、治水整備との調整事項、川づくりにおける住民参加の経緯等である。調査対象河川は、表-1に示すとおりである。

３．２　地域に密着した河川事業における歴史・文化資源の活用手法の検討

２０事例の分析から、歴史・文化資源の活用による住民参加の川づくりにおける特徴を整理した結果、人と川、地域との結びつきが強まる過程に共通点が見られる。したがって、歴史・文化資源の川づくりへの活用のためには、住民参加の川づくりが始まった取り組みの段階に応じた、行政側の支援手法の検討を行う必要がある。以下に、川づくりに取り組みの段階を追って、その特徴を類型に分けて整理した。

(1) 川づくりのきっかけ

歴史・文化資源を活用した川づくりの代表事例からは、地域住民が川づくりに参加するきっかけにいくつかのタイプが見られ、その河川を取り巻く状況と密接に関連している。このようなきっかけは、その後の川づくり活動の展開に影響を与えていると考えられる。

表-1　調査事例一覧

	調査対象	所在地	類型	備考（住民参加等）
1	小樽運河	北海道小樽市	慣習、街並	歴史的な運河埋立に対する反対運動により保全・整備を決定。散策路等を整備。
2	横手川	秋田県横手市	街並	改修計画において並木保全の声があがり、これを受けて「ふるさとの川モデル事業」では護岸形状の工夫で保全が図られる。
3	北上川分流施設	岩手県豊里町他	構造物	歴史公園としての整備に向けた保全構想策定で、住民を含む委員会を組織。
4	中津川	岩手県盛岡市	街並	特殊堤設置工事に対し、既存の石積み護岸を保存する市民運動が起こり、計画見直し。市民団体の多彩な活動が行われている。
5	荒川水防林、霞堤	福島県福島市	治水施設、慣習	「ふるさとの川整備事業」の策定に当たって、沿川住民をメンバーに含む委員会が組織され、市民による川づくり協議会が様々な活動。
6	前川	茨城県潮来町	街並	かつての水郷風景を取り戻すための住民主体の運動が行われている。
7	小野川	千葉県佐原市	街並、河岸	住民主体の街並み保存運動。
8	赤羽岩淵水門	東京都北区	構造物	流域団体ネットワークなどの多くの活動（「荒川市民会議」等）
9	富岩運河	富山県富山市	構造物	
10	源兵衛川	静岡県三島市	慣習	市民団体による水環境の保全活動（グラウンドワーク）
11	船頭平閘門	愛知県立田村	構造物	
12	八幡堀	滋賀県近江八幡市	街並	堀の埋立計画に対する保存運動から、保存・修景を核としたまちづくり運動へ。
13	新町川	徳島県徳島市	慣習、街並	行政、地元商店街、住民一対となった川づくりの取り組み
14	千代川	鳥取県用瀬町	慣習	千代川を軸とした地域連携のための流域圏会議結成。
15	津和野川	島根県津和野町	街並、慣習	「ふるさとの川モデル事業」指定による整備への住民意見の反映。
16	藍場川	山口県萩市	慣習、街並	市民の自主的活動から発展、愛護団体による清掃、鯉の放流等が行われている。
17	柳川	福岡県柳川市	街並	堀割の埋め立て案を契機に住民懇談会が開かれ、官民一体の保全運動を開始。
18	中島川	長崎県長崎市	構造物	川と石橋の保全のための団体が活動、水害を契機に眼鏡橋の保存・修復運動へ。
19	裏川	熊本県玉名市	街並	住民の清掃管理、イベント、整備構想検討への参加。
20	甲突川	鹿児島県鹿児島市	構造物	水害後の橋梁撤去への反対運動（訴訟）。

(A)改変・危機型

地域の歴史・文化資源が無くなってしまう、異質なものへと変わってしまうという危機感から保存・保全に向けての取り組みが始まり、川づくりが始まるタイプで、物的資源（歴史的価値の高い橋梁や水門等）、環境的資源（運河、水路等の密着した水空間や景観の喪失）に分けられる。改修事業等が契機となり、反対運動となることもある。　例)18.中島川の眼鏡橋保存、17.柳川の堀割埋め立て

(B)改善・復興型

旧来から地域の人々の暮らしと密接に結びついていた水辺の環境の悪化や、そのことによる地域の魅力の低下に対して、状況を改善しようという取り組みから住民参加の川づくりが始まるタイプ。一部の意識の高い住民や、商業に関わる住民等がリーダーとなって清掃活動等の取り組みから始まることが多い。

例)10.源兵衛川の水辺環境の悪化、13.新町川の水質汚染や周辺の商業衰退

(C)チャンス型

元来良好な水辺資源を持っている地域において、整備事業や改修事業（計画）を契機にして、より良い環境をつくろうということから、住民参加の川づくりの取り組みが始まるタイプ。旧来から水辺への意識が高い地域では、川づくりへの住民の参加が比較的スムーズである。　例)5.荒川の「ふるさとの川整備事業」指定

(2) 住民参加の川づくりにおける取り組みの段階に応じた類型

ここでは、川づくりの取り組みを４段階に分けて分析を行った。

Ⅰ．始動期における活動（川づくりの活動の輪を広げる段階）

(1) 住民主導の活動（組織化、意識展開）

・ 核となる団体・組織の設立（愛護団体の結成、計画に対する反対運動）

どちらかといえば(B)改善・復興型や(C)チャンス型に見られるような、愛護団体結成や、(A)改変・危機型に見られるような反対運動の為の組織づくりがある。　例)7.小野川の「町並みを考える会」、4.中津川の石積み護岸保全運動

・ 試行的・実験的取り組み

会報の発行、鯉の放流など、試行的・実験的取り組みから活動が芽生えるタイプ。 例)1.小樽運河保全に関する住民案の公募、16.藍場川の鯉の放流

・ 美化運動など

地域の人々にとって分かりやすい取り組みから始まるタイプ。 例)12.八幡堀での自主的な清掃活動

(2) 行政側が準備した組織等への参加活動

行政側が準備した組織や仕組み等への参加を通して活動が芽生えるタイプである。河川整備に関する委員会等の設立、シンポジウム等の開催、イベントの開催、住民意識を高める活動の行政による支援などの事例が多い。 例)5.荒川での「ふるさとの川モデル事業委員会」への住民代表参画

Ⅱ. もの（計画）づくりへの参画（河川の整備や計画等に参加する段階）

(1) 住民参加による計画づくり・ものづくり

さまざまなレベルの住民参加により、計画づくりに参加するタイプ。 例)10.源平衛川の親水公園施行に住民参加

(2) 住民案の提示

公表された構想や計画案と住民が求めるものとの調整が着かない場合など、住民自らが手を動かして案を作る。住民にとっては、計画づくりのノウハウが得られ、問題意識が明確となるメリットがある。

例)1.小樽運河埋め立ての行政案に対しての住民案の提示

(3) 住民によるものづくりの実践

行政との関わり・調整に歩調を合わせるのでなく、個人や組織として先導的に実施するタイプ。 例)6.前川の個人によるアヤメ園の整備、13.新町川の地元商店街によるボードウォーク設置

Ⅲ. 維持・管理への参画（河川整備等の後の、清掃等の維持管理活動の段階）

歴史・文化資源が地域に根付いている場合は、住民参加による継続的な維持・管理が行われている。、例)4.中津川の清掃活動

Ⅳ. 活動の継続と展開（イベントの継続的運営等、新たな活動への展開の段階）

一時の川づくり活動の盛り上がりだけではなく、地域に根付いた魅力ある川となっている事例では、イベントや広報活動等の継続的活動が見られる。また、一連の川づくりの取り組みの成果が、他の河川やまちづくり全体に波及する例も見られる。

(1) イベント・祭り等の開催

川づくりの各段階における住民の参画の成果として、地域への愛情や誇りが高まりを見せたことにより発生する取り組みの展開である。 例)14.千代川における「千代川フェスティバル」開催

(2) 継続的な川づくり活動

従来からの取り組みの継続。活動を通じた地域への愛情や誇りの高まりが背景と考えられる。 例)1.小樽運河の伝統的建築物の保存活用に向けての協力

(3) 広報活動

会報の発行、名称公募などの取り組み。住民自らの活動に評価を与えることで、活性化のもととなっているものと考えられる。 例)17.柳川における市民活動の記録映画の作成

(4) 周辺のまちづくりへの波及

住民参加の整備事業が、民間事業者などに起業意識を生じさせ、地域の観光資源となって地域経済を活性化させたり、地元自治体による何らかの関連整備事業を生じさせたりしている場合も多い。 例)12.

八幡堀の近隣住民により景観形成協定締結、13.新町川でのパラソルショップ経営

3．3　地域密着型の川づくりにおける歴史・文化資源の活用手法

上記の４段階に区分した住民主体の取り組みにみられる特徴から、住民が歴史・文化資産の良さに気づき、活動を通してその認識を深め、活動を発展させていくという流れを作り出すことが、川づくりの成功の秘訣と考えられる。歴史・文化資源の活用にあたっての基本的な原則として、以下のようなものがあげられる。

・ 歴史・文化資源を、施設のみではなく、その周辺の空間、人々の暮らしや利用も含めて保全・活用する。
・ 歴史・文化資源を手がかりとする川づくりのためには、地域住民の誇りや愛着を育て、やる気を生み出すきっかけづくりに注力する。
・ 様々な局面における情報公開と対話（行政と住民の意思の疎通）を行う。

また、このような原則を踏まえつつ、歴史・文化資源をもとにした住民参加の川づくりを行うため、河川管理者や自治体等が用いるべき手法を以下に整理した。

活動段階のうち、まず、Ⅰ．始動期における活動では、「始動期の素地づくり」が必要である。そのための具体的手法としては次のようなものがあげられるであろう。

・ 地域の歴史・文化資源への認知度を高める（ＰＲ、タウントレイルなどの実施、イベント等の開催等）　例)5.
・ 歴史・文化資源のおかれている状況についての理解を得る（情報提供、シンポジウム、市民懇談会等)。
・ 川づくりに対する住民の参加意識を高める（検討委員会などへの住民の組み込み、イベント)。
・ 住民の自主的な川づくり活動の実践を促す（他地域の団体の活動紹介、イベントの自主運営の支援)。

Ⅱ．もの（計画）づくりへの参画では、「計画づくり・ものづくり段階での民意の反映、行政との共働」が必要である。そのための手法としては、次のものが考えられる。

・ 計画づくりに関する住民参加の機会を提供する（ワークショップ、フィールドワーク等)。
・ 住民の意見を吸い上げる機会を作る（積極的な情報提供、効果的な意向調査、住民窓口の設置等)
・ 住民の自主的な取り組みを支援する（協力体制の構築、用地や費用援助による側方支援、計画の見直しも含めた計画の再考)。

Ⅲ．維持・管理への参画では、「維持・管理段階での住民の参画を促すこと」が必要である。そのためには次のような手法が考えられる。

・ 情報提供（住民による河川管理活動に関する他地域の情報、活用できる基金や制度について)
・ 維持・管理に必要な物的支援を行う（掃除用具等、ＰＲ等にかかる費用の支援等)。
・ 職員の積極的参加（掃除等へ一市民として参加、専門知識・ノウハウの提供、他団体との交流の仲介等)

Ⅳ．活動の継続と展開では、「周辺やまちづくり全体への波及効果を生む手法」が必要である。そのためには以下のような手法が有効である。

・ 住民参加の取り組みを川づくりの次の段階へとつなげる（住民の活動を計画に組み込む、維持・管理も含めた体制づくり、良好な関係構築)。
・ 川づくりに関する愛着や誇りを育て、活動の良い循環をつくる（自主的活動の支援、交流促進)。
・ 地域の他の水辺やまちづくり全体へと飛び火的に展開する（周辺整備への展開)。
・ 再発見された歴史・文化資源を核にイメージを展開する（総合的イメージづくり)。
・ 地域の伝統的な水辺の楽しみ方を現代的に解釈し、新たに創造・展開する（イベント等による発信)。

4．主な研究成果物

・ 都市河川研究室，都市と河川に関する研究レポート（1），土研資料，第3689号，2000.3

（末次、舘）

7.4　地域社会特性の分析による社会資本整備の評価に関する研究

研究期間：平11～平13
担当：建設マネジメント技術研究室

【要旨】
今日の社会資本整備では住民ニーズとの整合性が求められているため、国民の実感に沿った社会資本整備の評価を実施する必要がある。平成11年度は海外文献を含む文献調査を行い、既存関連研究の収集及び研究動向、研究レベルを把握した。また、地域特性構成要素を分析したのち、モデル地域を設定し、社会資本整備の効果を的確に把握するために地域特性評価モデルの開発準備を行った。さらに、モデル地域において社会資本整備に対する住民意識調査を行い、住民ニーズの特性把握を行った。

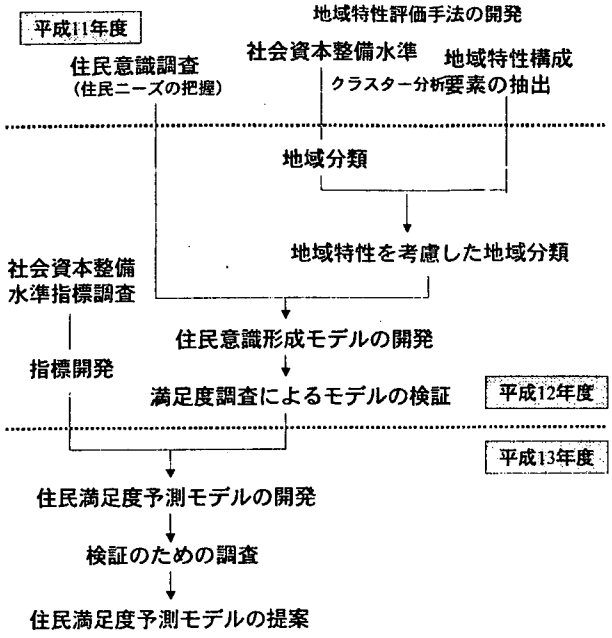


図-1　全体研究計画のフロー

1．研究目的

社会資本整備の質的向上を図るには、国民の実感に沿った評価を実施する必要がある。本研究は社会資本整備に対する住民満足度評価手法の開発を目指す。

平成11年度は地域の社会経済特性の調査を行い、それに基づいて地域の類型化を行う。また、社会資本整備に対する住民ニーズのアンケート調査を行い、住民ニーズの特性把握を行うことを目的とする。

2．研究方法

2．1　研究手順

研究手順を図-2 に示す。まず、心理学理論を用いて社会資本整備における欲求構造を整理し、それらを表現する指標を選定する。整理した指標に基づいてアンケート調査票を設計する。一方で、社会資本整備に対するニーズは地域毎に異なると思われることから、地域特性構成要因に基づいて市町村を類型化する。各類型から 11 調査対象地を抽出し、社会資本整備に対するニーズについてアンケート調査を行う。その結果にコンジョイント分析を適用し、地域の欲求構造を明らかにする。

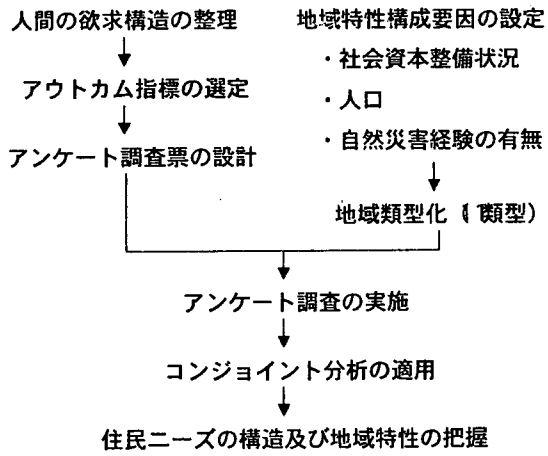


図-2　研究手順

2．2　住民ニーズの欲求構造の評価指標

Maslow の欲求の階層説に基づき、社会資本整備に対する住民ニーズを「安全」、「安心」、「利便」、「快適」の４段階に分類した。「安全」は生存の確保の欲求と言える。「安心」は生存における安心の追求を意味する。「利便」は物質的充足による満足感を、「快適」は精神的な満足感と定義した。社会資本整備評価に適合しうると考えられる指標を列挙した後、KJ 法によりそれらを整理し、上記の４段階との整合を図った。

2．3　コンジョイント分析

コンジョイント分析におけるプロファイルの属性はアウトカム指標の体系の中から KJ 法により決定した。また、質問形式は選択型コンジョイントとした。各質問は４属性で構成され、各属性は２水準で構成されている。２水準としたのはニーズの有無の把握を中心としたためである。アンケート調査では４属性２水準で構成される１つの質問に対して３つの整備案を提示し、その中から希望案を尋ねた。

表-1　調査票配布地域

配布町村名		有効回答数	回収率
衛生未達成都市群	静岡県 西伊豆町	365	24.3%
	和歌山県 田辺市	385	25.7%
施設特化型都市群	山口県 東和町	374	24.9%
都市面積ゆとり都市群	福島県 大越町	391	26.1%
	北海道 網走市	375	25.0%
スタンダード都市群	岐阜県 富加町	478	31.9%
	高知県 中村市	434	28.9%
	宮城県 仙台市	401	26.7%
スタンダード都市群（被災地）	静岡県 河津町	437	29.1%
	兵庫県 芦屋市	379	25.3%
	鹿児島県 鹿児島市	339	22.6%
合　計／平　均		4,358	26.4%

3．研究結果

3．1　アンケート結果の概要

住民基本台帳からランダムサンプリングを行い、一地域当たり 1500 枚の調査票を郵送で配布した。配布地域を表-1 に示す。有効回答平均回収率は 26.4%であった。回答者の年齢構成は地域の年齢構成比率と比較して、各地域ともに 20 代が若干少なく、50 代以上が若干多かったが、国勢調査の年齢構成比と比較して顕著な差はみられなかったため、調査結果は地域の平均的意識と考えられよう。

3．2　社会資本整備に対する住民ニーズの特性

コンジョイント分析の適用結果を表-2 に示す。表中の評価値は住民意識における各欲求段階の重要度である。この結果から、地域特性の異なる各都市においても「生活の安心」を生み出す社会資本の整備に住民の最大の関心が払われていることが分かる。また、この結果は、地域格格差が著しいと言われることのあるわが国において、住民の意識レベルでは社会資本整備に対する満足度の地域差は小さいことを示している。Maslow の欲求階層説に従えば、今回の調査地域は同じ欲求段階にあり、政令指定都市と地方の町でも具体的施策は別としても望まれる整備の方向性に大きな違いはないと考えられる。

表-2　コンジョイント分析の結果

都市別	評価値			
	安全	安心	利便	快適
静岡県 西伊豆町	24.67	26.19	25.10	24.04
和歌山県 田辺市	25.46	26.36	24.90	23.27
山口県 東和町	24.75	26.37	25.30	23.59
福島県 大越町	24.86	27.16	25.51	22.47
北海道 網走市	25.06	33.67	24.24	17.03
岐阜県 富加町	24.91	27.44	25.13	22.52
高知県 中村市	25.49	25.85	24.80	23.85
宮城県 仙台市	24.85	26.44	24.66	24.05
静岡県 河津町	24.82	26.86	25.22	23.10
兵庫県 芦屋市	25.39	27.02	23.87	23.72
鹿児島県 鹿児島市	25.98	26.94	24.06	23.01

3．3　まとめと今後の課題

今回の調査では、社会資本整備に対する住民ニーズに対してマクロ的観点からその構造及び特性把握を行った。その結果、安心の段階にニーズの中心があることが分かった。今後はより詳細な住民ニーズの把握のために、安心の段階に焦点を絞った調査が必要である。また、今回は調査対象外であった東京の住民ニーズの特性も調査する必要があろう。

4．主な研究成果物

・日本都市計画学会論文集投稿予定

（山下、栗原、臼田、青木）

都市空間におけるヒートアイランド現象の軽減に関する研究

8．都市空間におけるヒートアイランド現象の軽減に関する研究

研究期間：平成 10～14 年度
プロジェクトリーダー：河川管理総括研究官
益倉　克成

1. 研究の背景：

近年、都市の気温が郊外より高くなるヒートアイランド現象が顕在化している。このヒートアイランド現象は、真夏の熱帯夜の増加にみられるように、都市住民の生活環境を劣化させるとともに、冷房などのエネルギー消費の増加により地球温暖化にも影響を与えている。

ヒートアイランド現象の原因として、人工排熱の増加やコンクリート・アスファルト化の進行、熱調整機能を有する水辺や緑地などの減少等が挙げられているが、その原因と対策の中には、建設省が所管する事業に関連するものが多く、事業実施上での工夫や技術開発により、都市のヒートアイランド現象を軽減できる可能性を有している。

都市活動の基礎となる生活環境を保全したり改善することは、今後の都市の維持や発展に必要である。また、ヒートアイランド現象の軽減により化石燃料の消費抑制とともにＣＯ2 の排出量の削減にも寄与することができる。

2. 研究の目的：

本研究では、都市域のおけるヒートアイランド現象を軽減するため、気候緩和施策の効果を総合的に検討する都市熱環境評価手法を提案し、緑被、水域、保水性舗装等の気温緩和効果の定量的な評価を行う。また、未利用エネルギーの活用技術の検討・評価を行う。最終的には、各種対策の効果と費用の検討を行い、気温を 1℃から 3℃程度低下させる具体的な施策を提言する。

3. これまでの研究成果：

平成 10 年度は、ヒートアイランド現象に関する既往の文献を調査し、実態調査、シミュレーションモデル、現象の形成原因、都市温暖化の影響、ヒートアイランド対策の別に分類・整理した。都市河川や緑地の気候緩和効果に対しては、これまでの調査事例の再整理を行った。また、都市域の複雑な土地利用の影響を表現するシミュレーションモデルを整備し、事前評価としてモデルの妥当性を確認した。また、東京都 23 区を対象に人工排熱の時空間分布を推定し、建物排熱、自動車交通排熱の占める割合が高いことを示すとともに、水熱エネルギー利用の地域冷暖房システムを導入した場合の省エネ、排熱・排ガス削減の効果を算定した。さらには、路面発電システム REGS の性能について基本的な確認実験を行った。

－都市空間におけるヒートアイランド現象の軽減に関する研究－

個別研究課題目次

8.1　都市気候の動植物への影響に関する調査……（緑化生態研究室）…290

8.2　都市気候の数値シミュレーションに関する研究……（都市河川研究室）…294

8.3　都市気候緩和と地下水涵養に効果的な環境共生型舗装に関する研究……（都市河川研究室）…296

8.4　社会基盤等を活用した省エネ及び都市の気候緩和に関する研究（1）……（化学研究室）…298

8.5　社会基盤等を活用した省エネ及び都市の気候緩和に関する研究（2）……（都市河川研究室）…300

8.6　都市内緑地による温室効果ガス削減に関する調査……（緑化生態研究室）…304

8.1　都市気候の動植物への影響に関する調査

研究期間：平11～平14

担当：緑化生態研究室

【要旨】ヒートアイランドは、エネルギー効率や居住環境の悪化から問題とされることが多いが、気温の上昇は生物生態へも何らかの影響を与えているものと考えられる。ここでは、気象庁が1950年代から観測している生物季節データを用いて、ヒートアイランドが生物季節に与える影響を調査した。対象都市は、50年代から現在までに急激な人口増加を示した都市とし、アメダスデータから算出したヒートアイランド強度の経年変化と生物季節の経年変化を比較した。その結果、ヒートアイランドが発生している都市では、イチョウ、カエデの紅葉開始日が遅れていることが確認された。

1. 目的

ヒートアイランドは、エネルギー効率や居住環境の悪化から問題とされることが多いが、気温の上昇は生物生態へも何らかの影響を与えているものと考えられる。ここでは、気象庁が1950年代から観測している生物季節の経年変化と、アメダスデータから算出したヒートアイランド強度の経年変化を比較することにより、ヒートアイランドが生物季節に与える影響を確認することを目的とした。

2. 方法

2.1 対象とする生物季節観測種目

理科年表平成11年[1]に記載される生物季節観測種目16種（表1）の中から、安定的な観測精度を有し、かつ、ヒートアイランド現象に特徴的な冬季の気温上昇により、影響を受け安いと考えられる種目として、次の4種目を選定した。具体的には、動物に関する種目は、観察地などが一定でないことから除外し、観察木が設定される植物に関する種目とした。また、初春（晩冬）の気温上昇か、晩秋（初冬）の気温下降に関連すると予想される種目から、その生理的なメカニズムについての研究が比較的進んでいる種目とした。

① ウメ開花日
② ソメイヨシノ開花日
③ イチョウ黄葉日
④ イロハカエデ紅葉日

表1　生物季節観測項目一覧（理科年表記載分）

No.	観測項目
1	**ウメ開花日**
2	ウグイス初鳴日
3	タンポポ開花日
4	ツバメ初見日
5	**ソメイヨシノ開花日**
6	ソメイヨシノ満開日
7	モンシロチョウ初見日
8	ヤマツツジ開花日
9	ノダフジ開花日
10	ホタル初見日
11	サルスベリ開花日
12	アブラゼミ初鳴日
13	ススキ開花日
14	**イチョウ黄葉日**
15	イロハカエデ紅葉日
16	モズ初鳴日

なお、観測データは1953～98年のものを、（財）気象業務支援センターより入手し用いた。

2.2 調査対象都市

北海道、奄美、沖縄では、生物季節観測種目に違いがあるため、本州、四国、九州の観測地点（理科年表平成11年[1]記載）の中から、ヒートアイランド現象が発生する可能性が大きい地点（都市）として、次の4都市を選定した。具体的には、我が国では、人口30万人を越える都市において、ヒートアイランド現象が顕著になることが報告されているため[2]、現在の人口が30万人以上でかつ、生物季節観測開始当初の1950年代からの人口増加が著しい都市とした（表2）。

① 仙台

② 新潟

③ 宇都宮

④ 鹿児島

2.3 ヒートアイランド強度の算出方法

冬季（11月～3月）の最低気温の平均値を対象都市の市街部のアメダスポイントと、その近傍にあり、かつ、畑・水田などの農村的土地利用内に位置するアメダスポイントで比較し、その差を持ってヒートアイランド強度とした。アメダスポイントの一覧を表3に示す。アメダスポイントの周辺土地利用の確認は、環境庁作成の5万分の1植生図を利用した。

なお、算出に用いたデータの期間は1980～97年である。

表2 生物季節観測地点の所在する市町の人口変化（単位：千人）

観測地点名	1955	1998	増減	観測地点名	1955	1998	増減
青森	198	297	99	鳥取	107	146	39
秋田	190	311	121	浜田	55	47	△8
盛岡	143	283	140	京都	1934	1390	△544
山形	184	249	65	広島	485	1099	614
仙台	380	965	585	神戸	986	1448	462
福島	201	286	85	和歌山	265	396	131
新潟	301	485	184	奈良	126	362	236
金沢	300	437	137	松山	241	467	226
長野	253	356	103	高松	229	331	102
宇都宮	227	437	210	高知	185	323	138
福井	183	250	67	福岡	202	338	136
高山	50	66	16	大分	200	430	230
前橋	195	283	88	長崎	349	428	79
水戸	128	244	116	鹿児島	314	542	228
名古屋	1421	2090	669	宮崎	157	301	144
甲府	155	194	39				
銚子	91	82	△9				
津	113	160	47				
静岡	316	471	155				
東京*	6969	7854	885				

* 区部人口を記載。

注）1955年人口は、昭和30年国勢調査結果を、昭和55年10月1日の境域により再編したものを、千人単位に四捨五入した（出典：「国勢調査集大成 人口統計総覧」、総務庁統計局監修、東洋経済新報社編集、1985、東洋経済新報社）。1998年人口は、平成10年3月31日住民基本台帳の記載の人口を千人単位に四捨五入した（出典：「平成10年版 全国市町村要覧」、市町村自治研究会編、1998、第一法規）。

3. 結果と考察

3.1 生物季節の経年変化

対象都市別に生物季節の経年変化をグラフ化したものを図1に示す。

ヒートアイランドによる気温変化は、単純に考えた場合、春開花の2種目については、開花を早める方向に、秋紅葉の2種目は遅くなる方向に変化をもたらすことが期待される。

図1からは、秋紅葉の2種目については、いずれの都市においても、次第に紅葉開始時期が遅くなってきている傾向がみられ、鹿児島では、近年のカエデ紅葉が特に遅くなっている。

表3 アメダスポイント一覧

観測地点	比較地点	所在地住所	設置箇所
秋田	秋田	秋田市山王七丁目1-4	秋田地方気象台
	大潟	南秋田郡大潟村大潟6	秋田県立農業短期大学農場
仙台	仙台	仙台市宮城野区五輪1-3-15	仙台管区気象台
	白石	白石市福岡長袋字湯殿山13	－
新潟	新潟	新潟市幸西4-4-1	新潟地方気象台
	巻	西蒲原郡巻町字巻鎧潟甲12207	新潟農業大学校
宇都宮	宇都宮	宇都宮市明保野町1-4	宇都宮地方気象台
	真岡	真岡市下籠谷361-2	県立真岡北陵高校農場
鹿児島	鹿児島	鹿児島市東郡元町4-1	鹿児島地方気象台
	東市来	日置郡東市来町湯田1678	鹿児島県蚕業試験場

一方、春開花の2種目はいずれの都市においても、期待される方向への変化の傾向は認められず、サクラ開花は比較的安定した開花時期を維持している。また、ウメ開花については、年毎の変動が大きい。

サクラは、秋の日照時間の短縮により花芽を形成し、休眠に入る。そして冬季の低温により覚醒し、春の温度上昇により花芽の成長、開花に至る。この覚醒と成長は連動しており、覚醒の程度は低温の程度に影響され、強い温度による覚醒は、その後の花芽の成長を早め、春の気温上昇が小さな段階で開花に至る。逆に、弱い低温による覚醒は、花芽の成長を遅くし、気温が十分に上昇しなければ開花に至らない[3)]。したがって、ヒートアイランドによる冬季の気温上昇は、覚醒を浅くし、開花を遅らせる方向に働くが、一方では、晩冬から初春の気温上昇は花芽の成長を促進する方向に働くため、開花時期への影響は直接的には、現れにくいと考えられる。

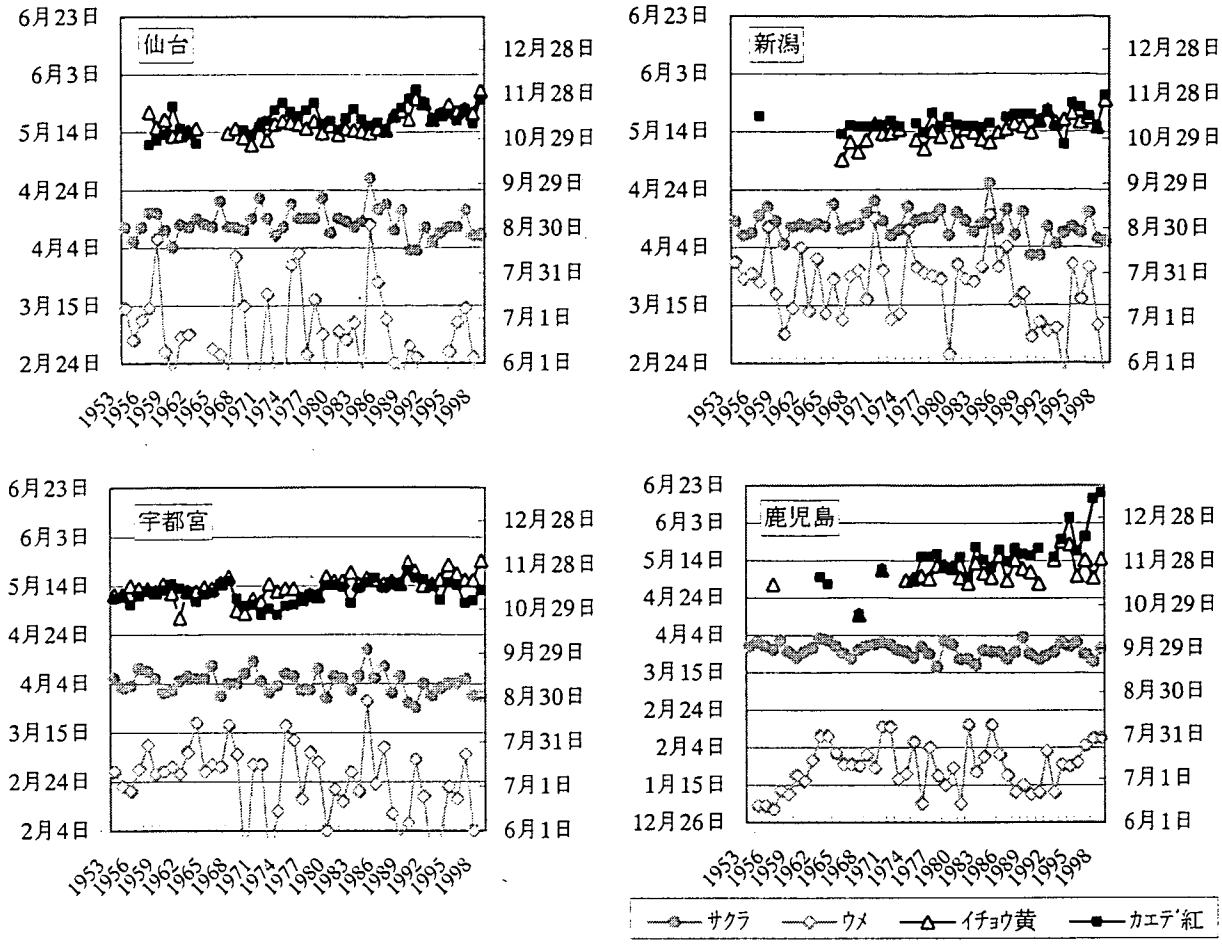


図1 生物季節の経年変化

ウメについても、休眠と覚醒の生理的メカニズムが存在するが、覚醒は、花芽成長には連動せず、開花のみに連動する[4]。そのため、ウメの花芽は覚醒に関わらず、成長可能な高温があれば成長を続ける。したがって、ヒートアイランドの発生は単純に開花を早めると考えてよいと思われるが、ヒートアイランドによる気温上昇よりも、毎年の気温変動の方が大きいため、ヒートアイランドの影響は捕らえにくいと考えられる。

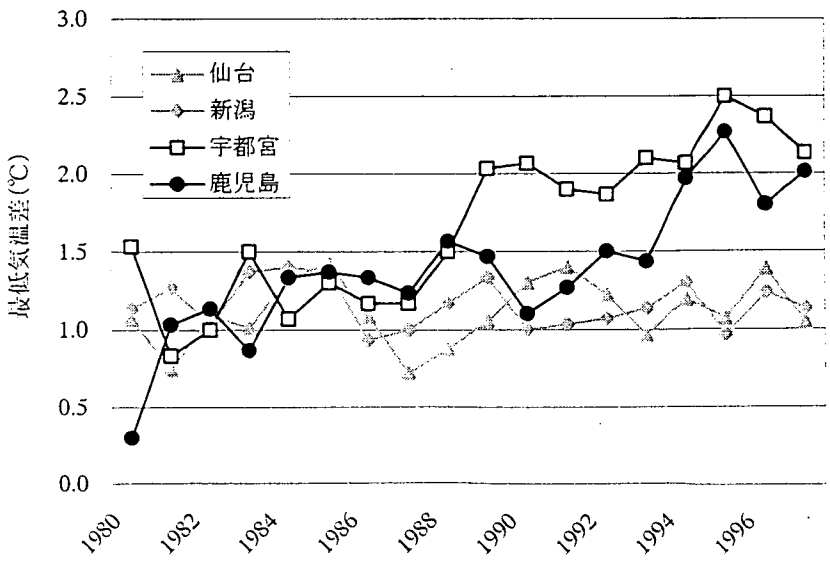


図2 調査対象都市のヒートアイランド強度

3.2 ヒートアイランド強度算出結果

各都市のヒートアイランド強度算出結果を図2に示す。同図より、仙台と新潟については、1980年代より1℃程度の最低気温の上昇が続いていることが解る。また、宇都宮と鹿児島については、80年代から90年代

にかけ、ヒートアイランド強度が増加している。宇都宮では 90 年代に入り 2℃程度の最低気温の上昇が続いており、鹿児島では、近年に至り、最低気温の上昇が 2℃程度に達している。

3.3 生物季節とヒートアイランド強度の比較

ヒートアイランドの進展が認められる鹿児島と宇都宮について、ヒートアイランド強度と秋紅葉の 2 種目の経年変化を併記したものが図 3.1 および図 3.2 である。

鹿児島については、両者が連動し推移する傾向が見られ、特にカエデで顕著である。しかし、宇都宮については、両者の連動は明らかではない。鹿児島のように温暖で落葉広葉樹の分布南限に近い地域において、ヒートアイランドの影響が現れるのではないかと思われるが、今後の検討が必要とされる事項である。

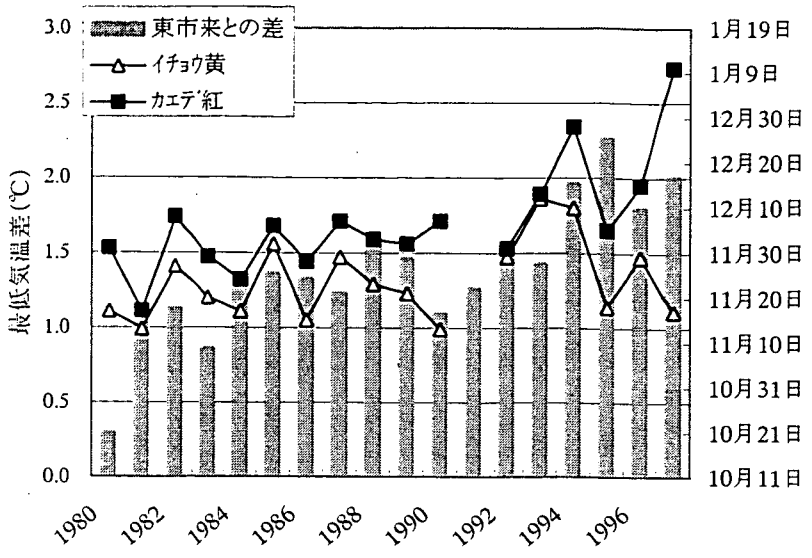


図3.1 生物季節とヒートアイランド強度の比較(鹿児島)

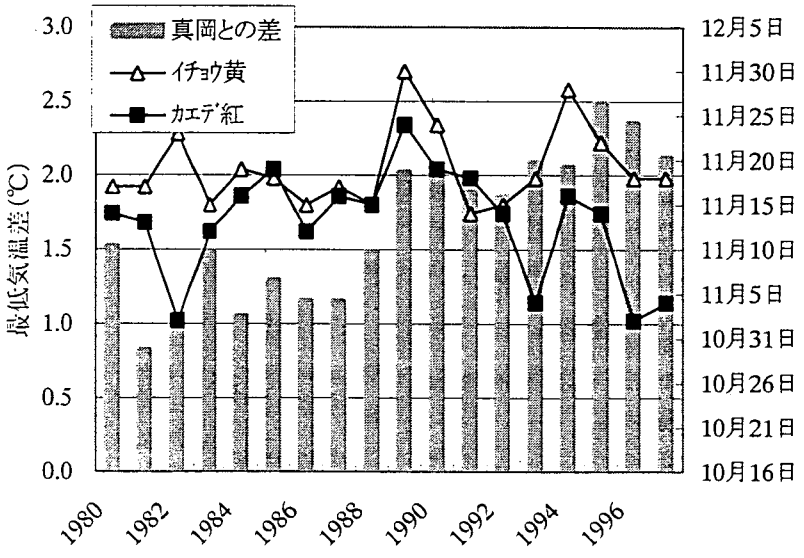


図3.2 生物季節とヒートアイランド強度の比較(宇都宮)

4. 今後の課題

今回の調査では、ヒートアイランドが鹿児島での紅葉の開始日に影響を与えていることが確認された。しかし、ここでの結果は、ヒートアイランドが生物季節に与える影響の一端を垣間見たに過ぎないと考えている。ヒートアイランドの影響を明確に把握するためには、対象都市の地域性、各年の平均気温の変動、生物の生理的メカニズムとの関連などの要素について、さらに解析を進める必要があると言える。

(藤原)

【参考文献】

1) 国立天文台編：理科年表平成 11 年、丸善、pp.274-275、1999

2) 福岡義隆：都市の規模とヒートアイランド、地理、28(12)、pp.34-42、1983

3) 永田洋、万木豊：生物季節に関する研究（Ⅰ）－なぜサクラは春に咲くのか－、森林分化研究、第 3 巻、pp.77-93、1982

4) 永田洋、万木豊：生物季節に関する研究（Ⅲ）－なぜウメは早春に咲くのか－、森林分化研究、第 5 巻、pp.163-175、1984

8.2　都市気候の数値シミュレーションに関する研究

研究期間：平10～平14
担当：都市河川研究室

【要旨】
本研究では，都市気象緩和対策の効果を算定するためのメソスケールモデルの検討を行った．本研究で対象としたモデルは，米国ペンシルバニア州立大学で汎用の気象計算モデルとして開発され，その後，NCAR（米国大気研究センター）においてさらに改良された MM5 を基本にしている．MM5 は非静力学方程式に基づいて３次元の大気流れと圧力，気温，水蒸気分布等を予測できるが，これを直接，様々な土地利用が混在する都市気象の計算に適用するには不都合な点があったことから，地表面の水文過程を取り入れるとともに，サブグリッドスケールのパラメータ化を導入した．これらの改良により，様々な土地利用が混在する都市の気象を再現できることがわかった．また，実測値との比較により，精度よい計算が可能であることがわかった．

１．研究目的

本研究は，各種の気候緩和対策の効果を精度よく算定するためのシミュレーションモデルを開発することを目的としている．11 年度は，都市スケールでの効果をシミュレートするためのメソスケールモデルの検討を行った．

２．研究方法

本研究では，米国ペンシルバニア州立大学で汎用の気象計算モデルとして開発され，その後，NCAR（米国大気研究センター）においてさらに改良された MM5 を基本モデルとして選んだ．MM5 は非静力学方程式に基づいて３次元の大気流れと圧力，気温，水蒸気分布等を予測できる．MM5 は NCAR により無償で配布されており，最新の研究成果を取り入れられるようにバージョンアップが何度も行われている世界的にみても最も先進的なメソスケールモデルの１つである．

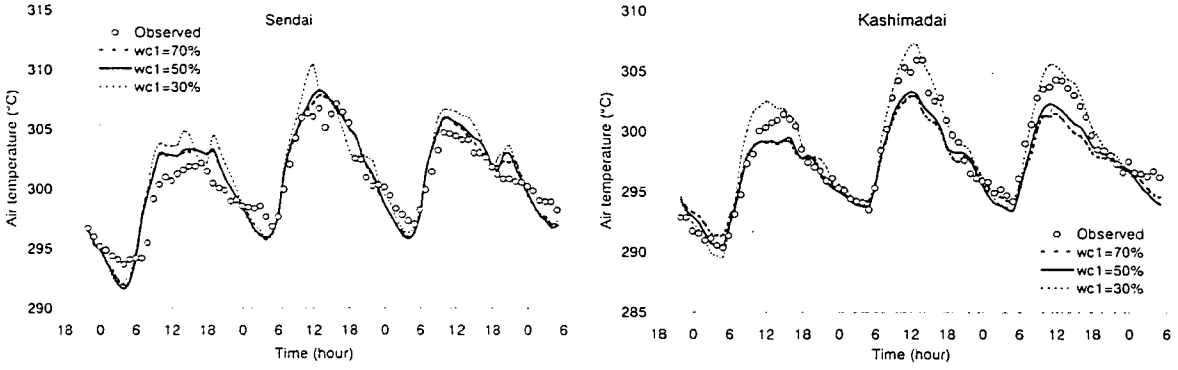
MM5 はもともと米国におけるメソ気象予測を主たる対象とした汎用モデルであるため，日本の都市気象計算に直接適用するためにいくつかの修正を加えた．一つには，日本の国土基本情報として国土地理院が整備・発行する土地利用メッシュデータ（分解能 30sec）と数値地図に含まれる標高データ（分解能 45sec）を使用できるよう修正した．土地利用は国土数値情報のもともとの 12 分類を 10 分類に集約し，既往の文献等に基づき分類毎の地表面パラメータを設定した．また，都市のような複雑な土地利用形態に適用する場合や計算メッシュサイズが大きい場合には，サブグリッド規模の一様性の仮定が成り立たず，地表面からのフラックス輸送量の算定結果に大きな違いが生じることが予想される．MM5 ではサブグリッド規模の非一様性を考慮していないことから，複雑な都市の土地利用に適した地表面フラックスの算定ができるようにサブグリッドスケールのパラメータ化手法を導入した．具体的には，MM5 の境界層モデル（Mellor-Yamada のクロージャーモデル，レベル 2.5）を修正して，サブグリッド毎に大気との運動量，熱，水蒸気の交換を計算できるようにした．人工排熱は地表面の熱収支式に含める方法が一般的に用いられるが，本モデルでは接地層内に平均的に放出するように MM5 のコードを修正した．排熱量は土地利用別に設定した日平均値の原単位を基準に日変動パターンを与えた．日変動パターンの東京都を対象にした１ｋｍメッシュデータから求めた．

従来，都市気象の研究で用いられている数値モデルでは，土地利用に固有の地表面パラメータの値を設定

するのが通例で，潜熱輸送量に大きく影響する蒸発効率も土地利用ごとに一様な値が与えられていた．しかし，現実には植生地や裸地などで土壌水分量が時空間的に変化しており，水蒸気輸送や潜熱輸送を介して都市のヒートアイランドの出現に影響を及ぼしていると考えられる．そこで，本研究では蒸発効率すなわち土壌水分量も大気の計算と連動して予測できるようにするため，新たに Noilhan & Planton の地表面モデルを境界層モデルに組み込んだ．これにより，地表面の水文条件の影響や地球温暖化や都市化により降雨特性が変化した場合の影響を把握したり，都市域の拡大による自然地の減少や都市内における自然地の保全の影響をより正確に推定することが可能となる．

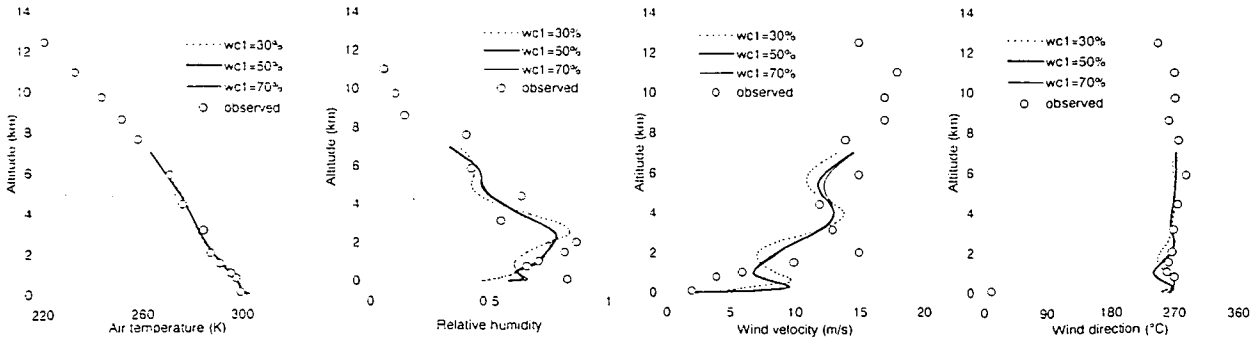
3．研究結果

仙台市とその郊外を対象エリアとして，1995 年 8 月 17 日 21 時からの 3 日間の気象シミュレーションを行い，計算結果と観測結果の比較を行った．計算では対象エリア全域で土壌タイプをロームと仮定し，初期土壌水分量は 3 通り（飽和含水率の 30%，50%，70%）に変えて行った．領域内 6 カ所あるアメダス測定地点のうち，仙台と鹿島台について計算結果と観測値の比較を図―1 に示す．土壌水分量の違いにより，仙台の最高気温で 3 度の違いがあった．鹿島台では初期含水率が飽和含水率の 30%の場合に，計算値が最も観測結果に近い．また，仙台では深夜から早朝にかけての計算結果が実測よりも低くなる傾向が出ており，都市キャノピーによる蓄熱，放射の効果を計算では組み込んでいないことも原因となっていると考えられる．



図―1　表層の土壌水分量が地上気温に及ぼす影響

図―2 は，仙台管区気象台地点における気温，湿度，風速，風向の鉛直分布の計算結果と実測値を比較したもので，気温以外の要素についても計算により鉛直分布の傾向がうまく再現されていることがわかる．今後は，モデルの精度向上を図りながら，関東平野へ適用して，各種対策の効果を試算していく予定である．



図―2　風速，風向，気温，相対湿度の鉛直分布による比較

8.3　都市気候緩和と地下水涵養に効果的な環境共生型舗装に関する研究

研究期間：平 11～平 13
担当：都市河川研究室

【要旨】
本研究では，ヒートアイランド現象の緩和とともに，水循環や都市型洪水の抑制，雨天時汚濁の削減に寄与することを目的として，透水性と保水性の双方を兼ね備えた環境共生型の舗装を開発する．11 年度は，放射と対流が共存する場において，各種多孔質体の熱と水分移動に関する基本特性を把握する目的で室内風洞実験を行った．本実験により，多孔質体の粒径分布に応じた蒸発量，蒸発の持続性，表面温度変化の特徴を明らかにした．

1．研究目的

都市の人工地覆は大気－地表間における水と熱・エネルギーの相互作用に大きく影響を及ぼしており，都市気候の悪化をもたらす．また，夏期の熱中症発生率は道路空間で相対的に高く，人間に及ぼす熱ストレスの悪影響も懸念される．さらに，人工地覆の改善により地下水涵養による自立した水資源の確保，河川の基底流量の維持に貢献することも重要である．そこで，本研究では，ヒートアイランド現象の緩和とともに，水循環や都市型洪水の抑制，雨天時汚濁の削減に寄与することを目的として，透水性と保水性の双方を兼ね備えた環境共生型の舗装を開発するため，各種の検討を実施する．

2．研究方法

本年度は，放射と対流が共存する場において，各種多孔質体の熱と水分移動に関する基本特性を把握する目的で室内風洞実験を行った．以下に実験内容と実験結果を説明する．

実験には資源環境技術総合研究所の保有するエッフェル型広域風洞を利用した．３つの供試体を風洞の測定胴部分に風に対して直角横一列に並べて設置した．供試体は，側面と底面を発泡ポリスチレンで断熱した 40cm 四方，厚さ 5cm の容器に入れた．各供試体上面には 100Wの白熱電球数十個を用いた放射装置を取り付け，両端に位置する供試体片側面にはアルミ箔で覆った反射板を立てた．これにより，各供試体上面では，供試体面を加熱するに足る十分な放射エネルギーが，平均的にほぼ同等量受熱されることを確認した．測定胴の風上側には複数の桟粗度（円柱）を並べ，供試体前面における風速の鉛直分布が対数則に従うようにした．

実験では各日の午前９時から午後７時までの 10 時間連続で通風を行った．各供試体の重量変化は精度１ｇの電子天秤により測定し，蒸発量に換算した．測定中に供試体が受ける長波放射量と短波放射量は，供試体とその隣の供試体の間に設置した放射収支計及び日射計により測定した．供試体面から反射される短波放射量は各日の測定開始日と終了時，およびその間の随時にアルベドメータにより測定した．その際，受光部は供試体から約３cm 離れていた．通風時の風速は供試体の風上側左右２カ所，１高度で測定し，測定終了時には中央の供試体の風上側で風速の鉛直分布を計測した．供試体内の温度は鉛直方向に 1cm おきに固定された銅－コンスタンタン熱電対の出力から求めた．ただし，保水性舗装を用いた場合には，都合上，熱電対は上面と底面にのみ敷設した．以上の測定は，供試体の重量変化がほとんどなくなるまで行った．

表-1 に示す５ケース，延べ 11 種類の供試体を対象に，多孔質体の蒸発特性と熱収支に関する実験を行った．最初は３カ所全てに水だけを入れた断熱容器を置き，それぞれの温度と重量の変化を測定し，３供試体の気象条件がほぼ同一であることを確認した．ケース１では配合の異なるビーズを３カ所に設置したが，ケ

ース 2～5 では 1 カ所には水のみを入れた容器をおき，飽和面からの蒸発量を実測した．

表-1 実験ケース一覧

ケース	供試体	諸元（粒径と重量百分率）	乾燥密度 (g/cm3)	飽和時含水率(%)	幅，長さ，厚さ(cm)
1	1	1mm(100.0)	2.187	38.1	40*40*5.0
	2	10mm(57.0)0.4mm(43.0)	2.360	22.1	
	3	5mm(40.0)2mm(60.0)	2.291	34.7	
2	4	10mm(33.7)5mm(33.7)0.4mm(32.7)	2.503	20.1	
	5	10mm(46.6)2mm(26.6)1mm(26.8)	2.544	29.5	
3	6	10mm(67.7)1mm(32.3)	2.785	23.1	
	7	5mm(67.1)1mm(32.9)	2.092	22.7	
4	8	保水性舗装(1)	2.150	7.5	39*39*3.8
	9	保水性舗装(2)	2.186	9.2	39*39*4.8
5	10	保水性舗装(3)	1.234	21.9	40*40*4.0
	11	超軽量ﾒｻﾗｲﾄ(36.5)10mm(63.5)	1.947	27.9	40*40*5.0

3．実験結果

舗装からの蒸発による潜熱輸送を長時間持続させるためには，舗装の飽和含水率の大小が重要である．表-1 に示すように，11 種類のうち，最も飽和含水率が高かったのが粒径 1 mm のビーズを充填した供試体 1 で，最も低かったのは保水性舗装(1)であった．0.4mm 径のビーズを他のビーズと混合した供試体 2，4 も比較的低い含水率を示す．空隙率 30％程度のアスファルト舗装の空隙に径の小さい粒子を充填する方法により 20％程度の含水率を確保し，保水性を高めることは可能であると考えられる．

各供試体表面温度の 3 日間における時間変化の例を図-1 に示す．表面温度は供試体表面の反射率の大小にも影響するため単純には比較できないが，供試体 1 では日ごとの最大表面温度はほとんど変わらなかったものの，供試体 2 の 3 日目では 1 日目に比べて最大地表面温度で 8.5 度程度高くなっている．これは各供試体内の水分移動特性の違いが影響した結果であり，1mm 単一粒径のケースで表面温度抑制効果が最も高いことになる．次に，供試体 4,5 及び供試体 8,9 について，直接測定した飽和水面からの蒸発量に対する各供試体からの蒸発量の比をとり，供試体の含水量との関係をプロットしたものが図-2，3 である．供試体 8,9 の保水性舗装では，実験 1 日目で蒸発比率が 0.1 程度に低下しているのに対して，3 粒径を配合した供試体 4,5 では，実験初日に急激な蒸発比率の低減があるものの，その後はゆっくりと減少し，実験 3 日後にも蒸発比率で 0.2 程度を維持している．

実験で供試体上面が受ける放射量は 1400～1500W/m^2 程度であり，夏期の日平均放射量と比べると 3 倍程度の値となっている．3 日間の実験は現実の気象条件では 1 週間以上に相当すると考えられることから，舗装の仕様を工夫すれば，1 週間程度蒸発効果を持続させることも可能であると考えられる．

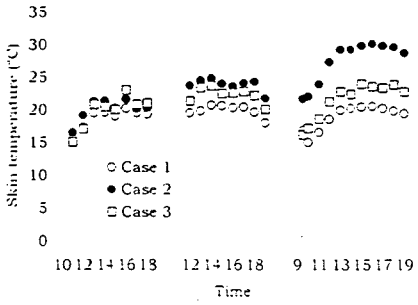


図-1 地表面温度の時間変化

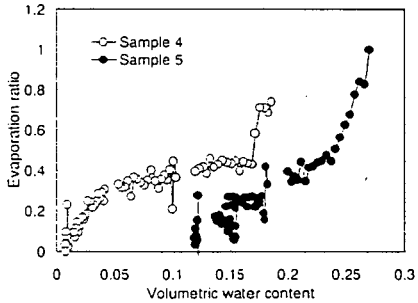


図-2 含水率と蒸発比率の関係(case4,5)

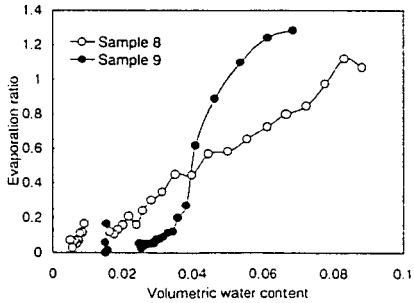


図-3 含水率と蒸発比率の関係(case8,9)

4．結論

現行の保水性舗装による表面温度の抑制効果は実験開始後 1 日程度に限られる．これは，保水性舗装の飽和含水率が小さいことに起因する．異なる粒径のビーズを数種類配合した多孔質体を用いた実験では，径の小さいビーズを配合することにより飽和含水率は低下するが，粒径の小さいビーズが混入していないケースに比べてある程度の時間を経ても蒸発比率を高めに保つことができる．

（末次忠司，河原能久，木内豪）

8.4　社会基盤等を活用した省エネ及び都市の気候緩和に関する研究（1）

研究期間：平10～平14

担当：化学研究室

【要旨】

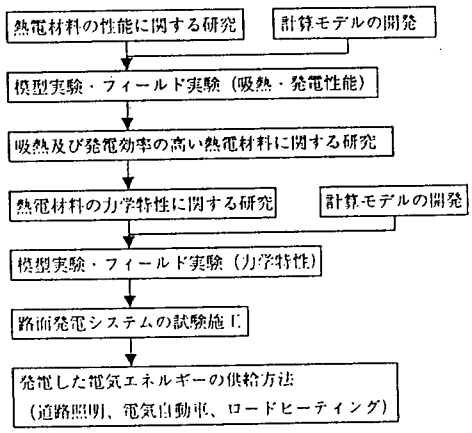
我が国では、情報化社会の進展及び生活の快適性を求めた国民の生活様式の変化等により、エネルギー消費量が増大している。特にエネルギー消費量の多い大都市圏では、ヒートアイランド現象が顕在化し、さらに今後拡大することが予想されると同時に、ヒートアイランド現象の緩和策が期待されている。本研究では、路面に与えられた熱を吸収することでヒートアイランド現象を緩和し、同時に吸収した熱を電気として利用する路面発電システム（Road Electric Generation System、以下本文ではREGSという）を開発することを目標としている。

平成11年度はREGSの性能に関する簡単なフィールド実験を行い、数値計算値との比較により評価することを目的とする。REGSの性能評価を行った結果、地中の温度分布、REGSによる発電量に関して、実験値と数値計算値とは比較的よく一致し、これらが数値計算により評価されることが確認された。

1．研究方法

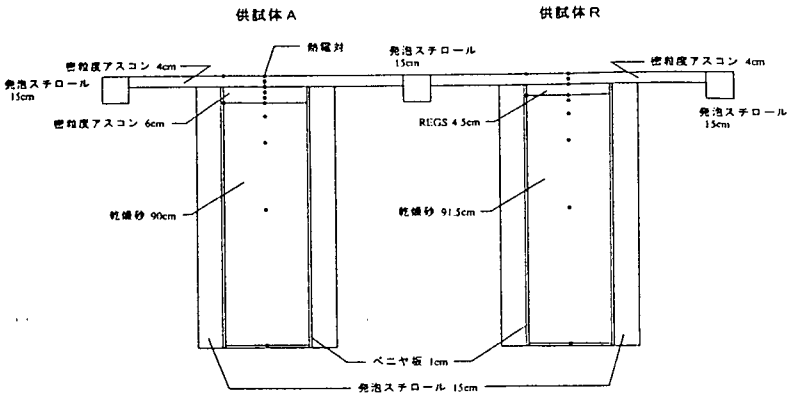
1．1　REGSの性能に関するフィールド実験

図－1に示すように、REGSを基層に挿入した舗装構造体を、太陽光が照射される開放空間に設置する。舗装構造体は30cm(幅)×30cm(長さ)×1m(高さ)の直方柱であり、下面は土層に接触している。舗装構造体を一次元熱伝導体と仮定できるように、装置の周囲を発泡スチロールにより断熱している。また、比較のため、REGSを設置しない通常の舗装構造についても実験を行っている。



舗装構造体は、上層より密粒度アスコン、REGS、乾燥砂の構成となっている。乾燥砂は自然含水比8.2%の砂を熱して水分を完全に蒸発させたものを用いる。本実験では、REGSの性能を把握するため、舗装構造体中に熱電対を埋め込んで温度と発電量を測定した。

REGSは、127個の熱電素子対から構成された熱電半導体モジュールを25個組み合わせた構造である。REGSの厚さは40mmであるが、そのうち熱電半導体モジュールの厚さは5mm程度で、残りの35mmはアルミニウムの構造となっている。本実験におけるREGSの性能は、厚さ5mm程度の熱電半導体モジュールの性能と同等と見られる。



図－1　フィールド実験の概要図

1．2　REGSの性能に関する数値計算

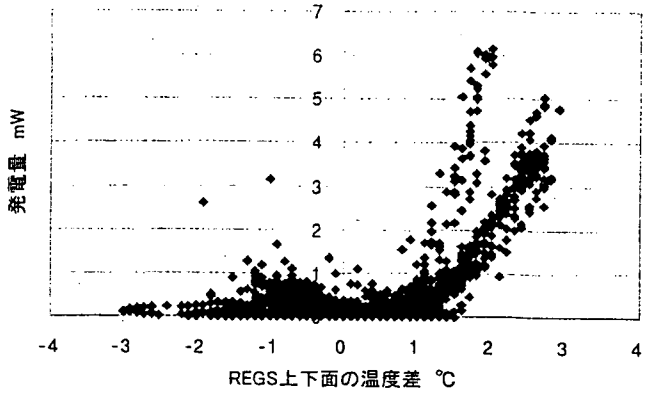
一次元熱輸送モデルを用いて、REGSの性能に関する数値計算を実施する。本研究では、数値計算値と実験値とを比較

することにより、フィールド実験の結果を数値計算により評価した。

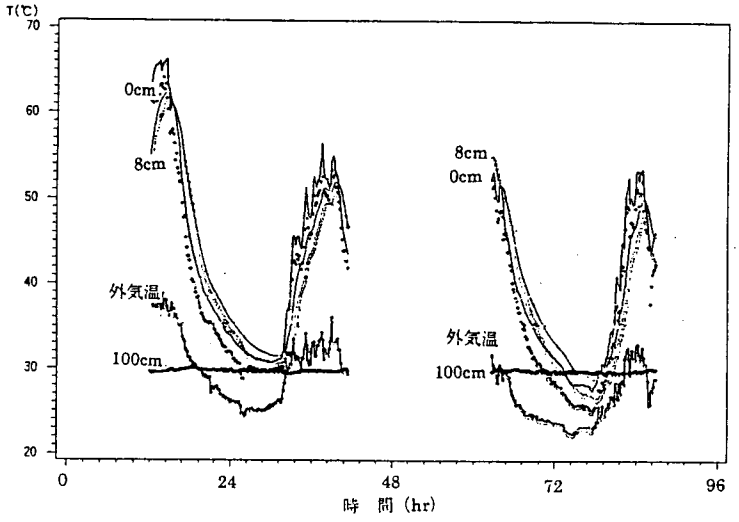
2．研究結果

2.1　REGS の性能に関するフィールド実験

夏季を対象として、REGS を基層に挿入した舗装構造体の温度分布を測定した。フィールド実験では一次元熱伝導体を仮定しているが、仮定を確認するため舗装構造体中央部の温度と端部の温度とを比較した。表面、深さ 10cm の温度を比較した結果、両者は比較的よく一致しており、仮定がほぼ成立していることが分かった。一方、REGS を基層に挿入した舗装構造体の温度分布を見ると、REGS 周辺で温度分布が不連続に変化する以外は、通常の舗装構造体の温度分布とほぼ同様の傾向を示した。図－2は REGS 上下面の温度差と発電量との関係を示したものであるが、これを見ると上下面に温度差はあまり生じていない。これは、REGS の大部分が熱伝導性の高いアルミニウムで構成されていることが一因と考えられる。REGS による発電量を増大させるためには、熱電半導体モジュールの物性値の向上と、熱電半導体モジュールの高さを大きくすることが必要である。



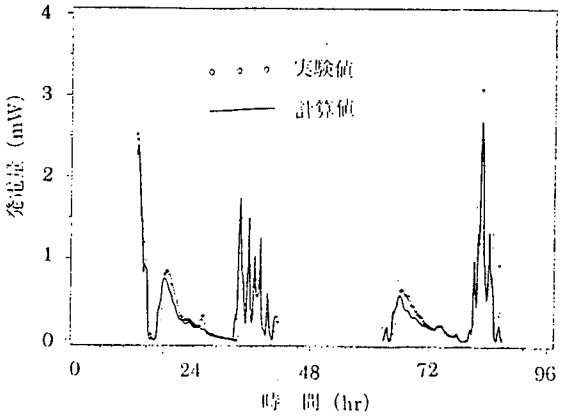
図－2　REGS 上下面の温度差と発電量



図－3　温度分布の時系列変化図

2.2　REGS の性能に関する数値計算

REGS を設置した舗装構造体における温度分布の時系列変化について、実験値と数値計算値とを図－3に示す。両者の温度分布の時系列変化は比較的よく一致していた。通常の舗装構造体の温度分布に対する実験値と数値計算値との整合は既に報告しているが[1]、今回の結果は、REGS を基層に挿入した舗装構造体の温度分布が数値計算により再現できることを示している。また、図－4は、REGS による発電量の実験値と数値計算値を示している。両者は比較的よく一致しており、REGS による発電量についても数値計算により再現できることが分かった。



図－4　発電量の時系列比較図

3．主な研究成果物

1)木嶋、明嵐：路面発電システムが気温に及ぼす影響、土木技術資料 42-3、pp60～63、2000.3

（文責：明嵐、木嶋）

8.5　社会基盤等を活用した省エネ及び都市の気候緩和に関する研究（2）

研究期間：平 10～平 14
担当：都市河川研究室

【要旨】
本研究では都市域におけるヒートランド現象を軽減するための各種対策の効果や費用を評価する．11 年度では，エネルギー消費と排熱の削減を目的とした河川水熱利用による河川水温への影響把握を行うため，感潮域にも適用可能な水温予測モデルを作成し，荒川における現地観測結果との比較検証を行った．これにより，強混合状態においては簡易な 1 次元の影響予測モデルでも十分な精度の水温予測が可能であることが明らかとなった．また，10 年度に検討した水熱エネルギー利用の将来シナリオに基づいて，荒川への温排水の放流による水温への影響をモデルにより計算し，今回の検討条件のもとでは最大で 0.4℃程度の水温上昇になることを明らかにした．

1．研究目的

わが国では，情報化社会の進展及び生活の快適性を求めた国民の生活様式の変化等によりエネルギー消費量が増加し，今後もエネルギー消費量の増加が見込まれる．特にエネルギー消費量の多い大都市圏では，ヒートアイランド現象が顕在化し，さらに拡大することが予想されることから，ヒートアイランド現象の緩和が期待されている．そこで本研究では，都市排熱の抑制によるヒートアイランド緩和及び省エネ効果の定量化を行うとともに，舗装及び都市河川等の社会基盤に熱電半導体，ヒートポンプ等を活用したエネルギー供給システムに関する研究を行うことにより，化石燃料の抑制を通じて省エネに貢献し，都市におけるヒートアイランド化の緩和・減少を図り，潤いのある都市環境の形成に資する．

2．研究方法

10 年度は，2010 年時点で東京都 23 区に水熱エネルギー利用の地域冷暖房システムを導入した場合の，省エネ，排熱・排ガス削減の効果を算定し，下水処理場，ポンプ場，河川の水熱エネルギーを水熱源から 1km 以内の都市開発事業予定地区で利用する場合には，その地区で 29％の省エネ，40％の CO2 排出量削減が可能となること等がわかった．また，水熱エネルギーの可採量や利用地区の分布からみて利用可能性の高い河川として荒川下流部や隅田川などの感潮河川が選定された．これらの河川水の熱エネルギー利用を推進するには，設置コストや適地の問題を解決することはもちろんのこと，排熱が河川水温に与える影響の適切な把握を行っておく必要がある．都市内を流れる感潮河川では潮汐に対応して流れが往ったり来たりするばかりでなく，海水の遡上により密度成層が形成され，鉛直方向の混合が起こりにくくなる．また，流域の下水処理区から処理水が排水されたり，小河川との分合流が生じている．したがって，河川の水温もこれらの現象の影響を受けて複雑な変化を示すものと予想されることから，このような現象を考慮した数値モデルにより水熱エネルギー利用に伴う水温変化の予測を行う必要がある．

水温変化は魚類の生息領域を脅かしたり，微生物による分解の反応速度を変えることから，水質変化予測や河川生態系評価にとっても重要な要素であるが，荒川のような感潮河川における水温や流れの実態，水温変化の要因は必ずしも詳細に把握されていない．また，感潮河川における水熱エネルギーの利用に伴う流れ，水温への影響予測に関する研究報告も数少ない．そこで，11 年度は感潮河川を対象とした 1 次元の水温予測モデルを作成し，荒川にて実施した現地観測結果との比較によりモデルの検証を行った上で，地域冷暖房システムの導入可能性と将来熱需要予測に基づくシナリオを与えて，水熱エネルギー利用に伴う水温変化を

計算し，水熱エネルギー利用による河川水温への影響予測を行った．

3．研究結果

（1）流れ・水温に関する1次元モデルの開発と検証

都市内を流れる感潮河川における水温形成には，小河川の分合流，下水処理水の流入，密度流の発生，放射，大気との熱交換などの要因が複雑に関連している．本来ならば，これらのすべてを考慮した3次元的なモデリングが望ましいが，ここでは断面平均的な水温変化を簡便に予測することを念頭におき，河川の流れ，水温ともに鉛直方向に平均化した流下方向1次元モデルを採用した．河川の流れは横流出入のある不定流の式と連続式に基づく．不定流の式に現れる運動量補正係数は荒川における流速分布の実測データを用いて算出した．熱輸送の計算には移流拡散方程式を用いた．河床の熱伝導量は対象河川の水深が大きいことから無視した．水表面からの顕熱，潜熱輸送の算定にはバルク法を用い，大気の安定度を考慮した Monin-Obkhov 相似則を適用した．

1次元モデルの検証は荒川下流部（図-1）を対象に行った．この区間では隅田川（隅田水門），中川（中川水門），綾瀬川（綾瀬水門），木下川（木下川水門）などとの間で河川水の流出入が常時行われている．流れの計算範囲は，秋ヶ瀬取水堰地点から河口部（-0.5km）までとし，上流端境界条件には秋ヶ瀬取水堰の放流量，下流端境界条件には南砂町水位観測所の水位データを与えた．水温の計算範囲は荒川工事事務所による1時間毎の計測記録が得られた江北橋（河口から 17km）から葛西橋（河口から 1.3km）までとし，両地点における計測値を上下流端の水温境界条件として与えた．

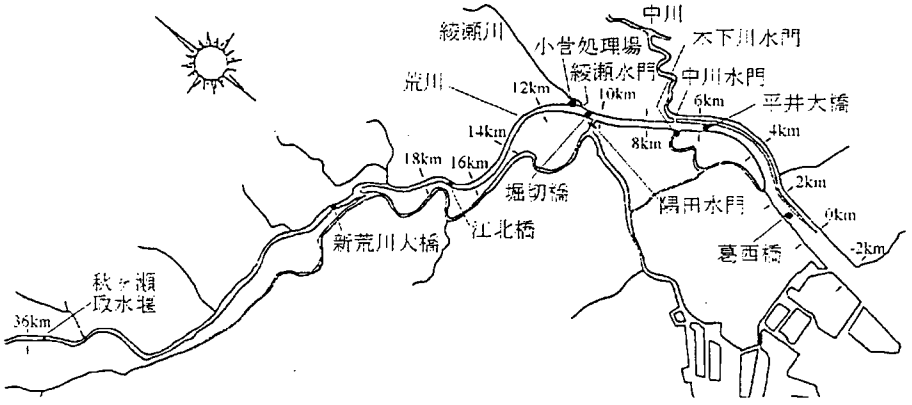


図-1　検討対象区間の平面図（荒川下流部）

今回の現地観測からの同定が困難な基底流量，粗度係数，縦分散係数については流量，水位，水温の計算値と実測値との整合性を勘案して定めた．粗度係数については水位の計算結果が実測値と最も整合するように対象範囲で一定値 0.015 を与えた．基底流量は流量の現地観測値や上流端流量，横流出入量に含まれる誤差を考えると，正確な同定は難しいことから，ここでは無視した．縦分散係数については後述するように水温の計測値を最もよく再現する値を利用した．

図-2（左）は下流の3断面における流量を比較しているが，計算結果と観測値とは良く整合している．しかし，図-2（右）の上流3断面では若干計算値と実測で位相差が見られた．これは現地観測データの不確実性によるものと湾曲の影響の双方が考えられる．ここには示さないが，水位の計算結果も実測水位をほぼ再現していた．

移流拡散方程式に用いられる縦分散係数 D_L についてはいくつかの実測値が報告され，定式化の試みがなされているものの，その同定は現地データとの照合に基づくのが最も精度が高いと考えられる．また，本モデルを用いた予備的検討によると縦分散係数の大小は計算結果に無視できない影響をもたらした．そこで，D_L =kdu*と仮定した場合について実測値との適合性を検討した．その結果，図-3 に示すように k=5000 とした時に最も良く実測値を再現した．D_L =kdu*で k=5000 として今回の水理条件に当てはめたときの縦分散係数は 0～600m²/s となった．

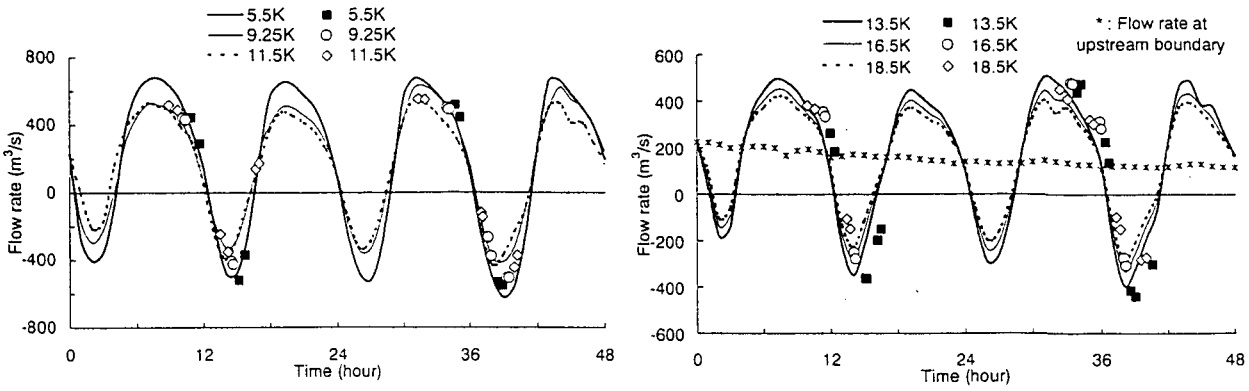


図-2　観測値と計算値の比較（流量）

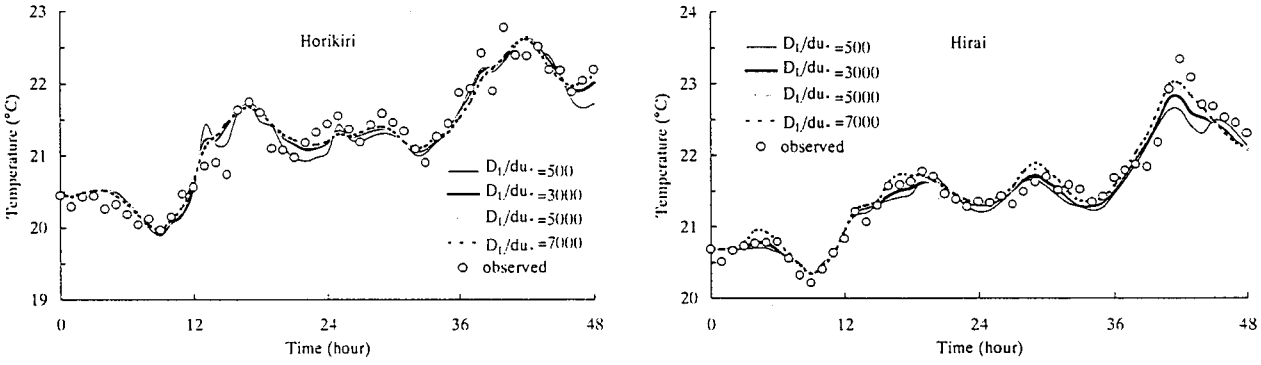


図-3　観測値と計算値の比較（水温）

（2）水熱エネルギー利用による水温変化

ここでは，検証された水温計算モデルを用いて，河川の水熱エネルギーを沿川の再開発地域で地域冷暖房システム(DHC)に利用した場合の水温変化を予測する．水熱エネルギーの需要量は，2010 年の冷暖房用の熱エネルギー需要を将来時点での建物用途別床面積の推定値と建物用途別・エネルギー使用用途別の需要原単位から推計した．また，水熱エネルギー利用地区は，現在または将来に都市開発事業が予定される地区における需給間の位置的関係と熱量的バランス，及び制度上の問題等現実的な制約条件も加味しながら設定した．需要の種類として夏期は冷熱のみを想定し，８月代表日の冷房需要量を算出した．さらに，この日需要量（供給冷熱量）と利用温度差５度としたときのヒートポンプの成績係数を用いて日平均の正味排熱量を算出した．

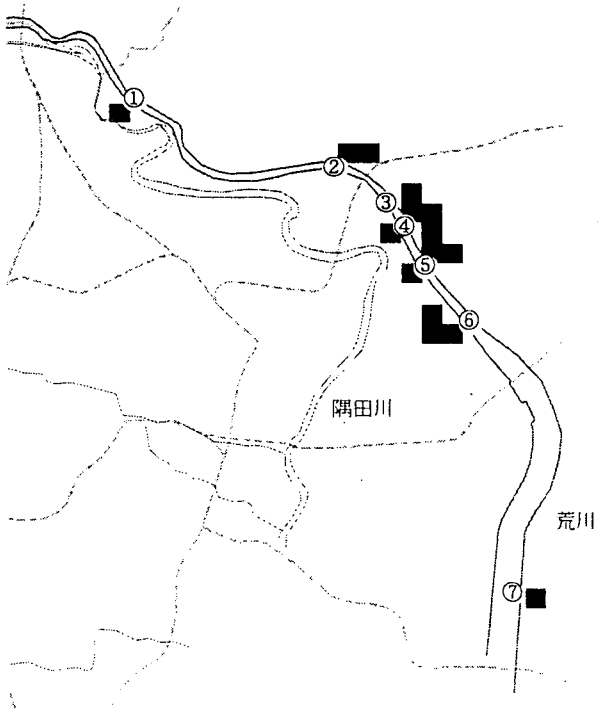


図-4　荒川沿いの温排水放流位置（①～⑦）

将来の再開発適地は図-4 に■で示すように荒川の検討対象区間内で 15 地区存在する．近接している地区は同一箇所で荒川から取水すると想定すると，全部で７カ所の取水箇所となる．そのうちの６カ所では，直接荒川から取水して，排熱を荒川に放出する．残りの１カ所は小菅処理場の下水処理水熱を利用するもので，

これは処理場から放流口までの熱損失なしで荒川に放出されると仮定した．このようにして算出された７カ所の排熱量は 9.5～165.1GJ/h の範囲内である．計算上の水理条件（河口水位），気象条件（気温，湿度，風速）には観測日のものを与えた．これは夏期晴天日の強混合状態を前提としたものである．河口(-2.0km 地点)での水温は 25 度，上流端水温は 21 度に設定した．また，隅田川等との間の分合流はないものと仮定した．

図-5, 6 は DHC を導入した場合の水温上昇量を河口から 0km, 5km, 10km 15km, 20km の５地点について示したものである．上流端流量は２ケース想定しており，当然ながら自流量の少ない図-5 の方が水温上昇量は大きくなる．これらの図より，今回の検討条件では，水温上昇は最大で約 0.4℃程度と無視できない量であり，排熱が放出される区間のほぼ中央にあたる 10km 地点で最も水温上昇量が大きくなることがわかる．また，仮に同じ７カ所から予測の２倍の排熱水を放流した場合についても計算したところ，水温上昇量は最大で約 0.85 度であった．魚類生息や河川生態系に及ぼす長期的あるいは短期的影響という観点からこの程度の水温上昇量がどのような意味を持つのかについては最新の研究成果をもとに整理していく必要がある．

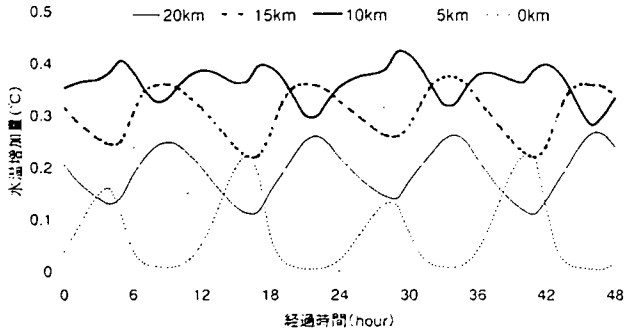


図-5　DHC の導入による水温上昇の計算結果
（上流端流量 20m³/s）

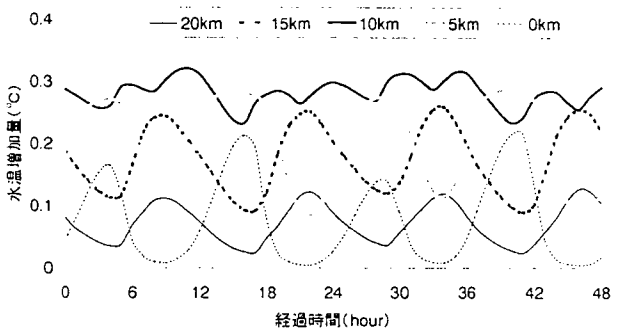


図-6　DHC の導入による水温上昇の計算結果
（上流端流量 50m³/s）

４．結論

今回の検討により，強混合状態においては簡易な１次元の影響予測モデルでも十分な精度の水温予測が可能であることが明らかとなった．また，水熱エネルギー利用の将来シナリオをもとに算出される荒川への排熱量の影響により，今回の検討条件のもとでは，最大で 0.4℃程度の水温上昇になることが明らかとなった．河川水温は気象条件や上流からの流量，河口の水温変動など多くの要因により変化することから，冬期の温熱利用も含めて，年間を通じた水温，水質予測を行う必要がある．そのためには，温度成層の影響を考慮するとともに，境界条件の設定，特に隅田川などの中小河川との間での河川水の交換を適切に取り扱うことが必要である．また，排熱の放流口付近での水温の３次元性や水温変化が生態系に及ぼす影響に関して知見を蓄積していく必要がある．

５．成果物

T.Kinouchi and Y.Kawahara : Measurement and modeling of stream temperatures under tidal variation in Tokyo District, ASCE's 1999 International Water Resource Engineering Conference, 1999.

木内，河原，末次，小林：都市河川感潮域における水熱エネルギー利用が河川水温に与える影響に関する研究，水工学論文集，第 44 巻，1017-1022，2000. 2.

（末次忠司，河原能久，木内豪）

8.6　都市内緑地による温室効果ガス削減に関する調査

研究期間：平11～平13

担当：緑化生態研究室

【要旨】

緑化によるCO_2削減効果を評価するため、緑化樹木のCO_2固定量の算出方法を検討した。樹木の木質部には乾燥重量比にして50%程度Cが含まれ、このCはすべて大気中のCO_2に由来する。したがって、樹木のCO_2固定量は木質部の成長量を算出することにより得られる。そこで、代表的な緑化樹木に対し年輪解析を行い、樹高・幹径の樹齢と対応した成長過程を明らかとし、成長予測式を策定した。この式を基にすれば、特定の樹齢あるいは大きさの樹木1本が、1年間に固定するCO_2量を算出できるため、緑化した樹木の本数と大きさが解れば、緑化事業によるCO_2削減効果の評価が可能となる。

1. はじめに

植物によるCO_2の吸収固定は、地球温暖化の防止に少なからず貢献するものと考えられ、京都議定書では、CO_2排出量の算定に際し、植林による固定量を算入することとされた。しかし、都市化が進み、林業による植林を多く望めない国からは、都市公園や街路樹などの都市緑化による植栽樹木も、CO_2吸収源として算入されることが要望されている[1)]。

算入のためには、植栽樹木のCO_2固定量を、広く実行可能な方法で算出できることが前提とされる。森林については、既にIPCCから算出の原単位となる森林面積当たりの年間バイオマス成長量が提示されている[2)]。しかし、都市緑化による植栽樹木は、森林形状を有しない単木や列状のものが多く、森林の原単位を適用できる範囲は限られてしまうため、樹木本数当たりの原単位設定が必要と考えられる。単木のCO_2固定量算定については、半田らによる研究[3)]があり、樹幹解析により樹木の成長量を明らかにすることにより、CO_2固定量を算出することが可能であることを報告している。しかし、データの蓄積が少なく、未だ有効な原単位の提示に至っていないのが現状である。

都市緑化には、様々な樹種、大きさ（樹齢）の樹木が用いられるため、原単位はそれらに応じたものである必要がある。著者らは、半田らの手法を参考とし、我が国で都市緑化に多用される樹種を対象に、樹幹（年輪）解析を行うことにより、その成長過程を明らかにし、特定の大きさの樹木が、特定の1年間に、あるいはその大きさに達するまでの間に、植物体内に蓄積するCO_2量を推定する算定式を作成した。算定式から得られるCO_2量は、都市緑化によるCO_2固定量算出のための原単位の一部となるものと考えている。

2. 方法

2.1　植栽樹木のCO_2固定量算出の前提条件

2.1.1　算定の対象とする植物体部位

植物は、光合成により大気中のCO_2を体内に取り込み、炭水化物を生成する。そして、炭水化物は、植物体の形成物質として植物全体に蓄積される。しかし、葉は、落葉により比較的短期間に失われるため、ここでは、木質化することにより長期に渡り固定が継続する幹・枝・根をCO_2固定量算出の対象とする。

2.2.2　木質部のC含有量

植物体に含まれるCは、そのほぼ全てが大気中の、CO_2に由来する。木質部のC含有量は、これまでの多くの分析結果から、樹種に関わらず乾燥重量比にして50%程度であることが知られている[3)]。そこで、ここ

では、木質部の乾燥重量を算出までを行うこととする。なお、CO_2固定量は、CO_2とCの分子量の比から乾燥重量に1.83を乗じたものとなる(注1)。

2.2. 木質部成長量（材積増加量）の算出方法

2.2.1 幹の年間材積増加量の算出方法

幹については、樹幹解析により得られる樹齢別の樹高と各高さの幹半径から年間材積増加量を算出し、別途求める乾材比重を用いて乾燥重量に変換する。樹幹解析は一般的な方法[5]に従い、高さ0.2mから1.0m毎の高さの年輪幅を計測する（図1参照）。

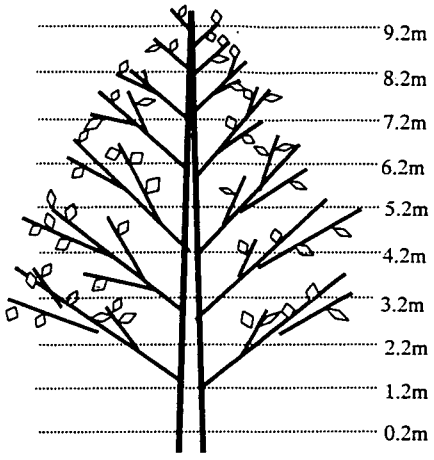


図1 樹幹解析の階層

2.2.2 枝・根の年間材積増加量の算出方法

枝・根の成長は、年輪による解析は困難であるため、幹と同様の割合で成長すると仮定し、別途求める幹・枝・根の部位別乾燥重量比を、幹の年間材積増加量に乗じることにより、枝・根の年間材積増加量とする。

2.2.3 部位別乾燥重量比および乾材比重の算出方法

樹幹解析供試木の幹・枝・根それぞれの全乾燥重量を測定し、各部位の乾燥重量比を算出する。また、樹幹解析から得られる幹の材積量と幹の乾燥重量から、乾材比重(g/cm^3)を算出する

2.3. 樹幹解析供試樹木

街路樹としての使用本数の多い樹種から、ケヤキ(Zelkova serrata)、イチョウ(Ginkgo biloba)、プラタナス(Platanus orientalis)の3種を選定し(注2)、各5本を供試木とした。全供試木の形状寸法を表1に示す。

3. 結果

3.1 重量測定結果

全供試樹木の乾燥重量、部位別乾燥重量比、および、乾材比重を表2に示す。

3.2 樹幹解析結果

樹幹解析の結果を、ケヤキ1を例として樹幹解析図の形にして図2示す。図2中の折れ線は各年の年輪で

表1 樹幹解析供試樹木一覧

樹種		ケヤキ					イチョウ					プラタナス				
植栽地		茨城県東茨城郡小川町下吉影					茨城県鹿島郡鉾田町鳥栖新田					茨城県つくば市福田坪				
樹木No.		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
形状寸法	樹高 m	10.0	9.0	8.0	7.5	7.0	7.3	8.0	6.0	5.5	9.0	8.0	9.0	6.0	7.0	9.5
	幹周(0.2m高) cm	102.5	92.0	75.0	71.0	78.0	53.5	65.0	47.0	32.0	66.0	66.0	59.0	40.0	51.0	61.0
	幹周(1.2m高) cm	90.0	74.0	61.5	54.0	64.0	41.0	49.5	36.0	25.5	52.5	55.0	47.0	31.0	41.0	53.0
	枝張り (最大) m	9.3	8.3	7.7	6.2	8.3	3.9	4.9	3.0	3.2	5.2	6.6	6.8	5.3	4.6	6.7
	枝張り (最小) m	7.1	5.5	6.2	5.5	6.5	3.1	4.0	2.2	2.2	4.6	6.2	6.4	4.6	3.8	6.2

注1) CO_2の分子量は44、Cは12なので、CO_2固定量は乾燥重量の50%の44/12、すなわち1.83倍となる。

注2) 1997年の全国の街路樹調査で、使用本数の順位はイチョウ1位、ケヤキ3位、プラタナス類6位であり、3種の合計本数は全街路樹本数の19.8%となっている[6]。

表2 部位別乾燥重量・乾燥重量比・乾材比重の測定・算出結果

樹種		ケヤキ					イチョウ					プラタナス				
伐採解体年月日		1999.11.10-12					1999.11.13-16					1999.11.7-8				
樹木No.		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
乾重(kg)	幹	117.7	82.2	51.8	45.4	55.6	19.9	28.4	12.4	6.3	37.6	49.6	40.5	13.1	26.0	53.8
	枝	259.3	119.7	66.2	46.5	69.7	7.3	11.4	4.4	2.7	18.5	36.5	26.7	9.5	12.5	32.8
	根	70.7	64.8	34.6	30.5	36.0	20.5	11.5	5.7	3.1	23.0	22.2	16.9	7.0	10.8	20.5
乾重比(%)	幹	25.3	30.8	33.9	37.1	34.5	41.6	55.4	55.1	51.6	47.5	45.8	48.2	44.3	52.7	50.2
	枝	58.7	44.9	43.4	38.0	43.2	15.3	22.2	19.6	22.1	23.4	33.7	31.7	32.1	25.4	30.6
	根	16.0	24.3	22.7	25.0	22.3	43.1	22.4	25.3	26.2	29.1	20.5	20.1	23.6	21.9	19.1
乾材比重(g/cm³)[illegible]		0.66	0.71	0.70	0.68	0.69	0.49	0.47	0.53	0.55	0.50	0.70	0.69	0.61	0.67	0.66

あり、ケヤキ1は樹齢26と推定される。また、折れ線と縦・横の軸に囲まれる部分が各樹齢での幹の半分の断面形状を表しており、この断面の縦軸を回転軸とした回転体の体積を算出することにより各樹齢の材積量が算出される。このようにして算出したケヤキ5樹木の樹齢と幹材積量の関係を図3に示す。

3.3 材積成長量算出結果

前項で算出した幹の材積量に、表2の乾材比重を乗じて乾燥重量とし、さらに同表の部位別乾重比から枝・根の乾燥重量を算出し、各樹木の全木質部乾燥重量を算出したものを図4.1に示す。また、同様な操作をイチョウ、プラタナスについて行い木質部乾燥重量を算出したもの図4.2および図4.3に示す。

4. 算定式の作成

4.1 樹木形状寸法項目と木質部乾燥重量の関係

以上の結果から、植栽樹木の特定の樹齢での木質部の乾燥重量が推定可能となる。しかし、都市に植栽される樹木個々の樹齢を、樹幹解析などの方法で推定することは実質的に困難である。そのため、容易に測定可能な樹木形状データから木質部乾燥重量を導き出す必要がある。

通常、植栽工事において、表示される樹木形状寸法の項目は、樹高、胸高幹周（高さ 1.2m）、枝張であり、これらの項目は、計測が比較的容易であり、計測値が、工事記録や各種の台帳として記録されていることが多い。そこで、まず、このような、一般的な形状表示項目と木質部乾重との相関関係を確認する。

一般に樹木各部位の重量等の物理量(Y)と、樹木形状寸法(X)との間には、相対成長式 $Y=aX^b$（a と b は定数）が成り立

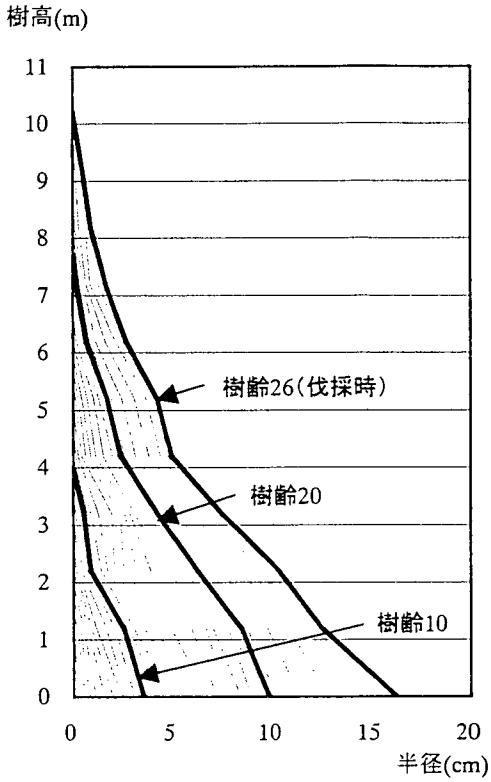


図2 ケヤキ1の樹幹解析図

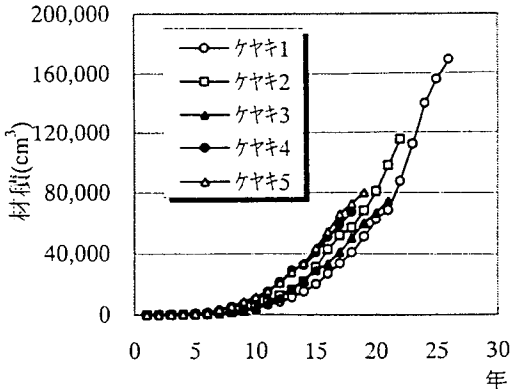


図3 ケヤキ幹材積成長

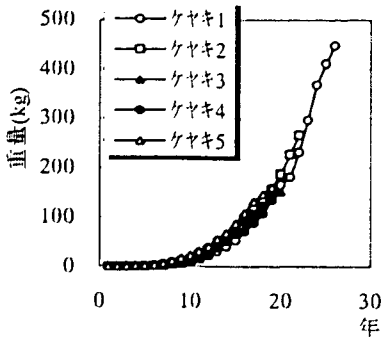


図4.1 ケヤキ木質部成長量

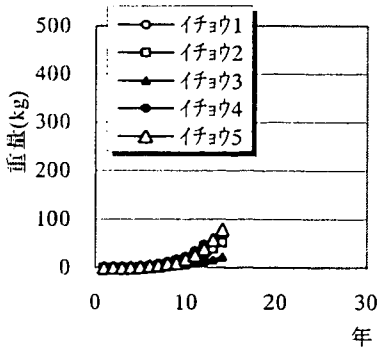


図4.2 イチョウ木質部成長量

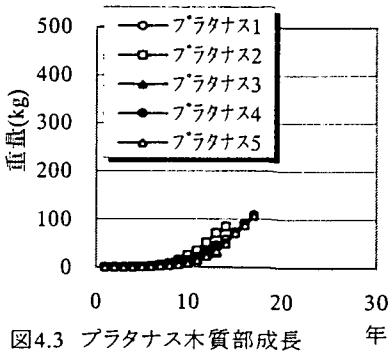


図4.3 プラタナス木質部成長量

表3 樹木形状寸法項目と木質部乾燥重量の相関関係

	樹高	胸高直径	0.2m幹周	1.2m幹周	胸高断面積	枝張
ケヤキ(n=5)	$y=0.1914x^{3.3086}$ $R^2=0.8243$	$y=0.0437x^{2.8017}$ $R^2=0.9308$	$y=7E-05x^{3.3785}$ $R^2=0.9865$	$y=0.003x^{2.6432}$ $R^2=0.9833$	$y=0.0614x^{1.4009}$ $R^2=0.9308$	$y=0.5492x^{3.0362}$ $R^2=0.4873$
イチョウ(n=5)	$y=0.0311x^{3.5998}$ $R^2=0.96$	$y=0.0607x^{2.5625}$ $R^2=0.9451$	$y=0.0027x2.4085$ $R^2=0.9185$	$y=0.0035x^{2.5003}$ $R^2=0.9387$	$y=0.0827x^{1.2813}$ $R^2=0.9451$	$y=2.1212x^{2.2551}$ $R^2=0.8886$
プラタナス(n=5)	$y=0.2439x^{2.7403}$ $R^2=0.8341$	$y=0.1838x^{2.2557}$ $R^2=0.9868$	$y=0.0009x^{2.8006}$ $R^2=0.9653$	$y=0.0076x^{2.3955}$ $R^2=0.9788$	$y=0.2414x^{1.1278}$ $R^2=0.9868$	$y=1.5991x^{2.1605}$ $R^2=0.6279$
3樹種(n=15)	$y=0.0131x^{4.269}$ $R^2=0.6539$	$y=0.0342x^{2.8603}$ $R^2=0.9568$	$y=0.0003x^{2.9946}$ $R^2=0.9266$	$y=0.0013x^{2.8297}$ $R^2=0.9551$	$y=0.0484x^{1.4301}$ $R^2=0.9568$	$y=1.7936x^{2.3015}$ $R^2=0.8142$

つことが知られている[7]。そこで、樹幹解析供試樹木15本について、木質部乾燥重量と、樹高、幹周、枝張のほか、いくつかの形状寸法項目との関係を、相対成長式を当てはめ、実測値との相対関係を確認した。結果を表3に示す。

表3より、胸高直径など幹の太さに関わる形状が、いずれも高い相関を示していることがわかる。また、枝張はケヤキ、プラタナスでの相関が低く、樹高は個々の種では、良い相関が認められるが、3樹種のデータでは相関が低くなっている（図5）。一方、胸高直径では、各樹種、全樹木でも高い相関が見られる（図6）。このような結果から、乾燥重量を推定する項目として、3樹種に共通の形状寸法項目となりうるという点からは、幹の太さに関わる項目が適していると言える。

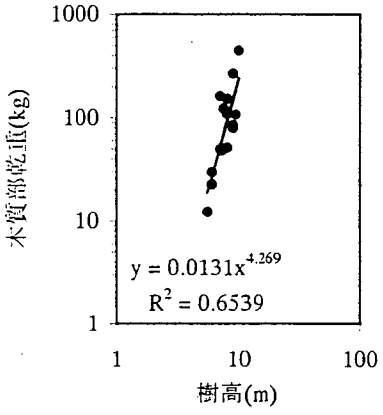


図5 樹高と木質部乾重の関係（3樹種）

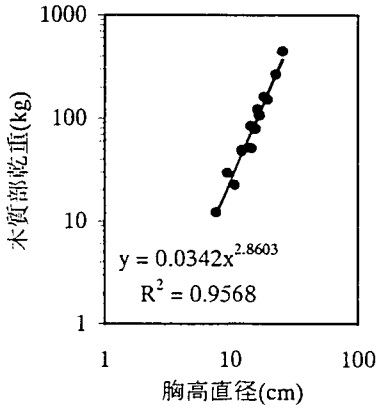


図6 胸高直径と木質部乾重の関係（3樹種）

表4 樹高・胸高直径と木質部乾燥重量の相対成長式（樹幹解析全データ）

	樹高	胸高直径
ケヤキ	$y=0.0192x^{4.1842}$ $R^2=0.9409$	$y=0.1596x^{2.2961}$ $R^2=0.9657$
イチョウ	$y=0.0128x^{3.5402}$ $R^2=0.9177$	$y=0.0799x^{2.2494}$ $R^2=0.925$
プラタナス	$y=0.0104x^{3.9664}$ $R^2=0.9257$	$y=0.1271x^{2.155}$ $R^2=0.9631$
3樹種	$y=0.0135x^{3.9938}$ $R^2=0.8901$	$y=0.1179x^{2.2893}$ $R^2=0.9465$

4.2 樹幹解析データを用いた相関解析

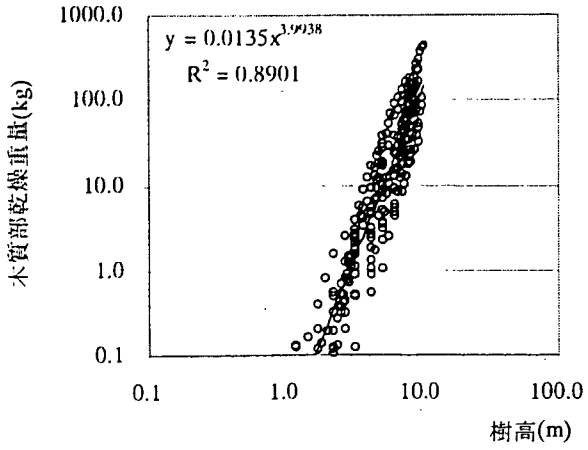


図7 樹高と木質部乾重の関係
(樹幹解析全データ)

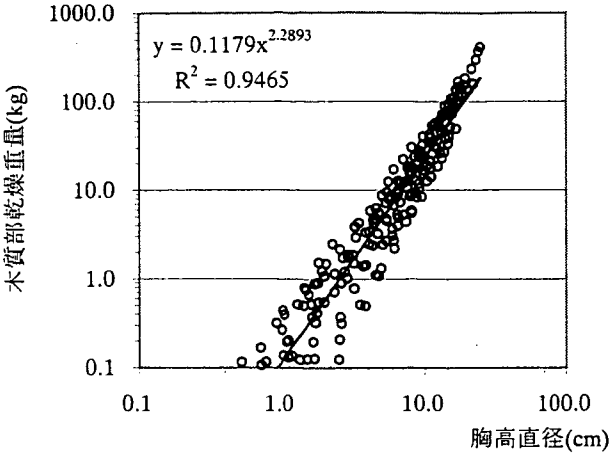


図8 胸高直径と木質乾重の関係
(樹幹解析全データ)

前項において良い相関が得られた項目である樹高と胸高直径について、樹幹解析から得られた全ての値を用いて相対成長式を求めた。結果を表 4 に示す。両項目とも、各樹種、また 3 樹種の全データにおいても、高い相関が得られた。散布図の例として、3 樹種全データのものを図 7 および図 8 に示す。

これらの式からは、特定の樹高あるいは胸高直径の樹木が、その大きさになるまでに蓄積した、木質部乾燥重量、すなわち CO_2 固定量の算出が可能である。

しかし、この式から、特定の樹高あるいは胸高直径の樹木が、一年間にどのくらい成長するかを明らかにするには、樹高、胸高直径の年間成長量を明らかにする必要がある。

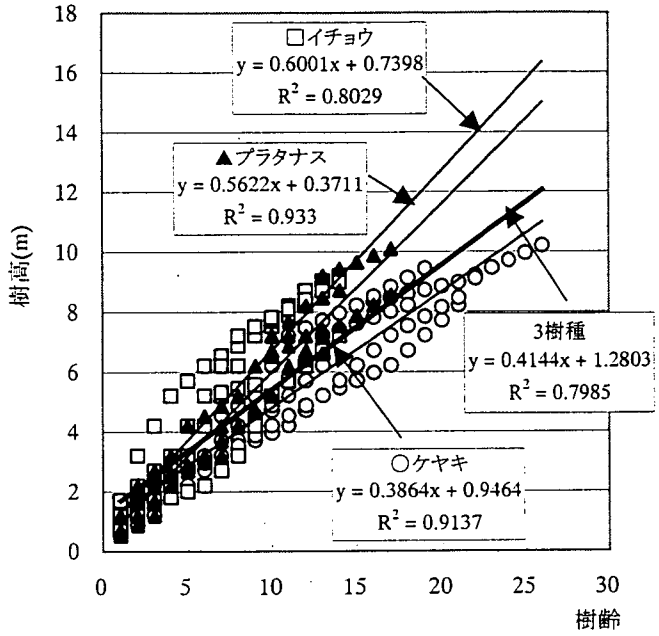


図9 樹高と樹齢の関係

4.3 樹高・胸高直径と樹齢の相関関係

樹幹解析の全データを用いて、樹高と樹齢の関係を見たものが図 9、胸高直径と樹齢の関係を見たものが図 10 である。

図 9 より、樹高は樹種毎に樹齢と直線的な関係があると言える。しかし、3 樹種のデータを合わせみると、相関は低くなる。それに対して、図 10 からは、胸高直径と樹齢との直線関係は、3 樹種とも非常に近似したものとなっており、先の 15 樹木の解析からも示唆されたように、ここでも、一つの回帰式により、3 樹種について胸高直径と樹齢の関係を示すことができる。

さて、これらの関係からは、両項目とも一定の速度で成長をしているように見えるが、実際には、毎年の気候の変動などにより、各年の成長量は、違ったものとなる。また、樹齢によってもその成長速度に差があるものと思われる。ここでこの式が意味するものは、解析対象とした樹木のこれまでの成長を、平均的速度で表したものと解釈される。

4.4 CO_2固定量の推定

以上の解析から、木質部乾重と樹高・胸高直径と樹齢の関係を整理すると次の式で表される。

$Y=a\{(X+c)^{b}-X^{b}\}$

Y：木質部乾燥重量　X：樹高（または胸高直径）

a、b：木質部乾燥重量と樹高（または胸高直径）との相対成長式から得られる定数

c：樹齢との回帰式から得られる樹高（または胸高直径）の年間成長量

ケヤキの樹高を例にして述べると、平均的な1本のケヤキが、これからの1年間に平均的な成長をするとした場合、期待される樹高成長量は、図9の回帰式（y=0.3864x＋0.9464）から、0.3864mである。

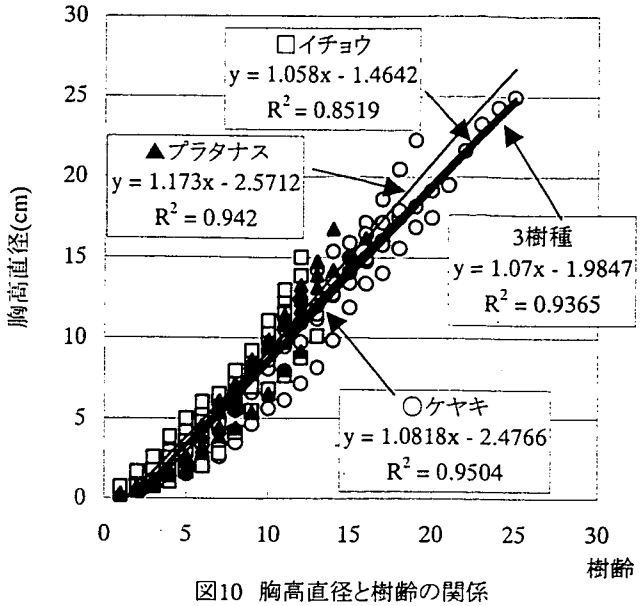


図10 胸高直径と樹齢の関係

樹高 Xmのケヤキが 1 年間に成長すると期待される木質部成長量は、樹高 X(m)のケヤキと、樹高 X＋0.3864(m)のケヤキとの木質部乾重の差となり、表 4 のケヤキ樹高の相対成長式 $y=0.0192x^{4.1842}$ から、その差を求める式は、$Y=0.0192\{(X+0.3864)^{4.1842}-X^{4.1842}\}$ となる。同様にケヤキの胸高直径については、$Y=0.1596\{(X+1.0818)^{2.2961}-X^{2.2961}\}$ が得られる。これらの式を用いて、樹幹解析を行ったケヤキ 5（樹高 7.0m、胸高直径 20.4cm）の木質部乾燥重量を算出すると、樹高からは 16.3kg/年，胸高直径からは 20.4kg/年という値が得られた。ちなみに 1.83 倍し CO_2 に換算すると、それぞれ、30.4kg/年、37.4kg/年となる。

5. おわりに

以上述べてきたように、CO_2 固定量算定の原単位となる、特定の樹高または胸高直径における樹木の年成長量（木質部乾燥重量）を算出した。しかしながら、この原単位については、わずかな樹種と比較的若齢の樹木に限定される、適応の拡大には、他の樹種や大木での解析が必要とされるほか、気候や地域の差による変化などの補足データが必要である。

また、都市内全域の植栽樹木の CO_2 固定量を算出しようとする場合、植栽樹木の樹種や大きさ、総本数をどのように把握するかが重要な問題であり、原単位設定も、測定が可能でなければ、その役割を果たし得ないこととなってしまう。本稿で検討した樹木単位の原単位の設定は、類似の成長特性を有する植物種の統合や、様々要因による差の簡単な補正方法などが整備されなければならないと考えている。

（藤原）

【参考文献】

1) 藤原宣夫：COP4 報告-吸収源としての土地利用・森林に関する討議結果について-、土木技術資料 40-1、pp.68-71、1999

2) IPCC：Revised 1966 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories, Workbook(volume 2), pp.5.22, 1996

3) 半田真理子ほか：道路緑化樹木の二酸化炭素固定に関する研究、土木研究所資料、3059 号、建設省土木研究所、1992

4) 三浦伊八郎、西田吃二：木材の元素組成、「木材化学」、丸善出版、pp.35-38、1933

5) 梶原幹弘：樹木の生長量の測定、「森林計測学」大隅眞一ほか共著、養賢堂、pp.118-138、1971

6) 藤原宣夫、田中隆、木部直美：わが国の街路樹Ⅳ、土木研究所資料、3666 号、建設省土木研究所、1999

7) 佐藤大七郎：陸上植物群落の物質生産Ⅰa－森林－、共立出版、1973

走行支援道路システム（AHS）に関する研究開発

9．走行支援道路システム（ＡＨＳ）に関する研究開発

研究期間：平成 10～12 年度
プロジェクトリーダー：高度道路交通システム研究室長
岩崎　泰彦

1.　研究の背景：

現在、交通事故、交通渋滞等の道路交通問題や排出ガス、騒音等の交通環境問題の抜本的な解決のため、先端的な情報通信技術を活用した高度道路交通システム（ITS：Intelligent Transport Systems）について、わが国を始めとする欧米等各国において世界的な取り組みが行われている。ITS は最先端の情報通信技術、自動車技術等と道路インフラ技術を連携させることによって、人と車と道路を一体のシステムとして構築するものであり、交通安全、交通渋滞等の問題解決の切り札であると同時に、自動車、情報通信等の広範な分野の新産業創出に大きな効果をもたらすものと期待されている。

わが国では、建設省を始めとする関係 5 省庁（運輸省、警察庁、通商産業省、郵政省）が 1996 年 7 月に日本での ITS のマスタープランとなる「ITS 推進に関する全体構想」を策定し、これに基づいて研究開発と実用化を推進している。

本研究で対象とする走行支援道路システム（AHS: Advanced Cruise-assist Highway System）は、ITS を構成する 9 つの開発分野のうちの主要な技術であり、ドライバーに対する道路交通状況に関する情報提供、さらには運転制御支援によって、交通安全、交通渋滞等の道路交通問題を解決することが期待されている。土木研究所では 1989 年より基礎的な研究開発に着手し、上信越自動車道での実道上公開走行実験（1996 年 9～10 月）を実施してきた。1997 年からはこれらの成果を踏まえ、走行支援道路システムの実用化に向けた研究開発に積極的に取り組んできている。

2.　研究の目的：

本研究では、事故の削減による道路交通の安全性向上を目的とした走行支援道路システムの実用化を目指し、システムに求められる機能や性能（リクワイアメント）に関する研究、センサ・通信等の要素技術の開発、システムの設計、システムの評価を実施している。

走行支援道路システムとは、ドライバーに対して見えない障害物や交差車両等に関する情報を提供し、また警報や操作支援を行うことにより事故の削減を図るシステムであり、7 つのユーザサービス（前方障害物衝突防止支援サービス、カーブ進入危険防止支援サービス、車線逸脱防止支援サービス、出合い頭衝突防止支援サービス、右折衝突防止支援サービス、横断歩道歩行者衝突防止支援サービス、路面情報を活用した車間保持等支援サービス）を提供する。

3.　これまでの研究成果：

走行支援道路システムの 7 つのユーザサービスにおける情報提供、警報、操作支援の方法やタイミング、システムやシステム構成機器に求められる機能・性能・信頼性等に関する定量的要件をまとめたリクワイアメントを作成した。

リクワイアメントに基づいて、安全性や信頼性を考慮にいれたシステムの機器構成や機能配置を設計するとともに、システム構成機器である道路状況や路面状況を把握するセンサ、車両に車線の中央位置等を提供するレーンマーカ、車両に情報を提供する通信システム等の開発を行ってきた。

これまでに設計・開発してきた機器を構成要素とする実証実験システムを土木研究所構内に構築し、ユーザサービスの事故回避に対する有効性の検証、ドライバーの受容性の評価等を行う総合的な実験を平成12年度に予定している。

－走行支援道路システム（ＡＨＳ）に関する研究開発－

個別研究課題目次

9.1.1 ＩＴＳ全般に関する調査（その１）…… （高度道路交通ｼｽﾃﾑ研究室）…316

9.1.2 ＩＴＳ全般に関する調査（その２）…… （高度道路交通ｼｽﾃﾑ研究室）…320

9.2 コンセプト及びアーキテクチャの設計と評価に関する調査…… （高度道路交通ｼｽﾃﾑ研究室）…322

9.3 道路状況把握道路システムに関する調査…… （高度道路交通ｼｽﾃﾑ研究室）…324

9.4 路面状況把握道路システムに関する調査…… （高度道路交通ｼｽﾃﾑ研究室）…326

9.5 車両誘導制御支援道路システムに関する調査…… （高度道路交通ｼｽﾃﾑ研究室）…328

9.6 走行車両位置検出支援道路システムに関する調査…… （高度道路交通ｼｽﾃﾑ研究室）…330

9.7 最先端の通信方式を利用した道路システムに関する調査…… （高度道路交通ｼｽﾃﾑ研究室）…334

9.8 システムの設計に関する調査…… （高度道路交通ｼｽﾃﾑ研究室）…338

9.9 システムの評価に関する調査…… （高度道路交通ｼｽﾃﾑ研究室）…342

9.1.1　ＩＴＳ全般に関する調査（その１）

研究期間：平９～平１２

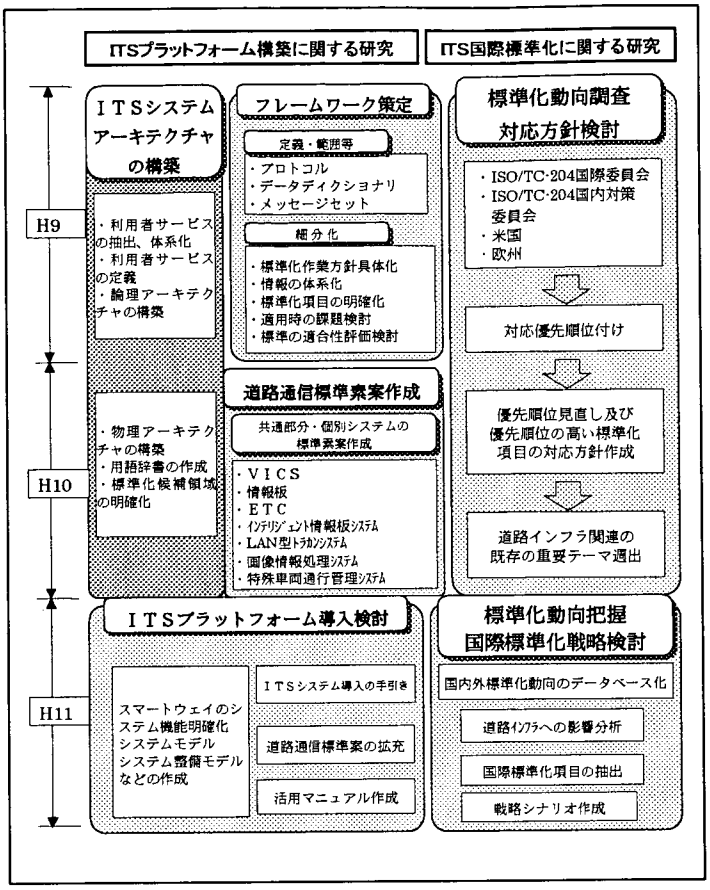
担当：高度道路交通システム研究室

【要旨】

本研究は、道路管理者個々のＩＴＳシステムに共通に適用可能な通信標準や設計モデルなどのＩＴＳプラットフォームを検討し、システムの互換性、相互運用性、相互接続性を向上させ、また、ＩＴＳ関連の国際標準との整合性を高め、ＩＴＳ技術を用いた道路インフラ整備の効率的、経済的な推進に資することを目的とする。

１１年度は、地建等で検討中の個別システムについて、システムアーキテクチャを用いて通信要件を見出し、通信プロトコル、データディクショナリ及びメッセージセットの標準案を構築した。

また、ＩＳＯや欧米の標準化動向の把握を行い、ＩＴＳの標準化の検討がなされているテーマのうち重要なテーマと新規に標準化提案すべきテーマを抽出し、国際標準化の戦略検討を行った。



１．研究目的

個々の道路管理者独自の流儀で作成された情報システムは、システム構成や扱う情報の定義、通信規約等が異なるため、道路管理者間の情報交換の調整に多大な時間を要するなど、道路管理の効率化や国民サービスの充実に支障となりつつある。この問題に対応し、道路管理者個々のＩＴＳシステムの統合的、効率的、経済的な整備推進に資するため、本研究は、各道路管理者のＩＴＳシステム共通に適用できる通信標準や設計モデルなどのＩＴＳプラットフォーム（システム共通基盤）について、国際標準との整合性に留意しつつ検討し、ＩＴＳシステムの互換性、相互運用性、相互接続性の向上を図ることを目的とした。

２．研究方法

２．１　ＩＴＳプラットフォーム構築に関する研究

２．１．１　スマートウェイのシステム構成の明確化

平成１０年度に概念が提示されたスマートウェイの機能及びシステム構成を明確化し、システム設計時に参照すべき、次の６種類のモデルを作成した。

（１）機能モデル：システムアーキテクチャで示される機能を詳細化して明示

（２）システムモデル：個別のシステムで必要となる機器構成を明示

（３）機能配置モデル：機能を実際の業務遂行組織（局、事務所等）に割り付けたもの

（４）システム配置モデル：システムで必要な機器構成を実際の業務遂行組織に割り付けたもの
（５）機能整備モデル：どの時点で機能を持たせるかの整備イメージを持たせたもの
（６）システム整備モデル：どの時点で必要な機器を配備するかの参照とするもの

２．１．２　ＩＴＳシステム導入の手引きの作成

各道路管理者がＩＴＳの個別システムの仕様を決定する場面を想定し、システムのライフサイクルモデルに基づくコスト算定方法、整備効果の推計方法、上記の各モデルや日本のＩＴＳシステムアーキテクチャ（1999年11月：ＩＴＳ関連５省庁作成）の趣旨を達成する方法等を簡明に示したＩＴＳシステム導入の手引きを作成した。

２．１．３　道路通信標準案の拡充

昨年度作成した道路通信標準素案について、以下の観点から、必要な通信要素の追加修正を行った。

①道路管理者の平成１２年度のシステム調達から現地導入が可能なこと

②国際標準と矛盾無く、国際標準の場に提案し議論できる技術レベルを保持すること

２．１．４　道路通信標準活用マニュアルの作成

実際のシステム整備において道路通信標準素案を導入するため、既存システムからの移行方法、等をまとめた活用マニュアルを作成した。

２．１．５　ＩＴＶ画像システムの基本設計

道路管理の一層の効率化に向け、各道路管理者の収集・管理しているＩＴＶ画像を複数の道路管理者間で相互交換可能な画像システムを整備する必要がある。この際、既存システムの改良や新規アプリケーション整備を、拡張性に配慮して効率的に行うために、基本設計（システムの機能と情報を明確化し、ユーザ（道路管理者）とのインタフェースの仕様を定める設計）の試設計を行った。

２．２　ＩＴＳ国際標準化に関する研究

２．２．１　国内外の標準化動向把握

ＩＴＳの標準化に係る国際・国内会議の審議内容、欧州、米国等の標準化機関や国内関連機関での検討状況については、４９のワーキングに着目した上で最新情報を収集し、動向把握を行った。また、データベース候補の約２００の標準化テーマから１６３のテーマを抽出し、この関係資料を標準化活動・ＩＴＳ推進・研究の支援などに有効な情報として活用できるように、検索情報を付加してデータベース化を行った。

２．２．２　標準化が道路インフラに及ぼす影響分析

.各標準化テーマについて提出された案が標準化された場合の市場及びインフラ整備に与える影響を抽出し、好ましい日本の標準化戦略と対抗案の要件を整理し、総合評価を行った。

２．２．３　ＩＴＳにおける国際標準化戦略作成

２．２．２国際標準化が道路インフラに及ぼす影響の分析を行ったテーマのうち最も重要度の高い５テーマ及び道路関連ＩＴＳ施策に係る国際標準化すべき項目の設定におけるテーマについて、国内外の標準化動向把握における国際標準化の最新動向を踏まえつつ、関連するＩＳＯ／ＴＣ２０４の国内ワーキンググループと密接に連携を図りながら、ＰＷＩ（予備テーマ提案；新規テーマ提案の前段階）もしくは代替案として提案するための資料を作成した。

３．研究結果

３．１　ＩＴＳプラットフォーム構築に関する研究

３．１．１　スマートウェイのシステム構成の明確化

スマートウェイを構成する具体の個別システムとしては、地方建設局等におけるシステムアーキテクチャの展開状況を検討した結果、表（Ａ）の１２個別システムのプラットフォームの優先度が高いことがわかった。

これらについて、２．１．１の６つのモデルを作成したところ、表（B）の８の関連システムを含めた計２０の個別システムに適用可能な汎用性の高いモデルが得られた。

表(A)

・道路関連情報事前提供システム	・過積載監視システム
・駐車場情報提供システム	・道路行政支援システム
・公共交通情報提供システム	・道路環境情報システム
・高速バス情報提供システム	・災害対応システム
・他主体情報提供システム	・寒冷地用ＡＨＳシステム
・特車行政手続き対応システム	・突発事象検知システム

表(B)

・商用車ＥＤＩ対応システム	・事象対応交通管理システム
・道路関連情報提供システム	・ＥＴＣの汎用利用システム
・最適経路情報システム	・公共交通運行支援システム
・交通管制システム	・歩行者支援システム

３．１．２　ＩＴＳシステム導入の手引きの作成

ＩＴＳの情報通信技術は、３～５年も経つと陳腐化で価値を失う一方で新しい技術はこれまでの価値／コストの常識を一掃するような性格を有する。また、システム導入時よりも維持更新費用の方が巨額となるケースがほとんどであり、システムのライフサイクルモデルに基づいた費用算定が有効であることがわかった。また、費用便益分析が適用困難なケースも多く、投資価値判断（Value for Money）の必要性が高いことがわかった。このため、ライフサイクルコスト、システム拡張時の手戻りリスクなど、システムの、コスト、リスク、オプション（将来の便益増加期待）に関係する事項と、その簡便な取り扱い方法についてまとめた手引きの素案を作成した。

３．１．３　道路通信標準案の拡充

これまでの素案について、地方建設局等で導入する観点から、追加・見直しを行い、以下の成果を得た。データディクショナリについては、複数のアプリケーションにおけるデータ利用可否の判定をより的確に行うため、精度、品質、メソッド（計測方法）を追加するとともに、互いに関連するデータをまとめた構造体型のデータ定義方法を採用した。データディクショナリの数は、道路関連情報関係６８６項目、管理諸元関係２６項目、機器制御関係１８６項目、総数９９８項目となった。メッセージセットについては、新たにコンポーネント概念（複数のシステムについてその論理的構成要素：コンポーネントに着目した整理体系）を開発、適用し、より汎用性を高めることができた。また、プロトコルについては、下位層と上位層を大きく２分し、その組み合わせをアプリケーションの通信要件毎に選定する方法が有効であることがわかった。

３．１．４　道路通信標準活用マニュアルの作成

各道路管理者が有利となる標準類の選択を行い、円滑な移行が行える活用マニュアルを作成し、各道路管理者の意見を聴いたところ、現状では、通信技術の理解はほとんど進んでおらず、当マニュアルのさらなる簡素化や具体的な適用事例を示す必要があることがわかった。

３．１．５　ＩＴＶ画像システムの基本設計

基本設計では、各道路管理者がシステム整備を行う際、目指すサービスに対し具備すべき機能、性能、品質を明示することであるが、現在はメーカ間で内容が著しく異なるなど、再利用特性（他の道路管理者が一部分を利用すること）が著しく低下している。このため、基本設計ステージの明確化のため、ＩＴＶ画像システムを例に、実際に適用な試設計を行った。この結果、当該システムが具備すべき機能とこれが扱う情報が明確化されることにより、調達に必要なシステムの標準的な機能要求、ユーザである道路管理者とのインタフェースの基本的な仕様が１０パターン程度に整理できることがわかり、設計業務の簡素化に役立つことがわかった。

３．１．６　今後の課題

道路通信標準案については、机上及び関係者等への意見聴取による実用性の確認を行っているが、広く適用される標準として策定することに先立ち、実装による検証を行っていく必要がある。

３．２　ＩＴＳ国際標準化に関する研究

３．２．１　国内外の標準化動向把握

ＴＣ２０４、米国、欧州及び国内の標準化検討組織における標準化の動向を把握した。これにより、道路イン

フラ関連の国際標準化戦略立案に必要な周辺状況等を的確に把握できたほか、機敏な対応が必要な動向に対し適切に対処することができた。

３．２．２　標準化が道路インフラに及ぼす影響分析

国際標準化が検討されている道路インフラ関連テーマの重要度を数値化し、特に重要な下記の20テーマについては影響分析を実施した。これにより、国際標準と整合を図るために必要となる活動を重点的かつ的確に進めていくための基準となる指標が得られた。

	テーマ	検討組織
1	AHS	AHSRA
2	Roadside Traffic Impediment Warning Systems	WG14
3	Data Interfaces between Centers for TICS	WG9
4	Data Exchanges involving Roadside Modules in TICS	WG9
5	Data Dictionary for Traffic Management, Information and Center	WG9
6	NTCIP - Global Object Definitions	AASHTO
7	NTCIP - Object Definitions for Dynamic Message Signs	AASHTO
8	Medium Range Pre-Information	WG10
9	TTI Messages via Traffic Message Channel	WG10
10	TTI Messages via DSRC , Data Specification	WG10
11	TTI Messages via Cellular Networks	WG10
12	Stationary Dissemination Systems for Traffic and Traveler Information	WG10
13	User Services Integration for Traffic and Traveler Message Lists	WG10
14	TTI over high data-rate broadcast digital bearers	WG10
15	TTI Conceptual Model Architecture & Terminology	WG10
16	ITS Data Dictionaries Guidelines	IEEE
17	Standard for Data Dictionaries for ITS	IEEE
18	Standard for Message Set Template for ITS	IEEE
19	TICS Handling & Storage of Secure Video Images	Ad-hoc(ﾋﾞﾃﾞｵｲﾒｰｼﾞ)
20	Dedicated Short Range Communication	WG15

３．２．３　ＩＴＳにおける国際標準化戦略作成

重要テーマ及び緊急テーマについて、国際標準化活動に必要な資料の作成及び戦略の検討を実施した。これにより、当面の具体な国際標準化活動方針が明確化された。

３．２．４　今後の課題

ＩＴＳに関するＩＳＯ等の場における標準化に関する議論は、国際的に相次ぐ新技術の開発を背景に継続的かつ活発に行われており、常に動向が変化しつつある。従って、道路インフラ整備者たる道路管理者が実施するインフラ調達に際して発生が想定される国際問題を回避し、円滑なインフラ整備を進めていくためには、今後とも国内外の標準化動向を継続的に把握するとともに、ＩＴＳに関する技術開発動向についても把握し、これらを迅速に分析するとともに、道路インフラに影響がある動向に対しては、機敏かつ的確に必要となる対応を実施していく必要がある。

４．主な研究成果物

１）Tadashi Okutani,Isao Sekine, Development of Road Communication Standards in Japan, Sixth World Congress on Intelligent Transport Systems, Toronto ,1999.11

２）道路通信標準に関する最近の取り組み　建設マネジメント技術　ｐｐ２０～２３　２０００年３月号（財）経済調査会

（岩崎、奥谷、池野）

9.1.2　ＩＴＳ全般に関する調査（その２）

研究期間：平 8～12

担当：高度道路交通システム研究室

【要旨】

本研究は ETC、VICS、適正車速・車間保持システムといった ITS アプリケーションが導入された場合の交通流に与える効果を、交通流ミクロシミュレーション等を用いて定量的に評価し、ITS 導入展開シナリオを作成する上での基礎資料とすることを目的としている。過年度までの研究では、適正車速・車間保持を導入した場合のサグ部における渋滞解消効果の基礎検討を行い、システム導入の有効性を確認した。11 年度は、ETC の導入による料金所渋滞の軽減効果、適正車速・車間保持サービスの導入によるサグ部渋滞の軽減効果の算定を行った。

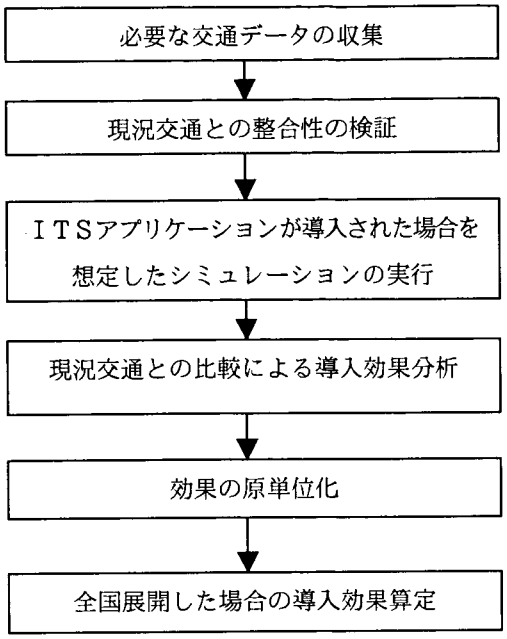


図１　ＩＴＳ導入効果分析の流れ

1.研究方法

交通流シミュレーションを用いた ITS アプリケーション導入効果分析の流れを図１に示す。まず、現状の交通流を把握するために、導入効果を把握したい特定の箇所（料金所あるいはサグ部等）における各種交通データ（交通量、平均速度、渋滞長、渋滞時間、車頭間隔、車線利用率等）を収集する。次に、収集されたデータを入力値として、特定箇所のシミュレーションを実行し、シミュレーション結果と実際の交通現象との整合性を検証し、必要であればシミュレーションモデルのパラメータの調整を行う。次に ITS アプリケーションのパラメータ（ETC 料金所の通過時間、適正車速・車間保持サービスにより制御される車頭間隔時間等）を仮定し、これを用いてシミュレーションを実行し、現況交通現象と比較することによって、特定箇所の ITS アプリケーションの導入効果を算定する。さらに ITS アプリケーション対応車の混入率、交通流の制御方法等と渋滞解消効果との関係を導出し、効果の一般化（原単位化）を行う。これを用いて ITS アプリケーションが全国展開した場合の導入効果を算出する。

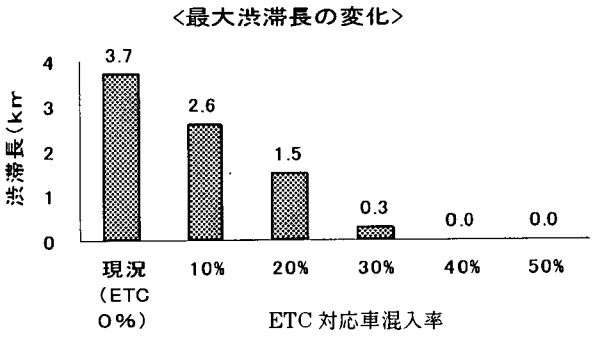


図２　東名高速東京料金所における ETC の渋滞解消効果

2. 研究結果

2.1 ETC 導入にともなう料金所渋滞の解消効果の計測

首都圏にある料金所の中から、渋滞回数が多く、かつ料金所の３つのタイプ（通行券の受け取りのみのタイプ、均一料金徴収タイプ、距離帯別料金徴収タイプ）が網羅されるように９箇所の料金所を選定し、ETC 導入にともなう料金所渋滞解消効果の計測を行った。結果の一例を図２に示す。図は平成 10 年 2 月 15 日における東名高速道路東京料金所における渋滞に対し、ETC が導入された場合の最大渋滞長の変化を ETC 対応車の混入率別に見た物である。図より混入率 30%で渋滞はほぼ解消されていることが分かる。これら結果に対し、ETC 対応車の混入率、

平均渋滞長、料金所タイプを規定するダミー変数を用いて回帰分析を行い、任意の料金所における ETC 導入による渋滞解消効果を説明できる渋滞解消モデル（最大渋滞長の変化を予測するモデル）を作成し、現況の交通条件下において ETC サービスを全国展開した際の料金所渋滞解消効果を推計した。検討結果、図3のように、ETC サービスを全国展開した場合、対応車混入率 30%程度で、料金所渋滞はほぼ解消することがわかった。

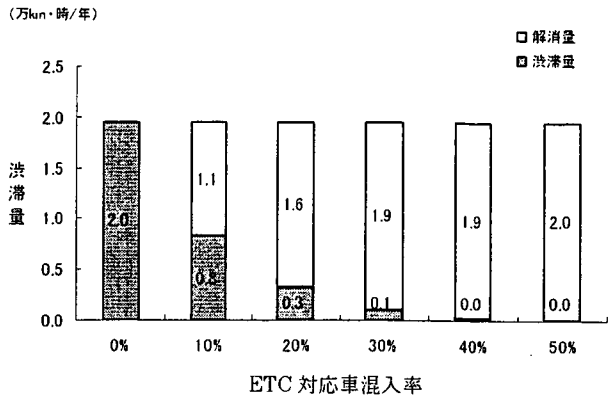


図3　ＥＴＣ対応車混入率別の全国料金所渋滞量の変化
（渋滞量＝最大渋滞長×渋滞時間／２×渋滞回数）

2.2 適正車速・車間保持システム導入によるサグ部渋滞解消効果の計測

サグ部における速度低下に伴う自然渋滞の発生には、車速・車間を適正に保つシステムの導入が有効であることが過年度までの研究により確認されている。11 年度はサグ部による速度低下を原因とした渋滞発生回数の多い代表的な 5 箇所のサグ渋滞箇所を対象に、適正車速・車間保持システム導入にともなうサグ渋滞解消効果の計測を行った。結果の一例を図 4 に示す。図は平成 10 年 9 月 27 日の東名高速道路上り綾瀬バス停付近での渋滞に対し、システムが導入された場合のサグ部の最大渋滞長を混入率別に見たものである。図より対応車混入率 30%で渋滞は大幅に軽減され、50%でほぼ渋滞が解消されていることがわかる。これらの結果に対し、システム対応車混入率、現況の最大渋滞長および渋滞時間を変数として回帰分析を行い、任意のサグ部におけるシステム導入による渋滞解消効果を説明できる渋滞解消モデル（渋滞損失時間の変化および最大渋滞長の変化を予測するモデル）を作成し、現況の交通条件下において適正車速・車間保持システムを全国のサグ渋滞箇所に導入した際のサグ渋滞解消効果及び沿道環境改善効果を推計した。検討結果、図5に示すように現況の交通条件下においてシステムを全国のサグ渋滞箇所に適用した場合、対応車混入率 30%程度で、サグ部渋滞はほぼ解消することが分かった。

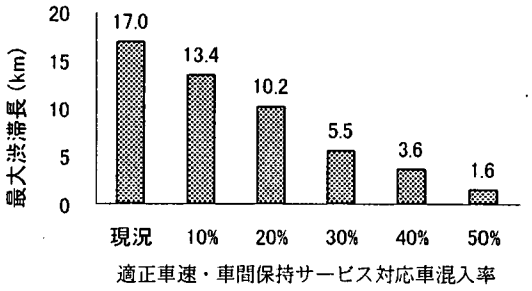


図4　東名高速綾瀬バス停付近における
渋滞解消効果

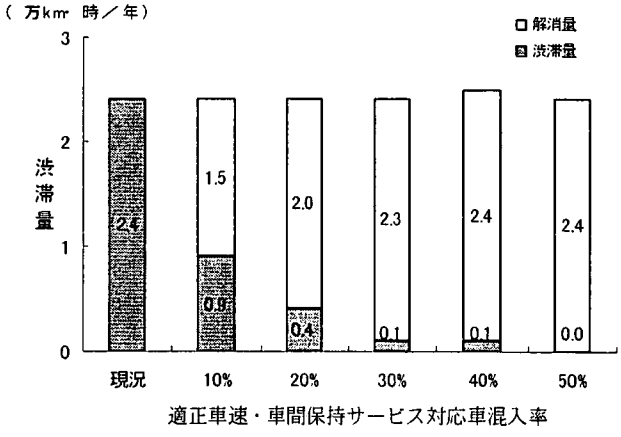


図5　適正車速・車間保持システム対応車混入率別の
全国サグ部渋滞量の変化

2.3 今後の課題

次年度は商用車のプラトーニング走行、交通需要マネジメント施策、高速道路合流部における車両制御の導入効果分析等を行う計画である。

（岩崎、浦野、田中、横地、小林）

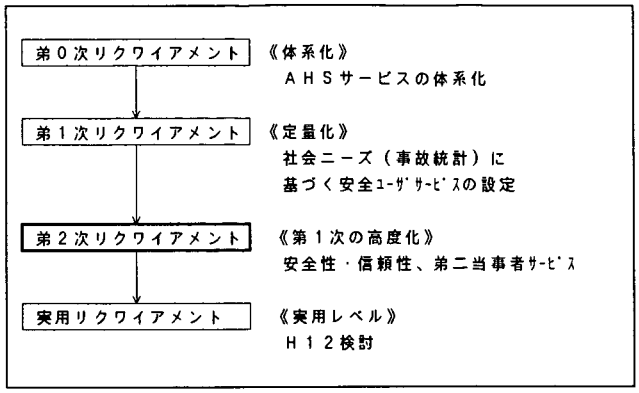
9.2　コンセプト及びアーキテクチャの設計と評価に関する調査

研究期間：平成８年～平成１２年

担　　当：高度道路交通システム研究室

【要旨】

本研究では、走行支援システム（ＡＨＳ）の実用化に向け、システムに対する社会ニーズに基づいたシステム開発に対する基本的、共通的な必要条件を定めたリクワイアメントについて検討を行っている。平成１０年度までの研究により、走行支援システムのユーザサービスの選定、走行支援サービスの実施方法や道路インフラの機能・性能に関する定量的なリクワイアメント（第１次リクワイアメント）が策定されている。平成１１年度は、安全性・信頼性や第２当事者等に関するリクワイアメントの検討を実施した。



図－１　研究フロー

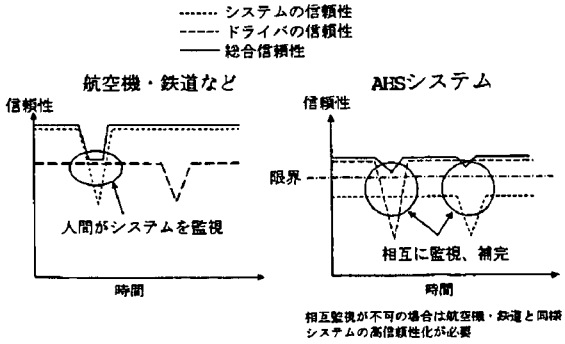
１．研究方法

第２次リクワイアメントは、事故統計に基づいたユーザサービスの実施方法や道路インフラに求められる機能・性能に関する要件を規定した第１次リクワイアメントに対して、安全性・信頼性の検討を行ってシステムに要求されるミス確率（2.(1)に記載）と、事故統計の分析に基づいて第２当事者へのサービスのリクワイアメント（2.(2)に記載）を追加した。

２．研究結果

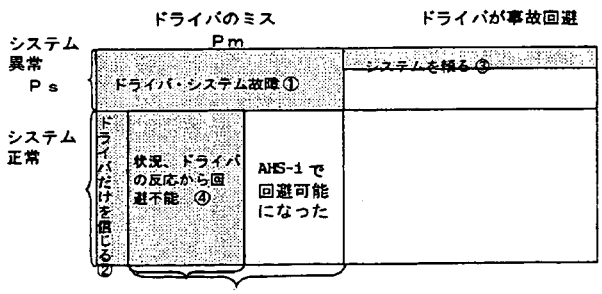
（１）　安全性・信頼性の検討

図－２は、交通システムの安全性・信頼性の考え方を示したものである。航空機・鉄道システムは、運転支援の高度化が図られており、システムの信頼性がドライバーより大きく、人間がシステムを監視する形態で運用されている。一方走行支援システムでは、ユーザが不特定である、コストなどの制約がある、さらにシステムが未成熟なことから、システムと人間（ドライバー）が相互に補完し合いシステム全体の信頼性を高める形態で運用すべきである。



図－２　システムとドライバーの協調

情報提供・警報を行う走行支援システム（ＡＨＳ－ｉ）の事故発生モデルを図－３に示す。ミス確率とは走行支援システムが危険な事象を起こす確率である。事故が発生するのは図－３のハッチングの部分であり、次の４つの場合が考えられる。



図－３　ＡＨＳ－ｉの事故モデル

（イメージ図であり各分割の大きさは正確ではない）

① ドライバーとシステムのミスが重なったとき

② システムが正常であっても、ドライバーがシステムを信頼しないとき

③ ドライバーのシステムへの過信等により、システムがミスを起こした場合これをドライバーが補完でき

ないとき

④ ステムの情報提供が遅れる等の理由でドライバーが適正に反応できないとき

※ 事故発生率Ｐmi＝①+②+③+④

※ ドライバーのエラー率Ｐm＝事故統計より推定したドライバーのミス操作確率

表－１　システム目標ミス確率

検討対象システム		情報支援 AHS-i		制御操作支援 AHS-c	制御操作支援 AHSに含まれない		自動走行 AHS-a
		情報提供システム	警報システム	緊急操作支援システム	衝突軽減システム	一部自動化システム	全自動システム
目標ミス確率	前方	1E-3	1E-4	1E-4～1E-6	1E-6	1E-4～1E-7	1E-7
	側方	1E-2	1E-3	1E-3～1E-6	1E-6	1E-3～1E-7	1E-7

ミス確率 ＊危険が存在するのに危険がないとミスする確率が基本
＊制御支援の場合は誤作動等による2次事故の確率を含む
＊事象が特定できる場合は確率／回、できない場合は確率／h

各確率は「D.Pomerleau,et al.: Performance Specification Development for Roadway Departure Collision Avoidance Systems, 4th ITS World Congress (1997)」を参考に算出した値

この事故発生率Ｐmi（走行支援システムを導入した場合の事故発生率）がドライバーのエラー率Ｐmを上回らないようにすることを走行支援システムのミス確率に対するリクワイアメントと仮定した。この方針に沿ってＰsを算出したものを表－１に示す。今後具体的なシステムの設計を進めていく上で、このシステム全体の目標ミス確率の見直しを検討した後に、各設備にミス確率のリクワイアメントを配分する必要がある。

（２）第２当事者へのサービス

第１次リクワイアメントでは安全な運転を心掛けるドライバーが事故の第１当事者となるのを防止することを前提に策定したが、全死亡者数に対する第２当事者が関与する事故の死亡者の割合が６割以上ををを占める事故実体を考慮し、安全な運転を心掛けるドライバーが第２当事者として事故に捲込まれるのを防止できることもサービスの対象とした。第２当事者向けサービスの対象は、第２当事者が関係する事故のうち「追突」のように第２当事者側では対策困難ものを除き、走行支援システムで対策可能なものに絞る（表－２）。この場合でも、事故ポテンシャルは全死亡事故の約28％を占め、第２当事者へのサービスの有効性が高いことが分かる。ただし、第２当事者へのサービスは、安全に対して本当に有効か否かの判断及びどのサービスレベルが妥当か（警報が良いのか、制御支援まで必要か等）は、今後実証実験やシミュレーション等による検討を待つ必要がある。

表－２　第２当事者へのサービス

基本ユーザサービス	第2当事者へのサービス
車線保持（直線）	対向車からのはみ出し車両の情報（警報）を提供
車線保持（カーブ）	対向車線を超過速度で走行する車両やはみ出し車両の情報（警報）を提供
出合い頭衝突防止支援	主道路側で信号無視等の違反のある車両情報（警報）を提供（発信支援）
	同上（接近支援）
	従道路側で発進時に動静判断を誤り飛び出し車両情報（警報）を提供
	従道路側で一時不停止等の違反のある車両情報（警報）を提供
	信号無交差点の主道路側で不注意や違反のある車両情報（警報）を提供
右折衝突防止支援	飛び出し・信号無視等違反のある右折車情報（警報）を提供
	信号無視・超過速度等違反のある対向車情報（警報）を提供
①全交通事故死亡者数 9,640人	
②第2当事者が関与する事故の死亡者数 6,235人 、②／①＝64.7%	
③上記対策に関連するもの 2,729人 、③／①＝28.3%	

（平成9年度交通事故統計による）

３．今後の課題

今後実道配備に向けて整備していくための課題は以下のとおりである。

○ Ｈ１２年度に実施予定である実証実験、シミュレーションによる評価を反映させる。

○ 道路交通環境の厳しい地域でのサービス、第２当事者支援サービス、インフラ単独サービス、複合的なサービス等のリクワイアメントの精緻化が必要である。

○ システムの目標確率に基づいたシステムの構成機器の安全性・信頼性に関する要件を定め、さらにシステムの安全性・信頼性設計を行う。

（岩崎、田中、村田、小林）

9.3　道路状況把握道路システムに関する調査

研究期間：平 8～平 12

担当：高度道路交通システム研究室

【要旨】

走行支援システム（AHS）の交差点における衝突防止支援サービス（出合い頭衝突防止支援、右折衝突防止支援、横断歩行者衝突防止支援）を実現するためには、道路状況把握センサにより交差点における車両、歩行者の複雑な挙動を把握する必要がある。そこで、平成 10 年度までに開発した道路状況把握センサを使用して交差点における車両・歩行者の複雑な挙動を把握するアルゴリズム開発を行い、実験によりアルゴリズムの評価・改良を行った。さらに、前年度より継続して、雨・霧・降雪環境における道路状況把握センサの道路障害物検出特性を評価する実験を行った。

1. 研究方法

1.1　交差点における車両・歩行者の挙動の把握

交差点における衝突防止支援サービスを実現させるために必要な道路状況把握センサには、前年度まで研究を進めてきた単路部を対象として開発されたアルゴリズムにはない以下の機能が必要となることが分かった。

- 車両の交差挙動があるので、前後・左右方向における検出が必要である。
- 横断歩行者の挙動を監視するため、横断歩行者と車両の識別や高精度位置検出が必要である。
- 交差点には多数・多種の道路状況把握センサが設置されるため、センシングされたデータ統合処理が必要である。

これらの機能を達成するためのアルゴリズム開発を行い、これを実装した交差挙動把握装置を試作した。本装置を図 1 に示す通り土木研究所試験走路内の模擬交差点に設置し、実車による走行実験を行い、機能検証、検出特性把握及び実道配備へ向けた検出特性の最適化、課題抽出を行った。

本装置は、画像センサを中心に 3 種 11 個のセンサと統合処理装置から構成されている。各センサは、それぞれの異なる領域を監視し、統合処理装置は、それらの領域において非同期に検出される検出情報を時間的、空間的に同一座標軸上に統合し、交差点全域の情報を生成する。実験車両として高精度車両位置計測装置を搭載した車両を用い、検出されたデータのリファレンスとした。

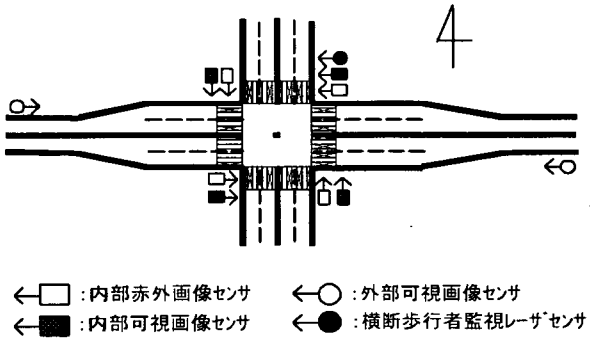


図 1　センサ配置

1.2　悪天候下における走行車両の検出

雨霧環境、降雪環境における道路状況把握センサの検出特性を評価するために、土木研究所の雨霧環境実験設備、冬期の北海道開発局開発土木研究所石狩吹雪実験場、および新潟県と福島県の県境国道 49 号線福取トンネル付近の実道で、可視画像センサ、赤外センサ、ミリ波センサを用いた走行車両検出等の実験を行った。

2. 研究結果

2.1　交差挙動把握実験

実験結果と課題を表 1 にまとめる。普通車両の右左折、横断歩行者に対する位置計測性能はリクワイアメント

を満足することができた。速度計測はセンサに対するリクワイアメントを達成することができておらず、今後引き続きアルゴリズム開発や改良を行っていく必要がある。

表1　実験結果と課題

センサ＼仕様項目		検出対象	基本計測性能（注1）				課題
			位置計測			速度計測	
			縦精度	横精度	更新周期	精度（注2）	
リクワイアメント		車両 横断歩行者	5.0m 0.8m	0.8m 0.8m	100ms 500ms	5% or 5km/h	(共通) ・ｼｬﾄﾞｳｲﾝｸﾞ時の検出特性向上 ・速度計測精度の向上
可視画像ｾﾝｻ	交差点内	車両/横断歩行者	2.0m	2.0m	130ms	10% or 10km/h	・影による性能劣化低減 ・色による性能劣化低減 ・薄暮夜間における計測
	交差点直前	車両	5.0m	1.0m	100ms	10% or 10km/h	
	交差点+60m	車両	3.0m	0.8m	100ms	5% or 5km/h	
赤外画像ｾﾝｻ	交差点内	車両/横断歩行者	2.0m	1.0m	133ms	10% or 10km/h	・大型車検出特性向上 ・低ｺﾝﾄﾗｽﾄ時の計測 ・画像の安定性向上
	交差点直前	車両	5.0m	1.0m	133ms	10% or 10km/h	
	交差点+60m	−	−	−	−	−	
レーザセンサ（横断歩道毎）		横断歩行者	0.5m	0.5m	500ms	−	・車両と歩行者の識別 ・計測時間の短縮
統合処理装置		車両 横断歩行者	↑ ↑	↑ ↑	50～100ms	— ↑	・ｼｬﾄﾞｳｲﾝｸﾞ時の推定精度向上

（注1）曇天、車両重なりがない時の縦列、並列、左折、右折待ち直進、単独横断歩行者に対する計測精度
（注2）速度精度は%値または km/h の大きい方の値
（注3）↑は各種センサの中で最も精度の高い値

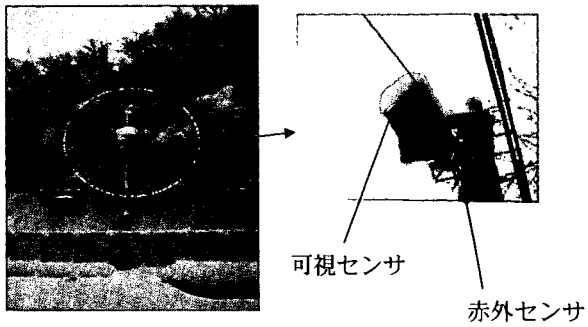
2.2　環境実験

2.2.1　雨霧環境実験

霧の場合は視程、雨の場合は降雨強度を評価パラメータにし、雨霧環境実験施設で各センサの検出性能を評価する実験を行った。画像系の可視・赤外センサは、降雨強度 55mm/h で検出距離が降雨のない時の半分に、100mm/h 以上では全く検出できなかった。また、霧の場合は視程 200m で検出距離が 75m、視程 100m で検出距離 50m、視程 50m になると検出ができなくなった。ミリ波センサの検出距離は雨、霧に影響されないことが確認された。

2.2.2　積雪寒冷地環境実験

可視センサ、赤外センサは視程の影響が大きく、可視画像センサは視程が 1000m 以下、赤外センサは視程が 200m 以下になると検出距離が短くなる。一方、ミリ波センサは、視程による影響をほとんど受けず、降雪環境においても走行車両検出性能が変わらないことが確認された。また、寒冷地においてもセンサおよびその他機器の検出動作に問題はなく、降雪、寒冷地における使用に耐えられることが確認された。



3.　今後の課題

交差点における車両と横断歩行者の検出実験の結果、表1に示した課題が抽出された。今後、これらの課題の解決とリクワイアメントを満足するようにアルゴリズム開発と改良を図っていく予定である。

（岩崎、鈴木、佐々田）

9.4　路面状況把握道路システムに関する調査

研究期間：平 8～平 12

担当：高度道路交通システム研究室

【要旨】

走行支援システム（AHS）の全ての基本ユーザサービス（障害物衝突防止支援、カーブ進入危険防止支援、車線逸脱防止支援、出合い頭衝突防止支援、右折衝突防止支援、横断歩道歩行者衝突防止支援、路面情報活用安全車間保持支援等）の実現に必要な路面状況を把握するため、路面状況把握センサの検出アルゴリズムの開発と改良を行った。

1. 研究方法

平成 11 年度は、これまで路面状況判別アルゴリズムの開発を行ってきた光ファイバ式センサ、路面巡視式センサ、電波放射計、レーザレーダセンサ、並びに新規開発の可視画像式センサの精度・信頼性を実験的に検証し、路面状況検出アルゴリズムの改良を行った。さらに、複数の状態が混在している路面（例えば、路面の一部が凍結している状態）において、走行支援サービスを提供する場合にどのように情報提供すべきかについて検討を行った。

2. 研究結果

2.1 各センサの機能検証と改良

光ファイバ式センサ、路面巡視式センサ、可視画像式センサ、電波放射計、レーザレーダセンサの性能を評価した結果は表１に示す通りである。走行支援システムのリクワイアメントに規定されている５状態（乾燥・湿潤・積雪・凍結・水膜）の判別は可能であるが、積雪寒冷地におけるニーズ等を反映した９状態（乾燥・湿潤・薄い水膜・厚い水膜・新雪・ジャム雪・圧雪・圧雪氷板・氷膜）の判別を行うには課題が残されている。

表１ 各センサの評価結果

センサ		検出路面状態と精度（センサ性能は人工路面での評価段階）	検出範囲	出力単位範囲	検出時間	作動環境性
第1次リクワイアメント要求仕様		5段階 乾燥、湿潤、水膜、積雪、凍結	幅員方向全域、及び路線方向監視範囲で、車両挙動に影響を与える場所	・単位区間を代表する状態を出力 ・サービス区間が長距離の場合は、複数ポイントを計測し、区間の路面状態の推定でもよい	１分以下	全天候・視程 50m以上 ・雨量 50mm/h以下 ・風速 25m/h以下
開発目標		5段階以上９段階まで 乾燥、湿潤、水膜１、水膜２、新雪、ジャム雪、圧雪、圧雪氷板、氷膜	幅員方向全域× サービス毎に必要な道路長	代表する最小範囲（最小検出範囲） 縦方向： ・自専道短路（R=300m以上）：２０m ・一般道単路（R=50m以上）：９m ・一般道交差点：２m 横方向：２m（約１／２車線）	同上	上記の全天候条件下で実フィールド条件（実道で現れる定常状態）で正常作動、または、確信度信号を発生
広域	光ファイバ式	６段階 乾燥、湿潤、水膜１、水膜２、積雪、凍結	幅員方向全域 × 最大１５ｋｍ	最小検出範囲 縦方向：１０m 横方向：１車線	１分以下（低μ側路面から高μ側路面変化時は１５分程度）	実フィールド条件下で未確認
広域	路面巡視センサ式	８段階 乾燥、湿潤、水膜、新雪、ジャム雪、圧雪、圧雪氷板、氷膜	（５cm×センサ個数） ×全長	最小検出範囲 縦方向：２m程度 横方向：５ｃｍ	１分以下	実フィールド条件下で未確認
エリア	可視画像式	５段階 乾燥、湿潤、水膜、積雪、凍結 （凍結は温度センサ必要）	幅員方向全域×１００m	最小検出範囲　（）内は検出範囲 縦方向：２m（30～50m） ２０m（50m～） 横方向：２m以下	１分以下	実フィールド条件下で未確認
エリア	電波放射計式	８段階 乾燥、湿潤、水膜、新雪、ジャム雪、圧雪、圧雪氷板、氷膜	幅員方向全域×４０m	最小検出範囲 縦方向：２m以下 横方向：２m以下	１分以下	実フィールド条件下で未確認
スポット	レーザレーダ式	８段階 乾燥、湿潤、水膜、新雪、ジャム雪、圧雪、圧雪氷板、氷膜	幅員方向全域×４m	最小検出範囲 縦方向：２m以下 横方向：２m以下	１分以下	実フィールド条件下で未確認

北海道開発局開発土木研究所石狩吹雪実験場において、電波放射計の雪氷路面判別実験を行った。実験期間中に降雪した新雪を車両で踏み固める、撒水するなどして、模擬的に冬期道路特有の路面（摩擦係数が著しく低い、いわゆる「つるつる路面」、水分を多量に含有した「シャーベット」など）を生成し、これらの路面の判別可能性を評価した。

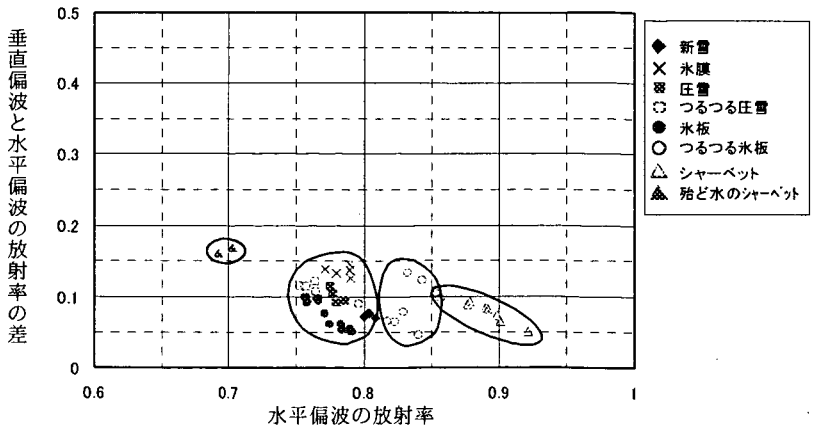


図１　電波放射計による雪氷路面の判別

その結果、図１に示すとおり、現在の路面状態判別アルゴリズムでは、シャーベットを判別することは可能であるが、新雪・氷膜・圧雪・つるつる圧雪・氷板を判別することは不可能であった。前年度には同様な実験を土木研究所新潟試験所内で実施したが、その時には上記の状態判別も可能であった。北海道で判別ができなかった理由は、新潟と北海道での雪質に違いであることが考えられる。一般に新潟では雪自体に水分が多く北海道では非常に湿り気の少ない状態になっており、雪の含有水分量の違いが大きく影響しているものと推察される。

2.2　路面状況の情報提供方法

実際の路面では、轍部分はタイヤの熱により乾燥するなど、複数の路面状態が混在することがある。実道において路面の混在状態を調査した結果、左右の車輪が同一の路面状態である「均一路面」、左右の車輪が異なる路面状態である「またぎ路面」、進行方向に状態が変化する路面の「まだら路面」の３つに大きく分類された。

AHS 交通シミュレータにより、上記３種類の路面状況について、道路種別毎に車両挙動への影響についてシミュレーションを行った。路面状態としては、「またぎ路面」、「まだら路面」において「乾燥」＋「凍結」等の組合せを設定した。左右輪の摩擦係数が異なれば車線逸脱の可能性が高くなる。摩擦係数の低い路面の範囲を可変値とし、車両が車線逸脱しないという条件を走行支援サービスを提供する上で路面状況把握センサが検出すべき最小範囲と定義した。シミュレーションの結果を表２に整理する。高速道路では走行速度が高いため、センサは同時に広い範囲の路面状況を検出し、その中で最も摩擦係数が低くなる可能性がある路面状態を提供する必要がある。

表２　センサの最小検出範囲

道路種別	縦方向	横方向
高速道路	20m	2m（1/2 車線）
一般道 単路	9m	2m（1/2 車線）
一般道 交差点	2m	2m（1/2 車線）

3.　今後の課題

表１に示す性能は、整備された実験環境下における性能であり、実交通環境下におけるセンシング性能の信頼性、データ確信度を評価し、アルゴリズムを改良する必要がある。北海道における雪氷路面の状態判別には、路面状態の時系列的な変化特性を考慮にいれ、摩擦係数が著しく低下した路面を判別するアルゴリズム開発も必要になってくるものと考えられる。また、車両の挙動はタイヤや車両特性によって大きく変化するため、路面情報の提供方法については継続して研究を実施する必要がある。

（岩崎、鈴木、佐々田）

9.5　車両誘導制御支援道路システムに関する調査

研究期間：平 8～平 12

担当：高度道路交通システム研究室

【要旨】

車両誘導制御支援道路システムは、走行支援システム（AHS）において、道路に設置されたセンサから道路状況や路面状況を収集し、ドライバーが安全にかつ安心して走行支援サービスを受けることができるように、交通状況に応じて情報提供や警報を行ったり、車両を適切に制御するための情報を生成する役割を有している。

平成 11 年度は、AHS 交通シミュレータを用いたシミュレーション実験、実験車両を用いた実機実験を実施し、安全走行を支援するためには、センサ等により収集された車両周辺状況から、個々の車両（ドライバー）に、どのようなタイミングで、どのような情報を提供することが効果的であるかを検証し、最適な走行支援情報生成アルゴリズムの検討を行った。

1. 研究方法

平成 11 年度は、平成 10 年度までに開発した基本ユーザサービス（前方障害物衝突防止支援、カーブ進入危険防止支援、車線逸脱防止支援、出合い頭衝突防止支援、右折衝突防止支援、横断歩道歩行者衝突防止支援）における走行支援情報アルゴリズムを開発し、シミュレーション実験と実験車両を用いた実機実験により、アルゴリズムの有効性に対する評価を行った。

シミュレーション実験では、AHS 交通シミュレータ上で模擬されたセンシング情報を走行支援アルゴリズムに入力し、情報の内容や提供タイミング、操作支援の内容やタイミングなどの走行支援情報が出力される。AHS 車両はこの走行支援情報に基づいて挙動する。これにより、走行支援アルゴリズムの安全性を支配するパラメータ範囲を明らかにすることが可能となる。また、シミュレーション実験と同様に、走行支援情報アルゴリズムのリアルタイム制御性の検証するために、実験車両を用いた実機実験も実施した。これらの実験を通して、走行支援情報アルゴリズムの有効性を評価した。

2. 研究結果

2.1　前方障害物衝突防止支援アルゴリズムの概要

走行支援システムのリクワイアメントでは、走行支援の対象となる車両 1 台に対するサービスを想定しており、前方障害物衝突防止支援サービスの場合には、障害物の位置を基準としてリクワイアメントに規定されているドライバーの反応時間や減速度等に基づいて、情報提供・警報・操作支援の開始タイミングを一意的に定めている。複数の車両が障害物に接近している状況における走行支援サービスの方法は規定されていない。

障害物へ向かって複数台の車両が走行する場合、後続車両になるに従い、ドライバーの反応遅れ時間が累積されて前方車両の接近距離、接近時間が短くなるとともに、先行車両が障害物の手前で停止するため停止距離も短くなり危険な状態となる。そこで、後続車両に対しては、先行車両の減速挙動を考慮に入れ、リクワイアメントに定めるタイミングより早いタイミングで情報提供・警報・操作支援を開始することが必要である。

また、走行支援サービスを受ける AHS 車両の後を、サービスを受けない非 AHS 車両が追従している状態において、前方障害物衝突防止支援サービスが適用されると、障害物を確認できない非 AHS 車のドライバーは AHS 車両の減速挙動に追従できず、急減速が必要になったり、最悪の場合追突する可能性がある。

したがって、走行支援情報アルゴリズムは、交通状況に応じて障害物に接近する複数台の車両が安全に停止することができるように、個々の車両に対して個別の情報を生成することが必要である。

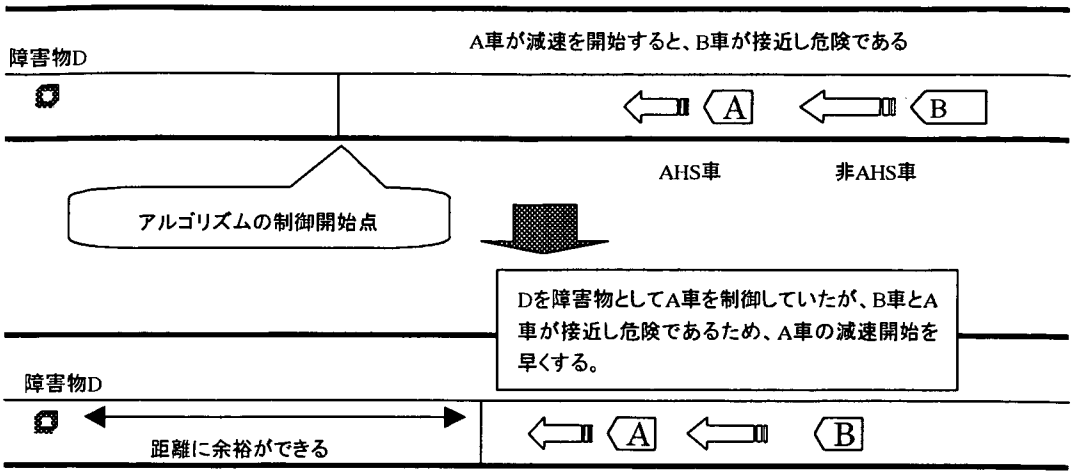


図１　走行支援アルゴリズムの評価シミュレーション

2.2　走行支援アルゴリズムの有効性検証

走行支援アルゴリズムの有効性を検証するため、図１に示すような AHS 車の後を非 AHS 車両が追従している状況において、AHS 車両に障害物情報を提供した場合のシミュレーションの結果、2 台の車両には図 2-1 に示す減速度が発生した。AHS 車はリクワイアメントに定められているように、最大 3m/s^2 で減速しているが、非 AHS 車は反応時間だけ遅れて制動を開始し最大 5m/s^2 で減速している。

そこで、非 AHS 車の最大減速度を抑えるために、AHS 車に対してリクワイアメントより早めに障害物情報を提供するアルゴリズムを適用した場合、図 2-2 に示す通り、非 AHS 車の減速度はおよそ 3m/s^2 となり、図 2-1 と比べると明らかに小さい減速度で停止できている。この結果は、後続車両が AHS 車であった場合にも同じことであり、走行支援情報アルゴリズムの有効性を表している。

したがって、走行支援システムの前方障害物衝突防止サービスを実現するためには、個々の車両に対して個別の情報を提供し、個々の車両が適切なタイミングでドライバーへ情報提供を開始する定める必要がある。

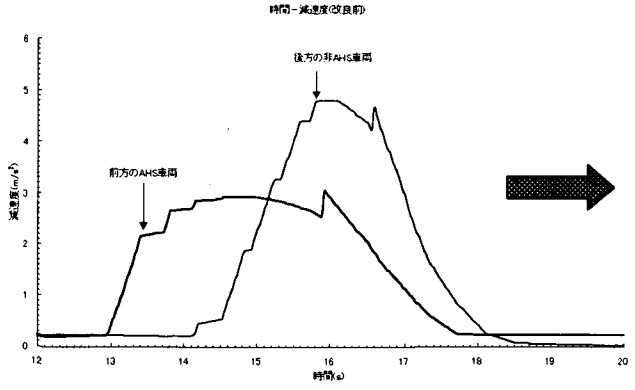


図 2-1　走行支援アルゴリズムを適用しない時の減速度の変化

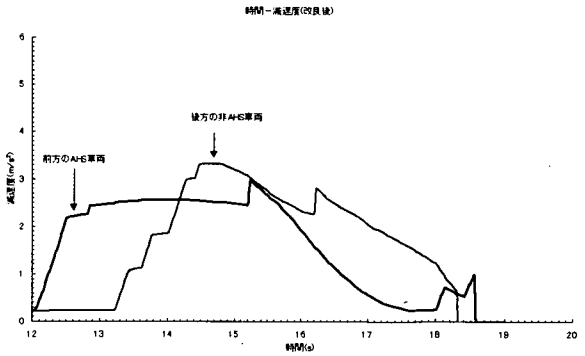


図 2-2　走行支援アルゴリズムを適用した時の減速度の変化

３．今後の課題

今後の課題としては、実交通流を再現した交通条件、道路線形条件、センサ条件、気象条件、車両制御条件を変化させた実験評価を行うことにより、より適用性の高い走行支援アルゴリズムの開発が必要である。また、複数のユーザサービスが同時に提供される時の走行支援アルゴリズムの開発と有効性検証を行う予定である。

（岩崎、鈴木、佐々田）

9.6　走行車両位置検出支援道路システムに関する調査

研究期間：平 8～平 12

担当：高度道路交通システム研究室

【要旨】

本研究の目的は、道路システムと車両システムの協調による安全で効率性の高い車両走行を実現する走行支援システム（ＡＨＳ）において、道路上の車両位置のリアルタイムな検出並びに基点等の位置情報検知を行う位置検出支援道路システム（レーンマーカ）の開発を行うことである。

11 年度は、10 年度に整理したレーンマーカの具体的方式案を見直し、その機能検証を進めて、12 年度の実証実験に供するレーンマーカを決定するとともに、今後の課題を整理した。

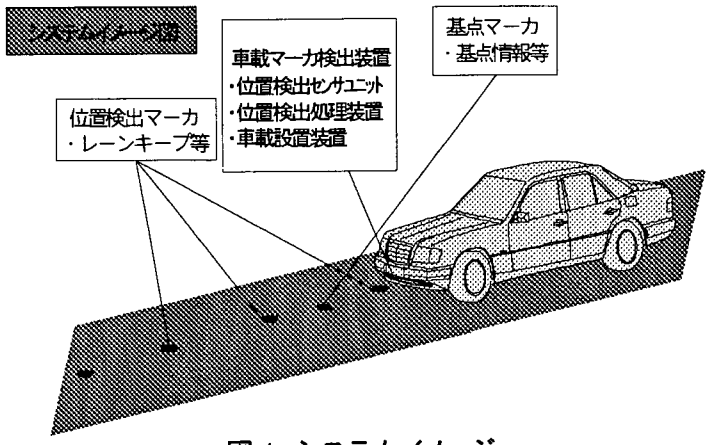
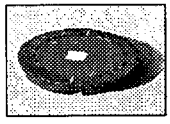


図１ システムイメージ

1. 研究方法

表１は代表的な車両の位置検出支援技術について方式や原理毎に整理したものである。位置検出支援技術は大きく分類すると、車両が画像処理を行って道路の白線を検出する方法、GPS を利用する方法、路面に敷設したレーンマーカを使用する方法がある。白線を検出する方法は悪天候や路面に積雪がある時などには使用できない。また、GPS を利用する方法は GPS 衛星からの電波がビルなどで遮断される市街地は使用できないことも多い。そこで、本研究では、車両に対して場所を問わずリアルタイムに位置情報を提供する方法として、路面に敷設するレーンマーカを用いている。

表１　研究結果に基づく位置検出技術の体系

マーカ区分	原理方式	区分形態	使用周波数・反射方式・給電方式による分類
光学式		画像処理白線検出方式	
GPS式		D－GPS	
		RTK－GPS	
位置マーカ	磁気式マーカ	テープ型(磁気テープ)	
		プレート型(磁気平板)	
		ネイル型(磁気ネイル)	[ﾈｲﾙ]  [ﾌﾟﾚｰﾄ] 
		電波送受の方式	使用周波数・反射方式等による分類 ／ 給電方式：マーカへの電力の供給の方法
	電波式マーカ	パッシブ方式	短・中長波通倍反射方式 ― 給電(車側) 通倍反射：受信した電波を通倍(2倍)して送信する
			短・中長波変調反射方式 ― 給電(車側) 変調反射：受信した電波の周波数・振幅・位相を変化させて送信する
		アクティブ方式	短波変調方式
基点マーカ	電波式マーカ	アクティブ方式 マーカ側から車両側に電波を発信する。	短波変調方式 ― 給電(路側)
		パッシブ方式 車両から送られた電波をマーカで反射して、車両が受信する方式	短波変調反射方式 ― 給電(路側) 短波通倍変調反射方式 ― 給電(車側)
	磁気式 (SN極の組合せ)		

レーンマーカには、車線の中央位置を車両へ提供するための位置マーカ、走行支援システムのサービスの始点と終点を車両へ情報提供するための基点マーカがある。基点マーカは障害物の位置などに関する情報を提供する際の基準点としての役割とともに、走行支援サービスの提供区間に車両が進入した時に車載無線機が受信すべき周波数に関する情報を提供する機能も有している。

レーンマーカの方式には磁気式と電波式がある。磁気式マーカの場合、磁石を路面に埋設し車載機器で磁界強度分布を検出して車線の中央位置を提供することや、N極とS極の組み合わせ配置により基点を定義することが可能である。また、電波式マーカの場合、マーカから車両側に電波を発信するアクティブ方式と、車両側が電波を発信し、これをマーカが反射して信号を車両に送信するパッシブ方式があり、車載機器で電波の電界強度分布を検出して車線の中央位置を提供することや、電波に変調を加える等により車両に対して少量の情報を提供することも可能である。表1に示す通り、位置マーカと基点マーカそれぞれに多様な方式が考えられるため、位置検出精度、情報提供量、レーンマーカと車載機器のコスト、施工性・車載性などの条件毎に比較検討を行ってきた。磁気式は情報提供量が小さいため、基点マーカとしての機能を満足することは困難と考えられる。このため、基点マーカは電波式を採用した。

11年度は、他の方式に比べて情報提供量が大きい短波帯を使用した電波式マーカを中心として、レーンマーカシステムの情報提供量、位置検出精度、給電方式の機能検証を行うとともに、過年度の成果である中長波帯及び磁気式マーカとの比較評価を行い、12年度の実証実験に供する基点マーカおよび位置マーカを選定した。

2. 研究結果

2.1 電波式マーカの機能検証

短波式マーカについて、表2に示す情報提供方式、位置検出方式、マーカへの給電方式について、車載検出器のセンシング高さをパラメータとする機能検証を実施した。

表2　電波式マーカの機能検証方式一覧

検証内容	分　類	方　式	路側給電	車側給電
位置検出	アクティブ	短波変調方式	○	—
	パッシブ	中長波逓倍反射方式	—	○
		中長波変調反射方式		
		短波逓倍反射方式		—
		短波変調反射方式		
情報提供	アクティブ	短波変調方式	○	—
	パッシブ	短波変調反射方式		○
		短波逓倍変調反射方式		

注：短波逓倍反射方式・短波変調反射方式ともに位置検出には給電を必要としない。

各機能に対して以下の結果を得た。

- 位置検出系の機能検証の結果、短波変調方式（アクティブ）は、受信強度にバラツキが生じ所定の検出精度が得られないことがわかった。また、横位置精度はパッシブ方式の内、中長波・短波式とも逓倍反射式が変調反射式より優位性が認められる結果が得られた。
- 情報提供系の機能検証の結果、マーカ側に発信機をもつ短波変調方式（アクティブ）は、パッシブ方式に比較して、

受信強度が強く、伝送エラー率も少ないことがわかった。また、パッシブ方式については、キャリア波送信のための車載アンテナ、検出器の車載性が課題となった。

給電方式については、情報検出系及び位置検出系との組合せを考慮し、誘導無線規格の中長波と特定小電力の短波帯について路側給電と車側給電の機能検証を行った結果、車側給電の車載検出器の消費電力が検出器高さ 30cm でも数W～10W 以上に達するため、車両の電気系統に大きな改造が必要となり、現在の市販車への搭載は実現困難であることがわかった。

2.2 実証実験におけるレーンマーカ方式

過年度までの研究成果を踏まえて、走行支援システムのリクワイアメントを満足するレーンマーカ方式の候補を選出し、主として、位置精度、使用条件、車載性、コスト等の視点から方式の選定を行った。なお、電波式マーカには多様な方式が考えられるとともに、個々の方式についても技術の進歩が進んでいる途上にあることから、実証実験で使用した方式が必ずしも走行支援システムを実用化する時のレーンマーカ方式とは限らない。

2.2.1 位置マーカ

実証実験における位置マーカの候補としては、表3に示す通り、磁気式マーカと短波・中長波逓倍反射式マーカ、画像処理技術によって白線を検出する方式、GPS 地上局からの電波で GPS 衛星からの電波に含まれている位置検出誤差を補正する RTK-GPS 方式の 4 方式を検討の対象とした。 画像処理白線検出方法は白線が実線である場合には道路の縦方向の位置が検出できない、路面に冠水、積雪がある時などには使用できない、白線に太陽光線が反射しているときには白線を検出できないなどの欠点がある。また、RTK-GPS 方式は GPS 衛星からの電波が遮断されるトンネル内や高架橋下では使用できないという欠点がある。これらの点において磁気マーカと逓倍反射型電波マーカが有利であるが、磁気式マーカが逓倍反射型電波マーカに比べ車載性が良いこと及び位置精度が高いことなどから、実証実験システムでは磁気マーカを採用することとした。

表3 位置マーカの比較

比較項目	磁気マーカ	逓倍反射型 電波マーカ	画像処理 白線検出	RTK-GPS
横位置精度	○:≦±5cm	○:≦±5cm	○:≦約±10cm	◎:≦±数cm
縦位置精度	○:≦±5cm等方性マーカ	○:≦±10cm	×: 連続線では無理	◎:≦±数cm
応答性	○:≦20msec	○:≦20msec	×:≦約0.1sec	×:電波遮断時 応答性難 (数～数10sec)
使用天候条件の限定	◎:全天候	◎:全天候	×:冠水、霧、積雪時等不可	◎:全天候
使用シーン・場所の限定	◎	◎	△: 白線汚れ、太陽光外乱	×: トンネル、高架等不可
施工性	○	○	○:再塗装	○
車載性	◎	○	◎	◎
インフラコスト	○	○	○	○
車載コスト	○: 車載検出器;0.6	○: 車載検出器;1	○: 車載検出器;1	× 車載検出器; ≧約10

2.2.2 基点マーカ

2.1の機能検証結果を踏まえて、十分なデータ量の情報提供と高い精度での位置検出が得られる基点マーカとしての機能を持つ方式として、表4に示す3方式を実証実験の候補として選定した。アクティブ以外のパッシブ2方式の短波変調反射式とは、短波変調反射方式、逓倍変調反射方式を含むものとし、給電形態の違いによる車載性及び車両の消費電力の比較を中心に検証を行った。その結果、現状では、ループコイルアンテナを舗装に埋設する必要がある、電池の寿命が短い、コストが高いという点で課題を残すものの、車載性がよく、車載機コストが低いという点が他方式より優れている路側給電型短波変調反射式電波マーカを採用した。本方式を実用化するためには、マーカのアンテナを小型化すること、消費電力を小さくすることなどの課題が残されている。

一方、路側給電パッシブ方式、車側給電パッシブ方式ともに、車側の検出器、特に送信・給電アンテナの小型化、給電のための消費電力の低減、車載機の低コスト化等の課題を解決することにより、実現可能性は高くなるものと考えられる。特に、短波逓倍変調反射方式については、マーカアンテナの小型化により、基点マーカと位置マーカを兼用できる可能性もある。

表4　基点マーカの比較

比較項目	方式		
	路側給電(ｱｸﾃｨﾌﾞ) 短波変調式 電波マーカ	路側給電(ﾊﾟｯｼﾌﾞ) 短波変調反射式 電波マーカ	車側給電(ﾊﾟｯｼﾌﾞ) 短波変調反射式 電波マーカ
縦位置精度	○：≦±1m	○：≦±1m	○：≦±1m
応答性	○	○	○
情報信頼性	○	○	○
情報提供量	○	△	△
使用天候条件の限定	全天候	全天候	全天候
使用シーン・ 場所の限定	◎：全場所	◎：全場所	◎：全場所
施工性	×： ﾙｰﾌﾟｺｲﾙ 埋設	×：ﾙｰﾌﾟｺｲﾙ埋設or △複数個ﾏｰｶ埋設	△： 複数個ﾏｰｶ埋設
保守・管理性	△： 電池寿命考慮要	○	○
車載性	○	△：アンテナ大	×：アンテナ大 ×：消費電力大
インフラコスト	△： 約30～40万/個所	△：やや安価	○：さらに安価
車載コスト	○： 約1万/台以下	○： 約1万/台以下	△： 約1～2万/台以下

2.2.3 信頼性の改良と耐久性の推定

実証実験に使用される短波式電波マーカに対して、車載アンテナの車両構造物や車両ノイズに対する影響(情報提供、位置検出、マーカへの給電)を調査した結果、車載アンテナはループアンテナよりバーアンテナの方が影響が小さいことが確認された。また、マーカの埋設材料、路面冠水に対する影響を調査した結果、埋設舗装材や埋め込み路面の冠水の影響はほとんどないことがわかった。 また、位置マーカとして路面に埋設した磁気式マーカに対して実道相当の走行負荷を与える実験を行い、マーカの耐久性の推定を行った。その結果、表層および基層に埋設した場合においても10年以上の耐久性があるものと推定された。

3. 今後の課題

基点マーカとして最適な周波数及び電界強度の詳細検討を行うと共に、位置・基点マーカの共有化を考慮したマーカシステムの再構築を検討し、車載性、設置性、信頼性、保守性、管理性といった観点も考慮した総合的な評価を実施していく必要がある。平成12年度は実用化を目指した実道フィールド実験及び積雪路実験などを実施する予定である。

(岩崎、鈴木、池野、酒井)

9.7　最先端の通信方式を利用した道路システムに関する調査

研究期間：平 8～平 12

担当：高度道路交通システム研究室

【要旨】

走行支援システム（AHS：Advanced Cruise-Assist Highway System）は、情報・通信技術を活用により、従来不可能だった前方の見えない障害物や交差車両等の情報をリアルタイムにドライバーへ提供することにより、飛躍的に安全で安心な走行を目指し、事故の大幅な削減を図ることを目的としている。本研究では、走行支援システムの基本ユーザサービスの実現に必要な路車間通信技術の開発を行っている。

平成 11 年度においては、平成 12 年度に計画されている走行支援システム実証実験で使用する狭域通信(DSRC：Dedicated Short-Range Communication)方式の路車間通信システムの仕様策定を行った。さらに、高度道路交通システム（ITS：Intelligent Transport Systems）実現の鍵となる次世代道路と位置づけられるスマートウェイ（知能化された道路）の実現に向けて、複数の ITS サービスに対して統合的に使用可能な路車間通信システムの仕様を確立するため、将来の利用や拡張性を整理した上で、路車間通信に必要とされる機能や品質について取りまとめ、解決すべき課題について整理を行った。

1. 研究方法

1.1　実証実験仕様

実証実験用の路車間通信システムは、走行支援システムの 7 つのユーザサービス（前方障害物衝突防止支援、カーブ進入危険防止支援、車線逸脱防止支援、出合い頭衝突防止支援、右折衝突防止支援、横断歩道歩行者衝突防止支援、路面情報活用車間保持等支援）の実証実験を実施することを目的に開発された。図 1 は走行支援システムのリクワイアメント（要求される機能・性能）に基づいたカーブ区間における前方障害物衝突防止支援サービスの提供例である。カーブ区間内で発生した交通状態の変化や障害物の移動などに基づいてリアルタイムにドライバーへ情報提供や警報を行うためには、カーブ区間において路車間通信が切断されることのない連続したサービスが必要である。

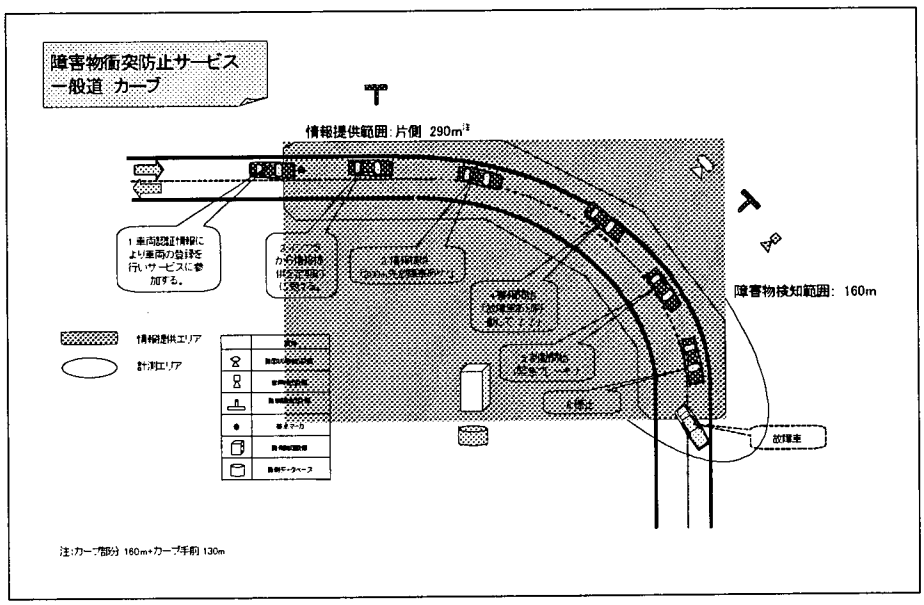


図 1　前方障害物衝突防止支援サービスの実施例

実証実験用の路車間通信システムの通信仕様の策定にあたっては、DSRC の実現例である自動料金収受システム（ETC）の仕様である ARIB STD-T55 を参考にしながら、個々のユーザサービス毎のリクワイアメントを満足することを前提とし、確実な移動体無線通信が可能と考えられる技術水準に配慮した。

1.2　スマートウェイ実現に向けた路車間通信の仕様

平成 11 年 11 月に、5 省庁（警察庁、通商産業省、運輸省、郵政省、建設省）によって策定されたシステムアーキテクチャで定義されている 172 のユーザサービスの中から狭域通信を導入することが効果的である

と考えられるユーザサービスを抽出し、次に、抽出されたユーザサービスの形態を通信の型式別に分類、さらにユーザサービスの形態を実現するために通信インフラに求められる機能を整理した。さらに、これらの通信インフラに対する要件を満足するために解決しなければならない課題の整理を行った。

2. 研究結果

2.1 実証実験用の路車間通信システム無線仕様

2.1.1 リクワイアメント

走行支援システムの実証実験に求められる路車間通信の主要なリクワイアメントは以下の通りである。

①120km/h で走行する実験車両と通信を行うこと。

②個々のユーザサービスに求められる情報提供範囲で確実な通信が行えること。カーブ区間で連続的な情報提供を行うため、最大で 600m の連続通信ゾーンを形成すること。

③12 台の実験車両と同時に双方向個別通信が行えること。

④リアルタイムな情報提供を行うため通信周期は 0.1 秒以下とすること。

表－1 実証実験用路車間通信システムの無線仕様

			路側	車載
一般的条件	無線周波数帯		5.8GHz帯	同左
	キャリア周波数(MHz)		5798.0（路→車） 5799.0 5800.0 5801.0 5802.0	5838.0（車→路） 5839.0 5840.0 5841.0 5842.0
	通信方式		複信方式	同左
	無線アクセス方式		TDMA/FDD	同左
	通信チャネル数（同報）		1	同左
	通信チャネル数（個別）		12	同左
	通信量	下り同報部	1408バイト	同左
		下り個別	200バイト	同左
		上り個別	200バイト	同左
	変調方式		π/4DQPSK	同左
	無線区間伝送速度		512kbps	同左
送受信に関する条件	送信特性	空中線電力	200mW	10mW
		送信電力の出力偏差	+20%、-50%以内	+50%、-50%以内
		隣接チャネル漏洩電力	-50dB以下	同左
		キャリアオフ時の漏洩電力	*1	18nW以下
		スプリアス発射の強度	25μW以下	同左
		占有周波数帯域幅	400kHz以下	同左
		周波数安定度（周波数偏差）	±2ppm以下	同左
	受信特性	受信感度*2	-92dBm以下	-85dBm以下
	空中線	種類	平面アレイアンテナ	平面型アンテナ
		利得	17dBi以上	8dBi以上13dBi以下
		周波数範囲	5770～5850MHz	同左
		指向性	*3	半値幅 EL:45° 以上 AZ:90° 以上
		偏波	右旋円偏波	右旋円偏波
	空中線（LWG）	周波数範囲	5770～5850MHz	−
		偏波	直線偏波	−
		長さ	100m	−
		総合損失	80dB以下（伝搬距離15m）	−
		電波輻射方向	主ビーム方向：45° ±5° 以内	−
		周方向指向性	半値幅±30° 以上	−

*1:常に送信するため規定なし
*2:ビット誤り率が1×10-5となるときの受信入力
*3:本アンテナはアンテナ高8mに設置した場合、無線ゾーンは幅10m/距離40～140mとなる

2.1.2　仕様の策定

リクワイアメントを満足すること、技術的に実現可能であることを条件として、表1に示す実証実験用の路車間無線仕様を策定した。

2.1.3　機能の策定

実証実験用の路車間通信システムが有している代表的な機能は以下の通りである。

(1) 誤り制御機能

実証実験では、データ伝送速度が512Kbpsであり通信品質が安定していると考えられること、0.1秒間隔で繰り返し伝送されるデータが多いことを考慮し、データ誤りが発生した時には誤りの部分のみを再送する制御は行わず、データ誤りが検出された時にはそのデータを廃棄する機能を実装する。

(2)　個別通信機能

路車間通信フレームには、通信ゾーン内に存在する実験車両に対して路側から同じ情報を提供する同報通信部と、個々の実験車両に対して個別の情報を提供したり、路側が個々の実験車両から情報を受け取るための個別通信部が設けられている。路車間において個別通信を確立するためには、実験車両が通信ゾーン内に進入してくると、直ちに個々の実験車両毎に個別通信のチャンネルを割当てる必要がある。

(3)　ハンドオーバー機能

無線局（ビーコン）の通信ゾーンの大きさは、電波の電界強度やマルチパスによる干渉等の制約より100m程度が限界である。100m 以上の情報提供範囲を必要とするサービスの提供には、複数のビーコンを連続的に設置して通信ゾーンを形成する必要がある。ハンドオーバーとは、通信中に他の通信ゾーンに車両が移動しても通信が継続できるようにゾーン間の受け渡しを行う機能である。通信ゾーンが切り替わる毎に個々の実験車両に対して個別チャネル割当が行われる。

2.2　スマートウェイ実現への路車間通信

2.2.1　DSRCを必要とするユーザサービス

172のユーザサービスには、路車間において道路の場所に応じた利用者毎の個別情報をリアルタイムに送受信するものが含まれており、このようなサービスの実現にはDSRCを用いることが効果的である。DSRCが効果的と考えられるユーザサービスの形態を分類すると、以下の5種類にまとめることができる。

①情報収集・提供系：道路情報、駐車場案内、走行環境情報、旅行者情報等の提供
②道路管理系：道路管理車両位置モニタ、情報通知等道路管理支援
③車両運行管理系：特殊車両、商用車、公共車の運行管理支援
④料金収受系：有料道路や駐車場等の自動料金収受
⑤走行支援系：道路環境、走行環境等に関する事象のリアルタイムな提供による安全走行の支援および道路交通の効率性向上支援

2.2.2　DSRCの要件の抽出

表2にユーザサービスの形態を通信の型式別に分類し、さらにユーザサービスの形態を実現するために通信インフラに求められる機能を整理した。

(1)　通信の型式

①同報（放送）型：情報を提供する車両を特定せず、路側が周期的に同報情報を提供する。
②車両モニタ型：車両の位置登録、車両が収集した情報を路側に送信する。
③リクエスト型：車両から路側に対してサービスのリクエストを行い、これに基づいて路側がリクエストを行った車両に対して個別情報を提供する。

④トランザクション型：通信ゾーン内において、定められた手順にしたがって路車間で双方向通信を行うことによりサービスを提供する。

(2) 通信インフラに求められる機能

①高速で走行する車両との間で通信すること。

②多数の車両との同時に通信すること。

③リアルタイム性の高い情報を提供すること（情報更新周期の短い通信）。

④高い通信セキュリティを確保すること。

⑤道路方向に長い情報提供範囲を形成すること。

⑥大容量の情報を通信すること。

⑦通信プロトコルの拡張性を確保すること

表2 通信形態と通信に求められる要件

		情報収集・提供	道路管理	車両運行管理	料金収受	走行支援
通信形態	同報（放送）型	○				
	車両モニタ型	○	○	○		○
	リクエスト型	○				
	トランザクション型	○			○	○
通信機能	高速走行する車両との通信	○	○	○	○	○
	同時に多数の車両との通信	○				○
	即時性の高い通信			○	○	○
	信頼性の高い通信				○	○
	広い通信範囲	○	○			○
	大容量の情報通信	○				○
	拡張性の高い通信プロトコル	○	○	○	○	○

2.2.3 今後の課題

通信インフラに対する要件を満足する上で解決しなければならない課題について以下に示す。

(1) 伝送速度の高速化

DSRCは狭い通信ゾーンで情報通信を行うため、大容量の情報を送受信するためには、伝送速度の高速化が重要である。高速通信の安定した通信品質を確保するためには、周波数を効率的に利用する変調方式の活用、フェージング対策技術の開発が必要である。

(2) 広い情報通信領域の形成

カーブ区間における前方障害物衝突防止支援サービスを提供する走行支援システムは、道路区間の数百mをカバーする情報通信領域を有する通信インフラを必要とする。このような情報通信領域を形成するためには、DSRCを複数連接して設置して、個々のDSRCの通信ゾーン間で情報通信を継続するハンドオーバ技術の確立が必要である。さらに、DSRCの通信ゾーンを道路方向に長くすると路面等の反射によるマルチパス、シャドウイング等の電波伝播の障害を解決することが必要である。

(3) 通信のセキュリティ確保

ETCの料金収受や走行支援システムの交通事故を回避するための情報提供等は、路車間における確実な通信の完了、通信の妨害やデータの改ざん等の防止という点から、通信のセキュリティを確保するための暗号化技術等の開発が必要である。

(4) 多様な道路環境への対応

道路には、カーブ・トンネル・橋梁・高架等様々な構造が存在する。このような多様な道路環境に対して低コストで幅広く対応できる通信インフラ設備構造とする必要がある。また、通信インフラの設置に対する美観保護も今後の大きな課題になると考えられる。

(5) ユーザサービスの拡張性を有する通信仕様

様々なユーザサービスを異なった通信方式によって提供することは、ユーザの負担が大きくなるため避けなければならない。また、今後の通信技術の進歩に対応できる通信方式でなければ、新技術の活用の障害となる。したがって、ユーザサービスの統合化、高度化にユーザが最低限度の負担で対応できるような拡張性の高い通信仕様を策定する必要がある。

（岩崎、村田、小林、酒井）

9.8　システムの設計に関する調査

研究期間：平８～平１２
担当：高度道路交通システム研究室

【要旨】

走行支援システム（ＡＨＳ）は、情報・通信技術の活用により、従来不可能だった前方の見えない障害物や交差車両等の情報をリアルタイムにドライバーへ提供することにより、事故の大幅な削減を図ることを目的している。本研究では、これまでに走行支援システムのシステム設計を行ってきたが、平成１１年度では、走行支援システムの実用化に向けて、これまでに実施してきたシステム設計についてさらに詳細化をすすめるとともに、来年度に土木研究所テストコースにおいて実施予定の実証実験に使用するＡＨＳ実機システム（実証実験システム）の設計・製作を実施した。

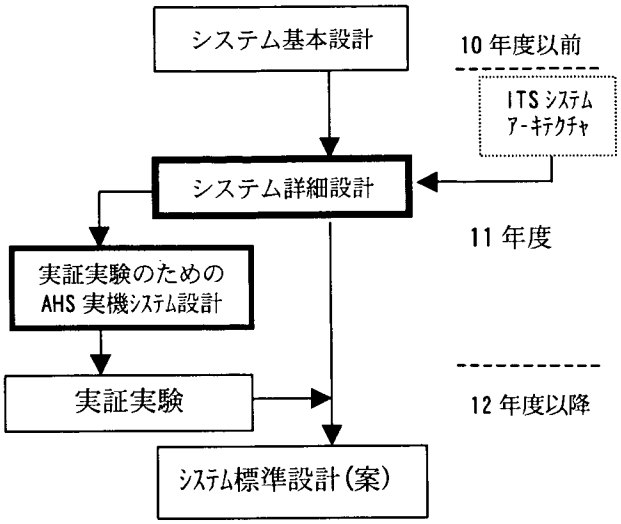


図１　本研究の位置づけ

１．研究方法

走行支援システムの効率的・効果的な展開を図るためには、ＩＴＳ全体の設計図であるシステムアーキテクチャを考慮しながら、走行支援システムの個々のユーザサービスやその他ＩＴＳのサービスとの機器の共有化を図り、最適な機器構成、機能配置等のシステム設計の作成することが極めて重要である。そのため、本研究では、これまで実施してきた走行支援システムのシステム設計を基に、システムアーキテクチャとの整合を図りつつ、安全性の考え方を追加し、システムの設計の詳細化を実施する。また、システム設計の詳細化を受け、平成１２年度の実証実験に用いる実証実験システムの設計と製作を実施する。

２．研究結果

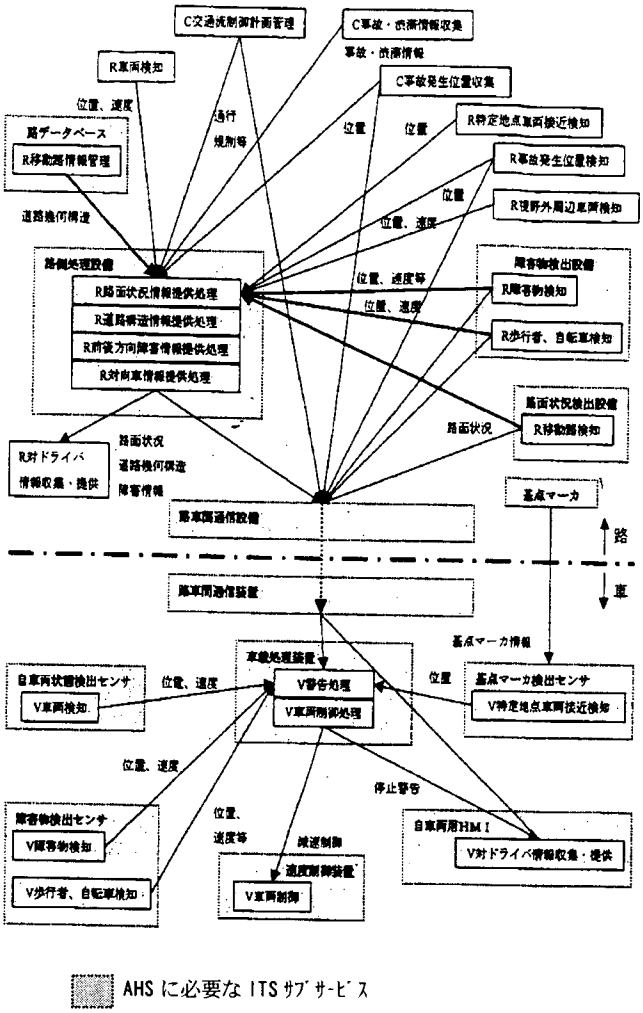
2.1 システムアーキテクチャとの整合検証

平成１１年１１月、建設省を含むＩＴＳ関連５省庁はＩＴＳの全体設計図であるシステムアーキテクチャを完成させた。システムアーキテクチャは平成８年度に策定された「ＩＴＳ全体構想」で示された９つのＩＴＳ開発分野を１７２のサブサービスに細分化して、その実現のために必要な機能・情報を整理し、情報についてできる限り共有化できるように体系化して、システムを構成するサブシステムを設定するものである。走行支援システムの効率的なシステム設計を実施していくために、このシステムアーキテクチャの中で走行支援システムの７つのサービス（前方障害物衝突防止支援、カーブ進入危険防止支援、車線逸脱防止支援、出合い頭衝突防止支援、右折衝突防止支援、横断歩道歩行者衝突防止支援、路面情報活用車間保持等支援）がサブサービスのパッケージングで実現されるものであるかについて検証をおこない、システム設計を進める上での課題を整理した。走行支援システムの７つのサービスとそれに関連するサブサービスを抽出した結果を表１に示す。走行支援システムの７つのサービスは１５のサブサービスの機能を合成することで再現でき、走行支援システムはサブサービスのパッケージングとして取り扱うことができることが分かった。さらにサブモデルレベルで整合性を検証し、その検証結果の例として、障害物衝突防止支援サービスと関連する６つのサブサービスのサブモデル図を図２に示す。走行支援システムはハッチング部分により実現されるが、基点マーカに直接該当するサブシステムがなかったものの、それ以外のシステム機器については整合がとれ

ており、その他のＩＴＳサービスとの機器共用化を考慮に入れた各機器の設計の必要性が改めて明らかになった。また、図２を見れば明らかなように、走行支援システムを実現するためのサブサービスには、走行支援システムでは必要のないサブモデルも数多く含まれているが、今後それらの機器を接続することにより、走行支援システムの構成機器を旅行者情報提供に活用するなどの機能追加が予想されることから、今後の拡張性を視野に入れたシステム設計や機器設計が必要である。

表１　走行支援システムサービスとサブサービス

	走行支援システムのユーザサービス / サブサービス	前方障害物衝突防止支援	車線逸脱防止支援	カーブ進入危険防止支援	出合い頭衝突防止支援	右折衝突防止支援	横断歩道歩行者衝突防止支援	路面情報活用車間保持等支援
走行環境情報	路面状況情報の提供	○	○	○	○	○	○	○
	道路構造情報等の提供	○	○	○	○	○	○	○
	前後方向の障害等情報の提供	○						
	対向車情報の提供	○						
	市街地交差点での情報の提供				○	○	○	
危険険警告	道路構造等の危険警告			○				
	前後方向の車両の危険警告							○
	歩行者、障害物の危険警告	○			○			
	車線逸脱警告		○	○				
	交差点危険警告				○			
運転補助	道路構造等の危険性に対する運転補助			○				
	前後方向の車両の危険性に対する運転補助							○
	歩行者、障害物の危険性に対する運転補助	○						
	車線逸脱時の運転補助		○	○				
	交差点での運転補助				○			



AHS に必要な ITS ｻﾌﾞｻｰﾋﾞｽ

図２　前方障害物衝突防止支援サービスが関連するサブサービスを構成するサブモデル図

2.2 安全性の検討

本研究では、通信エラーなどの一時的な故障や故障の通知ができない故障、サービス中に故障状態になる場合の故障というように、故障の発生をドライバに通知できない故障や通知が間に合わない状態を「危険な故障」として考え、その発生確率を抑えるためにシステムが有すべき機能（安全機能）について検討した。これまでに行ったハザード解析から走行支援システムにおいて発生が予想される危険な故障のパターン（例：シャドウイングによる通信エラー、悪天候による障害物の未検知）を整理し、安全機能を表２に示す６つの機能に分類した。

表２　安全性機能の概要

	中分類	小分類	機能概要
安全機能	異常検出	自己診断機能	自設備の異常を検出する機能 ・環境悪化を把握する機能、・性能劣化を把握する機能、・故障を把握する機能
		相互診断機能	通信相手となる設備の異常を検出する機能 (ｱ) 接続設備を定期的に監視する機能、(ｲ) 接続設備との通信を監視する機能 (ｳ) 接続設備の状態を監視する機能
		入力ﾃﾞｰﾀﾁｪｯｸ機能	外部から入力したデータの異常を検出する機能。入力データの時系列的な連続性や項目間の整合性からデータの妥当性を判断。
	異常判断	異常判断機能	異常検知の結果をもとに、サービス停止等の対応を決定
	異常通知	異常通知機能	異常検知の結果と異常判断機能の判断結果を、ＡＨＳ車両ならびにセンタ設備に通知

安全機能は６つの機能から構成されており、それぞれの機能毎にセンタ設備、路側処理設備、路車間通

信設備等のシステムを構成する設備が有すべき詳細機能について明らかにした。

例として、図３に相互診断機能に関するシステム構成設備間で有すべき詳細機能について示す。

2.3 実証実験用 AHS 実機システムのシステム設計

これまでの走行支援システムのリクワイアメンの検証、システム設計の妥当性、システムの有効性等を評価するために平成１２年度に土木研究所のテストコース等において実施する、実証実験のシステム設計を行った。

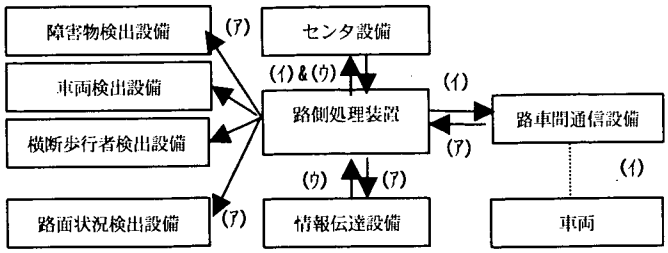


図３　システム構成設備間の相互診断機能に関する関連図

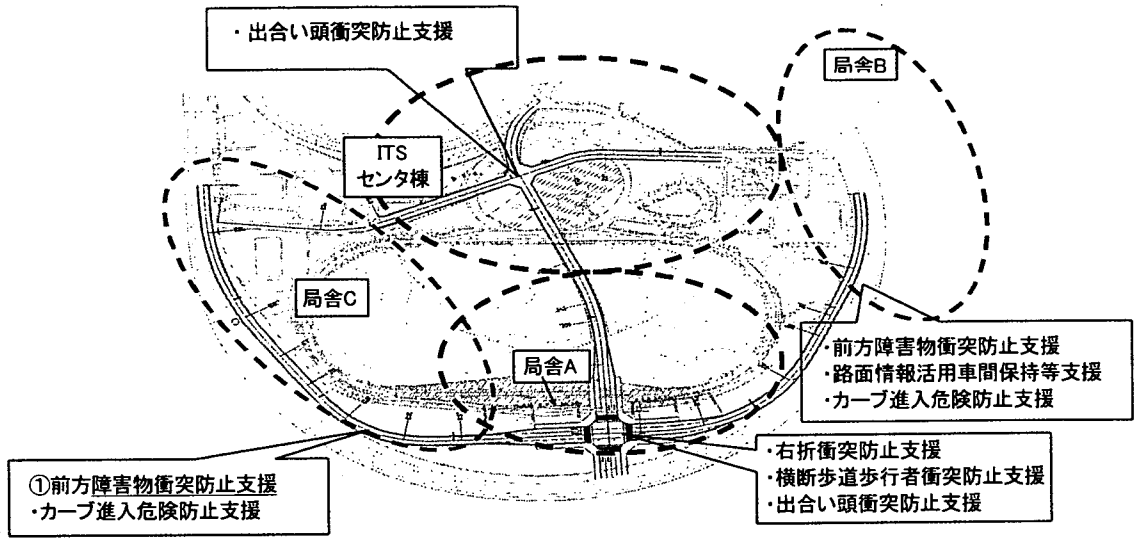


図４　土木研究所における実証実験場所（南ループ）

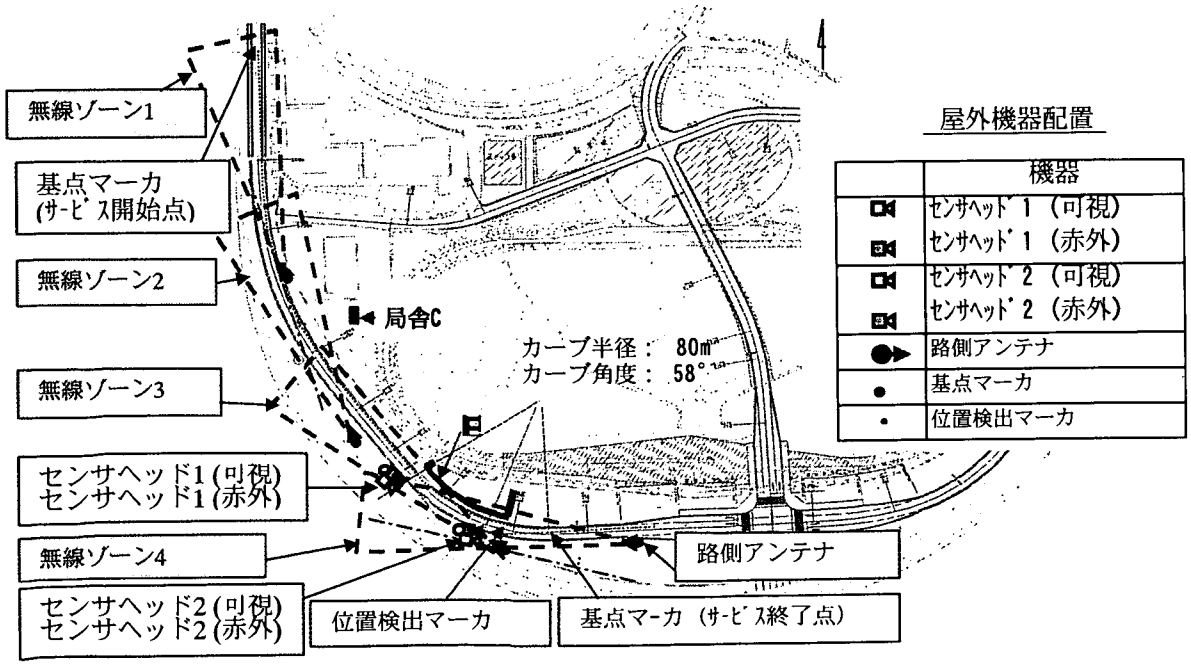


図５　前方障害物衝突防止支援サービスのため実機システム設計

システム評価を行うサービスは表１に示してある７つのサービスであり、土木研究所のテストコース全周

ならびに雨霧環境実験施設をつかって実証実験を行うこととしている。図３に示すように、テストコースの南ループエリアでは４エリアに分かれ数多くのサービスの実験を行う予定である。走行支援システムのリクワイアメントを基に土木研究所テストコースの道路線形、実証実験のなかで様々な実験に対応できる等を考慮してシステム設計を行った。その一例として図３中の①として示す障害物衝突防止支援サービスの設計結果を図４に示すとともに、その設計手順について述べる。図３の①のエリアはカーブ半径８０m、カーブ角度５８度という主要な線形データを持つカーブ区間である。リクワイアメントから無線ゾーンは緩制動０．３Ｇをもとに設定すべきところであるが、リクワイアメントの設定値自体も実証実験の評価対象である点を考慮し減速度を０．２Ｇとした範囲まで通信範囲を拡大することとした。そこから、無線機、道路センサの性能を考慮し無線ゾーンは４ゾーン、道路センサの２セットとした。道路センサはセンシング方式の比較評価を行うため、可視タイプと赤外タイプを併設することとした。

表３　路車間通信ﾒｯｾｰｼﾞｾｯﾄ路→車　同報）

項目				byte
ﾒｯｾｰｼﾞ種別			プロトコル識別子	1
			メッセージＩＤ	1
			データ長	2
			データ作成日付	4
			データ作成時刻	3
道路関連情報	交差点情報		フィールド識別子	1
			フィールドデータ長	2
			接続道路の有無	4
			横断歩道の有無	4
			繰り返し道路数	1
		接続道路情報	道路番号	1
			基点マーカからの距離	2
			停止位置	2
			横断歩道内側位置	2
			横断歩道幅	1
			交差点の大きさ	2
			優先道路監視対象道路	4
			対向道路監視対象道路	4
	道路線形情報		フィールド種別子	1
			フィールドデータ長	2
			繰り返し道路数	1
			道路番号	1
			車線数ﾃﾞｰﾀ繰り返し数	1
			車線数ﾃﾞｰﾀ　縦位置	2
			車線数	1
			道路幅ﾃﾞｰﾀ繰り返し数	1
			道路幅ﾃﾞｰﾀ　縦位置	2
			車線幅	1
			曲線半径ﾃﾞｰﾀ繰り返し数	1
			曲線半径ﾃﾞｰﾀ　縦位置	2
			曲線種類	1
			曲線半径	2
			縦勾配ﾃﾞｰﾀ繰り返し数	1
			縦勾配ﾃﾞｰﾀ　縦位置	2
			縦勾配	1
			横勾配ﾃﾞｰﾀ繰り返し数	1
			横勾配ﾃﾞｰﾀ　縦位置	2
			横勾配	1
			舗装種類ﾃﾞｰﾀ繰り返し数	1
			舗装種類ﾃﾞｰﾀ　縦位置	2
			舗装種類	1
提供ｻｰﾋﾞｽの種類			フィールド識別子	1
			フィールドデータ長	2
			繰り返し道路数	1
		道路毎	道路番号	1
			提供ｻｰﾋﾞｽﾃﾞｰﾀ繰り返し数	1
			提供ｻｰﾋﾞｽﾃﾞｰﾀ　提供ｻｰﾋﾞｽの種類	1
			ｻｰﾋﾞｽ範囲	2

2.4 実証実験用路車間通信インターフェース設計

実証実験に用いる路側に配置される路車間通信設備と車側の路車間通信装置間の「路車間通信インターフェイス」について検討した。本研究ではその中でも特にメッセージセットとデータディクショナリを作成した。走行支援システムのサービス開始から終了までに、路車間通信でやりとりするメッセージは路車間で使用されるメッセージは現在のところ、①車→路個別メッセージ、②路→車個別メッセージ、③路→車同報メッセージ、の３種類となっている。車から路へメッセージは主に車両の登録情報から構成されており、路から車へのメッセージは主に道路構造や道路線形といった道路関連情報と路面状況や障害物の情報というような路側設備で収集したインフラセンシング情報で構成されている。実証実験で使用する路車間通信における通信内容、範囲、表現方法、通信量等を検討し、メッセージセットおよびデータディクショナリを作成した。その一例としてメッセージセットを表３に、データディクショナリを表４に示す。また、本メッセージセット、データディクショナリを実証実験に用いることにより、別研究課題で検討作成した通信プロトコルやサービス自体の評価を行っていく予定である。

表４　データディクショナリ（路→車）の一例

No	項目	説明	符号	単位	範囲
1	メッセージ種別	路車間通信メッセージの種類を表す			
2	プロトコル識別子	提供サービスが、AHSサービスであることを通知 1：実証実験用 AHS サービス、2：実用 AHS サービス	無し	—	1…2
3	メッセージＩＤ	メッセージの種類を通知 1：車→路個別、2：路→車個別、3：路→車同報	無し	—	1…3
4	データ長	路車間通信メッセージ（プロトコル識別子、メッセージＩＤ、データ長、データ作成日時含む）のバイト数	無し	1 byte	—
5	データ作成日付	路車間通信メッセージを作成した日時 【用例】2000/4/28 → 0x20000415	無し	100ms	—
6	データ作成時刻	路車間通信メッセージを作成した時刻。経過時間で表示	無し	100ms	0…863999

３．今後の課題

今後、事故多発地点等の現地調査結果や実用システムのリクワイアメントの見直しおよび実証実験結果をシステム設計に反映させてこととしている。更に、２００１年以降の実験計画へ対応するための実証実験システム設計の見直しを実施すると共に実道フィールド用実験のためのシステム設計を実施する予定である。

（岩崎、村田、横地、小林）

9.9　システムの評価に関する調査

研究期間：平 8～12
担当：高度道路交通システム研究室

【要旨】

本研究は走行支援システム開発において、開発プロセスと結果が目的と目標に照らしあわせて妥当であるかを評価し検証することを目的として、ドライビングシミュレータ、AHS 交通シミュレータおよび実機システムを用いて、リクワイアメント作成のためのヒューマンファクタに関するデータ収集、ユーザサービスの事故回避に対する有効性の検証、ドライバーの受容性の評価等を行うものである。11 年度はヒューマンファクタ評価装置を用いたドライバーの走行挙動データ収集による走行支援システムの有効性の検証、および実機を使用したユーザサービスの事故回避に対する有効性やユーザ受容性を評価するための実験計画の作成を行った。

1.研究内容

1.1 ドライビングシミュレータを用いた走行支援システムの有効性検証

1.1.1 研究方法

ドライビングシミュレータを用いて、減速回避を要する危険場面を想定し、情報提供・警報に対するドライバの反応行動を測定し、走行支援システムのサービスの有効性を検証した。被験者は一般男性（25～36 才）15 名、一般女性（25～38 才）15 名、ならびに高齢者（60～72 才、男性のみ）20 名で実施し、一般ドライバーと高齢者ドライバーの走行挙動の比較を行うとともに、特に高齢者に対するサービス提供の有効性を検証した。まず、被験者層別の 2 つの基本的な回避反応特性の違いを明らかにした。一つは警報発令と同時に即ブレーキを踏むという単純反応、もう一つはディスプレイに加速または停止を指示することにより、アクセルかブレーキかを判断する必要のある選択反応である。次に、情報提供による事故回避反応時間を計測し、走行支援システムによる情報提供の有効性を基本的回避反応特性と比較することにより検証する。本研究では一般道における半径 100m の見通しの悪いカーブ区間を 60km/h の速度で走行中、前方に障害物（停止車両）が存在し、これを回避する場合を想定し、ドライバーに前方障害物に関する情報提供・警報のサービスを実施した。情報提供は 3.5 秒の反応時間後に、0.5 秒の制動立ち上がりと 3.0m/s² の減速度で衝突を回避できるタイミングで、車載ディスプレイを通じて「前方停止車　走行注意」と表示することによりドライバーに提示するものとした。

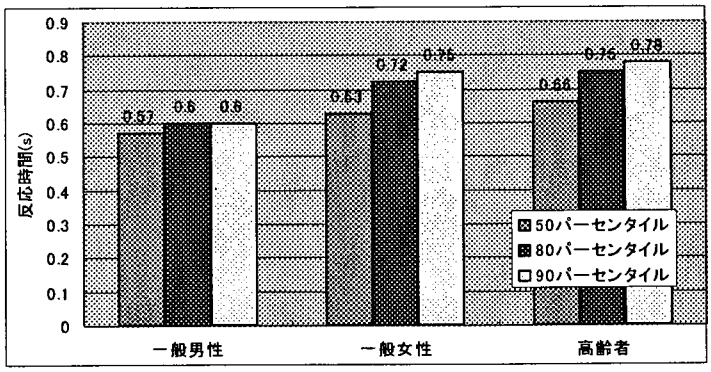


図 1　基本的回避反応特性（単純反応）

1.1.2 研究結果

図 1 に単純反応時間を、図 2 に選択反応時間の計測結果を示す。図より、高齢者は一般男女と比較して単純反応・選択反応ともに多くの時間を要していることが分かる。しかしながら、単純反応時間に関しては、50 パーセンタイルで見た場合、その差は一般男性と比較して 0.09 秒、一般女性と比較すると 0.03 秒とそれほど大きな差を示していない。一方、より実際の運転挙動に近い選択反応時間においては、50 パーセンタイルで見た場合、その差は一般男性と比較して 0.27 秒、一般女性とは 0.33 秒と開いており、さらに 90 パーセンタイルで見た場合、一般男性とは 0.39 秒、一般女性とは 0.6 秒と差が拡大しているのが分かる。そこで、情報提供により、前方障害物の存在を事前に知らせることにより、運転における選択判断の負担を軽減してやれば、高齢者も一

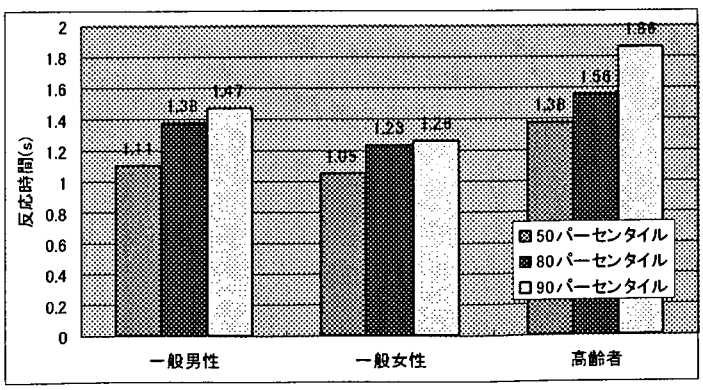


図 2　基本的回避反応特性（選択反応）

般ドライバーに近い反応時間で減速できるのではないかという仮定が立てられる。

図3に情報提供に対する減速反応時間を示す。図より情報提供に対する減速反応においては、50パーセンタイルで見た場合、高齢者は一般男性と比較して0.07秒の差で減速反応している。これは一般女性よりも僅かではあるが早い反応である。この結果は、情報提供が高齢者の運転における選択判断負荷を軽減するという仮定を立証する一例と考えることが出来る。一方で、90パーセンタイルで見た場合、一般男性と高齢者では0.95秒、一般女性とは0.4秒の差があり、高齢者の情報提供に対する反応には個人差が大きく、情報提供だけでは全ての高齢者の運転を一般ドライバーと同程度にまで向上できるものではないことを示している。

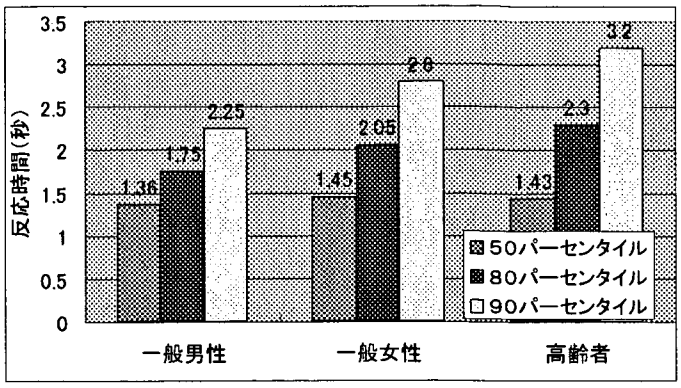


図3　情報提供に対する減速反応

1.2 実証実験計画の作成

実用リクワイアメントの作成、ヒューマンファクタ等に関する基礎データの取得を目的として、以下に挙げる6つの項目から成る実証実験を実施する。

1)リクワイアメントの検証

リクワイアメントにおいて仮設定されたドライバーのヒューマンファクタ値（反応時間や減速度等）および車両特性値（減速度等）の妥当性を評価するために、情報提供や警報に対するドライバーの反応時間や減速度を計測する。また、実用リクワイアメントを作成するために追加すべき項目を抽出する。

2)システム設計の妥当性評価

センサの検出性能、サービス提供、機器構成、員数等の妥当性を評価するために、実証実験システムを構成するインフラ機器の員数や配置およびサービスの提供タイミングを変化させ、システム設計の妥当性を評価する。またシステムの安全性・信頼性検証のために、異常事態発生回数・条件を測定し、当該事象発生の要因を分析する。

3)システムの有効性評価

過年度までの研究成果によって設計されたシステムおよびインフラ構成機器が、同様のサービスを実施できる他のシステムと比較して事故回避において、より有効であるか否かを評価するために、路車協調サービス、車両単独サービス、サービスがない場合によるドライバーの反応や車両挙動を比較し評価する。

4)ドライバーの受容性評価

サービスの提供方法（車載ディスプレイ上における表示、情報板における表示、音声）や提供タイミングがドライバーに受容されるかを評価するために、サービスの提供タイミングや提供頻度を変化させた場合のドライバーの生理的変化の計測や、サービス提供に対するドライバーの認知率と反応率を計測する。

5)ハザード対策

システム構成機器の故障や性能低下等が発生した時のフェイルセーフ機能（正常時におけるサービス提供が実施不可能なことをドライバーに知らせる機能）が正しく機能し、正確に伝わるかを評価するために、サービス停止をドライバーに情報提供した場合のドライバーの反応時間・減速度等を計測する。

6)システムの拡張性

見通し不良カーブ区間での第2当事者に対する対向車に関する情報提供や、車路車間通信を利用した出合い頭衝突防止支援ならびに右折衝突防止支援における第2当事者への情報提供に関する実験を行い、システムの拡張性に対する課題の抽出を行う。

2.今後の課題

12年度は、実験計画に基づく実証実験の実施、ドライビングシミュレータを用いた危険事象におけるドライバー挙動の計測、AHS 交通シミュレータを用いたシステムの有効性の検証を行うことにより、より現実に近い状況（多数の車両が介在した複雑な状況等）での評価を行う予定である。

（岩崎、田中、村田、小林）

建設事業のコスト縮減に関する研究

１０．建設事業のコスト縮減に関する研究

研究期間：平成 10～13 年度
プロジェクトリーダー：建設マネジメント技術研究官
藤本　聡

1. 研究の背景：

平成９年４月に「公共工事コスト縮減対策に関する行動指針」が関係閣僚会議において策定されるなど、建設事業のコスト縮減は政府全体で取り組むべき重要な課題となっている。土木研究所においてもマネジメント技術を含む多様な領域において、直接、間接に公共工事のコスト縮減に資する研究に取り組んでいる。

しかしながら、これらの研究開発は、必ずしも建設事業のコスト構造を踏まえて戦略的、重点的に行われているとは言えない部分もあり、個々の要素技術の開発も全体コストをどれほど縮減するものかが曖昧なまま取り組まれているものも少なからずある。

従って、コスト縮減を効率的、効果的に進めるためには、まず建設事業のコスト構造の解明が必要である。さらに、これを踏まえて、重点的に研究開発を進めるべき分野の提示等が必要となっている。

2. 研究の目的：

① 建設事業のコスト構造の解明と要素技術の開発およびそれらのコスト縮減効果の予測
② 土木研究所における技術開発指針（案）の作成
③ 民間に対する技術開発ニーズの提示
④ プロジェクトマネジメントシステムの開発

3. これまでの研究成果：

①建設事業のコスト構造の解明と要素技術の開発およびそれらのコスト縮減効果の予測

建設事業のコスト構造の解明については、直轄事業の代表工種である道路および河川工事のコスト構造の実態把握を行った。その結果、道路工事・河川工事とも、土木工事積算システムの工事工種体系におけるレベル４（工種細別）の金額シェア上位１割程度の工種数で工種金額全体の約７割を占めていることが判明し、これらの工種細別に重点を置いた研究開発の方向性が示唆された。

さらに、要素技術の開発およびそれらのコスト縮減効果の予測については、「軽量盛土材の活用」、「擁壁構造の設計合理化」、「シールド工事の設計合理化」、「橋面舗装の合理化」、「深層混合処理工法の合理化」、「管渠システムの設計合理化」、「揚排水機場の設計合理化」に関する研究を行った。その結果、「擁壁構造物の設計合理化」については、変形を考慮した補強土壁の設計法を提案した。これにより、従来地盤改良が必要と判断された箇所でも地盤改良が不要となる場合もあり、コスト縮減効果が大きく期待できることが明らかとなった。「シールド工事の設計合理化」については、新たなセグメントを採用することにより、従来工法に比べ、2～9%のコスト縮減効果が期待できることが確認できた。「管渠システムの設計合理化」については、マンホールの小型化やマンホール間隔の拡大により、地域によってはマンホール建設費を最大で３割程度縮減できることが明らかとなった。その他の課題については、工法の適用条件等の研究を行った。

②プロジェクトマネジメントシステムの開発

受注者の工事プロセスと発注者の業務プロセス（設計協議、発注契約、検査、変更契約など）を対象に建設プロセスの体系化を試みた（ＷＢＳの試作）。また、体系化された業務プロセスを用いたプロジェクト・マネ

ジメント・システムのプロトタイプの開発を行い、その試運用と評価を行った。

－建設事業のコスト縮減に関する研究－

個別研究課題目次

10.1.1 建設事業のコスト構造の分析に関する調査（その１）…… （建設システム課）…350

10.1.2 建設事業のコスト構造の分析に関する調査（その２）…… （建設システム課）…352

10.2 軽量盛土材の活用に関する調査…… （土質研究室）…354

10.3 擁壁構造物の設計合理化に関する調査…… （施工研究室）…358

10.4 シールド工事の設計合理化に関する調査…… （施工研究室）…362

10.5 橋面舗装の合理化に関する調査…… （舗装研究室）…364

10.6 深層混合処理工法の合理化に関する調査…… （土質研究室）…366

10.7 管渠システムの設計合理化に関する調査…… （下水道研究室／建設システム課）…368

10.8 揚排水機場の設計合理化に関する研究…… （機械研究室）…374

10.9.1 プロジェクトマネジメント手法の検討に関する調査（その１）…… （建設ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ技術研究室）…376

10.9.2 プロジェクトマネジメント手法の検討に関する調査（その２）…… （建設ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ技術研究室）…378

10.9.3 プロジェクトマネジメント手法の検討に関する調査（その３）…… （建設ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ技術研究室）…380

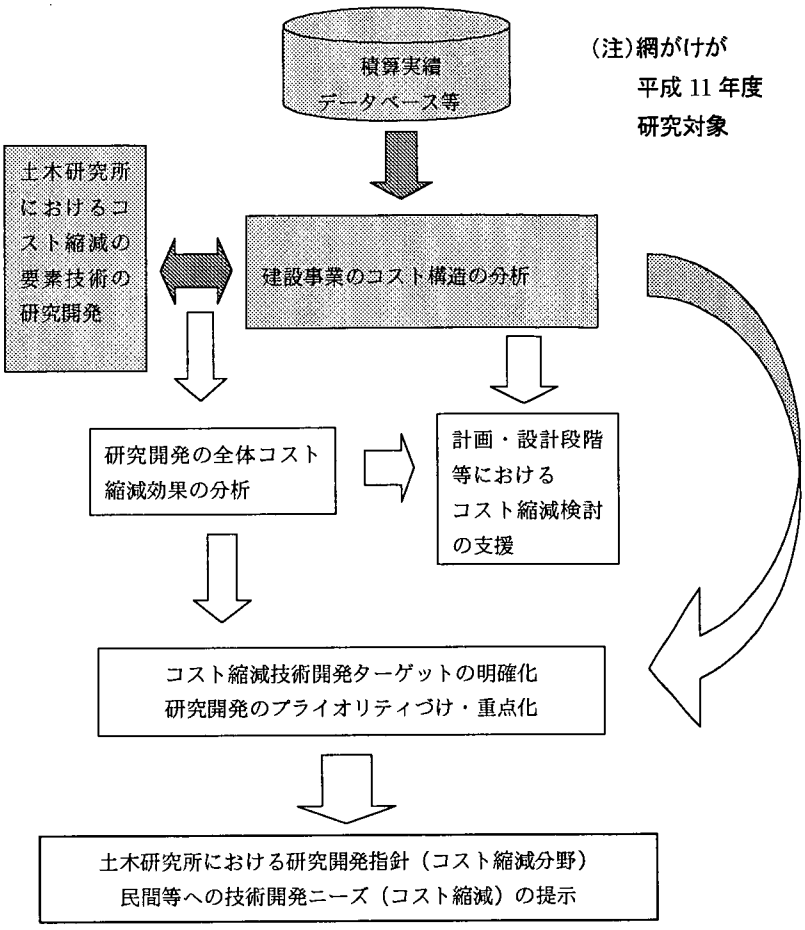
10.1.1　建設事業のコスト構造の分析に関する調査（その１）

研究期間：平 11～平 13
担当：建設システム課

【要旨】

公共工事のコスト縮減に対する社会的要請は極めて強いが、これに適切に応えていくためには、縮減効果をできる限り定量的に把握し、目に見える形で公表するとともに、コスト縮減のための技術開発や施策検討を効果的に行っていくことが重要である。このため、本研究では、積算実績データベースを利用して道路事業における建設工事のコスト構造を階層的に明らかにし、計画段階等におけるコスト縮減に向けた取り組みが効率的に行えるよう支援するとともに、土木研究所の個々の研究開発等が全体コストに与える効果を試算・評価し、コスト縮減の視点からみた効果的な技術研究開発のあり方について提言を行うものである。

平成 11 年度は、コスト縮減の仕組みについて整理を行い、本研究の位置づけを明らかにするとともに、道路工事のコスト構造の実態把握および工事コストの構成要素とコスト縮減施策との関係分析を行った。



図－１　研究全体フロー

１．研究方法

コスト構造の実態把握にあたっては、建設省直轄工事事務所の道路工事（平成 10 年度）の積算実績データベースを用いた。また、工事コストの構成要素とコスト縮減施策との関係分析については、新土木工事積算大系における体系ツリーに基づく構成要素と、土木研究所におけるコスト縮減関連の要素技術開発との結び付けを中心に行った。

２．研究結果

２．１　コスト縮減の仕組みの整理

建設事業のコスト縮減に直接的に影響する要因として、次の３つに分類化した。

(1)　技術的要因（材料・設計手法・工法・施工管理手法等の見直し）
(2)　社会的要因（諸規制・制度・要求性能等の見直し）
(3)　市場的要因（生産・流通システム等の改善）

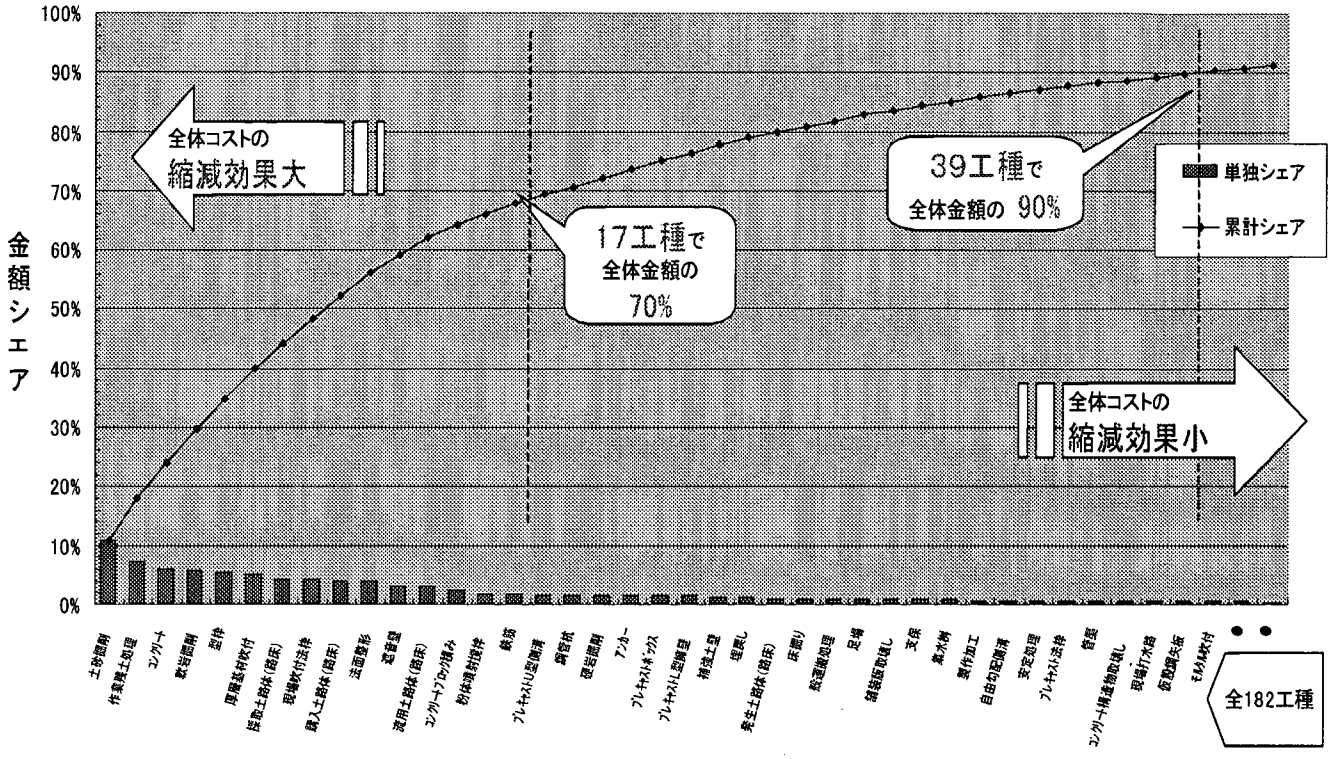
また、実際に行われているコスト縮減に向けた代表的な取り組みを、これらの直接的な要因を促進するための仕組みづくりと位置づけ、「ＶＥ（Value Engineering)」「技術開発の推進」「情報収集・提供環境の充

実」「入札・契約制度の改善」「意識改革の推進」等と整理した。

これらのうち、本研究は、コスト縮減を促進する重要な要素である「ＶＥの推進」や「技術開発の推進」を効果的・戦略的に進めるものとして位置づけた。

２．２　道路工事のコスト構造の実態把握

道路工事のうち、建設省直轄事務所において特に頻度の高い道路改良工事等について、そのコスト構造を階層的に明らかにした。新土木工事積算大系の体系ツリーにおけるレベル２でみると、道路土工が最も多く、法面工、擁壁工、小型水路工、カルバート工を合わせた５工種で全体の８割を占めた。また、レベル４でみると、土砂掘削以下、金額シェアの多い上位１割弱の工種数で全体の７割を占めた。（図－２）



図－2 道路改良工事における工種金額シェア(レベル4)

２．３　工事コストの構成要素とコスト縮減施策との関係付け

土木研究所においては、コスト縮減に通じる個々の要素技術の研究開発に取り組んでいるが、これらの研究開発が、工事コストのどの構成要素に結び付いているか（縮減効果がどこに現れるか）、その関係付けを行った。

３．主な研究成果物

・建設省土木研究所「戦略的なコスト縮減を目指して」（パンフレット）、平成12年３月

（松井、福田、澤田、大田）

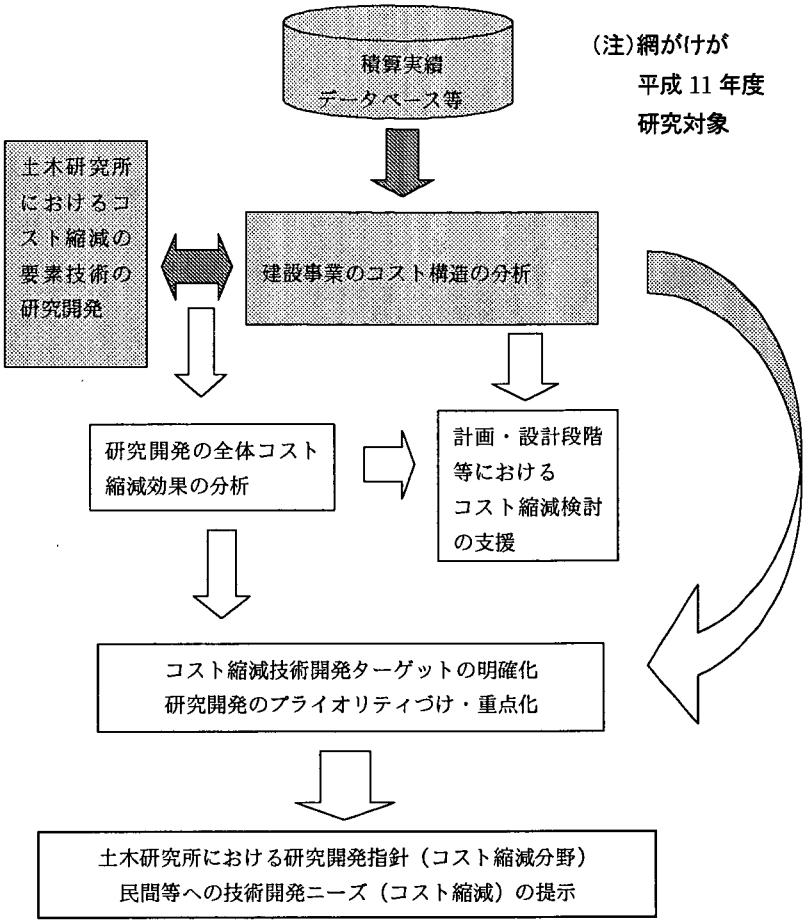
10.1.2　建設事業のコスト構造の分析に関する調査（その２）

研究期間：平 11～平 13
担当：建設システム課

【要旨】

公共工事のコスト縮減に対する社会的要請は極めて強いが、これに適切に応えていくためには、縮減効果をできる限り定量的に把握し、目に見える形で公表するとともに、コスト縮減のための技術開発や施策検討を効果的に行っていくことが重要である。このため、本研究では、積算実績データベースを利用して河川事業における建設工事のコスト構造を階層的に明らかにし、計画段階等におけるコスト縮減に向けた取り組みが効率的に行えるよう支援するとともに、土木研究所の個々の研究開発等が全体コストに与える効果を試算・評価し、コスト縮減の視点からみた効果的な技術研究開発のあり方について提言を行うものである。

平成 11 年度は、コスト縮減の仕組みについて整理を行い、本研究の位置づけを明らかにするとともに、河川工事のコスト構造の実態把握および工事コストの構成要素とコスト縮減施策との関係分析を行った。



図－１　研究全体フロー

１．研究方法

コスト構造の実態把握にあたっては、建設省直轄工事事務所の河川工事（平成 10 年度）の積算実績データベースを用いた。また、工事コストの構成要素とコスト縮減施策との関係分析については、新土木工事積算大系における体系ツリーに基づく構成要素と、土木研究所におけるコスト縮減関連の要素技術開発との結び付けを中心に行った。

２．研究結果

２．１　コスト縮減の仕組みの整理

建設事業のコスト縮減に直接的に影響する要因として、次の３つに分類化した。

(1)　技術的要因（材料・設計手法・工法・施工管理手法等の見直し）

(2)　社会的要因（諸規制・制度・要求性能等の見直し）

(3)　市場的要因（生産・流通システム等の改善）

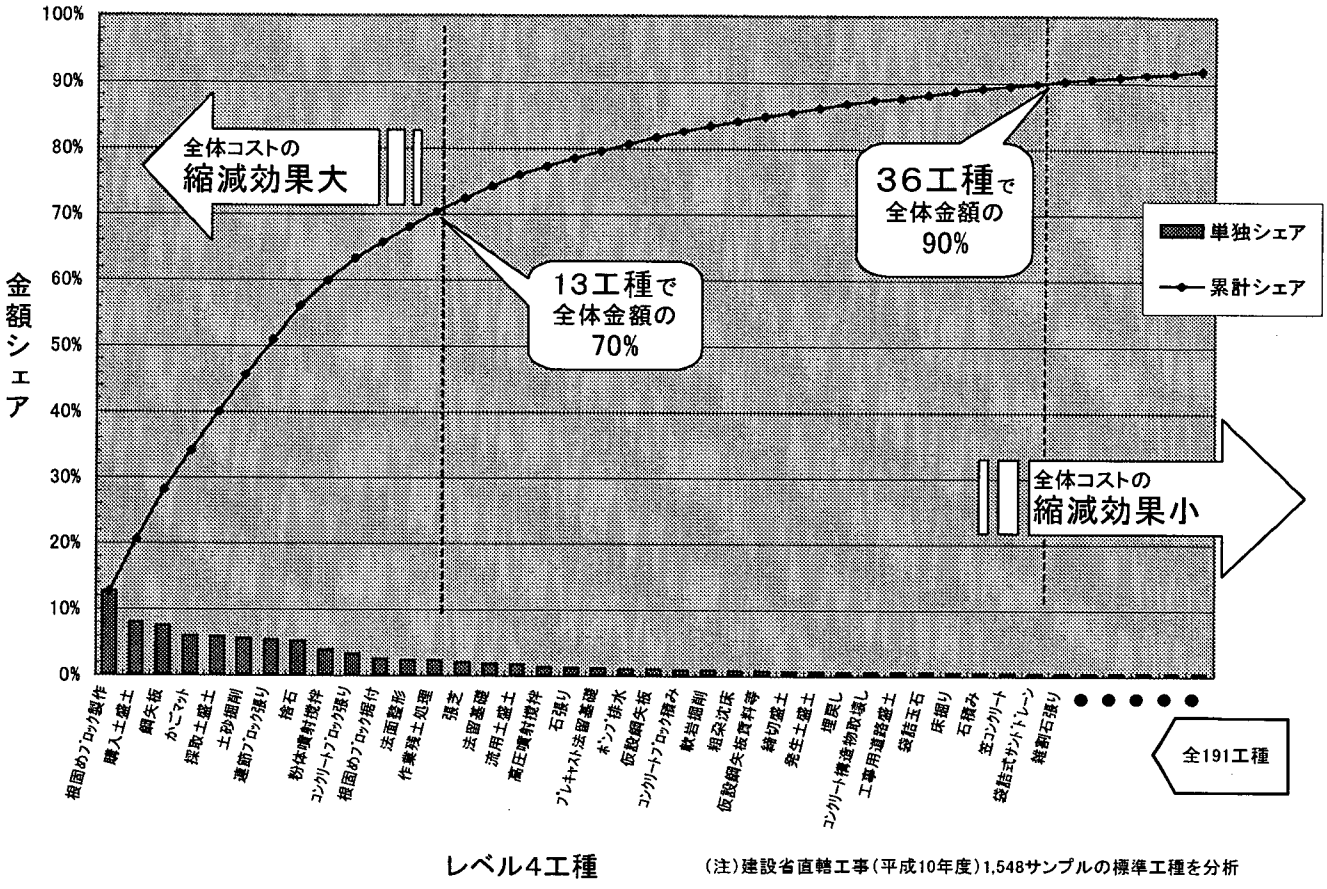
また、実際に行われているコスト縮減に向けた代表的な取り組みを、これらの直接的な要因を促進するための仕組みづくりと位置づけ、「ＶＥ（Value Engineering)」「技術開発の推進」「情報収集・提供環境の充

実」「入札・契約制度の改善」「意識改革の推進」等と整理した。

これらのうち、本研究は、コスト縮減を促進する重要な要素である「ＶＥの推進」や「技術開発の推進」を効果的・戦略的に進めるものとして位置づけた。

２．２　河川工事のコスト構造の実態把握

河川工事のうち、建設省直轄事務所において特に頻度の高い築堤・護岸工事等について、そのコスト構造を階層的に明らかにした。新土木工事積算大系の体系ツリーにおけるレベル２でみると、法覆護岸工が最も多く、河川土工、根固め工、護岸基礎工を合わせた４工種で全体の８割を占めた。また、レベル４でみると、根固めブロック製作以下、金額シェアの多い上位１割弱の工種数で全体の７割を占めた。(図－２)



図－２　河川工事における工種金額シェア(レベル４)

２．３　工事コストの構成要素とコスト縮減施策との関係付け

土木研究所においては、コスト縮減に通じる個々の要素技術の研究開発に取り組んでいるが、これらの研究開発が、工事コストのどの構成要素に結び付いているか（縮減効果がどこに現れるか)、その関係付けを行った。

３．主な研究成果物

・建設省土木研究所「戦略的なコスト縮減を目指して」(パンフレット)、平成12年３月

(松井、福田、澤田、大田)

10.2　軽量盛土材の活用に関する調査

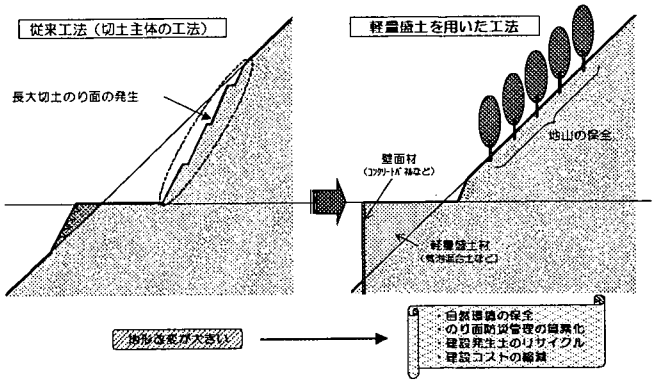
研究期間：平９～平１２
担当：土質研究室

【要旨】

急峻な斜面上の道路建設において，道路中心線を谷側にシフトし，軽量材料等を用いた盛土主体工法とすることにより，大規模切土等による自然環境の改変を最小限にとどめ，かつ建設コストを抑制することが可能となる。このような軽量盛土を活用した山岳道路工法の確立のため，11年度は，前年度に引き続き，気泡混合軽量土の傾斜斜面上盛土への適用について，動的遠心力載荷実験及び数値解析に基づく耐震性の検討等を行った。その結果，急傾斜斜面上に高盛土を構築する場合も，鉛直方向応答による影響を考慮した適切な配合強度設定や必要に応じて地山と盛土体の定着対策工等を実施することにより，十分な耐震性が確保されることがわかった。

1. 研究目的

本研究は，急峻な斜面上の道路建設において，切土による地形改変を出来る限り低減する観点から，軽量材料を用いた盛土主体工法の適用に関するフィジビリティスタディ，並びに耐震性を考慮した設計手法の検討を行うものである。



図－1　地形改変を低減する軽量盛土工法のイメージ

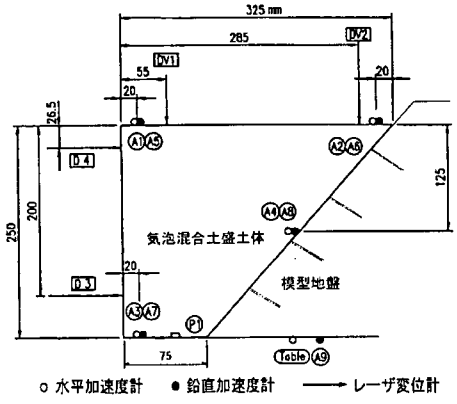
2. 研究方法

動的遠心力載荷実験は，10年度と同様，高さ12.5mの急傾斜斜面上盛土の1/50模型を想定し（図－2参照），50Gで遠心載荷を行った後，段階的に動的加振を実施し，盛土体模型の応答変位及び応答加速度の計測を行うとともに，載荷・加振後の盛土体の変形，破壊状況を観察した。実験に使用した気泡混合軽量土の配合及び強度特性は表－1に，実験ケースは表－2に示すとおりとした。その他の実験条件は下記のとおり。

・模型地盤表面処理：耐水サンドペーパー#1000（地山と気泡混合土の間の摩擦係数0.7程度を再現）

・上載荷重（路盤及び舗装部）：砂鉄入り砂袋を1G場換算で14kPa(1.4tf/m2)相当を再現するよう調整

・加振入力波形：正弦波75Hz20波（1G場換算1.5Hz），地震波（神戸波 N-S成分を卓越周波数75Hzに調整）



図－2　実験模型断面（対策なしケース）

表－1　気泡混合軽量土の配合及び強度特性

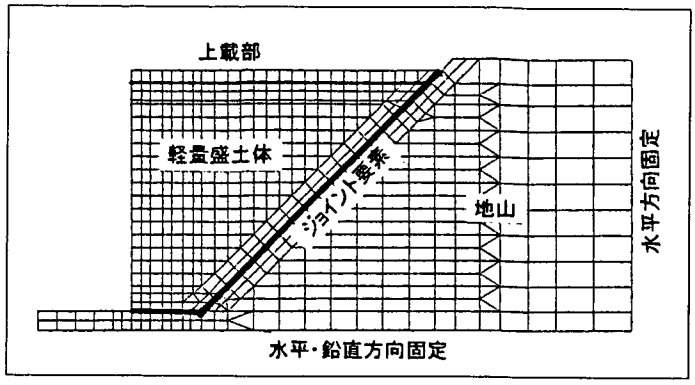
配合	配合（1 m³当たり） 試料土量 [kg]	水 [kg]	固化材量 [kg]	気泡量 [リットル]	一軸強度（4週） [kN/m²]	湿潤密度 [g/cm³]	備考
A	180	241	135	582	84	0.582	※原料土：関東ローム（江戸崎産）（自然含水比92.6％）
B	96	382	100	550	156	0.577	
C	87	350	140	573	290	0.578	※固化材：一般軟弱土用固化材 配合Aのみ普通ポルトランドセメント
D	75	301	200	606	474	0.595	

表－2　実験ケース一覧

実験ケース	設計強度	耐震対策工	入力波形
No.1 (H10)	100kN/m² (1.0kgf/cm²)	なし	正弦波
No.2 (H10)		なし	地震波（神戸波N-S）
No.3	150kN/m² (1.5kgf/cm²)	なし	正弦波
No.4		抵抗杭	
No.5		地山小段＋抵抗杭	
No.6		なし	地震波（神戸波N-S）
No.7		抵抗杭	
No.8	250kN/m² (2.5kgf/cm²)	なし	正弦波
No.9		抵抗杭	
No.10		地山小段＋抵抗杭	
No.11		なし	地震波（神戸波N-S）
No.12		抵抗杭	
No.13	500kN/m² (5.0kgf/cm²)	なし	正弦波
No.14		抵抗杭	

・対策工：①抵抗杭φ1mm，長さ20mmを地山模型に１本／16cm²で設置（1G場換算φ50mm，長さ1m，１本／4m²）
②上記抵抗杭に加え，地山地盤に幅2.5cm（1G場換算1.25m）の小段を２箇所設置

また，上記実験の検証を解析（有限要素法）を用いて行った。解析プログラムとしては地震時のすべり破壊が考慮できる静的及び動的変形解析プログラム「SADAP」を用いた。解析は，ｹｰｽNo.3，4，5，8，9，10，13，14の８ｹｰｽについて行った。解析の土の物性値は，実験土から採取したサンプルに室内試験結果を行い求めた値を用いた。（表－３）解析モデルの地山の側面は水平方向を，底面は鉛直・水平方向を固定とし，地山と軽量盛土の接触する部分にはジョイント要素を適用した（図－３）。また地山の挙動モデルとしては線形モデル，気泡混合土の挙動モデルとして非線形の Hardin-Drnevich モデルを用いた。



図－３ 解析モデル図（対策なしの場合）

表－３ 解析パラメータ

部材	せん断弾性係数の初期値 G_i	単体重量 γ_t	粘性力 c	内部摩擦角 ϕ	静止土圧係数 K_0	静的解析のﾎﾟｱｿﾝ比の初期値 ν_{si}	動的解析のﾎﾟｱｿﾝ比 ν_d	解析モデル定数					
								α_1	n_1	α_2	N_2	α	γ
地山	1.000E+8	2.40	500	0	－	0.250	0..250	1.000E+8	0	－	－	－	－
上載部	1.007E+7	3.20	500	0	－	0.167	0.167	1.007E+7	0	－	－	－	－
気泡混合土１ (qu=150kN/m²)	5.380E+4	5.78	80	0	－	0.397	0.315	5.380E+4	0	－	－	1.0	－
気泡混合土２ (qu=250kN/m²)	8.110E+4	5.84	138	0	－	0.404	0.337	8.110E+4	0	－	－	1.0	－
気泡混合土３ (qu=500kN/m²)	1.954E+5	5.49	255	0	－	0.291	0.295	1.954E+4	0	－	－	1.0	－

３．研究結果

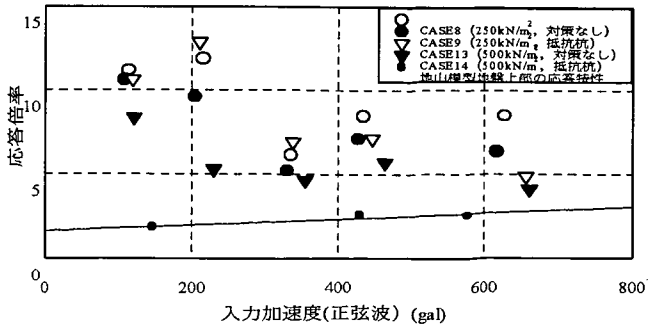
３．１ 動的遠心力載荷実験

(1)加速度応答特性

各加振ステップ毎に得られた応答加速度観測値に基づき，気泡混合土軽量盛土の地震時加速度応答特性について考察した。

まず，盛土肩部の水平方向応答加速度(A1)の振動台入力加速度(Table)に対する応答倍率値は，いずれのケースについても概ね1.0～1.5倍の範囲に収まり，10年度（設定強度98kPaのケース）とほぼ同様の結果となった。また，加振入力波形（正弦波と地震波），気泡混合土強度の違いによる水平方向の応答特性への大きな影響は認められない。

盛土肩部の鉛直方向応答加速度(A5)は，ほぼ全ケースにおいて，振動台の鉛直方向加速度(A9)に対して概ね５倍以上，地山地盤上部の鉛直方向加速度に対しても概ね２倍以上の高い応答値を示している。これは，盛土体が地山と分離しブロック体として応答していること（応答ベク



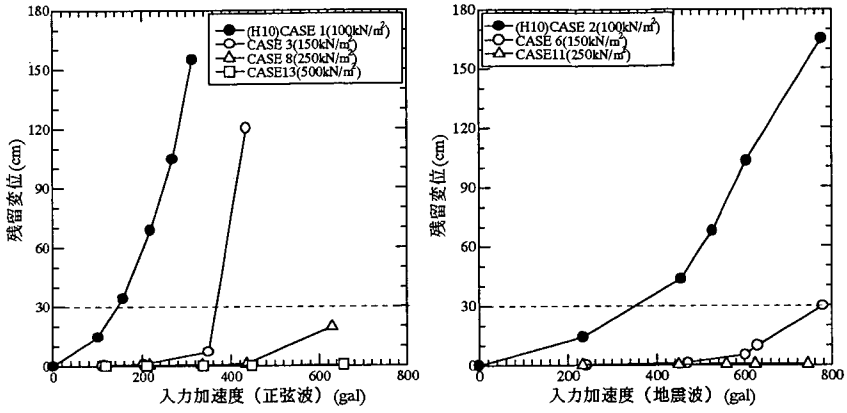
図－４ 盛土肩部の鉛直方向応答加速度特性

トル解析については10年度成果参照）のほか，急傾斜斜面上の軽量盛土の特性であるトップヘビーな構造におけるロッキング的な応答の発生に起因すると考えられる。なお，抵抗杭を設置し地山と盛土体の定着を図ったケースでは，鉛直方向の応答加速度は若干抑えられる傾向がみられる（図－４）。

(2)変形特性

10年度と同様，限界の加振レベルに達すると，模型地盤との境界における盛土体の滑動と同時に，盛土体底部において内部支持力破壊が生じ，その結果顕著な水平方向変位及び沈下が観測された。

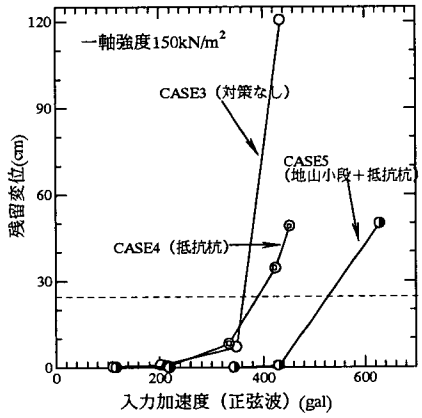
盛土肩部の水平方向の残留変位に注目すると，気泡混合土強度の増加による明らかな残留変形の抑制効果が確認され，本実験の盛土形状では，250kN/m²程度の強度が確保されれば，大規模地震動（レベルII）相当の加振に対しても顕著な残留変形は生じていない（図－５）。



図－５ 盛土肩部の水平方向残留変位(強度別，対策なしケース)

入力波の影響については，10年度と同様，地震波加振のケースでは，正弦波のケースに比べて残留変位が小さいレベルに留まる。こうした傾向は，地震波の不規則性に起因するものと考えられる。

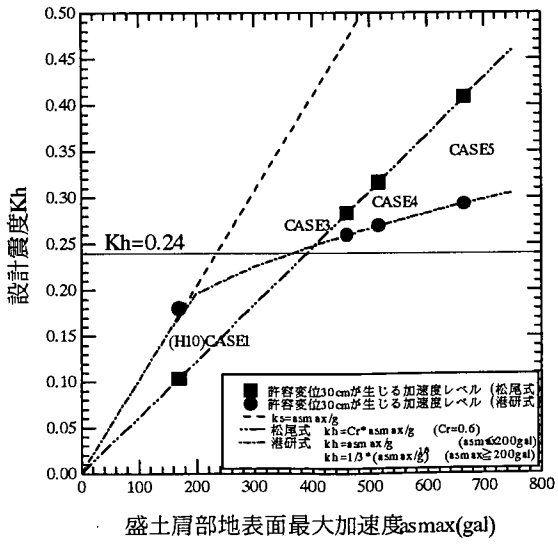
対策工の効果について，抵抗杭を設置したケースでは，無体策のケースと比して，盛土体がすべり始める加振加速度レベルに大きな違いはないが，すべり始めた後の加振ステップにおける急激な変形の進行はある程度抑制される（図－６）。また，抵抗杭に加えて地山小段を設置した場合，小段部の水平方向摩擦抵抗の増加により，変形量を抑制するとともにすべり始めの加振加速度レベルを若干引き上げる傾向がみられる。一方で，大変形が生じる際には，地山小段部よりクラックが発生し，逆に弱点箇所となる現象も観測された。



図－６ 盛土肩部の水平方向残留変位(対策工別)

(3)設計震度との関係

実際に生じる地表面における地震動と震度法による安定計算上の設計震度との関係については，野田ら（運輸省港湾技術研究所）や松尾ら（土木研究所同土質研究室）の研究結果がある。これらの式を用いて，盛土肩部の水平方向の許容変位を30cm（盛土高の約2.5%）と仮定した場合の本模型実験ケースの設計震度を推定すると，10年度実施した100kN/m²ケース以外は，すべて道路土工指針の大規模地震を想定した設計震度を十分満足することが確認された（図－７）。



図－７ 盛土肩部の最大加速度と設計震度の関係

3．2 数値解析

(1) 応答特性解析

解析に用いた土の物性値により算出された盛土体の固有周期が入力波の周波数と大きく異なり，盛土体は共振作用を受けないことが明らかになった。

解析結果の数値に着目すると，解析における盛土体の水平方向の応答加速度は，平均 1.5 倍程度と実験値とほぼ同等な値となった（図－８）。また，盛土体内部の応力の解析結果は垂直応力が卓越し，せん断応力は垂直応力の $1/10^5$ 程度であることが分かった。

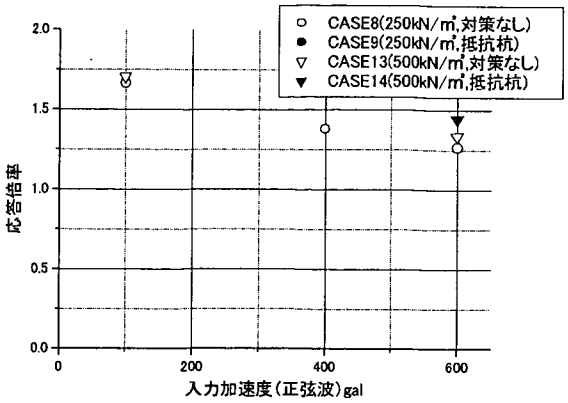
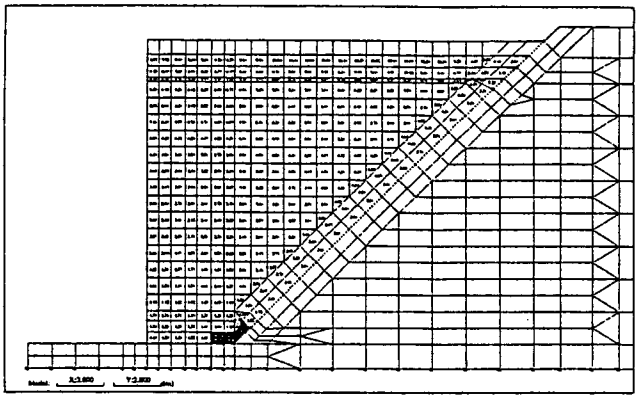


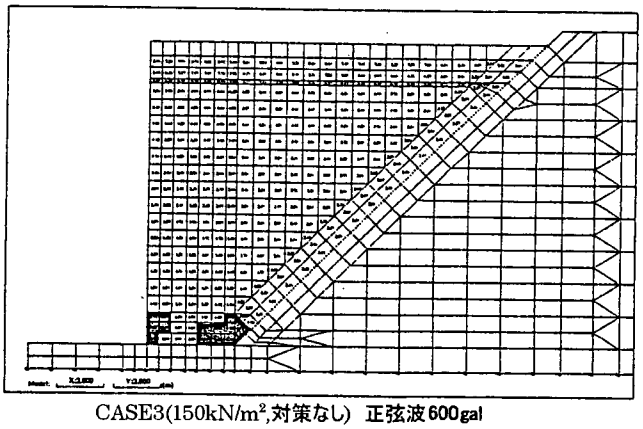
図-8 盛土肩部の水平方向応答加速度特性

(2) 内部応力照査

盛土体内部の垂直応力の静的解析結果をもとに盛土体の最低安全率（軽量盛土の強度/垂直応力）がほぼ 1 に等しい気泡混合土(150kN/m²)を用いたｹｰｽについて，動的解析後の安全率を計算した。その結果，気泡混合土のかかとの部分に近づくほど安全率が低下し，入力波形を強くすると安全率が 1 を切る領域数は増加することが明らかになった（図－９）。また，気泡混合土の強度が 250kN/m² のｹｰｽでは 600gal の加振時についても上記安全率が 1 を切る領域数はわずかとなり，500kN/m² のｹｰｽでは全く見られない。こうした解析結果は模型実験の気泡混合土の破壊時挙動を比較的よく表しているといえる。



CASE3(150kN/m²,対策なし) 正弦波100gal



CASE3(150kN/m²,対策なし) 正弦波600gal

図-9 動的解析結果により安全率が1を切る領域
（静的解析の安全率がほぼ1となる低強度の盛土のケース）

4．まとめ

10年度の成果とあわせて，気泡混合軽量土の急傾斜斜面上の高盛土への適用に関して，①大規模地震動に対する鉛直方向の応答を考慮する場合，静的荷重の1.5倍程度の鉛直荷重を見込んだうえで所定の安全率を考慮する必要があること，②適切な配合強度設定や必要に応じて地山と盛土体の定着対策工等を実施することにより，大規模地震動に対しても十分な耐震性が確保されること，などが分かった。

5．主な研究成果

・中野穣治，小橋秀俊，三木博史，環境にやさしい山岳道路づくりについて～地形改変を低減させる軽量盛土工法～，月刊建設Vol.43,pp18-20,1999.6
・中野穣治，三木博史，小橋秀俊，山岳道路への軽量盛土の適用による地形改変の低減，第23回日本道路会議一般論文集B，pp48-49,1999.10
・J.Nakano,H.Miki,H.Kohashi&A.Fujii, Reduction of land cutting effects by the application of lightweight embankments, Slope Stability Engineering Vol.2, A.A.Balkema Rotterdam, pp955～958, 1999.11

（三木，中野，森）

10.3　擁壁構造物の設計合理化に関する調査

研究期間：平８～平１１
担当：施工研究室

【要旨】
本研究は，支持地盤のある程度の変形に追従するという補強土壁の特徴を設計法に反映するため，土工実験棟内にある大型土槽の軟弱地盤上に補強土壁を構築し，載荷によって基礎地盤の沈下変形に伴う補強土壁の変形挙動等の確認を行なった。その結果，基礎地盤が沈下し壁面変位量が大きくなっても補強領域は一体となって挙動し，内的安定を満足していれば，補強土壁は基礎地盤の変形に追従し安定を保つことがわかった。これらから，補強土壁の鉛直支持力に対する安全率を見直す可能性を示した。

１．研究目的

軟弱地盤上に構築したアンカー式補強土壁の変形挙動と安定性を明らかにし，変形を考慮した設計法を提案することを目的として実施するものとする。

２．研究（実験）方法

２．１　実験概要

本実験は、高さ 4.5m・縦幅 10.0m・横幅 4.0mの大型土槽内に基礎地盤として粘性土地盤（H=1.5m），アンカー式補強土壁（H=3.0m）を構築し，さらに補強土壁上面から載荷板による載荷を行って，補強土壁構築時および載荷時の基礎地盤の地盤反力，沈下変形及び補強土壁部材の応力，壁面変形について観測した（図１）。

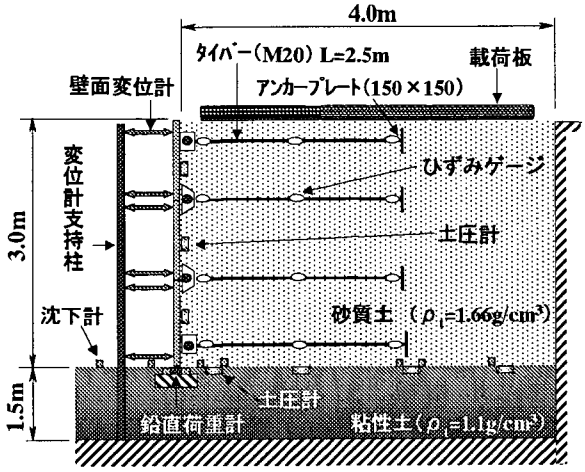


図１　実験概要（断面図）

２．２　準備試験及び事前検討・解析

実大実験を行うにあたって，土質材料の締固め度を決定するための準備試験（転圧回数と土の力学特性の関係）を行った。その結果を基に補強土壁の内的・外的安定の検討および二次元の弾塑性ＦＥＭ変形解析を行い，実験模型の仕様や実験条件等を決定した。

内的安定計算では，タイバーの破断及びアンカーの引抜けに対しては，十分に盛土構造体の安定が確保されている（表２）。

表１　基礎地盤の物理・力学的性質

試験項目			試験結果
土粒子の密度 $\rho_{s\,max}$		(g/cm³)	2.736
自然含水比 w_n		(%)	93.7
粒度特性	レキ分	(%)	1
	砂分	(%)	8
	シルト分	(%)	36
	粘土分	(%)	55
	最大粒径	(mm)	2.00
液性限界 W_L		(%)	141.5
塑性限界 W_P		(%)	77.7
塑性指数 I_P		(%)	63.8
最大乾燥密度 ρ_{dmax}		(g/cm³)	0.742
最適含水比 w_{opt}		(%)	89.0
土質名			関東ローム（江戸崎産）
土質分類			VH_2－S
力学的試験条件（密度）			ρ_t=1.1g/cm³
三軸圧密	粘着力 c_u	(kN/m²)	16
	せん断抵抗角 ϕ_u	(°)	9.5
	圧縮指数 C_c		1.02
	圧密降伏応力 P_c	(kN/m²)	38

２．３　実大実験模型構築

基礎地盤材料には関東ローム（表１），補強土材料には山砂（江戸崎産：w_n=22.5%）を使用した。補強土壁の補強材は内部安定の検討より長さ 2.5m のタイバー（M20）と 15cm×15cm のアンカープレートを選定した。施工方法は，基礎地盤は所定の湿潤密度（ρ_t=1.1g/cm³）になるよう 30cm 毎の撒き出しで，タンパによる緩めの転圧（１回）を行い，前壁基礎は基礎砕石（幅 60cm・厚さ 20cm）の上に、コンクリート布基礎（幅 40cm・厚さ 20cm）とした。補強土壁裏込め土は 25cm 毎の撒き出しで締固め度 85%（ρ_t=1.66g/cm³）を確保するようタンパによる入念な転圧（７回以上）を行った。基礎地盤は平板載荷試験，動的平板載荷試験によって極限支持力を算出し，補強土壁裏込め土の構築については盛土（H=0.5m 間隔）の密度試験を行い，締固め度を管理した。

2．4　段階載荷試験

載荷は，上載盛土１ｍずつの荷重増分を想定し，17kN/m² 毎 136kN/m²（換算上載盛土高 8m）まで８段階行った。各段階の荷重保持時間は概ね２時間とし，地盤の沈下がほぼ収まったのを確認した後，次の段階に進んだ。

表２　内的安定の検討結果（q_{max}=136kN/m² 載荷時）

深さ Zi(m)	アンカープレートの引抜き対する検討 引抜力 Ti(kN/本)	許容抵抗力 Tai(kN/本)	判定結果	部材の検討 タイバー 呼称径	コネクター サイズ	アンカープレート 規　格	判定結果
0.175	2.5	63.7	○	M20	t=4.5	サブなしM20	○
1.000	24.6	66.5	○	M20	t=4.5	サブなしM20	○
2.000	27.2	69.9	○	M20	t=4.5	サブなしM20	○
2.815	14.6	72.6	○	M20	t=4.5	サブなしM20	○

2．5　計測項目

計測項目は，前壁基礎部に作用する地盤反力，前壁基礎部および補強領域部の基礎地盤沈下量，壁面水平変位，前壁に作用する土圧，タイバー張力を測定した（図１）。また，載荷試験終了後の載荷面の沈下形状，各段タイバーの変形，アンカープレートの引抜け，基礎地盤の沈下形状，基礎地盤の密度変化を観測した。

3．研究（実験）結果

3．1　基礎地盤の沈下

基礎地盤の盛土構築および載荷による沈下状況を図２（a）に示す。地盤沈下は補強土壁構築段階から発生し，3.0m盛り立て完了時点で前壁基礎部に 110mm、補強領域に最大 141mm の沈下が生じた。載荷に対しても盛土中央部付近を中心にへこむような形でほぼ一様に比例的に沈下が進行し，最終 136kN/m² 載荷段階での沈下量は，前壁基礎部で 269mm，盛土部で最大 335mm となった。また，68kN/m² 載荷段階（換算上載盛土高４m）では急激な沈下（最大沈下増加量 64mm）が見られた（図２）。今回の実験では，基礎地盤に比較的大きな沈下が生じたが，前壁基礎部が大きく沈下するような挙動を示さず，補強領域後部が最大変位となる不同沈下が生じた。

3．2　地盤反力

基礎地盤の地盤反力分布を図２に示す。地盤反力の分布は載荷が小さい段階では盛土部よりも前壁基礎部の方が大きく，載荷の増加に伴ってほぼ一様に増加しているが，68kN/m² 載荷段階以降は補強領域の後部が卓越する形で増加した。また図３地盤反力について実測値と設計計算値（下式による）を比較すると，実測値は前壁部で設計計算値より大きく，盛土部で設計計算値より若干小さい。

盛土部地盤反力：$Q_1=(P_{A1}\cdot\sin\delta_1+W_1)\ /B_1$

前壁基礎部地盤反力：$Q_2=(P_{A2}\cdot\sin\delta_2+W_2)\ /B_2$

（ここに、$P_{A1,2}$：補強領域背面，前壁面にかかる土圧、$\delta_{1,2}$：補強領域背面（δ_1=0），壁背面と土との摩擦角（δ_2=2/3ϕ）、$W_{1,2}$：補強領域部の自重及び載荷重，前壁と基礎部の自重及び載荷重、$B_{1,2}$：補強領域部，前壁基礎部の幅）

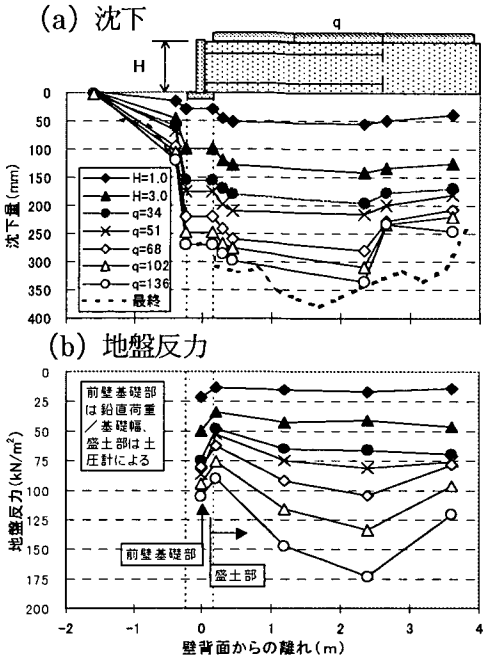


図２　基礎地盤の沈下と地盤反力の分布

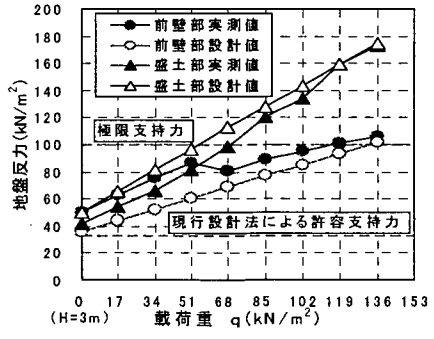


図３　地盤反力の設計値と実測値

※ 盛土部は補強領域中央で計測

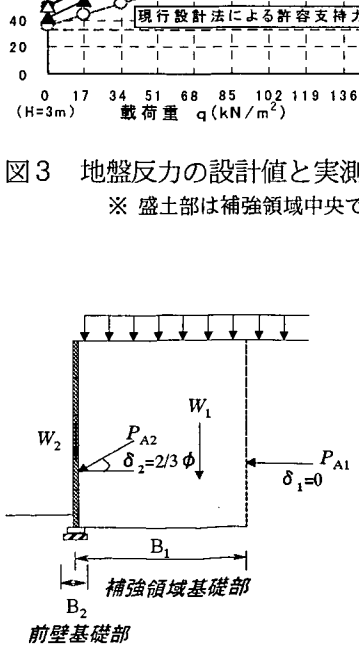


図４　基礎地盤の支持力

３．３　外的安定の検討

外的安定（地盤支持力，全体円弧すべり）の安全率の推移を図５に示す。補強土壁 3.0m盛り立て完了での支持力に対する安全率は，前壁基礎部、盛土部とも３より小さく，68kN/㎡ 載荷段階で盛土部の支持力に対する安全率がほぼ１に等しくなった。また，盛土の円弧すべりに対する安全率（計算上）は，載荷重の増加に対して地盤支持力と同様な傾向で低減し，102kN/㎡ 載荷段階ほぼ１となった。今回の実験では，支持力又は円弧すべりに対する安全率がほぼ１に等しくなった段階で，比較的急激な地盤の沈下変形が生じており，安全率の推移と実際の挙動が比較的一致しているといえる。

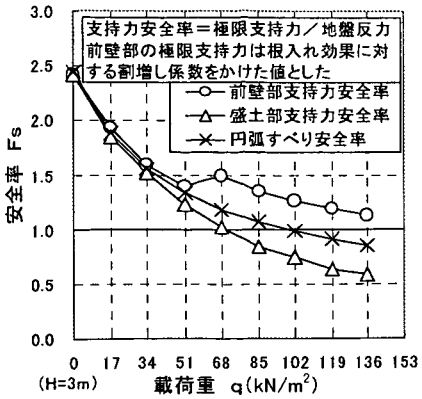


図５　外的安定安全率

３．４　壁面水平変位

壁面水平変位を図６に示す。補強土壁 3.0m盛り立て完了時点の壁面は前面側に多少変位しており，その最大値は 20㎜ であった。載荷に対しても壁面は全体的に前面側にさらに変形し，68kN/㎡ 載荷段階で比較的大きな変位量（最大変位増加量 48㎜）を示した。その後，多少壁面中央部がはらむような形で壁面変形は進行し，136kN/㎡ での最大変位量は 154㎜ となった（図６）。今回の実験では，上載荷重や基礎地盤の沈下に対し壁面が柔軟に変形し，比較的大きな水平変位が見られたものの，壁面パネルが落下したり補強材が破断するような補強土壁としての機能を損なうような変形形態には至らなかった。

３．５　タイバー張力と壁面水平土圧

タイバー張力を図７，壁面水平土圧分布を図８に示す。補強土壁 3.0m盛立て完了時点および段階載荷試験終了までの壁面土圧は，壁高 H=0.5m，2.5m での計測結果は各段階で概ね設計値と一致する値を示したが，H=1.5m の位置で計算値より低い値を示した。また，タイバー張力は各段階ですべて設計値を下回る値を示し，H=1.0m のタイバー張力が H=2.0m のタイバー張力よりも小さい値を示した。また，地盤の沈下や壁面変位に比較的大きな変化が見られた 68kN/㎡ 載荷段階においても特段注目すべき変化は現れていない。今回の実験では，タイバー張力及び壁面土圧の分布は各段階において，設計理論とは異なる分布となったものの過大な値を示すことはなかった。また載荷終了後のタイバーは，曲折した箇所があるものの破断は見られない（写真 1），アンカープレートの引抜け量は約 1～2㎝ である，事前設

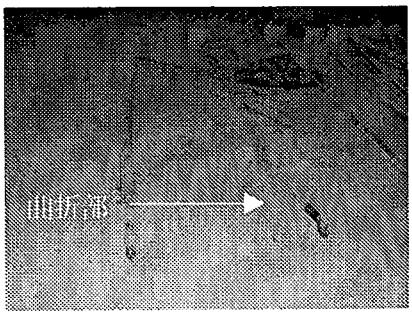


写真１　載荷後のタイバー

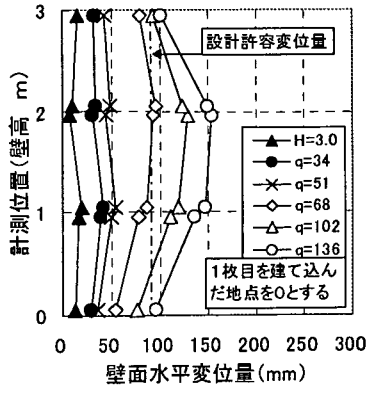


図６　壁面水平変位分布

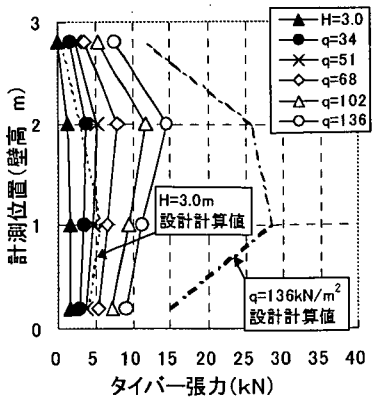


図７　タイバー張力（平均値）分布

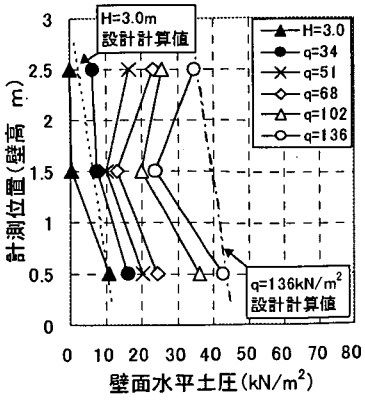


図８　壁面水平土圧分布

計の内的安定の検討においても十分な安全が確保されていることから，補強領域内の内的安定は，地盤の沈下変形に対しても大きな影響を受けることなく安定しており，補強領域が柔軟に変形しながら一体となって変形したものと推測される。

3．6　変形と外的安定

地盤の変形状況，外的安定の安全率の推移,壁面の水平変位量等の結果を考察すると，図９に示すように載荷板による段階載荷によって補強領域が押され，一体化した補強領域が変形したと考えられる。それが原因で，壁面変形および盛土部の基礎地盤の沈下が引き起こされたと想定される。

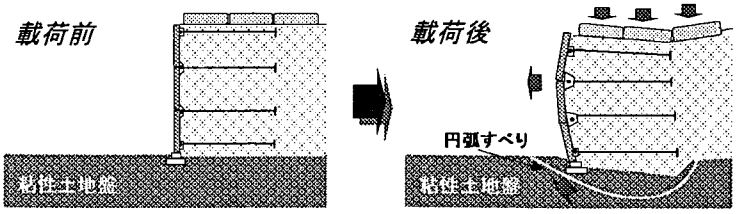


図９　載荷重による補強土壁変形

4．結論

今回の実験より、以下のことが考察できた。

今回の実験では，軟弱な支持地盤のケースで補強土壁構築および載荷実験を行ったが，補強土壁の内的安定は満足されており，地盤の変形に対し，補強土壁の補強領域が柔軟に変形しながら一体となって挙動したと考えられる。従来は，支持の地盤変形などの外的不安定によって，内的安定が損なわれると考えられていたため，外的安定の安全率はコンクリート擁壁の設計と同等の変形を生じさせないレベルに設定されていた。今回の実験から，外的な要因は必ずしも内的安定を損なうものではなく，外的安定の安全率をある程度の変形を許容したレベルまで引き下げる可能性が示された。しかし本実験では，補強領域には無視できない変形が生じており，変形による構造物としての機能への悪影響が懸念される。従来は内的な安全率が十分に確保されていれば，補強領域の変形は生じないと考えられてきたが，今回の実験では，外的不安定が補強領域の変形に直接影響し，内的な安定性が変形の抑制に寄与していないと推測される。

5．今後の課題

今回の実験は，補強土壁の鉛直支持（沈下）に対する安全上の余裕度を小さくしてトータルの安全率を見直すことができる可能性を示している。ただし今後，外的安定の検討については，従来の視点に加え補強領域の変形への影響という視点からの基準値を検討する必要がある。その際に，地盤の沈下変形及び壁面変形に対する許容レベルを検討することによって，要求される道路構造物の性能に見合う設計法の提案が必要であると思われる。

6．主な研究成果物

- 平澤雅己，青山憲明，宮武裕昭，橋本　聖：粘性土地盤上に構築した補強土壁の安定実験（その１），土木学会第 55 回年次講演会　2000,9（投稿中）
- 橋本　聖，青山憲明，宮武裕昭，平澤雅己：粘性土地盤上に構築した補強土壁の安定実験（その２），土木学会第 55 回年次講演会　2000,9（投稿中）

（大下，青山，橋本）

10.4　シールド工事の設計合理化に関する調査

研究期間：平 10～11

担当：施工研究室

【要旨】

現在、都市内における地下利用が進み、シールド工法による下水管路施設等の整備が増加している。また、地方都市の市街地においても、交通事情や土地利用の問題から小規模なシールド工事の採用が増加しつつある。一方、下水道事業においては、平成９年４月に政府が示した「公共工事コスト縮減に関する行動指針」を踏まえ、「下水道事業におけるコスト縮減の取り組みについて」が公表され、コスト縮減に向けた基準や計画・設計方法の見直し、技術開発の推進が必要となっている。本研究では、今後、採用が一層増加すると予想される小規模シールド工事の施工の合理化に向けたコスト縮減の課題を整理し、コスト縮減方策を提案することを目的とする。11 年度は、小規模シールド工事の合理化に向け、鋼製セグメント構造の合理化、二次覆工省略のための防食・防水、新素材によるセグメント製作の適用性について各々検討するとともに、コスト試算およびコスト縮減効果について検討した。

1　合理化案の策定

昨年度の調査結果から、仕上がり内径 3m 以下の小規模シールド工事では、経済性等の観点から鋼製セグメントが多く採用されること、また、下水道シールド工事のコスト縮減には二次覆工省略が有効な手段であることが確認されている。このため今年度は、表－１に示すように鋼製セグメントの構造を合理化したセグメントを採用したケースや二次覆工省略対策を施したＲＣセグメントを採用したケース、また、11 年度に並行して検討を行った新素材（FRP）をセグメントに適用したケース、および最近の小規模シールドで施工実績の多い FRPM 管による二次覆工を対象に合理化案を策定した。

表－１　合理化策の概要

合理化策	合　理　化　策　の　内　容
1	泥水式の場合、シールド装備推力を 30%低減できる可能性が確認できたことから、鋼製セグメントに対して、ジャッキ推力の低減およびセグメント幅の拡大に伴う主桁構造の合理化を導入した**鋼製幅拡合理化セグメント**を採用したケース。
2	二次覆工厚の縮減および合流管路・汚水管路における耐薬品性の向上を図るために，一次覆工にＲＣ平板型セグメント（内面平滑タイプ）を適用し，**二次覆工に樹脂被覆工法（現場施工タイプ）**を採用したケース。
3	二次覆工省略および合流管路・汚水管路における耐薬品性の向上を図るために，現在，基礎研究が進められている**ガラス繊維強化樹脂（ＦＲＰ）で製作したセグメント**を採用したケース。
4	二次覆工コンクリートよりも内面粗度の向上が期待できることによるトンネル規模の縮径化を図ることが可能であり，近年，小規模シールド工事で施工実績が増加している**ＦＲＰＭ管**を採用したケース。

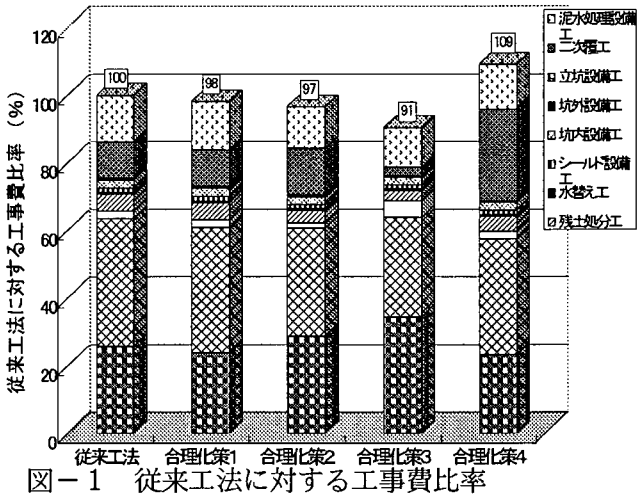
2　コスト縮減効果の検討

表－１に示す合理化案および従来工法について表－２に示す条件でコスト試算および工期試算を行い、従来工法に対するコスト縮減効果および工期短縮効果を検証した。図－１にコスト試算の結果を示す。コスト試算では、合理化案１～合理化案３において－２～－９％の縮減効果が期待できる。合理化案３は、コスト縮減効果が最も大きい結果となっているが、現在のところ、圧縮試験、曲げ試験等による物理特性や薬品浸漬試験等の化学特性を調査する要素実験を行い確認した段階のため、今後は、各種条件による試験施工等により施工性の検証や実用化の検討を行う必要がある。合理化案４についてはコスト増となっているが、実現場

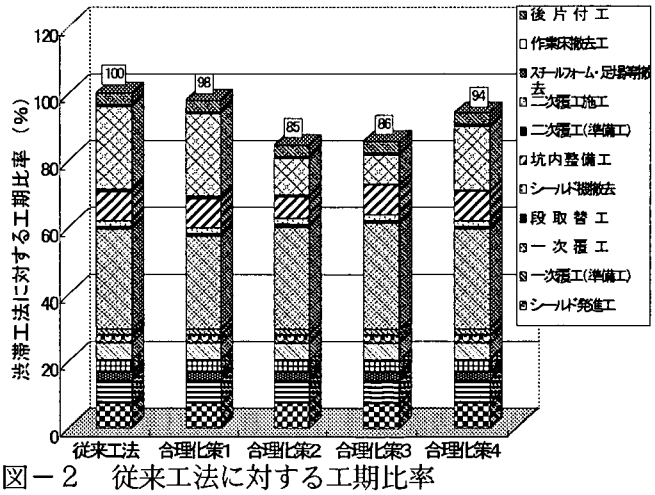
では今回の試算条件よりも仕上がり内径の小さい現場で採用されていることやコンクリートによる二次覆工で発生する養生後のエアボイド等の穴埋めやクラックの補修などの作業が省略されるため、机上の試算以上にコスト縮減効果が得られると考えられる。一方、工期は図－２に示すように各合理化案ともに－２～－15%の縮減効果が期待できる結果となった。

表－２　試算条件

		従来工法	合理化策１	合理化策２	合理化策３	合理化策４
		鋼製セグメント（NS45）	鋼製幅拡合理化セグメント	RC平板型（内面被覆）	FRPセグメント	FRPM管工法
施工延長		1,000 m				
シールドマシン	掘削形式	泥水式				
	外径	3,480 mm	3,480 mm	3,030 mm	2,730 mm	3,280 mm
一次覆工	セグメント形式	鋼製セグメント(NS45) スキンプレート厚 3mm 主桁厚 12mm 縦リブ厚 9mm	鋼製セグメント スキンプレート厚 3mm 主桁厚 12mm 主桁本数 3 縦リブ厚 9mm	主鉄筋 8－D13＝10.14cm² 外縁かぶり 13mm 内縁かぶり 13mm	FRPセグメント スキンプレート厚 3mm 主桁厚 12mm 主桁本数 3 縦リブ厚 9mm	鋼製セグメント(NS39) スキンプレート厚 3mm 主桁厚 12mm 縦リブ厚 7mm
	外径	3,350 mm		2,900 mm	2,600mm	3,150 mm
	内径	3,094 mm		2,600 mm	2,350mm	2,894 mm
	桁高	125 mm		150 mm	125 mm	125 mm
	幅	1,000 mm	1,200 mm	1,000 mm		
	日進量 初期到達	3.9 m／日	4.1 m／日	3.8 m／日	3.7 m／日	3.9 m／日
	日進量 本掘進	7.8 m／日	8.4 m／日	7.6 m／日	7.3 m／日	7.7 m／日
二次覆工	厚さ	244 mm	244 mm	3mm	省略	244 mm （うち，管厚 29mm）
	仕上り内径	2,600 mm	2,600 mm	2,594mm	2,350 mm	2,400 mm
	日進量	9.0 m／日		20 m／日	(内面パネル設置工 25 m/日)	14 m／日
坑内整備工		25 m／日		34 m／日	25 m／日（FRPM 管内清掃は 65m／日）	
備考			主桁および縦リブ構造の合理化を図った鋼製セグメントを適用する。	内面樹脂被覆は現場で施工する工法を適用する。	粗度係数n＝0.010 適用に伴う必要内空断面の低減（内径△10%）を考慮。但し，メーカーの製造規格内径を採用する。	粗度係数n＝0.010 適用に伴う必要内空断面の低減（内径△10%）を考慮。但し，メーカーの製造規格内径を採用する。



図－１　従来工法に対する工事費比率



図－２　従来工法に対する工期比率

３　今後の課題

11 年度は、鋼製セグメント構造の合理化、二次覆工の省略に伴う防食・防水に対する検討を行い、コスト試算および縮減効果を試算・分析した。今後は、小規模な下水道シールド工事を採用している自治体等の協力を得ながら、11 年度および 10 年度に検討した合理化案を参考に、実現場での合理化の検討およびそれらのフォローアップを実施していきたいと考えている。また、建設コスト以外に維持管理やリサイクル、環境負荷等も考慮したトータルコストによるコスト縮減技術の評価手法の確立も必要である。

（大下、森、井谷）

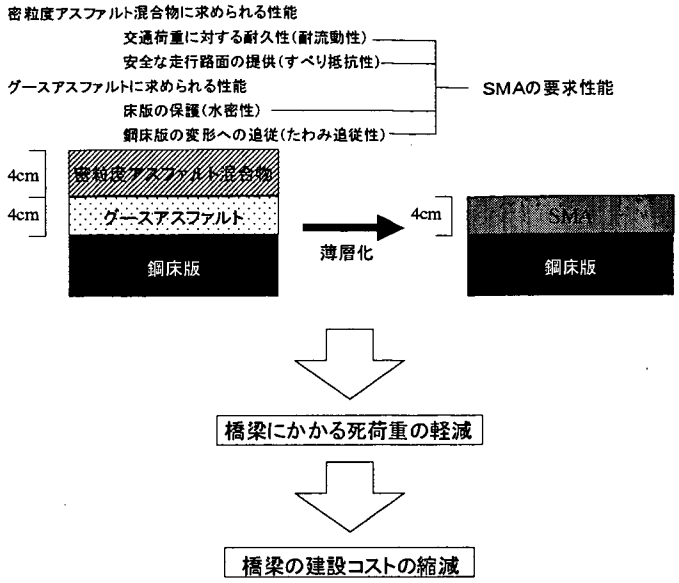
10.5　橋面舗装の合理化に関する調査

研究期間：平10～平12

担当；舗装研究室

【要旨】

橋梁の建設コスト縮減のために，構造物全体の死荷重を軽減させるとともに、25トン車対応等による床版の上面増厚の際の建築限界の問題等を解決する方策として橋面上の舗装の薄層化を検討する必要がある。従来の橋面舗装の機能を保持した上で舗装厚を薄くする技術として砕石マスチックアスファルト（ＳＭＡ）による一層施工を取り上げ、グースアスファルトや密粒度アスファルト混合物などの既存の混合物と物性の比較を行い、ＳＭＡの橋面舗装技術としての妥当性を検証した。



１．研究方法

10年度は、床版の防水性能や混合物の耐水性については、SMAがグースアスファルトと同等の性能を有すること､さらに耐流動性などの耐久性についてはグースアスファルトよりも優れていることが確認された。

11年度は、比較対象として密粒度アスファルト混合物（以下、密粒度混合物）を加え、使用アスファルトも改質アスファルトII型（以下、改質II型）と、橋面舗装用改質アスファルト（以下、橋面改質）の２種類とし、SMAの粒度を10年度の結果をもとに２種類（標準：配合Ａ、粗め：配合Ｂ）に設定して混合物性状の比較試験を行った。図-1には今回試験を行った各混合物の合成粒度を示す。密粒度アスファルト混合物と比較すると、SMAは細かい粗骨材の代わりに粗い細骨材を使用しており、排水性混合物のように開粒度となっている。排水性混合物との違いは、骨材間隙率がそれほど高くなく、その間隙をアスファルトと石粉で充填している点である。したがって、水密性が高く耐流動性も高い混合物となっている。

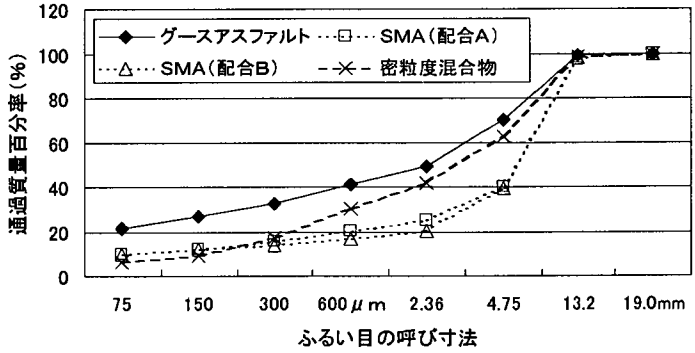


図-1 各混合物の合成粒度

実施した混合物試験は

①ホイールトラッキング試験(耐流動性)

②曲げ試験（たわみ追従性）

③回転式すべり摩擦測定器による動的摩擦係数の測定（表面のすべり抵抗性）

である。

２．研究結果

図-2にホイールトラッキング試験の結果を示す。重交通道路における動的安定度の目標値は一般に1500(回

／mm）とされており[1]、グースアスファルト以外は十分な耐流動性を有していることが分かる。一方、ＳＭＡの粒度による違いでは粗めの配合Ｂの方が、使用アスファルトの違いでは橋面改質の方が若干高い耐流動性を示しているが両者の差はほとんどない。また、ＳＭＡと密粒度混合物の間にも有意差はほとんどみられなかった。

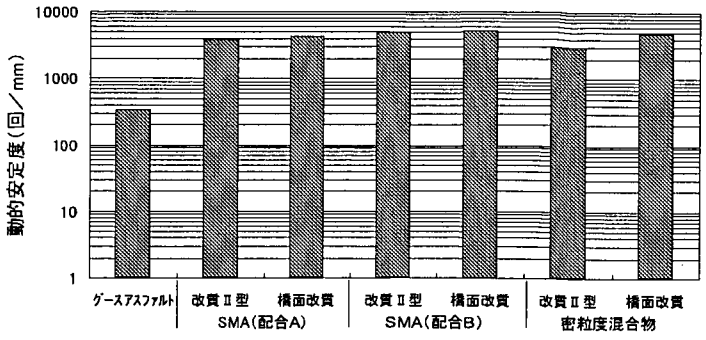


図-2 混合物種別の動的安定度

図-3に曲げ試験結果を示す。曲げ試験により得られる破断ひずみの目標値は、グースアスファルトの場合8.0×10^{-3}以上、密粒度アスファルト混合物の場合6.0×10^{-3}以上とされており[2] 改質Ⅱ型を使用した密粒度混合物以外はグースアスファルトの目標値を満足する結果となった。特にＳＭＡ、密粒度混合物に関わらず橋面改質によるたわみ追従性の向上効果が顕著であることが分かる。

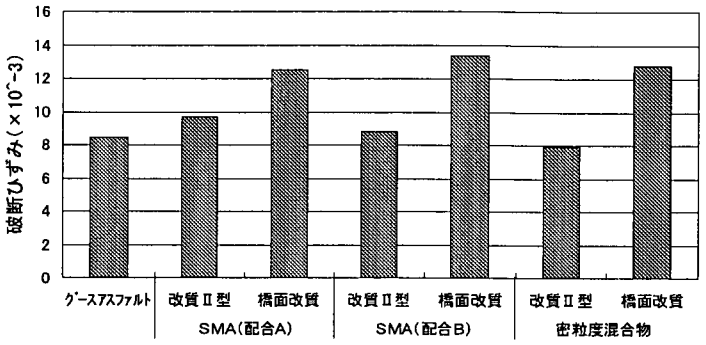


図-3 混合物種別の破断ひずみ

図-4に回転式すべり抵抗測定器による動的摩擦係数測定結果を示す。ＳＭＡについては配合Ａに対して粗めの合成粒度とした配合Ｂの方が若干高いすべり抵抗性を示しているが、グースアスファルトや密粒度混合物と比較すると低い値を示している。交通量の多い一般国道におけるすべり摩擦係数の維持修繕要否判定の目標値はすべり抵抗測定車で測定した場合0.25であり[3]、配合Ｂでもかろうじて満足している程度である。

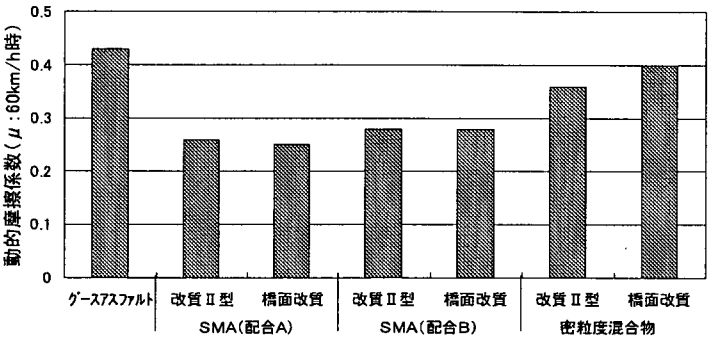


図-4 混合物種別の動的摩擦係数

３．まとめと今後の課題

耐流動性、たわみ追従性に対するSMAの性状は良好であったが、すべり抵抗性に対しては実用的な値とは言えず、混合物の合成粒度を粗くした効果もほとんど見られなかった。原因の一つとして配合Ｂの合成粒度を粗くした分、設計アスファルト量が0.5%増加してしまい、このアスファルト量の増加分が混合物表面の粗さを低下させたためと考えられる。これまで、SMAの配合設計はマーシャル試験で行ってきたが、排水性混合物に適用されているダレ試験などの配合設計方法についても検討する必要がある。

今後は、ＳＭＡのすべり抵抗性の向上方法についてさらに検討を続けるとともに、試験舗装による施工性・耐久性の検証も行う予定である。

（吉田、久保）

＜参考文献＞

1)アスファルト舗装要綱、（社）日本道路協会、平成４年
2)多田：橋面舗装の設計と施工、鹿島出版会、平成８年
3)道路維持修繕要綱、（社）日本道路協会、昭和53年

10.6　深層混合処理工法の合理化に関する調査

研究期間：平 10～平 12
担当:土質研究室

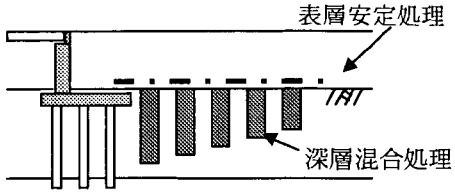
【要旨】

本研究では、軟弱地盤上の構造物と取付盛土との間に生じる段差を解消するための対策(すりつけ対策)について、コストを縮減し合理的な設計法を提案することを目的としている。

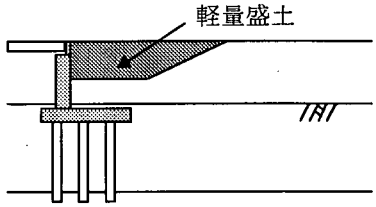
11 年度は、すりつけ対策として、表層安定処理を併用したフローティング式低改良率深層混合処理工法を取り上げ、沈下抑制効果の検討を行うために模型実験を行った。

実験の結果、10%という低改良率の場合でも、改良領域の一体化効果が発揮され、沈下量を低減し、側方流動を抑制する効果があることが明らかになった。

・深層混合処理工法によるすりつけ対策



・軽量盛土工法によるすりつけ対策



1.研究目的

本研究では、軟弱地盤上の構造物と取付盛土との間に生じる段差を解消するための対策(すりつけ対策)について、コストを縮減し合理的な設計法を提案することを目的としている。本年度は、すりつけ対策として、表層安定処理を併用したフローティング式深層混合処理工法を取り上げ、その効果を検証することを目的として、大型模型実験を行った。

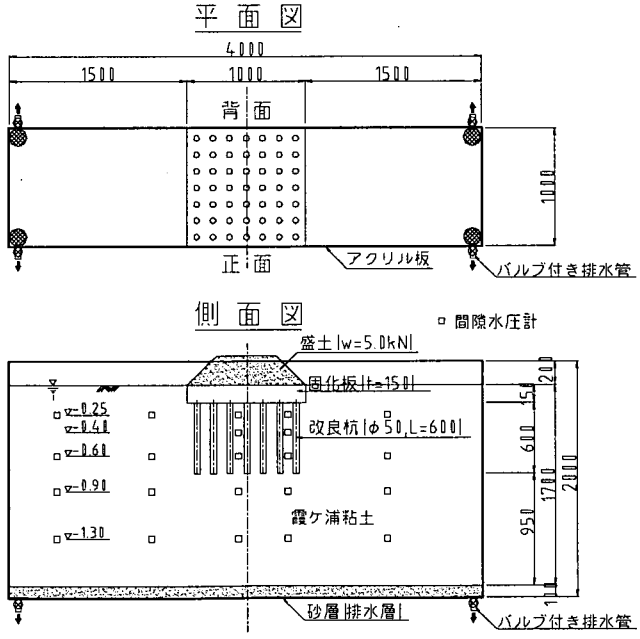
2.研究方法

実験は、図－1 に示すような模型地盤を作製し、上載荷重(盛土)をかけて行った。軟弱地盤材料には霞ヶ浦浚渫粘土、盛土材料には砂鉄(20kN/m^3)を用いた。霞ヶ浦粘土の物理特性を表－1 に示す。

表層安定処理を想定した固化板と深層混合処理を想定した改良杭は、目標強度(7 日)を 300kN/m^2 として、霞ヶ浦粘土にソイルセメントを混合攪拌して作製した。改良杭は模型地盤に直接打設し、固化板はあらかじめ作製して実験直前に地盤上に設置した。

実験では、霞ヶ浦粘土の含水比を 230%に調整して土槽に投入し、16 日間圧密期間を設けた後に改良杭と固化板を設置して盛土載荷を行った。模型地盤の排水条件は、上下両面排水とした。

盛土による上載荷重は、合計 5kN を 5 段(1kN/段)に分けて載荷した。



図－1 模型地盤概要図　　単位:mm

表－2 実験ケース一覧表

	固化板	改良杭		
	B×t	φ×L	杭ピッチ	改良率
	cm	cm	cm	%
CASE1	100×15	—	—	—
CASE2	100×15	φ5×60	14.0	10.0

表－1 霞ヶ浦粘土の物理特性

密度 ρs	(g/cm^3)	2.542
自然含水比 Wn	(%)	220.8
砂分	(%)	8
シルト分	(%)	26
粘土分	(%)	66
液性限界 W_L	(%)	193.5
塑性限界 W_P	(%)	52.9
塑性指数 I_P		140.6
圧縮指数 C_C		1.306
膨潤指数 C_S		0.071

載荷速度は、1 段あたり 30 分(載荷 10 分、放置 20 分)で行い、合計 130 分で全載荷を終了させた。

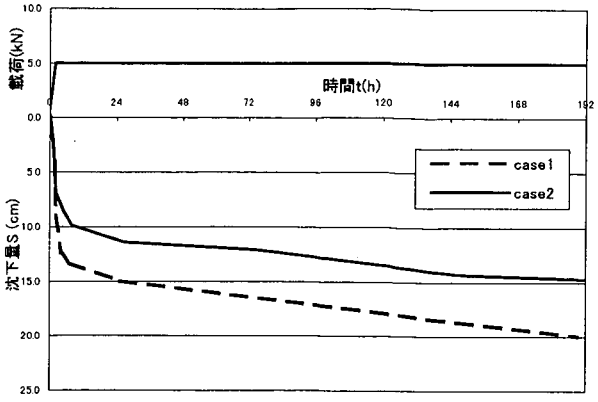
実験ケースを表－2 に示す。CASE1 は固化板のみのケースで、CASE2

は固化板と改良杭を併用したケースである。計測は、地表面沈下量・側面変位等について行った。

3.研究結果

3.1 地盤の変形・変位

盛土部中央の沈下曲線を図－2 に示す。図より固化板と改良杭を併用することにより、即時沈下量(沈下速度が急勾配から緩勾配に変わった載荷 6 時間後までの沈下量)は、3/4 程度に減少し、載荷後 1 週間までの圧密沈下量(全体沈下量から即時沈下量を引いたもの)も 3 割程度減少していることがわかる。

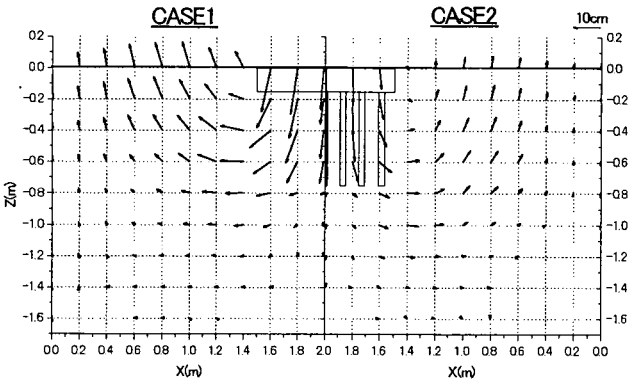


図－2 盛土沈下量の経時変化

即時沈下量減少の原因は、改良杭によって囲まれた地盤が一体化することにより、盛土荷重が固化板直下には作用せずにそのまま杭先端部に伝わり、改良杭を併用しなかった CASE1 に比べ、側方流動が減少し、地盤全体の変位が抑制されたためと考えられる。

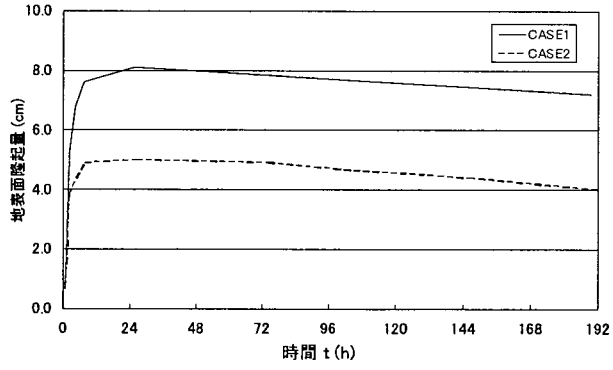
圧密沈下量減少の原因は、固化板と改良杭に囲まれた領域の地盤の圧密が抑制され、それ以外の地盤の圧密のみが発生したためと考えられる。

載荷終了から 24 時間後の変位ベクトルを図－3 に示す。改良杭を設置した CASE2 では、改良領域内の最も外側の杭付近で地盤のすり抜け現象による水平変位も多少見られるものの、ベクトルの大きさは全体的に小さくなっている。これは、改良杭の効果により、改良領域内の地盤が一体化していることを示していると考えられる。



図－3 変位ベクトル図(24h 後)

地表面の最大隆起量の経時変化を図－4 に示す。両ケースとも載荷 24 時間後が最大となり、その後減少した。これは、側方流動の影響が 24 時間後まで続き、その後圧密沈下によって地盤全体が沈下したためと考えられる。また、地表面の最大隆起量が CASE1 で 8.1cm、CASE2 で 5.0cm と改良杭の効果により 2/3 程度に抑えられていた。



図－4 地表面の最大隆起量の経時変化

3.2 まとめ

本実験では、構造物取付部のすりつけ対策として表層安定処理を併用したフローティング式深層混合処理工法を用いた場合、改良率が 10%であっても地盤が一体化し、①即時沈下・圧密沈下の抑制、②側方流動による周辺地盤隆起等の抑制、という効果があることが認識された。

今回の実験で、短期間の効果は確認できた。今後、さらに低改良率のケースと長期的な沈下抑制効果やメカニズム等について解明していく予定である。

4.主な研究成果物

三木、古本、井戸，橋台取付盛土沈下すりつけ対策に関するコスト比較，第 23 回日本道路会議一般論文集(B)，pp58～59，1999.11

三木、古本、井生，ジオグリッドなどを併用した低改良率深層混合処理工法に関する一考察，第 54 回年次学術講演会講演概要集 第 3 部(B)，pp496～497，1999.9

(三木、古本、大野、井戸)

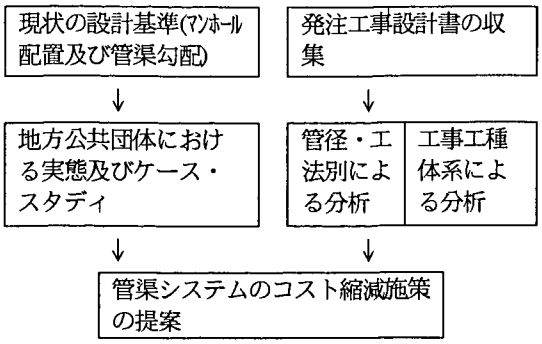
10.7　管渠システムの設計合理化に関する調査

研究期間：平１０～平１１

担当：下水道研究室、建設システム課

【要旨】

下水道管渠のコスト縮減策として、マンホールの設置基準及び管渠勾配の２項目につき、過去の調査結果を勘案しつつ、今後の方向性につき取りまとめた。特に、建設費の縮減という観点からのみでなく、建設後の適正な維持管理を担保するという観点からも検証を加えた。また、下水道事業の実施単位となる処理区当たりの管渠の延長、建設単価、施工方法内訳を統計的に分析し、全体的な管渠建設コストの構成例を示すと共に、代表的な工種に対し、工事工種体系化に沿った費用内訳分析の事例を例示し、今後のコスト縮減の方向性を考察した。



研究フロー図

１．調査目的

社会資本の中でも下水道整備は未だ先進国に比較して立ち遅れた事業であり、今後とも一層の事業推進が求められている。昨今の厳しい国家財政、地方財政を勘案して、限られた財源を有効に活用することが必要である。下水道事業費のうち、管渠施設の占める割合は約７割であり、全体の整備コストを縮減するためには管渠のコスト縮減は非常に重要である。そこで、管渠施設の建設コスト分析を行うと共に、従来の設計基準を見直すことにより、コスト縮減施策につき検討した。

２．調査方法

２．１　マンホール配置及び管渠勾配に関する検討

マンホール配置及び管渠勾配に関して、現状の設計基準及び各地方公共団体における実態を調査すると共に、ケース・スタディによりコスト縮減効果を検討することにより、新たな設計基準につき検証を加えた。

２．２　建設コストの分析に関する検討

全国の地方公共団体から収集した発注工事設計書を活用し、管径、工法別に分類し処理区単位で建設コスト分析を行うと共に、工事工種の体系化に沿った本設計書の分析により建設費分析を行う。

３．調査結果

３．１　マンホール配置及び管渠勾配に関する検討

（１）マンホール配置基準に関する検討

下水道マンホールは、構造上管渠の接合及び会合のために必ず設置しなければならないものであると共に、維持管理上管渠の清掃、点検、調査等の作業や管渠内の換気のため必要不可欠である。「下水道施設計画・設計指針と解説」（以下、「設計指針」とする）では、マンホールの構造及び配置の規定として、原則として、最小のものとして内径75cmの組立０号マンホールからの寸法を規定すると共に、マンホール間隔についてもその標準的な間隔を規定している。マンホールの構造に関しては、近年の下水道の普及と共に、より狭小な道路に管渠を埋設する必要性が生じ、０号マンホールより小規模の「小型マンホール」が一部採用されている。また、「設計指針」の小規模管路施設では、維持管理上支障を来さない範囲で曲管等の使用によ

りマンホールの省略が可能としている。一方、マンホール間の最大間隔は管径300mm以下の場合、「設計指針」では標準的には50m以下とするものの、清掃作業を考慮し地域条件により、間隔を100m程度又は30m程度とすることも可能であるとしている。

以上の現状を踏まえつつ、マンホール設置におけるコスト縮減を図るため、①マンホール個数の減少（マンホール間隔の長距離化、曲管の採用）、②マンホールの小型化につき検討を行った。

（イ）マンホールコスト縮減のケース・スタディ

マンホール配置を変えることによる建設コスト縮減効果を検討するために、平成８年度報告書[1]で対象とした計画処理人口１万人未満の９処理（分）区を対象として、表１－１のようなケースで試算を行った。すなわち、マンホール最大間隔を50mとして、起点、方向変化部、直線中間部及び会合部全ての箇所に通常マンホールを採用した場合を現状（ケース０）として、小型マンホール及び曲管の採用、マンホール最大間隔の長距離化によるコスト縮減効果を把握するため、５つのケースについて、それぞれマンホール最大間隔を50、75、100mの３条件で試算を行った。あわせて、現状（ケース０）についても、マンホール最大間隔のみを75、100mに変更した２条件で試算を行った。各ケースの結果は表１－２の通りである。

表１－１　検討ケース

ケース名	ケース１	ケース２	ケース３	ケース４	ケース５
設置条件	起点のみ小型マンホール	起点、方向変化部全て及び直線中間部を交互に小型マンホールを配置	起点、方向変化部及び直線中間部の全てを小型マンホール	２に加え、方向変化部の角度が30度以下の場合は曲管	３に加え、方向変化部の角度が30度以下の場合は曲管
	全てのケース共に会合部は通常マンホール				

表１－２　　コスト比較

最大間隔	ケース０	ケース１	ケース２	ケース３	ケース４	ケース５
50m	１００％	９２％	７０％	４８％	５３％	３８％
75m	９５％	８７％	６６％	４６％	３５％	２８％
100m	８８％	８０％	６２％	４３％	３３％	２７％

上記より、マンホール間隔を変更することなく、小型マンホールを導入するだけでも相当にコスト縮減効果が見込まれる。特に、平成８年度報告書から明らかなように、全マンホール箇所の内方向変化部は50％を占めておりまたその方向変化部の内中心交角30度以下のものが66％を占めていることより、今回のケース・スタディでも曲管の採用によるコスト縮減効果は大きいことが明らかとなった。一方、マンホール最大間隔を長距離化することによるコスト縮減効果は、小型マンホール及び曲管の採用に比較して、相対的に大きなものではなく、特に75mから100mへの長距離化はさほど縮減に寄与していない。

（ロ）適用に当たっての課題

マンホール配置は、管渠の維持管理上必要不可欠であるため、建設コストの縮減のみでなく、適切な管渠の維持管理を確保するという観点からも検討されるべきである。

・マンホール間隔

管渠勾配等にもよるが、テレビカメラによる管渠内点検は、標準的に100m程度は可能であり、管内清掃（高圧洗浄）は、一般的に標準設備で80m、最大で150m程度可能である。また、管渠の改築・修繕は、工法及び管径により施工可能延長は異なるが、小口径対応工法でも半分程度は100m以上は可能である。以上の点から考慮すると、「設計指針」における標準間隔50mは変更する余地がある。

・小型マンホール

現在の機器ではマンホールの径が600mm以上であれば作業効率は落ちるが、小型テレビカメラによる管

内点検及び管内清掃（高圧洗浄）は可能である。管渠の改築・修繕は小型マンホールすなわち人が中に入れないと現状の工法では困難である。そこで、平成９年度報告書[3]で記述したように、維持管理上、マンホールの機能別（起点部、直線中間部、方向変化部及び会合部）による重要性が異なっており、これを考慮して、機能別に通常マンホール及び小型マンホールを使い分ける又は飛び石に交互配置する等、各地域事情に応じたマンホール配置を検討することが望ましい。

・曲管

曲管を採用するとマンホールから管渠内を目視することが困難であること、曲率によっては現在の機器ではテレビカメラによる管渠内点検が不可能であること及び管渠の改築・修繕は基本的には不可能となること等より、多くの地方自治体においてその採用は消極的である。ただし、狭小等の道路及び地下埋設物が輻輳している箇所等においては、曲管を採用することが適当である可能性もあり、維持管理上支障を来さない範囲で今後とも採用することが望ましい。

（２）管渠勾配に関する検討

管渠の勾配を緩和した場合、土被りが浅くなり、土工量の減少及び簡易な土留め工の採用により建設コストが縮減される。現行の「設計指針」では汚水管の勾配の決定方法を、「流速は計画下水量に対し最小流速を0.6m/秒として下流に行くに従い漸増させ、勾配は下流に行くに従い緩くする」と定めている。この最小流速0.6m/秒とは、「下水の中に含まれている土粒子等が管内で堆積することを避けること（掃流力の確保）」に必要な最小流速とされている。「設計指針」には、最小流速0.6m/秒がどのような条件下（流量等）でどの地点での流速か明記していないが、実際のほとんどの設計では下水が満管の状態で流れる場合の平均流速としている。しかし、末端管渠では流量が少なく、その水深は管径の半分以下となり、満管時の流速は確保されていない。また、満管時の定常流れの掃流力を前提に最小流速0.6m/秒は算出されているが、実際、末端汚水管渠では排水設備からの汚水の流入が連続的にあるとは考えられず非定常流となっている。この繰り返される非定常流の瞬時最大流量エネルギーが固形物を搬送すると考えて設計すれば、管渠勾配を小さくできる可能性もある。

本調査では、このように管渠勾配に関する現行設計方法が合理的とは言い難い点を有しているために、これらを検証し、新たな設計方法の採用の可能性につき検討するものである。

（イ）現状の管渠勾配

各地方自治体における現状の管渠勾配の決定方法を把握するために、地方自治体を対象としてアンケートを実施した。実際に各地方自治体において設計されている末端管渠（管径200mmかつ塩ビ管を採用している場合）における最小勾配を整理したものが表１－３である。満管状態で流速が0.61m/秒の時の勾配は2.0‰であるが、表１－３のように８割程度の自治体では最小勾配として2.0‰を超える値を採用している。この理由として、末端では流量が少ないこと、施工精度を確保すること等を指摘している。

表１－３　最小勾配別の地方自治体の割合

勾配（‰）	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5～
割合（%）	２４	４	２１	１９	７	１	２３

表１－４　許容施工誤差別の地方自治体数

施工誤差(mm)	１０	２０	３０	５０	７５	合計
開削工法	２	２０	４０	２		６４
推進工法			２	９	１	１２

また、各地方自治体における管渠の敷設に際しての鉛直方向の許容施工誤差は、表１－４の通りである。例えば、マンホール間隔（平成８年度調査報告書参照）を30mとすると、誤差±30mmは勾配±1.0‰に相当

する。

（ロ）管渠勾配緩和のケース・スタディ

管渠勾配の緩和によるコスト縮減効果を検討するために、表１－５のような地域において、表１－６で示す条件において、建設コストの試算を行った。なお、現計画に関するデータは事業認可図書より入手した。

表１－５　モデル地区の概要

地区名	面積（ｈａ）	特徴
A	80.0	海沿いの平坦な地域
B－1	31.2	川沿いの平坦地で、国道沿いに市街地が密集
B－2	24.1	
C	48.8	湖周辺の川沿いの平地

表１－６　試算条件及び建設コスト比較

地区名	現計画	試算条件	比率
A	最小勾配3.0‰(＝流速0.74)	最小勾配2.0‰(＝流速0.61)	94.0%
B－1	最小勾配3.0‰(＝流速0.74)	最小勾配2.0‰(＝流速0.61)	91.9%
B－2	同上	同上	98.0%
C	最小勾配3.5‰(＝流速0.80)	最小勾配2.0‰(＝流速0.61)	82.6%

（注）上記流速は満管流速（m/秒）であり、比率はそれぞれの現計画を100%としている

最小勾配の緩和による処理区全体のコスト縮減率は、地域条件（地下埋設物の多さ或いは河川横断の有無等）により異なる。すなわち、ある地点での管渠の土被りは、上流側管渠の土被り及び管渠勾配のみでなく、同地点での既存埋設物等との兼ね合いで決定されることもある。したがって、B地区内においても、B－1、B－2では縮減率において約6%の差があった。また、C地区においては、他地区より現行計画に比べ勾配を大きく緩和させたこと及び農村部であったこともあり、大幅なコスト縮減効果が見られた。

（ハ）まとめ

既に述べてきたように現行の設計方法は合理的とは言い難い面もある。しかし、設計通りの勾配が確保されていれば、堆積という問題は特殊な場合（伏せ越し部における堆積、飲食店から排出される油脂による閉鎖等）以外はあまり生じていないようである。つまり現行の設計方法は、合理性はともかく一つの設計方法として大きな役割を果たしてきたと言える。（イ）のように多くの地方自治体では施工誤差、実流速を勘案して、現行の設計方法よりも急な管渠勾配を採用している。また、平成９年度報告書の通り、末端管渠においては確かに非定常流として固形物は掃流されているが、その掃流は勾配が小さい時は１回のフラッシュ流量及びフラッシュ回数により左右されている。したがって、排出先の排出条件により限界掃流力規定による流速は異なり、一般化は困難である。以上のことを勘案すると、コスト縮減の観点からのみ、現行の設計方法を変更することには慎重にならざるを得ない。

３．２　建設コスト分析に関する検討

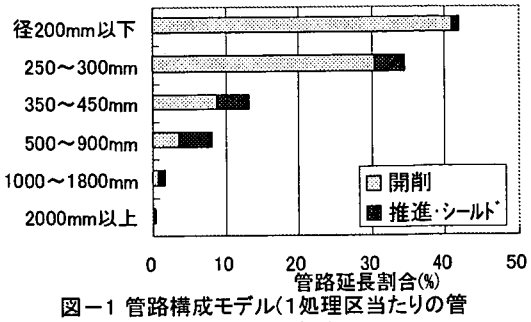
（１）処理区単位で見た建設コスト分布

処理区を構成する管路は管径・土被り等の異なる様々な管渠群から構成されるため、これら費用を増減させる要因別に処理区の管路構成をモデル化する必要がある。一般的に単位長さ当たりの管路建設費を増減させる要因には、管径と土被りがあるが、土被りの違いを工法の違いとして表現した場合、処理区当たりの管路建設費Ｃは以下のようになる。

$$C=\sum_{i=\text{管径}}\sum_{j=\text{工法}}(l_{ij}\times U_{ij})$$

l_{ij}：管径・工法別延長(m)　U_{ij}：管径・工法別ｍ当たり施工単価(千円/m)

管径・工法別延長(m) l ij の内、管径別延長割合は、計画処理人口５～30 万人、主に分流式、供用開始後25 年以上の条件で抽出した日本の 33 都市の管径別管路延長の割合から設定し、管径別埋設工法の割合は、平成 10 年度「日本の下水道」に記載されている平成８年度総工法別延長、管径・管種別発注延長より算定した管径別開削、推進、ｼｰﾙﾄﾞ各工法の延長割合を用いた。処理区当たりの管路延長構成は、圧倒的に小口径開削工法の割合が大きい（図－１）。



図－1 管路構成モデル(1処理区当たりの管径・工法別管路延長)

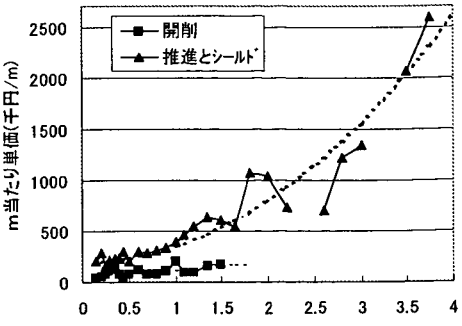
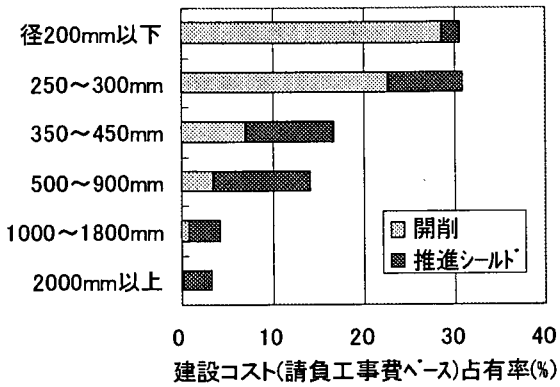


図-2 管径・工法別m当り施工単価(直接工事費ベース)

管径・工法別 m 当たり施工単価 Uij は、収集した全国地方自治体の平成 9 年度工事設計書 260 件、管径・工法の異なる 335 管路区間より算定した。発注規模の違いによる諸経費率の違いを除去するために、直接工事費ﾍﾞｰｽで施工単価を算出し(図－２)、この直接工事費単価に上記工事設計書の管径・工法別平均諸経費率(総請負工事費/総直接工事費)を乗じて総工事費ﾍﾞｰｽの Uij を算出した。



図－3 管路建設コストモデル(処理区当たりの管径・工法別コスト占有率)

図－３に処理区当たりの管路建設費Ｃを示す。一般的に大口径管路ほど管路延長割合は少なくなるものの、ﾒｰﾄﾙ当たり施工単価が大きいため、建設コストに占める割合は高くなる。全体的として、300mm 以下の開削管路が建設費の約 50%、900mm 以下の推進管路が約 30%、350mm 以上の開削管路が 10%強、1000mm 以上の推進・ｼｰﾙﾄﾞ管路が 10%弱、それぞれ占めることがわかる。コスト縮減には、コスト占有割合の大きい小口径の開削及び小口径推進の工種に対し、コスト縮減に向けた技術開発をより進めることが全体的な事業費の削減に寄与することがわかる。

（２）工事費内訳から見た建設コスト分布

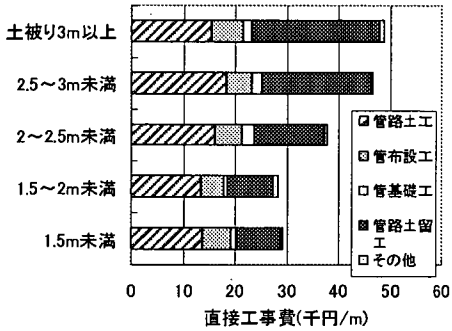
発注者サイドが工事設計書の内訳を分析するためには、その工種・種別・細別項目が含む積算費用（機械・労務・材料費など）は、一義的・全国共通的に定義されていなければならない。例えば、開削管路の土工としての「掘削」「埋戻」「発生土処理」などの細別は、どの工事設計書でも掘削、埋戻、残土の運搬や処分費などの費用に関し、同じ定義に基づく費用が入力されていなければ、工事設計書間の費用比較はできない。工事工種の体系化とは契約図書となる工事数量総括表（金抜設計書）について、階層数や階層定義、細分化方法などの構成方法、用語名称や数量単位などの表示方法を工種毎に標準化・規格化する事をいう。この定義した積算階層を上位から工事区分(ﾚﾍﾞﾙ１)、工種(ﾚﾍﾞﾙ２)、種別(ﾚﾍﾞﾙ３)、細別(ﾚﾍﾞﾙ４)と呼んでいる。本研究の分析対象とした前述の工事設計書は、この工事工種体系に基づいた工事設計書となっているため、容易に工事費を工種・種別などの内訳費用に分解・分析することができる。図－４に下水道工事工種体系を表すツリー図例を示す。図－５に管径 200～250mm 開削管路の土被り別ﾚﾍﾞﾙ 2「管きょ工(開削)」の細別（ﾚﾍﾞﾙ３）内

訳を示す。ﾚﾍﾞﾙ3内訳では、「管路土工」と「管路土留工」のコスト割合が大きく、土被りが大きいほどその割合は大きくなる。開削管路では工事目的物とならない任意仮設工事となるべき部分の割合は全体の約 50～60%を占め、この部分のコスト縮減が大きな課題であり、今後施工の安全性を確保する中で、より安価な山留め工法の技術開発などが求められるといえる。管径200～800mm 小口径推進の管径別工種（ﾚﾍﾞﾙ2）内訳を図6に示す。

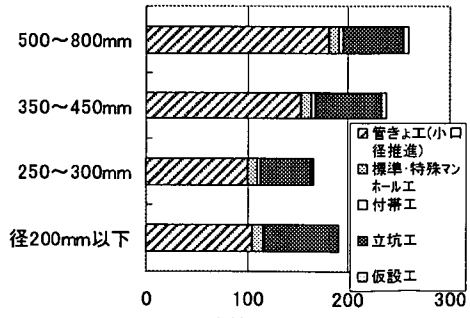
ﾚﾍﾞﾙ1 工事区分	ﾚﾍﾞﾙ2 工種	箇所名 工法名等	ﾚﾍﾞﾙ3 種別	箇所名 工法名等	ﾚﾍﾞﾙ4 細別	箇所名 工法名等	ﾚﾍﾞﾙ5 規格	積算用単位	工事数量総括表用単位	摘要
管路	管きょ工（開削）<管径○mm>		管路土工		管路掘削		【 － 】	m3	式	
					管路埋戻		【 － 】	m3	式	
					発生土処理		【 － 】	m3	式 ※1	
			管布設工		硬質塩化ﾋﾞﾆｰﾙ管		【規格、管径、支給の有無】	m	m	
					強化ﾌﾟﾗｽﾁｯｸ複合管		【規格、管径、支給の有無】	m	m	
					鉄筋ｺﾝｸﾘｰﾄ管		【規格、管径、支給の有無】	m	m	
			管基礎工		砂基礎		【高さ、幅】	m	m	
					砕石基礎		【高さ、幅、砕石規格】	m	m	
					まくら土台基礎		【材質、幅】	m	m	
			管路土留工		（木矢板土留）		【掘削幅】	m	式 or m	任意の場合、ﾚﾍﾞﾙ3で1式
					（建て込み簡易土留）		【掘削幅】	m	式 or m	
					（軽量鋼矢板土留）		【掘削幅、軽量鋼矢板型式】	m	式 or m	
	管きょ工（小口径推進）<管径○mm><工法>		仮管併用推進工		推進用ｺﾝｸﾘｰﾄ管（仮管併用）		【規格、管径】	m	m	
					発生土処理		【 － 】	m3	式 ※1	
			ｵｰｶﾞ掘削推進工		推進用ｺﾝｸﾘｰﾄ管（ｵｰｶﾞ掘削）		【規格、管径】	m	m	
					発生土処理		【 － 】	m3	式 ※1	
			仮設備工（小口径）		（坑口（小口径））		【発進又は到達】	箇所	式 or 箇所	任意の場合、ﾚﾍﾞﾙ3で1式
					（立坑基礎）		【砕石規格・厚、ｺﾝｸﾘｰﾄ規格・厚】	㎥	式 or ㎥	
					（裏切り）		【土留め形式】	箇所	式 or 箇所	
					（推進設備等設置撤去）		【設置・撤去の別】	箇所	式 or 箇所	
	管きょ工（推進）<管径○mm><工法>		刃口推進工		推進用ｺﾝｸﾘｰﾄ管（刃口）		【元・中押し区分、規格、管径】	m	m	
					発生土処理		【 － 】	m3	式 ※1	
					裏込め		【裏込材種類】	m	m	
	管きょ工（シールド）<仕上り内径○mm><工法>		一次覆工		ｼｰﾙﾄﾞ本体・後続台車損料		【形式、ｾｸﾞﾒﾝﾄ規格】	m	式 or m	
					覆工ｾｸﾞﾒﾝﾄ		【ｾｸﾞﾒﾝﾄ規格、圧気・無圧気区分】	m	m	
					発生土処理		【 － 】	m3	式 ※1	
	標準マンホール工				マンホール		【ﾏﾝﾎｰﾙ規格（類○号）、平均ﾏﾝﾎｰﾙ深】	箇所	箇所	
					組立マンホール		【ﾏﾝﾎｰﾙ規格（組立○号）、副管の有無】	箇所	箇所	
	立坑工		管路土工		管路掘削		【 － 】	m3	式	ｼｬﾌﾄ、鋼製立坑を除く立坑内土工
					管路埋戻		【 － 】	m3	式	
					発生土処理		【 － 】	m3	式 ※1	
			土留工		（清掘り）		【 － 】	m	式 or m	
					（仮設鋼矢板）		【型式、長さ、打込又は引抜】	枚	式 or 枚	

図－4　下水道工事工種体系

「管きょ工(小口径推進)」と「立坑工」で施工費のほとんどを占めるが、「管きょ工(小口径推進)」の費用は管径にほぼ比例する一方、「立坑工」の費用は管径に係わらずほぼ一定の金額であることがわかる。立坑に関しては、小口径管での施工方法の効率化・低コスト化が望まれる。また、小口径推進は、開削管路同様任意仮設工事部分の割合が高く、この部分を低コスト化する技術開発が求められている。



図－5 ﾚﾍﾞﾙ2管きょ工(開削)の土被り別種別(ﾚﾍﾞﾙ3)内訳(径200～250mm)



図－6 小口径推進管路の管径別工種(ﾚﾍﾞﾙ2)内訳

<参考文献>

1）、2）田中他、「小規模下水道の管渠設計・施工に関する調査」、平成８年度・平成９年度下水道関係調査研究年次報告書集

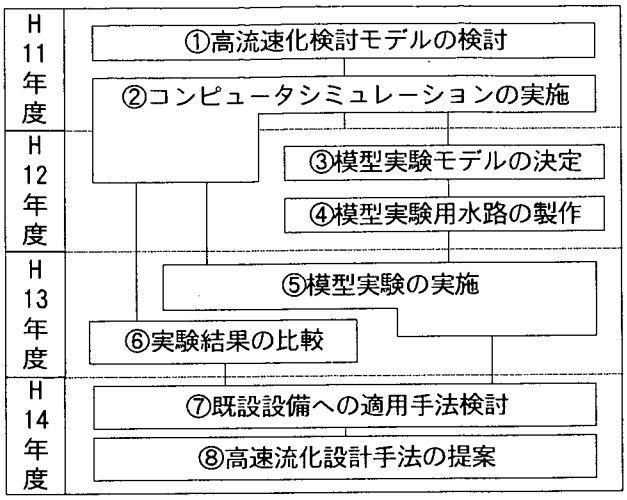
（井上、植松；松井、小林）

10.8　揚排水機場の設計合理化に関する研究

研究期間：平成１１～１４
担当：機械研究室

【要旨】

１１年度は、揚排水機場における高速流路施設の事例調査、高流速化に対する条件整理を行い、高流速化が可能と思われる流路施設の提案およびコスト比較を行った。揚排水機場は設備の機能確保とともに、公共事業に対するコスト縮減が求められている。その具体策の一つとして、大型の揚排水機場では吸水槽からポンプまでの水の流れを高速化することによって、土木構造物の規模を縮小し、コスト縮減を図る取組みが行われている。本研究では、この吸水槽内流速の高速化を小・中規模の揚排水機場への適用を研究するものである。今後はコンピュータシミュレーションと模型実験により、既設排水機場への適用手法検討および高流速化設計手法の提案を行う予定である。



１．研究目的

洪水等の水害から人命や資産を守るため、日本各地で排水機場の整備が進められてきた。一方、最近では公共サービスに対するコスト縮減が社会的要請になっており、中・小規模の排水機場についても建設コストの縮減の努力が求められている。その１案として吸込流速を速めることにより従来と同様の排水能力を確保しつつ吸水槽の小型化を行い、建設コスト縮減および既設機場の排水能力向上手法の提案、揚排水ポンプ設備技術基準（案）への反映を図ることを目的とする。

２．研究方法

平成１１年度は、高流速化に向けた吸水槽を提案するべく、過去の事例調査、吸水槽小型化に対する土木施工や機器設置上の制約条件の整理、高流速化吸水槽の提案を行った。

３．研究結果

３．１　事例調査

平成１０年度以降に着工あるいは竣工した建設省直轄排水機場でオープン型吸水槽を有する 10 機場及び高流速化・小型化を図った排水機場 15 機場の事例調査を行い、平成９年度以前のデータと合わせて整理した。

排水量と流速との関係を図１

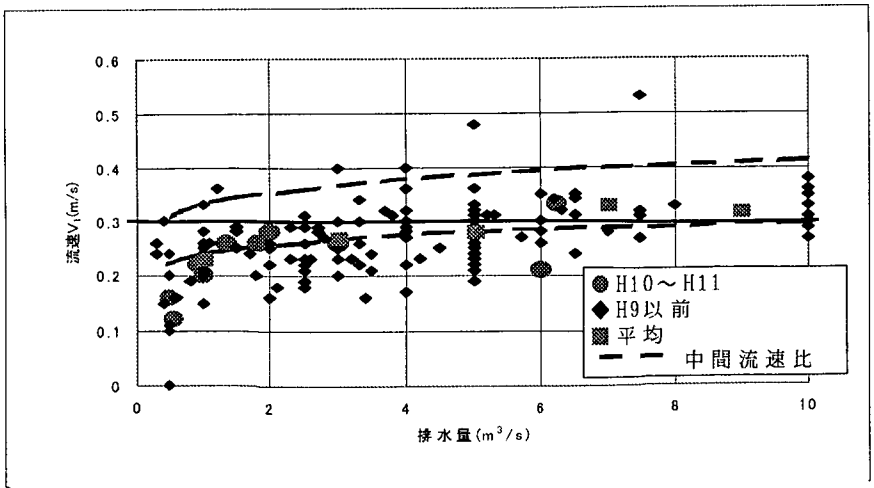
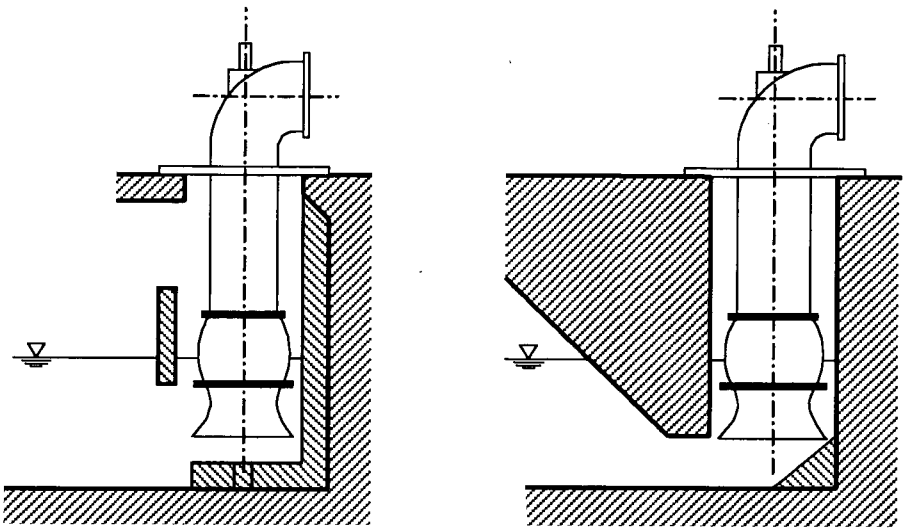


図１　排水量とポンプ呑み口部流速の関係

に示す。この結果、多くの排水機場が「揚排水ポンプ設備技術指針（案）」の標準値 0.3m/s を採用する場合が多いが、排水量が大きいほど若干の高流速化の傾向が分かる。これは相似則（寸法比の 0.2 乗に比例）の関係から小口径域では低流速化することや、土木施工上や主原動機等の機器設置スペースにより吸水槽が比較的大きくなるためと思われる。

３．２　高流速化に向けた基本形状の検討

高流速化によって問題となるのは自由水面からの空気吸込や水流の隔たりにより発生する水中渦がポンプ羽に接触し、振動や能力変動を誘発することである。これらを防止するためにオープンピット型排水機場では突っ込み整流板による水面流速の低速化や後壁整流板や底面十字型整流板による水中渦発生抑制の提案を行った。また中型排水機場を対象に流れ損失を低減しスムーズな水流を実現させ、より空気吸込渦や水中渦の発生抑制を図ったセミクローズドピット型吸水槽の提案を行った。図２に各吸水槽の断面図を示す。



(a)オープンピット型吸水槽　　(b)セミクローズドピット型吸水槽

図２　オープンピット及びセミクローズドピット型吸水槽

３．３　制約条件の整理

吸水槽の高流速化に対する制約条件としては、乱流と渦の発生などの水理的な限界の他に土木施工時の作業スペースや吸水槽上部に配置される主原動機や吐出弁の設置スペースからの制約がある。

中小排水機場では、水理的な制約条件よりも土木および機器設置上の制約条件が厳しく、土木施工条件としてはセミクローズピット形吸水槽において、ポンプ吸込口の開口部内における型枠工の施工限界により、ポンプ口径 1350φ以上の排水機場にのみ適用可能である。また、機器の設置スペースでは、吐出弁の設置スペースの面からポンプ口径 900φ以上の吸水槽で現行基準より水路幅の縮小が図れることが分かった。

３．４コスト比較

セミクローズドピット吸水槽の採用によるコスト縮減効果をポンプ口径 1500φ及び 1800φの機場における標準的な排水機場の建設コストを試算し、比較を行った。この結果、吸水槽の小型化により数パーセントの縮減効果が試算された。また吸水槽の小型化と高速形ポンプの採用により更なる縮減効果が期待できるとの試算も得られ、用地費用の縮減を合わせた排水機場全体のコスト縮減効果はより向上するものと考えられる。

４．主な成果物

・建設経済局建設機械課,平成１２年３月２４日付け事務連絡:揚排水機場における高流速吸込水路及び高速・高流速ポンプの標準化検討について

（村松、持丸、新田、水上）

10.9.1　プロジェクトマネジメント手法の検討に関する調査（その１）

研究期間：平 11～平 12

担当：建設マネジメント技術研究室

【要旨】

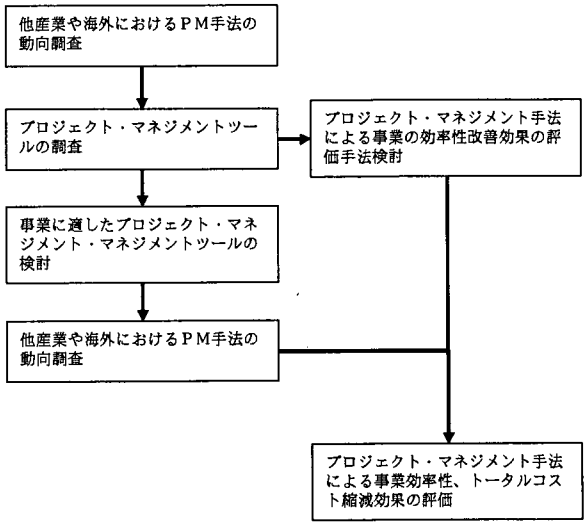
本調査は、プロジェクト管理の手法のグローバルスタンダードとなりつつある Project management 手法について、事業への適用性を調査するものである。１１年度は、海外機関における PM 標準の動向把握を行った。また、事業プロセスを WBS(Work Breakdown Structure)手法により整理を行い、マネジメントプロセスの中で Time, Cost, Risk を対象にマネジメントプロセスを支援する PM ツールとマニュアルの試作を進めた。

１．調査目的

事業への住民参加や情報公開などを背景に、事業を円滑に進めるためのマネジメント技術も高度化している。プロジェクト管理の手法として、プロジェクト・マネジメント（ＰＭ）と呼ばれる手法体系が海外の様々なプロジェクトなどを通してグローバルスタンダードとなりつつある。本調査は、プロジェクト・マネジメント手法の事業への適用性を調査するものである。

２．調査方法

公開されている情報の収集により、海外の発注機関やＰＭ協会などにおけるプロジェクト・マネジメント手法の定義や範囲をまとめる。続いて、事業に適したＰＭツールの機能をヒアリング調査などによってまとめ、市販のソフトを応用した建設省版ＰＭツールの開発を行う。同時にＰＭツールや事業ＤＢなどの統合的な情報システム（ＰＭシステム）を用いたＰＭプロセスのあり方を検討してまとめて試行を行う。また、ＰＭシステムを用いた事業効率性評価手法の検討を行い、その可能性についてもまとめる。



図－１；調査概要

３．調査結果

３．１　ＰＭをめぐる動向

生産システムの規格化が進む中で、1996 年の BS6079、1997 年の ISO10006 などプロジェクト管理についての規格策定や PM に関する知識体系の整理が行われている（表－１）。

表－１；ＰＭ協会、標準化機関におけるＰＭ規格や知識体系の例

	団体名	URL	PM 規格、知識体系
標準化機関	International Standardization for Organization (ISO)	http://www.iso.ch	ISO10006 Guidelines to Quality in Project Management (1997)
	The British Standards Institution (BSI)	http://www.bsi.org.uk	BS6079 (1996)
ＰＭ協会	Project Management Institute (PMI)	http://www.pmi.org	A Guide to the Project Management Body of Knowledge (1996)(略称 PMBOK)
	The Association for Project management (APM)	http://apm.org.uk	The APM Body of Knowledge
	International Project Management Association (IPMA)	http://www.ipma.ch	IPMA Competence Baseline (1999)
発注機関	CALIFORNIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION	http://www.dot.ca.gov/hq/projmgmt/	CALTRANS PROJECT MANAGEMENT HANDBOOK Third Edition

表-2　体系化された事業プロセス

1	予備調査段階					
		1-1	基礎資料の収集分析			
				1-1-1	工事実施基本計画のレビュー	
				1-1-2	地建内ダム建設順序の設定	
						1-1-2-1 局内の手持ち事業の状況把握
						1-1-2-2 治水利水を組み合わせたダム群の設定と建設順序のレビュー
				1-1-3	調査費の算定	
						1-1-3-1 ダム事業候補水系の選定
						1-1-3-2 調査実施事務所の選定
						1-1-3-3 調査費の算定
				1-1-4	ダム事業実施可能性協議	
						1-1-4-1 県水政課とダム事業実施可能性に関する協議
						1-1-4-2 自治体とダム事業実施可能性に関する協議
				1-1-5	調査費予算要求	
						1-1-5-1 ダム事業候補水系の提示
						1-1-5-2 調査費の予算要求

複数存在する PM 規格を世界的に統合しようとする試みもある。また、カリフォルニア州交通局などでは独自に PM 標準やマニュアルの作成を行っており、このような PM 方法論の形式化は有益な示唆を含むものである。

3．2　PM 手法の範囲

PM 手法の特徴としては

・プロジェクト管理機能を強化し、プロジェクトの責任と権限の所在を明確化するため組織機能の責任や権限とを分離したマトリックス組織構造。

・「立ち上げ」、「計画」、「遂行」、「終結」のプロジェクトマネジメントのプロセスのマニュアルやツールによる形式化。

・ WBS (Work Breakdown Structure)

・PMS (Project Management Software)

が挙げられる。

3．3　PMツール

本調査では、WBS を用いて事業プロセスを体系化し、PM ツールへの入力情報の規格化を進めた（表－2）。また、平成 10 年度に行った工事事務所長へのアンケート調査結果を参考に進捗管理、予算管理、リスク管理のマネジメントプロセスについての PM ツールとマニュアルの試作を行い、次年度の試運用の準備を進めた。PM ツールの機能を PMBOK（表-1）におけるマネジメント分野の分類を基に整理して示したのが表－3である。

表-3　対象としたマネジメントプロセスとＰＭツール

対象としているマネジメントプロセス（PMBOK によるマネジメントの分類）	マネジメントプロセスの概要（サブプロセス）	ＰＭツールの機能
進捗管理のマネジメントプロセス (Time Management)	スケジュール作成（業務計画策定）	業務テンプレートの提供
	予算設定	執行計画策定支援
	業務の実施（プロジェクト計画の共有、進捗状況の監視）	プロジェクト情報の共有 進捗状況のモニタリング
	進捗報告（工程会議）	進捗報告レポートの出力
	スケジュール変更	計画変更シミュレーション
予算管理のマネジメントプロセス (Cost Management)	予算執行計画の作成	予算試行計画の共有
	執行状況の把握	予算執行状況の共有
	工事の出来高のモニタリング	出来高の修正
	進捗報告（工程会議）	レポートの作成
	対応策の策定（執行計画の変更）	執行計画変更シミュレーション
リスクマネジメントのプロセス (Risk Management)	リスクの特定（用地物件毎の状況、特性把握）	用地物件毎の進捗状況の整理、可視化
	リスクの定量化（用地物件毎の見通しの予測、予算執行の予測）	EVA を応用した進捗状況の定量化、用地取得、予算執行見通しの予測
	対応策の策定（代替アプローチの検討、工程会議、予算要求、繰越）	代替アプローチの情報提供

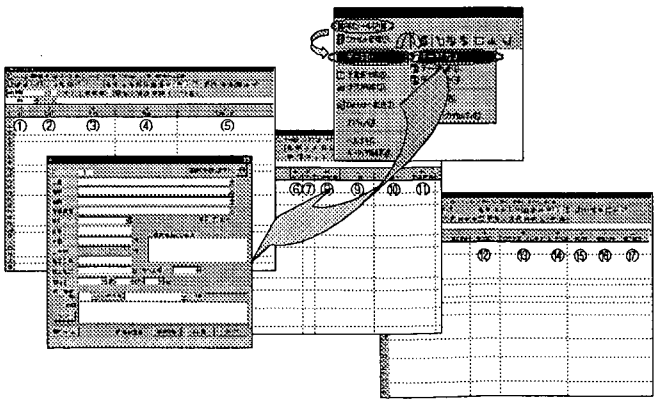


図-2；PM ツールの操作イメージ

4．今後の課題

試運用を通じたＰＭツールのブラッシュアップと共に、プロジェクト計画立案を支援するためのデータベース仕様の検討、PM 情報を用いた事業効率性計測手法の検討が今後の課題となっている。

（山下、安原）

10.9.2　プロジェクトマネジメント手法の検討に関する調査（その２）

研究期間：平 11～平 12

担当：建設マネジメント技術研究室

【要旨】

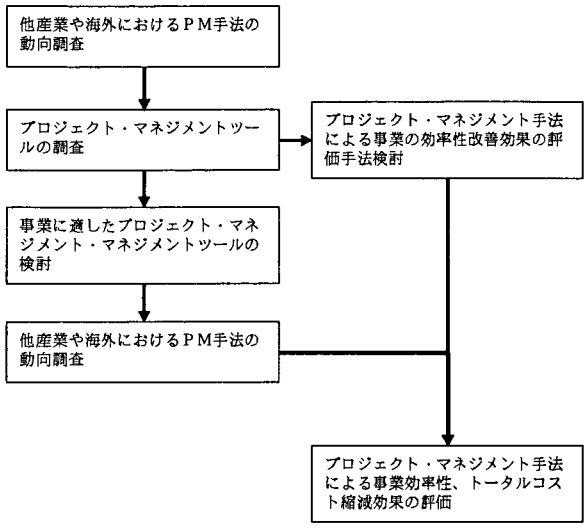
本調査は、プロジェクト管理の手法のグローバルスタンダードとなりつつある Project management 手法について、事業への適用性を調査するものである。１１年度は、海外機関における PM 標準の動向把握を行った。また、事業プロセスを WBS(Work Breakdown Structure)手法により整理を行い、マネジメントプロセスの中で Time, Cost, Risk を対象にマネジメントプロセスを支援する PM ツールとマニュアルの試作を進めた。

１．調査目的

事業への住民参加や情報公開などを背景に、事業を円滑に進めるためのマネジメント技術も高度化している。プロジェクト管理の手法として、プロジェクト・マネジメント（ＰＭ）と呼ばれる手法体系が海外の様々なプロジェクトなどを通してグローバルスタンダードとなりつつある。本調査は、プロジェクト・マネジメント手法の事業への適用性を調査するものである。

２．調査方法

公開されている情報の収集により、海外の発注機関やＰＭ協会などにおけるプロジェクト・マネジメント手法の定義や範囲をまとめる。続いて、事業に適したＰＭツールの機能をヒアリング調査などによってまとめ、市販のソフトを応用した建設省版ＰＭツールの開発を行う。同時にＰＭツールや事業ＤＢなどの統合的な情報システム（ＰＭシステム）を用いたＰＭプロセスのあり方を検討してまとめて試行を行う。また、ＰＭシステムを用いた事業効率性評価手法の検討を行い、その可能性についてもまとめる。



図－１；調査概要

３．調査結果

３．１　ＰＭをめぐる動向

生産システムの規格化が進む中で、1996 年の BS6079、1997 年の ISO10006 などプロジェクト管理についての規格策定や PM に関する知識体系の整理が行われている（表－１）。

表－１；ＰＭ協会、標準化機関におけるＰＭ規格や知識体系の例

	団体名	URL	PM 規格、知識体系
標準化機関	International Standardization for Organization (ISO)	http://www.iso.ch	ISO10006 Guidelines to Quality in Project Management (1997)
	The British Standards Institution (BSI)	http://www.bsi.org.uk	BS6079 (1996)
ＰＭ協会	Project Management Institute (PMI)	http://www.pmi.org	A Guide to the Project Management Body of Knowledge (1996)(略称 PMBOK)
	The Association for Project management (APM)	http://apm.org.uk	The APM Body of Knowledge
	International Project Management Association (IPMA)	http://www.ipma.ch	IPMA Competence Baseline (1999)
発注機関	CALIFORNIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION	http://www.dot.ca.gov/hq/projmgmt/	CALTRANS PROJECT MANAGEMENT HANDBOOK Third Edition

複数存在する PM 規格を世界的に統合しようとする試みもある。また、カリフォルニア州交通局などでは独自に PM 標準やマニュアルの作成を行っており、このような PM 方法論の形式化は有益な示唆を含むものである。

３．２　PM 手法の範囲

PM 手法の特徴としては

・プロジェクト管理機能を強化し、プロジェクトの責任と権限の所在を明確化するため組織機能の責任や権限とを分離したマトリックス組織構造。

・「立ち上げ」、「計画」、「遂行」、「終結」のプロジェクトマネジメントのプロセスのマニュアルやツールによる形式化。

・WBS (Work Breakdown Structure)

・PMS(Project Management Software)

が挙げられる。

３．３　ＰＭツール

本調査では、WBS を用いて事業プロセスを体系化し、PM ツールへの入力情報の規格化を進めた（表－２）。また、平成 10 年度に行った工事事務所長へのアンケート調査結果を参考に進捗管理、予算管理、リスク管理のマネジメントプロセスについての PM ツールとマニュアルの試作を行い、次年度の試運用の準備を進めた。PM ツールの機能を PMBOK（表-1）におけるマネジメント分野の分類を基に整理して示したのが表－３である。

表-2　体系化された事業プロセス

2	設計段階						
		2-1	概略～詳細設計の実施				
				2-1-1	【本省】概算要求（２次補正）の配分		
				2-1-2	河川整備対象地先の設定		
				2-1-3	施設配置計画案のレビュー		
				2-1-4	概略設計／詳細設計の実施準備		
						2-1-4-1	概略設計／詳細設計の業務計画の作成
						2-1-4-2	担当者の選定
				2-1-5	河川環境整備等の把握		
						2-1-5-1	占用施設等（公園、田畑等を含む）の把握
						2-1-5-2	構造物（堰、橋梁等）の把握
						2-1-5-3	取水・排水系統の把握
						2-1-5-4	地質の把握
						2-1-5-5	河川環境整備の把握

表-3　対象としたマネジメントプロセスとＰＭツール

対象としているマネジメントプロセス（PMBOK によるマネジメントの分類）	マネジメントプロセスの概要（サブプロセス）	ＰＭツールの機能
進捗管理のマネジメントプロセス (Time Management)	スケジュール作成（業務計画策定）	業務テンプレートの提供
	予算設定	執行計画策定支援
	業務の実施（プロジェクト計画の共有、進捗状況の監視）	プロジェクト情報の共有 進捗状況のモニタリング
	進捗報告（工程会議）	進捗報告レポートの出力
	スケジュール変更	計画変更シミュレーション
予算管理のマネジメントプロセス (Cost Management)	予算執行計画の作成	予算試行計画の共有
	執行状況の把握	予算執行状況の共有
	工事の出来高のモニタリング	出来高の修正
	進捗報告（工程会議）	レポートの作成
	対応策の策定（執行計画の変更）	執行計画変更シミュレーション
リスクマネジメントのプロセス (Risk Management)	リスクの特定（用地物件毎の状況、特性把握）	用地物件毎の進捗状況の整理、可視化
	リスクの定量化（用地物件毎の見通しの予測、予算執行の予測）	EVA を応用した進捗状況の定量化、用地取得、予算執行見通しの予測
	対応策の策定（代替アプローチの検討、工程会議、予算要求、繰越）	代替アプローチの情報提供

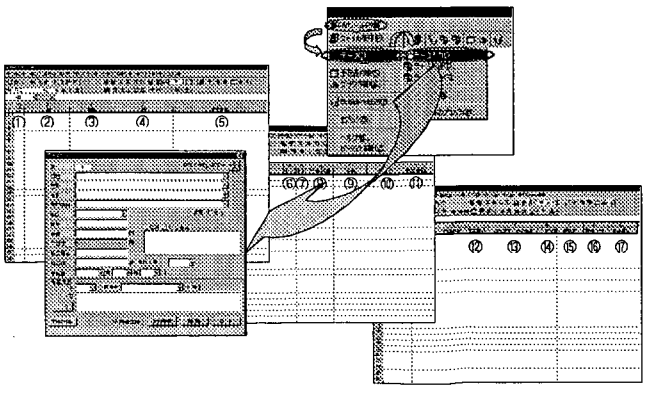


図-2；PM ツールの操作イメージ

４．今後の課題

試運用を通じたＰＭツールのブラッシュアップと共に、プロジェクト計画立案を支援するためのデータベース仕様の検討、PM 情報を用いた事業効率性計測手法の検討が今後の課題となっている。

（山下、安原）

10.9.3　プロジェクトマネジメント手法の検討に関する調査（その３）

研究期間：平 11～平 12

担当：建設マネジメント技術研究室

【要旨】

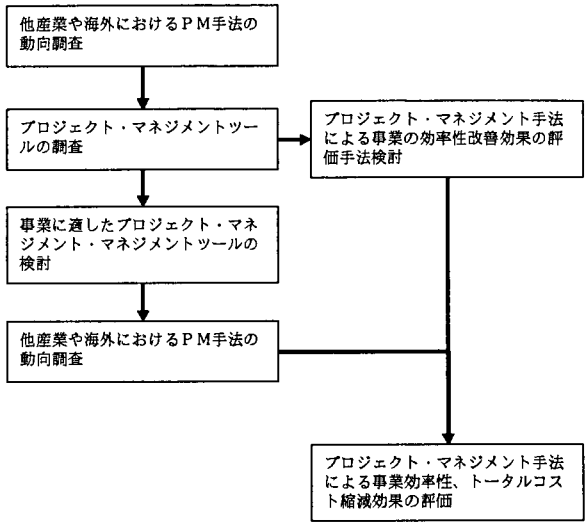
本調査は、プロジェクト管理の手法のグローバルスタンダードとなりつつある Project management 手法について、事業への適用性を調査するものである。１１年度は、海外機関における PM 標準の動向把握を行った。また、事業プロセスを WBS(Work Breakdown Structure)手法により整理を行い、マネジメントプロセスの中で Time, Cost, Risk を対象にマネジメントプロセスを支援する PM ツールとマニュアルの試作を進めた。

１．調査目的

事業への住民参加や情報公開などを背景に、事業を円滑に進めるためのマネジメント技術も高度化している。プロジェクト管理の手法として、プロジェクト・マネジメント（ＰＭ）と呼ばれる手法体系が海外の様々なプロジェクトなどを通してグローバルスタンダードとなりつつある。本調査は、プロジェクト・マネジメント手法の事業への適用性を調査するものである。

２．調査方法

公開されている情報の収集により、海外の発注機関やＰＭ協会などにおけるプロジェクト・マネジメント手法の定義や範囲をまとめる。続いて、事業に適したＰＭツールの機能をヒアリング調査などによってまとめ、市販のソフトを応用した建設省版ＰＭツールの開発を行う。同時にＰＭツールや事業ＤＢなどの統合的な情報システム（ＰＭシステム）を用いたＰＭプロセスのあり方を検討してまとめて試行を行う。また、ＰＭシステムを用いた事業効率性評価手法の検討を行い、その可能性についてもまとめる。



図－１；調査概要

３．調査結果

３．１　ＰＭをめぐる動向

生産システムの規格化が進む中で、1996 年の BS6079、1997 年の ISO10006 などプロジェクト管理についての規格策定や PM に関する知識体系の整理が行われている（表－１）。

表－１；ＰＭ協会、標準化機関におけるＰＭ規格や知識体系の例

	団体名	URL	PM 規格、知識体系
標準化機関	International Standardization for Organization (ISO)	http://www.iso.ch	ISO10006 Guidelines to Quality in Project Management (1997)
	The British Standards Institution (BSI)	http://www.bsi.org.uk	BS6079 (1996)
ＰＭ協会	Project Management Institute (PMI)	http://www.pmi.org	A Guide to the Project Management Body of Knowledge (1996)(略称 PMBOK)
	The Association for Project management (APM)	http://apm.org.uk	The APM Body of Knowledge
	International Project Management Association (IPMA)	http://www.ipma.ch	IPMA Competence Baseline (1999)
発注機関	CALIFORNIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION	http://www.dot.ca.gov/hq/projmgmt/	CALTRANS PROJECT MANAGEMENT HANDBOOK Third Edition

複数存在する PM 規格を世界的に統合しようとする試みもある。また、カリフォルニア州交通局などでは独自に PM 標準やマニュアルの作成を行っており、このような PM 方法論の形式化は有益な示唆を含むものである。

表-2　体系化された事業プロセス

5	予備設計段階					
	5-1	予備設計の実施				
			5-1-1	概算要求(2次補正)の配分		
			5-1-2	対象事業の設計工事区の設定		
					5-1-2-1	概算要求(2次補正)の事務所配分
					5-1-2-2	対象事業の設計工事区の設定
			5-1-3	事業実施計画の内容のレビュー		
			5-1-4	予備設計の実施準備		
					5-1-4-1	航空写真測量地図の入手(1/1,000)
					5-1-4-2	調査設計の発注(実施)計画の作成
					5-1-4-3	担当者の選定
			5-1-5	予備設計Aの実施		
					5-1-5-1	整備路線の中心線の設定
					5-1-5-2	整備路線の縦断図横断図の作成
					5-1-5-3	道路の幅員構成、道路構造の基本形態の選定
			5-1-6	予備設計Aの内容確認(開始・中間・最終)		
			5-1-7	自治体等への計画協議の方針整理		
			5-1-8	自治体等への計画協議の方針設定		
			5-1-9	自治体等への計画協議の実施		
					5-1-9-1	自治体(担当部局)との計画協議
					5-1-9-2	鉄道事業者との計画協議

3．2　PM 手法の範囲

PM 手法の特徴としては

・プロジェクト管理機能を強化し、プロジェクトの責任と権限の所在を明確化するため組織機能の責任や権限とを分離したマトリックス組織構造。

・「立ち上げ」、「計画」、「遂行」、「終結」のプロジェクトマネジメントのプロセスのマニュアルやツールによる形式化。

・WBS (Work Breakdown Structure)

・PMS (Project Management Software)

が挙げられる。

3．3　PMツール

本調査では、WBS を用いて事業プロセスを体系化し、PM ツールへの入力情報の規格化を進めた（表－２）。また、平成 10 年度に行った工事事務所長へのアンケート調査結果を参考に進捗管理、予算管理、リスク管理のマネジメントプロセスについての PM ツールとマニュアルの試作を行い、次年度の試運用の準備を進めた。PM ツールの機能を PMBOK（表-1）におけるマネジメント分野の分類を基に整理して示したのが表－３である。

表-3　対象としたマネジメントプロセスとＰＭツール

対象としているマネジメントプロセス（PMBOK によるマネジメントの分類）	マネジメントプロセスの概要（サブプロセス）	ＰＭツールの機能
進捗管理のマネジメントプロセス (Time Management)	スケジュール作成（業務計画策定）	業務テンプレートの提供
	予算設定	執行計画策定支援
	業務の実施（プロジェクト計画の共有、進捗状況の監視）	プロジェクト情報の共有 進捗状況のモニタリング
	進捗報告（工程会議）	進捗報告レポートの出力
	スケジュール変更	計画変更シミュレーション
予算管理のマネジメントプロセス (Cost Management)	予算執行計画の作成	予算試行計画の共有
	執行状況の把握	予算執行状況の共有
	工事の出来高のモニタリング	出来高の修正
	進捗報告（工程会議）	レポートの作成
	対応策の策定（執行計画の変更）	執行計画変更シミュレーション
リスクマネジメントのプロセス (Risk Management)	リスクの特定（用地物件毎の状況、特性把握）	用地物件毎の進捗状況の整理、可視化
	リスクの定量化（用地物件毎の見通しの予測、予算執行の予測）	EVA を応用した進捗状況の定量化、用地取得、予算執行見通しの予測
	対応策の策定（代替アプローチの検討、工程会議、予算要求、繰越）	代替アプローチの情報提供

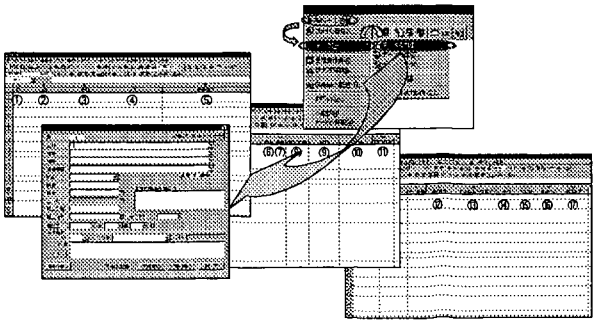


図-2：PM ツールの操作イメージ

4．今後の課題

試運用を通じたＰＭツールのブラッシュアップと共に、プロジェクト計画立案を支援するためのデータベース仕様の検討、PM 情報を用いた事業効率性計測手法の検討が今後の課題となっている。　　（山下、安原）

外部コストを組み入れた建設事業コストの低減技術の開発

１１．外部コストを組み入れた建設事業コストの低減技術の開発

研究期間：平成 10～14 年度
プロジェクトリーダー：建設マネジメント技術研究官
藤本　聡

1. 研究の背景：

建設コストの縮減は政府全体で取り組むべき重要な課題である。一方、建設活動による地球環境や生活環境への影響が問題視され、建設事業における適切な対応が喫緊の課題となっている。また、国民の建設事業に対するニーズが多様化するなか、合意形成に向けた取り組みも益々重要な課題となっている。このため、建設事業を国民の理解を得ながら進めていくに際しては、単に内部コストの縮減だけでなく外部コストを含めた総合的なコストの評価を行うことが重要である。しかし、建設事業における外部コストの実態は十分把握されておらずその評価手法も確立していない。

以上のことから、今後の建設事業の実施にあたっては、外部コストを適切に評価し、環境への影響等を低減させる技術などの普及により総合的に最適な工事･工法の選定を可能とするコスト縮減を推進して行くことが求められている。

2. 研究の目的：

①外部不経済の実態把握とそのコスト換算手法の開発
②総合的な建設事業コストの評価手法の開発
③外部コストを低減する新技術の開発
④新技術を有効活用するシステムの提案

3. これまでの研究成果：

①外部不経済の実態把握とそのコスト換算手法の開発

建設事業における外部コスト項目の整理、重点的外部コストの選定、外部コストの評価に適用する計測手法の適合性評価を行った。その結果、コンジョイント分析等のマーケティング手法が、外部コストの計測手法として適用可能であることを確認した。

②総合的な建設事業コストの評価手法の開発

外部コストの内部化調査、道路事業コストの算出、トンネル工事の外部コスト試算、維持修繕工事の外部コスト試算を行った。その結果、外部コストの内部化調査では内部化事例に基づき内部化手法を体系的に明らかにした。道路事業コストの算出では、事業の遅延による機会損失が非常に大きなウェートを占めていること、合意形成コストの定量化の指標には、地元議会の審議状況を用いることが可能であること等が明らかとなった。トンネル工事の外部コスト試算では、都市トンネル施工時の外部コストとして地上部の交通規制に伴う渋滞の影響が最も大きいことが明らかとなった。維持修繕工事の外部コスト試算では、外部コストとして交通渋滞の影響が大きく、これを低減するためには工事形態や規制形態の改善が有効であることが明らかとなった。

③外部コストを低減する新技術の開発

建設発生木材、コンクリート用骨材、環境にやさしい塗料について調査・検討を行った。その結果、建設発生木材の調査では活用マニュアル作成のための標準的な副産物のリサイクルフロー（案）を作成した。コ

ンクリート用骨材の調査では、粗骨材の実積率がコンクリートの単位水量に与える影響が大きいことなどが明らかとなった。環境にやさしい塗料の耐久性調査では、新設用塗装系（内面用塗装系を除く）は、曝露5年経過した時点でほぼ現行のC塗装系と同程度の耐食性が確認された。

④新技術を有効活用するシステムの提案

民間技術活用の入札契約手法の提案、新技術の評価・活用に係る実態調査を行った。その結果、民間技術活用の入札契約手法の提案では、詳細設計付き入札時VE、契約後VE方式について共通仕様書を作成し、入札契約方式を開発した。新技術の評価・活用に係る実態調査では、新技術活用後評価のフィードバックが十分機能していないことが明らかとなった。

－外部コストを組み入れた建設事業コストの低減技術の開発－

個別研究課題目次

11.1　外部コストの概念整理、計測、評価手法の開発……（環境計画研究室）…388

11.2　内部コストの実態把握、外部コストの内部化手法調査……（建設システム課）…390

11.3　道路事業における外部コストの実態把握、評価手法の開発……（道路研究室）…392

11.4　維持補修事業における外部コストの実態把握、評価手法の開発……（施工研究室）…396

11.5　トンネル施工法における外部コストの実態把握、評価手法の開発……（トンネル研究室）…402

11.6　建設汚泥、建設発生木材等リサイクル促進技術の開発……（施工研究室）…404

11.7　低品質骨材・再生骨材の利用用途拡大技術の開発……（コンクリート研究室）…406

11.8　環境にやさしい塗料技術の開発……（化学研究室）…408

11.9　民間技術活用の入札契約手法の提案に関する調査……（建設ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ技術研究室）…410

11.10　建設技術情報流通システムの構築に関する調査……（建設ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ技術研究室）…412

11.1　外部コストの概念整理、計測、評価手法の開発

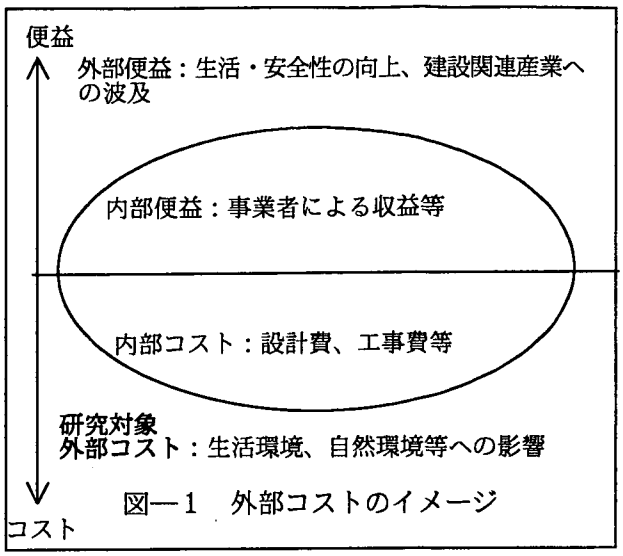
研究期間：平 10～平 12

担当：環境計画研究室

【要旨】

本研究は、環境や機会費用のようにこれまでコストとして算入されていなかった社会的な費用（外部コスト）についてそれらの影響度や頻度等さまざまな観点から体系的に整理するとともに、当該コストを明示的に算出する手法の開発を目指すものである。

平成１１年度は、外部コストの計測手法について、従来から提案されている手法に加えて、マーケティング手法等を外部コストの計測に適用する上での問題点を整理した。その結果、コンジョイント分析等のマーケティング手法は、外部コストの計測手法として適用の可能性が認められた。また、一般に外部コストの貨幣換算化が分析的でないもの、過度に費用が掛かるものとならないよう適切なの手法の組み合わせ等を検討していく必要が明らかになった。



図―１　外部コストのイメージ

１．研究目的

本研究の目的は、建設事業に適用する観点から外部コストの項目を体系的に整理する。また、外部コストの項目は広範囲に渡ることが考えられることから、従来から提案されている非市場財の計測手法以外にも着目し、外部コストの計測する上で、手法ごとの問題点を整理する。

２．研究方法

１）外部コストの項目整理

外部コストの項目は、ライフサイクル、事業分野、質の区分の３つの観点から整理を行った。

ライフサイクル：①計画設計、②材料・機械製造、③施工、④維持管理・供用、⑤解体廃棄、⑥副産物の処理処分の６段階とした。

事業分野：全事業共通、河川・海岸・砂防、道路、公園緑地、下水道、建築の６種類とした。

質の区分：外部コスト項目は環境質の変化に関するものが多い。このことから、区分については、環境と環境以外とする。細区分として環境を、環境影響評価法に基づく、大気汚染、騒音等の 16 区分とし、環境以外を外部コストの帰着先となる個人、集団、経済の３区分とする。

２）外部コストの計測手法の整理

外部コストの計測手法について、貨幣換算化の可能性、要因別・事象別・主体別の把握の可能性の観点から整理する。整理する手法は、幅広く外部コストを定量的に捉えるために、従来から提案されている非市場財の計測手法以外にも、価値判断を伴うという共通事項があることから、計量心理学やマーケティング手法が、外部コストを計測する適用性について検討する。

３．研究結果

１）建設分野で扱う外部コストの概念整理

外部コストの定義は、外部コスト＝事業に係る社会的コスト－内部コストとした。

外部と内部の判断基準は、経済学的には（その影響が）市場を経由したものか否かがである。しかし、本研究で

は、事業コストとして顕在化しているかどうかが重要なポイントであるため、事業主体が負担しているか否かを判断基準とする。

本研究で対象とした建設分野の外部コストの傾向は、ライフサイクル、事業分野、区分の各観点毎に以下の点が挙げられる。

① ライフサイクル

ライフサイクルからみた建設コストは、表－1に示すとおりである。外部コストの項目数としては、維持管理・供用段階が最も多くなっており、施工段階がそれに続いている。

計画設計段階、材料・機械製造段階では外部コストは、特定の事業分野あるいは特定の区分に限定されているのに対し、施工段階、維持管理供用段階では複数の事業分野、区分に幅広く分布している。

表－1　ライフサイクルからみた建設コスト

ｺｽﾄ	計画設計	材料・機械製造	施工	維持管理・供用	解体廃棄	副産物処理処分
外部	合意形成	工場の環境汚染	施工現場の環境汚染	補修工事現場の環境汚染 供用の環境汚染	解体工事現場の環境汚染	処理場の環境汚染 処分場の環境汚染
内部	計画費 設計費	原料採掘費 材料製造費 機械製造費	直接工事費 間接工事費 一般管理費	人件費 水光熱費 清掃費 剪定等費用 補修等工事費	直接工事費 間接工事費 一般管理費	処理費 処分費

②事業分野

各事業分野別に発生する外部コストは、ライフサイクルの段階ごとに、外部コスト項目への偏り度合いが顕著に異なっている。

材料・機械製造段階、施工段階では、ほとんど全事業共通となっている。

計画設計段階、維持管理・供用段階では、多くの事業分野に分散している。

解体廃棄段階では、解体廃棄工事の対象となるダム、橋梁が含まれる事業分野のみとなっている。

③質の区分

計画設計段階を除いて、全般的に環境関連の外部コストが多くなっている。外部コストの発生場所は、工場周辺、施工現場周辺、補修工事現場周辺、道路交通周辺、解体工事現場周辺となっている。計画設計段階では、この段階で事業全体が大きな影響を受ける「合意形成」に関連する項目がある。

2）外部コストの計測手法の整理

外部コストの計測手法を整理した結果は、表－2に示すとおりである。それぞれの手法に長所・短所がある。たとえば、CVMの場合、評価する対象を包括的なものにした場合、評価が一体的なものとなり、詳細項目に分割することは出来ず、一方、多くの項目を詳細に調査しようとすれば調査の実施に大きな費用が掛かることになる。このため、評価項目に適合した手法を選定すること及び外部コストの原単位を予め設定しておくことが望ましい。

表－2　外部コストの計測手法の特徴

計測手法	貨幣換算化の可能性	要因別・事象別、主体別把握の可能性			備考
		一括	要因別・事象別	主体別	
AHP	△	○	○	○	単独では貨幣換算不可能
HPM	○	○	△	×	パラメーターによって要因別把握が可能
CVM	○	○	△	○	理論的には全て貨幣換算可能であるが手法が完全に確立していない
グレード評点法	×	○	△	△	単独では貨幣換算不可能
コンジョイント分析	○	○	○	○	理論的には全て貨幣換算可能であるが手法が完全に確立していない
家計生産関数法	○	×	△	○	計測対象ごとに計測シナリオが必要
産業連関分析	○	×	△	△	発生CO_2の算定

○：本来的に可能、△：可能性あり、×：不可能

（安田、並河）

11.2　内部コストの実態把握、外部コストの内部化手法調査

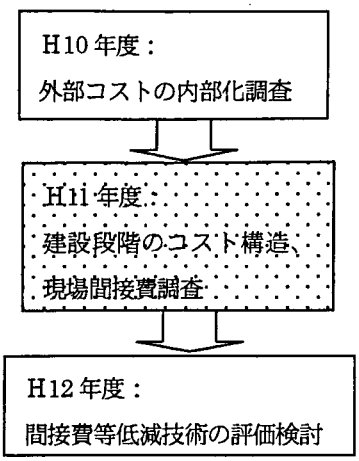
研究期間：平 10～平 12
担当：建設システム課

【要旨】

公共事業に対する社会的な要請の多様化から、建設活動が地球環境や生活環境に与える影響を考慮した総合的な建設事業コストの低減が求められている。これを踏まえ、土木研究所では重点研究プロジェクト「外部コストを組み入れた建設事業コストの低減技術の開発」に取り組んでいる。

本研究は、この一環として総合的な建設事業コストの評価に必要な現段階での建設コスト（内部コスト）を把握し、その間接費等の低減技術の評価について検討を行うものである。

平成 11 年度は、建設コストのなかで特に大きなウエイトを占める施工段階のコスト構造について明確にするとともに、そのうちの現場間接費など諸経費における外部コストの内部化状況について調査・整理を行った。



図－1　研究フロー

1.研究目的

建設事業は複雑多枝な要素から構成されており、それぞれの条件に即した一品生産方式であるため、そのコスト構造を統計的・定量的に把握することが難しい。施工段階コストの明確化を目的として、直轄工事の積算データと諸経費調査データ等を用いてコスト分析を行うとともに、かつて外部コストであったものが内部化した部分や実際の現場で外部コスト要素を内部化して対応している部分といった間接費の不明確な範囲について、内部コストの構成と外部コスト要素の関連から明確にする。

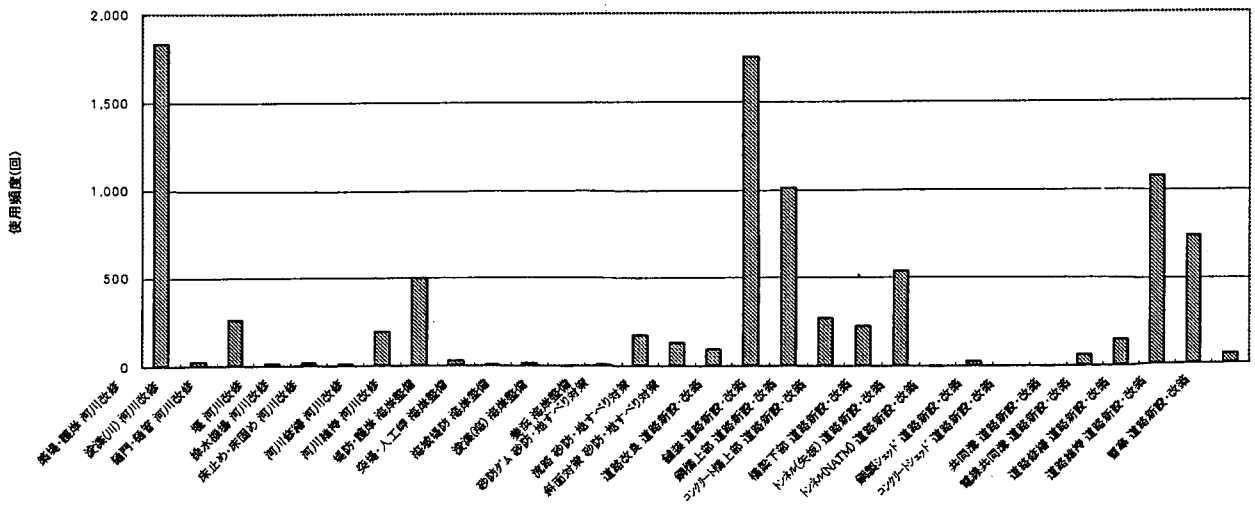
2.研究方法

2.1 施工コストの明確化

平成 10 年度の直轄工事について、積算実績ＤＢデータと間接費等諸経費動向調査データを用いて、積算使用頻度、工事費構成（直接工事費・間接工事費）等の分析を行った。

2.2 現場間接費等調査

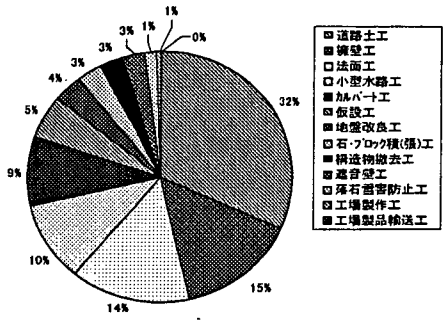
間接工事費等について、直轄工事の諸経費の実態傾向と積算基準の改定内容により外部コスト要素と内部化コストとの関係について整理を行った。



図－2　平成 10 年度工事区分（レベル 1）積算使用頻度

表－1　道路改良工事の価格構成

		構成比(%)
直接工事費		62.8
共通仮設費		11.2
	安全費	4.4
	営繕費	2.4
	技術管理費	1.3
	準備費	1.3
	運搬費	1.3
	役務費	0.3
	事業損失防止施設費その他	0.2
現場管理費		19.4
	従業員給料手当	10.0
	法定福利費	4.1
	労務管理費	0.7
	保険料	0.5
	通信交通費	0.5
	その他	3.6
一般管理費等		6.0



図－3　道路改良のレベル2シェア

表－2　H10工事区分別工事費構成

工事区分	構成比(%)
築堤・護岸	18.4
道路改良	17.6
橋梁下部	10.4
道路修繕	8.0
舗装	7.3
共同溝	5.7
鋼橋上部	5.7
コンクリート橋上部	3.9
道路維持	3.6
樋門・樋管	3.3
トンネル(NATM)	3.1
砂防ダム	2.2
その他	10.8
合計	100

3.研究結果

3.1施工コストの明確化

平成10年度の建設省直轄事務所における工事内容は、工事工種体系のレベル1（工事区分）ごとの使用頻度でみると、河川改修の築堤・護岸工事と道路改良工事が特に多く（図－2）、直接工事費割合は両者で36%（表－2）となり最も一般的な工事と言える。

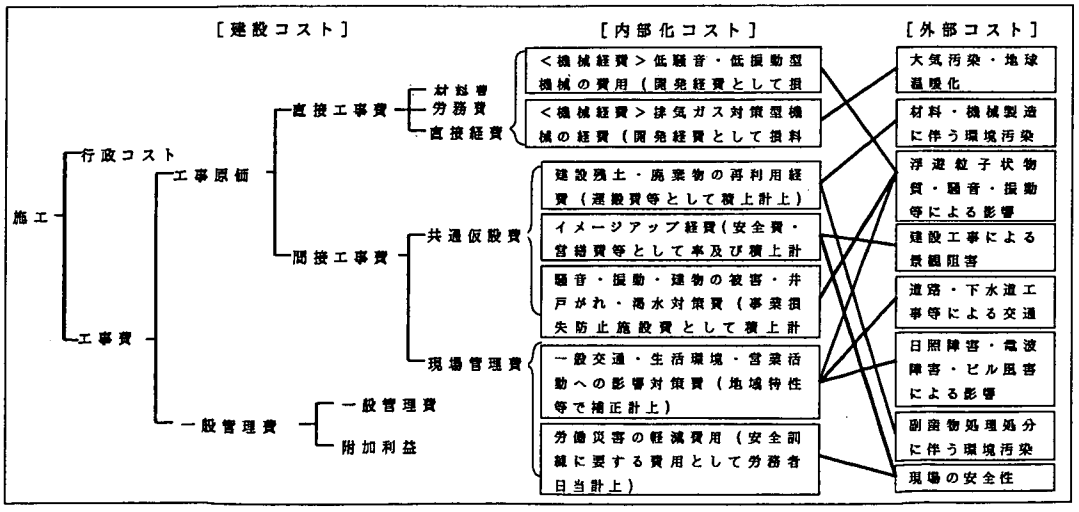
道路改良工事について、さらに階層的にレベル2（工種）頻度でみると、道路土工が最も多く、法面工、擁壁工、小型水路工、カルバート工を合わせた5工種で全体の8割を占めた（図－3）。

全工事の工事費構成比率の平均値は、直接工事費が約6割、共通仮設費がほぼ1割、現場管理費が2割弱であり、平均値を基準とするとほとんどの工事区分で平均値に近い値となっている。道路改良工事の例を表－1に示す。

3.2現場間接費等調査

直接工事費では、大気汚染・地球温暖化・騒音・振動などの対応として対策機械の開発利用費用が機械経費に内部化している。間接工事費のうち、共通仮設費では副産物に係る影響や現場環境（安全・営繕等）周辺環境（騒音・振動・建物被害等）に係る影響などへの対応費用が内部化しており、現場管理費では周辺環境（交通・生活等）に係る影響や現場環境（安全）などに対応する費用が内部化している（図－5）。

諸経費動向調査の分析では、道路維持工事、河川維持工事及びトンネル工事において現場管理費の占める割合が高い。この特徴は、現場管理費と内部化動向の関係から実際の工事において工事地域特性（都市部・地方部）や作業時間帯（昼間・夜間）による格差が要因と考えられる。このことは、現場管理費で対応している周辺環境や現場環境への対策費が増大していることによると言える。



図－5　建設コストと内部化の関連

（松井健一、福田至、河上誠）

11.3　道路事業における外部コストの実態把握、評価手法の開発

研究期間：平10～平12

担当：道路研究室

【要旨】

道路事業の予算管理は各年度独立して発注することを基本に行われる。発注した直接工事費以外のデータは存在するもののそれを活用するには至っていない。また、道路事業全体コストの最適化を図るという観点からの分析も充分にはなされてはこなかった。

このため、本研究では、道路プロジェクト全体について、工事着手から完了までの期間を対象に工事費以外の項目のコスト構造を分析することを目的としている。

平成10年度は市街地とICを結ぶ道路プロジェクトについて事業着手から完了までのコスト把握、行政コストの分析、事業の早期完了のために要した経費の試算を行った。

平成11年度は、都市計画変更手続きについてケーススタディを行い、道路プロジェクト実施にあたって市民、行政等が合意形成に要する費用を算出することを試みた。この結果、合意形成コストについては行政コストよりは地元議会の審議状況の方が指標としては好ましいこと等が判明した。

1. 背景と目的

現在、政府で行われているコスト縮減の取り組みは、発注契約過程を通じた価格管理を中心として行われている。道路事業全体のコストを縮減することが今後の課題として存在している。

従来から、事業全体の費用について分析を行う必要は認識されていたが、実際に行われた例はあまりなかった。本研究は、今後の公共事業の効率的実施を行うにあたり、合意形成も含めた事業全体の費用について、コストを算出するための研究を行うものである。

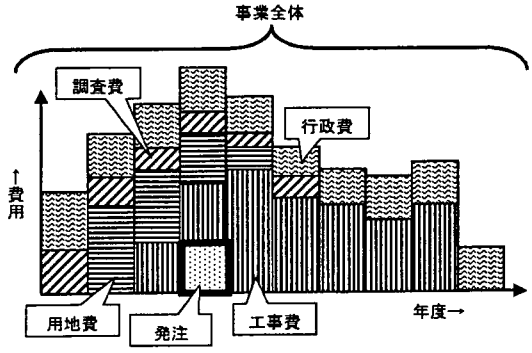


図 1　事業全体のコスト

2. 調査の概要

昨年度は、行政経費を含む道路事業の開始から完了までのコスト算出のためのケーススタディを行った。この結果、以下のことが判明した。

① 発注実績、打ち合わせ記録等を基にして行政コストを含む道路事業全体の費用把握が可能である。

② 用地交渉、環境アセスメントなどの事業過程において合意形成のための関係者の負担が非常に大きいため、行政コストだけでなく住民側の負担も含めた合意形成コストの把握を今後の課題とすべきである。

③ 事業全体の費用を考える場合に、支払った経費だけでなく事業が遅延することによる機会

損失は非常に大きな要因である。

こうした結果を踏まえ、本年度は、行政コスト以外の様々な合意形成のために要した負担を算出しようとすることを目的として研究を行った。本年度は合意形成の中でも、公開性等の観点から、比較的入手しやすい都市計画決定変更手続きをケーススタディの対象とした。

3. 研究の概要

（1） 各種合意形成

合意形成過程を市民、議会、行政に着目して例示すると次のようになる。

① 市民と議会
- 請願等：市民が行政に対して議員を介して行う陳情・意見書の提出・署名・請願等。
- 投票：議会選挙時の公約と投票

② 市民と行政
- 広報・説明会：事業実施にあたっての広報誌の作成や、地元説明会
- 意識調査
- 意見書等：市民が国、行政に対して直接行う陳情・意見書の提出・署名・請願等。
- 投票：首長選挙の公約と投票

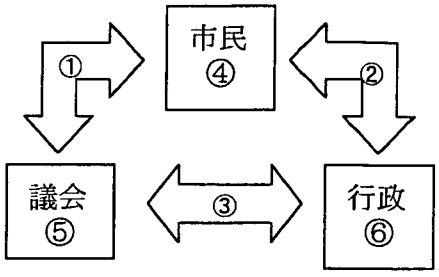


図 2 様々な合意形成

③ 議会と行政
- 一般質問：議会における議論で、各種請願審議も含まれる。
- 特別委員会：特別委員会で行われる審議。

④ 市民間
- ビラなどの配布
- 反対集会の開催

⑤ 議会内
- 議会内における審議

⑥ 行政間
- 市町村・都道府県・国間の協議：国と地方自治体、又は自治体相互間の意見調整
- 異なる部局間の協議：政府部内、地方自治体内の部局間調整

（2） 指標化にあたっての検討項目

本研究では、以上の関係につき、当面客観的データに基づく定量化を行いやすいものはどれであるかにつき以下の観点から検討を行った。

① 公表が前提

一般に実際の事業をケーススタディの対象とする場合、調査を行っても結果を公表できないことが多い。道路事業のコストについては、今後ば行政内部だけでなく幅広く議論してもらう必要性もあるため、公開し得るデータでなければならないと考えられる。このため、データは可能な限り公的に公開されているデータを用いることとした。

② 長期間のデータが継続的に存在している

合意形成が問題となるような事業の場合、一般的に事業が長期化することが多く、合意形

成が 10 年以上に及ぶこともまれではない。このため、データが長期的に継続していることが必要になる。

③ 関係者との接触なしにデータ収集が可能である

合意形成コストが問題となる事業の場合、一般的に地元との交渉等において微妙な関係にあることが多い。仮に合意形成そのものは終了していても関係者の間にわだかまりが残っていることも侭ある。こうした事業の場合には、関係者と直接接触するなどして、不用意に事業の進捗を遅らせてはならない。このため、データは関係者との接触なしに収集可能であることが好ましい。

以上の観点から検討を行った結果、議会における議事録を基にして、「③議会と行政」の合意形成について定量的な評価を行うことが可能なのでないかとの結論に達した。

（３）議会と合意形成の関係

調査は、幹線道路の整備について、道路事業が開始された時期から、計画変更を行った時期までの議会に議事録から、関連する発言を抽出し、その発言者、発言回数、発言内容等につき調べた。年度毎の議会における発言は基本的に議員と行政の間のやり取りであり、延べ発言人数は図３、延べ発言回数は図４のようになった。

対象となった道路事業は、１年目に最初の都市計画決定が行われ、最後の年に都市計画変更が行われた。序盤は、最初の都市計画案をめぐって紛糾し、終盤は都市計画変更案をめぐって喧喧諤諤の議論が行われた。図３、図４ともに議論が活発になっている様子を定量的に表現できている。議会における審議状況は、③議会と行政、⑤議会内の合意形成コストを直接示すものであるが、議会が間接的に市民の声を反映すべき性格をもつことを考えれば、市民･議会･行政の合意形成コストをあらわす指標とも考えることができる。

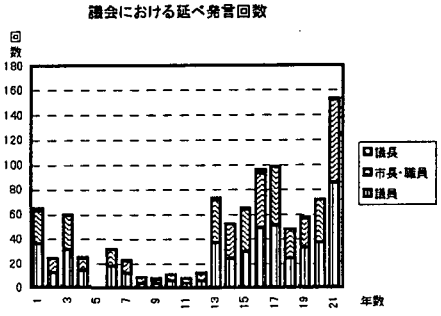


図 3　議会における発言回数図

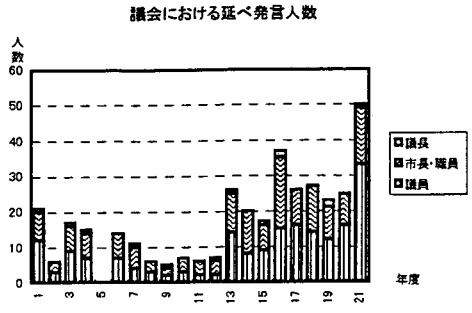


図 4　議会における発言人数

（４） 総合指標の試み

（３）では議会における審議をもとに議会を中心とした合意形成に着目して調査を行った。ここでは、更に、陳情、請願、意見書等とその内容の検討を行っていくことで、（１）で述べた様々な合意形成コストを合計して市民・行政・議会の合意形成コストを総合指標化することも試みた（図５）。住民、地元自治体が事業に反対していた時期を第Ⅰ期、地元自治体が事業支持となった時期を第II期として、試算を行ってみた（図６）。当初の都市計画案に対する市民の反対運動、都市計画変更全の議論活発化などが表現できている。

本ケーススタディの場合、多くのデータが幸いにも保存されており、試算が可能であったが、通常の場合、反対側の署名・広報等は十分に保管されていないことが多い。またこれらの多くは、非公式のデータであり、（２）で述べた観点からは、問題のある指標を多く含んでいる。

区分			項目	推計方法
行政	広報公聴	広報・説明会 反対陳情ニュース	広報数 発行部数 単価 コスト	「広報いちかわ」、「あどりの道」発行件数、「市理事会ニュース」発行件数 想定（世帯数を考慮して想定：10万部） 想定（1部10円） 発行部数×単価
		陳情書	コスト	想定（200万円～300万円）
		市民意識調査	コスト	サンプル数×単価（1000円/サンプルとして想定）
	議会対策等	一般質問	議員質問数 対応準備 コスト	実績 想定（0.5人日/質問） 議員質問数×1質問あたり対応準備人日×準備に係る人件費（800万円/年（2.2万円/人日）と想定）/365
		特別委員会	開催回数 委員 自治体 会議参加時間 準備時間 延べ人員 コスト	実績 特別委員会設置時のメンバー数（9～11） 想定（5） 想定（会議の時間は、2時間/回） 想定（5人日/回） 会議参加時間＋準備時間（人日/回） 延べ人員×人件費（800万円/年（2.2万円/人日））/365
		国・県への要請	要望件数 準備 コスト	実績 想定（3人日/件） 要望件数×1件あたり準備人日×準備に係る人件費（800万円/年（2.2万円/人日））/365
住民等	反対運動	ビラなどの作成		－
		反対集会		－
		署名	署名数 延べ時間 コスト	実績 3分/件と想定 署名数×延べ時間×「自由時間の金銭価値（313円/人・時間）」
	陳情請願	陳情・請願	新規陳情・請願数 準備 コスト	実績 10人日/件と想定（1日7.5時間の拘束と仮定） 新規陳情・請願件数×1件あたり準備人日×「自由時間の金銭価値（313/人・時間）」

図 ５ 総合指標化の試み

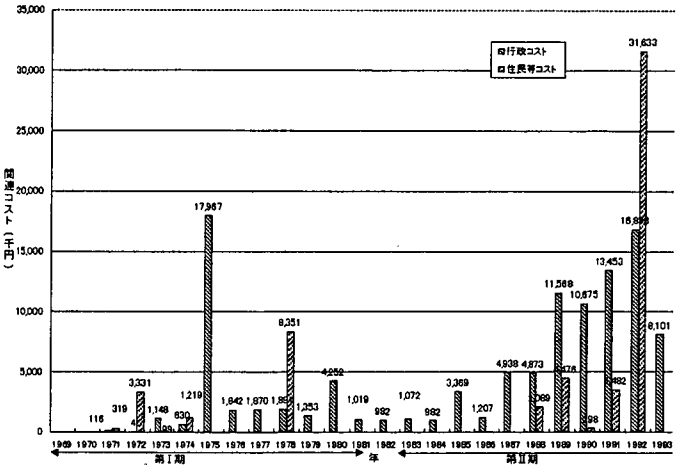


図 ６ 試算結果

4. 考察及び今後の課題

合意形成に要する労力をコスト化することは非常に困難であると考えられるが、本研究では、合意形成過程を市民、議会、行政の三者に着目して、最終的にはコスト化を行うことを目標としてケーススタディを実施した。その結果、公開資料である議会における議事録から、議会と行政間の合意形成の定量化を行える可能性が高いことが判明し、今後研究を進めることで何らかの形で合意形成コストを定量化できる可能性があることがわかった。

議会の審議以外の指標を用いた合意形成コストの総合指標化の試みも行ったが、実用化には課題が多いことが判明した。

（濱田、曽根、田中）

11.4　維持補修事業における外部コストの実態把握、評価手法の開発

研究期間：平１０～平１４
担当：施工研究室

【要旨】
10年度の調査によって、維持･補修工事における工事費の割合が大きいものは、舗装工事のオーバーレイと表面処理、橋梁補修工事の床版補修と橋台補修であることがわかっている。これを受けて11年度は、実際の舗装補修工事を対象として、工事に伴う外部コスト要因を整理したうえで、騒音や交通量･走行速度を計測し、計測値を既に定量化されている評価手法によりコスト化した。この結果、舗装補修工事の工事費と比較して、外部コストは著しく小さい値であった。そこでケーススタディとして、規制方法、工事方法および交通量を変化させた場合の工事費および外部コストを試算し、各ケースについてトータルコストで評価した。

１．外部コスト計測項目の選出

維持・補修作業に伴う外部コスト項目の中には、地域住民に対する影響や道路利用者に対する影響等さまざまな要因が含まれており、これらの項目を貨幣換算することの是非を検討した。また、貨幣換算化しようとする外部コストについて、発生事象の物理量を定量的に捉えることができるのか、技術的に算出可能かを整理した。

整理された外部コストのうち、貨幣換算化することが適当であり、物理量としての計測が可能で、発生頻度とその規模（現状および将来）が大きい項目について、定量化されている手法を用いて外部コストの貨幣換算を行った。また、外部コストの負担者とその範囲を考慮し、外部コストの総額を試算した。

維持・補修作業に伴う外部コストのうち、計測可能でかつ金銭表現が可能な項目として、次の事項を評価対象とした。

- 走行時間損失
- 走行費用増大
- 騒音影響

なお、交通事故、大気汚染、地球温暖化等は対象とする工事が短期間なので、全体に与える影響は少ないと考え評価対象からは除外した。

２．現場計測

実際の舗装工事における外部コストを算出するために、交通量、走行速度、騒音について現場で計測した。

２．１　計測概要

工事箇所　：一般国道15号東京都大田区東六郷地先
対象区間　：工事規制の影響が考えられる区間
規制時間　：平日の20時～翌6時
計測期間　：工事規制時間帯を含む24時間
計測項目　：交通量、走行速度および騒音

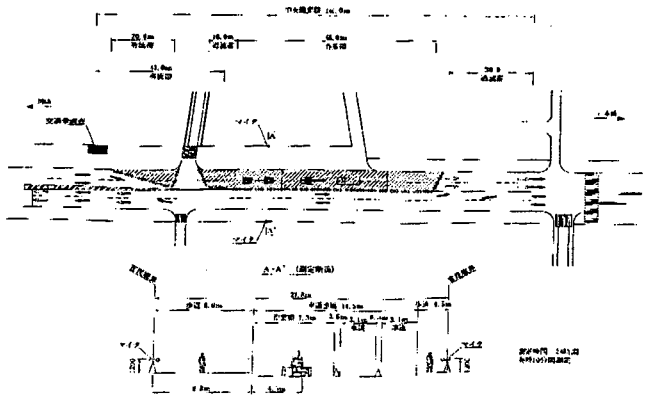


図-1　交通量騒音・測定計画

2．2　交通量調査

交通量調査は、一般国道15号の六郷橋北詰と東六郷三丁目間の時間帯別断面交通量を対象区間交通量とし、上下線別、4車種別で15分ごとの集計により24時間実施した。

その結果，時間当たりの最大交通量は、下りで約1,050台、上りで約950台（ともに15時～16時）であり、一般的な1車線の交通容量（1,500～1,800台/時）と比較すると、小さい交通量である。また、1日（24時間）の分布は、昼間（7時～19時）で比較的均一な交通量となっており、下りの交通量が上りより多く、他路線とは異なった傾向を示していた（図-2）。

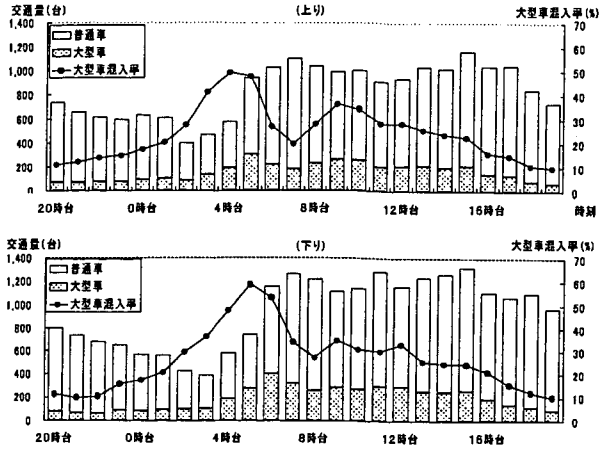


図-2　交通量調査結果

2．3　走行速度調査

走行速度調査は、工事区間（六郷橋北詰と東六郷三丁目間）とその前後区間で、1時間に2回実車を走行させて24時間実施した。なお、信号での停車時間は走行時間から除いた。その結果、上りで工事時間帯での走行速度が低下している傾向にある。これは、今回の調査区間では上り車線を交通規制しているため、車線変更などの影響で走行速度が低下していると考えられる。

また、下りでは速度低下は見られない。なお、今回の調査では、上り下りとも交通規制による渋滞は認められなかった（図-3）。

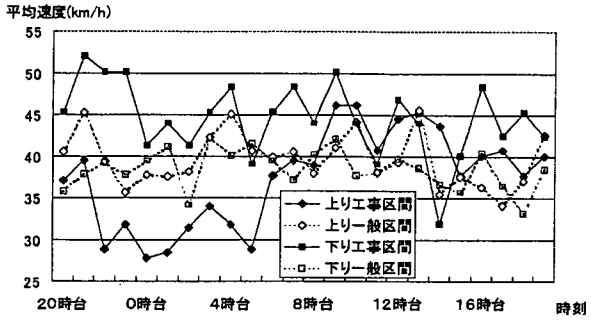


図-3　走行速度調査結果

2．4　騒音調査

騒音調査は、工事による音源付近と工事による影響を受けないと考えられる箇所の道路両側で、1時間毎に10分の測定で24時間実施した。その結果、上り下りとも工事の初期段階（21時台）で騒音レベルが大きく表れている。

これは、工事の初期段階で既設舗装撤去の際に発生するブレーカの機械音および舗装掘削の破壊音によるものと考えられる。このような騒音は時間帯によって断続的に発生し、近隣住民に悪影響を与えていると考えられる。

また、車線規制した上りでは引き続き翌1時台まで騒音レベルは大きい傾向を示しており、上りで工事を実施した影響が表れている（図-4）。

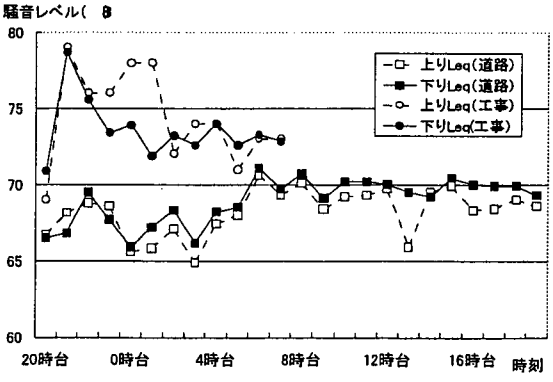


図-4　騒音調査結果

3．実測からの外部コスト算出方法と結果

3．1　外部コスト算出方法

外部コスト計測手法の算出式は、道路投資の評価に関する指針（案）（以降、指針（案））に準じた。

（１）走行時間損失

平常時と交通規制時の総走行時間費用の差から走行時間損失に関する外部コストを算出した。

総走行時間費用は車種別交通量、走行時間および車種別時間価値原単位によってコスト化した。

(総走行時間費用)＝(交通量)×(走行時間)×(時間価値原単位)･･･(式１)

（２）走行費用増大

平常時と交通規制時の総走行費用の差から走行費用増大に関する外部コストを算出した。

総走行費用は車種別交通量、区間延長および車種別走行費用原単位によってコスト化した。

(総走行費用)＝(交通量)×(区間延長)×(走行費用原単位)･･･(式２)

（３）騒音影響

平常時と交通規制時の騒音影響貨幣評価値の差から騒音に関する外部コストを算出した。

騒音影響貨幣評価値は騒音の影響度合い、区間延長および騒音貨幣評価原単位によってコスト化した。

(騒音影響貨幣評価値)＝(騒音影響程度)×(区間延長)×(騒音貨幣評価原単位)･･･(式３)

３．２　外部コスト算出結果

（１）走行時間損失に関する外部コスト

今回の調査では交通規制による渋滞は認められず、走行時間損失に関する外部コストは発生しない結果となった。そこで、今回の舗装工事に伴う規制下で実際の交通量を割増した場合について、外部コストの発生状態をシミュレーションしたが、上り下りとも実際の 1.3 倍の交通量が通過した状態でも，今回の舗装工事では渋滞が発生しないことが分かった。

（２）走行費用増大に関する外部コスト

走行費用増大に関する 1 日当りの外部コストを表-1 に示す。今回の調査時には交通規制による渋滞は認められなかったため、走行費用に関する外部コストはわずかな値であった。

表-1　走行費用に関する外部コスト

		上り	下り	備考
外部コスト	工事規制時	606 円	35 円	20 時～翌 6 時の 10 時間
	最大時	131 円	—	5 時台　(速度低下 13.3km/h)
		—	69 円	14 時台 (速度低下 4.7km/h)

（３）騒音影響に関する外部コスト

騒音影響に関する 1 日当りの外部コストを表-2 に示す。この結果、外部コストは試算上小さな値であったが、騒音レベルは等価騒音レベル 55dB を大幅に上回っており、近隣住民に対してはかなり不快な騒音であったと考えられる。

しかし、騒音影響貨幣評価原単位で外部コストを試算すると 10 時間あたり数千円程度であった。

表-2　騒音影響に関する外部コスト

	上り		下り		備　考
	平常時	工事規制時	平常時	工事規制時	
環境影響程度 (dB (A))	67	75	68	74	等価騒音レベルの平均値
騒音影響貨幣評価値 (円/10 時間)	53,760	59,720	54,080	58,944	工事期間の値
外部コスト (円/10 時間)		5,960		4,864	

３．３　実工事費と外部コスト

今回の調査箇所は橋梁を越えた箇所で、比較的単路線に近く、前後にボトルネックがあり交通量が少なかった。そのため今回の工事では、図-5 に示すように、実工事費（内部コスト）に対する外部コストの割合が、著しく小さい結果となった。

しかし、今回の維持工事では舗装切削時の騒音が、一時的に環境基準値を満足しない状態が表れたこともあり、舗装工事に適した

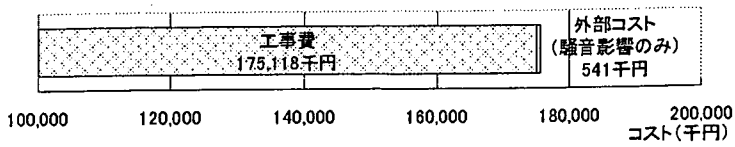


図-5　実工事費と外部コスト

貨幣評価原単位を検討することが望ましいことが分かった。

4．ケーススタディ

今回の調査箇所では渋滞の発生が認められず、外部コストも著しく小さかった。

そこで、ケーススタディとして表-3 に示す組 6 ケースについて、車道部舗装打換え工事における概算工事費と外部コストを算出し、交通量や工事形態に応じた損失の影響を分析した。

表-3　ケーススタディの検討ケース

ケース	工事形態	規制形態	交通量割増
1	夜間	夜間２車線	1.00・1.10・1.15・1.30
2	〃	夜間１車線	1.00・1.10・1.15・1.30
3	昼間	全日２車線	1.00・1.10・1.15・1.30
4	〃	全日１車線	1.00・1.10・1.15・1.30
5	全日	全日２車線	1.00・1.10・1.15・1.30
6	〃	全日１車線	1.00・1.10・1.15・1.30

なお、工事区間の合流部の基本交通容量は、「路上工事の交通運用検討資料」を参考にして 1,400pcu/h とした。

4．1　概算工事費（内部コスト）の算出

今回の調査対象とした舗装打換え工事の概算工事費（内部コスト）に基づき、表-3 に示す各検討ケースについて、車道部のみの舗装打換えの概算工事費（内部コスト）を試算した。ここで、舗装打換え工事には、歩道部舗装の打換え、排水溝の取り替えおよび乗入れ部の舗装打換えも含まれているが、、これらの影響による交通渋滞や騒音は、今回の計測結果とは異なると考えられるため、車道部のみの舗装打換えの概算工事費（内部コスト）を計上した。

表-4 に各ケースにおける概算工事費と規制期間の検討結果を示す。

表-4　概算工事費

ケース	工事形態	規制形態	工事費（千円）	規制期間（日）
1	夜間	夜間２車線	175,118	50
2	〃	夜間１車線	175,118	50
3	昼間	全日２車線	122,079	49
4	〃	全日１車線	122,857	51
5	全日	全日２車線	123,300	25
6	〃	全日１車線	124,078	26

4．2　外部コストの算出

前述した方法と同様に、走行時間損失、走行費用増大および騒音影響それぞれに関する交通量の割増に応じた 1 日当りの外部コストに、表-4 に示す規制期間を乗じることで、各検討ケースでの総外部コストを算出した。

4．3　ケーススタディの検討結果

図-6 に、交通量割増に応じた各ケースの検討結果を示す。図から、今回のケーススタディでは以下のことが確認できた。

- 今回の工事（夜間 2 車線規制･工事）では、渋滞が発生しない結果となった。外部コストは騒音影響のみで、内部コストに対する割合は 0.3%程度であった。
- 全日規制による昼間工事または全日工事の内部コストは、夜間規制･工事に対して 70%程度であった。
- 全日 2 車線規制では、交通量の割増が増えることによって、走行時間損失による影響が非常に大である。
- 全日 2 車線規制による昼間工事での総コストは、交通量割増が 1.15 倍で夜間工事の場合と同程度になる。このとき、昼間工事の外部コストは内部コストの 40%程度である。
- 全日 1 車線規制では、交通量割増が 1.3 倍で渋滞が発生すると推測できる。また、走行時間損失や走行費用増大の外部コストは、全日 2 車線規制と同様に全日工事より昼間工事のほうが大きい。
- 全日 1 車線規制による昼間工事のトータルコストは、交通量割増が 1.30 倍で夜間工事と同程度となる。このときの外部コストは内部コストに対して 40%程度である。

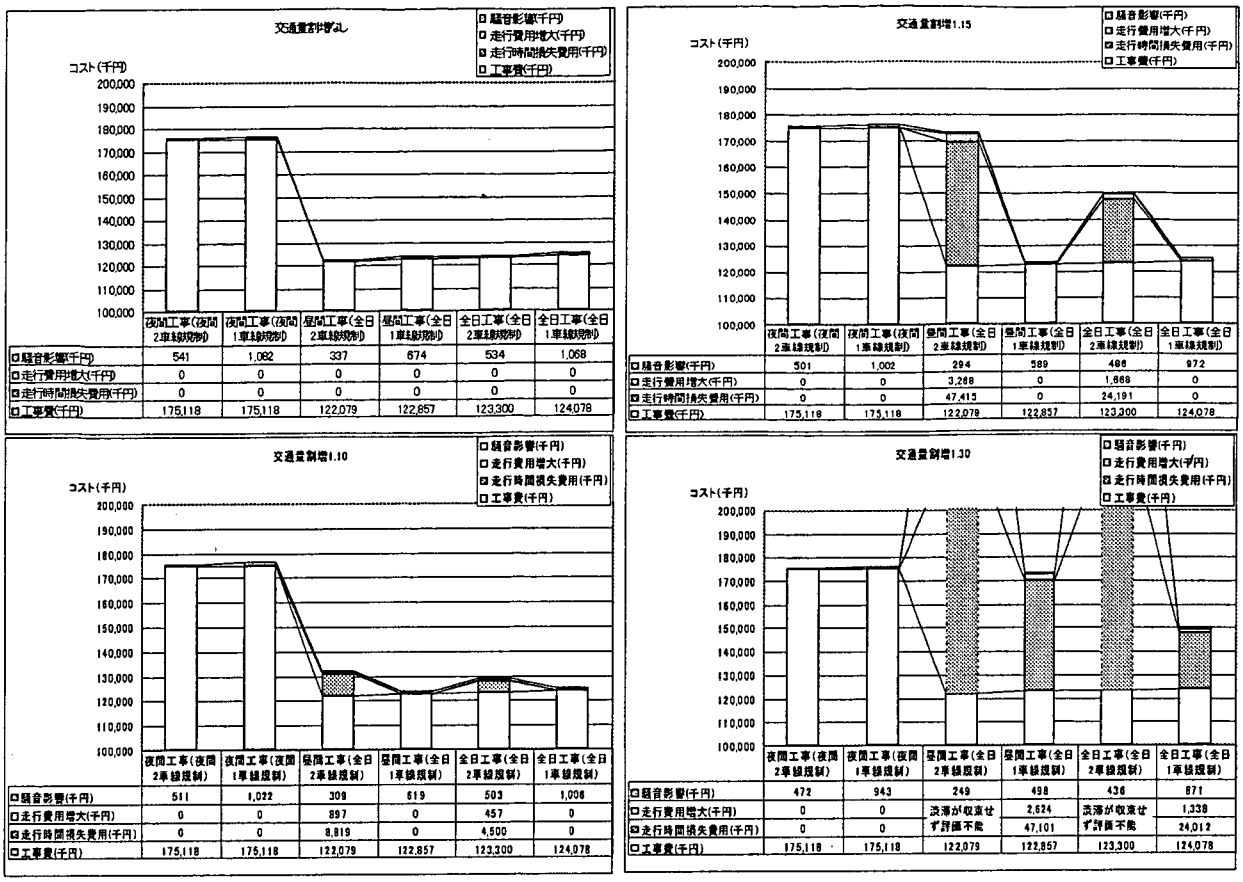


図-6 ケーススタディの検討結果

4．4 外部コストを検討する上での課題

舗装工事における外部コストは、渋滞による走行時間損失に関するウエイトが非常に大きく、交通量が多くなると、その傾向が特に卓越することが確認できた。

その一方で、渋滞による走行費用増大および騒音影響に関する外部コストは極めて小さく、交通量の影響等にもほとんど影響されないことが分かった。

したがって、外部コストの低減を行うためには、渋滞による走行時間損失に関する外部コスト、すなわち渋滞を少なくすることが最も有効な手段と考えられる。

渋滞を低減するためには、遅れ時間の低減と交通規制期間の低減が必要となる。ここではその 2 点に着目して検討した。

(1) 遅れ時間の低減

遅れ時間（渋滞）は、交通量と交通規制の形態とで関係づけられると考えられる。

つまり、遅れ時間を低減するためには、断面交通量を遅滞なく流せる車線の確保が重要である。

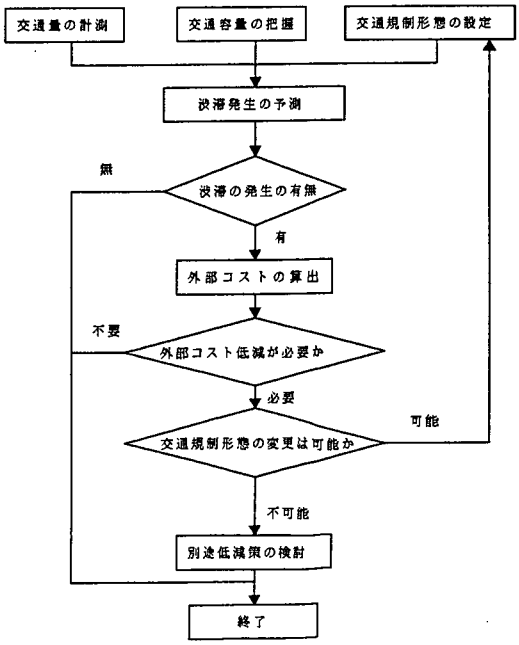


図-7 交通規制形態検定フロー

そのためには、図-7のような検討が必要となる。

ここで、実際の道路の交通容量を把握することは難しいと考えられるため、交通量と同様に現地計測を行うことが望ましいと考えられる。

また、交通規制形態についても、規制車線数、規制時間等について、現場条件によって最適な形状を検討することが必要である。そのためには、渋滞予測の精度を上げる必要があり、様々なケースを検証して基礎データを蓄積する必要がある。

（2）交通規制期間（工事期間）

渋滞が発生する場合は、交通規制期間を短くすることが外部コストを低減する大きな要因の一つであると考えられる。

舗装の施工では、アスファルト合材の品質向上や施工性に富んだアスファルトフィニッシャーなどの導入で施工性は向上しているものの、交通規制に関しては、道路車線数や地域性、周辺道路状況によって大きな違いがある。この限られた現場条件の中では、交通規制を抜本的な改善策がないのが現状であるが、各現場において最大限の対応できる規制形態を考慮する必要がある。

5．まとめと考察

今回の現場計測では、交通規制による渋滞は認められなかったため、渋滞による走行時間損失に関する外部コストは発生しない結果となった。そこで、当該工事規制で交通量を割増した場合について外部コストの発生状態を確認してみたところ、1.3倍の交通量が通過した状態でも，今回の舗装工事では渋滞が発生しない結果となった。

また、交通規制では若干の速度低下が認められたにも関わらず、渋滞発生には至らない程度であったため、走行費用増大に関する外部コストは、工事費と比較して極めて小さな値であった。

騒音の影響評価も、コスト化すると少額な値であった。しかし、騒音レベルは等価騒音レベル55dBを大幅に上回っており、近隣住民に対してかなり不快な騒音であったと考えられる。そのため、騒音レベルが高くなる場合については、原単位を見直す等の検討が必要である。

ケーススタディは、全日および夜間に1車線あるいは2車線交通規制した場合における、概算工事費（昼間、夜間）および外部コストを試算し、各ケースにおけるトータルコストを比較した。その結果、交通渋滞が発生した場合のトータルコストは、交通量が多くなる場合、工事形態（全日、昼間、夜間）や規制方法（1車線，2車線）の違いによる工事費より、渋滞損失によるコストが大きくなる可能性があることが確認できた。したがって、外部コストを含めたトータルコストを削減するためには、工事形態や規制方法の改善等によって、交通渋滞を抑えることがポイントになることが分かった。

都内の維持・補修工事はすべて夜間に作業が行われているのが現状である。しかしながら、今回の検討結果から、夜間規制で夜間作業を実施しない場合でも、交通渋滞が発生しない可能性があることが確認できた。

したがって、維持・補修工事にあたっては、事前に現場の交通量や交通容量および沿道状況等を把握し、交通渋滞発生の予測を行うことで、適当な工事時間帯や，交通規制形態を選定することが可能であると考えられる。

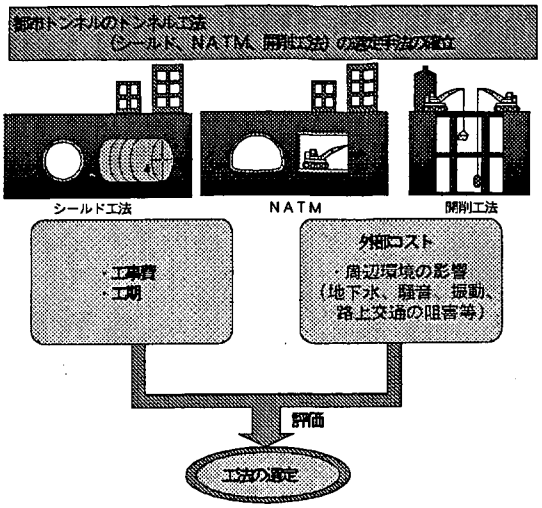
（大下，青山，橋本）

11.5　トンネル施工法における外部コストの実態把握、評価手法の開発

研究期間：平１１～１２
担当：トンネル研究室

【要旨】

本研究は、都市トンネルの建設工法（山岳工法、シールド工法、開削工法）の選定にあたり、これまでコストとして考慮していなかった地上部での交通規制、騒音等の周辺環境に与える様々な影響を「外部コスト」として評価し、外部コストを含めた評価方法を提案することを目的としている。平成１１年度は、都市トンネル施工時の外部コストを評価する上で必要となる情報（騒音・振動・交通規制による渋滞などの周辺環境へ影響）を収集し、外部コストの評価項目の抽出および実際に施工した工事での外部コストの試算を行った。その結果、都市トンネル施工に伴う外部コストとして地上部の交通規制に伴う渋滞が最も影響が大きいことが明らかとなった。

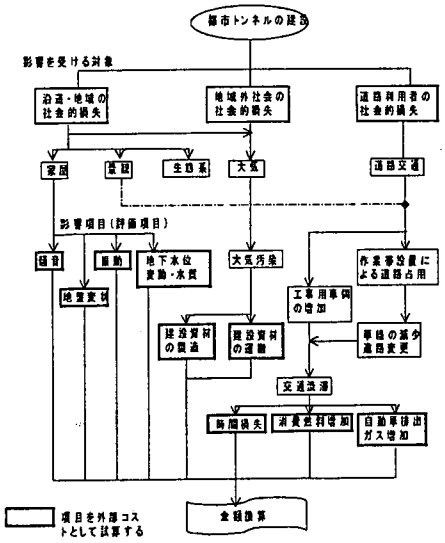


１.研究目的

本研究は、都市トンネルの建設工法（山岳工法（NATM)、シールド工法、開削工法）の選定にあたり、これまでコストとして考慮していなかった地上部での交通規制、騒音等の周辺環境に与える様々な影響を「外部コスト」として評価し、外部コストを含めた評価方法を提案することを目的としている。

２.研究方法

都市トンネル施工時の外部コストを評価する上で必要となる情報（騒音・振動・交通規制による渋滞などの周辺環境へ影響）を収集し、外部コストの評価項目の抽出を行うとともに、実際に施工した工事の外部コストの試算を行った。今回、実績調査および外部コストの試算を実施した対象トンネルは開削工法12件、シールド工法12件、山岳工法4件である。



図－１　都市トンネル施工時の外部コスト項目の抽出

３.研究結果

３.１　都市トンネル施工時の外部コスト評価項目の抽出

図－１に都市トンネル施工時に周辺環境へ影響を与える対象および影響項目を整理した。これより、影響を受ける対象としては、家屋・景観・生態系など

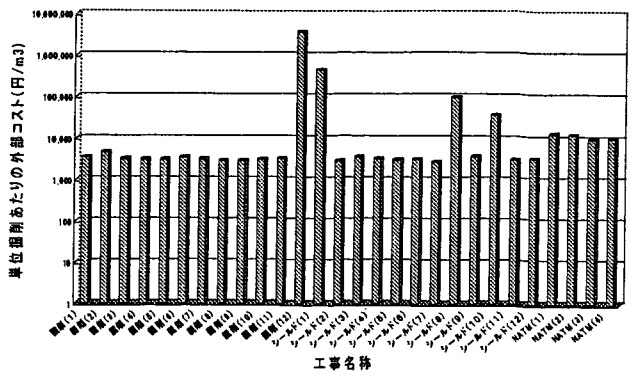
表－１　外部コスト試算方法

対象	項目内容			外部コスト試算の主な条件	試算根拠
沿道・地域	振動・地下水・地盤変状			補償費による	－
	騒音			2,400,000(円/dB／km／年)×工事増加騒音10dB×影響範囲×工事期間	道路投資の評価に関する指針(案)：日本総合研究所(平成10年)、騒音値はある特定の工事の調査結果を適用
地域外社会	大気汚染	建設資材の製造	二酸化炭素CO2	対象資材(ｺﾝｸﾘｰﾄ・鋼材)量×2300円/t	道路投資の評価に関する指針(案)：日本総合研究所(平成10年)
		建設資材の運搬	二酸化炭素CO2		
			窒素酸化物NOX	対象資材(ｺﾝｸﾘｰﾄ・鋼材)量×2920000円/t	同上
道路利用者	交通渋滞	時間損失		規制による速度減少(30km/h→20km/h)と渋滞長さによる損失時間×貨物評価原単位(乗用車58円/台・分、ﾊﾞｽ406円/台・分、普通貨物101円/台・分、小型貨物90円/台・分)×交通量	道路投資の評価に関する指針(案)：日本総合研究所(平成10年)、環境面から見た地下鉄建設工法の評価：トンネルと地下1999.11
		消費燃料増加		規制による速度減少(30km/h→20km/h)と渋滞長さによる燃料損失分(ｶﾞｿﾘﾝ価格100円/1ﾘｯﾄﾙで計算)×貨物評価原単位(乗用車17円/台・分、ﾊﾞｽ66円/台・分、普通貨物39円/台・分、小型貨物33円/台・分)×交通量	道路投資の評価に関する指針(案)：日本総合研究所(平成10年)、環境面から見た地下鉄建設工法の評価：トンネルと地下1999.11
		自動車排ガス増加	二酸化炭素CO2	対象資材(ｺﾝｸﾘｰﾄ・鋼材)量×2300円/t	道路投資の評価に関する指針(案)：日本総合研究所(平成10年)
			窒素酸化物NOX	対象資材(ｺﾝｸﾘｰﾄ・鋼材)量×2920000円/t	

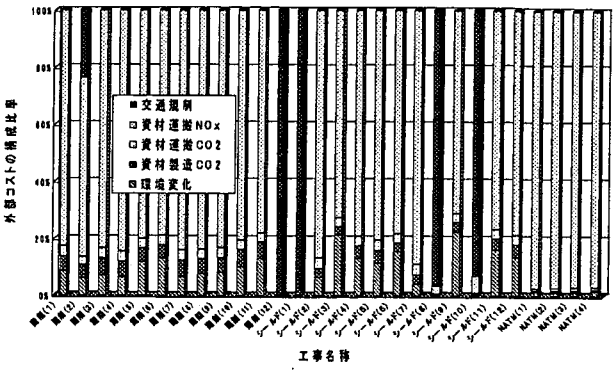
に対する沿道・地域の社会的損失、大気に対する地域外社会損失、道路交通に対する道路利用者の社会的損失の３つが考えられる。これらに対する社会的損失の項目は図中に示す項目が考えられるが、外部コスト算出に用いる項目としては、太線で囲んだ項目となるものと考えられる。

３．２ 都市トンネル施工時の外部コストの試算

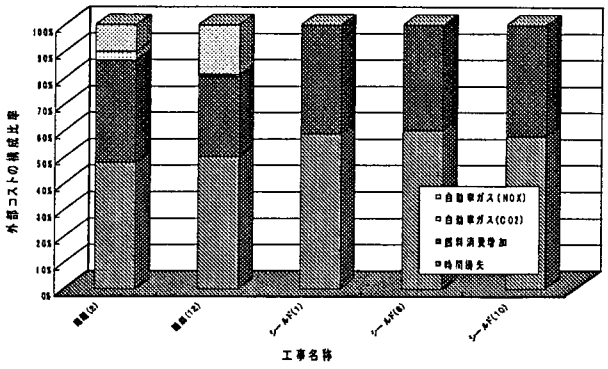
費用便益調査で用いられている評価手法は幾つか提案されているが、今回は、都市トンネル施工法選定のための外部コスト評価が目的であるため、評価方法が普遍的であることが望ましいこと、他の市場に置換するよりも直接評価項目の数量を用いて算定する方が根拠がわかりやすいことなどの理由により直接利用者の便益を算定する「消費者余剰アプローチ」に基づいて外部コストを試算することとした。外部コスト試算の評価項目、試算方法を表－２に示す。



図－２ 単位掘削あたりの外部コスト(円/m3)



図－３ 各工事の外部コストの構成比率



図－４ 交通規制による外部コスト構成比率

図－２に各工事の単位掘削あたりの外部コスト試算結果を示す。これより、各工事の外部コストは大きく異なり、開削(12)、シールド(1)(8)(10)、NATM(1)～(4)が特に高いことが分かる。図－３は外部コストの構成比率を示したものであるが、外部コストが高い開削(12)、シールド(1)(8)(10)は交通規制による外部コストの比率が非常に高く、これらの工事の外部コストが高い原因に交通規制が大きく寄与していることが分かる。また、NATM(1)～(4)では資材運搬NOxが大きな比率を占めているが、今回対象とした調査工事では、NATMが開削、シールドの他の工事に比べてトンネル断面積が大きく、かつ土被りも比較的大きいことから、トンネル構造物の規模が大きいことがその原因として考えられる。図－４に交通規制が実施された工事のみを対象とした交通規制による外部コスト構成比率を示す。これより、交通規制による自動車排ガスによる外部コストに比べて、燃料消費増加および道路利用者の時間損失コストが大きいことが分かる。以上より、対象としたトンネルが置かれた条件（交通規制の有無、断面積、土被り等）が異なるために今回の外部コストの試算結果は単純に比較できるものではないが、トンネル施工時に交通規制を伴う場合には、外部コストに与える影響が極めて大きいことが明らかとなった。

４.今後の課題

今後は、対象トンネルを想定したケーススタディを実施し、直接工事費に外部コストを含めた比較・分析を行い、都市トンネルの工法選定手法を提案する必要がある。

（真下、石村、真弓）

11.6　建設汚泥、建設発生木材等リサイクル促進技術の開発

研究期間：平１０～平１４

担当：施工研究室

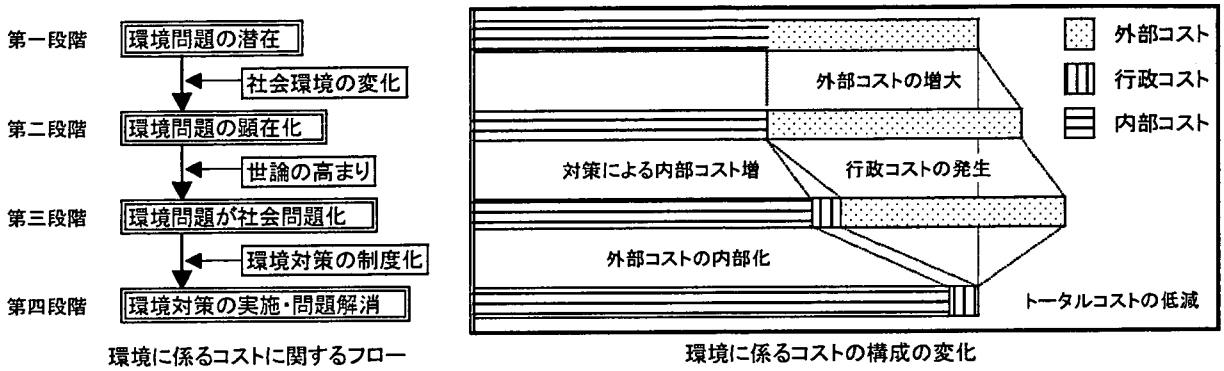
【要旨】

リサイクルの促進にあたってはリサイクルのコストを適切に評価することが必要である。建設副産物のうちリサイクルが低迷している建設発生木材を取り上げ、リサイクル事例に関する調査を行ない、リサイクル促進に向けたコスト面における課題の把握をおこなった。

１．リサイクルコストの考え方

リサイクルに関するコストとしては副産物の処理に要する直接的な内部コストに加え、①建設副産物の存在あるいはその処理の過程において生じる環境汚染に関する外部コスト、②適切な処理を行うことで有用な資源として用いることができる副産物を安易に最終処分してしまうことによる資源の浪費に関する外部コストの二つの観点の外部コストを含めたトータルコストの観点から評価する必要がある。

環境に関するトータルコストの内部化については、図１に示すような段階を踏むと考えられている。



環境に係るコストに関するフロー　　環境に係るコストの構成の変化

図1　環境問題におけるトータルコストの推移と構成の変化

第一段階は環境問題が潜在し、問題となっていない状態である。この場合でも外部コストは発生している。それが社会環境の変化に伴い、外部コストが増大すると環境問題として顕在化する。これが第二段階である。さらに外部コストが増大すると環境問題が社会問題化する。このとき、対策の実施により内部コストが増大し、同時に、社会問題を処理するための行政コストが発生する。最終的には外部コストは制度化された対策費として内部化され、その結果、内部コストは増大するが、トータルコストが低減されるというものである。

リサイクルに関するコストを考えた場合、環境の汚染に関するコストは廃棄物処理法によって運搬、貯蔵、処分等の処理における特別な取扱いが規定されており、その対応を行うことで内部化される仕組みがほぼ確立されており、第四段階にかなり近づいていると言える。

しかし資源の浪費についてのコストは、リサイクル法においてその理念は示されているものの現場レベルまで十分に浸透しているとは言い難い。それは資源の浪費による環境への負荷というコストが、沿線住民の抗議、といった具体的な目に見える形をとらないこと、資源浪費に伴う環境負荷というコストの定量的な把握が進んでいないことが理由として考えられる。

リサイクルを行うかどうかを判断する際、リサイクルを行う場合と行わない場合のコスト比較を行うことになる。しかし環境汚染に関わるコストは既に制度によって内部化されているのに対し、資源浪費に関するコストは考慮に入れられない状態で比較が行われることになる。結果として、リサイクルを行う場合のコストは環境汚染コストによって増大し、資源浪費の低減という便益は充分に算定されず、結果としてリサイクルを行う場合の費

用便益比が低下し、リサイクルを行うという判断はコストの観点から不利な状態になり、リサイクルを低迷させる原因となる。

2．実態調査

実際にリサイクルが行われる現場における問題点を把握するため、ヒアリング調査を行ない、リサイクル促進に向けた課題を抽出した。

調査対象は表1に示すように、平成10年度簡易センサス調査においてリサイクルが低迷している建設発生木材とした。また図2に示すような木材処理フローを想定し、リサイクル手法を選定する際に採用案を選定した理由を調査した。調査対象工事は造成工事（5件)、ダム工事（4件)、トンネル工事（1件）とし、特に工事規模や発注者に関する条件は設定せず、選定した。調査はリサイクル手法を選定するにあたって、選定条件となった事項について自由記入方式で調査した。

表1　建設副産物のリサイクル状況

	H10	H12目標
建設廃棄物	85.3%	80%
コンクリート塊	95.3%	90%
コンクリート・アスファルト塊	98.1%	90%
建設発生木材	49.9%	90%
建設汚泥	36.8%	60%
建設混合廃棄物	21.1%	50%
建設発生土	77.9%	80%

※H10の値は簡易センサスを単純集計した参考値
※建設発生土は建設廃棄物には含まない。
※発生土の再利用率は
　土砂利用量に占める再生材の量の割合

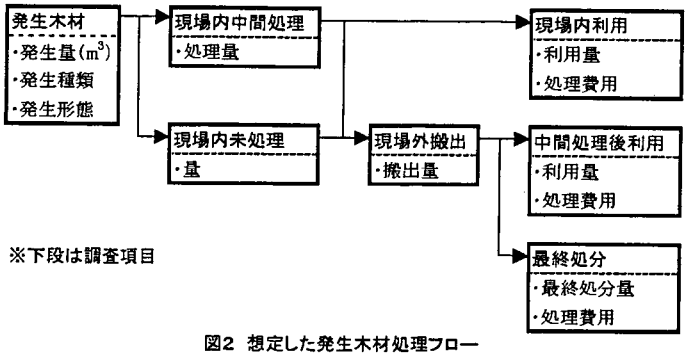


図2　想定した発生木材処理フロー

3．調査結果

調査の結果、10 件の事例のうち、3件については経済性の比較によってリサイクル手法を選定していた。また5件については発注者の指示により手法を選定しており、経済性の評価は行っていなかった。このように事業者によってリサイクルに関するコスト意識にはばらつきが見られた。

また、最もリサイクルに高い意識を持っている事例としては、「現場内ゼロエミッション」という目標を掲げて発生木材を全て現場内で中間処理し、植栽の堆肥、盛土の表面にマルチング材として散布した事例がある。逆にリサイクルの手法を処理費用の観点のみから比較し、「費用面で不利」という理由から処理方法が定まらず、未処理のまま長期間仮置きされている事例もあった。今回の調査はリサイクルを行った事例を抽出しており、比較的リサイクルに関する意識の高い事例を対象としたと考えられるが、その中でもこのようにコスト意識のばらつきが見られる。今回の調査対象の中ではコスト原因によるリサイクルの失敗事例は一件のみであったが、発生木材のリサイクル率が低迷していること、また成功した事例における調査でもコストに関する問題が、共通して主たる問題としてあげられていることから、リサイクルの推進に向けた重要な課題であると考えられる。

4．今後の課題

公共事業においてはリサイクル原則化ルールによってリサイクルの実施を義務づけている。これは現時点では算定されない資源浪費に関するコストを定性的に評価した施策である。しかしリサイクル原則化ルールは公共事業以外には適用されないため、民間事業におけるリサイクル率向上のためには資源浪費に関するコストを定量的に評価し、そのコストを内部化する制度の確立が必要である。また公共事業においても建設事業における用途が少なく、他産業における用途を考慮する必要が高い建設発生木材のリサイクル促進のためには外部コストを把握し、経済的な支援策を検討することが必要である。

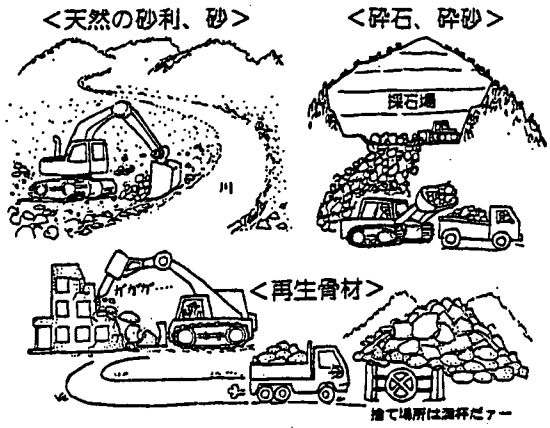
（大下武志　青山憲明　宮武裕昭）

11.7　低品質骨材・再生骨材の利用用途拡大技術の開発

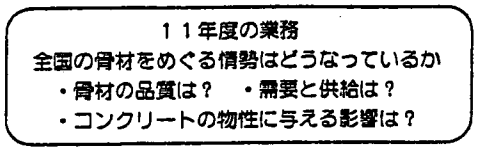
研究期間：平 10～平 14
担当：コンクリート研究室

【要旨】

コンクリート構造物に関する外部コストを考えるとき、コンクリート用骨材の有効利用法の確立は重要であり、有効利用促進のためには、まず、骨材をめぐる全国的な情勢を整理する必要がある。11 年度は全国的に実施した骨材および生コンクリートの実態調査結果を元に、骨材物性の地域的な特徴、骨材供給上の問題点、およびコンクリートの品質に与える影響等について検討を行った。



骨材の有効利用法と環境負荷低減効果の検討



研究の概要

１．骨材および生コンクリートの実態調査

調査は'92 年度と'99 年度に実施した。各年度とも各地方建設局ごとに１０箇所程度の工事現場を選定し、その工事に使用された生コンクリートの骨材およびコンクリート配合について調査した。調査項目は骨材の岩種（砂利、砕石の違い等）、物性（密度、吸水率、実積率等）、およびコンクリート配合とした。

２．骨材物性の地域的な特性

調査結果から、細骨材、粗骨材の密度・吸水率および粗骨材の実積率について整理した。'99 年度の粗骨材吸水率の例を図－１に示す。各物性の地域的な特徴と年次的な変化の特徴を以下に述べる。

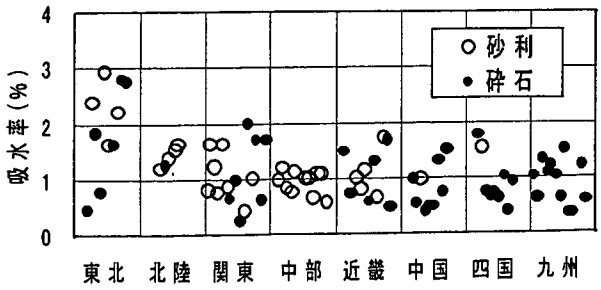
(1)細骨材の表乾密度：川砂、山砂等の天然砂の密度はほとんどが 2.57t/m^3 前後で地域性はあまり見られない。砕砂を混合して使用している場合の密度は天然砂に比較してやや大きい傾向にある。'92 年度と'99 年度で顕著な差はみられない。

(2)細骨材の吸水率：東北地方の細骨材の吸水率はやや大きい。砕砂を混合した細骨材の吸水率は天然砂に比較して小さい傾向にある。'92 年度に比較して'99 年度の吸水率は全国平均で 0.2 %程度増加している。

(3)粗骨材の表乾密度：砂利の密度はほとんどが 2.62t/m^3 前後で地域性はあまり見られない。砕石の密度は岩石の種類によって大きく異なり、2.57 から 3.0t/m^3 の範囲で様々であった。'92 年度に比較して'99 年度では砕石の比率が増えているが、物性についての大きな変化はみられない。

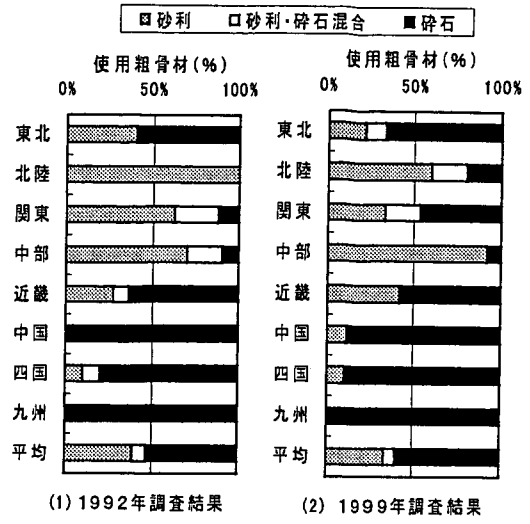
(4)粗骨材の吸水率：東北地方の粗骨材の吸水率はやや大きい。砕石の吸水率は砂利と同程度かやや小さい傾向にある。'92 年度に比較して'99 年度では砕石の吸水率が全国平均で 0.2 %程度増加している。

(5)粗骨材の実積率：粗骨材の実積率は 60.5 %を境に、それ以上が砂利、それ以下が砕石となった。砂利は東日本で、砕石は西日本でおもに使用されており、実積率についても地域差が顕著に現れる結果となった。



図－１　骨材の品質(粗骨材吸水率,1999年)

一般に骨材の物性は密度、吸水率で評価されるが、地域的には東北地方の一部で吸水率のやや高い骨材が認められる。しかしながら、一方で、コンクリート用骨材としては砂利や天然砂より性能が劣るとされる砕石・砕砂のほうが密度、吸水率の値が良好な傾向もあり、単に密度、吸水率だけで骨材の品質を評価することはできないと考えられる。'92 年度と'99 年度の比較で、骨材吸水率の平均値がわずかではあるが増加していることも考えあわせると、今後はより一層の骨材の低品質化が予想され、規準に一部達しない骨材でも有効利用ができるような技術開発や、新たな規準の整備が必要と考えられる。



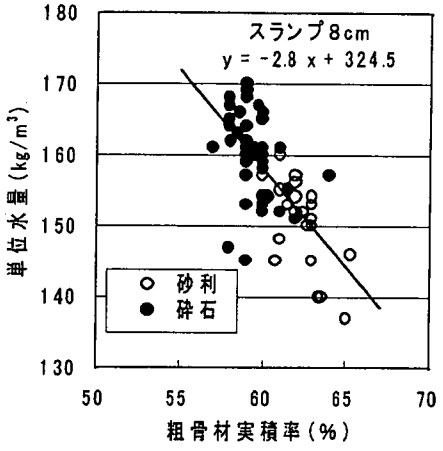
図－2 使用粗骨材の割合

2．骨材に使用される岩種の地域性と変遷

'92 年度と'99 年度の調査結果から、粗骨材を天然の砂利と砕石とに分けて、地域ごとの使用割合を調査した結果を図－2に示す。近畿、中国、四国、九州では'92 年度でも砕石の使用が多いために'99 年度も同様の傾向であるが、東北、北陸、関東では明らかに砕石の使用割合が増加していることがわかる。

細骨材についても同様に、'99 年度は'92 年度に比較して、砕砂の混合や、砕砂単独の使用が全国的に増えてきていることが明かとなった。

良好な天然骨材の供給量の減少に伴い、今後はさらに砕石、砕砂の供給量が増加するものと考えられる。



図－3 粗骨材実積率と単位水量の関係(1999年)

3．粗骨材の実積率がコンクリートの単位水量に与える影響

骨材の物性がコンクリートの品質に与える影響としては、骨材自体の強度、耐久性の他に、粒子形状や粒度分布、実積率等によるコンクリートの単位水量への影響がある。これらの物性が悪いと、同一のコンシステンシーを得るための単位水量が増加し、単位水量の増加はコンクリートの乾燥ひび割れの発生につながる。

そこで、粗骨材の実積率とコンクリートの単位水量との関係について調査した。コンクリートの配合条件としてはスランプ８ｃｍ、呼び強度 18 ～ 30 N/mm^2 の範囲とした。'99 年度の調査結果を図－３に示す。この図から、粗骨材の実積率と単位水量との間には良い相関が認められ、１％の実積率の増加で単位水量は約 2.8kg/m^3 減少する結果となった。この結果から、特に砕石を使用する場合には、粒子形状の改善や粒度分布の適正化等により、少しでも実積率を高めるための工夫が重要と考えられる。

4．まとめと今後の課題

１１年度の検討結果から、地域的に密度・吸水率のやや劣る骨材でも有効利用していく必要があること、良好な天然骨材の供給量の減少に伴って、今後はますます砕石・砕砂の供給量の増加が考えられること、粗骨材の実積率がコンクリートの単位水量に与える影響は大きく、実積率を少しでも高めるための工夫が重要であることが明かとなった。今後はこれらの成果を踏まえ、外部コストを考慮した骨材の有効利用技術について検討を行うものである。

（河野、片平）

11.8　環境にやさしい塗料技術の開発

研究期間：平10～平14
担当：化学研究室

［要旨］

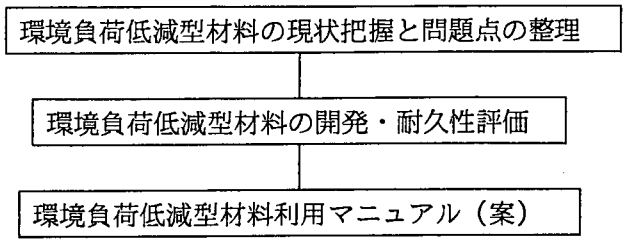
建設事業による地球環境や生活環境への影響等の外部不経済（外部コスト）を含めた建設事業コストの低減を図る必要がある。このため、建設事業から発生する環境負荷を低減する技術を開発することを目的とする。

１１年度は、環境負荷低減型材料として、光化学スモッグなどの大気汚染の原因物質の一つである揮発性有機溶剤(ＶＯＣ)を1/3以上削減した環境にやさしい塗料（新設用）の耐久性検討および環境にやさしい塗料（塗替え用）の検討を行った。

１．研究目的

環境負荷低減型材料として、ＶＯＣを削減した環境にやさしい塗料の実用化をることを図ることを目的とする。

２．研究方法



２．１　環境にやさしい塗料（新設用）

ＶＯＣを現行のＣ塗装系の1/3以上削減した９種類の環境にやさしい塗装仕様（新設用）を沖縄，親不知，つくばで５年間曝露し、その耐久性を評価した。

２．２　環境にやさしい塗料（塗替え用）

試験片は、Ａ塗装系が塗装され東京およびつくばで10年間暴露したものを利用した。素地調整程度２種，３種ａ，３種ｂおよび４種で処理し、表－１に示す５種類（塗装系２０は比較用ｃ－１塗装系）の環境にやさしい塗装仕様（塗替え用）で塗替え、厳しい腐食環境の沖縄に曝露した。曝露２年後の塗膜外観を調査した。

３．研究結果

３．１　環境にやさしい塗料（新設用）

いずれの曝露場所でも一般部はほとんどさびなどの劣化は見られず、塗膜外観はほぼ良好であった。内面用６の塗膜スクラッチ部は、塗膜欠陥が30㎜以上であった。その他の塗装系のスクラッチ部の塗膜欠陥は、比較用Ｃと同程度であった。光沢保持率を図－１に示す。内面用６は光沢保持率がほぼ０であった。溶剤系上塗り塗装は光沢保持率が60程度、水系上塗りは20～50程度であった。内面用６の色差は10程度である。他は２以下であった。したがって、環境にやさしい塗料（新設用）の耐久性は、Ｃ塗装系と同じ程度であることが確認された。なお、内面用塗装系は、ほとんど外気環境に曝されないため、今回の曝露試験条件は過酷すぎたと考えられる。

３．２　環境にやさしい塗料（塗替え用）

素地調整程度に関わりなくほとんどの塗装系で細かなふくれが生じていた。また、スクラッチ部からの塗膜欠陥が、比較用２０より大きかったのは２４－２，３種ａで２５－３ａ以外，３種ｂで２２－３ｂと２４－３ｂ，４種で２５－４以外であった。曝露２年では塗装仕様の耐久性を十分評価することはできないので、少なくとも５年間の曝露を終えたところで評価を行う予定である。

表－1　環境にやさしい塗装仕様（塗替え用）

記号	素地調整	塗　装　仕　様
20-2	2種	有機ｼﾞﾝｸﾘｯﾁﾍﾟｲﾝﾄ＋変性ｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料(2回)＋ふっ素樹脂塗料中・上塗り
-3a	3種a	変性ｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料(3回)＋ふっ素樹脂塗料中・上塗り
-3b	3種b	変性ｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料(2回)＋ふっ素樹脂塗料中・上塗り
-4	4種	変性ｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料(1回)＋ふっ素樹脂塗料中・上塗り
21-2	2種	水系有機ｼﾞﾝｸﾘｯﾁﾍﾟｲﾝﾄ＋水系ｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料(2回)＋水系ふっ素樹脂塗料中・上塗り　水
-3a	3種a	系ｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料(3回)＋水系ふっ素樹脂塗料中・上塗り
-3b	3種b	水系ｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料(2回)＋水系ふっ素樹脂塗料中・上塗り
-4	4種	水系ｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料(1回)＋水系ふっ素樹脂塗料中・上塗り
22-2	2種	有機ｼﾞﾝｸﾘｯﾁﾍﾟｲﾝﾄ＋ﾊｲｿﾘｯﾄﾞｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料＋ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ樹脂塗料上塗り
-3a	3種a	ﾊｲｿﾘｯﾄﾞｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料＋ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ樹脂塗料上塗り
-3b	3種b	ﾊｲｿﾘｯﾄﾞｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料＋ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ樹脂塗料上塗り
-4	4種	ﾊｲｿﾘｯﾄﾞｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料(薄膜)＋ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ樹脂塗料上塗り
23-2	2種	有機ｼﾞﾝｸﾘｯﾁﾍﾟｲﾝﾄ＋ﾊｲｿﾘｯﾄﾞｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料＋水系ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ樹脂塗料中・上塗り
-3a	3種a	ﾊｲｿﾘｯﾄﾞｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料＋水系ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ樹脂塗料中・上塗り
-3b	3種b	ﾊｲｿﾘｯﾄﾞｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料＋水系ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ樹脂塗料中・上塗り
-4	4種	ﾊｲｿﾘｯﾄﾞｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料(薄膜)＋水系ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ樹脂塗料中・上塗り
24-2	2種	有機ｼﾞﾝｸﾘｯﾁﾍﾟｲﾝﾄ＋低溶剤形ｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料＋厚膜ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ樹脂塗料上塗り
-3a	3種a	低溶剤形ｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料(2回)＋厚膜ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ樹脂塗料上塗り
-3b	3種b	低溶剤形ｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料(1回)＋厚膜ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ樹脂塗料上塗り
-4	4種	低溶剤形ｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料(1回)＋厚膜ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ樹脂塗料上塗り
25-2	2種	有機ｼﾞﾝｸﾘｯﾁﾍﾟｲﾝﾄ＋水系変性ｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料(2回)＋水系ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ樹脂塗料中・上塗り水系
-3a	3種a	変性ｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料(3回)＋水系ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ樹脂塗料中・上塗り
-3b	3種b	水系変性ｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料(2回)＋水系ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ樹脂塗料中・上塗り
-4	4種	水系変性ｴﾎﾟｷｼ樹脂塗料(1回)＋水系ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ樹脂塗料中・上塗り

（明嵐、守屋）

11.9　民間技術活用の入札契約手法の提案に関する調査

研究期間：平 9～平 11
担当：建設マネジメント技術研究室

【要　旨】
限られた財政を用いて良質な社会基盤を整備していくためには、事業執行システムの一層の効率化が必要である。その有効な手段の一つとして民間技術力の活用があり、平成 9 年度から「品質の確保」、「コスト縮減」を目的として多様な入札・契約方式が試行されている。
本研究では、多様な入札・契約方式の導入を促進するに当たり、各方式の効果や適用性を調査するとともに、問題点を抽出し、今後、事業をより効率的に執行するための留意事項等の検討を行った。

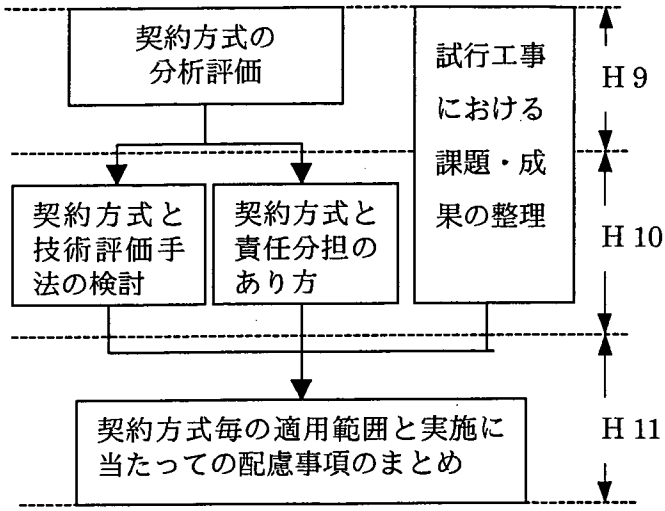


図-1　研究の全体計画

1.　研究方法

1.1　多様な入札・契約方式の整理

平成 9 年度から試行されている多様な入札・契約方式について手法の研究を行った。対象とした方式は、VE 方式（設計、入札時、契約後）、技術提案総合評価方式、設計・施工一括発注方式である。これらの手法について、プロジュクトにおける導入段階、技術提案の評価手法等について研究を行った。

1.2　試行事例の研究

平成 9 年度及び 10 年度に試行した案件の一覧を表-1 に示す。これらの案件を対象として、アンケート及びヒヤリング調査を行った。調査は個別の試行事例について、効果、各手法の適用性、問題点の抽出等の観点から行った。問題点の抽出では、リスクの評価手法、発注者及び提案者の責任分担のあり方等について研究を行った。

表-1　試行実積一覧

		H9	H10
VE 方式	設計	8	48
	入札時	35	17
	契約後	5	3
技術提案総合評価方式		0	1
設計・施工一括発注方式		0	1

2.　研究成果及び今後の取り組み

VE 方式、技術提案総合評価方式、設計・施工一括発注方式についての具体の事例におけるアンケート及びヒヤリング結果を表-2 に示す。本研究の対象となった各方式は、比較的難易度の高い案件において、直接工事費の縮減や外部コストの縮減等で成果が上がっている。一方で、技術提案を求め、評価する手法であるため、その作業の過程において発注者及び提案者の双方に大きな負担がかかる場合がある。これらの方式を効率的に活用して

表-2　多様な入札・契約制度一覧

	VE 方式	技術提案総合評価方式	設計・施工一括発注方式
概　要	・設計時、入札時、施工時に VE 手法を導入し、民間の技術力を活用することにより、コスト縮減、品質の向上等を実現する手法である。	・入札時に価格に加え、技術提案を求め、品質、工期、安全性、デザイン等の観点から総合的に評価を行う手法である。	・設計と施工を一括して発注することにより、技術提案を積極的に活用し、コスト縮減、品質の向上等を実現する手法である。
効　果	・設計 VE 方式で数%から 30%程度のコスト縮減効果があった。	・工期短縮による外部コストの縮減を実現し、総合的な評価のもとで最も安いモノを調達できた。	・難易度の高い工事において、設計段階で施工者の技術提案を求めることにより、コスト縮減を実現できた。
適用性	・設計段階での VE 導入が最も効率が良い。特に、基本設計終了後が最も効果的である。	・工事の難易度が比較的高く、工事に伴い価格に換算できる外部コストが発生する案件に対して効果的である。	・大規模案件で工事の難易度が比較的高く、潜在的リスクの小さい案件に対して効果的である。
課　題	・技術提案および審査について、発注者、提案者ともに、労力が必要である。 ・発注者には、技術提案を審査する技術力が必要である。		
	・提案者に対する技術提案を行うインセンティブの付与方法の検討。 ・提案範囲の整備が必要。	・価格以外の項目の評価手法の確立が必要。 ・複数の評価項目間における重み付け手法の確立が必要。	・リスクの評価の検討。 ・発注者と受注者の責任範囲が明確でない。 ・本方式の標準的な契約書の整備が必要。

いくためには、技術提案による費用対対効果を考慮することが有効と考える。たとえば、プロジェクトの難易度、規模等による費用対効果は、概念的には図-2 のようになると想定さる。今後は、具体的なプロジェクトについて、費用対効果を推定する手法を検討し、効果の大きなプロジェクトに技術提案を評価する方式を積極的に活用する仕組みを構築する必要がある。

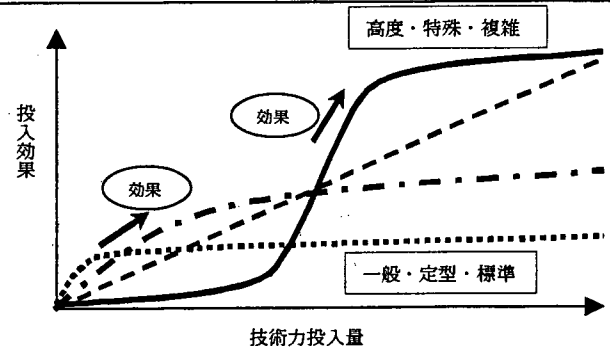


図-2　技術力投入量と投入効果の関係

また、各方式の現状の運用において、発注者と提案者の責任範囲は明確でない場合が多いようである。斬新な技術提案を採用する場合、高い効果が期待できるがリスクが発生する技術提案を採用する場合については、発注者と受注者相互の責任分担を明確にし、顕在化しているリスクや潜在的なリスクに対して、どちらが責任を持って対応するのかを明らかにしておく必要がある。今後の取り組みとして、責任範囲を明確にするためには、契約約款を整備することが有効な手段の一つと考えられる。

（山下、小澤、加藤）

11.10　建設技術情報流通システムの構築に関する調査

研究期間：平１０―平１２

担当：建設マネジメント技術研究室

【要旨】 公共事業の建設コスト縮減の一方策として、民間が開発した新技術の公共工事への積極的な活用が考えられる。

本研究では、建設技術開発の促進に対する阻害要因や課題を明らかにするとともに、新技術を公共工事に活用する際に有用となるニーズ情報や新技術情報のあり方、新技術の評価方法について検討し、技術開発促進とコスト縮減を図るための新技術情報流通システムの提案を目指す。

今年度は、「発注者が行う新技術の評価・活用」に着目し、これまでに実施された試験フィールド事業、技術活用パイロット事業の追跡調査を行ない、「新技術の評価・活用」に係わる実態を把握するとともに、新技術活用促進に向けた課題を抽出した。

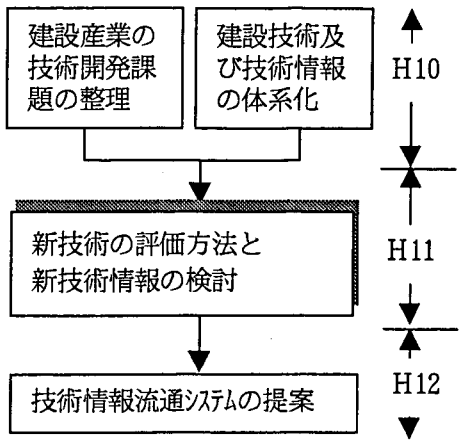


図-1　研究の全体計画

１．研究方法

昨年度は、開発主体（民間）と発注者を対象として、現状の技術開発・新技術活用に関するアンケート調査を実施し、「発注者が行う新技術の評価・活用」に対する両者の認識の差異が顕著であることを確認した。

今年度は、平成10年度までに各地建で展開した試験フィールド事業、技術活用パイロット事業（以下、技術活用パイロット事業等）を対象として、全国の新技術採用状況を整理するとともに、アンケート及びヒアリング調査（表－１参照）を行ない、新技術活用時に「発注者が行う評価」のプロセスと、各場面における新技術の評価内容についての実態調査を実施した。

表-1　ヒアリング及びアンケート調査の概要

調査分類	アンケート調査	ヒアリング調査
調査対象者 〈対象事業〉	活用頻度が高い７つの技術活用ﾊﾟｲﾛｯﾄ事業等の工事事務所技術活用担当者（全３６件） 〈対象事業〉 ①ジオテキスタイルを用いた補強盛土・土壁工法 ②地盤補強基礎（GRF）工法 ③法面緑化（ﾃｸｽﾙｸﾞﾘｰﾝ）工法 ④セメント系深層混合処理（CDM他）工法 ⑤現位置攪拌固化工法（ISM工法） ⑥泥水固化壁（NOMST工法） ⑦ﾎﾟｰﾗｽｺﾝｸﾘｰﾄ護岸工法	建設省地方建設局技術事務所（一ヶ所） 技術事務所長および技術課課長 〈対象事業〉 地建内で実施した全ての技術活用ﾊﾟｲﾛｯﾄ事業等
主要な 調査項目	・新技術活用の背景 ・新技術活用までのプロセス ・活用前評価と活用後評価の内容	・新技術活用までの評価プロセス ・活用後評価の現状 ・新技術活用に係わる現状の課題

２．研究結果

２．１　新技術活用状況の整理

各地建において、平成６年から平成10年度までに技術活用パイロット事業等に採用された新技術は総数６５３技術となる。これら６５３技術の採用状況を全地建（全国）で整理して図－２に示す。図より、全６５３技術のうち、３６６技術（全体の55%）が単年度１現場のみの活用となり、一般化には至らなかった技術と推察することができる。一方、複数年度での活用がなされた技術には、複数地建にまたがり長期の活用が継続されている新技術もあり、ニーズへの適合性と予測された効果出現が期待できる。

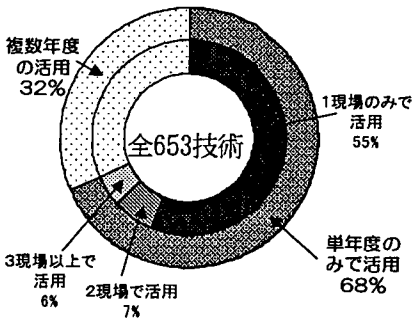


図-2　新技術の採用状況

２．２　新技術活用・普及に至る評価プロセスの整理

平成10年度から運用が実施されている新技術活用促進システムは、図－３に示す３つの評価により、新技術の活用・普及を行う。まず、民間開発の新技術は、「Ⅰ.登録に向けた評価」により、新技術情報提供ｼｽﾃﾑ（NETIS)へ掲載される。各工事事務所はNETISを利用し、新技術と従来工法・材料の比較検討など「II．活用に向けた評価」を行ない、新技術導入を決定する。そして、新技術活用後には、当該現場条件下での新技術の効果、施工上の課題などの「Ⅲ.活用後の評価」を行なう。それらの結果を適切にフィードバックし、更なる現場活用を進め、一般工事への普及に至る。

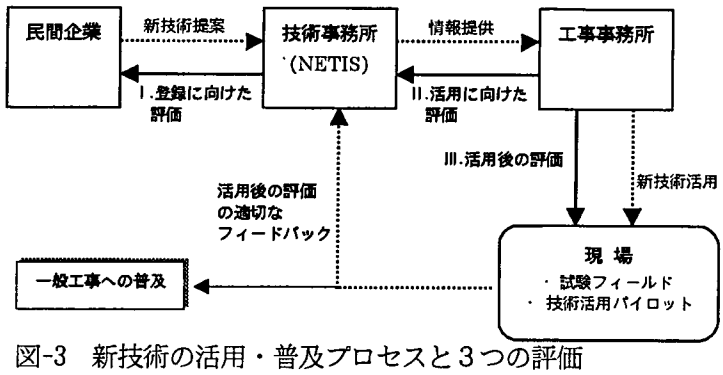


図-3　新技術の活用・普及プロセスと３つの評価

アンケートおよびヒアリング調査から整理した上記Ⅰ～Ⅲの評価内容と課題を整理して表－２に示す。

平成12年度は、これらの課題について検討を行ない、効率的な新技術活用に向けた「新技術の評価方法」および「評価結果を用いた技術情報内容」の提案を目指す。

表-2　新技術評価の３分類と新技術の効率的な活用に向けた課題（現状）

評価の分類	評価の内容	評価項目（現状）	新技術活用に向けた課題
Ⅰ．登録に向けた評価	民間開発の新技術の適用性を概略評価 当該新技術を活用する事業種別（試験ﾌｨｰﾙﾄﾞ、技術活用ﾊﾟｲﾛｯﾄ、一般工事）を判断する	①技術の成立性確認 （机上レベルの技術の成立性） ②実施条件下での適用性の確認 ③一般工事での活用適否の確認 （施工管理法、標準歩掛整備）	・活用後結果を用いた掲載技術の選別・分類が必要 （活用後結果が良くない新技術については、情報から除くなど）
II．活用に向けた評価（活用前評価）	新技術情報提供システム（NETIS）を利用して、現場技術者が現場活用できる新技術を評価・選定する	①従来技術と比較して優れた特徴（経済性、工期、環境配慮等） ②自然条件、施工条件などに影響を受ける場合は、適用範囲を予測評価	・新技術活用後評価結果のフィードバックがなされていない （複数現場の活用後結果をどのように評価し、技術情報として提示するか）
Ⅲ．活用後評価	現場技術者が当該現場での活用効果を従来工法との比較により評価する	①経済性 ②工程 ③品質・出来形 ④安全性 ⑤施工性 ⑥環境	・経済性、工程以外の項目の適切な評価方法の確立 （例えば、経済性でやや劣るものの環境で優れる新技術を採用する場合の技術的判断指標・根拠の作成）

建設事業の品質管理体系に関する研究

１２．建設事業の品質管理体系に関する研究

研究期間：平成 10～12 年度
プロジェクトリーダー：新材料開発研究官
猪熊　明

1. 研究背景：

近年の国際社会において、国際規格および国際適合性評価制度の発展が求められており、1996 年 1 月 1 日に発効した世界貿易機関（ＷＴＯ）の新たな政府調達協定においても、技術仕様を、「デザインまたは記述的に示された特性よりも性能に着目して定め、国際規格が存在する場合には、当該規格に基づいて定めること」としている。また、国際標準化機構（ＩＳＯ）により、品質管理等を目的とした国際規格として、ISO9000's が整備されている。我が国の建設工事においても、国際整合性を確保した工事の技術仕様や関係技術基準類を用いた新たな品質管理体系の開発が必要となっている。さらに、コスト縮減や新技術開発導入のインセンティブの確保のために、設計・施工の自由度を向上させることが求められており、設計・施工の具体的方法を制約せず、成果物の性能を重要視した新しい品質管理手法の開発が必要とされている。

以上のように、建設事業を取りまく国内外の社会的要求が変化しており、これらに対応した新しい品質管理体系の開発が必要となっている。

2. 研究の目的：

建設事業をとりまく社会的要求に対応する有効な方法の 1 つとして、性能規定の導入が期待されている。これは、性能規定により技術仕様を成果物の性能に着目したものとするとともに、それに伴う設計・施工の自由度の向上が期待できるためである。また、本来、品質管理において重要なことは、各品質管理項目が、要求性能を実現する上でどのような意味を持つかを明確にして、コストや作業効率をも考慮した上での最も有効な品質管理項目により重点的に行うことである。本研究は、これらのことを考慮しつつ、建設事業の性能規定化や国際規格への対応を含めた新しい品質管理体系の開発を行うものである。

3. これまでの研究成果：

国内外の社会的要求の変化に対応した、新しい総合的品質管理体系を開発するために、各研究課題、構造物や材料等の対象ごとに検討を行い、性能規定導入のための検討や、新しい品質管理・検査技術のための実験データの計測を行ってきた。

－建設事業の品質管理体系に関する研究－

個別研究課題目次

12.1 要求性能と品質レベルの相関性の検討（構造物の性能に与える品質の影響度）…… （構造研究室）…420

12.2 要求性能と設計・材料・施工・維持管理の品質管理レベルの相関性の検討…… （橋梁研究室）…422

12.3 品質規格の性能規定化手法の開発…… （化学研究室）…424

12.4 コンクリート材料・構造物の品質検査技術の開発（非破壊検査・高知能検査等）…… （コンクリート研究室）…426

12.5 鋼構造物の品質検査試験技術の開発（非破壊検査・溶接検査・塗膜検査等）… （橋梁研究室）…430

12.6 鋼構造物の品質検査試験技術の開発（非破壊検査・溶接検査・塗膜検査等）… （化学研究室）…432

12.7 土構造物の品質管理技術の開発…… （施工研究室）…434

12.8 施工情報活用による品質管理・検査の合理化技術の開発（シールド工）…… （機械研究室）…436

12.9 公共土木工事の発注体系に関する調査研究…… （建設ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ技術研究室）…438

12.10 公共土木工事の性能発注に関する調査研究…… （建設ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ技術研究室）…440

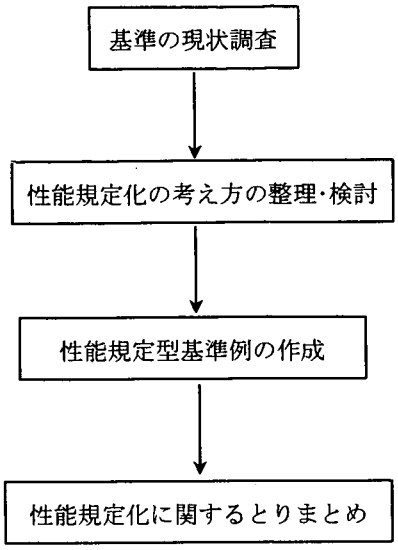
12.1　要求性能と品質レベルの相関性の検討（構造物の性能に与える品質の影響度）

研究期間：平９～平１２

担当：構造研究室

【要旨】

近年、国内の土木構造物設計の各分野において性能規定が注目されている。性能規定化によって構造物の要求性能が明確となり、設計施工上の自由度が増加すると考えられている。本課題は、土木鋼構造物設計において必要な要求性能を整理し、技術基準類を性能規定化し提案することを目的とする。11 年度は、橋梁の耐風設計を対象として、NKB レベルシステムを参考に必要とされる要求性能の整理、各要求性能に対する検証方法、みなし仕様の対応づけを行った。その結果、現行の橋梁の耐風設計はＮＫＢのそれぞれのレベルに適応した設計法となっており、比較的容易に性能規定化できることが明らかとなった。さらに、要求性能の１つである使用性の観点から振動の許容値について文献調査を行った。



１．研究目的および方法

１．１　耐風設計法の性能規定の適合状況に関する調査

橋梁の耐風設計を性能規定化するために、ＮＫＢ（ノルディック建築委員会）が提唱した構造物の設計に関するレベルシステムを参考に、現行の道路橋耐風設計便覧の規定内容を、要求性能、検証方法、みなし仕様に整理し性能規定化への適合状況を検討した。

１．２　振動使用性に関する許容振動振幅に関する調査

現行の道路橋耐風設計便覧では、振動の許容振動振幅を使用性、初通過破壊、疲労破壊の３つの限界状態に対して許容振幅を設定するべきとしているが､使用性について明確な許容振幅を示していないため、使用性に対する振動恕限度を既往の文献より調査した。

２．研究結果

２．１　要求性能の整理の結果

ＮＫＢの整理方法を参考に、道路橋耐風設計便覧の規定内容を要求性能、検証方法およびみなし仕様を整理した結果の概要を表１に示す。その結果、風荷重およびガスト応答や、フラッターや渦励振などの振動現象に対する要求性能が明示されていること、検証方法についても、各振動現象に対する発現風速および振動振幅の推定式、さらに、風洞実験にもとづく推定方法が示されていることが明らかとなった。また、便覧には振動現象に対する検討が必要かどうかを判別する式が示されているが、橋梁の形式、主径間、桁幅および設計風速が判定式を満たす場合には、詳細な耐風設計を行わずに振動現象に対する要求性能を満足しているとみなすことができるため､これをみなし仕様と整理することができる。以上より、道路橋の耐風設計法はＮＫＢの各レベルに対応した記述となっているため、比較的容易に性能規定化が可能であると考えられる。ただし、設計基準風速に関する再現期間の設定などについて、更に検討が必要であると考えられる。

２．２　振動恕限度に関する調査

橋梁の耐風設計では、1Hz 以下の比較的低い振動数範囲を対象とすることが多い。この振動数範

囲の鉛直もしくはねじれ振動に対する怨限度を示した文献は少ないが、ISO2631/3 では、「30 分静止時に非常に不快」となる怨限度が示されている。これを道路橋耐風設計便覧の許容渦励振振幅に相当する振動加速度を比較したところ、道路橋耐風設計便覧の規定は ISO2631/3 に比べて小さな値であった。ただし、ISO2631/3 で想定している状態は、道路橋利用時の状態と必ずしも一致しないため、今後、立位時、歩行時、運転時など利用者の状態に対する振動怨限度の検討が必要である。

表１　橋梁の耐風設計法とＮＫＢレベルシステム

レベル	内容
レベル１ OVERALL OBJECTIVES	架設地点で発生する風に対して、所要の安全性および使用性があり、それを供用期間中維持するように道路橋を設計・施工しなければならない。
レベル２ FUNCTIONAL AREAS	(1)風の作用 ①風荷重　②ガスト応答　③フラッター　④ギャロッピング　⑤渦励振 (2)効果 ⑥橋梁または部材に発生する力、応力または変形　⑦橋梁または部材に疲労を起こす、繰り返し応力または変形 ⑧空力的不安定現象　⑨利用者に不安・不快感をもたらす振動
レベル３ REQUIRED PERFORMANCE	(1)風荷重およびガスト応答 静的設計荷重 Pd を以下のように求め、上記⑥に関し、道路橋示方書の基準値を下回らなければならない。 $Pd = 0.5\,\rho\,Ud^2\,Cd\,An\,G$ (ρ:空気密度 Ud:設計基準風速, Cd:抗力係数 An :有効面積 G:ガスト応答係数) (2)フラッターおよびギャロッピング 上記⑧に関し、下記の式を満たさなければならない。 フラッター $Ucf > Ur$　ギャロッピング $Ucg > Ur$　$Ur = Ud\,Er1\,Er2$　$Ud = U10\,E1$ (Ucf:フラッター発現風速, Ucg:ギャロッピング発現風速, Ur:照査風速, Ud:設計基準風速, Er1:自然風の変動に関する補正係数, Er2:安全係数(1.2), U10:基本風速) (3)渦励振 橋の安全性は上記⑥⑦、使用性は上記⑨に関して、下式を満たさなければならない。 $Ucv > Ud$　(Ucv:渦励振の発現風速最大振幅) あるいは、 $Ac < ha$, θa　$ha=0.04/fh$（曲げ）　$\theta a=2.28/(b\,f\,\theta)$（ねじれ） (Ac: 渦励振最大振幅, ha: 許容渦励振振幅, fh: 鉛直曲げ１次モードの固有振動数, θa: 許容ねじれ渦励振振幅, b: 桁の中央から最外レーンの中央までの距離, $f\theta$:ねじれ１次モードの固有振動数)
レベル４ VERIFICATION	フラッター、ギャロッピング、渦励振の振動現象は、推定式もしくは風洞実験によって発現風速または最大振幅を推測し、レベル３で示した許容値と比較する。 (1)推定式による予測 過去の風洞実験結果から導かれた、推定式を以下に示す。 a) フラッターの発現風速 $Ucf = 2.5\,f\theta\,B$　(Ucf:フラッター発現風速, $f\theta$:ねじれ１次モードの固有振動数, B:桁幅) b) ギャロッピングは(B/d)が５以下の充腹断面桁で乱れ強さが小さい場合に発生する $Ucg = 8\,fh\,B$:ほぼ水平の風　$Ucg = 4\,fh\,B$:吹き上げの風 (Ucg:ギャロッピング発現風速,　fh:鉛直曲げ１次固有振動数) c)渦励振は充腹断面桁で発生し、発現風速と渦励振振幅は以下の通り。 $Ucv = 2.0\,fh\,B$:たわみ渦励振　$Ucv = 1.33\,f\theta\,B$:ねじれ渦励振 $Ac = Ae\,Ems\,Et$,　$Ae = \beta ds \cdot 0.05 \cdot (d/B)/(mr\ \delta h)$:曲げ、$Ae = \beta ds \cdot 13.2 \cdot (d/B)3/(Ipr\ \delta\ \theta)$:ねじれ (Ucv:渦励振最大振幅発生風速,Ac:渦励振最大振幅, Ae:一様流での最大振幅, Ems:振動モードに関する補正係数 $(4/\pi)$,Et:乱れに関する補正係数, βds:断面形状に関する補正係数,mr,Ipr:無次元質量および極慣性モーメント, δh, $\delta\ \theta$:構造減衰) (2)　風洞実験による振動の予測 推定式による振動予測は安全側であるため、全橋模型試験、タウトストリップ試験、バネ支持模型試験などの風洞実験を用いた推定によって、より経済的な設計が得られる可能性がある。
レベル５ SOLUTIONS	橋梁の形式、主径間、桁幅および設計風速などの諸元が判定式を満たす場合には、詳細な耐風設計を行わずに振動現象に対する要求性能を満足しているとみなすことができる。

（佐藤、大儀）

12.2　要求性能と設計・材料・施工・維持管理の品質管理レベルの相関性の検討

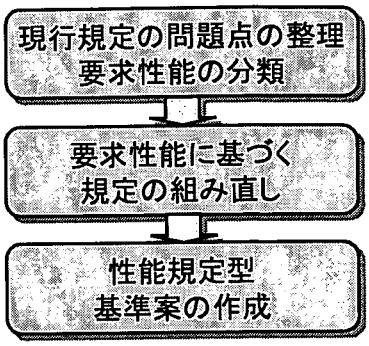
研究機関：平９～平１２

担当：橋梁研究室

【要旨】

近年の経済の国際化やコスト縮減の動きに対し、競争力や透明性の確保、新技術の迅速な導入のためには、従来の仕様規定型の技術基準から性能規定型への移行が必要となってきている。本検討では、鋼道路橋について性能規定型基準としたときの要求性能の枠組みを作成し、性能規定型基準案を提案することを目標とする。

１１年度は、性能規定型基準案に向けて、枠組みの整理を行うとともに、基準案提案の端緒として、鋼橋溶接部における設計・施工・維持管理の各段階での品質管理の目的と内容について検討した。



1．研究方法

1．1　性能規定型基準案の枠組みの整理

１０年度までに、性能規定型基準を検討するにあたっては、誰がその性能水準を要求するのかという責任分担の明確化が不可欠なことを提案し、国民（納税者）の立場からみた橋としての要求性能を、安全性、利用性、環境適合性、経済性の４項目で整理した。１１年度は、性能規定型道路橋基準の枠組みの整理を行ったが、その際、図-1に示すように「裁量と責任」と、「橋としての要求性能」という２つの観点からの整理を試みた。これらの観点は、前者が道路橋基準の法的位置づけを、後者が同基準の編構成の再編を念頭においたものである。



図-1　性能規定型道路橋基準をとらえる2つの観点

1．2　鋼橋溶接部の品質管理に関する項目の整理

性能規定型基準案の作成の際に重要となるのは、いかに検証方法をわかりやすく具体的に示せるかという点である。１１年度は、検証方法を例示する前段階のケーススタディとして、鋼部材溶接部に着目し、設計・施工・維持管理の各段階での品質管理の目的と内容について検討した。

2．研究成果

2．1　性能規定型道路橋基準の枠組みの整理

（1）裁量と責任

図-2に、裁量と責任という観点での枠組みを示す。現在の道路橋示方書は、道路・都市局長の通達という形をとっているが、その中身は、図中の上位レベルから下位レベルまで、広い役割を担っている。裁量と責任という観点で性能規定型基準を考えた場合、現在の道路橋示方書の記述内容は、国の裁量と責任で規定すべき技術基準（要求性能）と、その解決法となる技術基準あるいは仕様書に分離すべきと考えられる。具体的には、設計自動車荷重などは国の規定で定めるべき内容であり、構造細目などは各発注者レベルで定めるべき内容であると考えられる。

（2）橋としての要求性能

橋に求められる性能という観点から性能規定型基準を考えると、その枠組みは、図-3に示すようなものに

なると考えられる。すなわち、橋としての要求性能である、安全性、利用性、環境適合性、経済性とその検証方法を記述する編と、部材、接合部、材料の要求性能と検証方法を記述する編に分離するものである。ここで強調すべき点は、全ての要求性能は時間軸を持つ（全ての要求性能に耐久性の概念がある）と考えられるため、検証方法にも、経年変化を念頭に置いた記述が必要になるということである。

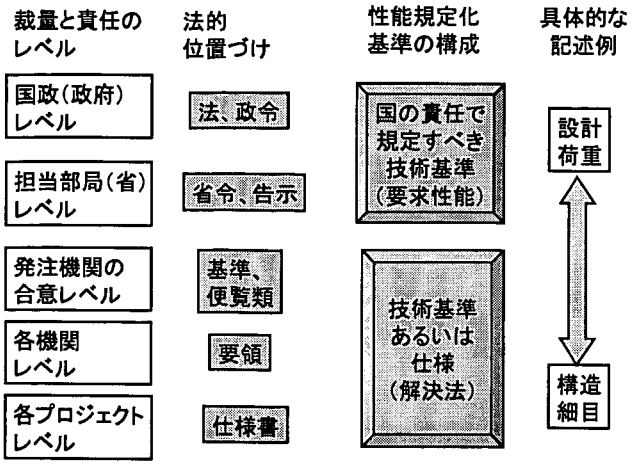


図-2「裁量と責任」を観点とした性能規定化基準の構成

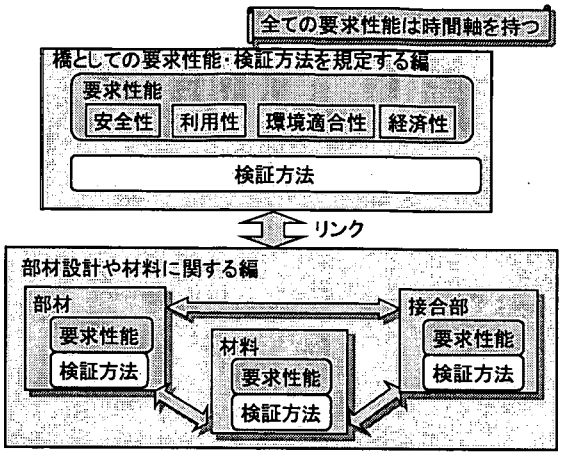


図-3「橋としての要求性能」を観点とした性能規定化基準の構成

2．2　鋼橋溶接部の品質管理に関する項目の整理

表-1に鋼構造物の溶接継手における、設計・施工・維持管理の各段階での品質管理の目的と内容をまとめたもの（品質管理マップ）を示す。ここであげた内容は、図-3中の接合部に関する内容の一部と関連するものである。

表-1　鋼構造物の溶接継手の品質管理に関するマップ

どの段階で	何の目的で	何をする(ができる)のか	備考
Ⅰ　設計	◎継手品質の要求レベル及び種類の設定 ・疲労(繰返し応力を受ける継手) ・靭性(耐震部材、極寒冷地仕様) ・静的強度 ・美観、出来型(外観、変形)	○概略設計 (弱点とならない)継手位置の設定 ○詳細設計 (施工・検査しやすい)継手の構造 ○疲労設計に応じた構造詳細選定	・道示Ⅱ第4章 ・誰が設計すべきか ・時期改訂版道示Ⅱに導入予定
Ⅱ　施工	◎設計で意図した品質の確保、確認		
Ⅱ-1　前段階	○適切な施工方法の確認 ・不良継手発生確率の抑制 ・責任の明確化	施工要領書の作成・承諾(合意) 【溶接施工試験】 ・使用材料、溶接法　・管理体制 ・品質検査の方法、頻度 【工場認定】	プロセス管理の前提条件 ・ISO9000シリーズとの関連 ・道示Ⅱ第15章
Ⅱ-2　施工中	○施工要領遵守の確認 ・品質レベル(ばらつきを含む)の確保 ・不良(手抜き)工事の排除	【常駐検査】 ・常駐検査員 ・任意検査権の確保	施工後に確認出来ない場合 ・検査員の資格 ・抜打ち検査の実施
Ⅱ-3　施工後	○継手品質の確認 ・品質レベル(欠陥)の確認 ・不良(手抜き)継手の排除	【非破壊検査】 ・UT、RT　・全数、抜取り、抜打ち 【外観検査】 ・目視、計測　・PT、MT 【出来型管理】 ・設計外の継手のチェック	外観検査では確認できない場合 ★極厚鋼板のAUTの開発 ・検査頻度と要求レベル 外観で確認できる場合 ・付属物、吊り金具、疲労に影響
Ⅲ　維持管理	◎引き渡し後のフォロー ・初期故障の発見 ・検査の不完全性を補完	○品質保証 ・瑕疵担保(2年、10年) ・長期保証	・現状 ・実現性は疑問

（西川、玉越、上仙、廣松）

12.3　品質規格の性能規定化手法の開発

研究期間：平成９～平成12
担当：化学研究室

【要旨】

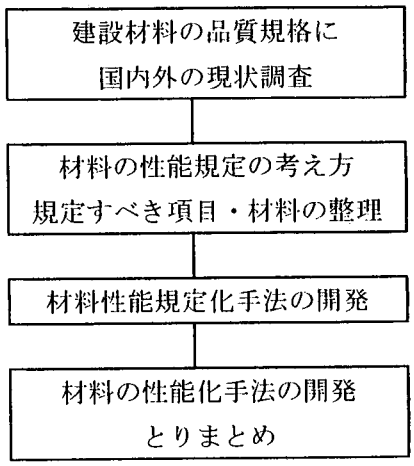
ＩＳＯ（国際基準化機構）等では、材料に関する試験法や機械等製品規格を中心に国際規格を整備してきた。近年、品質保証体制（ＩＳＯ9000シリーズ）や、構造物の設計基準、性能基準についても整備が進められつつある。我が国の建設分野においては、材料・部材等の要求品質と品質管理の手法を規定する仕様規定が一般的であった。しかし、国際整合化の観点から、性能を重視する性能規定の考え方へ移行していく必要が生じている。そこで、性能規格化に対応した新たな品質管理のしくみが必要となる。１１年度は材料の性能規定化の一例として塗装の要求性能や性能規定について検討した。

１．研究目的

塗装の要求性能や性能規定化の試案を作成することを目的とする。

２．研究方法

塗装に要求される性能を調査し、性能の数値化・性能の検証方法などについて検討を行い、塗装の性能規定化の試案を作成する。



３．研究結果

３．１　塗装の性能規定化

仕様規定は材料、工法、寸法等を具体的に規定することである。一方、性能規定化とは、何のために（目的）、何に対して（対象）、何を要求しているか（条件）を明確にすることである。さらに、要求される性能、性能水準およびその検証方法（計算方法、試験方法）を規定することである。

従来の仕様規定のもとでは、発注者が架設予定地の腐食環境に基づいて鋼道路橋塗装便覧（以下便覧と言う）から塗装系を指定し、受注者は便覧の品質基準に合格している塗料をメーカーから購入して、便覧に規定された塗装方法で塗装する。塗膜の品質保証は、塗装後の乾燥膜厚を便覧に規定した方法で測定して、その合格基準を満たすことである。

性能規定では、はじめに発注者が求める性能を明示する。受注者は要求性能を満足する材料、工法等を提案する。次に、発注者は要求性能を満足するか否かを検査する。塗装の性能規定化として、塗装の目標・要求性能・性能規定・検証方法および見なし仕様を整理すると表－１のようになる。塗装における性能規定化の技術的問題点は、要求性能を検証するための手法が完全に確立されていないことである。このような状況のもとでは、要求性能を検証しようとする時、暫定的な適合みなし仕様を検査するしかない。以下に塗装の性能規定化を行う上での具体的な検討課題を示す。

（１）要求性能と性能規定

塗装に求める要求性能は、鋼材の防錆、景観・美観、環境負荷低減と安全性である。

①鋼材の防錆：鋼材は、鋼構造物の信頼性に及ぼす影響が大きいので、構造物の機能を阻害しないことが求められる。すなわち、さびが発生しても所定の期間鋼材が板厚減少にいたらなければ、そのさびの発生は許容されるべきである。発注者は、ＬＣＣなどを検討してその期間を設定すればよい。

②景観・美観：鋼構造物が周辺景観との調和を乱したり、その汚れによる嫌悪感を周辺住民に与えないようにす

べきである。これらの機能に対する要求の度合いは構造物の設置場所によって異なる。

③環境負荷低減：塗料に含まれている揮発性有機溶剤（ＶＯＣ）が、夏季に都市内に光化学スモッグを発生させる原因物質の一つとされているので、その削減を図る必要がある。

④安全性：作業者の安全衛生上配慮および周辺環境を汚染しないため、塗料に含まれる有害物質（コールタールなどの発ガン性物質）や有害重金属（鉛、クロムなど）を排除することが望まれる。

（２）要求性能の検証

性能規定化のためには、使用材料や設計構造物の性能を検証する方法が必要である。防錆性能を検証する方法としては、塗膜の物理性状と促進試験による方法があるが、現時点では性能規定化のために十分整備されているとはいえない。景観性能を検証するには、促進耐候性試験が一般的である。しかし試験条件の設定に関するさらなる検討が必要である。たとえば、紫外線発生方式として、キセノン，ＱＵＶ，カーンボンアークなど、どの方式が最適か検討が必要である。また、試験時間と実際の耐用年数との関係も検証されていない。防汚機能は、防汚材料評価試験方法が適用できる。しかし、防汚性能の持続期間は検証することできてない。環境負荷低減を検証するため、ＶＯＣの測定方法は確立されている。安全性を検証するため、有害物質の有無を検証する方法は確立されている。

（３）見なし仕様

塗装の性能規定を検証する試験方法が完全に確立されていないのが現状である。そこで、当面は見なし仕様を適用して対応していかざるを得ない。

表－１　塗装の性能規定化

目標	要求性能	性能規定	性能規定の検証方法	見なし仕様
鋼材の腐食によって鋼構造物の機能を阻害しない。	腐食減（板厚減）を生じない	鋼材を所定の期間防錆する。	1）透水係数，遮塩性，酸透過係数 2）複合環境腐食促進試験	全工場塗装Ｃ塗装系
周辺景観との調和を乱さない。	構造物の美観を保持する。	景観機能：美観性を所定の期間維持する。 防汚機能：汚れにくい・汚れを落としやすい機能を保持する。	景観機能 促進耐候性試験（キセノン）3000時間；光沢保持率70%以上，色差ΔＥ*10以下 防汚機能 ①防汚材料評価促進試験方法Ⅰ（案）；ΔＬ*-7.00以上 ②防汚材料評価促進試験方法Ⅱ（案）；ΔＬ*-5.00以上	景観機能 ふっ素樹脂塗料上塗り 防汚機能 ①土木用防汚材料Ⅰ種 ②土木用防汚材料Ⅱ種
環境に過大な負荷を与えない。	周辺環境への負荷を削減する。	ＶＯＣを所定量削減する。	ＶＯＣ量の定量分析	環境にやさしい塗装系
安全性を維持する。	作業者の安全性を確保する。 周辺環境を汚染しない。	有害重金属および有害物質を含まない。	①鉛，クロム量の定量分析 ②コールタール量の定量分析	クロム等有害重金属およびコールタールを含まない。

（明嵐、守屋、寺田）

12.4　コンクリート材料・構造物の品質検査技術の開発（非破壊検査・高知能検査等）

研究期間：平９～平12

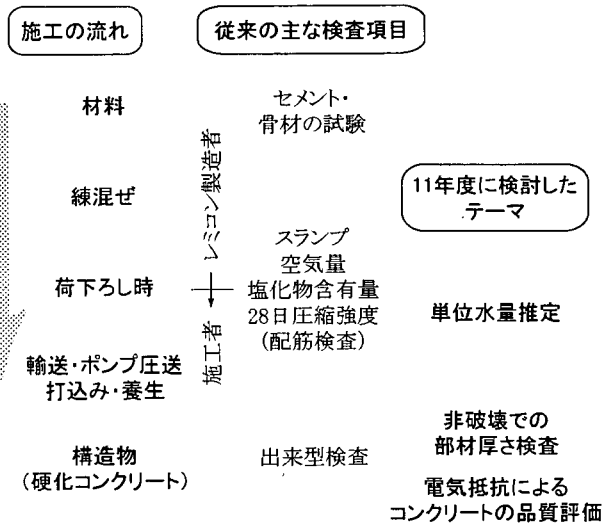
担当：コンクリート研究室

【要旨】

コンクリート構造物の耐久性評価を行うためには，コンクリート自体の耐久性や鋼材保護性能に密接に関係する水セメント比や養生条件の良否等を把握できる試験方法が必要である。そこで，10年度まで室内試験で検討してきたフレッシュコンクリートの単位水量推定方法を現場で適用し，合理的な品質管理法を提案した。また，硬化後の構造物のコンクリート品質を，電気抵抗測定によって評価する方法について基礎的検討を行った。一方，舗装などの部材については，コンクリート部材の厚さを確保することが耐荷力・耐久性を確保する上で重要になることから，超音波等を用いた非破壊のコンクリートの部材厚さ測定方法についても検討を行った。

１．研究目的

従来のコンクリート構造物の品質管理体系の中では，受入れ時にスランプ試験，空気量試験等を行い，標準供試体を作成して材齢28日の圧縮強度を測定することで，使用した材料の適切さを確認する方法が一般的である。しかし，圧縮強度の測定までには時間がかかり，仮に使用した材料が不適切であったことが判明しても大規模な補修や撤去が困難であるという問題点がある。そこで，検査の迅速化や品質に対する責任の明確化を可能にするため，受け入れ時にフレッシュコンクリートの配合，特に単位水量を確認する方法について検討した。



図－１　研究の概要

ただし，実際の構造物中のコンクリートの良否は，打込み前の材料の良否に加え施工時の養生条件等の良否に影響されるので，硬化後のコンクリートの品質評価手法も必要である。鉄筋コンクリート構造物の耐久性確保の面からは，コンクリートの鋼材保護性能が重要であり，施工の影響等も含めてこれを評価する方法の一つとして，電気抵抗測定による硬化コンクリート品質評価について基礎的な検討を行った。

一方，舗装や床版などの部材では，コンクリートの厚さを確保することが耐荷力・耐久性を確保する上で重要である。従来の検査では，打込み前にレベル等を用いて確認する，完成後コアを抜いて確認するといった方法が通常用いられているが，それぞれ，事前に検査位置が明らかになる，労力が大きくかつ構造物を傷つけるといった問題がある。そこで，超音波・電磁波等を用いた非破壊での部材厚さ測定方法の改良についても検討を行った。

２．研究内容

２．１　フレッシュコンクリートの単位水量推定方法についての検討

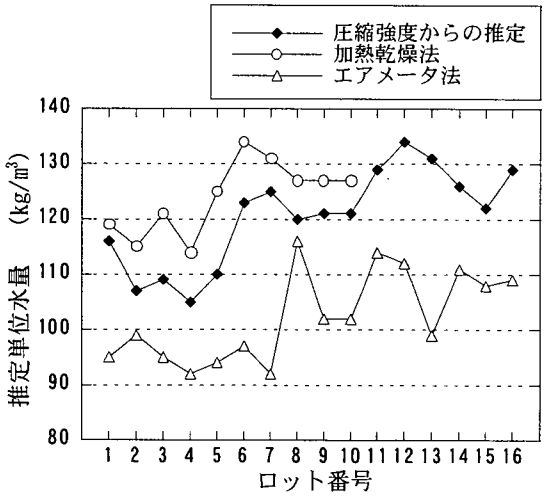
コンクリートの品質は主に水セメント比によって決定される。このうち単位セメント量については，生コンプラントの計量装置の精度向上や自動記録装置の普及により比較的容易に把握できる。一方，単位水量については，骨材の表面水量の変動等の影響でその真の量を的確に求めることは困難である。そこで，フレッ

シュコンクリートの単位水量を推定する方法として,原理が単純で誤差要因が少なく現場への適用性が高いと考えられる乾燥炉を用いた加熱乾燥法（以下，乾燥炉法）と，簡易法としてエアメータを用いた単位容積質量法（以下，エアメータ法）について検討を行っている。９年度，10年度は室内実験でこれらの推定方法を検討した。11年度は，実施工での試験を行うとともに合理的な品質管理法の提案を行った。

図－２に，実施工で単位水量の推定を行った結果を示す。乾燥炉法は約２kgのコンクリート試料を加熱乾燥し蒸発量から単位水量を推定した。また，乾燥後の試料を洗い出して粗骨材量の補正を実施した。エアメータ法は無注水法によって空気量を求めるとともに質量を測定し,試料の単位容積質量から単位水量を推定した。また，図－２には，生コン工場での実績から得られた強度と水セメント比との関係式を用いて，材齢28日の圧縮強度から推定した単位水量の値を併せて示した。なお，このコンクリートの示方配合上の単位水量は135kg/m³である。

乾燥炉法から得られる推定単位水量の値は，圧縮強度から得られる値と比較して一様に10kg/m³程度高いものの，双方のグラフの増減傾向は非常によく一致している。推定単位水量の絶対値として，どちらの推定結果が正しいかを検証することはできないが,乾燥炉法による推定値がフレッシュコンクリートの単位水量の増減を的確に捉えていることが確認された。一方，エアメータ法で得られた推定単位水量の値は，かなり少ないものとなった。単位容積質量をもとに単位水量を推定するエアメータ法では,コンクリートの質量の大半をしめる骨材の密度の測定誤差が推定単位水量に大きな影響を与えることがあり,今回推定単位水量の値が少なかったのもこのためと考えられる。ただし，骨材の密度が急激に変化する可能性は低く，今回の試験においても，データにばらつきはあるものの，前半の１～５バッチの単位水量が少なく後半になるに従い単位水量が増加していく傾向を概略的にとらえることができた。

９年度から11年度まで行ってきた検討の結果，現状では,精度の高い推定を行うには高出力の乾燥炉などの装置と手間(時間)が必要で頻繁に行うことは困難であること，一方，高い推定精度は期待できないが，エアメータ法のような手間のかからない方法であれば,日常の施工管理に適応できる可能性が高いことがわかった。そこで，各手法の特質を考慮し，表－１に示すような品質管理法を提案した。



図－２ 実施工における単位水量推定結果

表－１ フレッシュコンクリート単位水量の品質管理法の提案

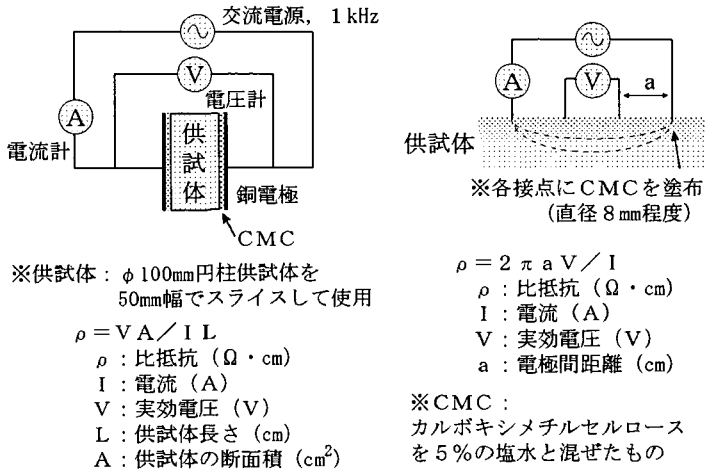
位置づけ	対象	試験方法	試験の頻度
品質検査（抜き打ち検査）	中強度配合	乾燥炉法(コンクリート試料)	随 時
	高強度配合	乾燥炉法(ウェットスクリーンモルタル試料)	
日々の品質管理	重要構造物	エアメータ法(注水法)	空気量測定頻度と一致
	一般構造物	エアメータ法(無注水法)	

２．２ 電気抵抗測定による品質評価に関する基礎的検討

鉄筋コンクリート構造物の耐久性を確保するためには,かぶりコンクリートによる鋼材の腐食保護を確実にすることが重要である。かぶりコンクリートの鋼材保護性能は，コンクリート部の透過性の把握とかぶりの厚さによって評価が可能になる。しかし，コンクリートの透過性を評価する試験方法はいくつか提案されているものの，試験条件や機器の制約から，まだ一般的には用いられていないのが実状である。そこで，10年度から,比較的現場に適用しやすいと考えられる電気抵抗測定によるコンクリートの透過性評価方法を選

定し，実験室内で基礎的な検討を行っている。10年度は，円柱供試体を用いた測定方法（以下，対面電極法）で，飽水状態のコンクリートの電気抵抗と塩化物イオンの浸透性に相関があることを確認した。

11年度は，現場への適用を考慮して，30×30×50cmの供試体の一面から電気抵抗を測定する方法（以下，４極法）を検討した（図－３）。11年度は，①４極法と対面電極法との測定結果の比較，②４極法を用いた場合の電極間距離や電圧などの測定条件の影響，③供試体の吸水操作と電気抵抗の関係，等に着目して試験を行った。



※供試体：φ100mm円柱供試体を50mm幅でスライスして使用

$\rho = VA / IL$

ρ：比抵抗（Ω・cm）
I：電流（A）
V：実効電圧（V）
L：供試体長さ（cm）
A：供試体の断面積（cm^2）

※各接点にCMCを塗布（直径８mm程度）

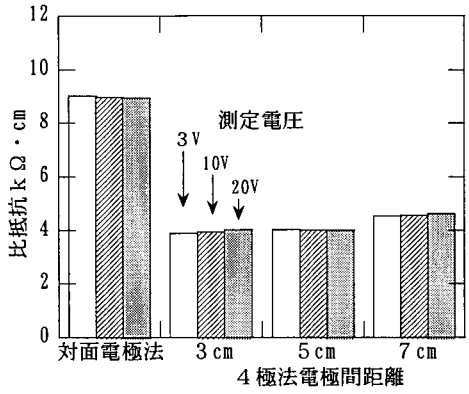
$\rho = 2\pi aV / I$

ρ：比抵抗（Ω・cm）
I：電流（A）
V：実効電圧（V）
a：電極間距離（cm）

※CMC：カルボキシメチルセルロースを５%の塩水と混ぜたもの

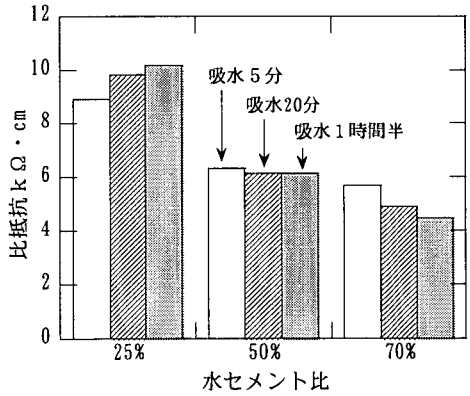
図－３ 電気抵抗計測方法

水中養生後すぐに計測を行った飽水状態での電気抵抗測定結果を図－４に示す。４極法による計測結果は，対面電極法よりも比抵抗が小さくなった。これは，対面電極法の場合と異なり，測定面が電流の流れやすいモルタル分で覆われていることがその理由の一つと考えられる。４極法の測定条件に着目すると，測定電圧（３～20V）による違いは明確には見られなかった。



図－４ 飽水状態での電気抵抗測定結果
（W／C 50%，28日水中養生）

ところで，実際の構造物のコンクリートを直接測定する際には，実験室の場合と異なり完全な飽水状態にすることは困難である。そこで，気中で養生を行った供試体に散水して電気抵抗を測定し，コンクリート品質の評価を行うことが可能か試みた。その結果，10年度に行った対面電極法での測定結果と同様に，水セメント比が大きい供試体ほど比抵抗が小さくなることが確認された。また，水セメント比が大きい供試体では吸水時間を長く取るにつれて比抵抗が小さくなるが，水セメント比25%の供試体では５分以上の吸水時間の多少がほとんど影響を与えなかったこともわかった。一例として，電極間距離５cm，測定電圧10Vでの測定結果を図－５に示す。この他，鉄筋の影響についても試験を行い検討した。



図－５ 吸水させての電気抵抗測定結果
（湿潤養生２日の後28日まで気中に放置）

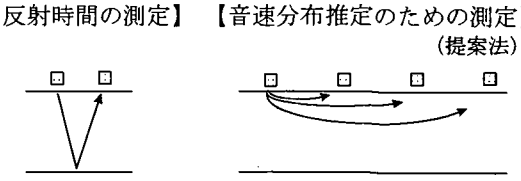
11年度の検討の結果，鉄筋の影響を受けないように十分考慮すれば，４極法でコンクリートの電気抵抗を測定しその品質を評価できる可能性があることがわかった。今後は，実構造物に用いた場合の具体的な測定方法や適用範囲，測定時の温度の影響等について明確にしていくことが課題である。

２．３ 非破壊での部材厚さ測定方法に関する検討

コンクリート部材の厚さを確保することは，舗装の場合などで耐荷力・耐久性確保の重要なポイントとなる。そこで，超音波を用いた非破壊での部材厚さ測定方法がいくつか提案されている。超音波を用いた測定は，構造物を傷つけず，任意の箇所で測定できるという利点がある。しかし，従来の方法ではコンクリート内での超音波の音速を一定と仮定しているため，この仮定に起因する数%の誤差を避けられず，検査に適用

できるほどの精度が得られないという問題がある。

そこで，あらかじめコンクリート部材内の音速分布を推定するための測定を行って精度を向上させる方法（図－6）を提案し，供試体を作製して確認のための試験を行った。試験結果を表－2に示す。版状の供試体Aを用いて打設面から計測したケースでは，提案法の効果が認められた。これは，ブリージングや乾燥等の影響を受け，打設面近くと供試体内部で音速の相違があることを，提案法によりうまく求めることができたためと考えられる。一方，壁状の供試体Cを用いて打設方向と垂直な方向で測定したケースでは，提案法の効果は明確には認められていない。この測定箇所の内部ではコンクリート品質の変化がほとんどなく音速がほぼ一定であったためと考えられ，提案法の音速分布の形状を検討する必要がある。



※反射時間と音速から版厚を求める
※従来法では音速の仮定方法が明確でなかった。
※提案法では，端子間の距離を変えて数点測定し，変分法により深さ方向の音速分布を推定

図－6 超音波による部材厚さの測定方法

この他，同じ供試体を用い，電磁波，衝撃弾性波を用いた部材厚さ計測方法についても検討を行った。

表－2 部材厚さの測定結果

供試体	測定面	設計厚さ	従来法		提案法	
			測定結果	測定/設計	測定結果	測定/設計
版状A	打設面	300	267.3	0.891	298.0	0.993
版状B	打設面	225	214.6	0.954	241.8	1.075
壁状C	側面Ⅰ	100	95.9	0.959	100.5	1.005
	側面Ⅱ	200	199.9	1.000	211.5	1.058
	側面Ⅲ	400	389.5	0.974	475.7	1.189
	側面Ⅳ	600	603.4	1.006	717.3	1.196

※厚さの単位は全てmm
※従来法では，音速一定と仮定（表面音速を使用して算出）
※提案法では，深い部分のコンクリートほど，ルート分布に従って音速が大きくなると仮定（壁状の場合は，中央で音速最大）

3．主な研究成果物

・河野広隆，加藤俊二，田中秀和，片平博：高温加熱によるフレッシュコンクリートの単位水量迅速判定方法の検討，土木研究所資料第3611号，1999.3
・河野広隆，片平博：フレッシュコンクリートの単位水量迅速推定法に関する実験的研究，土木研究所資料第3657号，1999.7
・片平博他：「加熱乾燥法によるコンクリート単位水量迅速推定法」，土木技術資料，Vol.41，No.12，pp.62-67，1999.12
・片平博他：「エアメータを利用したコンクリート単位水量迅速推定法」，土木技術資料，Vol.42，No.3，pp.64-69，2000.3
・片平博他：「フレッシュコンクリートの単位水量を迅速に推定する方法について」，土木技術資料，Vol.42，No.4，pp.6-7，2000.4
・片平博，河野広隆：「加熱乾燥法によるコンクリート単位水量迅速推定法の特性」，第23回日本道路会議一般論文集（B），pp.328-329，1999.10
・田中秀和他：「高温加熱による単位水量迅速判定方法の検討」，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.301-306，1998.6
・田中良樹他：「光ファイバー温度センサーを用いたＰＣグラウト管理法に関する基礎的研究」，（社）プレストレストコンクリート技術協会，第8回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.65-70，1998.10
・河野広隆，渡辺博志，田中良樹，鹿島孝之：コンクリートの電気抵抗による耐久性評価の基礎的研究，土木研究所資料第3716号，2000.3
・鹿島孝之，河野広隆，渡辺博志，田中良樹：「コンクリートの電気抵抗による耐久性評価の基礎的研究」，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.895-900，1999.6
・鹿島孝之，河野広隆，渡辺博志，田中良樹：「コンクリートの電気抵抗に及ぼす含水状態の影響」，土木学会，第2回構造物の診断に関するシンポジウム論文集，pp.113-116，1999.8
・森濱和正：「超音波による正確なコンクリート版厚の測定方法」，土木技術資料，Vol.41，No.2，pp.38-43，1999.2
・河野広隆，田中良樹，古賀裕久：コンクリート構造物基準類の性能規定化に関する検討，土木研究所資料第3594号，1998.9

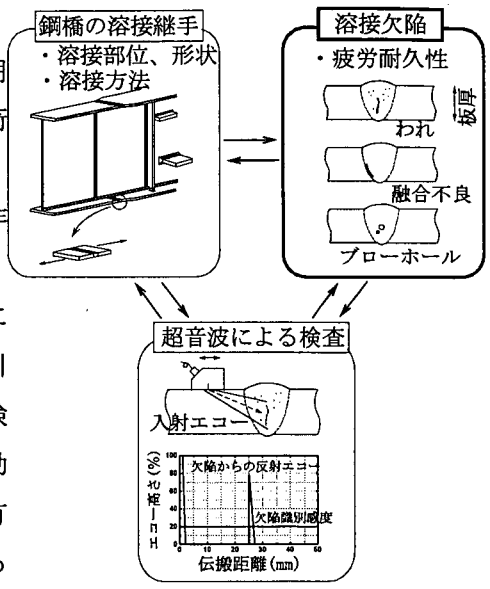
（河野・森濱・片平・田中・古賀）

12.5　鋼構造物の品質検査試験技術の開発（非破壊検査・溶接検査・塗膜検査等）

研究期間：平９～平１２

担　　当：橋梁研究室

【要旨】



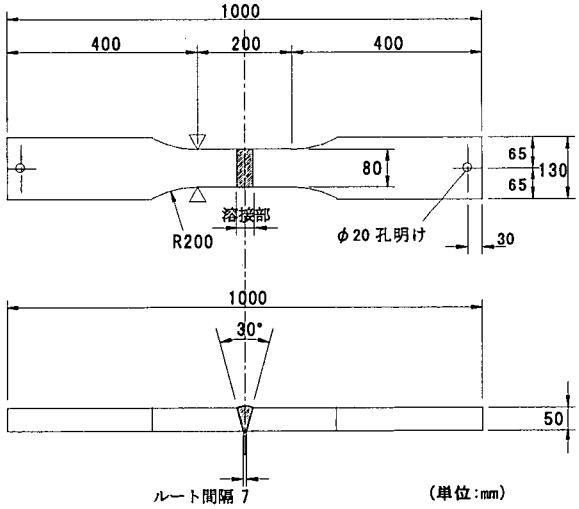
近年の経済の国際化や建設コスト縮減の動きに対し、競争力や透明性の確保、新技術の迅速な導入のためには、従来の仕様規定型の技術基準から性能規定型への移行が必要となってきている。本研究では、鋼道路橋について性能規定型基準としたときの要求性能の枠組みを作成し、性能規定型基準案を提案することを目標とする。

１１年度は、性能規定型の基準を目標とした場合の道路橋示方書における溶接継手に要求される性能を明らかにするため、１０年度に引続き、溶接継手部に各種の溶接内部欠陥を挿入した試験体の疲労試験を行った。また、要求性能の検証方法の一つである既存の超音波自動探傷試験(AUT)の能力を把握するため、AUTが実施された内部欠陥を有する試験体(別途製作)の破壊実験を実施した。その成果として、ある程度の大きさならば内部欠陥を有していても疲労強度が期待できることおよび内部欠陥の実際の形状寸法等が確認された。

１．研究方法

図－１に板厚50mmの試験体の形状寸法を示し、表－１に溶接内部欠陥の種類と挿入位置を示す。試験体板厚(鋼材質)は50mm(SM490C)、75mm(SM490C)を用い、それぞれの板厚の試験体に対し、表－１に示す内部欠陥を同じように挿入した。試験体の溶接継手には、鋼桁および鋼製橋脚の現場突合せ溶接を想定し、片面Ｖ形開先のＣＯ$_2$ガスシールドアーク溶接による多層盛り溶接を採用した。

疲労試験における載荷波形は正弦波として与え、繰返し載荷の周波数は10Hzとした。応力比Ｒ(＝σmin/σmax)はほぼ0とした。疲労亀裂の発生・進展の状況を調べるため、一部の試験体に対しては最大応力σmaxを一定としたまま所定の繰返し回数毎に応力範囲を半減させるビーチマーク試験を行った。



図－１　試験体の形状寸法(板厚50mm)

表－１　溶接内部欠陥のと挿入位置

名称	欠陥種類	欠陥挿入位置	
		深さ	溶接線直角方向断面
ＢＨ	群集ﾌﾞﾛｰﾎｰﾙ	中央	中央付近
ＬＦ	融合不良	裏波側	開先面に沿った位置
ＣＲ	割れ	初層	中央付近

２．研究結果

図－２～４にそれぞれ、BH、LF、CR試験体のS-N線図を示す。図中の記号◆の下添え数字は放射線透過試験にて測定した溶接線方向の欠陥指示長さを示しており、記号◆にアッパーラインが付いているもの（記号$\overline{◆}$）は溶接止端部から疲労破壊したことを示す。図中の一点鎖線は、(社)日本鋼構造協会における疲労強度分類のうちのＤ等級の疲労強度曲線である。図－２よりBH試験体の疲労強度はそのほ

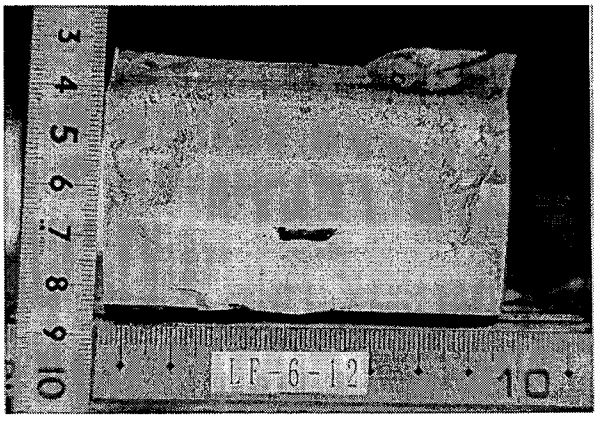
とんどがD等級以上であり，図－３よりLF試験体についてはほぼD等級の線に沿って分布している．図－４よりCR試験体では，欠陥寸法の大きい試験体の疲労強度がD等級よりも低い結果となっていることが分かる．

写真－１に破断面の例を示す。この試験体に対してはビーチマーク試験を実施した。写真－１はLF試験体において欠陥を起点とする亀裂が発生し破断に至った試験体の破断面である。欠陥を中心とした円形の模様は、欠陥を起点として放射状に亀裂が進んだ疲労破面と考えられる。この円形状の模様の疲労破面とその他部分の疲労破面の様子が外見上異なって見える理由は、次に述べることが原因と考えられる。先ず、欠陥を起点として放射状に亀裂が進み円形の疲労破面が形成され、真空状態のまま円形の形で疲労破面が徐々に大きく成長していく。次に、この円形の疲労破面が試験体裏波側表面まで進んだところで、亀裂破面が外気に触れ、破面の形成に大気による酸化等の影響が入り、疲労破面の様子が外見上異なって見えるものと考えられる。この縞模様により、亀裂が溶接止端部から発生したことが分かり、亀裂の進行過程の様子が分かった。

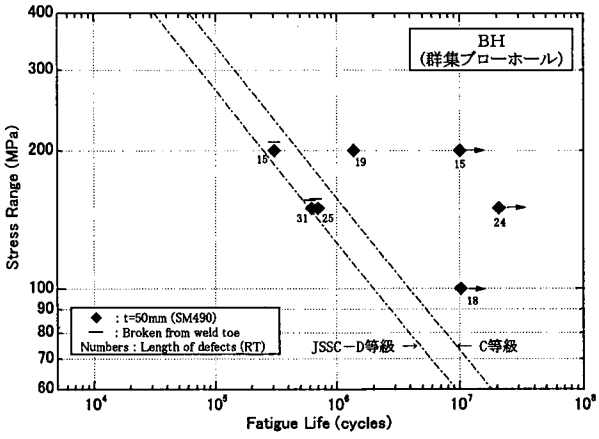
３．主な研究成果物

高橋、西川、川間他：内部欠陥を有する板厚50mmおよび75mmのＶ形開先突合せ多層盛り溶接継手の引張疲労強度試験、(社)土木学会第55回年次学術会講演概要集、平成１２年９月（投稿済み）．

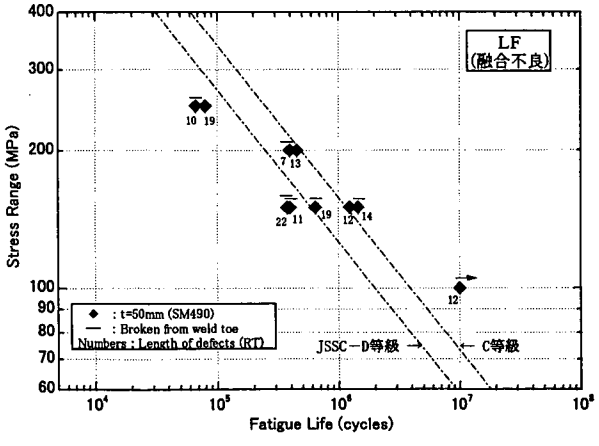
（西川、上仙、高橋、川間）



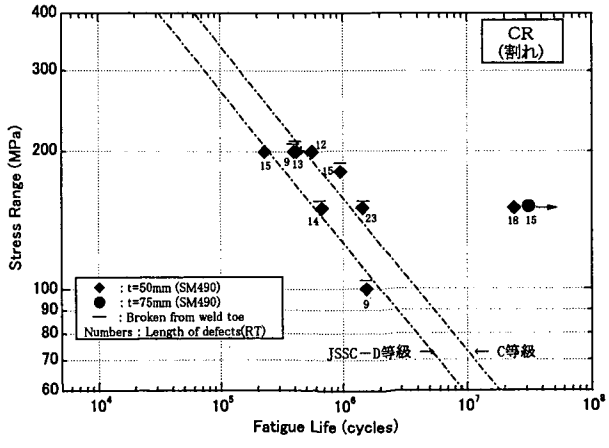
写真－１　破断面(LF試験体)



図－２　疲労試験結果(BH試験体S-N図)



図－３　疲労試験結果(LF試験体S-N図)



図－４　疲労試験結果(CR試験体S-N図)

12.6　鋼構造物の品質検査試験技術の開発（非破壊検査・溶接検査・塗膜検査等）

研究期間：平９～平１２

担当：化学研究室

［要旨］

国際化並びにコスト縮減のための建設事業の性能規定化が求められている。性能規定化に伴う鋼構造物の塗膜の防食性能や景観性能を保証するため、効率的で精度の高い検査技術が求められている。

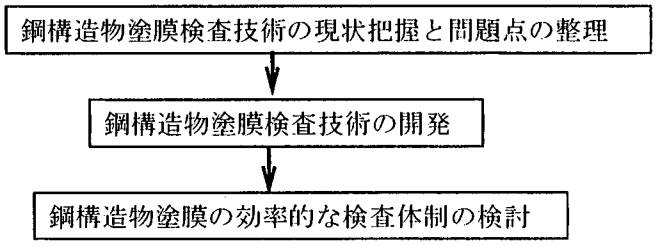
鋼構造物の塗膜検査は、塗料が十分に乾燥したのち電磁式膜厚計で所定の膜厚が確保されているか測定している。しかしながら、測定結果は、ばらつきが大きく、定められた均一な膜厚を確保することが困難である。そこで、塗膜厚をモニタリングしながら施工ができる塗料（省検査形塗料）の開発を行っている。

１１年度は、省検査形塗料の塗替え塗装への適用性を検討した。その結果、所定の膜厚が得られていることが確認され、塗替え塗装の膜厚管理に適用できることが判明した。

１．研究目的

効率的かつ簡便な塗膜検査方法として、所定の塗膜厚まで塗装が行われた時点で下地の色が隠ぺいされるように調整した省検査形塗料の適用性を明らかにし、鋼構造物塗装の膜厚検査を省力化する。

２．研究方法



２．１　塗替え塗装試験

変性エポキシ樹脂塗料が塗装されている高さ1.8m，幅1.7m，長さ6.5mの箱桁に省検査形塗料の塗替え塗装を行った。箱桁の腹板と下面に50cm角の部分に素地調整程度２種を施し旧塗膜を完全に除去した上に、専用プライマーを塗布した後、省検査形塗料局部用（150μm×２回で300μmに膜厚設定）をはけ塗りとローラー塗りで塗装した。また、局部用試験部位以外は、素地調整程度４種を施し省検査形塗料一般部用（60μm×２回で120μmに膜厚設定）をはけ塗りおよびローラー塗りで塗装した。このとき、はけ塗りおよびローラー塗りの塗装作業性と乾燥性を評価した。塗膜が十分に乾燥した後、電磁式膜厚計で旧塗膜を含めた膜厚を測定した。また、ペイントボーラーで塗膜を円錐状に削り取り、その断面の左右２点の省検査形塗料の膜厚を顕微鏡で測定した。さらに、塗膜の付着力も測定した。

３．研究結果

３．１　塗替え塗装試験

省検査形塗料一般部用の塗装作業性は、はけ塗り，ローラー塗装のいずれも特に支障はなかった。しかしながら、省検査形塗料局部用ははけさばきがやや重く、ローラー塗りののびもやや不足していた。

乾燥性は通常のエポキシ樹脂塗料とほとんど変わりはなかった。

塗装方法および塗装部位（側面と底面）の違いによる塗膜の初期付着力の差異は認められず良好であった。

箱桁に塗装した後十分に乾燥してから、電磁式膜厚計およびペイントボーラーで膜厚をで計測した。その結果を表－１に示す。

測定された一般部の膜厚は、はけ塗り，ローラー塗りともに箱桁の側面，下面，フランジ上面で目標値がほぼ確保された。ただし、添接板の膜厚は、電磁式膜厚計では十分な膜厚が確保されていたが、ペイントボーラーに

よる測定値は目標値120μmよりも幾分低くかった。これは、電磁式膜厚計が過大膜厚となっていた旧塗膜を含めた膜厚を測定したこと、およびボルトなどのために複雑な形状をしている添接板の膜厚が薄くなったのは、省検査形塗料の色調変化を確認しにくかったためと考えられる。すなわち、一般部に、省検査形塗料を適用できることが判明した。ただし、添接板に適用するためには塗装方法等の改善が必要であることが明らかとなった。

表－1　塗膜厚測定結果

塗　料	塗装方法	測定位置	電磁式膜厚計　(μm)						ペイントボーラーによる測定値（μm）
			測　定　値					平均値	
省検査形塗料一般部用	はけ	北側側面	418	417	374	376	384	３９４	１２１
		南側側面	423	439	439	396	486	４６７	－
		下面	421	452	399	412	358	４０８	－
		北側添接板	499	497	538	503	528	５１３	１０７
		南側添接板	636	511	598	638	578	５９２	１１０
		下面添接板	535	528	580	501	542	５３７	１０９
		北面下フランジ上面	432	387	288	279	380	３５３	１５７
		南面下フランジ上面	489	515	464	544	416	４８６	－
	ローラー	北側側面	470	473	410	376	444	４３５	１９３
		南側側面	385	373	373	372	386	３７８	－
		下面	396	337	322	315	313	３３７	－
		北面下フランジ上面	360	300	383	340	335	３４４	１５７
		南面下フランジ上面	442	408	461	420	395	４２５	－
省検査形塗料局部用	はけ	北側側面	361	321	393	403	324	３６０	３５０
		南側側面	393	390	358	406	390	３８７	３７９
		北側下面	363	387	325	401	364	３５８	－
		南側下面	344	323	320	321	327	３２７	－
	ローラー	北側側面	368	344	443	412	413	３９６	－
		南側側面	363	384	387	428	370	３８６	４２１
		北側下面	363	387	325	401	364	３６８	－
		南側下面	348	347	318	395	320	３４６	－

注）省検査形塗料一般部用の電磁式膜厚計の測定結果には、旧塗膜の膜厚分を含む

（明嵐，守屋）

12.7　土構造物の品質管理技術の開発

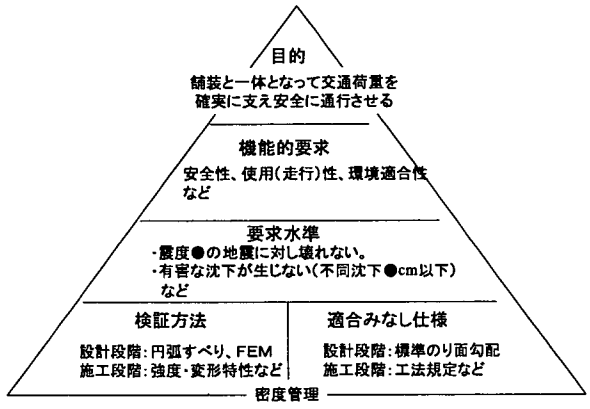
研究期間：平９～１２
担当：施工研究室

【要旨】

道路土工は、現在、原則として道路土工要綱・指針に従って設計･施工されている。しかし、近年は、技術の向上等によりこれらの要綱・指針に盛り込まれていない新工法が数多く出現してきている。これらの新工法を採用することによって、品質向上、コスト縮減等の効果が見込まれる場合であっても、要綱・指針に盛り込まれていないことが理由で採用に踏み切れないことが多くある。こうした事態を解決するため、本研究においては、従来の詳細な仕様に拘束されず、構造物に要求される性能あるいは品質を明確にし、的確に品質を確認できる検査手法を導入することによって品質管理の合理化を図り、品質向上とコスト縮減を図るものである。10 年度は、土構造物の品質に着目した性能規定化の対象分野の絞り込み、技術基準や設計・契約図書類の変更点および導入すべき検査手法について検討した。11 年度は、土構造物の代表的な構造物である道路盛土を対象に要求性能の明確化とそれに対応する検証方法について検討を行った。

1　道路盛土の要求性能

道路盛土について、ＮＫＢアプローチ（ノルディック建築基準委員会）手法によって要求性能を階層整理した例を図－１に示す。また、機能的要求の安全性および使用（走行）性について、道路盛土の各部位ごとの重要度、要求水準、品質、検証方法等について、表－１のように整理した。性能規定化の目的とは、構造物に要求される性能のみを明示し、施工法や検証方法に自由度を持たせることによってコスト縮減や品質の向上を図ることである。このため、現実的に性能規定化による効果が発揮される道路は、図－２に示すように重要性の高い主要幹線道路やコスト縮減が期待できる大規模な盛土に限定されるものと考えられる。

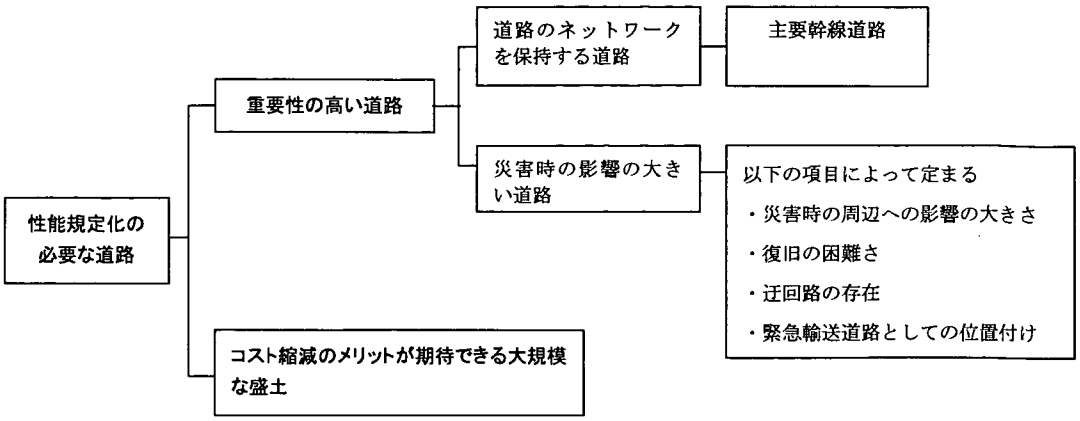


図－１　道路盛土の階層分類

表－１　各部位による要求性能の重要度

盛土全体の要求性能	要求性能	部位				
		構造物裏込め土	一般部			
			路床	路体	のり面	
					全体	表層
安定性	すべらない(常時)	○	○	◎	◎	○
	すべらない(地震時)	○	○	◎	◎	○
	すべらない(降雨時)	○	○	◎	◎	○
	交通荷重に対する支持力	○	◎	○	－	－
	エロージョン	－	－	－	－	◎
使用(走行)性	有害な段差を生じない	◎	○	○	－	－

◎：要求度が高い　○：要求がある　－：特に要求されない



図－２　性能規定化の効果が発揮される道路

２　性能規定化を前提とした品質管理

表－２に道路盛土の各品質管理手法の特徴を示す。前述したように道路盛土の安定性に関する要求性能の施工時の検証方法として、地盤の強度や変形特性による品質管理や検査手法が考えられる。強度や変形特性による品質管理は、測定がシンプルでリアルタイムに行えることから、盛土全体の品質をチェック可能である反面、含水比の影響を大きく受ける。このため、現状では、直接的な盛土の要求品質でない密度計測を原則とした締固め度等の管理が中心となっている。今後の性能規定化を前提とした品質管理や品質保証等を想定した場合、含水比に左右されない土質条件であれば、強度・変形特性による品質管理手法を導入し、密度管理とともに併用されることが望ましいと考えられる。

表－２　各品質管理手法の特徴

管理規定	メリット	デメリット	摘要
締固め度、飽和度、空気間隙率の規定	・含水状態に対して鈍感 ・**長期安定性**を保証しやすい ・目標とする品質(せん断強度、変形性、透水性)を予測しやすい。	・盛土の要求品質を直接確認できない。 ・測定に**手間**がかかる。 ・従来は点的な管理である。 ・飽和度、空気間隙率の管理は含水比の高い粘性土では問題がある	ＲＩ法、砂置換法による現場密度管理
強度・変形の規定	・盛土の要求品質を直接確認できる ・測定が簡便なため短時間で多量のデータが取得可能。 ・面的に管理可能である。 ・**施工へのフィードバック**を行いやすい。	・含水比の変化によって**強度変化が大きい**。	衝撃加速度法、貫入試験、プルーフローリング等
工法の規定	・工事の監督並びに施工の管理が**直接的でわかりやすい**。	・盛土の品質を直接確認するものではない。 ・試験施工によって品質を確認し、**締固め機種と締固め回数を決定すること**が原則。	ＧＰＳによる転圧回数管理

３．今後の課題

11 年度は、土構造物の代表的な構造物である盛土を対象に要求性能の明確化と検証方法について検討した。12 年度は、改良工法地盤や土留め構造物等も対象として検討を行う予定である。

(大下、青山、森)

12.8　施工情報活用による品質管理・検査の合理化技術の開発（シールド工）

研究期間：平10～平12

担　　当：機械研究室

【要旨】

近年の国際社会において，WTO/TBT協定に示されるように，技術仕様はデザインまたは記述的に示された特性よりも，性能に着目して定めることが求められている。また，国内においては，公共工事のコスト縮減のために，品質管理・検査の合理化に取り組むこと等が求められている。このような要求に対応するためには，構造物に本来要求されている性能に着目して，これを実現する設計・施工の効率的な品質管理・検査の実施が考えられる。本研究は，シールド工事を事例として，性能に着目した品質管理・検査の合理化方法の検討を行うものである。

本研究の全体計画を図-1に示す。要求される性能を実現して構造物の品質を確保するためには，設計・施工にわたる品質管理・検査の実施が必要である。設計・施工にわたる品質管理・検査の項目は広範囲にわたるため，本研究においては，施工の品質管理・検査について行うこととする。

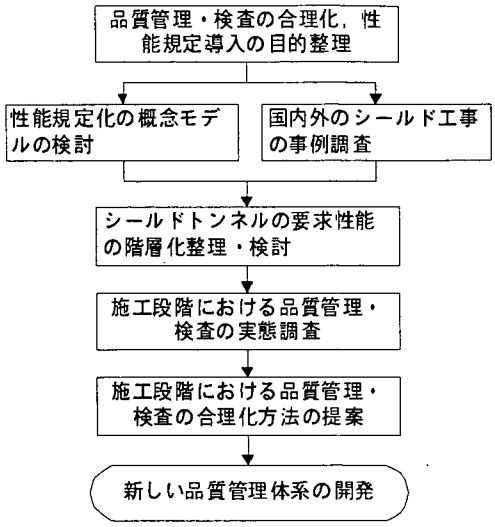


図-1 研究計画

1.　研究方法

シールドトンネルに求められる性能と品質および検査項目の関係を明らかにするために，要求性能の階層化整理し，階層化された要求性能の実現に必要な施工段階での品質管理・検査項目を整理検討する。品質管理・検査の合理化検討においては，この整理方法をいくつか提案して比較することにより，最も判りやすい整理方法を選定することとした。選定した整理方法により，現在の品質管理・検査の問題点を下記のような事項について抽出するとともに，新たな品質管理・検査方法を提案する。

1. 同じ要求性能を実現するために，不必要に複数の品質管理・検査が行われているもの
2. 同じ要求性能を実現するために，施工の進捗に従って何度も重複して品質管理・検査が行われているもの
3. 必要な事項であるが，現状において，品質管理・検査が行われていないもの

2.　研究結果

10年度に行ったシールドトンネルの要求性能では，シールドトンネル全体の要求目的を11項目に整理した。この整理結果を5項目にまとめて，品質管理・検査の実施方法を検討した。とりまとめた分類を表-1に示す。

この5項目について，シールドトンネルの構成要素に着目した性能を階層化し[(1)]，品質管理・検査方法との関係を整理する。品質管理・検査方法の整理方法として，図-2から図-5を提案し，現状の整理を行った。

表-1 シールドトンネルの要求目的

シールドトンネル全体の要求目的		シールドトンネル全体の要求性能
外力に対する安全性	goal1	トンネルへの作用荷重（供用時の内外荷重）に対して安全に抵抗できる、構造上の必要な強度を有している.
	goal3	あらかじめ明示された地震時荷重（トンネル縦断方向荷重、横断方向荷重）に対して強度的に安全である.
	goal5	熱によるコンクリートの強度劣化を防止できる.
	goal7	浮力に対して構造上安定している.
所要の水密性	goal4	トンネル外部から内部への漏水を、トンネルの排水機能で対応可能な漏水量以下に抑えることができる.
所要の出来形	goal2	トンネル用途に障害となるような変形が生じない.
	goal8	トンネル用途に適合した内面形状と大きさを有する.
	goal9	トンネル用とに適合した出来形（線形）および仕上がり状況を有している.
周辺環境に対する影響が少ない	goal10	供用期間中に周辺環境へ及ぼす影響が少ない.
	goal11	工事発注者が果たすべき責任範囲において、施工中に周辺環境に及ぼす影響が少ない.
所要の耐久性	goal6	要求する供用期間において、あらかじめ明示された維持管理手法により、性能を維持できる.（寿命に関する要求）

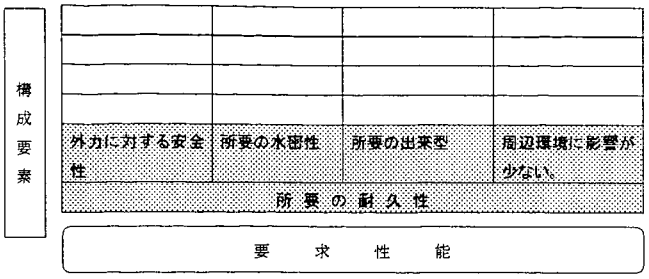


図-2 品質管理・検査方法の整理(表形式①)

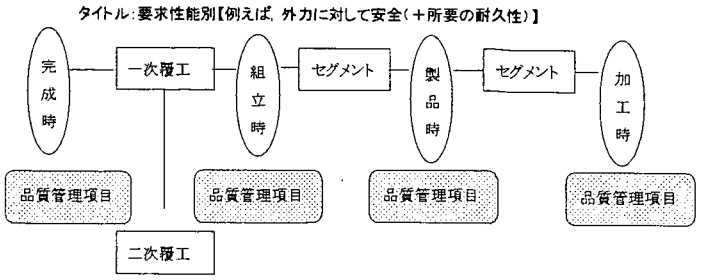


図-3 品質管理・検査方法の整理(ツリー形式①)

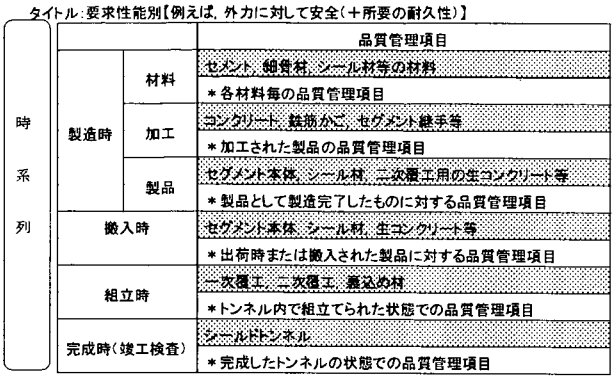


図-4 品質管理・検査方法の整理(表形式②)

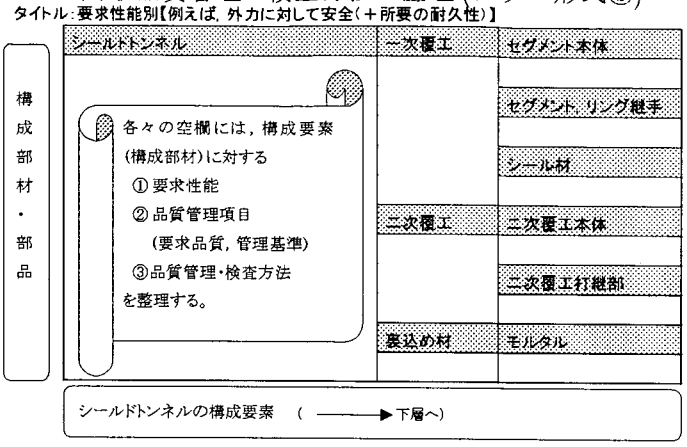


図-5 品質管理・検査方法の整理(表形式③)

それぞれの利点と欠点を表-2に示す。シールド工事の施工における現状の品質管理・検査方法について，各整理方法により整理を行っている。

表-2 品質管理・検査の各整理方法の特徴

	表形式①	表形式②	表形式③	ツリー形式①
品質管理・検査の全体を一覧できる	○	×	×	×
構成要素の階層性が明確である	×	○	○	○
品質管理・検査項目を時系列に評価できる	×	△	○	△
構造物から部材要素にいたるまでの品質管理項目が整理できる	△	○	○	○
品質管理項目と品質管理・検査方法の内容が詳しくわかる	△	○	△	×

3. 今後

11年度に行った現状の品質管理・検査方法の整理結果をさらに詳細に検討を行い，シールド工事の施工における合理的な品質管理・検査方法について提案する。また，この事例検討の結果に基づき，性能に着目した品質管理・検査の合理化の検討方法についてとりまとめる予定である。

4. 主な研究成果物

○ 田中和嗣・村松敏光・持丸, シールド工事の性能規定化のための要求性能の検討,CS,pp.190-pp.191, 土木学会第54回年次学術講演会,1999.9.

○ 田中和嗣・村松敏光・持丸修一, 土木工事における要求性能の明確化の手法-シールド工事を用いた事例検討-,pp.13-pp.24, 第17回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会,1999.12.

＜参考文献＞

(1) 田中・村松, 土木工事における品質と性能の関係の概念モデル, 第16回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会,pp.65-pp.72,1998.12.

(村松敏光，田中和嗣)

12.9　公共土木工事の発注体系に関する調査研究

研究期間：平９～平１２
担　当：建設マネジメント技術研究室

【要旨】

近年、ＷＴＯなどの世界的な潮流として、また、設計・施工の自由度の向上や技術開発の促進を目的とした土木構造物の設計・施工に関する技術基準類の性能規定化が検討されてきている。

本研究は、これら技術基準類の性能規定化等により新技術採用の自由度向上をはかった際の品質確保の方策を探るために、現在の発注体系における品質確保方策の整理すると共に性能規定化された発注における品質確保に関する課題の整理を行った。

１．研究方法

契約書、共通・特記仕様書・各種技術基準類から構成される現在の契約図書において規定されている品質確保に関する整理を行った。（図－１）

また、これら品質確保の体系について、性能規程化された場合に与える影響及び問題点の把握を行った。

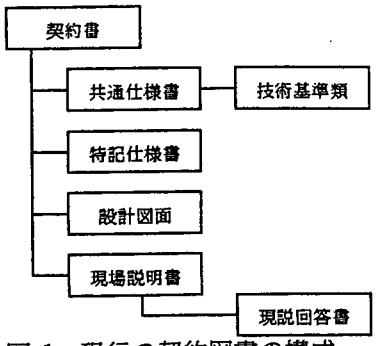


図-1　現行の契約図書の構成

２．研究成果

２．１　現行の品質管理体系

現在の品質管理の体系を大きく以下の３つに分類して整理した。

①技術管理による品質管理

②契約行為に基づく品質に関する発注者の権利

③受注者側管理による品質確保方策等

（１）技術管理による品質確保（表－１）

表-1　技術管理における品質確保方策

	設計	施工	備考
技術基準類	・共通・特記仕様書 ・調査職員の承諾した技術基準（共通仕様書では247種）	・共通･特記仕様書 ・土工11種、鉄筋ｺﾝｸﾘ５種…	
監督・検査	― （具体な検査・監督基準なし）	・土木工事監督技術基準 ・土木工事監督技術マニュアル ・土木工事施工管理基準及び規格値 ・土木工事写真管理基準	【会計法29条11】 ・契約の履行確保のために監督を行う。 ・完了の確認のをするための必要な検査を行う。

（２）契約行為に基づく品質に関する発注者の権利（表－２）

契約行為における法的な修補等の権利を行使することにより品質を確保する。

表-2 契約による品質確保方策

発生時期	受注者の責任	発注者の権利
完成前	債務不履行責任	解除権（契約を解除する権利）
		完全給付請求権（修補等により完全な給付を請求する権利）
		損害賠償請求権（発注者の損害に対する賠償金を請求する権利）
完成後	瑕疵担保責任	瑕疵修補請求権（瑕疵の修補を請求する権利）
		損害賠償請求権（発注者の損害に対する賠償金を請求する権利）

（3） 受注者側の管理による品質確保の促進等（図－2）

上記2点以外に以下の品質確保方策が契約図書上位置づけられている。

・設計成果の照査技術者による照査（設計）
・設計成果の施工者による照査（設計）
・ISO9000（設計、施工）
・品質保証制度（施工）
・業者選定における事前審査

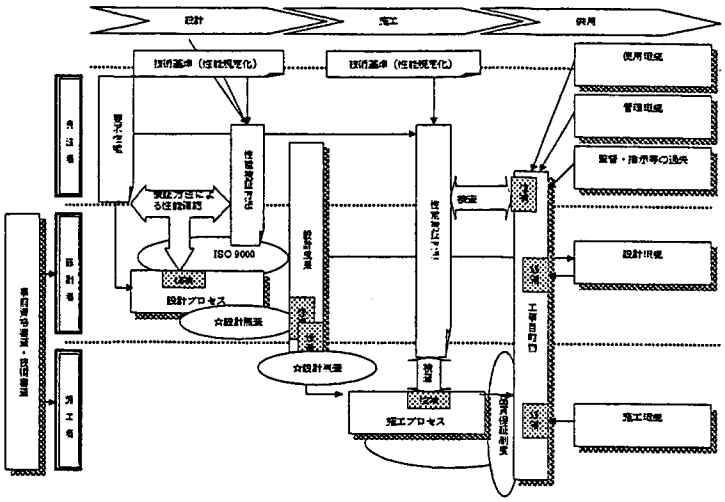


図-2 現在の品質確保方策の概要

2．2 性能発注における品質確保方策（図－3）

(1)検証方法の特定

今後、技術基準類の性能規定化に伴い性能に対する検証方法が整備されていくことと考えられる。しかし、同じ性能項目であっても複数の検証方法が存在したり、改訂のタイミングにより最新の検証方法が技術基準類に反映されていないことも考えられる。このような場合において、誰が検証方法の特定を行うかが課題となる。

①発注者が要求性能と共にその性能の検証方法を契約図書中に明示する。

発注者が契約図書中に要求性能と共に検証方法を明示することにより、検証方法の特定を行う。検証方法自体の確実性に関するリスクは発注者が負うこととなる。

②性能検証方法自体も技術提案等により募集

発注者は性能要求項目だけを明示し、性能達成方法及び性能検証方法も含めて提案させる。技術基準類にも反映されていない、新たに開発された検証方法が適用しやすくなる反面、その検証方法の確実性をどのように担保していくかが課題となる。

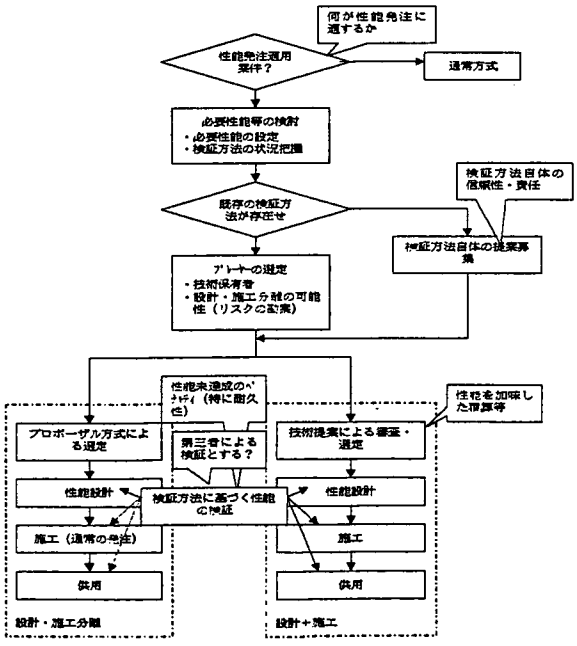


図-3 性能発注フロー

(2)検証タイミング

検証が可能となるタイミングにより、後述する最適な性能発注の対象調達範囲も異なってくる。性能が検証可能なタイミングは、大きく以下の3つに分類される。

①設計途中又は設計終了時に検証可能な性能
②施工途中又は竣工時に検証可能な性能
③供用期間を経て検証可能な性能

(3)積算（設計）

建設コスト縮減のｲﾝｾﾝﾃｨﾌﾞ（性能は高くても建設コストも高い設計）や企業努力に対するｲﾝｾﾝﾃｨﾌﾞ（従来型と同じ設計料）が設計時点で働かないことから、成果の内容に応じた報酬等、発注者側で設計のコントロールを可能とする仕組みが必要である。

(4)積算（設計＋施工、施工）

設計＋施工の発注段階においては、詳細設計はなされていない状況であり、現在の積算手法は適用できない。性能を反映した積算やユニットプライスによる積算及び相手方の見積もりによる積算を指向する必要があると考える。

（山下、小澤、加藤）

12.10　公共土木工事の性能発注に関する調査研究

研究期間：平９～平１２
担　当：建設マネジメント技術研究室

【要旨】

近年、ＷＴＯなどの世界的な潮流として、また、設計・施工の自由度の向上や技術開発の促進を目的とした土木構造物の設計・施工に関する技術基準類の性能規定化が検討されてきている。

本研究は、実際に国内で試行されている性能発注事例について分析を行い、性能発注における課題の抽出及びその対応の考え方について整理を行った。

１．研究方法

実際に建設省発注工事において試行が始まったアスファルト舗装工事における性能発注事例について調査を行い、契約面やリスクアロケーション等における課題の抽出及び対応策について検討を行った。

２．研究成果

２．１　アスファルト舗装における性能発注事例の概要

（１）　工事概要と要求性能・検証方法

性能発注対象事例における工事の概要及び要求性能及び検証方法は、表-1 に示すとおりである。

- 工事内容：国道の車道打換工、排水工
- 規模：延長 200m、車道舗装工 8,900m2
- 工事費：１億９千万円
- 工期：８ヶ月

表-1 要求性能工と検証方法

	施工完了時	供用期間（１年後）
動的安定度	動的安定度 4000 回/mm 以上	
排水性	現場透水性試験 1000ml/15sec 以上	
平坦性	σ2.4mm 以内	
騒音値	測定者により 89db 以下	測定車により 90db 以下

（２）　入札・契約手続き

- 調達範囲

入札時には、標準的な舗装構造を提示し、入札後に舗装構造も含めた技術提案を求めている。調達範囲は契約後 VE と同様（コスト縮減でなく性能に着目、VE 管理費はなし）

表-2 調達対象範囲

概略設計	詳細設計	施工
	⇐	⇒

- 予定価格

標準構造により予定価格を策定している。

- 落札者選定方法

入札対象者は通常の公募型指名競争入札と同様であり、落札者は最低入札価格者による自動落札方式である。また、技術資料も通常の公募型と同様であり、特別に性能達成方法等の資料は求めていない。

２．２　アスファルト舗装における性能発注の課題と対応策

（１）　性能発注におけるコストアップ要因とコスト縮減

性能発注事例における従来の方法と比較したコストアップ要因を表-3 に整理する。表に示すとおり、性能発注においては受注者側の技術的裁量の余地が増加する反面、コストリスクを抱え込むことになる。技術的裁量の余地が増加によるコスト縮減効果とコストリスクは以下の関係がある。

- リスク増加に伴うコストアップ＞技術によるコスト縮減額→「入札価格のアップ」

➢ リスク増加に伴うコストアップ＜技術によるコスト縮減額→「入札価格のダウン」

事例においては、純然としたコスト（材料費、施工費用）はアップしているとの企業側のコメント（企業側のPR効果への期待で相殺）もあり、健全な企業側のインセンティブが働いていないと考えられる。性能発注の健全な発展のためには、会計法との整合も考慮しながらリスクテイクや性能とコスト（予定価格・積算）の関係を明確にしていく必要がある。特に、受注者側コントロール範囲外のリスクについてはその適用条件の明確化やリスク低減のための発注者側の取り組み等を行わないと入札価格のアップにつながり結局、「高い買い物」となる恐れがある。

表-3 従来の方法と比較した性能発注事例における受注者側ｺｽﾄｱｯﾌﾟ要因

ｺｽﾄｱｯﾌﾟ要因			受注者ｺﾝﾄﾛｰﾙ可否	備考
作業範囲によるｺｽﾄｱｯﾌﾟ要因			×	舗装構造・使用材料設計や検証等、従来工事では施工者が行わなかった作業によるｺｽﾄｱｯﾌﾟ。
性能向上によるｺｽﾄｱｯﾌﾟ要因			×	通常の工事以上の要求性能・品質が求められることによるｺｽﾄｱｯﾌﾟ。同一企業内で見れば品質の高いものは価格も高いのは当然。
修補ﾘｽｸｱｯﾌﾟによるｺｽﾄｱｯﾌﾟ要因	完成時（性能未達成）	技術的ﾘｽｸ	△	要求性能を満たす技術や施工方法が自社内に存在しないことによる性能未達成の恐れ。
		騒音測定ﾘｽｸ	×	騒音測定車による測定が一般的ではなく、受注者側で事前の測定試験等が行えないことによる性能未達成の恐れ。（既存試験値を公開することで緩和）
	供用開始後（性能未達成）	技術的ﾘｽｸ	△	要求性能を満たす技術や施工方法が自社内に存在しないことによる性能未達成の恐れ。
		騒音測定ﾘｽｸ	×	騒音測定車による測定が一般的ではなく、受注者側で事前の測定試験等が行えないことによる性能未達成の恐れ。（既存試験値を公開することで緩和）
		交通状況（使用状況）ﾘｽｸ	×	当初予定していた以上の交通量が発生した場合の性能劣化の恐れ。
		道路ﾒﾝﾃ状況ﾘｽｸ	×	性能に影響に影響するメンテナンス方法・状況による性能劣化の恐れ。

△ 受注者側で技術開発によりﾘｽｸのｺﾝﾄﾛｰﾙが可。受注者によってはｺｽﾄｱｯﾌﾟ要因とはならない。
× 受注者側でﾘｽｸのｺﾝﾄﾛｰﾙ不可。単なるｺｽﾄｱｯﾌﾟ要因。

（2） プレーヤー

今回の事例では受注者は施工者であったが、設計において性能発注を適用した場合の課題について以下に示す。

➢ 設計者のインセンティブ確保

施工者においては、技術的な工夫増大による工事コスト縮減による利益確保のインセンティブが働くこととなるが、設計ではそのプロセスや技術の工夫による設計コスト縮減の余地が少なかったり工事コスト縮減のメリットを直接享受できないため、企業側のインセンティブが働きにくい構図がある。場合によっては、性能は満たしているが過大設計となる恐れもあり、成果に応じた報酬等が必要となると考える。

➢ 性能検証方法

事例のように施工完了時点で検証を行った場合、設計者に施工リスクも負わせることとなり、設計費用・施工費用のアンバランスより設計費用の高騰を招く恐れがある。よって、性能設計において要求する性能は設計終了時点で検証可能な項目・方法にとどめておく必要がある。

（3） 積算方法

詳細な設計をベースとした現在の積み上げによる積算方法では、会計法上の課題は別として性能の反映、リスクの反映に柔軟に対応できなかったり、積算のためだけの詳細設計といった歪な構造となる恐れがあり、ユニットプライス化の指向を目指すべきと考える。 （山下、小澤、加藤

個別課題と予算科目

個別課題と予算科目について

1．先端技術の国土マネジメントへの応用に関する研究

1．1	ＧＩＳを活用した河川流況予測システムの研究開発	建設技術研究開発経費
1．2	洪水氾濫被害の最小化のための氾濫源管理システムの研究開発	建設技術研究開発経費
1．3	総合的な震災対策支援システムの研究開発	建設技術研究開発経費
1．4	震災対策体制の評価技術に関する研究	行政部費
1．5	生態情報の統合化及び活用に関する研究	建設技術研究開発経費
1．6	ＧＩＳを利用した統合情報基盤の開発	建設技術研究開発経費
1．7	人工衛星利用技術を活用した流域水文情報収集技術に関する研究開発	建設技術研究開発経費
1．8	人工衛星による流域の土砂環境把握と危険度評価手法の開発に関する研究	建設技術研究開発経費
1．9	大規模岩盤斜面の長期的変形調査	建設技術研究開発経費
1．10	災害復旧作業における高分解能衛星データの利用に関する研究	建設技術研究開発経費
1．11	衛星通信技術の道路分野への適用可能性に関する研究	建設技術研究開発経費
1．12	都市緑地調査における人工衛星技術の活用に関する研究開発	建設技術研究開発経費
1．13	リモートセンシングデータを活用した流域土砂管理に関する研究	砂防事業調査費
1．14	数値標高モデル地図を用いた地すべり地の抽出技術に関する調査	砂防事業調査費

2．耐震設計の体系化に関する研究

2．1	活断層の客観的認定および伏在断層による地表変位に関する研究	行政部費
2．2	大規模地震を想定した設計地震動の設定手法に関する研究	道路事業調査費
2．3．1	地震ハザードマップの作成手法の開発に関する研究（その１）	道路事業調査費
2．3．2	地震ハザードマップの作成手法の開発に関する研究（その２）	道路事業調査費
2．4．1	耐震設計の性能規定化に関する研究（その１）	行政部費
2．4．2	耐震設計の性能規定化に関する研究（その２）	行政部費
2．5	地盤ー基礎系を含む全体系を考慮した構造物の耐震性能の実験的検証技術に関する研究	行政部費
2．6	公共土木施設の耐震性水準の横断的整合に関する研究	行政部費

3．水環境における水質リスク管理に関する研究

3．1	環境ホルモン生成物質の水環境中での挙動に関する研究	行政部費
3．2	下水中の微量化学物質の新しい検出技術に関する調査	下水道事業調査費
3．3	下水汚泥中内分泌かく乱物質の消長に関する調査	下水道事業調査費
3．4	生態系から見た下水処理水の評価方法に関する調査	下水道事業調査費
3．5	水循環健全化のための環境ホルモン等リスク対策の調査検討	行政部費
3．6	内分泌かく乱物質等の発生源と処理対策手法の調査	下水道事業調査費
3．7	下水道での有害化学物質の管理に関する調査	下水道事業調査費
3．8	病原性微生物の下水処理過程での制御に関する研究	行政部費
3．9	病原性微生物の発生源および対策に関する調査	下水道事業調査費
3．10	下水中病原性微生物の同定方法に関する研究	行政部費
3．11	水系における病原性微生物の挙動に関する研究	行政部費
3．12	下水処理水の安全性向上に関する研究	行政部費

4．河川・湖沼の整備及び管理における自然との共生技術の開発

4．1	水系土砂動態変化に伴う河川の自然形成システムの変質とその再生手法に関する調査	河川事業調査費
4．2	河川のハビタットに関する調査	河川事業調査費
4．3	自然作用を活用した共生型川づくりに関する研究	建設技術研究開発経費
4．4	新素材・新工法を用いた防御工の開発（総論）	河川総合開発事業調査費
4．4．1	新素材・新工法を用いた防御工の開発（その１：侵食防止ｼｰﾄ、ﾎﾟｰﾗｽｺﾝｸﾘｰﾄ、ふとんかご、河岸侵食予測手法）	河川総合開発事業調査費
4．4．2	新素材・新工法を用いた防御工の開発（その２：侵食防止ｼｰﾄ(1)・植生）	河川総合開発事業調査費
4．4．3	新素材・新工法を用いた防御工の開発（その２：侵食防止ｼｰﾄ(2)・環境ﾎﾙﾓﾝ）	河川総合開発事業調査費
4．4．4	新素材・新工法を用いた防御工の開発（その３：ﾎﾟｰﾗｽｺﾝｸﾘｰﾄ(1)・品質管理）	河川総合開発事業調査費
4．4．5	新素材・新工法を用いた防御工の開発（その３：ﾎﾟｰﾗｽｺﾝｸﾘｰﾄ(1)・植生）	河川総合開発事業調査費
4．5	渓畔林を活用した流路整備に関する調査	砂防事業調査費
4．6	中小河川における天然河岸の保全手法に関する研究	国立機関公害防止等試験研究費
4．7	ダム湖における生物生息空間の整備技術の開発	河川総合開発事業調査費
4．8	魚類の生息空間の保全・創出手法の開発	建設技術研究開発経費
4．9	水域のネットワーク保全手法に関する研究	行政部費
4．10．1	自然共生実験施設を用いた河川の自然環境の保全に関する基礎調査（その１）	河川事業調査費

4．10．2	自然共生実験施設を用いた河川の自然環境の保全に関する基礎調査（その２）	河川事業調査費
4．11	変動を加味した正常流量に関する基礎調査	河川事業調査費
4．12	浮島による湖沼の自然回復と水質浄化に関する研究	国立機関公害防止等試験研究費
4．13	人工生態礁による富栄養化対策に関する調査	地建依頼
4．14	湿地帯における栄養塩収支の把握と水質浄化能力の評価に関する研究	科学技術振興調整費

5．社会資本整備におけるCO2削減に関する研究

5．1	都市型総合廃棄物を原料とした環境負荷低減型セメントの建設事業への適用技術に関する研究	国立機関公害防止等試験研究費
5．2	省エネルギー型セメントを用いたダム用コンクリートの利用技術に関する調査	河川総合開発事業調査費
5．3	都市域の交通部門における温暖化防止施策の総合評価に関する研究	地球環境研究総合推進費
5．4	低公害大型車等の導入が都市交通環境に与える影響に関する調査	街路交通調査費
5．5	戦略的環境アセスメントに関する研究	行政部費
5．6	都市内緑地による温室効果ガス削減に関する検討その他	都市公園事業調査費
5．7	下水道システムのＬＣＡに用いる原単位に関する調査	下水道事業調査費
5．8．1	建設事業におけるＣＯ２算定評価システムの開発に関する研究（その１）	行政部費
5．8．2	建設事業におけるＣＯ２算定評価システムの開発に関する研究（その２）	行政部費

6．公共事業におけるリサイクル材利用技術の開発

6．1	リサイクル新材料の利用技術に関する研究	行政部費
6．2	他産業リサイクル材利用のマニュアル検討調査	地建依頼
6．3	一般廃棄物の焼却灰溶融固化物の舗装用骨材としての利用に関する調査	地建依頼
6．4	廃木材を活用した大気汚染対策用舗装の開発	地建依頼

7．地域のニーズを反映した社会資本整備技術の開発

7．1．1	地域のニーズを反映した社会資本整備手法に関する研究（その１）	行政部費
7．1．2	地域のニーズを反映した社会資本整備手法に関する研究（その２）	行政部費
7．2	地域特性を活かした地域計画及び施設設計の手法に関する研究	行政部費
7．3	河川に関する歴史・文化資源を活用した川づくりに関する調査	河川事業調査費
7．4	地域社会特性の分析による社会資本整備の評価に関する研究	科学技術振興調整費

8．都市空間におけるヒートアイランド現象の軽減に関する研究

8．1	都市気候の動植物への影響に関する調査	
8．2	都市気候の数値シミュレーションに関する研究	
8．3	都市気候緩和と地下水涵養に効果的な環境共生型舗装に関する研究	国立機関公害防止等試験研究費
8．4	社会基盤等を活用した省エネ及び都市の気候緩和に関する研究（１）	行政部費
8．5	社会基盤等を活用した省エネ及び都市の気候緩和に関する研究（２）	行政部費
8．6	都市内緑地による温室効果ガス削減に関する調査	都市公園事業調査費

9．走行支援道路システム（ＡＨＳ）に関する研究開発

9．1．1	ＩＴＳ全般に関する調査（その１）	道路事業調査費
9．1．2	ＩＴＳ全般に関する調査（その２）	道路事業調査費
9．2	コンセプト及びアーキテクチャの設計と評価に関する調査	道路事業調査費
9．3	道路状況把握道路システムに関する調査	道路事業調査費
9．4	路面状況把握道路システムに関する調査	道路事業調査費
9．5	車両誘導制御支援道路システムに関する調査	道路事業調査費
9．6	走行車両位置検出支援道路システムに関する調査	道路事業調査費
9．7	最先端の通信方式を利用した道路システムに関する調査	道路事業調査費
9．8	システムの設計に関する調査	道路事業調査費
9．9	システムの評価に関する調査	道路事業調査費

１０．建設事業のコスト縮減に関する研究

10．1．1	建設事業のコスト構造の分析に関する調査（その１：道路事業）	道路事業調査費
10．1．2	建設事業のコスト構造の分析に関する調査（その２：河川事業）	河川事業調査費
10．2	軽量盛土材の活用に関する調査	道路事業調査費
10．3	擁壁構造物の設計合理化に関する調査	道路事業調査費

10．4	シールド工事の設計合理化に関する調査	下水道事業調査費
10．5	橋面舗装の合理化に関する調査	道路事業調査費
10．6	深層混合処理工法の合理化に関する調査	道路事業調査費
10．7	管渠システムの設計合理化に関する調査	下水道事業調査費
10．8	揚排水機場の設計合理化に関する研究	行政部費
10．9．1	プロジェクトマネジメント手法の検討に関する調査（その１：ダム事業）	河川総合開発事業調査費
10．9．2	プロジェクトマネジメント手法の検討に関する調査（その２：河川事業）	河川事業調査費
10．9．3	プロジェクトマネジメント手法の検討に関する調査（その３：道路事業）	道路事業調査費

１１．外部コストを組み入れた建設事業コスト低減技術の開発

11．1	外部コストの概念整理、計測、評価手法の開発	建設技術研究開発経費
11．2	内部コストの実態把握、外部コストの内部化手法調査	建設技術研究開発経費
11．3	道路事業における外部コストの実態把握、評価手法の開発	建設技術研究開発経費
11．4	維持補修事業における外部コストの実態把握、評価手法の開発	建設技術研究開発経費
11．5	トンネル施工法における外部コストの実態把握、評価手法の開発	建設技術研究開発経費
11．6	建設汚泥、建設発生木材等リサイクル促進技術の開発	建設技術研究開発経費
11．7	低品質骨材・再生骨材の利用用途拡大技術の開発	建設技術研究開発経費
11．8	環境にやさしい塗料技術の開発	建設技術研究開発経費
11．9	民間技術活用の入札契約手法の提案に関する調査	行政部費
11．10	建設技術情報流通システムの構築に関する著巣阿	行政部費

１２．建設事業の品質管理体系に関する研究

12．1	要求性能と品質レベルの相関性の検討（構造物の性能に与える品質の影響度）	建設技術研究開発経費
12．2	要求性能と設計・材料・施工・維持管理の品質管理レベルの相関性の検討	建設技術研究開発経費
12．3	品質規格の性能規定化手法の開発	建設技術研究開発経費
12．4	コンクリート材料・構造物の品質検査技術の開発（非破壊検査・高知能検査等）	建設技術研究開発経費
12．5	鋼構造物の品質検査試験技術の開発（非破壊検査・溶接検査・塗膜検査等）	建設技術研究開発経費
12．6	鋼構造物の品質検査試験技術の開発（非破壊検査・溶接検査・塗膜検査等）	建設技術研究開発経費
12．7	土構造物の品質管理技術の開発	建設技術研究開発経費
12．8	施工情報活用による品質管理・検査の合理化技術の開発（シールド工）	建設技術研究開発経費
12．9	公共土木工事の発注体系に関する調査研究	建設技術研究開発経費
12．10	公共土木工事の性能発注に関する調査研究	建設技術研究開発経費