

土 木 研 究 所 資 料

平成 10 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 2 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。

平成 10 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 10 年度より開始した土木研究所重点研究プロジェクト 8 課題を対象に、重点研究プロジェクトを構成する個別課題について、その研究成果をとりまとめたものである。

キーワード

耐震設計 水質リスク管理 自然との共生 ヒートアイランド
走行支援道路（A H S） コスト縮減 外部コスト 品質管理

ま え が き

土木研究所の研究活動の最終的な目標は 21 世紀に相応しい国土と社会の実現にある。21 世紀の国土ビジョンとして、平成 10 年 3 月に「新・全国総合開発計画」が閣議決定され、また、建設分野における研究開発の方向性について、平成 9 年 7 月に建設技術開発会議より「真に豊かな『ひと・地域・国』の未来を創る技術を目指してー21 世紀に向けた建設技術の新たな展開ー」が提言されている。土木研究所が現在策定中の「第 5 次土木研究所研究五箇年計画」では、これらの決定や提言を受け、土木研究所が行うべき研究として次の 5 つの分野、11 の基本研究課題を設定している。

- I 国土マネジメントの方向性に関する研究
 - 1 国土マネジメントの方向性に関する研究
- II 安全で安心できる国土の形成のための研究
 - 2 災害に強い国土づくりに関する研究
 - 3 水系に着目した国土の管理に関する研究
- III 自然生態系と地球環境の回復・保全に関する研究
 - 4 自然環境の回復・保全に関する研究
 - 5 地球環境への負荷の低減に関する研究
 - 6 資源循環型社会の形成に関する研究
- IV 多様性に富んだ社会、快適な地域環境の創出に関する研究
 - 7 地域の個性を活かし、多様な主体が共生できる社会の形成に関する研究
 - 8 都市環境・地球環境の向上に関する研究
- V 経済活力の維持と効率的な建設行政の執行に関する研究
 - 9 新たな交通体系の形成に関する研究
 - 10 建設生産システムの高度化に関する研究
 - 11 社会資本ストックの保全と有効活用に関する研究

さらに、社会のニーズに対してソフト面での対応も含めて総合的な解決を図るため、

- ① 社会および行政ニーズが高い研究課題
- ② 総合的視点から体系的な取り組みが必要な研究課題
- ③ 技術水準が高く、土木研究所でなければ実施できない研究課題

を対象に、土木研究所として組織横断的、重点的に取り組む 28 の研究を重点研究プロジェクトとして位置づけ、これを推進することとしている。このうち、平成 10 年度は、次の 8 課題を重点研究プロジェクトとして開始したところである。

- 1. 走行支援道路システム（AHS）に関する研究開発
- 2. 建設事業の品質管理体系に関する研究
- 3. 耐震設計の体系化に関する研究
- 4. 水環境における水質リスク管理に関する研究
- 5. 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
- 6. 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
- 7. 建設事業のコスト縮減に関する研究
- 8. 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

本報告書は、これら重点研究プロジェクトについて、平成 10 年度における研究成果をとりまとめたものである。これらの重点研究プロジェクトはいまだ研究途中段階であり、今後もさらにその研究を進めていくことが必要であるが、本報告書では、現段階までに達成した研究成果についてとりまとめている。21 世紀に相応しい国土と社会の実現に向け、本研究成果が土木技術さらには国土マネジメント技術の発展に寄与することを切に願うものである。

平成 11 年 3 月

研究調整官 京才俊則

重点プロジェクト研究課題 総目次

1. 耐震設計の体系化に関する研究

1.1 活断層の認定法および大規模地震時の設計用入力地震動の設定手法の開発

- (1) 土木構造物の防災的見地からの第四紀断層に関する研究…………… (地 質 研 究 室) … 6
- (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試験調査(その1)…… (振 動 研 究 室) … 8
- (3) 大規模地震を想定した設計地震動の設定手法に関する試験調査(その2)…… (振 動 研 究 室) … 10

1.2 耐震性水準の合理的な設定方法の開発

- (公共土木施設の耐震設計水準の横断的整合に関する研究)…………… (防 災 技 術 課) … 12

2. 水環境における水質リスク管理に関する研究

- 2.1 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) … 20
- 2.2 下水処理水の安全性向上に関する研究…………… (三 次 処 理 研 究 室) … 26
- 2.3 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) … 32
- 2.4 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) … 38
- 2.5 生態系からみた下水処理水の評価方法に関する調査…………… (水 質 研 究 室) … 40
- 2.6 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) … 46
- 2.7 水道水源河川における汚濁物質モデルに関する研究…………… (水 質 研 究 室) … 52

3. 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

- 3.1 河川のハビタットに関する調査…………… (河 川 環 境 研 究 室) … 64
- 3.2 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) … 66
- 3.3 水域ネットワークの保全手法に関する研究…………… (河 川 環 境 研 究 室) … 68
- 3.4 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…………… (河 川 環 境 研 究 室) … 70
- 3.5 新素材・新工法を用いた防御工の開発
 - (1) 新素材・新工法を用いた防御工の開発…………… (河 川 研 究 室) … 72
(侵食防止シート、ポーラスコンクリート、連続栈工法、新型ふとんかご、河岸侵食予測手法)
 - (2) 新素材・新工法を用いた防御工の開発…………… (河 川 研 究 室) … 78
(樹木群による破堤軽減工法)
 - (3) 新素材・新工法を用いた防御工の開発…………… (緑 化 生 態 研 究 室) … 80
(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)
 - (4) 新素材・新工法を用いた防御工の開発…………… (コンクリート研究室) … 84
(ポーラスコンクリート)
- 3.6 溪畔林を活用した流路整備に関する調査…………… (砂 防 研 究 室) … 86
- 3.7 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) … 90
- 3.8 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) … 92
- 3.9 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) … 94
- 3.10 生態系の保全・生息空間の創造技術の開発…………… (河 川 環 境 研 究 室) … 96

4.1 ヒートアイランド現象の実態及び影響の把握

4.2 社会基盤等の活用と対策技術

(1) 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…	都 市 河 川 研 究 室 化 学 研 究 室	… 113
(2) 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…		(化 学 研 究 室) … 117

5.1 AHS コンセプト・国際標準化等

(AHS:コンセプト・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) … 124

(AHS: 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) ... 126

(AHS：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) … 128

(1) AHS：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）… 130

(2) AHS：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）… 132

(3) AHS：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）… 134

(4) AHS：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）… 136

(5) AHS：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）… 138

6.1 道路構造物の建設コスト縮減に資する設計標準化に関する調査……（建設システム課）… 146

(1) 道路事業プロセスにおける建設コスト縮減方策の調査…………… 148

(2) 河川事業プロセスにおける建設コスト縮減方策の調査…………… 152
 { 建設マネジメント技術研究官 }
 { 建設マネジメント技術研究室 }

6.4 擁壁構造物の設計合理化に関する調査…………… (施 工 研 究 室) … 160

6.6 長大橋の橋面構造の合理化に関する調査

(経済性に優れた新しい橋梁の走行面に関する試験調査 (その1) … (舗 装 研 究 室) … 166

6.8 管渠システムのコスト削減に関する調査

(1) 管渠システムのコスト縮減に関する調査…………… (下水道研究室) … 170

(2) 管渠システムのコスト縮減に関する調査…………… (建設システム課) … 172

7. 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

7.1 建設分野における外部コストの評価手法の開発に関する研究

- | | | | |
|-----|-------------------------------|-------------------|-----|
| (1) | 建設分野における外部コストの評価手法の開発に関する研究…… | (環 境 計 画 研 究 室) … | 180 |
| (2) | 建設分野における外部コストの評価手法の開発に関する研究…… | (緑 化 生 態 研 究 室) … | 182 |
| | (都市公園の経済評価調査) | | |
| (3) | 建設分野における外部コストの評価手法の開発に関する研究…… | (道 路 研 究 室) … | 184 |

7.2 建設副産物の発生抑制・再利用拡大技術の開発

- (1) 建設副産物の発生抑制技術の開発……………(施 工 研 究 室) … 188
- (2) 建設副産物の発生抑制・再利用拡大技術の開発……………(コ ン ク リ ー ト 研 究 室) … 190

7.3 環境負荷低減のための材料・構造物補修改修技術の開発

- | | | |
|------------------------------|-----------------|-----|
| (1) 維持補修分野における外部コスト削減対策..... | (施 工 研 究 室) ... | 194 |
| (2) 環境負荷低減型材料の開発..... | (化 学 研 究 室) ... | 196 |

7.4 建設コストに含まれるコスト構造の明確化及びその低減技術の研究

- [illegible]

8. 建設事業の品質管理体系に関する研究

8.1 性能規定化手法とそれに対応した設計・材料・施工・維持管理の品質管理体系の開発

- | | | | |
|-----|---|---------|-----|
| (1) | 品質規格の性能規定化手法の開発 | (化学研究室) | 210 |
| (2) | 要求性能と品質レベルの相関性の検討
ー構造物の性能に与える品質の影響度ー | (構造研究室) | 212 |
| (3) | 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) | 214 |

8.2 品質管理・検査の合理化技術の開発

- | | | | |
|-----|--------------------------------|-----------------------|-----|
| (1) | 施工情報活用による品質管理・検査の合理化技術(シールド工)… | (機 械 研 究 室) … | 216 |
| (2) | 土構造物の品質管理技術の開発…………… | (施 工 研 究 室) … | 218 |
| (3) | コンクリート材料・構造物の品質検査技術の開発…………… | (コ ン ク リ ー ト 研 究 室) … | 222 |
| | —非破壊検査・高知能検査等— | | |
| (4) | 鋼構造物の品質検査試験技術の開発…………… | (化 学 研 究 室) … | 224 |
| (5) | 鋼構造物の品質検査試験技術の開発…………… | (橋 梁 研 究 室) … | 226 |

8.3 総合的品質管理体系 (TQM) の開発

- | | | |
|-----------------------|-------------------|-----|
| (1) 公共工事の発注体系に関する調査研究 | (建設マネジメント技術研究室) … | 228 |
| (2) 公共工事の性能発注に関する調査研究 | (建設マネジメント技術研究室) … | 230 |

耐震設計の体系化に関する研究

耐震設計の体系化に関する研究

1. 研究の背景

我が国は、これまでも関東大震災、阪神淡路大震災等地震による大きな被害を経験しており、地震に対して安全な社会の構築が望まれている。

耐震性の高い安全な社会を構築するためには、個々の構造物の耐震性の向上に加え、地域として面的な安全性の確保の観点から、道路や鉄道、及び電力、ガス等のライフライン施設の耐震性能の水準の横断的整合性を図ることが必要である。

現在の道路橋、ライフライン施設、ダム等の耐震設計基準においては、設計に考慮する地震動が異なるばかりでなく、耐震性能の水準についても整合性のとれた体系になっていない。また、設計に考慮すべき地震動としては、従来の海溝型の大規模地震に加え、兵庫県南部地震のような内陸直下型の地震を想定することが求められている。

さらに、耐震設計基準については、コスト縮減や VE 制度の普及等を考慮すれば、技術者の創意工夫が反映できる設計の自由度の高い基準とすることが望まれている。

2. 研究の目的

大規模な地震災害に対応した安全性の確保と我が国の社会全体が有する高コスト構造の是正とを両立させ、各種公共構造物間で整合性のとれた耐震設計基準のあり方を提示する。

- ① 活断層の定量的認定基準を開発するとともに、個々の活断層の特性や地盤構造等を考慮した地震動の設定手法を開発する。
- ② 各種構造物の耐震設計基準において、設計に考慮すべき地震動や各種構造物の重要度に応じた耐震性能の水準が一貫性を有する体系となるように横断的整合性のとれた手法を開発する。
- ③ 構造物の有すべき耐震性能を明確化し、自由度の高い耐震設計基準を開発する。

3. 達成目標

- ① 活断層の定量的認定基準及び個々の活断層の特性を考慮した地震動の設定手法を提案し、過去に発生した地震と活断層を考慮した地震ハザードマップの試案を提示する。
- ② 各種構造物の耐震設計に考慮すべき地震動と重要度に応じた耐震性能の水準について、横断的整合性を図るための試案（パフォーマンスマトリックス）を提示する。
- ③ 性能規定型の耐震設計基準の試案を提示する。

4. 社会的な効果

- ① 地震ハザードマップによって、地震災害に対する国民生活の安全性を確保するうえで最も基礎となる情報である地域毎の地震に対する危険度を提示することが可能になる。これによって、適切な地震防災対策計画の立案に貢献することができる。また、全国的に整合性のとれた合理的な耐震設計を実現することが可能になる。
- ② 様々な社会基盤施設の地震時の安全性レベルの整合性を図ることによって、コストと地震に対する安全性の適切なバランスを図った社会基盤施設整備が可能になる。また、地域の耐震性能の水準に関する住民合意の基礎となる考え方(基準)を提示できる。
- ③ 性能規定型の耐震設計基準の整備によって設計の自由度が拡大し、コストパフォーマンスに優れた技術の開発が促進され、環境負荷の小さい構造物の設計が可能となる。

1.

1.5

—耐震設計の体系化に関する研究—

個別研究課題目次

1.1 活断層の認定法および大規模地震時の設計用入力地震動の設定手法の開発

- (1) 土木構造物の防災的見地からの第四紀断層に関する研究…………… (地 質 研 究 室) … 6
- (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試験調査 (その 1) …… (振 動 研 究 室) … 8
- (3) 大規模地震を想定した設計地震動の設定手法に関する試験調査 (その 2) …… (振 動 研 究 室) … 10

1.2 耐震性水準の合理的な設定方法の開発

- (公共土木施設の耐震設計水準の横断的整合に関する研究)…………… (防 災 技 術 課) … 12

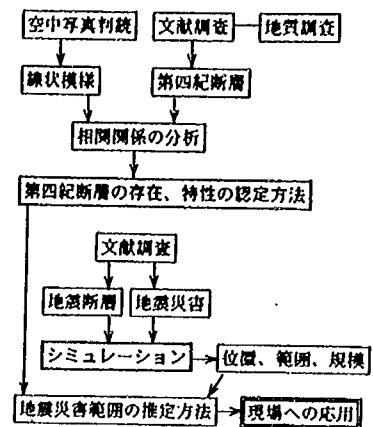
1.1 (1) 土木構造物の防災的見地からの第四紀断層に関する研究

研究期間：平8～平11

担 当：地質研究室

【要旨】

本研究は第四紀断層の変位に伴う災害防止を目標にしている。8年度に考案した山岳域における客観的な線状模様抽出法の正断層地域における妥当性を検討する目的で、鴨川地溝帯南西部において本方法の適用を試みた。その結果、おおむね良好な線状模様抽出が行えることがわかった。また伏在断層の活動による地表面変位の出現位置・大きさを知る目的で、阪神地区における沖・洪積層地盤物性値の3次元モデル化を行い、2次元有限要素法による伏在断層の垂直変位に伴う地表面変位分布のシミュレーション計算を行った。その結果、沖・洪積層厚が2,000mに及んでも、地表面に大きな変位が現れることがわかった。



1. 研究方法

1.1 山岳域における客観的な線状模様抽出法

8年度に、山岳域における線状模様の客観的な抽出法を考案した。本方法は横ずれ断層である北武断層周辺において試みられ、線状模様抽出法として有用であることが示された。本手法の概要は以下の通りである。

縮尺 1/40,000 の空中写真を用い、まず調査地域を面積 1km² 程度の流域に分割する。次に分割された流域界上にある鞍部に注目し、鞍部を挟む2本の谷筋がなす角が約120度より大きいものを抽出する。最後に抽出された鞍部と谷筋のセットの延長方向に連続する鞍部、谷筋、その他の地形境界線を抽出する。

10年度は房総半島南西部に位置する正断層である鴨川地溝帯南断層において同一の方法で線状模様の抽出を行い、通常の写真判読（以下、「主観的方法」と呼ぶ）による抽出結果との比較を行った。ただし今回は縮尺 1/20,000 の空中写真を用いた。

1.2 伏在断層の活動に伴う地表面変位分布シミュレーション

8年度に行った阪神地区周辺の13本のボーリングデータおよび、地質調査、微動探査等の成果を用い、主にコンピュータを用いて、図2に示すように東西方向19km、南北方向12km、深さ3kmの範囲で地層層序および、地盤物性の三次元のモデル化を行った。ここでモデル化した地盤物性値は、P波速度・S波速度・剛性率・ポアソン比・密度・ヤング率・N値である。このうちヤング率とポアソン比を用いて、図2に示す断面において2次元有限要素法により、基盤に強制変位（断層運動）を与えた場合の地表面に現れる変位量をシミュレーションした。伏在断層の静的パラメータとして、断層面の傾斜角を50度、70度、90度の正断層および逆断層の5ケース、動的パラメータとして断層の変位量を1.5m、3m、6mの3ケース、伏在断層の深さとして500m、1,000m、2,000mの3ケース、総計45ケースについてシミュレーションを行った。

2. 研究結果

2.1 山岳域における客観的な線状模様抽出法

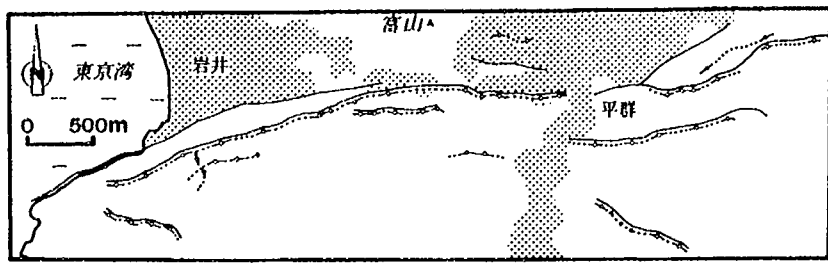
図1に鴨川地溝帯南断層周辺の線状模様の抽出結果を示す。主観的方法と客観的方法による抽出結果はおおむね良い一致を示したが、山地平野境界に当たる線状模様は客観的手法によって抽出できなかったところがある。これは客観的方法が鞍部と直線谷に注目したもので、山地平野境界の線状模様は原理的に抽出が困難であるためと思われる。しかしながら以上の結果は、山岳域において客観的手法が横ずれ断層地域に限らず、正断層地域においても適用可能であることを示している。

2.2 伏在断層の変位に伴う地表面変位分布シミュレーション

図3に深さ500m、強制変位量1.5m、傾斜角70度の逆断層の場合のシミュレーション結果の例を示す。

図のように、地表面では最大約 1.1m の合成変位が現れた。またすべてのケースを比較してみて明らかになったことは、正断層と逆断層では変位の向きが逆になるだけで変位量の絶対値は同じこと、強制変位量が 2 倍、4 倍になると地表面における最大変位量も 2 倍、4 倍となり、線形性を有していることがわかった。また、深さが深くなっても地表面に現れる変位量は極端に減少するという傾向は認められず、2,000m の深さでも強制変位を 1.5m 与えると地表面には 1m 近い変位量が現れることが明らかとなった。

伏在断層が活動した 1948 年の福井地震 ($M=7.1$: 予想基盤変位量 1.8m、基盤の深さ約 200m) の例をみても、地表面の上下変動が 60 ~ 70cm であり、今回行ったシミュレーションの方が深い位置にもかかわらず大きな変位が現れる結果となった。このような違いがでてきた原因として、実際に基盤が変位を起こしたときに塑性変形をつかさどる地中の空隙の影響の問題、あるいは物性値のモデル化を行う際の精度などの問題などが考えられる。



凡例：—主観的方法による結果 ---客観的方法による結果 □山地部 ▨平野部(平均傾斜<12°)

図1 線状模様の抽出結果

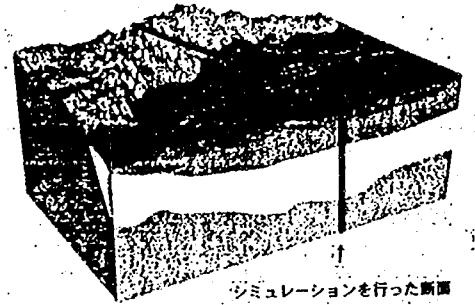


図2 三次元地盤モデル(地層層序の例)

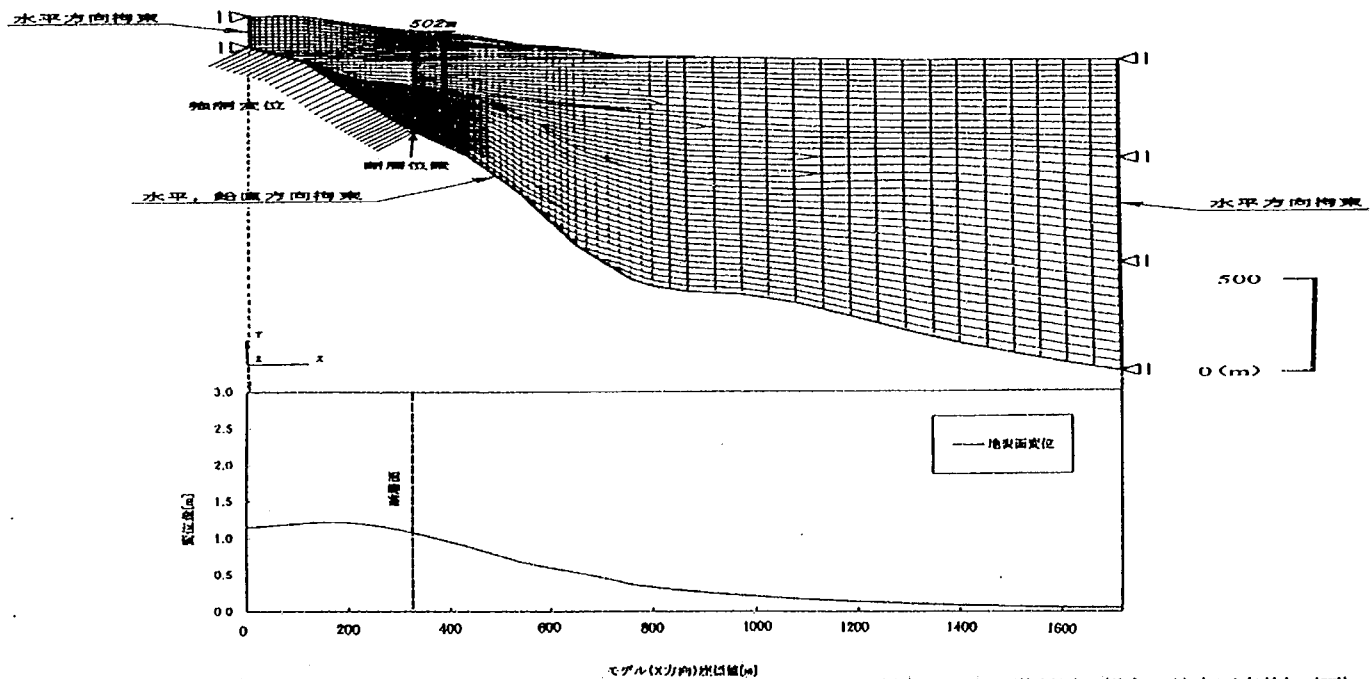


図3 有限要素法のモデル(深度 500m)(上)と解析結果例(強制変位 1.5m、断層傾斜角 70 度、逆断層の場合の地表面変位)(下)

3. 主な研究成果物

黒木貴一、品川俊介：鞍部と地形線から構成される線状模様の認定方法，日本地理学会発表要旨集，52，214-215，1997.10.

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：建設現場における空中写真からの活断層認定に関わる問題—双葉断層を例として—，季刊地理学，50-3，1998.

黒木貴一、品川俊介：活断層起源の線状模様と断層の位置関係の検討，日本地理学会発表要旨集，54，142-143，1998.

品川俊介：地形学的方法による客観的な活断層の認定，第37回土木研究所研究発表会論文集，土木研究所資料，3603号，49-52，1998.12

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.

(脇坂、梶川、品川)

1.1 (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試験調査 (その1)

研究期間：平10～平14

担 当：振動研究室

【要旨】

適切な地震防災計画の策定や、耐震設計における合理的な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まで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。そこで、

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に関する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している。10年度は、活断層の活動性に関して地震学、地質学等の知見及び情報を収集し、ハザードマップ作成手法に係る問題点及び研究課題を明らかにした。

1. 研究方法

ハザードマップ作成のために、特に開発することが必要な技術の1つに活断層の活動性の評価方法がある。10年度は文献調査等により、活動性の指標である以下の(a)から(c)について地震学、地質学等の知見及び情報を収集した。

(a)活断層の活動度・平均変位速度

(b)平均活動間隔

(c)現在から特定の期間内の地震発生確率

2. 研究結果

2. 1 活断層の活動度・平均変位速度

活断層の活動度は地質学的な見地から推定される平均変位速度により定義され、活断層の活動性を大略的に表す指標であり、平均変位速度が不明な場合にも地形の新鮮さなどに基き推定されていることがある。平均変位速度は、年代が既知の地層や地形の累積変位量を形成年代で除して得られるものであり、活断層の長期間の平均的な活動性を表す指標であるが、実際には、累積変位量の情報が得られたとしても、その形成に要した期間が不明な場合が多く、平均変位速度が示されていない活断層が少なくない¹⁾。活断層の活動性をより詳細に考慮してハザードマップを作成するためには、平均変位速度がある一定以上の精度で推定されていることが望ましいが、その推定には以下に示す課題がある。

(a)地層や地形の形成年代が正確にわからない場合には、平均変位速度の精度が悪くなり、また、形成年代が不明な場合には平均変位速度を算出することができない。

(b)累積変位量の定義として、変位の上下成分、水平成分、上下と水平の合成値が挙げられる。科学技術庁による最近の活断層調査結果²⁾では、累積変位量の定義が明らかにされるものが増えているものの、これまでの調査結果には定義が示されていないものがある。

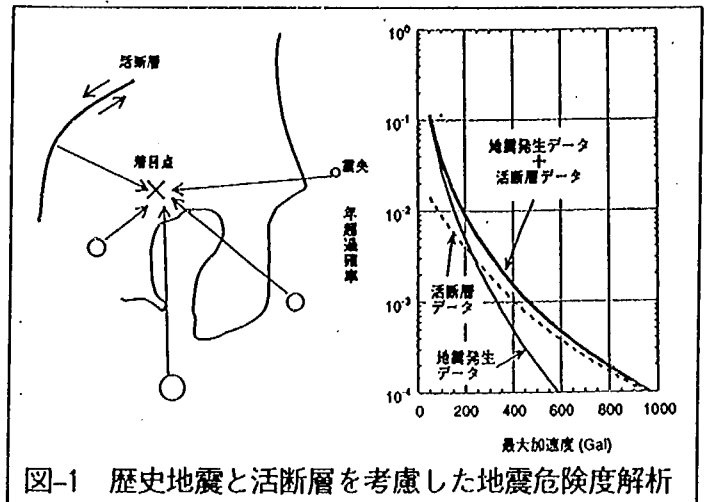


図-1 歴史地震と活断層を考慮した地震危険度解析

(c) 累積変位量は断層に沿った各点で異なるため、1 地点の調査結果から算出される平均変位速度を用いて、断層全体を代表させることができない。

2. 2 平均活動間隔

活断層の1回の活動による変位量を経験的な推定式やトレンチ調査に基づき推定し、平均変位速度で除することにより、平均活動間隔を推定することができる。

(1) 経験的な推定式に基づく方法²⁾

経験的な推定式に基づく方法が一般的であり、松田の式³⁾等を用いて活断層の長さ等から一回の活動による変位量を推定する。経験的な推定式を用いた活断層の平均活動間隔の推定では、以下の点に注意が必要である。

(a) 平均変位速度 (2. 1 参照) の精度が平均活動間隔の推定に及ぼす影響が大きい。

(b) 活断層の変位量推定式の精度が平均活動間隔の推定に及ぼす影響が大きい。

(2) トレンチ調査に基づく方法

過去に活断層が活動した時期を複数回について精度よく特定することができれば、平均的な活動間隔を推定することができる。しかしながら、現時点では、以下(a)、(b)のような課題があり、精度よく平均活動間隔が推定されている活断層の数は限定されている。

(a) 個々の活動時期の推定については、年代測定の精度だけではなく、その活動がどの地層までを変位させているかの認定に係る不確定性も含まれる。

(b) 活動が過去にあったとしてもその痕跡が地表に達しなかった場合や、液状化等の痕跡をその断層での活動と認定してしまう場合など、地震発生認定に関する問題がある。

2. 3 特定期間内の地震発生確率の推定

同じ場所ではほぼ同じ規模の地震がおよそ一定の間隔で繰り返し発生すると考える固有地震説は、本来、プレート境界型地震を対象としたものであるが、これまでは内陸活断層に起因する地震についても適用されてきた。しかし、兵庫県南部地震以降、活断層の調査が精力的に実施されるようになり、活動履歴に関する情報をはじめとして活断層に関する調査結果が急速に蓄積されつつあることから、特定期間内の地震発生確率の推定には、これらの情報を考慮することが望ましい。特定期間の地震発生確率の推定は、地震発生確率と前回活動時期からの経過時間の関係を確率分布でモデル化することにより行われるため、以下の要因が発生確率の推定結果に影響を及ぼす。

(a) 活断層の活動間隔の平均値とそのばらつきの評価

(b) 活断層の活動間隔の確率分布形状

(c) 活断層の前回活動時期

2. 2 により(a)の評価にはばらつきが伴うため、特定期間内の地震発生確率の評価に大きな影響を及ぼす。また、対象とする活断層が平均活動間隔を過ぎて活動していない場合には、確率分布の裾野の形状が発生確率の評価に大きな影響を与えるため、活断層の活動履歴情報に応じて適用する(b)の確率分布形状の選択が重要である。さらに、個々の活断層により(c)の前回活動時期に関する情報の精度と量が異なるため、情報に応じて特定期間内の地震発生確率を合理的に推定する方法の開発が必要である。

【参考文献】 1) 活断層研究会：新編 日本の活断層—分布図と資料—、東京大学出版会、1991 年

2) 科学技術庁：第 2 回活断層調査成果報告会予稿集、1998 年

3) 松田時彦：活断層から発生する地震の規模と周期について、地震、第 2 輯 vol. 28、1975 年

4) 地震調査研究推進本部地震調査委員会長期評価部会：長期的な地震発生確率の評価方法について (改訂試案)、1999 年

(田村, 片岡, 中尾)

1.1 (3) 大規模地震を想定した設計地震動の設定手法に関する試験調査 (その2)

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。10年度は、断層モデル手法の高精度化を図るとともに、次年度以降に実用的な断層モデル設定法を開発するために、既往の断層調査法と断層パラメータ評価法の調査・整理を行った。また、それらの成果をもとに、1923年関東地震の際の東京湾口部における地震動の推定を行った。

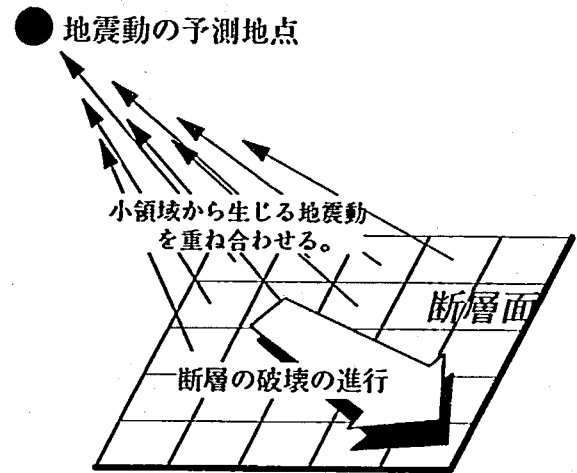


図-1 断層モデルを用いた地震動推定手法

1. 研究方法

1.1 断層モデル手法

震源断層の破壊はある一点（震源）で始まり、時間と共に進展して断層面を形成する。このような震源断層の破壊過程をモデル化したものは断層モデルとよばれ、様々な観測記録や地盤構造に基づいて作成されている。この断層モデルを用いることにより、震源特性を反映した地震動を推定することが可能であり、そのとき用いる地震動推定手法を断層モデル手法とよんでいる。断層モデル手法には、中小規模の地震による地震記録を重ね合わせて大規模地震の地震動を合成する半経験的手法と、地震動の発生・伝播を理論的に数式を用いて表現して計算する理論的手法等がある。10年度は、地盤を無限に広がる均質な弾性体であると仮定していた従来の理論的手法を改良し、地盤をより現実的な水平成層構造（地盤の特性が水平方向には一定で、深さ方向には変化する）にモデル化して計算を行うことができるようにした。

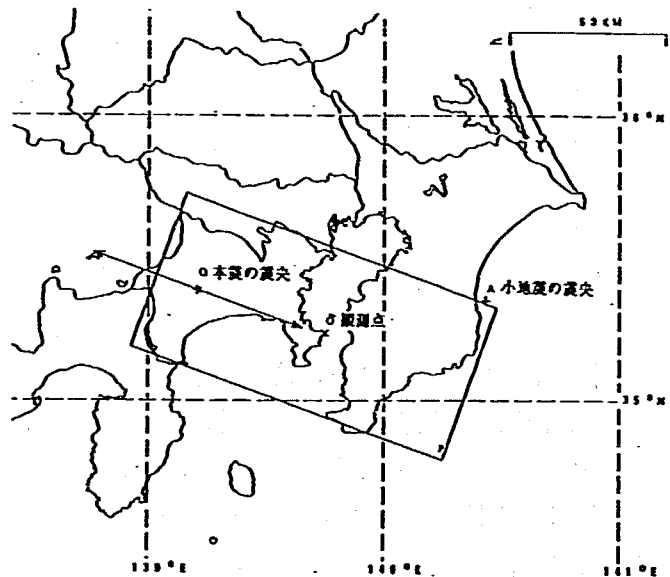


図-2 関東地震の断層面、震央等の位置図

1.2 検討ケース

既往の断層調査法と断層パラメータ評価法を整理した結果から、海峡横断道路プロジェクト計画地点付近で発生し、比較的詳細な断層モデルが提案されている 1923 年関東地震（気象庁マグニチュード $M_{JMA}=7.9$ ）を想定し、東京湾口部における地震動の推定を行った。地震動推定の対象地点は湾口部に近い観音崎観測点（N35.25, E137.75）である。計算は半経験的手法に加え、1.1で述べた水平成層構造の地盤モデルを用いる理論的手法によっても行った。理論的手法による計算では、Sato 他(1998)が本郷における地震動の推定に用いた 12 層からなる地盤モデルを用いた。

関東地震の断層モデルとしては、Wald and Somerville (1995)によって提案されているモデル（以下、WSモデルとよぶ）を用いた。WSモデルでは、130[km]×70[km]の断層面を 70 枚の小断層に分割し、すべり角、くい違い量、震源時間関数が小断層毎に求められている。理論的手法ではこの断層の破壊過程を忠実

に再現して計算を行ったが、半経験的手法では断層の破壊過程が小地震と大地震で相似であると仮定するため、くい違い量の分布のみを考慮して計算を行った。関東地震の断层面、震央、観測点の位置を図-2に示す。また、半経験的手法で用いる小地震の記録としては、図-3に示す1987年千葉県東方沖地震 ($M_{JMA}=6.7$) の際に観音崎観測点で得られたNS成分の記録を用いた。

2. 研究結果

半経験的手法と理論的手法による推定地震動をそれぞれ図-4と図-5に示す。これによると、半経験的手法では短周期成分が、理論的手法では長周期成分がそれぞれ卓越した地震動が推定されている。加速度波形では短周期成分が支配的になるため、振幅を比較すると理論的手法による推定地震動は非常に小さいことが分かる。

2つの推定地震動と半経験的手法に用いた小地震の記録の加速度応答スペクトルを示すと図-6のようになる。小地震の記録とそれを重ね合わせて合成した半経験的手法による推定地震動の加速度応答スペクトルは、卓越周期が長周期側に移行するもののほぼ相似であり、半経験的手法による推定地震動の特性が用いる小地震の記録の特性に強く支配されているといえる。また、理論的手法では長周期成分が再現されており、約4秒以上では半経験的手法の結果と同程度のレベルの加速度応答が得られていることが分かる。したがって適当な小地震の記録が得られていない場合には、長周期帯域ではこのような理論的地震動評価が有効となる可能性がある。

3. 主な研究成果物

1) Tamura, K. and Nakao, Y.: Strong ground motion estimation based on source modeling and semi-empirical Green's function technique, 14th U. S.-Japan Bridge Engineering Workshop, UJNR, Nov. 1998.

2) 中尾吉宏 他：断層パラメータの設定が推定地震動に与える影響，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，667-673，1998年11月

【参考文献】

Sato, T., Graves, R. W., Somerville, P. G. and Kataoka, S.: Estimates of regional and local strong motions during the Great 1923 Kanto, Japan, earthquake ($M_s 8.2$). Part 2: forward simulation of near-fault long-period ground motions, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 88, 206-227, 1998.

Wald, D. J. and Somerville, P. G.: Variable-slip rupture model of the Great 1923 Kanto, Japan, earthquake: geodetic and body-waveform analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 85, 159-177, 1995.

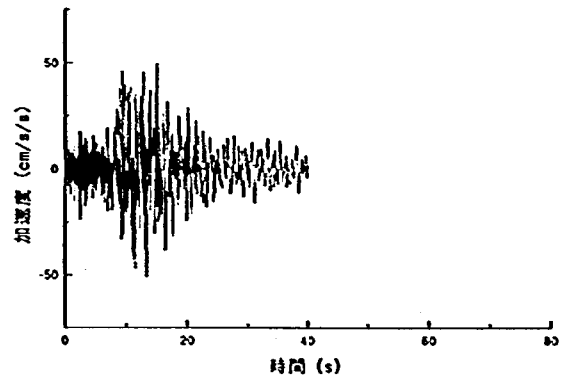


図-3 半経験的手法に用いた小地震の記録

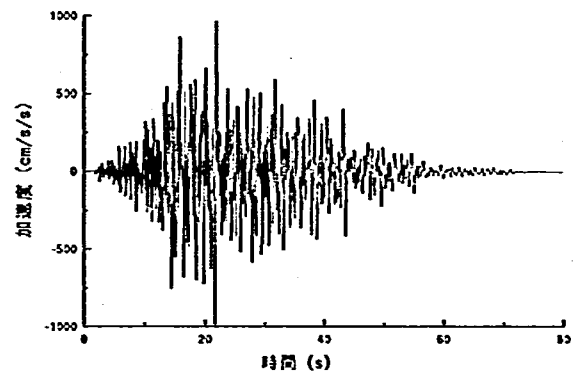


図-4 半経験的手法による推定地震動

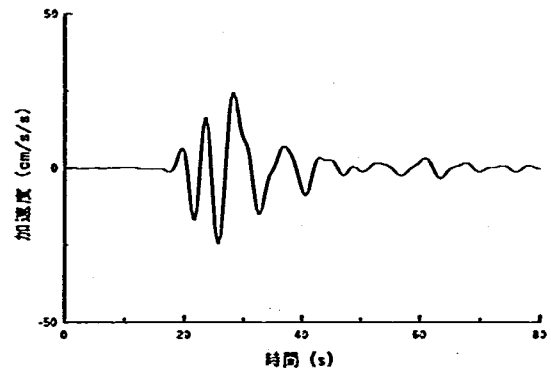


図-5 理論的手法による推定地震動

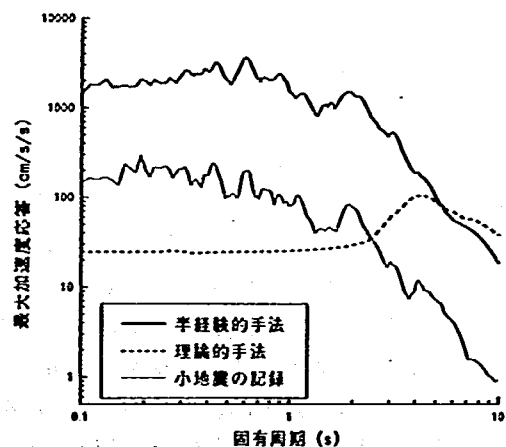


図-6 加速度応答スペクトルの比較

(田村，片岡，中尾，千葉)

1.2 耐震性水準の合理的な設定方法の開発

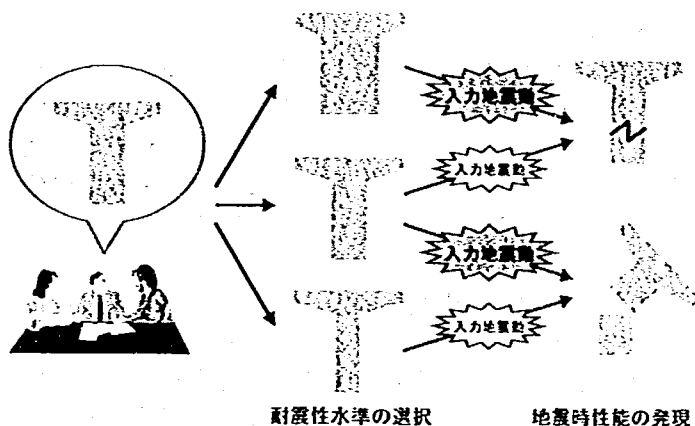
(公共土木施設の耐震性水準の横断的整合に関する研究)

研究期間：平 10～平 12

担 当：防災技術課

【要旨】

道路、河川管理施設等の公共土木施設の耐震設計にあたっては、その対象とする入力地震動及び求められる耐震性能が地域内で整合が取れており、適切な投資配分で行われる必要がある。しかし現在のところ、各施設の設計には異なる基準が用いられており、必ずしも整合が取れているとは言い難い。本研究は、複数の構造物の耐震性水準を、その整合性を保ちながら合理的に設定するための手法について検討し、耐震対策事業の効率化に資するものである。平成 10 年度は、複数構造物の耐震対策内容を比較し、選択するための、耐震性水準、性能レベルの表示法を提案したほか、地域における耐震対策効果を最大にする耐震対策内容を設定する計算法を検討した。



1. 研究方法

構造物の耐震性水準を把握し選択するためには、地域で想定される複数の地震動レベルとそれに対して水準を変化させた場合に発現する地震時性能を組み合わせることで表示することが考えられる。性能の表示法については、これまで合衆国の建築分野を中心として、パフォーマンスマトリックスを用いることが試みられてきた。本研究では、複数の構造物の耐震性水準を比較しながら設定するため、パフォーマンスマトリックスを発展させた IOC カーブ (Input-output-cost curve) を提案し、特定条件の道路橋について実際に概略設計を繰り返して IOC カーブを導いた。また、IOC カーブが与えられた際に、構造物の最適な耐震性を決定する方法を検討した。

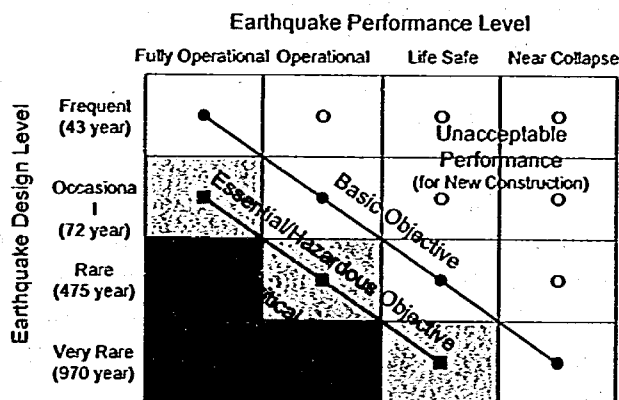


図 1 合衆国 VISION-2000 委員会によるパフォーマンスマトリックス

2. 研究成果

2. 1 IOC カーブの提案

図 1 のパフォーマンスマトリックスは、想定する地震動レベル (確率表示) に対して要求する性能を定めるものであり、構造物の重要度に応じて要求する性能を変化させている。図中斜めの線が地震動レベルとそれに対して要求する性能レベルの組み合わせを示したものであり、構造物に要求する耐震性水準を示したものである。この場合、性能、水準が要求ベースであるため、実際の設計では要求と同じかそれよりも高い水準で設計することになり、マトリックスを示したのみでは実際に選ばれる耐震性水準やそのための構築コストは不明である。本研究では、パフォーマンスマトリックスを要求ベース (demanded performance matrix: DPM) のものから実現ベースのもの (realized performance matrix: RPM) に発展させ、特定のサイトにおいて耐震性水準すなわち設計内容を変化させたときに、想定地震動に対して実際に発現する性能を表示することを提案した (図 2 左)。さらに、このパフォーマンスマトリックスに、各耐震性水準を確保するために必要

な構築費用を加味したものを IOC カーブ (input-output-cost curve) として示した (図 2 右)。IOC カーブを用いて、特定構造物の耐震対策費用を考慮しながら耐震性水準を選択することや、複数構造物の耐震性水準のメリハリを検討することが可能となる。

2. 2 IOC カーブの試算例

実際の橋梁について、一定の架設条件のもとで設計内容すなわち耐震水準を変化させ、RPM および IOC カーブを描いた。架設条件は 3 径間連続橋 (3×50m) で、上部構造は RC 床版鋼箱桁 (4 車線)、下部構造は高さ 10m の RC 橋脚とし、基礎工は杭長 22m の場所打ち杭と設定した。また、地盤条件は第 II 種地盤とし、粘性土層、砂質土層、砂礫層の三層構成を仮定した。地域で想定されている地震動としては、PGA=100gal (再帰年 1 年) ~1100gal (同 1000 年) の範囲で 4 レベルを想定した。図 3 は、橋脚断面を変化させ、各地震動レベルに対して各設計内容の橋脚が示す性能を示したものである。ここで、性能レベルは、次式のパラメータ λ を定義し、塑性状態率と名づけた。

$$\lambda = \frac{\delta - \delta_y}{\delta_u - \delta_y}$$

ここで δ は橋脚天端の変位、 u, y はそれぞれ終局状態、降伏状態を表す添字である。また、図 3 中の各線は設計内容 C1 ~ C6 に対応し、番号が小さいほど耐震性水準が高い設計となっている。これらの線は、同一水準 (設計内容) において各地震力が作用した場合の性能を示したもので、等設計線あるいは等水準線と呼ぶことができる。この等水準線上では設計内容が同じであり、構築コストも同額となることから、図 3 の RPM にコストの軸を加え三次元的に示したものが図 4 で、これが IOC カーブに相当する。図中地震動レベル-性能 (λ) で張られる平面に各等設計線を投影しているが、これは図 3 の RPM にほかならない。図 4 より、一般的な設計において示される IOC カーブの形状が特定された。本年度の検討においては、性能を表すパラメータとして塑性状態率 λ を定義したが、地震後の構造物の使用性 (serviceability)、安全性 (safety)、修復性 (reparability) などの性能規範を適切に選択し、それらと連動するパラメータを検討する必要がある。また、被災した場合の修復にかかる費用などのダメージコストの算入方法についても今後検討する必要がある。さらに、このような検討を経た後、複数の構造物に対して IOC カーブが与えられた際に地域において各構造物の耐震性水準の整合が取れ、最も満足度が高い状態を選択する手法について検討を進める。

3. 主な研究成果物

- ・野崎智文、杉田秀樹、社会基盤施設の耐震性水準の合理的な設定法に関する基礎的研究，土木技術資料 Vol. 41 No. 1, 56-61 頁，平成 11 年 1 月
- ・野崎智文、杉田秀樹，社会基盤施設における耐震性水準の合理的な設定方法に関する基礎的研究，土木研究所資料 (作成中)

(杉田，野崎，遠藤)

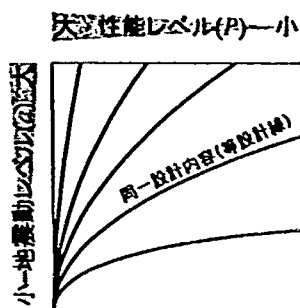


図 2 要求ベースのパフォーマンストリック (左) と IOC カーブ (右)

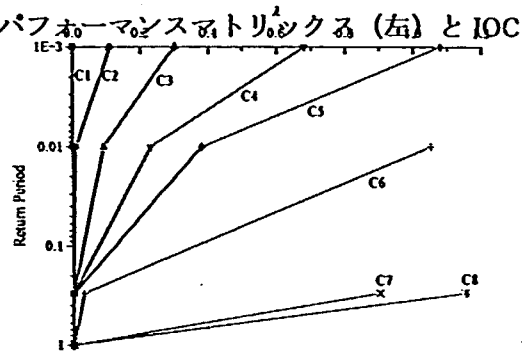
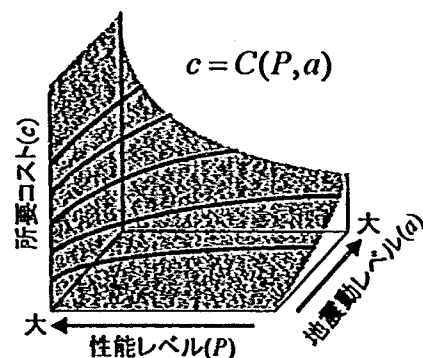


図 3 RPM の試算例

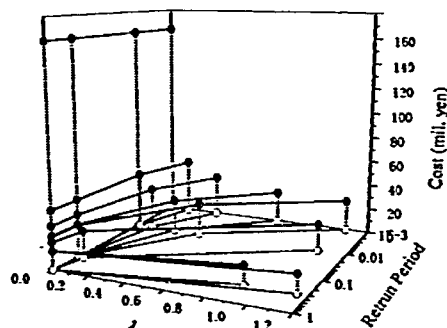
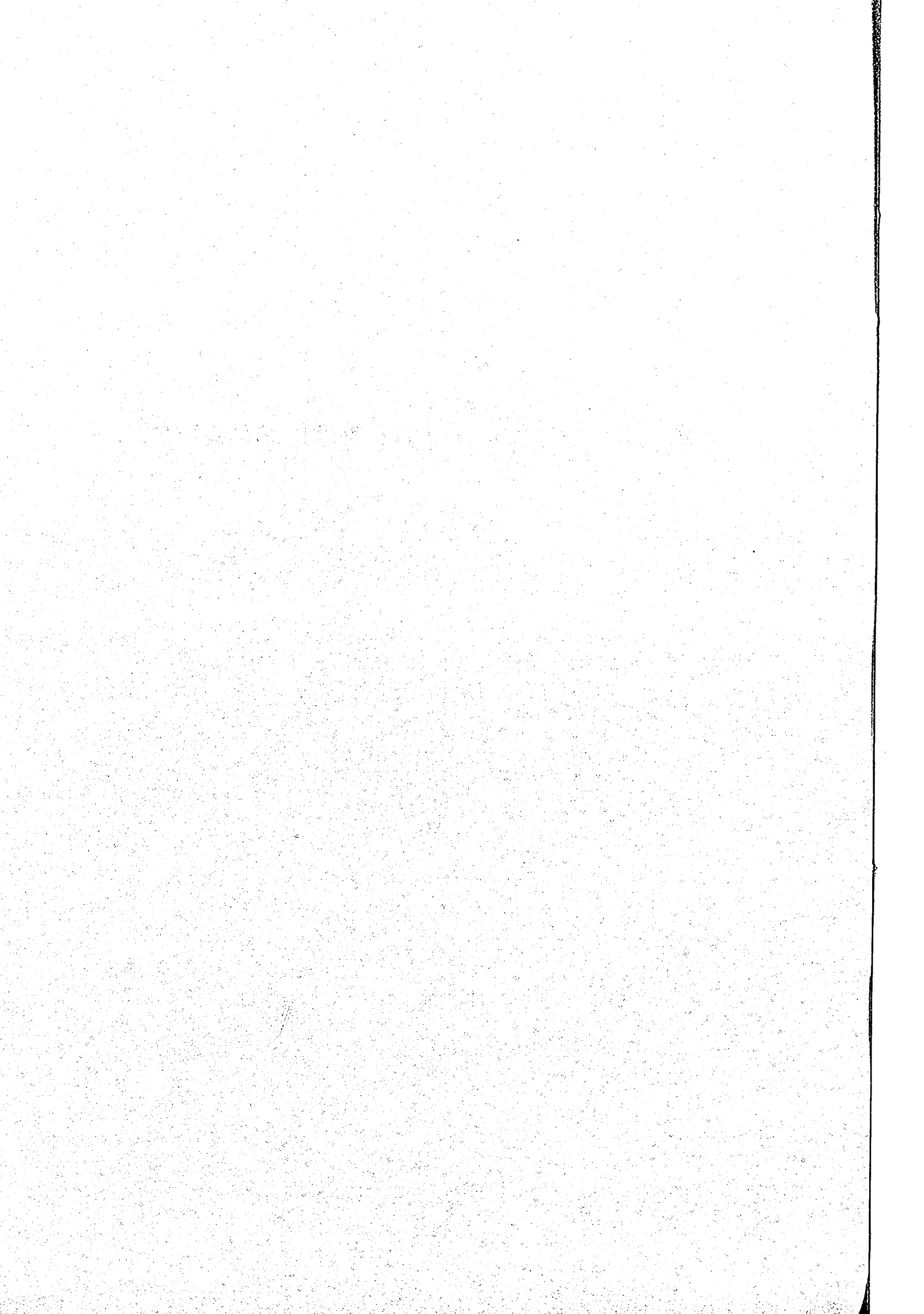


図 4 IOC カーブの試算例

水環境における水質リスク管理に関する研究



水環境における水質リスク管理に関する研究

1. 研究の背景

現在、水の安全性を示す指標としては大腸菌群と 26 の化学物質が用いられているが、これらでは代表し得ない病原性微生物や化学物質による汚染が指摘されている。平成 8 年に埼玉県越生町で発生したクリプトスポリジウムと呼ばれる原虫による集団感染や、最近問題となっている内分泌かく乱物質（いわゆる環境ホルモン）による汚染等がその例であり、水域における水質面のリスクは増大あるいは健在化している。

こうした病原性微生物や化学物質については分析法すら確立されていないものがあり、現在の技術では十分な対応が困難である。

そこで、安全で安心して利用できる水環境を確保するため、水質に関するリスクを適切に評価し、効率的にリスクを制御する手法を開発する必要がある。

2. 研究の目的

本研究は、リスク原因として近年になって感染や汚染が明らかにされつつあるクリプトスポリジウムと内分泌かく乱物質を採り上げ、水環境におけるリスクの把握、評価及び制御のための手法を開発することを目的としている。

3. 達成目標

- ① リスク原因の簡便な試験方法とモニタリング手法
- ② 全国の水域における汚染の実態把握
- ③ リスク評価技術
- ④ 目標とすべきリスクレベルの設定手法
- ⑤ リスク制御手法

4. 社会的な効果

- ① 病原性微生物や化学物質による汚染の実態が明らかにされることで、生活面や事業面等で迅速な措置をとることができ、汚染に伴う被害を最小限に食い止めることができる。
- ② リスクの制御を適切に行うことによって、安心して利用できる水域が確保され、潤いのある環境の形成が期待できる。

－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

2.1	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)	… 20
2.2	下水処理水の安全性向上に関する研究……………	(三 次 処 理 研 究 室)	… 26
2.3	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)	… 32
2.4	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)	… 38
2.5	生態系からみた下水処理水の評価方法に関する調査……………	(水 質 研 究 室)	… 40
2.6	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)	… 46
2.7	水道水源河川における汚濁物質モデルに関する研究……………	(水 質 研 究 室)	… 52

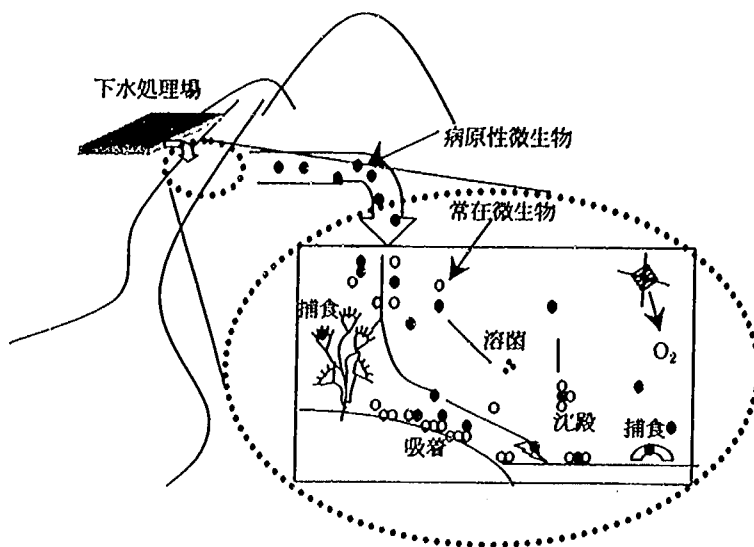
2.1 水系における病原性微生物の挙動に関する研究

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性が高まってきた。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なすべく、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。10年度は文献調査および水中における微生物挙動に関する基礎実験を行った。



1. 研究方法

1. 1 文献調査

本調査では、①水系における病原性微生物、②下水および環境水中における病原性微生物存在量、③水中における微生物の挙動に関する文献調査を行った。

1. 2 水中における微生物挙動に関する基礎実験

(1) 微生物の消長に与える水温および溶存酸素の影響

生理食塩水および下水二次処理水に、各供試微生物を 10^4 CFU/ml 程度になるように添加、4、20、30℃恒温水槽にて静置または振盪して、経時的に微生物濃度の測定を行った。供試微生物の種類およびその測定方法を表-1に示す。なお、二次処理水の滅菌処理は行っていないので、添加微生物以外の培地上に形成された集落も測定値に含まれる。

表-1 供試微生物の種類および測定方法

微生物種		測定方法		
		培地名	培養方法	集落形態
大腸菌 <i>Escherichia coli</i>	JCM1649	合成発色酵素基質培地 (メルク製)	表面塗抹、好気、36℃、18～24hr	青色
緑膿菌 <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	JCM5962	合成発色酵素基質培地 (メルク製)	表面塗抹、好気、36℃、18～24hr	赤色
エンテロバクテリウム (大腸菌群) <i>Enterobacter cloacae</i>	JCM1232	NAC 寒天培地 (日水製薬製)	表面塗抹、好気、36℃、18～24hr	緑色
腸球菌 <i>Streptococcus faecalis</i>	JCM5803	M-Enterococcus 寒天培地 (Difco 製)	表面塗抹、好気、36℃、18～24hr	赤色
クロストリジウム <i>Clostridium perfringens</i>	JCM3817	卵黄添加加ミシ加 CW 寒天培地 (日水製薬製)	表面塗抹、嫌気、36℃、48hr	白濁環 培地黄変
DNA フェージ 大腸菌ファージ T4	IFO20004	普通寒天培地 宿主菌：IFO13168 strain B	遠心分離 (12000rpm 10 分間) 上清を直接ブロー法	ブロー法
RNA フェージ 大腸菌ファージ Qβ	IFO20012	普通寒天培地 宿主菌：IFO13965 male strain of W3110	遠心分離 (12000rpm 10 分間) 上清を直接ブロー法	ブロー法
一般細菌		標準寒天培地	混釈平板法、好気、 36℃、18～24hr	白色
大腸菌群		デソキシコール酸塩培地	混釈平板法、好気、 36℃18～24hr	赤色、1mm 以上

一般細菌および大腸菌群 (デソキシコール酸塩培地) は測定方法を記載

(2) 微生物の消長に与える水質影響

以下の7種類の試料に各供試微生物を 10^4 CFU/ml 程度になるように添加、20℃恒温水槽に静置して、経時的に微生物濃度の測定を行った。添加供試微生物の種類およびその測定方法は前述と同様である。

①生理食塩水、②流入下水、③塩素処理水（原水：二次処理水、塩素注入率：3.2mg-Cl/L、接触時間：24 分、全残留塩素濃度：0.05mg-Cl/L 以下）、④オゾン処理水（原水：二次処理水、オゾン注入率：3.5mg-O₃/L、接触時間：15 分、吸収効率：97%、オゾン消費量：3.4mg-O₃/L）、⑤紫外線処理水（原水：二次処理水、紫外線透過率：73%、紫外線強度：4.91mW/cm²、紫外線照射量 68.8mWs/cm²）、⑥河川水（多摩川、東京都立川市付近）⑦海水（東京都八丈島沖）

2. 研究結果

2. 1 文献調査

(1) 水系における病原性微生物

水系における感染症は、飲料水やレクリエーション水（プール、海水浴、親水利用）などによるものがある。近年の我が国における水系感染症の集団発生事例では、原因は地下水、簡易水道を中心とする水道施設の管理不十分や給水設備の故障によるものであり、原因微生物は、大腸菌とカンピロバクターが大部分を占め、その他サルモネラ、赤痢菌、クリプトスポリジウム、ウェルシュ菌等である⁹⁾。

表-2 に水系感染症の一部に関する病原体およびその症状を示す。病原体は細菌、原虫、ウイルスと様々である。また、水系感染を起こす可能性のある腸管系ウイルスは 130 余りあるとされており²⁾、いまだ同定されていない病原性微生物も存在すると考えられる。

(2) 下水および環境水中における病原性微生物存在量

ヒトの腸内の微生物叢は年齢、食物やストレス等によって変化するが、糞便 1g 中には 70~100 種類、10¹¹~12 程度の細菌が存在する。優

占している細菌としては、偏性嫌気性群のバクテロイデス、嫌気性連鎖球菌 10¹¹~12、ビフィズス菌 10¹⁰、大腸菌および腸球菌 10⁷~8、乳酸桿菌 10⁶、ウェルシュ菌 10³ 等がある⁹⁾。ウイルス指標としての有効性が指摘されている大腸菌ファージは、DNA ファージ：23~77%、RNA ファージ：0~12%で検出され、DNA ファージ（10²~10⁴ 個/g）よりも RNA ファージ（0~10¹ 個/g）の方が少ない⁹⁾。また、病原性微生物については、感染者の糞便 1g 当たり、サルモネラが 10⁶、エンテロウイルスが 10⁶、ロタウイルスが 10¹⁰ 程度存在する⁷⁾。

表-2 水系感染症^{3),4)}

	病原体	潜伏期	症状	感染症 類型
細菌	コレラ (<i>Vibrio cholerae</i>)	数時間~5 日(通常 2~3 日)	急激に始まる水様性下痢、嘔吐、脱水、発熱、腹痛	3 号 感染症
	チフス(<i>Salmonella typhi</i>) パラチフス(<i>S. paratyphi</i>)	1~3 週間(通常 10~14 日)	発熱、頭痛、背痛、脱力感、食欲不振、バラ疹、脾腫	3 号 感染症
	サルモネラ (<i>Salmonella</i> spp.)	数時間~3 日(通常 12~36 時間)	腹痛、下痢、嘔吐、発熱、食欲不振、ときに敗血症症状	
	赤痢(<i>Shigella</i> spp.)	1~7 日(通常 2~3 日)	発熱、腹痛、下痢(粘血便)、裏急後重	3 号 感染症
	毒素原性大腸菌 (ETEC) 組織侵入性大腸菌(EIEC) 病原血清型大腸菌(EPEC) 腸管出血性大腸菌(EHEC)	6 時間~3 日(通常 10~15 時間)	水様下痢、腹痛、コラ様の発症 発熱、腹痛、粘血便、赤痢様発症 腹痛、下痢、嘔吐、発熱 腹痛、血便を伴う下痢、嘔吐	2 号 ^{*)} 感染症
	ビブリオ (<i>Vibrio parahaemolyticus</i>)	3 時間~3 日(通常 12~24 時間)	下痢、腹痛、嘔吐、発熱、頭痛、ときに赤痢様症状	
	エルシニア (<i>Yersinia enterocolitica</i>) (<i>Y. pseudotuberculosis</i>)	3~10 日(通常 7 日以内)	下痢、腹痛、発熱、頭痛、嘔吐、咽頭痛、関節炎、結節性紅斑、発疹、ときに敗血症症状	
	カンピロバクター (<i>Campylobacter jejuni</i>) (<i>C. coli</i>)	1~10 日(通常 3~5 日)	下痢、発熱、腹痛、嘔吐、嘔気、乳幼児では赤痢様血便あり	
	ウェルシュ菌 (<i>Clostridium perfringens</i>)	6~24 時間(通常 10~12 時間)	腹痛、下痢、嘔気	
	レジオネラ (<i>Legionella pneumophila</i>)	2~10 日	頭痛、発熱、肺炎、	1 号 感染症
	緑膿菌 (<i>Pseudomonas</i> spp.)		下痢、粘膜感染症、日和見感染症	
原虫	赤痢アメーバ (<i>Entamoeba histolytica</i>)	数日~数ヶ月	発熱、腹痛、嘔吐、肝臓病、粘血性下痢	1 号 感染症
	自由生活アメーバ類 (<i>Naegleria fowleri</i>) (<i>Acanthamoeba</i> spp.)	3~14 日	発熱、項部硬直、嘔吐 髄膜炎、角膜炎、日和見感染症	
	ランブル鞭毛虫 (<i>Giardia lamblia</i>)	3~6 週	水様性下痢、食欲不振、悪心、嘔吐、微熱	1 号 感染症
	クリプトスポリジウム (<i>Cryptosporidium</i> spp.)	4~5 日	腹痛、水様性下痢	1 号 感染症
ウイルス	ポリオウイルス (polio virus)	1~2 週	発熱、脊髄性麻痺	3 号 感染症
	コクサッキー A 群ウイルス (coxsackie A virus)	5~10 日	手足口病、風邪様症状、発熱、心膜炎、心筋炎	
	ノルウォークウイルス (Norwalk virus)	2~3 日	胃腸炎、下痢、嘔吐、腹部痙攣	
	ロタウイルス (rota virus)	1~2 日	下痢、嘔吐、脱水症状	
	アデノウイルス (adeno virus)	5~10 日	結膜炎、胃腸炎、咽頭炎、肺炎	
	エンテロウイルス (entero virus)	2~6 週	発熱、食欲不振、悪心、嘔吐、倦怠感、黄疸	1 号 感染症

感染症類型は「新しい時代の感染症対策について報告書」公衆衛生審議会伝染病予防部会基本問題検討小委員会、平成 9 月 12 月による。

*) 腸管出血性大腸菌感染症は 2 号感染症として例示されている。

下水中からは、これらの糞便に含まれる病原性微生物が検出される可能性があり、サルモネラはほぼ常在し、スタフィロコッカスも存在の可能性が高く、カンピロバクターは検出される場合とされない場合があり、屠殺場排水が供給源となる場合が指摘されている。また、ウイルスの検出率は45~100%と高く、濃度は $10^0 \sim 10^2$ 個/100mlであり、下水中の大腸菌ファージはほぼ全試料(100%)で検出されており、濃度は $10^3 \sim 10^4$ 個/mlである⁹⁾。

このように、下水中には病原性微生物が流入する可能性があるため、下水道従事者は感染の危険性を有することとなる。しかし、C.S.Clark らは、下水道従事者を対象に感染症に関する臨床検査を実施した結果、下水道従事者が特に感染しやすいとはいえなかったと報告⁹⁾している。

河川水中においても黄色ブドウ球菌、サルモネラ、コレラ、病原性大腸菌等の病原性微生物が検出されており、サルモネラの汚染は常在的であるとともに検出される血清型が増加している^{9),10),11),12)}。

(3) 水中における微生物の挙動

環境中に放出された微生物の生残・死滅に影響を与える要因は、非生物的要因として、温度、圧力、電磁波、基質、無機養分、イオン組成、有効水、pH、酸化還元電位、ガス組成、毒性等であり、生物的要因としては、競争、拮抗、捕食、植物との相互作用、菌体側の要因として、耐久型細胞の有無、生理状態、保有するプラスミド等があると考えられる。

1) 水温による影響

桑原らは河川水中細菌の消長に与える水温の影響を検討した結果、大腸菌群、糞便性大腸菌群ともに温度が上昇するにつれて減衰速度が増加したと報告している¹³⁾。また、ウイルスの不活化速度も高温ほど速やかであると報告されている^{14),15)}。

一方、環境中での水温の影響について、御手洗は愛媛県下の河川調査により、大腸菌群数は水温と正比例の関係があり、清浄な水ほどこの傾向が強いと報告している¹⁶⁾。

2) 溶存酸素の影響

微生物は分子状酸素 O_2 の有無が分類上用いられているように、微生物の生活環境中での酸素条件は各微生物の特異性を示す。ヒトを含む多細胞性の高等生物は酸素を利用し、無酸素状態では生活できないが、微生物では、無酸素や嫌気状態においても生育可能な嫌気性菌等が存在する。

腸管系細菌への溶存酸素影響について、Allen らは好氣的条件下と嫌氣的条件下での大腸菌と腸球菌の減衰速度を比較した。その結果、大腸菌は好氣的条件下よりも嫌氣的条件下で急速に減衰するが、腸球菌については両条件下での減衰速度に有意な差は見られなかったと報告している¹⁷⁾。

3) 生物間の影響

細菌や腸管系ウイルスは原生動物や線虫類に捕食される。原生動物による細菌の食性はかなり限定的であり、菌種によっても捕食され易さが異なるとされている¹⁸⁾。

他の細菌の存在による減衰速度への影響については、その微生物種により異なる。尾藤らは河川水への病原性大腸菌 O157 の添加実験により、夾雑菌の存在は大腸菌 O157 の生存を短くする可能性があると報告している¹⁹⁾。一方、佐々木らは蒸留水、生理食塩水、河川水への細菌添加実験において、カンピロバクターは単独培養より、大腸菌を混合した方の生残性が高く、その効果は菌種によって異なり、カンピロバクターは大腸菌、コレラ、サルモネラ、緑膿菌混合の順で生残性が高く、逆に各種細菌へのカンピロバクターの影響を調べた結果、大腸菌の増殖が促進されたと報告している²⁰⁾。

4) 塩類濃度の影響

腸管微生物の海水中での消長に関する報告^{6),21),22),23)}では、どの微生物も淡水より海水中の減衰速度の方が大きい。河川中の大腸菌群数は塩素イオン濃度との間には負の相関関係があり、海水により大腸菌群数は変動する。大腸菌群の塩分耐性について、藤田らは河川の大腸菌群を調査し、上流部では大腸菌群の各属の広い分布が確認されたが、河口付近においては、*Klebsiella* spp. が優性であったことから、大腸菌群の分離株を用いて、人工海水中の塩分濃度変化による発育の変化を測定した結果、*Klebsiella* spp.、*Citrobacter* spp. 属は塩分濃度35%までは影響なく、52%の時に生育阻害傾向が認められた。一方、*Escherichia* spp.、*Enterobacter* spp. は塩分濃度26%以上の時に生育阻害傾向が見られ、大腸菌群中の種による塩分耐性の違いを報告している²²⁾。

ウイルスにおいても塩類濃度は生育に影響を及ぼし、杉島らの研究によればウイルスの海水中の自己減衰速度は淡水中に比較して2倍ほど早いと報告されている²³⁾。

2. 1 基礎実験

(1) 微生物の消長に与える水温および溶存酸素の影響

各微生物種毎での微生物濃度の経時変化を図-1にまとめる。

本実験では、微生物を添加する際に洗浄を行わなかったため、微量(0.2%)の培地成分が含まれる。そのため、微生物の種類により生理食塩水中においても、添加直後(24時間以内)に増殖する傾向が見られた。

生理食塩水中の大腸菌および大腸菌群は、720時(30日)間において2種類の変動パターンを示した。20℃および30℃は振盪の有無を問わず、初期に1~2桁程度増加し、その後の菌数変化はほとんどなかった。一方、4℃では菌数の増加は認められず、時間経過とともに菌数が低下した。その減少速度は大腸菌群の方が大きく、720時間後には菌数が2桁程度低下した。ここでは、低い温度が細菌へのストレス因子となり、また、含まれる栄養源が微量であっても、生育温度が保持されれば、増殖する機会を有することが示されている。

緑膿菌は、4℃および30℃において菌数は低下する傾向であったが、30℃振盪で20日から30日にかけて菌数の増加がみられた。20℃では静置、振盪ともに24時間後までは減少したが、それ以降は増減を繰り返した。

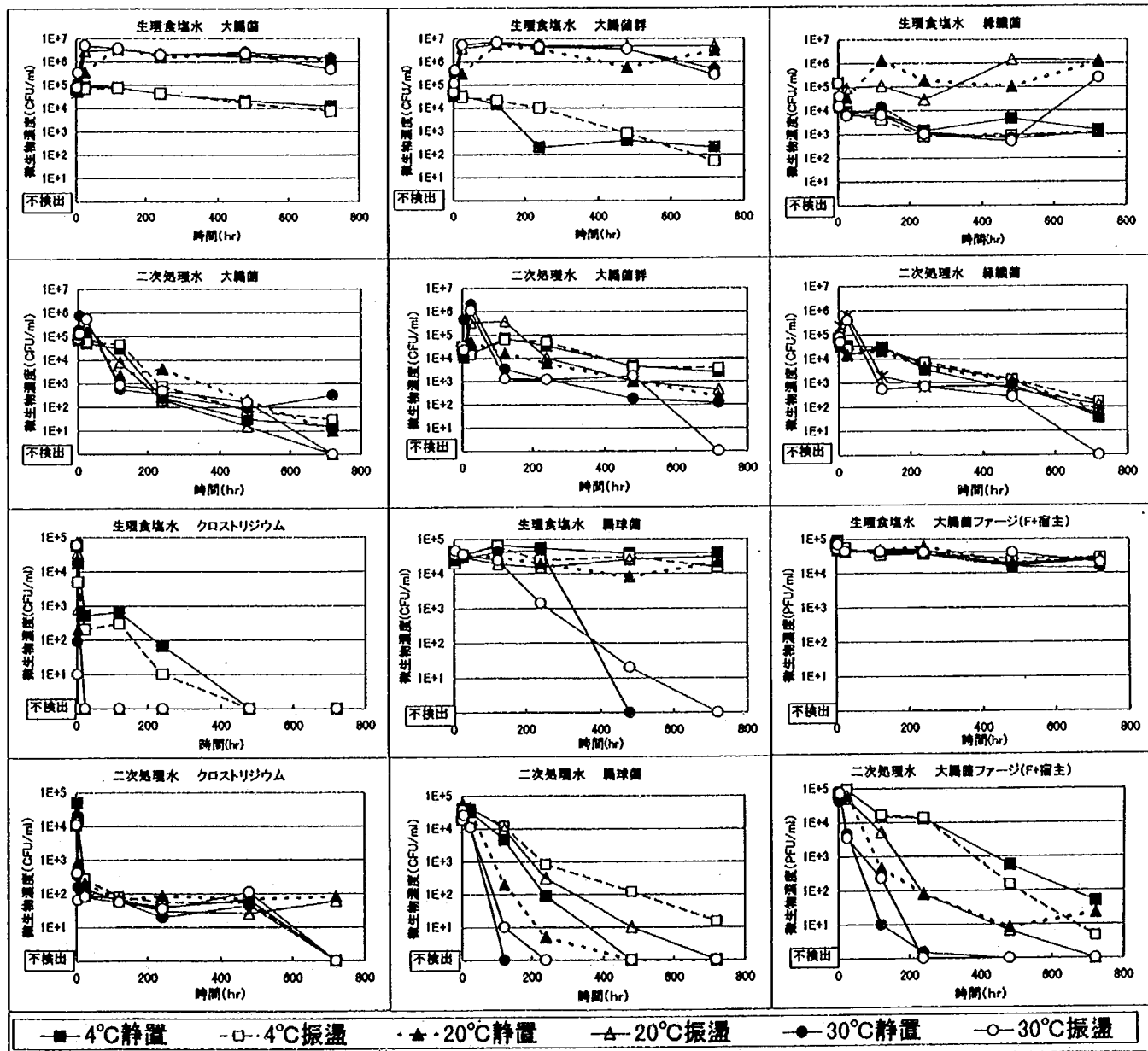


図-1 水温および振盪の有無による微生物の消長(微生物添加 10⁴CFU/ml、遮光)

二次処理水中でのこれら 3 種の細菌は似た挙動を示し、4℃ではほとんど菌数の増加は見られず時間経過とともに緩徐な減少曲線を示した。20℃および 30℃では、初期に菌数の増加が見られたが、その後菌数は低下した。また、温度が高いほど、増殖までの時間が短いとともに、増殖率および減少率が大きかった。

嫌気性細菌であるクロストリジウムは、生理食塩水および二次処理水ともに添加直後に菌数が低下し、生理食塩水では 4℃以外では不検出となった。この時の溶存酸素は 4℃が最も高濃度であり、嫌気性細菌には不利であったと考えられるが、低温度が生育の維持に有利に働いたと考えられる。一方、二次処理水中では、菌数低下後、 10^2 CFU/ml で菌数が安定した。

腸球菌は、生理食塩水中において 4℃および 20℃での菌数は安定していたが、30℃では 120 時間以降に菌数が減少した。一方、二次処理水中においては、全て減少傾向にあり、静置で温度が高いほど減少速度が大きかった。

大腸菌ファージは、生理食塩水中での菌数は振盪の有無・温度設定を問わずほぼ安定していたが、二次処理水中では増加することなく、測定期間を通じて減少傾向にあった。また、その減少速度は温度が高い程大きかった。

本実験において、どの微生物も 4℃で増殖することはなかったが、20℃および 30℃では初期に増加する菌種が認められ、また、温度が高いほど減少速度が大きくなる傾向が見られた。このように、水温はその微生物の状態（増殖期にあるか、減衰期にあるか）によって、増殖および減衰速度が水温と正の相関があると考えられる。

(2) 微生物の消長に与える水質影響

各微生物種毎での微生物濃度の経時変化を図-2 にまとめる。

生理食塩水は希釈水等に使用されることからわかるように、微生物の保存性が良く生菌数の濃度変化が少ないが、その他の供試水は、時間経過とともに生菌数が減少する傾向があった。

二次処理水と紫外線処理水はどの微生物においても似た減少曲線を示し、消毒により微生物に対する影響は変化しなかったものと考えられる。一方、塩素消毒では、緑膿菌、クロストリジウム、腸球菌は二次処理水と類似の消長を示したが、大腸菌は消毒により減少速度が大きくなり、逆に大腸菌群や大腸菌ファージは二次処理水より高い濃度で生残した。

二次処理水と流入下水では、二次処理水の方が好気性細菌である緑膿菌の生残性が高く、嫌気性細菌のクロストリジウムの生残性が低かったため、流入下水は二次処理水より嫌気状態に近かったことが推察される。その他の細菌については、二次処理水と流入下水の消長は類似しており、流入下水-二次処理水での汚濁程度は細菌の消長へ大きく影響しないことが示唆された。

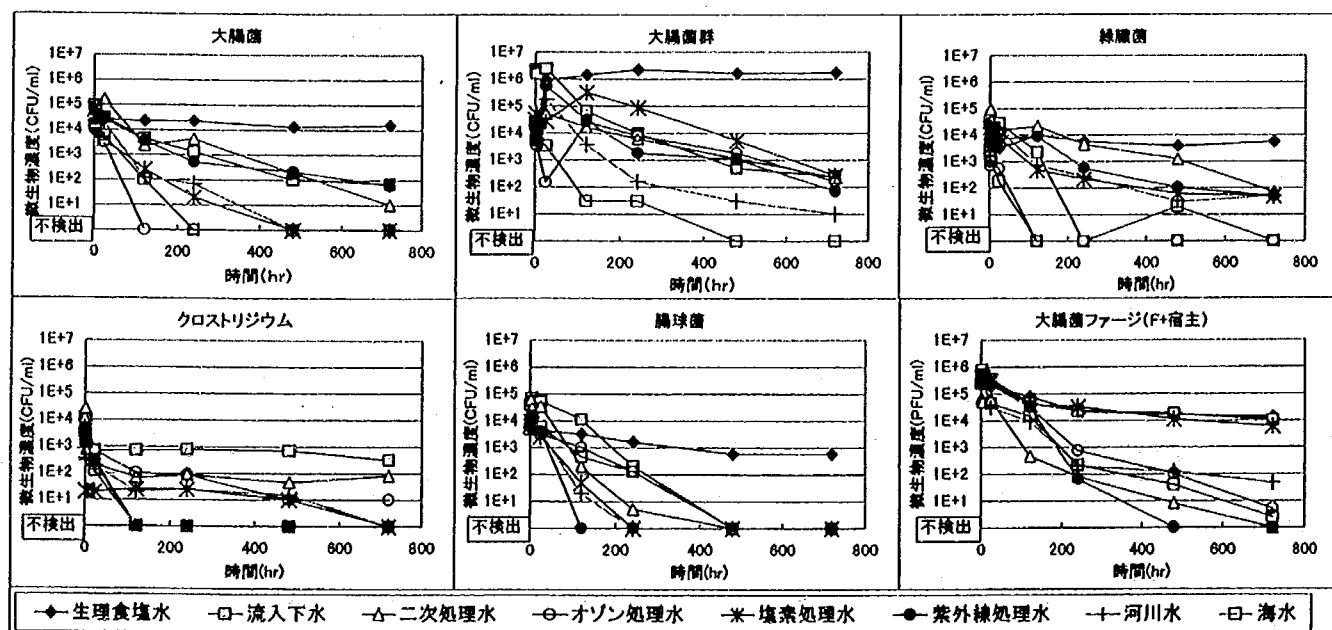


図-2 下水処理水および環境水中の微生物の消長（微生物添加 10^4 CFU/ml、20℃、静置、遮光）

海水による減衰速度の増加が認められたのは、大腸菌、大腸菌群、緑膿菌、クロストリジウムであり、細菌に対して海水は減衰速度を大きくすることが確認された。

図-3 は微生物添加を行っていない供試水中の大腸菌群（デスオキシコール酸塩培地）の経時変化を示すものである。塩素処理水、オゾン処理水および紫外線処理水は試験開始時に、大腸菌群は検出されなかったが、20℃静置での保存において菌数が増加した。これは、測定時の採水量が 1ml であることから検出されなかった細菌が増殖したと考えられる。また、細菌には正常な増殖能を失っており通常の培地では培養できないが、適当な環境に恵まれさえすれば元の正常な状態に回復し増殖しうる状態で存在する損傷菌の存在が指摘されており^{1),24),25)}、本結果も塩素、オゾンおよび紫外線消毒による損傷も回復し増殖能を得たとも考えられる。

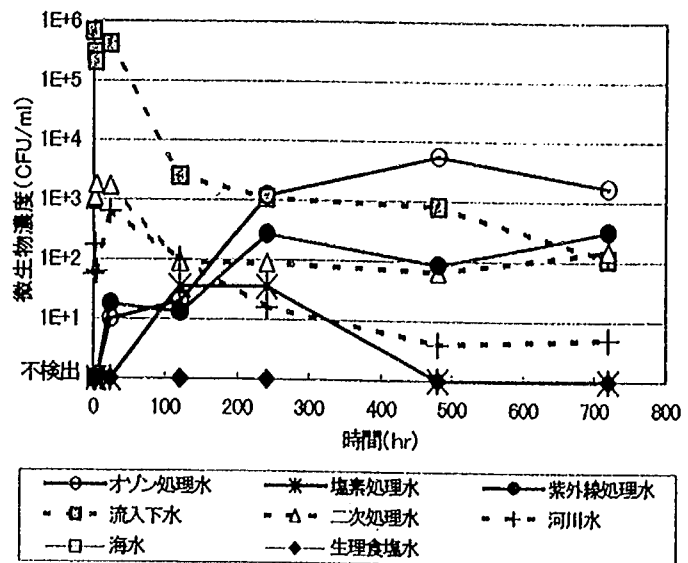


図-3 下水処理水および環境水中の大腸菌群の消長（微生物添加なし、20℃、静置、遮光）

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 10 年度）

【参考文献】

- 1) 土佐光司：水中における腸管系病原微生物の損傷に関する研究、東京大学博士論文、1998
- 2) Garba, C.P. et al : Viruses in source and drinking water, In Drinking water microbiology, McFeters, G. A.(Eds.), Springer Verlag New York Inc., New York, N.Y, 1991
- 3) 微生物検査必携細菌・真菌検査第3版：(財)日本公衆衛生協会
- 4) 金子光美：水質衛生学、技報堂出版、1996
- 5) 光岡知足：腸内フローラと感染症、学会出版センター、1986
- 6) 水中の健康関連微生物シンポジウム講演集：(社)水環境学会「水中の健康関連微生物」研究委員会、1995
- 7) Wheeler D. and Carroll R.F. : The Minimization of Microbiological Hazards Associated with Latrine Wastes, Water Science and technology, 21, (3), pp35-42, 1989
- 8) C.S.Clark et al., : Disease Risks of Occupational Exposure to Sewage, Proceedings of the A.S.C.E., Vol.102, No.EE2, pp375-288, 1976
- 9) 黒川顕、谷佳津治、那須正夫：河川環境中における大腸菌の性状について、第13回日本微生物生態学会講演要旨集、p43、1997
- 10) 金子光美、河村清史、箕形崇史：淀川の微生物汚染の実態、土木学会年次学術講演会講演概要集 第2部、Vol.39 th, pp717-718, 1984
- 11) 佐々木陽子、寺谷巖、他：下痢症原因菌調査(1)、島根県衛生研究所報、第27号、pp41-45、1987
- 12) 村松統一：Salmonellaの生態学的研究(Ⅱ)、長野県衛生公害研究所調査研究報告、Vol.3、1981
- 13) 桑原麟児、芦立徳厚、他：水質汚濁の生物学的指標について
- 14) 桃山和夫：バキュロウイルス性中腸腺壊死症ウイルス(BMNV)の感染組織および海水中での活性維持、魚病研究、Vol.24, No.3, pp179-181、1989
- 15) 海野肇、金台東、浅見和宏：ヒト腸管系ウイルスの廃水処理系における挙動、水処理技術、Vol.37, No.9, pp33-39、1996
- 16) 御手洗清：愛媛県における河川の水質について、四国公衆衛生学雑誌、Vol.28, No.1, pp148-151、1983
- 17) Allen, L.A., Pasley, S.M. and Pierce, M.A.F. : Some factors affecting the viability of faecal bacteria in water, Journal of Microbiol. Vol.7, p.36, 1952
- 18) Curds, C.R. et al : The Feeding Habits and Growth Rates of Some Fresh Water Ciliates Found in Activated Sludge Plant, J. Appl. Ecol., Vol.3, p127 1966
- 19) 尾藤朋子、大屋日登美：水環境における病原性大腸菌の生存性Ⅱ 環境条件による生残状態について、日本水処理生物学会誌、別巻13、pp33、1993
- 20) 佐々木陽子、石田茂、他：下痢症原因菌調査(2)、島根県衛生研究所報、第27号、pp46-52、1987
- 21) Cabelli, V. : New standards for enteric bacteria, In Water Pollution Microbiology, Ed. By Mitchell, R. John Wiley & Sons, pp233-271
- 22) 藤田藤樹夫、米虫節夫、山縣敬：淀川河口水域における大腸菌群の分布と水質との関係、近畿大学環境科学研究所研究報告 第13号、pp37-42、1985
- 23) 杉島伸祿、下原悦子：水中における腸内ウイルス生存について、日本公衛誌、Vol.30, No.5, pp189-193、1983
- 24) 小暮一啓、池本栄子：腸管出血性大腸菌O157の天然河川中の常在性、日本細菌学雑誌、Vol.52, No.3, pp601-607、1997
- 25) 住友恒、伊藤慎彦：消毒処理過程における回復可能菌の挙動、水道協会雑誌、Vol.62, No.3, pp46-55、1993

(鈴木、小越、諏訪、畑津)

2.2 下水処理水の安全性向上に関する研究

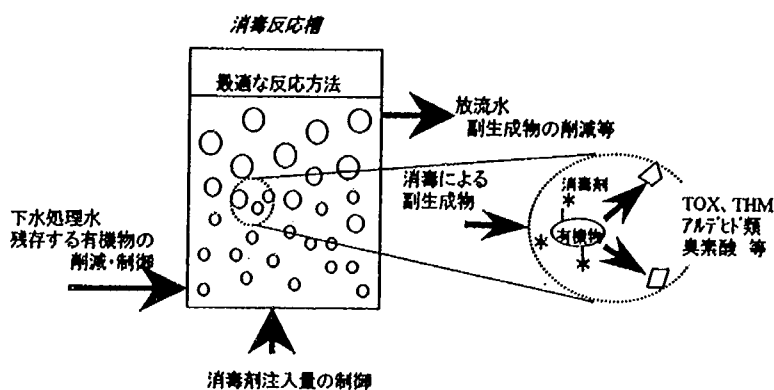
研究期間：平8～平11

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。10年度は、消毒副生成物の生成に及ぼす原水水質の影響および活性炭による副生成物除去実験を行った。



消毒による副生成物の制御(例)

1. 研究方法

1. 1 消毒副生成物の生成条件に関する検討

大腸菌群生残比が $0 \sim -5 \log$ となる消毒条件での、塩素消毒およびオゾン消毒における消毒副生成物の生成条件について検討した。

実験原水はA下水処理場内に設置されている活性汚泥処理プラントの二次処理水を用いた。また、この原水にアンモニア水(硝化の進行程度の影響)、フミン酸ナトリウム(有機物濃度の影響)、臭化カリウム(臭化物イオンによる影響)および海水を添加したものを原水とした。なお、添加したフミン酸ナトリウムは試薬フミン酸ナトリウム(Aldrich社製)を精製水に溶解し、硫酸を添加してpH7.0に調整後、5Aろ紙でろ過したものを原液とした。このフミン酸ナトリウム原液のTOCは1500mg/Lであった。また、海水は茨城県大洗海岸で採水した海水を用いた。この海水のTOCは6.2mg/Lであった。

＜塩素消毒実験＞：2Lビーカーに試料1Lを入れ、次亜塩素酸ナトリウムを所定量注入した後、マグネチックスターラーで攪拌を行った。接触時間は15分間とし、塩素注入率は $0 \sim 30 \text{mg-Cl/L}$ の範囲で設定した。

＜オゾン消毒実験＞：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。反応塔は内径5.6cm、高さ60cmのガラスカラムであり、試料量は1Lとした。実験では、オゾン化空気を 0.8NL/分 で曝気し、供給オゾン濃度と曝気時間を変えることにより、オゾン供給量を調整した。なお、オゾン供給量は $0 \sim 120 \text{mg-O}_3/\text{L}$ の範囲で設定し、その際の二次処理水におけるオゾン吸収量は $0 \sim 40 \text{mg-O}_3/\text{L}$ であった。

1. 2 活性炭による消毒副生成物除去実験

本実験は、残留消毒剤および消毒副生成物の除去を目的とし、活性炭による除去効果の検討を行った。実験の手順としては、精製水(ミリQ水)および下水二次処理水に標準試薬を添加、25℃で振盪し、経時的に添加試薬濃度を測定した。添加試薬および活性炭量は、①塩素の場合、 $\text{NaOCl } 12 \text{mg-Cl/L}$ に粒状活性炭 10g-AC/L を添加、②アルデヒド類の場合、各アルデヒド 0.1mg/L に粒状活性炭 140g-AC/L を添加、③臭素酸の場合、 KBrO_3 10mg/L に粒状活性炭 10g-AC/L を添加した。なお、活性炭は、三菱化学製ダイヤブ008(石炭系破砕炭、 $10 \sim 35 \text{mesh}$ 、平均粒径 1.0mm)を用いた。

1. 3 測定項目

消毒指標微生物は大腸菌群とし、測定はm-Endo培地によるメンブレンフィルター法とした。

臭素酸イオンは、臭化物イオンとともにイオンクロマトグラフ分析装置により測定した。また、海水添加実験においては、塩類濃度が高く分析結果に影響が見られたため、カートリッジフィルター(DIONEX社製)での前

処理を行った。なお、前処理方法は宮田¹⁾らの方法に準拠した。

アルデヒド類は上水試験方法²⁾に則って測定した。ここで対象としたアルデヒド類は、炭素数が1～8の直鎖アルデヒド(ホルムアルデヒド： HCHO ～オクタナル： $\text{C}_7\text{H}_{15}\text{CHO}$)、ベンズアルデヒド($\text{C}_6\text{H}_5\text{CHO}$)、グリオキサール(CHOCHO)である。また、残留塩素はジイソ-p-フェニレンジアミン(DPD)法、溶存オゾンはヨウ素滴定法、オゾンガスは紫外線吸収式オゾンモニター、トリハロメタン類(以下THMとする)はヘッドスペースガスクロマトグラフ(ECD)法(GC-ECD:島津GC-17A ECD-17)、全有機ハロゲン化合物(以下TOXとする)はUS EPA Method 450, 1(1980)(TOX計:三菱化学TOX-10Σ)により測定した。他の一般的な水質項目の測定は下水試験方法³⁾に準拠した。

2. 研究結果

2. 1 副生成物の生成条件に関する検討

(1) 原水水質

実験に使用した二次処理水質を表-1に示す。

二次処理水中においても、TOX(平均値 $39\mu\text{g/L}$)、THM(平均値 $1.0\mu\text{g/L}$)、アルデヒド類(平均値 $34\mu\text{g/L}$)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 0.2mg/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 実験原水二次処理水の水質

	pH	SS	アルカリ度	E260	全窒素	アモニア性窒素	亜硝酸性窒素	硝酸性窒素	全CODcr	溶解性CODcr	全TOC	TOX	THM	アルデヒド類
		[mg/L]	[mg/L]		[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[μg/L]	[μg/L]	[μg/L]
最大値	7.5	11.1	108	0.15	27.2	10.30	0.83	8.0	34	24	10.3	55	1.45	63
最小値	7.2	2.0	52	0.09	7.1	0.02	0.03	4.0	16	15	5.2	24	0.48	19
平均値	7.3	6.1	69	0.11	14.3	1.91	0.22	6.8	26	19	7.3	39	1.00	34

(2) 塩素消毒

二次処理水の塩素消毒における塩素注入率と大腸菌群生残比の関係を図-1に、塩素注入率とTHM生成量の関係を図-2に示す。大腸菌群は塩素注入率の増加とともに減少し、アンモニア性窒素を含まない場合は塩素注入率が 20mg-Cl/L 程度で大腸菌群生残比を $-4\sim-5\log$ にすることが可能である。一方、アンモニア性窒素を含む場合は、消毒効果が低減し、塩素注入率 20mg-Cl/L 以上で大腸菌群生残比が $-2\log$ 程度までしか低減しない。

塩素注入率 $0\sim30\text{mg-Cl/L}$ の範囲における消毒副生成物は、塩素注入率の増加とともにTOX、THMおよびアルデヒド生成量が増加し、塩素注入率 $0\sim30\text{mg-Cl/L}$ での最大値(最大生成量)は、TOX: $710(520)\mu\text{g/L}$ 、THM: $110(105)\mu\text{g/L}$ 、ホルムアルデヒド: $36(33)\mu\text{g/L}$ であった。ホルムアルデヒドにおいては水道水質指針値 $80\mu\text{g/L}$ 以下であったが、THMでは水道水質基準値 $100\mu\text{g/L}$ を超過する場合が見られた。なお、塩素消毒における臭素酸イオンの生成事例の報告⁴⁾はあるが、本実験においては臭素酸イオンの生成は認められなかった。

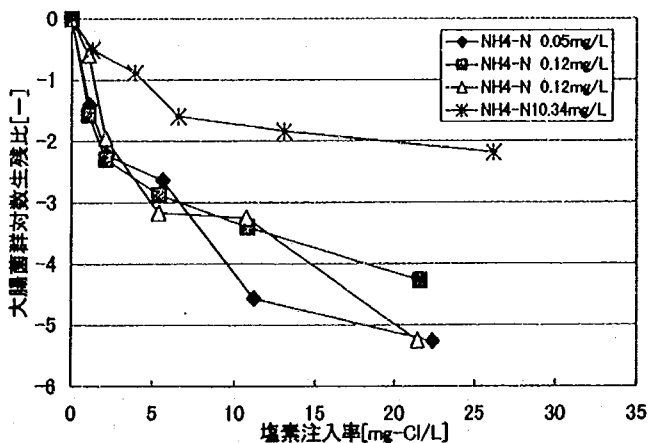


図-1 塩素注入率と大腸菌群数の関係

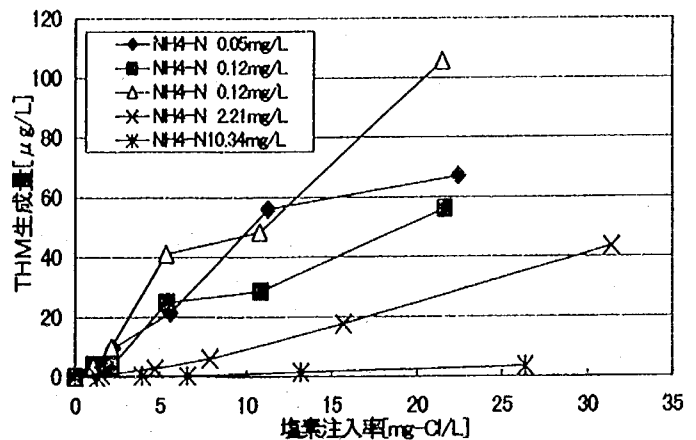


図-2 塩素注入率とTHM生成量の関係

実験においては、原水にアンモニア性窒素濃度が残存 (2mg-N/L 以上) する場合に、THM 生成量が少なく、また、塩素注入率の増加とともに TOX 生成率の上昇が小さくなる傾向が見られた。そこで、アンモニア性窒素の有無による TOX および THM 生成に及ぼす影響について検討を行った。

図-3 は二次処理水およびアンモニア水を添加した二次処理水を原水とした場合の、アンモニア性窒素濃度と THM 生成量の関係を示す。アンモニア性窒素濃度が高くなるにしたがって THM 生成量は減少し、塩素注入率が高いほど、アンモニア性窒素の THM 生成抑制の効果が高かった。また、THM 生成量は、アンモニア性窒素が 1 mg-N/L 程度存在することで、アンモニア性窒素が 0.1mg-N/L 存在する場合の半分に減少することがわかった。ただし、消毒効果において (図-1)、アンモニアの残存は消毒効果を低下させることや、クロラミンの毒性に関する報告⁹⁾ 等があるため、直ちに、硝化抑制 (アンモニア性窒素の残存) を推奨することは難しいと考えられる。

次に、有機物が消毒副生成物量に及ぼす影響について、二次処理水およびフミン酸ナトリウムを添加した二次処理水を原水に用いた結果を示す。

原水のアンモニア性窒素の有無により消毒副生成物の生成量は異なるが、フミン酸ナトリウムの添加量が多く TOC 濃度が高いほど、TOX、THM 生成量高い値を示した (図-4)。

図-5 は塩素消費量 (=注入量-残留量) と TOC 1mg 当たりの THM 生成量を示すものである。アンモニア性窒素を含まない場合、塩素消費量 1mg-Cl/L における THM 生成量は 1.9 μ g-THM/mg-TOC であり、アンモニア性窒素を含む場合は、0.19 μ g-THM/mg-TOC となった。

図-6 は海水を添加した二次処理水 (アンモニア性窒素: 0.12mg-N/L) を原水に用いた場合の、塩素注入率と THM 生成量を示す。海水を塩素処理した場合の THM 生成量は 20 μ g/L 以下であり、二次処理水では最大 60 μ g/L である。そして、10%海水が二次処理水に混入すると二次処理水の 1.5 倍程度である 85 μ g/L となり、海水の混入は THM 生成を促進することがわかった。

また、THM 構成比を比較すると、二次処理水の塩素消毒により生成される THM はクロロホルムが 60~80%、プロモジクロロメタンが 5~40%であり、塩素注入率の増加とともにプロモジクロロメタンの割合が増加した。一方、海水が含まれる場合は、臭素付加数の多いプロモホルムが生成されやすく、アンモニア性窒素を含まない場合は、プロモホルムが 90%以上を占めた。

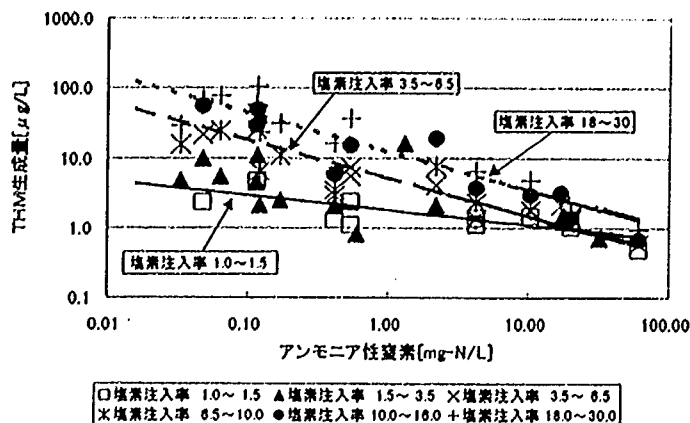


図-3 アンモニア性窒素濃度と THM 生成量の関係

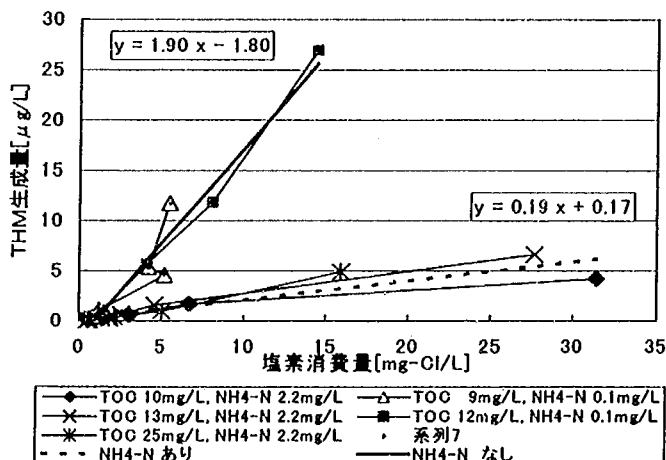
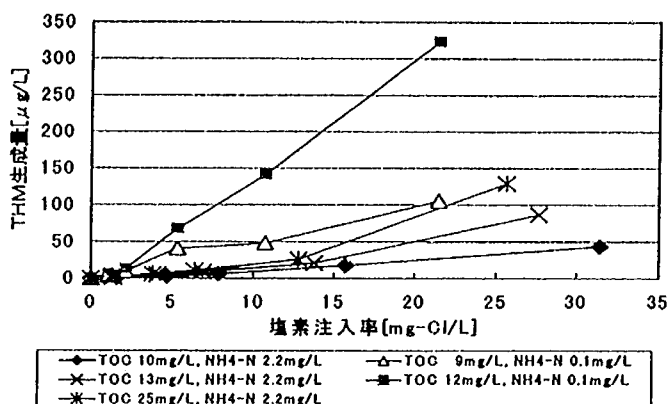


図-4 TOC 濃度による THM 生成量の違い

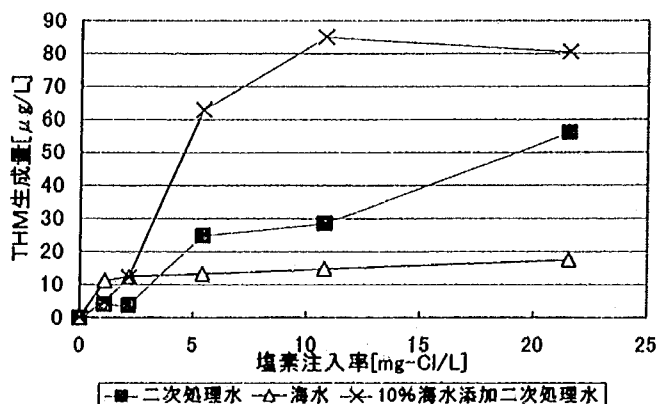


図-5 塩素消費量と単位 TOC 当たりの THM 生成量

臭素イオンを含む原水を塩素消毒した場合に、含臭素化合物が生成するのは、遊離塩素によって臭素イオンが酸化されて次亜臭素酸あるいは次亜臭素酸イオンが生成され、これらが有機物と反応するためと考えられている⁶⁾。

(3) オゾン消毒

二次処理水のオゾン消毒における、オゾン吸収量と大腸菌群数の関係を図-7に、オゾン吸収量とTHM生成量およびホルムアルデヒド生成量の関係を図-8、9に示す。

大腸菌群はオゾン吸収量の増加とともに減少し、オゾン吸収量が20mg-O₃/L程度で大腸菌群生残比を-4logにすることが可能である。また、オゾン消毒において、アンモニア性窒素の消毒効果への影響は認められなかった。

消毒副生成物は、オゾン供給量が少ない時に、若干のTOXおよびTHMの増加が認められたが、多くはオゾン供給量が増加するにしたがって、TOXおよびTHMが減少する傾向が見られた。これは、オゾン処理時の曝気によりTHM等の揮発性有機ハロゲン化合物が揮発した。もしくは、オゾン処理により有機ハロゲン化合物の分解が生じたものと考えられる。

一方、アルデヒド類と臭素酸イオンは、オゾン供給量の増加とともに生成量が増加し、オゾン供給量(吸収量)0~120(0~40)mg-O₃/Lでのホルムアルデヒド最大濃度(生成量)は80(70)μg/Lであり、水道水質指針値80μg/Lと同程度であった。なお、アルデヒド類濃度が高くなるにしたがい他のアルデヒド類が若干検出されたが、アルデヒド類合計値のほとんどはホルムアルデヒドであった。

臭素酸イオンは、オゾン吸収量が20mg-O₃/L以上で確認される場合が多く、最大濃度は0.25mg-BrO₃-Br/Lであった。

図-10~14は海水添加におけるオゾン供給量と大腸菌群生残比および消毒副生成物量の関係を示す。

海水が二次処理水に混入した場合、大腸菌群生残比は二次処理水の場合と同等であるが、TOXおよびTHMの生成が認められ、最大生成量は各々570μg/L、29μg/Lであった。TOXおよびTHMの生成は、消毒原水にKBrを添加した際にも見られた。したがって、海水添加によるTHM等の生成は、水中に含まれる塩化物イオン(Cl⁻)や臭化物イオン(Br⁻)等のハロゲン原子の増加によるものと考えられる。また、THM構成では40~100%がプロモホルムであり、オゾン吸収量の増加とともにプロモホルムの割合が増加した。

副生成物の生成促進はアルデヒド類および臭素酸イオンにも見られ、最大生成量は、臭素酸イオン:4.71mg-BrO₃-Br/L、ホルムアルデヒド:112μg/Lまで増加した。

これら海水の混入による消毒副生成物の生成促進は、オゾンによって臭素イオンが酸化されて、次亜臭素酸、次亜臭素酸イオン、臭素酸等が生成され、これら臭素酸塩が水中の有機物と反応するためと考えられている⁶⁾。

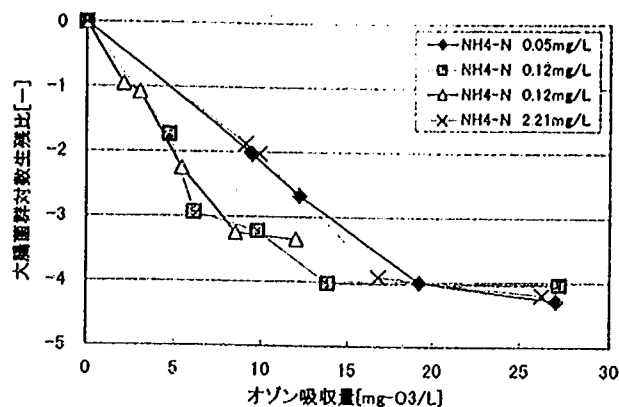


図-7 オゾン吸収量と大腸菌群生残比の関係

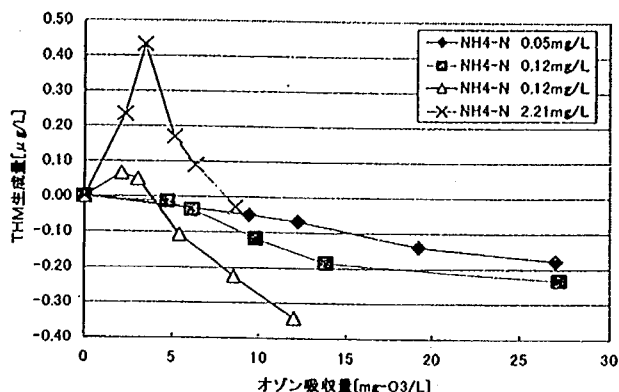


図-8 オゾン吸収量とTHM生成量の関係

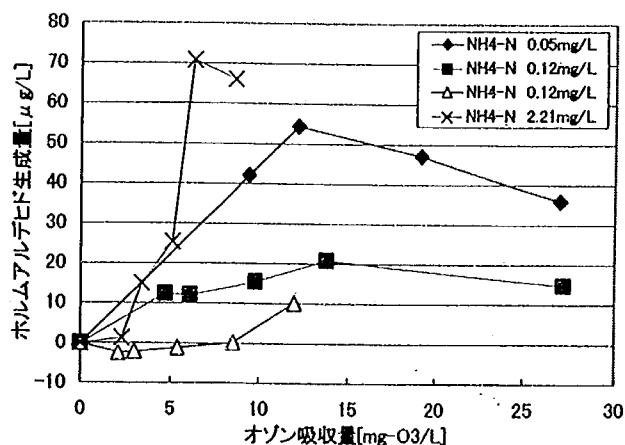


図-9 オゾン吸収量とホルムアルデヒド生成量の関係

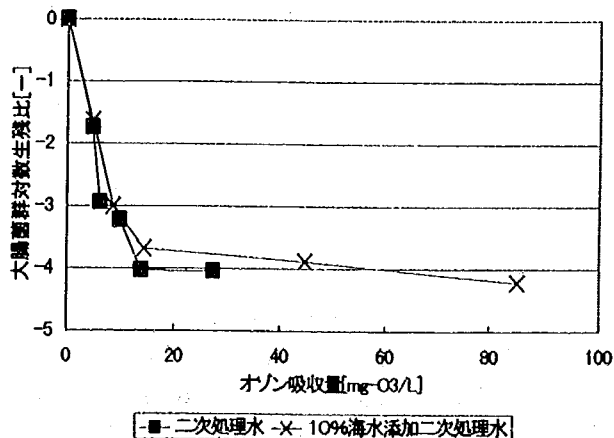


図-10 大腸菌群消毒に及ぼす海水の影響

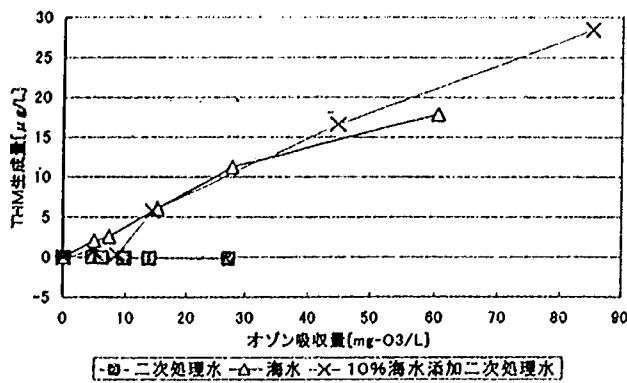


図-11 TOX生成に及ぼす海水の影響

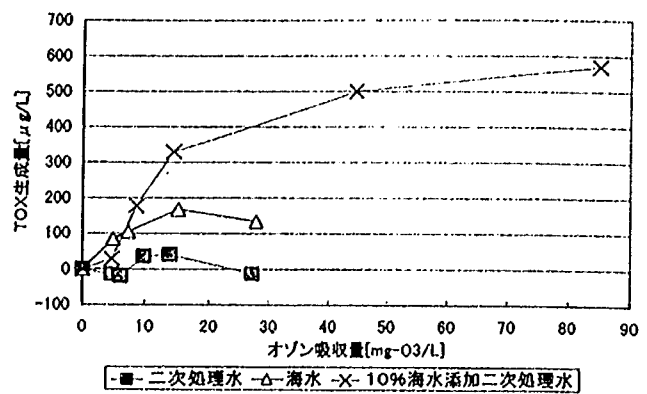


図-12 THM生成に及ぼす海水の影響

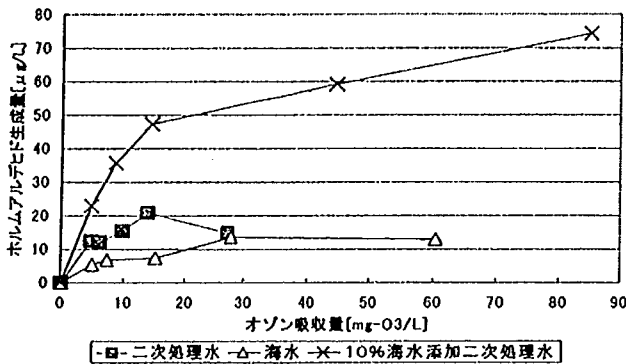


図-13 ホルムアルデヒド生成に及ぼす海水の影響

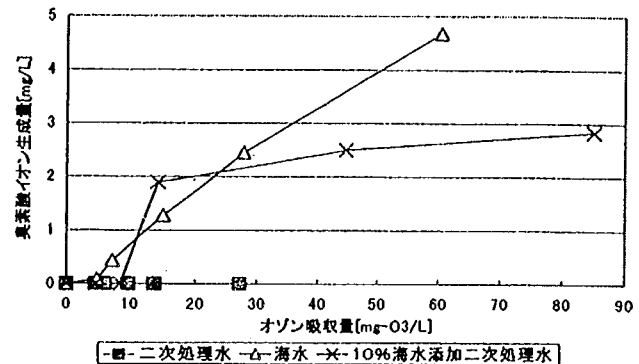


図-14 臭素酸イオン生成に及ぼす海水の影響

2. 2 活性炭による消毒副生成除去実験

(1) 次亜塩素酸ナトリウム

次亜塩素酸ナトリウムの活性炭除去速度を図-15に示す。

水中に添加した次亜塩素酸ナトリウム(全塩素)は濃度変化を示さなかったが、活性炭を含む精製水に塩素を添加した場合は添加後直ちに除去され、経過時間1分後には50%以上の除去率を示し、塩素濃度下限値(0.05mg-Cl/L)まで除去速度の低下は認められなかった。一方、二次処理水(NH₄-N:0.12mg-N/L)においても塩素は時間経過とともに減少したが、塩素濃度の低下とともに除去速度が小さくなる傾向が見られた。また、塩素除去速度は精製水に比較して低く、水中に含まれる物質種・量が多いほど、除去効率が低下することが確認された。

本実験は、塩素負荷量が低く、次亜塩素酸ナトリウムの活性炭除去量が把握できなかったため、塩素負荷量を上げて同様の実験(9000mg-Cl/Lに粒状活性炭1g-AC/L)を行ったが、塩素はほとんど除去され、活性炭の飽和は認められなかった。したがって、塩素の活性炭除去飽和量は9g-Cl/g-AC以上となる。

(2) アルデヒド類

アルデヒド類の活性炭除去速度を図-16に示す。

対照実験として行った、水中に添加したアルデヒド類は濃度変化を示さなかったが、活性炭を含む精製水に添加したアルデヒド類は、1分後に40%除去され、時間経過とともに減少した。除去速度は濃度の低下とともに小さくなる傾向が見られ、60分後における除去率は70%、活性炭除去量は0.004mg/g-ACであった。

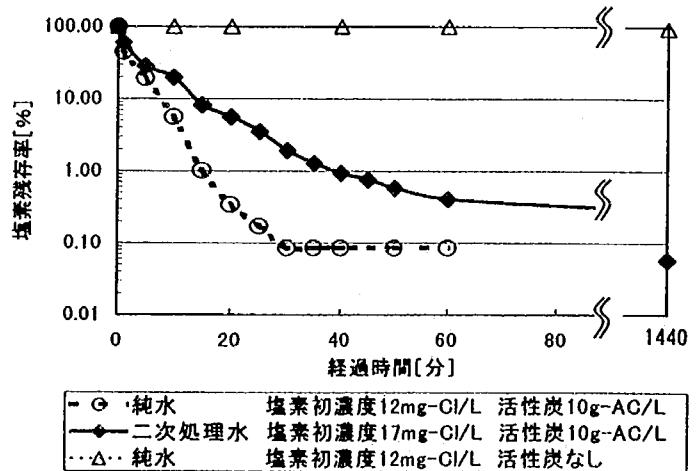


図-15 次亜塩素酸ナトリウムの活性炭除去速度

添加した 10 種のアルデヒド類を比較すると、アルキル基が少ないホルムアルデヒド (HCHO) やアセトアルデヒド (CH_3CHO) の除去速度が低く、除去されにくい。アルキル基の多い物質では除去が良好であり、5 分後には *n*-ヘプチルアルデヒド ($\text{C}_6\text{H}_{13}\text{CHO}$)、オクタナール ($\text{C}_7\text{H}_{15}\text{CHO}$)、ベンズアルデヒド ($\text{C}_6\text{H}_5\text{CHO}$) が不検出となった。これは、ホルムアルデヒドやアセトアルデヒドのように比較的小さいカルボニル化合物は、極性が大きく水に溶解するが、疎水性である炭化水素部分 (アルキル基) が大きくなると水溶性は減少するためである。

(3) 臭素酸

臭素酸の活性炭除去速度を図-17 に示す。

活性炭無添加の場合は濃度変化を示さなかったが、活性炭を含む精製水に添加した臭素酸は時間経過とともに減少した。除去速度は時間経過とともに小さくなり、40 分後以降の除去率はほとんど変化せず、飽和に達したものと考えられた。この時の除去量は $0.6\text{mg} \cdot \text{BrO}_3^-/\text{g} \cdot \text{AC}$ であった。また、二次処理水を用いた場合は、臭素酸の除去開始までに時間を要するとともに、精製水に比較して除去率が 20% 程度低下し、除去量は $0.1\text{mg} \cdot \text{BrO}_3^-/\text{g} \cdot \text{AC}$ で飽和に達した。

以上の結果から、消毒剤および消毒副生成物の活性炭除去を検討すると、塩素および臭素酸の除去は良好に行われるが、アルデヒド類においては、消毒により生成されるアルデヒドの多くは、アルキル基の少ないホルムアルデヒド等であり、活性炭での除去は有効ではないと考えられる。

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 8~10 年度)
- ② 安井 孝行 他 「下水処理水のオゾン処理における副生成物の生成に関する検討」、第 35 回下水道研究発表会講演集 (1998)

【参考文献】

- 1) 宮田雅典、寺嶋勝彦：高度浄水処理過程における臭素酸イオンの生成とその挙動、水道協会雑誌、Vol.66, No.3, pp16-25, 1997/3
- 2) 日本水道協会：上水試験方法、1993
- 3) 日本下水道協会：下水試験方法、1997
- 4) 山田春美、津野洋、古田起久子：塩素処理における臭素酸イオン生成特性、第 49 回全国水道研究発表会講演集、pp432-433、1998/5
- 5) 丸山俊郎、熊谷和也、三浦昭雄：塩素消毒によって生成されるモノクロラミンのノリの生育阻害濃度、第 28 回下水道研究発表会講演集、pp189-191、1991
- 6) 金子光美：水質衛生学、技報堂出版、1996

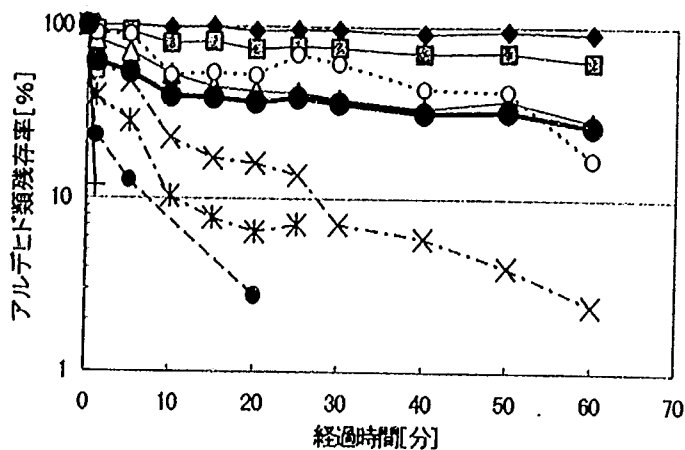


図-16 アルデヒド類の活性炭除去速度

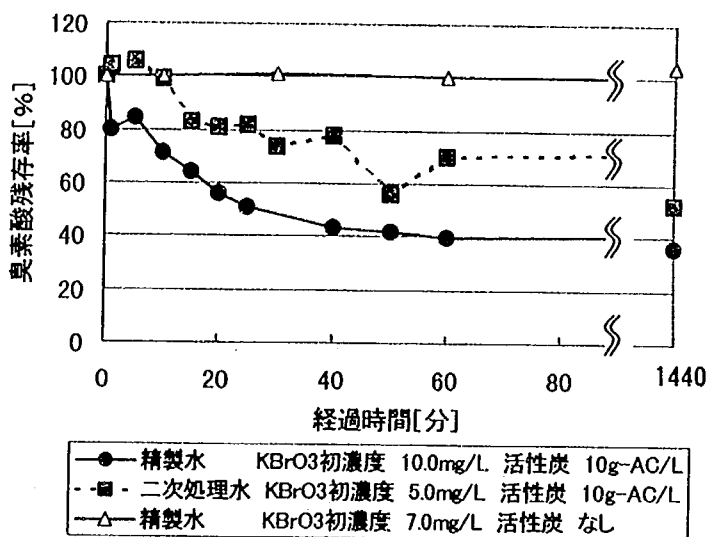


図-17 臭素酸の活性炭除去速度

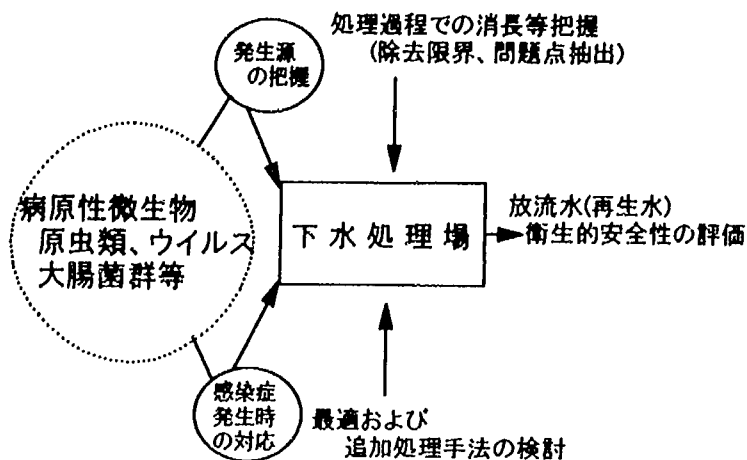
2.3 病原性微生物の発生源および対策に関する調査

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プトスポリジ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、クリプトスポリジウムに関して測定方法、活性汚泥処理法による除去能力の把握および除去効率の向上に関する検討を行い、また、下水中からのウイルスの検出方法について検討した。



1. 調査方法

1.1 クリプトスポリジウムの測定方法

クリプトスポリジウムの測定方法は、対象とする試料の性状等により前処理(夾雑物除去)、濃縮方法や懸濁物とオーシストの分離方法が異なる。濃縮方法としては、フィルターによるろ過や遠心分離か、また、懸濁物とオーシストの分離方法としては、パーコール蔗糖液による密度勾配遠心処理やふるい、免疫磁気ビーズ等が現在利用されている²⁾。

本調査では、図-1に示すように、前処理、濃縮方法、懸濁物除去が異なる4つの測定法についてオーシストの回収率試験を行った。測定水量は流入下水200mL、下水処理水0.5～20L、河川水1～20Lとした。なお、間接蛍光抗体染色にはHYDROFLUOR-Comboキット、ENSYS社製を用いた。

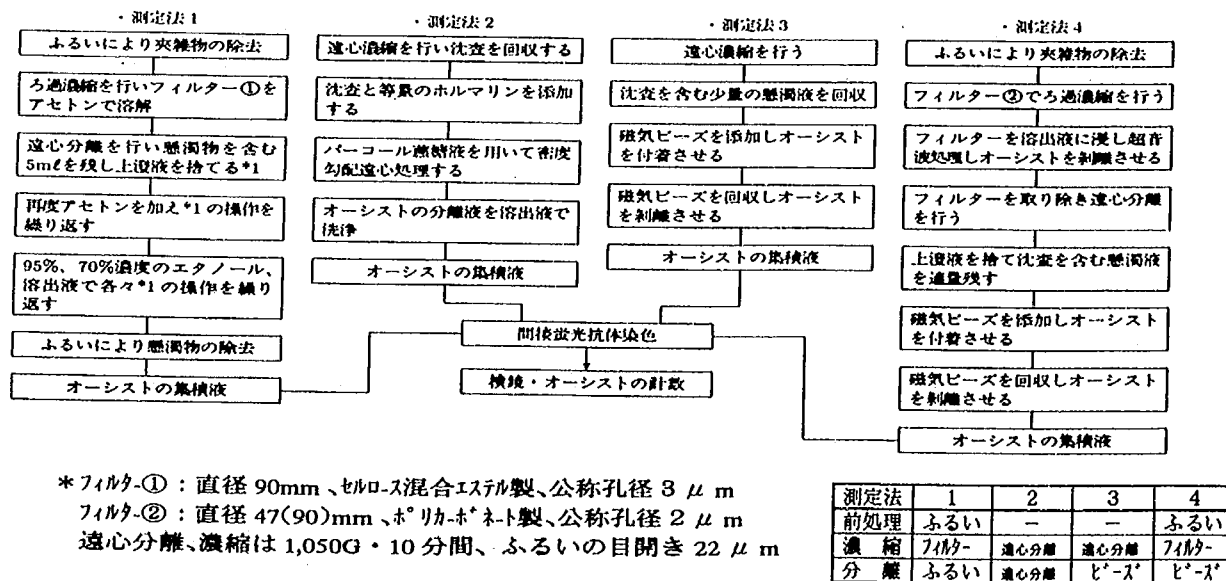


図-1 オーシストの測定方法の概略フロー

1.2 活性汚泥処理によるクリプトスポリジウムの除去実験

本実験では、水槽内(H200×W200×D200mm、槽内容量5L)に、A浄化センター内に設置してある活性汚泥パイロットプラント中の活性汚泥を入れ、オーシストを添加し曝気混合を行った。添加したオーシストは、HYDROFLUOR-Combo、ENSYS社製の陽性コントロールおよびTech Lab社製のものであり、ホルマリン固定後リン酸緩衝生理食塩水で洗浄を行ったものである。曝気後活性汚泥を2時間沈降させ、上澄液について図-1に示した測定法1によりオーシストを測定した。本測定法によるオーシストの平均回収率は57.6%であった。水質分析項目は水温、pH、DO、MLSS、濁度とした。なお、濁度計はセトリ科学社製TC-205型、セル長100mmを用いた。

1.3 ウイルスの検出に関する検討

ウイルスの検出に関しては、誘出液のpHの影響、毒性物質除去法、濃縮フィルター枚数等の検討を行った。検討に用いたウイルスは、ポリオウイルスI型の生ワクチン・セビンI型株とした。ウイルスの培養には、BGM細胞(ミドリ川腎由来細胞)またはHEp-2細胞(ヒト喉頭ガン由来細胞)、下水試料には、A、B浄化センターの流入下水および二次処理水を用いた。毒性物質除去法では、未処理、HCF-141b(代替70 μ m)、0.45 μ mフィルター(ニトリル製)、5%BSA(アルブミン)、5%Beef extract、5% β -Cyclodextrine処理について検討を行った。

2. 調査結果

2.1 各測定方法の回収率

各測定方法の回収率試験結果を表-1に示す。河川水1は懸濁物が少なく、河川水2は懸濁物が多い試料である。また、測定法4の()内数値は免疫磁気ビーズキットのバッファが改良される以前の回収率²⁾である。

流入下水については、測定法1および4ともに回収率は約20%である。測定法4の免疫磁気ビーズ法に関しては、バッファが改良されたことにより、以前よりも回収率が向上している。また、測定法4では検鏡するガラスプレートの枚数を少なくすることができるため、測定法1に比較して短時間でオシトを検出できる可能性がある。下水処理水については、測定法4は以前より回収率が向上しているものの、測定法1に比較して回収率が低いことから、水中のオシト濃度が低い場合には測定法1の方が良いと考えられる。

河川水1に関しても同様なことが言える。河川水2については、測定法2、3が遠心濃縮を行っている分、ろ過濃縮と比較すると回収率は低い。しかし、懸濁物の多い河川水を多量にろ過濃縮する場合には、多大な時間を要することになる。測定法4の河川水2では、河川水中の懸濁物が河川水1に比較して多いため、河川水1よりも回収率が若干低くなっている。

表-1 回収率試験結果				
	測定法1	測定法2	測定法3	測定法4
流入下水	20	—	—	20(10以下)
下水処理水	50	—	—	20-30(10-20)
河川水1	50	—	—	40-50
河川水2	—	20	20	30-40

(%)
※ 河川水1:懸濁物が少ない、河川水2:懸濁物が比較的多い
測定法4()内:バッファが改良される以前の回収率
:推奨測定法

よって、流入下水では回収率が低い等課題が残されるものの測定法4、下水処理水では測定法1、懸濁物の少ない河川水では測定法1、懸濁物の多い河川水では測定法2が適当であるのではないかと考えられる。しかし、下水処理水が河川水量の大部分を占めるような河川水では、測定法3、4の免疫磁気ビーズ法によるオシトの回収率が低下すると考えられるため、測定法1ないし2が適当であると考えられる。

2.2 活性汚泥処理によるクリプトスピリジムの除去

活性汚泥処理によるオシトの除去実験に先立ち、使用するオシトの清水中での沈降性について実験を行った。清水には、残留塩素を亜硫酸ナトリウムで中和した水道水を用いた。清水5L中にオシトを添加し曝気混合を行った後、曝気混合を止め2時間静置沈殿させた。各々上層および下層から試料を採取しオシトの定量を行った。オシトの定量は、試料50mLを蛍光染色用フィルターに直接通水して蛍光染色を行った。なお、活性汚泥曝気後の静置沈殿時間の把握を行うため、沈殿時間の違いによる濁度の測定を行った。その結果、曝気後の沈殿時間を2時間とすれば上澄液の濁度レベルがほぼ一定となることから、静置沈殿時間を2時間とし以降の実験を行った。

実験結果を図-2に示す。上層および下層から検出されたオシトの個数は同一であり、濃度変化が現れていない。よって、今回実験に使用したオシトは、清水中において短時間であれば沈降しないことが確認された。

活性汚泥処理(曝気混合)時間の違いによる処理水中(上澄液)オシト濃度の変化について、図-3に示す。オシトの添加濃度は、 $4.2 \times 10^3 \sim 2.4 \times 10^6$ 個/Lの4段階、槽内のMLSS濃度は1,630 $\sim$ 2,290mg/Lの範囲であった。処理時間の経過とともに処理水中のオシト濃度は低下するが、処理時間を24時間としても8時間の処理水中のオシト濃度より若干低くなる程度であった。オシトの添加濃度が約 4.0×10^5 個/Lの場合では、処理時間を1時間から8時間にすると処理水中の平均オシト濃度は約1/10に減少、8時間から24時間とすると約1/2に減少していた。また、添加オシト数を多くすることによって処理水中のオシト濃度が上昇している。

MLSS濃度を変化させた場合の処理時間と処理水中のオシト濃度の関係について図-4に示す。槽内のMLSS

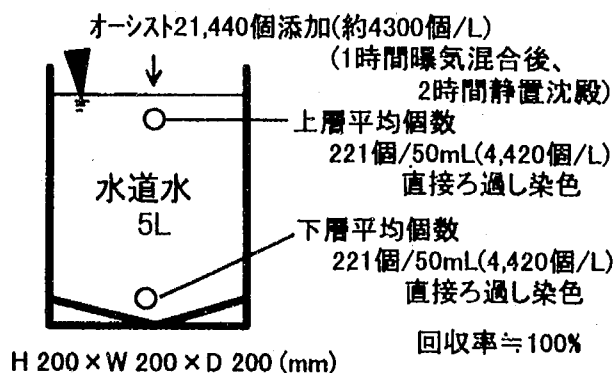


図-2 反応水槽の概略図

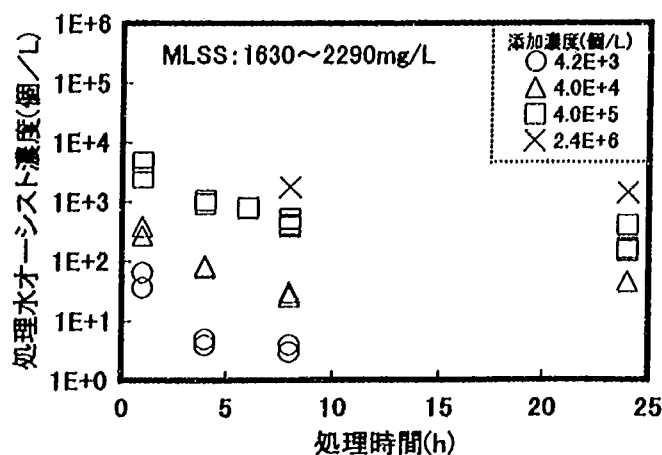


図-3 オーシスト添加濃度ごとの処理時間と処理水オーシスト濃度の関係

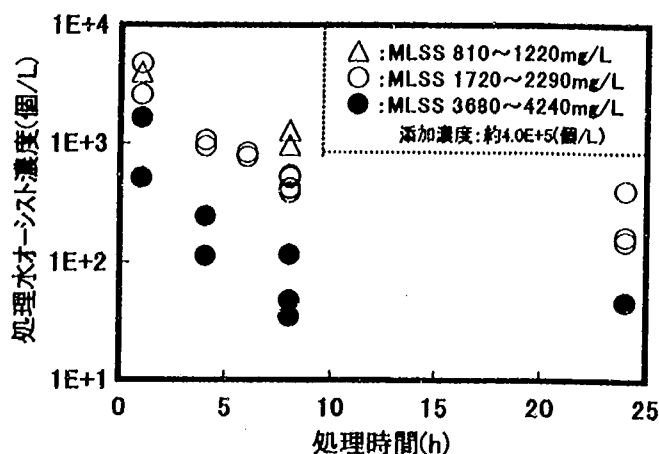


図-4 MLSS濃度の異なる3ケースにおける処理時間と処理水オーシスト濃度の関係

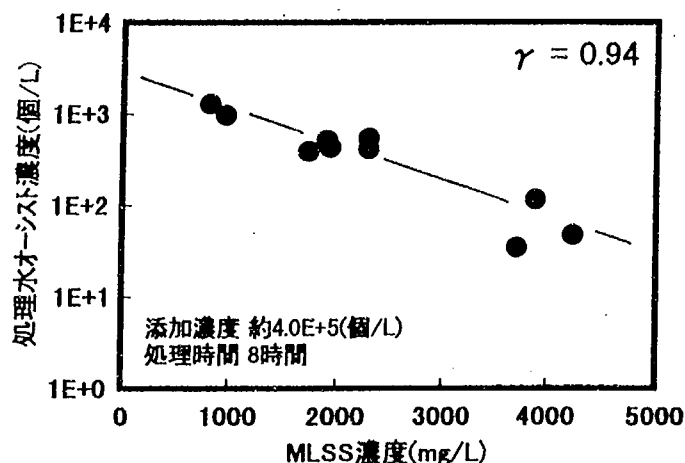


図-5 MLSS濃度と処理水オーシスト濃度の関係

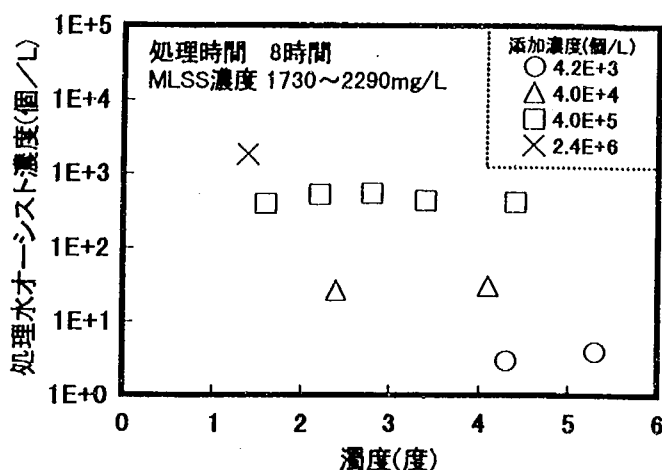


図-6 処理水濁度とオーシスト濃度の関係

濃度は1,000, 2,000, 4,000mg/L程度の3段階、オーシストの添加濃度は 4.0×10^5 個/Lである。MLSS濃度を高濃度とし処理時間を長時間とすることによって、処理水中のオーシスト濃度は低下する傾向を示している。処理時間が8時間の場合について、MLSS濃度と処理水中のオーシスト濃度の関係を図-5に示す。槽内MLSS濃度が1,000mg/L程度であれば、処理水中のオーシスト濃度は 1.0×10^3 個/L程度、4,000mg/L程度であれば 1.0×10^2 個/L程度に減少している。

処理水濁度とオーシスト濃度の関係について図-6に示す。オーシストの添加濃度は、 $4.2 \times 10^3 \sim 2.4 \times 10^6$ 個/Lの4段階、槽内のMLSS濃度は1,730~2,290mg/Lの範囲、処理時間が8時間のものについて示した。活性汚泥処理による処理水濁度とオーシスト濃度については、明確な相関関係が得られなかった。濁度が上昇しても処理水中のオーシスト濃度はほとんど変化していない。むしろ、添加個数を多くすることによって、処理水中のオーシスト濃度が上昇している。

処理水中オーシスト濃度は、8時間の処理によりほぼ一定の値となるため、処理時間が8時間の処理水中のオーシスト濃度を用いてMLSS1gあたりの除去量と処理水オーシスト濃度の関係について整理を行った。MLSS1gあたりのオーシスト除去量は、以下に示す(1)式により算出を行った。槽内のMLSS濃度は810~4,240mg/L、オーシストの添加濃

$$\text{除去量 (個/MLSS1g)} = \frac{\{\text{添加オーシスト (個)} / \text{活性汚泥容量5L (L)}\} - \text{処理水オーシスト濃度 (個/L)}}{\text{MLSS (g/L)}} \quad (1) \text{式}$$

度は $4.2 \times 10^3 \sim 2.4 \times 10^6$ 個/Lの範囲である。

MLSS1gあたりのオーシスト除去量と処理水中のオーシスト濃度の関係について図-7に示す。各々、処理水中のオーシスト濃度の実測値、回収率を考慮(実測値を回収率で割り戻した値、平均回収率:57.6%)した値を示した。活性汚泥処理による実験結果から、オーシスト除去量と処理水中のオーシスト濃度を両対数上にプロットすると直線関係が得られた。処理水中のオーシスト濃度を平衡濃度と仮定、また、除去量も活性汚泥に取り込まれ蓄積(濃縮)されると推測されることから吸着量と仮定し、フントリヒ(Freundlich)型吸着等温線で実験結果を整理すると、(2)式(回帰式)のとおりとなる。定数A、Bについて表-2に示す。

$$R_0 = A \cdot C^B \quad (2) \text{式}$$

ここに、 R_0 : 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)
 A, B : 定数

表-2 図-7の回帰式

	定数A	定数B	相関係数
実測値	1,039	0.90	0.96
回収率考慮	636	0.90	0.96

上記の結果から、MLSS1gあたりの除去量と処理水オーシスト濃度の関係が明らかとなったが、実際の下水处理場で処理区域内に感染者等が存在している場合には、オーシストは連続的に流入してくるため、除去(吸着)量もある時点で飽和に達する。また、曝気槽内では活性汚泥の生成や死滅(分解)も生じていることから、連続的な下水処理の場合のオーシストの除去割合を算出する必要がある。算出仮定条件を以下に示す。

[条件]

曝気槽内は押し出し流れ、滞留時間(HRT) 8時間、MLSS濃度 2g/L
 汚泥転換率：溶解性 BOD 0.5gMLSS/g S-BOD, SS 1gMLSS/g SS
 初沈流出水濃度：溶解性 BOD 80mg/L, SS 60mg/L
 初沈流出水中有機物成分による活性汚泥生成量 ΔX
 $\Delta X = (80 \times 0.5 + 60 \times 1) = 100 \text{mg MLSS/L} = 0.1 \text{g MLSS/L}$
 流入下水オーシスト濃度(C_{in}) $10^1, 10^2, 10^3, 10^4, 10^5$ (個/L)

[計算] 吸着式(1)とオーシスト収支式②を連立させて解く

0~8h 活性汚泥すべてが吸着能力を有する。このため吸着にかかわる活性汚泥濃度は2g MLSS/L。

$$\textcircled{1} : R_0 = 1039 \cdot C^{0.90} \quad \textcircled{2} : C + 2R_0 = C_{in}$$

(636)

定常 流入水中有機物によって新たに生成される活性汚泥(0.1g MLSS/L)のみが吸着能力を持つ。

$$\textcircled{1} : R_0 = 1039 \cdot C^{0.90} \quad \textcircled{2} : C + 0.1R_0 = C_{in}$$

(636)

上記算出条件から求めた流入と処理水オーシスト濃度の関係を表-3に示す。活性汚泥処理による定常状態でのオーシストの除去率は、98.0~99.3%、回収率を考慮した場合には、96.6~98.7%であった。よって、連続的な活性汚泥処理により1.5~2log程度の除去が行えることが推測される。

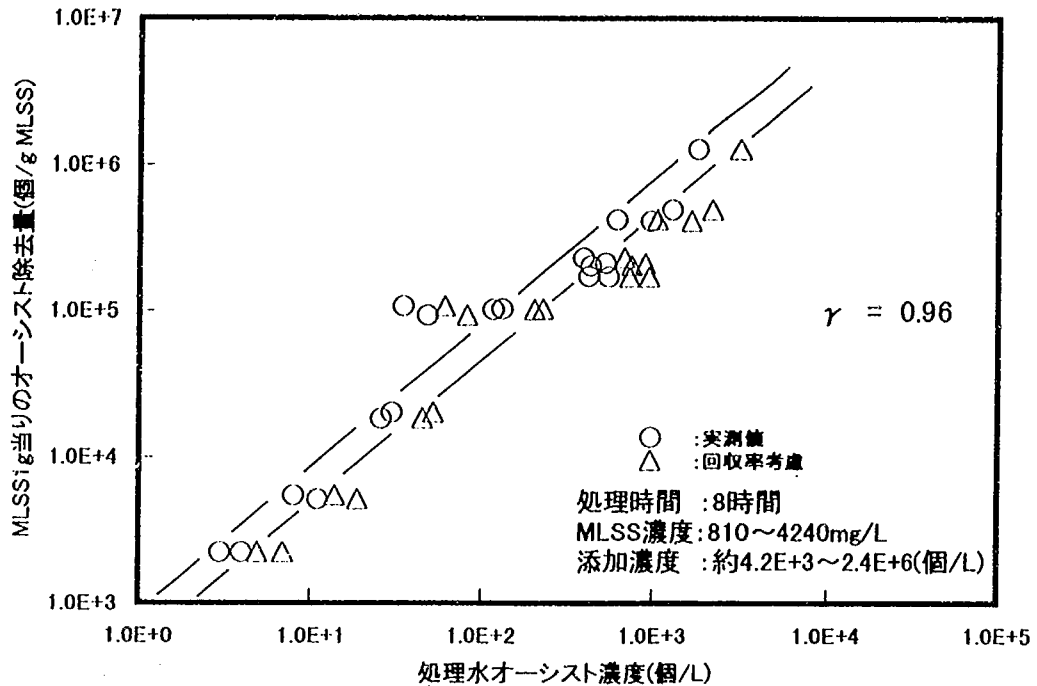


図-7 MLSS 1g当りのオーシスト除去量と処理水オーシスト濃度の関係

表-3 流入と処理水オーシスト濃度

流入下水オーシスト濃度(個/L)	処理水濃度(個/L)			
	0 ~ 8 h		定常	
	実測値	回収率考慮	実測値	回収率考慮
10^1	2.7E-3(>99.9)	4.6E-3(>99.9)	7.4E-2(99.3)	1.3E-1(98.7)
10^2	3.4E-2(>99.9)	5.9E-2(99.9)	9.5E-1(99.1)	1.6E+0(98.4)
10^3	4.4E-1(>99.9)	7.7E-1(99.9)	1.2E+1(98.8)	2.1E+1(97.9)
10^4	5.7E+0(99.9)	9.9E+0(99.9)	1.6E+2(98.4)	2.7E+2(97.3)
10^5	7.4E+1(99.9)	1.3E+2(99.9)	2.0E+3(98.0)	3.4E+3(96.6)

()内数値はオーシスト除去率(%)

さらに、除去効率を向上させることを目的として、凝集剤添加活性汚泥法によるオーストの除去実験を行った。槽内のMLSS濃度は1,790~1,970mg/Lの範囲、オーストの添加濃度は $4.0E+5$ 個/Lとした。凝集剤には、PAC(ポリ塩化アルミニウム)、多木化学社製(PAC250A)を使用した。PACの添加量は槽内のAl濃度が0~15mg/Lの範囲とした。活性汚泥処理時間は8時間としたが、その内7時間経過後、残りの1時間にPACの添加を行った。

実験結果を図-8に示す。槽内のAl濃度が高くなるにつれ、処理水中のオースト濃度も低下しており、Al濃度が10mg/L以上で安定した除去が行われている。図中の()内数値は濁度を示したが、PACの添加により濁度も低下している。また、PACを添加していない系は、処理水中に多数の微細なフロックの存在を目視できたが、PACの添加系ではその存在が明らかに低減していた。PAC添加によるオーストの除去率は、Al濃度が0mg/Lの時を基準として10mg/Lの場合約90%であった。

上記の除去実験結果をまとめると以下のとおりとなる。通常の活性汚泥処理により、オーストは最大で2log程度の除去、凝集剤を添加することにより、さらに1log程度の除去が期待できると考えられる。また、流入下水中のオースト濃度から処理水中のオースト濃度を推定することが可能であると考えられる。

2.3 ウイルスの検出に関する検討

下水処理水の衛生学的安全性を担保するためには、下水処理場に流入してくるウイルス濃度を測定するとともに、消毒プロセスを含めた各下水処理プロセスでの除去・不活化割合を把握しなければならないが、そのためには、安定した定量値を得る必要がある。従来、ウイルスの回収率は流入下水の場合10~20%程度と低く、また、細胞に対する毒性の影響等課題が残されていた。このため、回収率の向上等を目的として種々の検討を行った。

1) 誘出液のpHの影響

ゼータガラスフィルター上に捕捉したウイルスを誘出する誘出液(0.05Mグリシン緩衝液)のpHの違いが、ウイルスの回収率に及ぼす影響について検討を行った。ウイルスの定量はHEp-2細胞を用いたプラーク法とし、下水試料にはA、B浄化センターの流入下水を用いた。検討結果を表-4に示す。誘出液のpHが7.5~8.5の場合には、ウイルスの回収率は約3~5%と低いが、pHを11.5とすることにより約50~75%に向上している。誘出液中の夾雑物とウイルスを分離するために遠心分離を行い、細胞へ接種するウイルス濃縮試料を作成するが、誘出液のpHを11.5に上昇させたことにより、遠心分離時において夾雑物とウイルスの分離が良好に行えたと考えられる。従来、遠心分離時には誘出液のpHを中性付近に修正していたため、夾雑物とウイルスの再付着が起これ回収率が低下していたものと推定される。

2) 毒性物質の除去法

ウイルスの定性・定量を行うため、ウイルス濃縮試料を細胞へ接種するが、流入下水の濃縮試料中の毒性物質が細胞に対して悪影響を及ぼす。このため、HEp-2細胞、BGM細胞の2種類、下水試料にはB浄化センターの流入下水を用い、毒性物質の除去法に関して検討を行った。細胞へ接種する試料は、所定のウイルスの濃縮・誘出操作を行ったウイルス濃縮試料(未処理)と、各々5種類の処理方法により毒性物質の除去を試みたウイルス濃縮試料とした。それら各々の試料を細胞へ接種後、培養を行い細胞変性(溶解または脱落)を観察した。検討結果を表-5に示す。なお、表中の試料a、bは採水日の異なる流入下水である。未処理のものについては、流入下水中

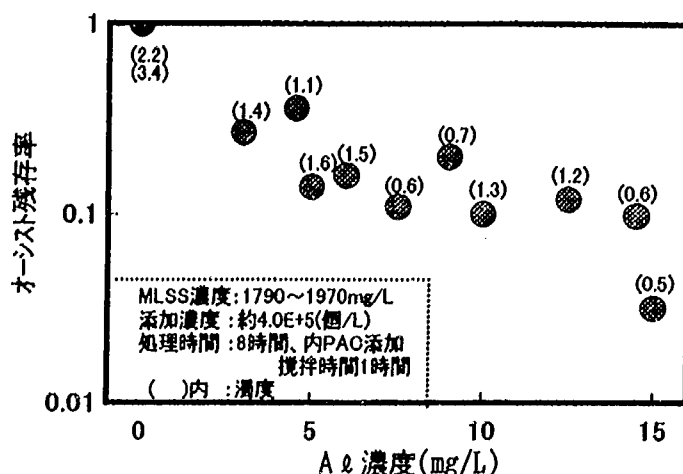


図-8 PAC添加濃度と処理水オースト濃度の関係

表-4 誘出液のpHと回収率

誘出液pH	A浄化センター	B浄化センター
7.5	2.5	2.8
8.5	4.7	4.5
9.5	42.0	57.5
10.5	47.2	77.5
11.5	49.3	75.0

(平均値:%)

表-5 流入下水中の毒性物質の除去

処理方法	試料	原液	
		HEp-2細胞	BGM細胞
未処理	a	toxic	toxic
	b	toxic	toxic
HCFC-141b	a	non	non
	b	non	non
0.45μmフィルター	a	non	non
	b	non	non
5% BSA	a	non	non
	b	non	non
5% Beef extract	a	toxic	toxic
	b	toxic	toxic
5% βcyclodextrin	a	toxic	toxic
	b	toxic	toxic

※ toxic : 細胞が溶解または脱落
non : 細胞の変性等なし

の毒性物質の影響を受けて細胞変性が観察された。毒性物質の除去法として、5種類の処理方法を検討したが、細胞変性の観察されなかった処理方法はHCFC-141b(代替70)、0.45μmフィルター(ニトセルロース製)、5%BSA(7μg/ml)処理の3手法であった。5% Beef extractは、ウイルスやファージの誘出剤の一種として用いられているが、毒性物質の除去には効果がなかった。また、包接剤の一種である5%β cyclodextrinについても毒性物質の除去には効果がなかった。

流入下水中の毒性物質の除去法としては、HCFC-141b(代替70)、0.45μmフィルター(ニトセルロース製)、5%BSA(7μg/ml)処理の3手法が有効であると考えられる。しかし、各々の手法がウイルスの回収率に及ぼす影響が不明であるため、各処理法によるウイルスの回収率試験を行った。ウイルスの定量はHEp-2細胞を用いたブランク法とし、下水試料にはB浄化センターの流入下水を用いた。回収率試験結果を表-6に示す。各処理法によるウイルス回収率は約50～70%であり、ほぼ同一とみなせる。よって、いずれの処理法により毒性物質の除去を行っても問題はないが、操作の簡便さや費用等の観点から、0.45μmフィルターによる処理法が良いものと考えられる。この手法の適用により、細胞に対する毒性物質の影響が回避でき、流入下水からウイルスを検出する上で、検出効率を高めることが可能である。

表-6 各処理法による回収率

処理方法	回収率(%)
5% BSA	73.3
HCFC-141b	53.3
0.45μmフィルター	60.0

3) 濃縮フィルター枚数の影響

ウイルス濃縮作業の効率化を計る上で、ウイルス濃縮フィルターの枚数とウイルス回収率の関係について把握を行った。すなわち、ウイルス濃縮フィルターを複数枚用いて下水試料を濃縮すると、濃縮フィルターの枚数が増加した分、ウイルス誘出液量も増加する。誘出液全量を細胞へ接種することは、多大な費用と労力を要することなどから現実的には不可能であり、現在のところごく一部の誘出液を細胞に接種しウイルスの定量を行わざるをえない。このため、ウイルス濃縮フィルターの枚数を増減させた場合、ウイルスの回収率に及ぼす影響を把握するために検討を行った。ウイルスの定量はHEp-2細胞を用いたブランク法とし、下水試料にはA浄化センターの流入下水と二次処理水およびB浄化センターの流入下水を用いた。流入下水を対象とした検討結果を表-7、二次処理水を表-8に示す。A浄化セン

表-7 濃縮フィルター枚数と回収率(流入下水)

フィルター枚数(枚)	ろ過量(L)	誘出液量(mL)	ウイルス回収率(%)	
			A浄化センター	B浄化センター
1	1	25	40.0	48.1
3	3	75	78.8	
8	8	200	61.4	40.9
10	10	250	40.0	

表-8 濃縮フィルター枚数と回収率
(二次処理水)

フィルター枚数(枚)	ろ過量(L)	誘出液量(mL)	ウイルス回収率
			A浄化センター
1	57	25	53.7
3	187	75	61.1

(%)

ターの流入下水の回収率で多少のばらつきがあるものの、フィルター枚数の増減に伴ってウイルスの回収率が大きく変動傾向は見られない。二次処理水についてもほぼ同一の回収率が得られており、大差はないものとなっている。よって、ウイルス濃縮作業の効率化を計る上で濃縮フィルターの枚数を減らしても、ウイルスの回収率に影響を及ぼすことはないと考えられる。

上記のウイルスの検出に関する検討結果をまとめると以下のとおりとなる。ゼーグラスフィルター上に捕捉したウイルスを誘出するための誘出液のpHは、11.5とすることにより従来よりも回収率を向上させられる。また、0.45μmフィルターにより流入下水中の毒性物質の除去が行えるため、流入下水からウイルスを検出する上で検出効率を高めることが可能である。さらに、ウイルス濃縮作業の効率化を計る上で濃縮フィルターの枚数を減らしても、ウイルスの回収率には影響を及ぼさない。

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10年度)
- ②鈴木 稔、諏訪 守、「下水道における病原性微生物への対応」月刊下水道 Vol.21 No.10(1998)
- ③第4回 下水道におけるクリプトスポリジウム検討委員会資料、日本下水道協会、平成11年3月
- ④諏訪 守、鈴木 稔、「活性汚泥処理によるクリプトスポリジウムの除去」、第2回水環境学会シンポジウム(1999) 投稿予定

【参考文献】

- 1) 例えば、埼玉県衛生部、「クリプトスポリジウムによる集団下痢症報告書」(1997)
- 2) 諏訪 守、鈴木 稔、土木研究所資料第3533号「下水処理場等におけるクリプトスポリジウムの検出方法の検討及び実態調査」、平成10年1月

(鈴木、小越、諏訪)

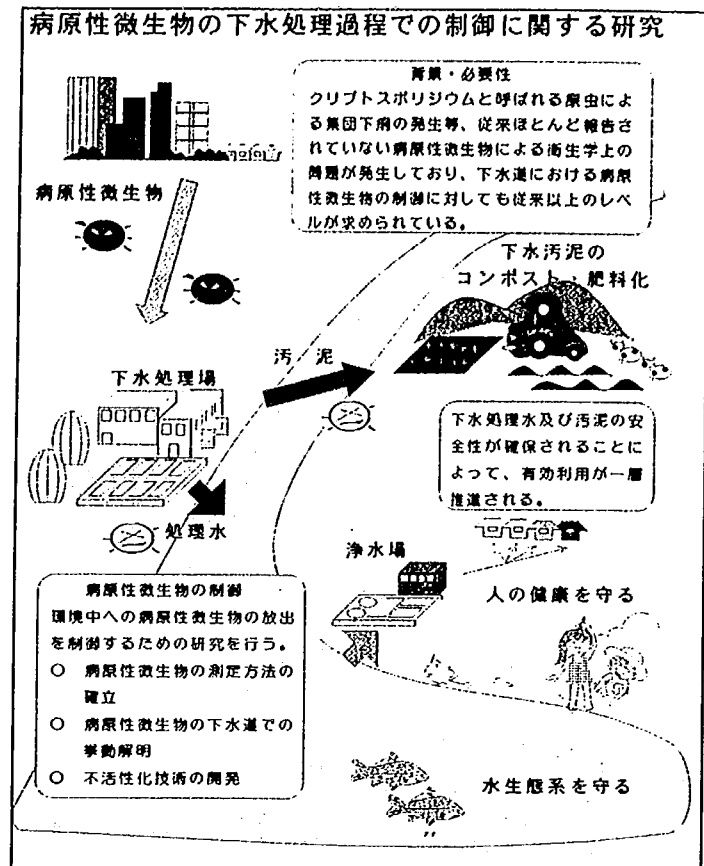
2.4 病原性微生物の下水処理過程での制御に関する研究

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、制御と対策に関する研究を行う必要がある。本年度は、下水処理過程でクリプトスポリジウムオーシストを制御するために重要となるオーシストの比重、ゼータ電位、凝集沈殿特性、活性汚泥への吸着特性を室内実験から明らかにした。その結果、オーシストの比重は、1.05～1.06の範囲にあった。下水中のオーシストのゼータ電位は、pH2～11の範囲において負に帯電してしており、pH7付近でのオーシストのゼータ電位は、-20mVであった。オーシストを添加した流入下水のPACによる凝集実験から、SSの除去率が最も高くなるPAC注入率でオーシストの除去率も最大となり、このときのオーシストの除去率は98.4%であった。活性汚泥によるオーシストの除去率は、処理時間4時間で99.6%の除去率が得られた。



1. 実験方法

- 1.1 オーシストの比重測定 オーシストの比重は、密度勾配沈降平衡法により測定した。浮遊液にはパーコール液を使用し、液体比重計により比重が1.00, 1.04, 1.05, 1.06, 1.07, 1.08となるように蒸留水で希釈調整した。15mlのチューブを5本使用し、それぞれのチューブに各浮遊液を5ml入れ、その表面上に1550個のオーシストを静かに積層した。この各チューブを750G, 10minの条件で遠心分離した後、上澄水4.5mlを静かに排除し、残液中のオーシストを計数した。
- 1.2 オーシストのゼータ電位測定 オーシストのゼータ電位は、0.45 μ mのメンブランフィルターでろ過したイオン交換水と流入下水のそれぞれにオーシストを添加し、pHを2～11に調整した後、オーシストのゼータ電位を測定した。pHの調整は0.1NHClと0.1NNaOHで行った。ゼータ電位計は、PenKem社製の顕微鏡電気泳動測定法ゼーターメーター Model 501を使用した。
- 1.3 オーシストの凝集実験 はじめに、流入下水の凝集沈殿特性を把握するために、30mlの試験管を多数本使用し、それぞれの試験管に濃度の異なるPACを入れ、実流入下水(SS:150mg/L, pH7.22)により20mlまでメスアップした後、直ちに凝集実験を行った。実験条件は、急速攪拌5分、緩速攪拌15分、沈殿20分とした。攪拌はロータリーシェーカーにより行った。引き続き最も凝集能力の優れていたPAC添加条件が含まれる範囲において、オーシストを添加した流入下水の凝集実験を行った。実験条件は先の予備実験と同一とした。PAC添加量は1.56, 7.80, 46.8, 78.0, 156mg-Al/Lの5段階とした。オーシストの添加量は6500個とした。静止沈殿後の上澄水中のオーシスト個数を計数し、凝集能力を評価した。
- 1.4 オーシストの活性汚泥吸着実験 30mlの試験管を6本使用し、活性汚泥(MLSS:2000mg/L, pH7.4)と一次処理水を9:1で混合したものを各試験管に20ml入れ、各試験管にオーシストを 1.3×10^5 個添加した。添加後直ちにロータリーシェーカーにより攪拌を開始した。攪拌経過時間5, 15, 30, 60, 120, 240分毎に試験管を一本ずつ取り外し、5分間静止沈殿させた。その後、汚泥界面より上部の上澄水を採取し、上澄水中のオーシストの個数を計数した。

1. 実験結果

2. 1 オーシストの比重測定結果

表-1 に実験結果を示す。表より分かるように、浮遊液の比重 1.04 以下では、97%以上のオーシストが沈殿していた。また、浮遊液の比重 1.06 以上では、沈殿したオーシストの割合は7%以下であった。このことから、オーシストの比重は、1.05~1.06 の範囲にあることが分かった。

表-1 オーシストの比重測定の結果

浮遊液の比重	残液中の オーシスト数	数値100とした割合
1	1525	98.4
1.04	1501	96.8
1.05	934	60.3
1.06	114	7.4
1.07	53	3.4
1.08	49	3.2

添加オーシスト数: 1550個

2. 2 オーシストのゼータ電位測定結果

イオン交換水と流入下水中のオーシストのゼータ電位に及ぼす pH の影響を図-1 に示す。図よりイオン交換水や下水中のオーシストのゼータ電位は、pH2 付近で等電点となり、pH が上昇するに従い低下する傾向を示した。下水中のオーシストのゼータ電位は、中性付近では -20mV 程度となった。下水とイオン交換水中のオーシストのゼータ電位値は異なり、下水中のオーシストのゼータ電位は、イオン交換水のケースより上昇する傾向が見られた。

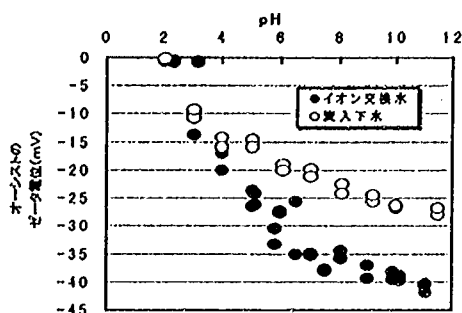


図-1 オーシストのゼータ電位測定結果

2. 3 オーシストの凝集沈殿結果

図-2 に PAC(Al)の添加量とフロックのゼータ電位・pH・上澄水 SS 濃度・上澄水中オーシスト個数とオーシストの除去率の関係を示した。図より PAC 添加量約 46.8mg-Al/L 付近で、フロックのゼータ電位が等電点になった。このときの pH は 6.5 であり、上澄水中 SS 濃度も 6mg/l と低レベルであった。本条件では、上澄水中のオーシストの検出個数も低レベルであり、オーシストの除去率は、98.4%であった。下水中の SS を凝集沈殿することによりオーシストも除去されることが分かる。

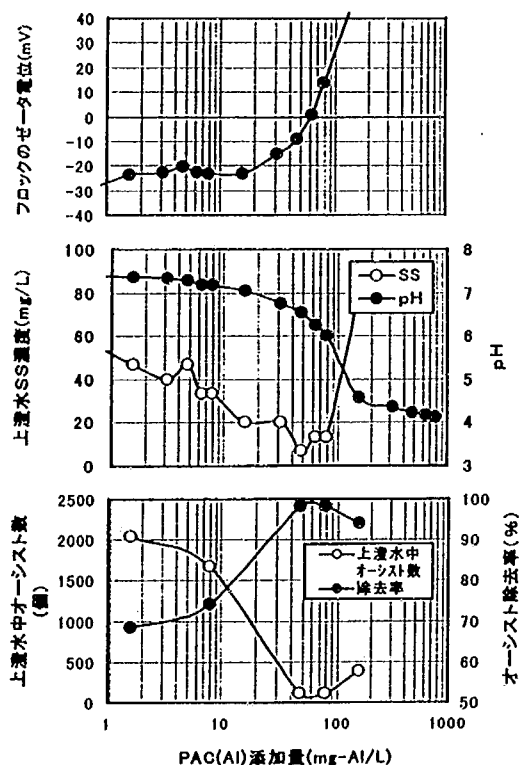


図-2 オーシストの凝集実験結果

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

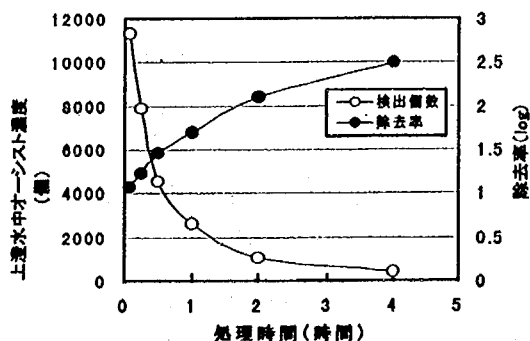


図-3 オーシストの活性汚泥吸着実験結果

(尾崎, 落, 北村)

2.5 生態系からみた下水処理水の評価方法に関する調査

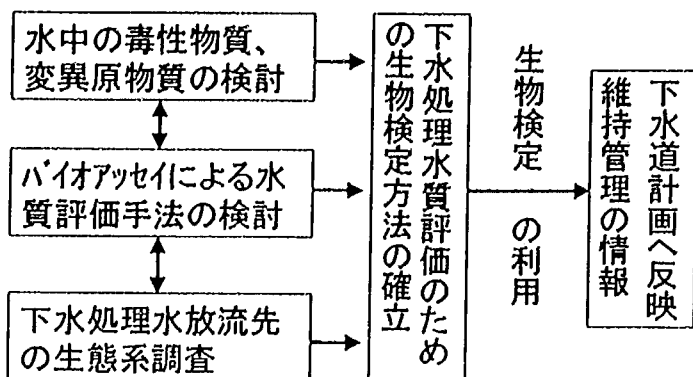
研究期間平成8年～平成11年

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。今年度は、①様々な種類のバイオアッセイを実際の下水試料に適用し、実態の把握を行うとともに、それぞれのバイオアッセイについて適用性を検討した結果、使用する生物種により検出している毒性物質の種類が異なる可能性があること、下水処理場の生物処理により毒性が低減するが、消毒プロセスにより毒性が上昇する場合があることが明らかとなった。②下水試料中の変異原性についてその由来を検討した結果、分離に用いるHPLCの条件を検討することで変異原物質の分離がある程度可能であると考えられた。③魚類等の野生生物の生殖に影響を及ぼす可能性が指摘されている環境ホルモンについて、バイオアッセイを用いた測定方法を検討した結果、遺伝子組み替えを行った酵母菌を用いて下水中の女性ホルモン作用を評価するための基礎データをえた。



1. 全国4ヶ所の下水処理場及び放流先河川で採水した試料のバイオアッセイによる影響評価

現在、水質研究室では下水処理水が生態系に与える影響を調べるため、下水処理場からの放流水が水量のほとんどを占めるような河川やせせらぎにおいて、どのような生物相が形成されているのかを把握するための実態調査を行っている。10年度は、全国4ヶ所の家庭排水が主体の下水処理場及び放流先河川、せせらぎにおいて季節毎に年3～4回の調査を行った。本調査では同時に、調査対象処理場及び放流先の調査地点において試料を採水し、2種類のバイオアッセイ(マイクロトックス急性毒性試験、藻類増殖阻害試験)を用いて生物に対する影響を検討した。

1.1 方法

1.1.1 採水

採水は家庭排水が主体の4つの処理場及び放流先河川においてスポットで行った。表-1に処理場の概要と採水地点をまとめた。

表-1 処理場の概要と採水地点

処理場	処理方式	消毒方法	放流先	採水地点
A	標準活性汚泥法+急速砂ろ過	塩素	親水用せせらぎ(全量処理水)	流入下水、初沈流出水、放流水、河川水(600m下流、1400m下流)
B	嫌気好気活性汚泥法	塩素	都市河川(処理水量>河川水量)	流入下水、初沈流出水、終沈流出水、放流水、河川水(上流、100m下流)
C	標準活性汚泥法+急速砂ろ過	オゾン	親水用せせらぎ(全量処理水)	流入下水、初沈流出水、終沈流出水、放流水、河川水(800m下流)
D	嫌気好気活性汚泥法+急速砂ろ過+膜間接触酸化	紫外線消毒+塩素消毒	都市河川(処理水量≒河川水量)	流入下水、終沈流出水、放流水(紫外線、塩素)、河川水(上流、100m下流)

1.1.2 マイクロトックス急性毒性試験

マイクロトックスは海洋性発光細菌(*Vibrio fischeri*)を用いた米国AZUR ENVIRONMENTAL社製の簡易毒性試験システムである。試験方法は基本的に添付のプロトコールに従った。試料は採水後直ちに0.45μm filterで除菌ろ過し、試験に供した。測定結果から、50%発光阻害濃度(EC50)を求め、さらに毒性単位(TU; Toxicity Unit)を $TU=100/EC50$ として算出した¹⁾。TUは試料の毒性濃度をEC50と等しくするために必要な希釈倍率を表してお

り、毒性が強いほどTUの値は大きい。

1. 1. 3 藻類増殖阻害試験

緑藻セレンストラム(*Seiellastrum capricornutum*)は、培養が容易で毒性物質に対して比較的感受性が高いため、世界的に広く用いられている。ここでは、96穴マイクロプレートを用いるカナダ環境庁の方法²⁾を一部改良した方法³⁾で行った。試料は採取後速やかに土木研究所に搬送し試験に供したが、残留塩素を含む試料は、輸送中の水質変化を防ぐ目的で採水時にアスコルビン酸ナトリウムを適量添加した。測定結果より I (阻害率%) = $100 \times (R_c - R) / R_c$ (R : 試験区における72時間の吸光度(440nm)変化、 R_c : 対照区における72時間の吸光度(440nm)変化) として阻害率 I を算出した後、横軸に試料濃度(対数)、縦軸に阻害率 I をプロットし、回帰計算により50%増殖阻害濃度(IC50)を求めた。また、 $TU = 100 / IC50$ として、TUを算出した。

1. 2 結果及び考察

1. 2. 1 マイクロトックス急性毒性試験

図-1に平成10年度の調査結果及び平成8, 9年度の調査結果の平均値を示す。平成10年度の調査においては、すべての処理場の流入水において季節を問わず毒性が確認されたが、終沈流出水では、すべての処理場のすべての時期において毒性は本試験の検出レベル以下であった。消毒後の放流水については、低濃度塩素消毒のB処理場、紫外線消毒と低濃度塩素消毒のD処理場、及びオゾン消毒のC処理場の毒性は認められないレベルであった。一方、親水利用のため一般の処理場よりも塩素注入量の多いA処理場においては放流水で流入下水よりも強い影響が認められたが、1,400m下流地点では毒性が検出できないレベルとなっていた。平成9年度においては、1,400m下流地点においても流入水より高い毒性が検出されているが、これは病原性微生物対策として過剰に塩素を注入(平成8, 10年度は通常運転)していたためと考えられる。また平成9年度において、放流水を脱塩素処理した試料では毒性が認められなかったことと合わせて考えると、A処理場放流水の発光細菌に対する毒性は主に残留塩素の影響であると考えられる。以上のことから、処理場における生物処理が毒性の低減に有効であることが示唆されたが、塩素消毒はその塩素注入量によっては放流先では衛生微生物の消毒のみならず、元々そこに生息する細菌等に対しても影響を及ぼしていることが示唆された。

1. 2. 2 藻類増殖阻害試験

図-2に平成10年度の調査結果及び平成8, 9年度の調査結果の平均値を示す。平成10年度の調査では、すべての処理場の流入水において季節を問わずセレンストラムに対する毒性が認められた。終沈流出水については、毒性が認められないか認められても流入水よりも小さい場合が多かった。過去のデータについてはC処理場の平成9年度の毒性が高くなっているが、これは平成9年11月の調査の際、直前にサンプリングラインの工事が行われており、処理水そのものの毒性ではなく配管材料等の影響を受けて毒性が高くなっていることが考えられた。塩素消毒の影響については、塩素消毒を行っている3処理場の放流水のセレンスト

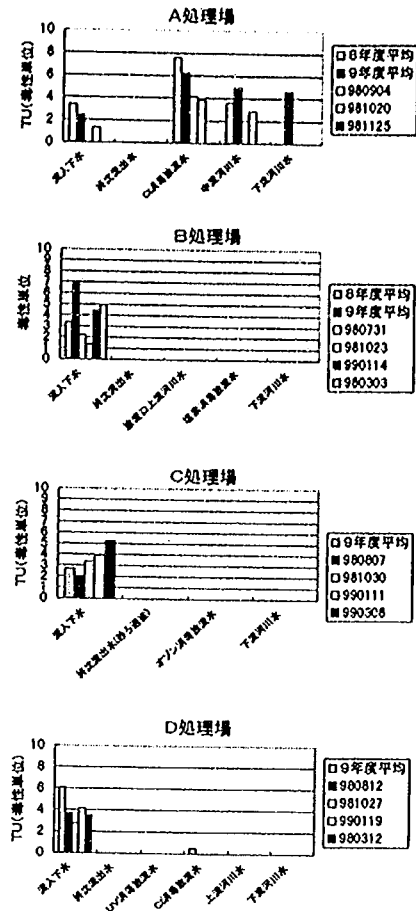


図-1 MICROTOX急性毒性試験の結果

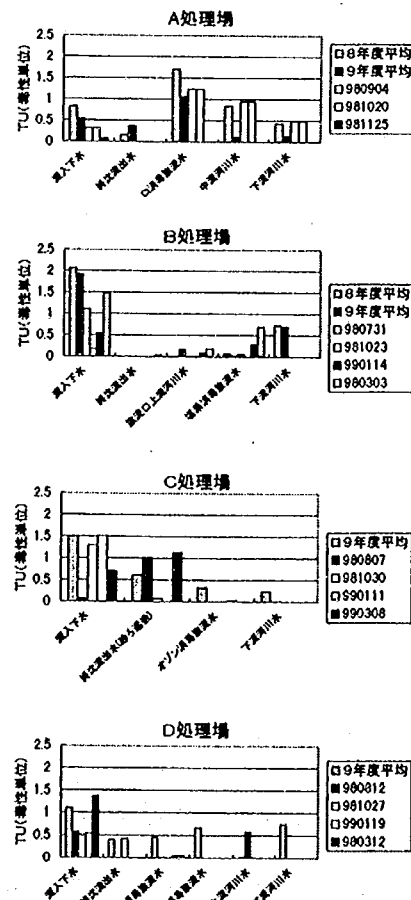


図-2 藻類増殖阻害試験の結果

ラムに対する毒性は、A処理場>D処理場>B処理場であり、塩素注入濃度が高いほど毒性が高い傾向がみられた。特に通常より高濃度の塩素消毒を行っているA処理場では、放流地点下流1,400m地点でも影響が認められた。試験に用いた水は採水時に塩素中和処理をしているため残留塩素の直接的な影響ではなく、その他の塩素処理によって副生成された物質が原因と推察された。これらの結果より下水処理における生物処理が毒性の低減に有効と考えられたが、塩素注入量が多い場合は消毒した放流水により放流先の藻類が何らかの影響を受けることが示唆された。オゾン消毒及び紫外線消毒については、消毒前後で特に変化がみられない場合がほとんどであり、塩素消毒の場合のような明らかな影響は認められなかった。

2. 下水処理場の流入水と処理水を用いた各種バイオアッセイの感受性比較

2.1 目的及び方法

当研究室では、下水試料の毒性評価を行うために様々な水生生物を用いたバイオアッセイについて検討を進めている。ここでは、全国の10ヶ所の下水処理場において採水した流入水と放流水に対して、種々の水生生物を用いたバイオアッセイを行うことにより、生物種による感受性の違いを把握すると同時に下水試料の毒性データの収集を行った。試料は採取後冷蔵条件で速やかに土木研究所に搬送し試験に供した。今回の測定においては試料採取から測定まで時間をおいているため、残留塩素等の消毒成分の影響を受けないこと、試料採取時にアスコルビン酸等の残留塩素中和剤を添加していないので、試料の成分が一部変質していること等が考えられる。処理場の概要を表-2に示す。

2.1.1 マイクロトックス急性毒性試験

試験操作は2.1.1と同様である。

2.1.2 藻類増殖阻害試験

試験操作は2.1.2と同様である。

2.1.3 ミジンコ急性毒性(遊泳阻害)試験

オオミジンコ(*Daphnia magna*)を用い、試験方法は主にOECDの方法⁴⁾に基づいて行った。ミジンコを試験溶液中に入れ24時間曝露した後、穏やかに振動させ15秒経過しても泳がない個体の数と試料濃度の関係から50%阻害濃度(EC50)を計算し、ここからTUを求めた。

2.1.4 AOD試験

アカヒレ(*Tanichthys albonubes*)、ヌカエビ(*Paratya compressa improvisa*)を用い、試験は佐々木らの方法⁵⁾に基づいて行った。試料はGF/Bろ紙でろ過した後凍結濃縮を行い、1800%に濃縮調整した。段階的に希釈した濃縮試料中に7個体の供試生物を入れ、アカヒレの場合は25±1℃、ヌカエビの場合は20±1℃に設定した恒温器内で48時間飼育した。この際死亡個体は速やかに取り除いた。48時間後、半数以上死亡した試水の%濃度と、半数以上が生残した試水の%濃度から50%致死濃度(LC50)を計算し、ここからTUを求めた。

2.1.5 カエル胚毒性試験

基本的な試験手順はASTM(American Society for Testing and Materials)に標準法として記載されているアフリカツメガエルの胚に対する催奇形性試験(FETAX)⁶⁾に準じて変更を加えた方法³⁾を用いた。死亡個体数の測定結果から半数死亡濃度(LC50)を求め、毒性単位TU=100/LC50を算出した。なお、今年度はF, G, I処理場の流入下水及び放流水について試験を行った。

2.2 結果及び考察

それぞれの試験で得られた結果を表-3に示す。数値は試験間の比較を容易にするために、それぞれの試験について50%影響濃度から毒性単位TUを算出している。

流入水のバイオアッセイの結果を10処理場の平均値で比較すると、検出した毒性単位はアカヒレを用いたAOD試験で最も高く、ヌカエビを用い

表-2 調査対象処理場の概要

処理場	排除方式	処理方式
A	分流・合流	標準活性汚泥法
B	分流・合流	標準活性汚泥法
C	分流	標準活性汚泥法+凝集沈殿+砂ろ過
D	分流	酸素活性汚泥法(嫌気-好気運転)
E	分流	凝集剤添加活性汚泥循環変法+砂ろ過
F	合流	標準活性汚泥法
G	分流	標準活性汚泥法・嫌気-好気法
H	分流	標準活性汚泥法
I	分流	標準活性汚泥法、循環式硝化脱窒法
J	分流	標準活性汚泥法+砂ろ過+礫間接触酸化

表-3 下水試料を用いた各種バイオアッセイの感受性比較

処理場	試料	供試生物による毒性単位(TU)					
		アカヒレ	ヌカエビ	緑藻	MICROTOX	ミジンコ	カエル
A	流入水	1.33	0.53	0.65	ND	ND	—
B	流入水	0.77	0.43	0.41	ND	ND	—
C	流入水	2.27	1.33	0.96	ND	ND	—
D	流入水	1.27	0.48	0.27	ND	ND	—
E	流入水	0.77	0.63	1.00	ND	ND	—
F	流入水	1.33	1.08	0.08	ND	ND	1.90
G	流入水	1.33	0.53	ND	1.59	ND	0.47
H	流入水	0.91	0.91	0.05	ND	ND	—
I	流入水	0.77	0.71	0.08	ND	ND	1.24
J	流入水	1.33	1.33	0.43	ND	ND	—
	平均	1.21	0.80	0.44	1.59	—	—
A	放流水	ND	ND	0.43	ND	ND	—
B	放流水	0.07	ND	ND	ND	ND	—
C	放流水	ND	ND	ND	ND	ND	—
D	放流水	0.43	1.27	ND	ND	ND	—
E	放流水	ND	ND	ND	ND	ND	—
F	放流水	0.13	0.13	ND	ND	ND	ND
G	放流水	ND	0.15	ND	ND	ND	ND
H	放流水	0.15	0.13	0.38	ND	ND	—
I	放流水	ND	0.06	ND	ND	ND	ND
J	放流水	ND	ND	ND	ND	ND	—
	平均	0.20	0.35	0.40	—	—	—

たAOD試験、藻類増殖阻害試験の順であった。MICROTOX試験、ミジンコ急性毒性試験の2つはほとんど毒性を検出することができなかった。同じ甲殻類であるミジンコとヌカエビの結果が大きく異なっているが、原因としては、それぞれの生物の感受性が異なるだけでなく、サンプルの前処理方法や曝露時間にもあることが考えられた。すなわち、AOD試験は凍結濃縮によりサンプルに含まれている物質をほとんどすべて濃縮し48時間曝露しているのに対し、ミジンコ試験はサンプルの濃縮を行っておらず測定サンプル中の毒性物質の濃度が検出に十分な濃度になっていないこと、曝露時間が24時間であることが考えられた。また毒性が検出された3つのバイオアッセイについて、流入下水の測定結果を用いて試験方法間の相関性を検討した結果、検出された毒性に相関は認められず、相関係数はアカヒレ：ヌカエビでは $R^2=0.336$ 、アカヒレ：緑藻では $R^2=0.111$ 、ヌカエビ：緑藻では $R^2=0.0025$ であった。以上の結果からそれぞれのバイオアッセイにおいて、それぞれ異なる毒性要因を検出している可能性が示唆された。また、カエル胚毒性試験は3処理場の試料について試験したのみであるが、検出した毒性単位は平均値でアカヒレを用いたAOD試験と同等であると考えられた。

放流水のバイオアッセイの結果を10処理場の平均値と比較すると検出した毒性単位はヌカエビを用いたAOD試験で最も高く、次にアカヒレを用いたAOD試験、及び藻類増殖阻害試験が高くなっていた。流入水と同様、MICROTOX急性毒性試験及びミジンコ急性毒性試験、カエル胚毒性試験の3つの方法では毒性を検出することができなかった。毒性を検出したサンプル数を比較するとアカヒレを用いたAOD試験が4サンプル、ヌカエビを用いたAOD試験が5サンプル、藻類増殖阻害試験が2サンプルであり、このことからヌカエビを用いたAOD試験は処理水に含まれる毒性の検出に優れていると考えられる。カエル胚毒性試験については試験した3つのサンプルに対して、毒性を検出できなかったが、これらのサンプルは他の方法では毒性が検出されているサンプルであることから、カエル胚毒性試験は処理水に残留している毒性物質に対して感受性が低いことが考えられた。

3. 下水試料中の変異原性検討

3.1 実験方法

下水試料の変異原性について情報を得るため、HPLC を用いて極性の違いから物質を分離分画し、その変異原性を検討した。小野らはヒトし尿中の変異原物質として多環芳香族の存在を報告している^{7) 8)} が、今回は下水に流入してくるより広範な物質を対象として変異原性の検討を行った。

3.1.1 試料の調整

下水試料はα処理場の高度処理水を用い、固相抽出法により濃縮を行った。試料は過去の検討⁹⁾ から一番変異原の抽出が期待される pH2 に調整した後 Na5A ろ紙でろ過し、固相カートリッジに通水（ジクロロメタンとメタノールでコンディショニング済み、流量 20ml/min）した。下水試料に含まれる化学物質を広範囲に抽出するため固相カートリッジには弱疎水性物質を広範囲に吸着する Sep-Pac tC18（ミリポア製）を用いた。

3.1.2 下水試料のHPLCによる分画

分取 HPLC により濃縮試料の分画を行った。HPLC の条件を表-4に示す。検出器の測定波長は試料全体のUV吸収が210～220nm 付近で高いこと及び多環芳香族化合物についても情報を得るため213nm と265nm の吸収を同時に測定した。HPLC からの流出液は2分間隔(各10ml)で80分後(40フラクション)まで分画・採取した。得られた各フラクションは、HPLC のクロマトグラム (UV吸収) を参考にして数本ずつまとめ、分画試料を作成した。これに精製水を加えてメタノール濃度を1%以下とし、再度固相カートリッジを用いて濃縮した後、メタノール、ジクロロメタンで順次溶出した。溶出液は乾固した後、ジメチルスルホキシド (DMSO) を0.5ml 加えて変異原性試験用の試料とした。

3.1.3 変異原性試験

本調査には、変異原性の測定方法としてumuテストを用いた。umuテストの方法は定法に従って行った¹⁰⁾。用いた菌株は *Salmonella typhimurium* TA1535/pSK1002、代謝活性に用いるS9ならびにS9mix 調整用 cofactor はオリエンタル酵母工業製を用いた。

3.2 結果と考察

分画したフラクションはクロマトグラムを参考に、紫外吸収の単一なピークが1つにまとまるように4分間または6分間に流出したものをまとめ、分画試料No.1～19を作成した。213nm で測定したHPLC のクロマトグラム及び分画試料の分割状況を図-3に示す。クロマトグラムから分かるように、今回の条件では下水試料中の物質の多くは4～32分の間に流出していた。また、クロマトグラムの39、50、59分に明確なピークが確認された。クロマトグラムは265nm でも同様のパターンであった。各

表-4 HPLC の条件

	下水試料の分画
カラム	分取用 ODS カラム、φ19mm×L300mm
溶離液	MeOH : 10mM 酢酸ナトリウム (6 : 4)
測定条件	流速5ml、分析温度40℃
検出器	UV 検出器 (213nm、265nm)

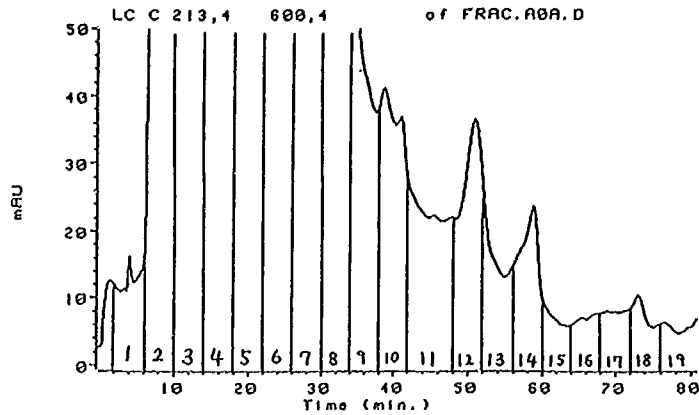


図-3 クロマトグラムおよび分画試料の分割状況

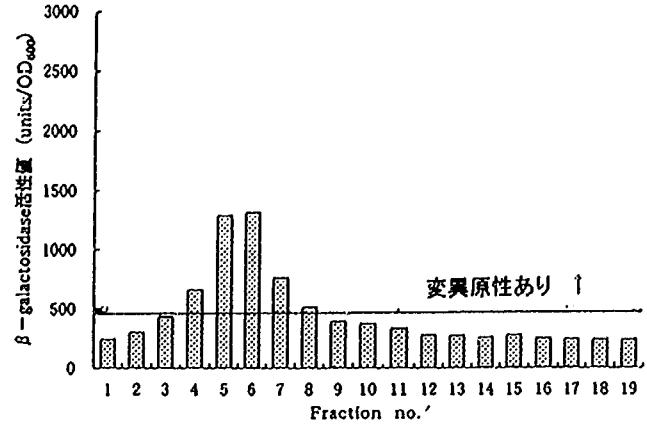


図-4 分画試料の変異原性測定結果

分画試料の変異原性を測定した結果を図-4に示す。図中の線は酵素活性がコントロールとして行った溶媒(DMSO)のみの測定結果の2倍を示しており、この値より大きいものを陽性と判定した⁸⁾。分画試料の変異原性を比較すると、S9+では変異原性が陽性と判断されるのは試料No.4~No.8であり、特にNo.5、6の変異原性が高くなっている。他の分画試料の変異原性は、コントロールよりも高い場合もあるものの明確な変異原性は確認できなかった。このことから、今回のHPLC条件では下水試料の変異原性は主に14分~32分の間に流出してくる物質に由来すると考えられたが、これらについては単独のピークとして確認できなかったものがほとんどであり、今後分析条件を検討する必要があると考えられる。一方、HPLCのクロマトグラムでピークが認められたNo.10、12、14等の分画試料については今回の検討では明確な変異原性が確認できなかった。この要因としては、HPLCのクロマトグラムから、これらの分画試料に含まれている変異原性物質の量が少ないこと及びこれらのピークを持つ物質の変異原性が低いことの両方が推定されるが、今回の検討結果からは判断が困難である。代謝活性については、行った(S9+)場合と行わなかった(S9-)場合を比較すると、変異原性の出現する分画試料のパターンは同様であるが、代謝活性を行った場合の方が変異原性が大きくなる傾向が見られたことから、代謝活性操作の検討も必要と考えられた。

4. 酵母を用いた環境ホルモン物質の検出方法の検討

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することが指摘されている¹¹⁾。化学物質の多くは、人間活動に伴い意図的または非意図的に環境中に放出される可能性があるが、下水道の普及率が上昇していることから、水を媒体として環境に流出する化学物質の内かなりの割合が下水道システムを経由していることが考えられる。一方、このような化学物質についてそれぞれの内分泌攪乱作用を評価することは、製造、使用の段階では特に重要であるが、下水道のように含まれている物質の特定が困難な場合には、特定の化学物質の分析を行うだけでなく、内分泌攪乱作用を総合的に評価することも重要であると考えられる。そこで、我々は遺伝子組み替え操作により女性ホルモン作用を検出する機能を組み込んだ酵母菌を用いて化学物質の女性ホルモン作用を評価する手法を下水試料に適用することで下水試料中の女性ホルモン作用を総合的に評価する方法について検討している。今回は滝上らの方法¹²⁾を参考に試験方法の検討を行った。

4.1 目的及び方法

測定方法は基本的に添付のプロトコルを基本とし、より安定した測定結果が得られるように測定方法を検討した。プロトコルでは①酵母菌をgrowth mediumで28℃条件下一昼夜前培養した後、②前培養液(4×10^7 cellの菌体量)を発色基質(CPRG)を含む Assay medium に混合する。③溶媒で希釈した測定対象物質を注入し溶媒留去した96穴マイクロプレートのwellに混合液を200 μ l加え、32℃で4日間静置培養する。④培養後発色したプレートをプレートリーダーにより550nm(基質の発色)及び600nm(反応溶液の濁度、酵母菌の増殖を測定)することとなっている。今回は(1)使用する有機溶媒の種類(DMSO、MeOH、EtOH)、(2)前培養した菌の添加量、(3)培養温度と培養日数について条件を検討した。

4.2 結果及び考察

測定方法について検討した結果、(1)使用溶媒についてはMeOHは測定結果のばらつきが大きかったが、EtOH、DMSOは測定結果が安定していた。しかし、EtOHは試料の希釈作業を氷浴上で行わなければならない、作業性からDMSOが優れていると判断した。(2)前培養した菌の添加量についてはプロトコルでは前培養した菌液を0.5~2.0ml(4×10^7 cell)加えるとなっているが、前培養した菌体の濃度を測定した結果、菌体濃度が充分高くなっておらず、

濃縮操作を行い 4×10^7 cell加えることとした。(3) 培養温度と日数については、測定に必要な発色が、それぞれ28℃なら7日間、32℃なら4日間で得られることが分かった。培養日数が4日の場合、測定期間は短くなるものの、土曜日、日曜日に作業を行わないようにすると、週に2回しか測定できないのに対し、培養日数が7日の場合、週に4回の測定が可能であり、多くのサンプルを測定するのに有利と考えられることから、28℃で7日間の培養を行ほうが適していると考えられた。

<主な研究成果物>

- 松原正明, 原田新, 田中宏明: 藻類増殖阻害試験およびカエル胚催奇形性試験の基礎的検討と下水試料への適用, 水環境学会誌, 20 (11), 768-775 (1997)
- 松原正明, 田中宏明, 南山瑞彦: バイオアッセイの下水試料等への適用性の検討, 第33回下水道研究発表会講演集, 301-303 (1996)
- 松原正明, 田中宏明, 南山瑞彦: バイオアッセイの下水試料等への適用性の検討(その2), 第34回下水道研究発表会講演集, 215-217 (1997)
- 原田新, 田中宏明: バイオアッセイによる下水再利用水の水質評価, 第3回エコトキシコロジー研究会・バイオアッセイ研究会合同研究発表会講演要旨集, 35-36 (1997)
- 原田新, 松原正明, 南山瑞彦, 田中宏明: カエル胚催奇形性試験(FETAX)による下水処理水の水質評価, バイオアッセイ国際シンポジウムinとやま講演論文集, 58-59 (1997)
- 松原正明, 南山瑞彦, 原田新, 田中宏明: 変異原性試験のための下水試料濃縮方法の検討及び下水処理場での変異原性評価, バイオアッセイ国際シンポジウムinとやま講演論文集, 88-89 (1997)
- 原田新, 松原正明, 南山瑞彦, 田中宏明: カエルの胚を用いたバイオアッセイによる下水処理水の水質評価, 第32回日本水環境学会年会講演集, 34 (1998)
- 松原正明, 原田新, 田中宏明, 南山瑞彦: バイオアッセイによる下水・河川水の毒性及び変異原性評価, 第32回日本水環境学会年会講演集, 109 (1998)

<参考文献>

- 1) USEPA: Technical support document for water quality-based toxics control, EPA/440/4-85/032 (1985)
- 2) Environmental Protection, Conservation and Protection, Environment Canada: Biological test method: Growth inhibition test using the freshwater alga *Selenastrum capricornutum*, Report EPS 1/RM/25 (1992)
- 3) 松原正明, 原田新, 田中宏明: 藻類増殖阻害試験およびカエル胚催奇形性試験の基礎的検討と下水試料への適用, 水環境学会誌, 20 (11), 768-775 (1997)
- 4) OECD: *Daphnia* sp., Acute Immobilisation Test and Reproduction Test, OECD Guidelines for testing of Chemicals, Method 202 (1993)
- 5) 佐々木, 古田ら: ゴルフ場排水モニタリング手法開発, 第25回水質汚濁学会講演要旨集, 46-47 (1991)
- 6) ASTM: Standard Guide for Conducting the Frog Embryo Teratogenesis Assay-Xenopus (Fetax), Annual book of ASTM Standards, E1439-91
- 7) 小野, 宗宮: 下水処理水中難分解有機物の遺伝毒性に関する研究, 下水道協会誌論文集, 30 (357), 92-99 (1993)
- 8) 小野芳朗, 毛利紫乃, 宗宮功, 小田美光: ヒトし尿の生物処理水中に存在するTrp-P-2の同定と評価, Environ. Mut. Res. Commun., 17, 179-186 (1995)
- 9) 松原正明, 南山瑞彦, 原田新, 田中宏明: 変異原性試験のための下水試料濃縮方法の検討及び下水処理場での変異原性評価, バイオアッセイ国際シンポジウムinとやま講演論文集, 88-89 (1997)
- 10) 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)
- 11) Environment Agency: The Identification and Assessment of Oestrogenic Substances in Sewage Treatment Works Effluents, 1997
- 12) H. Takigami et al., Detection of Estrogen-like Activity In Sewage Treatment Process Waters, Environ. Sanit. Eng. Res. Vol. 12, No. 3, 214-219 (1998)

(田中, 高橋, 東谷, 矢古宇)

2.6 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】

現在、生産・使用されている化学物質は数万種に及ぶと言われている。これらの化学物質は、生活に欠くことのできない有益な物質であることは言うまでもないが、人の健康を害するものも少なくない。人の健康を害する一部の物質については、環境や下水道への排出が規制されているところであるが、多くの化学物質は未規制のままである。生活排水、工場排水等を処理した後、環境へ戻している下水道においては、今後一層、有害化学物質を適切に管理することが重要な課題となる。

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。

10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、社会問題となったことから、環境ホルモンを調査対象物質とした緊急調査を行った。建設省が平成10年度に実施した「水環境における内分泌攪乱化学物質に関する実態調査」で調査対象とした化学物質のうち、ノルフェノール(NP)と前駆物質のノルフェノールエチレン(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、建設省の実態調査で下水からの検出率が比較的高かった物質を対象として、活性汚泥処理実験装置を用いた実態調査を行った。

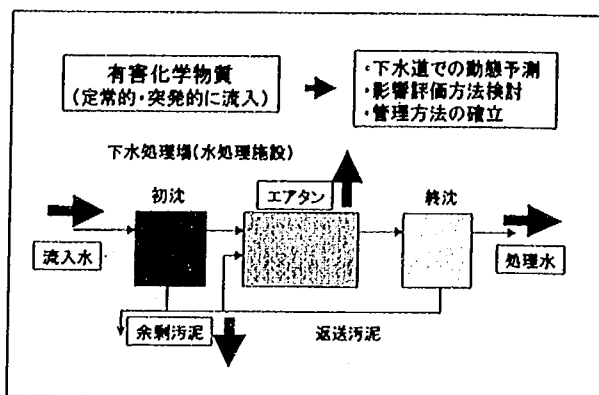
1. 研究方法

1.1 活性汚泥処理プロセスにおける NP、NPEO の挙動

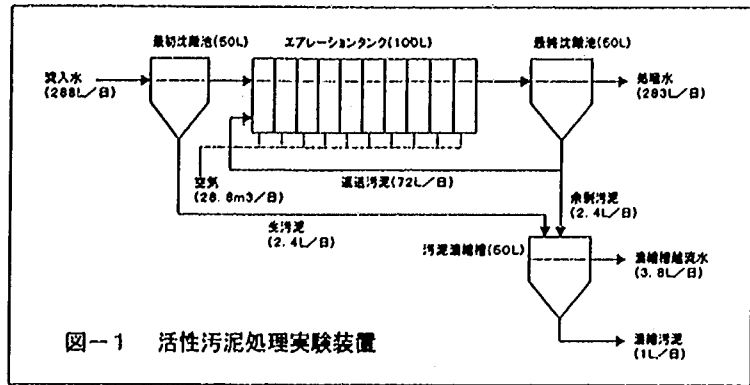
非イオン界面活性剤の一つである NPEO は、下水処理過程で好気・嫌気処理を受け NP を生じることが知られている¹⁾。NP は、近年、社会問題化している環境ホルモン問題の一対象物質として注目されている物質でもあり、我が国においても環境中での分布についていくつかの報告^{2), 3)}がみられる。また、NP は、建設省が平成10年度に実施した「水環境における内分泌攪乱化学物質に関する実態調査」⁴⁾において河川水、下水について調査対象とした物質でもある。

本調査は、環境ホルモンの中でも界面活性剤という身近な物質が発生原因と考えられている NP の下水処理プロセスでの挙動把握を目的とした。

図-1 に示す活性汚泥処理実験装置を用い実下水を流入水とした。流入水、初沈流出水、処理水、濃縮槽越流水、生污泥、余剰汚泥、濃縮汚泥を3時間間隔で24時間採取した後、同量づつ混ゼンポット試料を作成し分析に供した。分析項目は、調査対象項目の NP と NPEO、実験装置の運転状況を評価するための項目、BOD、SS、D-TOC、NH₄-N、NO₂-N、NO₃-N である。NPEO は、エチレン(EO)基が5以上のノルフェノールエチレン(NPnEO)と EO 基が1～4のノルフェノールエチレン(NP1-4EO)に分けて測定した。なお、調査に用



いた実験装置は、最初沈殿池(50L)、エレーションタンク(100L)、最終沈殿池(50L)、濃縮槽(50L)から構成されている。流入水量は 288L/day で運転しており水理学的な滞留時間は、初沈、終沈の各沈殿池が約 4 時間、エレーションタンクが約 8 時間、濃縮槽が約 10 日である。汚泥返送率は 25% である。生汚泥、余剰汚泥引き抜き量は、それぞれ 2.4L/day、濃縮汚泥引き抜き量は 1L/day である。エレーションタンク内 MLSS は約 2000mg/L、SRT は約 14 日である。



図一 活性汚泥処理実験装置

① NP、NP1-4EO、NPnEO の分析

・水試料の前処理

水試料の分析は小島ら²⁾の方法に準じた。流入水、初沈流出水、処理水を各 1L、濃縮槽越流水 500mL をガラス繊維ろ紙(孔径 1μm)でろ過した。ろ紙上に残った SS はメノールを加え、1 分間放置した後ろ液に混ぜた。このろ液は、メノール 10mL、超純水 10mL で「デ・イソニク」した固相カラム(Sep-Pak C₁₈)に 20mL/min で通水した。その後、固相カラムは遠心脱水(2000rpm, 10 分)し、メノール 5mL で溶出(1mL/min)した。メノール溶出液は、窒素を吹き付けにより 1mL に濃縮し HPLC 分析試料とした。

・汚泥試料の前処理

汚泥試料の分析は Kikuchi ら⁵⁾の方法に準じた。生汚泥、余剰汚泥、濃縮汚泥各 200mL を遠心分離(2000rpm, 10 分)し、上澄液と汚泥に分離した。上澄液は水試料の前処理に従い HPLC 分析試料を調製した。汚泥はスクリーバに移し、メノール 20mL を加え 10 分間振とう抽出した後、遠心分離(2000rpm, 10 分)した。このメノール抽出を 2 回繰り返す。次にメノール抽出液をロータリーエバポレータでメノールがなくなるまで濃縮し、残った水溶液をメノール 10mL、超純水 10mL で「デ・イソニク」した固相カラム(Sep-Pak C₁₈)に 20mL/min で通水した。その後、固相カラムは遠心脱水(2000rpm, 10 分)し、メノール 5mL で溶出(1mL/min)した。メノール溶出液は、窒素を吹き付けにより 1mL に濃縮し HPLC 分析試料とした。

・HPLC 測定条件

HPLC の分析条件を表-1 に示した。逆相系フェニル基結合剤カラムを充填したカラムを用いた。溶離液をメノール：水(70：30)で 9 分間流すことにより、NP と NP1-4EO を分離し 5 つのピークとして測定した。続けて 9～13 分までをメノールとすることにより NPnEO を 1 つのピークとして測定した。本法による NP、NP1-4EO、NPnEO の定量下限値は、水試料が 0.001mg/L、汚泥試料が 0.1mg/kg である。なお、NP、NP1-4EO、NPnEO の標準液は、以下の試薬(東京化成)をメノールに溶解し調整した。

表-1 HPLC分析条件

カラム	Inertsil Ph-3 (4.6×250mm)
溶離液	0～9min MeOH:H ₂ O(70:30) 9～13min MeOH:H ₂ O(100:0) 13～15min MeOH:H ₂ O(70:30)
流速	1.0mL/min
温度	40℃
測定波長	Ex225nm、Em300nm

NP : 4-Nonylphenol (mixture of compounds with branched sidechain), C₉H₁₉C₆H₄OH

NP1-4EO : Polyethylene Glycol Mono-4-nonylphenyl Ether (n≒2), HO(CH₂CH₂O)_nC₆H₄C₉H₁₉

NPnEO : Polyethylene Glycol Mono-4-nonylphenyl Ether (n≒10), HO(CH₂CH₂O)_nC₆H₄C₉H₁₉

② その他の分析項目

BOD、SS、D-TOC、NH₄-N、NO₂-N、NO₃-N の分析は下水試験方法⁶⁾に準じた。

1. 2 活性汚泥処理実験装置を用いた環境ホルモンの実態調査

動物の生体内に取り込まれた場合に、本来、その生体内で営まれている正常なホルモン作用に影響を与えることが疑われている外因性の物質(環境ホルモン)による環境汚染問題が顕在化してきている。これらの物質は、極低濃度で影響を及ぼす恐れがあることから大きな社会問題となっている。建設省は、この問題を緊急の課題として位置づけ、平成 10 年度に河川及び下水道における実態調査⁴⁾に着手した。工場・生活排水等を受け入れ処理した後、環境へ水を戻している下水道における環境ホルモンの実態把握は、これらの物質の環境への負荷削減効果の可能性を探る上においても重要である。

本調査は、我が国の下水処理で最も多く採用されている活性汚泥処理⁵⁾槽における環境ホルモンの挙動把握を目的として実施した。

最初沈殿池(50L)、アレーション槽(100L)、最終沈殿池(50L)から構成される活性汚泥処理実験装置(図-1 から濃縮槽を取り除いた)を用いた。実下水を流入水とした運転を行い、処理が安定した後調査を行った。調査対象項目は、建設省が実施した実態調査の「下水道における調査」で検出率が高かった NP、ビスフェノール A、アジピン酸ジ-2-エチルヘキシル、フタル酸ジ-2-エチルヘキシル、フタル酸ジ-n-ブチル、17β-エストラジオールに NPEO とエストロゲン様活性を加えた 8 項目とした。NPEO は、下水処理過程で好気・嫌気処理を受け NP を生じることが知られている¹⁾物質である。

流入水、初沈流出水、処理水を 2 時間間隔で 24 時間(13 検体)採取し、それぞれ分析試料とした。分析項目は、調査対象項目の 8 項目と実験装置の運転状況を評価するための BOD、SS、D-TOC、NH₄-N、NO₂-N、NO₃-N の 6 項目とした。また、生污泥、余剰污泥を 12 時間間隔で 24 時間(3 検体)採取し、それぞれの試料について調査対象項目からエストロゲン様活性を除いた 7 項目と MLSS の分析を行った。本装置への流入水量は 288L/day で運転しており水理学的な滞留時間は、最初沈殿池、最終沈殿池が約 4 時間、アレーション槽が約 8 時間である。污泥返送率は 25%(72L/day)、生污泥、余剰污泥引き抜き量は、それぞれ 2.4L/day である。また、アレーション空気量は 28.8m³/day であり、G/Q 比は 100 倍である。

各試料の分析は、NPEO とエストロゲン様活性を除く調査対象項目の水試料については建設省の実態調査⁴⁾の方法に従った。また、污泥試料は遠心分離後、アセトン、アセトリル、メタノールの何れかの溶媒を用い超音波抽出した後、水試料と同様の方法によった。水、污泥試料の NPEO は、前述の①の方法により、EO 基が 1~4 の NP1-4EO と EO 基が 5 以上の NPnEO に分けて測定した。水試料のエストロゲン様活性は、英国 Brunel 大学 Sumpter 教授より譲渡を受けた組み換え酵母を用い、酵母付属のマニファル(OESTROGEN(hER) SCREEN PROTOCOL)に概ね準拠した矢古宇ら⁷⁾の方法により測定し、その活性の総量を 17β-エストラジオールに換算した。その他の項目は下水試験方法⁶⁾に従った。

2. 研究結果

2. 1 活性汚泥処理⁵⁾槽における NP、NPEO の挙動

平成 10 年 4 月に活性汚泥処理実験装置の運転を開始し、調査は 10 月に実施した。3 時間間隔で採水した 24 時間コンポジット試料の水質分析結果を表-2、3 に示した。BOD、SS、D-TOC の除去率はそれぞれ 96%、95%、73%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 NO₃-N であり十分硝化が起こっていた。

流入水中の NP、NP1-4EO、NPnEO 濃度は、それぞれ 0.004mg/L、0.019mg/L、0.018mg/L であった。初沈流出水の NP、NP1-4EO、NPnEO 濃度は流入水とほぼ同等の値であり、約 4 時間の沈殿ではほとんど除去されていない。しかし、処理水中の NP、NP1-4EO は定量下限値以下、NPnEO は 0.002mg/L であった。NP は活性汚泥処理により 75%以上が除去されていた。同様に NP1-4EO は 95%以上、NPnEO は 89%

が除去されていた。初沈流出水の NP 濃度は、磯部ら³⁾ が実施したいくつかの処理場での調査結果 (2.04~21.2 $\mu\text{g/L}$) と比較しても同等の値である。処理水の NP 濃度は、0.001mg/L 以下であり磯部ら³⁾ の調査結果 (0.08~1.24 $\mu\text{g/L}$) と同等の値である。

汚泥中の NP 濃度は、生汚泥 1.4mg/kg·wet、余剰汚泥 0.1mg/kg·wet、濃縮汚泥 1.5mg/kg·wet であった。生汚泥、濃縮汚泥は、余剰汚泥に比較し高濃度で検出された。余

剰汚泥の濃度 0.1mg/kg·wet は、磯部ら³⁾ の調査結果 (36.9~81.0 $\mu\text{g/g·dry}$) に比べ低い値であった。NP1-4EO は、生汚泥 3.9mg/kg·wet、余剰汚泥 0.2mg/kg·wet、濃縮汚泥 1.5mg/kg·wet であった。NP 同様、生汚泥、濃縮汚泥から比較的高濃度で検出された。NPnEO は、生汚泥 3.7mg/kg·wet、余剰汚泥 1.8mg/kg·wet、濃縮汚泥 3.4mg/kg·wet であった。NP、NP1-4EO とは若干異なった傾向を示し余剰汚泥からも比較的高い濃度で検出された。

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、NP1-4EO、NPnEO のフラックスを計算しその結果を図-2 に示した。NPnEO は順次分解し NP1-4EO、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

スを計算する段階では mol 濃度に換算して行った。また、定量下限値以下の結果についても値を求め計算に用いた。

NP についてみると、流入フラックスと初沈流出フラックスは同量であるが、処理水フラックスは流入フラックスの 9.8% であった。生汚泥、余剰汚泥フラックスは、流入フラックスの 2.9%、0.16% であった。また、流入フラックスに対する排出フラックス (処理水、濃縮槽越流水、濃縮汚泥) の合計は 13% であった。残りの 87% は活性汚泥処理による分解の可能性はある。NP1-4EO、NPnEO は、流入フラックスの 4.7%、11% が処理水フラックスとして系外へ出ていた。また、汚泥処理を含めた排出フラックスは 5.6%、13% あった。残りの 94.4%、87% は、活性汚泥処理による分解の可能性が考えられる。

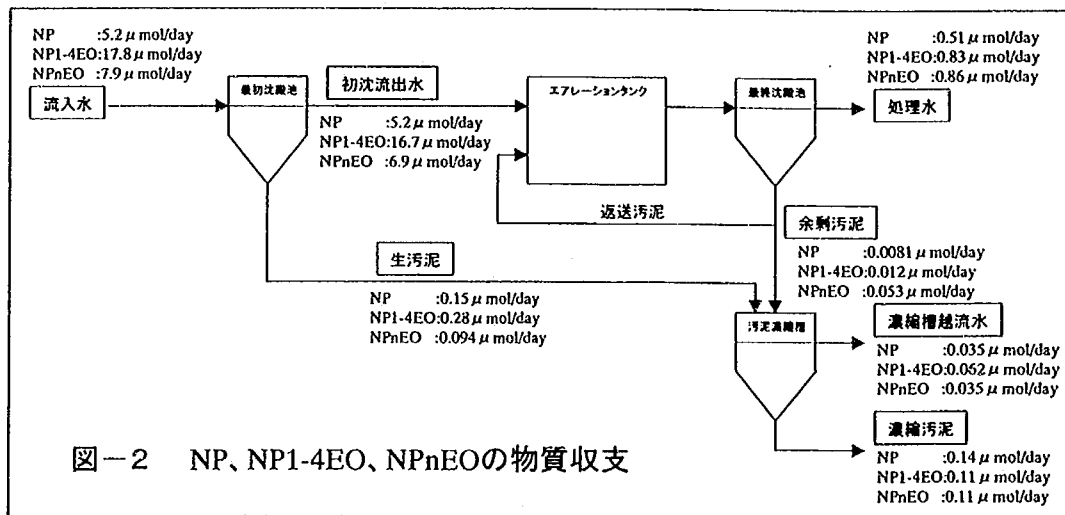
表-2 NP、NP1-4EO、NPnEO 分析結果

	単位	NP	NP1-4EO	NPnEO
流入水	mg/L	0.004	0.019	0.018
初沈流出水	mg/L	0.004	0.018	0.016
処理水	mg/L	<0.001	<0.001	0.002
濃縮槽越流水	mg/L	0.002	0.005	0.006
生汚泥	汚泥 mg/kg·wet	1.4	3.9	3.7
	上澄水 mg/L	0.004	0.010	0.001
余剰汚泥	汚泥 mg/kg·wet	0.1	0.2	1.8
	上澄水 mg/L	<0.001	<0.001	0.003
濃縮汚泥	汚泥 mg/kg·wet	1.5	1.5	3.4
	上澄水 mg/L	0.002	0.005	0.004

表-3 水質分析結果

単位: mg/L

	BOD	SS	D-TOC	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N
流入水	89	73	22	22	0	0
初沈流出水	57	26	22	22	0	0.2
処理水	4	4	6	0	0	14
濃縮槽越流水	58	32	31	26	0	0.2



2. 2 活性汚泥処理実験装置を用いた環境モニタリングの実態調査

平成 10 年 10 月に活性汚泥処理実験装置の運転を開始し、調査は平成 11 年 1 月に実施した。2

時間間隔で 24 時間採取した各試料の水質分析を行い、それぞれの平均値を求め表-4、5 に示した。BOD、SS、D-TOC の除去率はそれぞれ 87%、92%、76%であり、BOD 除去率が若干低い有機

表-4 水質分析結果(平均値)

単位:mg/L

	BOD	SS	D-TOC	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N
流入水	170	130	45	22	0.05	0.10
初沈流出水	110	43	45	22	0.02	0.03
処理水	22	11	11	1.5	0.96	13

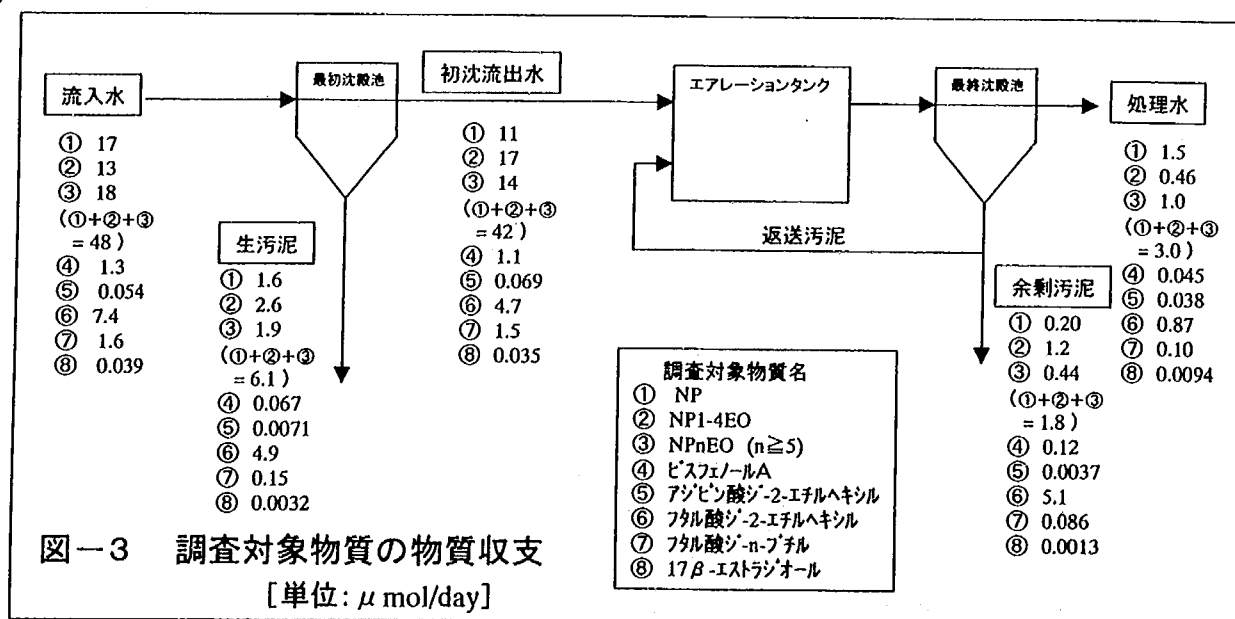
表-5 調査対象物質分析結果(平均値)

単位: μ g/L

	流入水	初沈流出水	処理水	生污泥	余剰汚泥
① NP	13	8.8	1.2	150	18
② NP1-4EO	14	18	0.5	340	160
③ NPnEO (n $\geq$ 5)	42	32	2.4	530	120
①+②+③	69	59	4.1	1000	300
④ ビスフェノールA	1.0	0.89	0.036	6.4	11
⑤ アジピン酸ジ-2-エチルヘキシル	0.07	0.09	0.05	1.1	0.57
⑥ フタル酸ジ-2-エチルヘキシル	10	6.4	1.2	800	830
⑦ フタル酸ジ-n-ブチル	1.5	1.5	0.1	17	10
⑧ 17 β -エストラジオール	0.037	0.033	0.009	0.36	0.15
⑨ エストゲン様活性 (17 β -エストラジオール換算値)	0.038	0.035	0.0066	—	—

物除去はほぼ良好であった。また、処理水中の窒素は、ほとんどが NO₃-N であり十分硝化が起こっていた。生污泥、余剰汚泥の MLSS 濃度は 8340mg/L、4670mg/L であり、エアレーション槽内の MLSS 濃度は 1580mg/L、SRT は 11 日であった。

流入水中の NP、ビスフェノール A、アジピン酸ジ-2-エチルヘキシル、フタル酸ジ-2-エチルヘキシル、フタル酸ジ-n-ブチル、17 β -エストラジオールの濃度は、それぞれ 13 μ g/L、1.0 μ g/L、0.07 μ g/L、10 μ g/L、1.5 μ g/L、0.037 μ g/L であった。これらの濃度は、建設省が実態調査⁴⁾した 10ヶ所の処理場流入水での検出濃度範囲と同一レベルの値である。また、処理水中の濃度についても同様であった。流入水、処理水中の NP1-4EO の濃度は 14 μ g/L、0.5 μ g/L、NPnEO の濃度は 42 μ g/L、2.4 μ g/L、エストゲン様活性の総量を 17 β -エストラジオールに換算した値は 0.038 μ g/L、0.0066 μ g/L であった。



流入水、初沈流出水、処理水、生污泥、余剰汚泥の分析結果を基に活性汚泥プロセスでの各物質(エストゲン様活性を除く)のフラックスを計算しその結果を図-3 に示した。NPnEO は順次分解し NP1-4EO、NP となるが、分解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。流入フラックスと処理水フラックスを比較すると NP、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-ブチルの処理水フラックスは流入フ

ックスの 10%程度あるいはそれ以下、アジピン酸ジ-2-エチルヘキシルは 70%、17β-エストラジオールは 24%であり、水系からの除去率は NP、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-ブチルが約 90%、アジピン酸ジ-2-エチルヘキシルが 30%、17β-エストラジオールが 76%である。これらの除去率は、建設省が実態調査した 10ヶ所の処理場での除去率、NP(76～99%)、ビスフェノール A(84～>99%)、フタル酸ジ-2-エチルヘキシル(82～>99%)、フタル酸ジ-n-ブチル(82～>96%)、アジピン酸ジ-2-エチルヘキシル(97～>99%)、17β-エストラジオール(40～93%)と比べるとアジピン酸ジ-2-エチルヘキシル以外は同レベルである。また、NP1-4EO、NPnEO の処理水フラックスは流入フラックスの 4%、6%であり、水系からの除去率は 96%、94%である。しかし、生汚泥、余剰汚泥として引き抜かれるフラックスも加えた排出フラックス(処理水フラックス+生汚泥フラックス+余剰汚泥フラックス)と流入フラックスを比較すると、ビスフェノール A、フタル酸ジ-n-ブチル、17β-エストラジオールの排出フラックスは流入フラックスの 18%、21%、36%であり、アジピン酸ジ-2-エチルヘキシル、フタル酸ジ-2-エチルヘキシルは 90%、150%であった。また、NP、NP1-4EO、NPnEO の合計をニルフェノール類として評価すると、ニルフェノール類の排出フラックスは流入フラックスの 23%であった。

ビスフェノール A、フタル酸ジ-n-ブチル、17β-エストラジオール、ニルフェノール類は流入負荷量の約 65%あるいはそれ以上が活性汚泥処理により除去されるのに対し、アジピン酸ジ-2-エチルヘキシル、フタル酸ジ-2-エチルヘキシルは、ほとんど除去されないことが示唆された。

3. 主な研究成果物

- ・小森行也、田中宏明、南山瑞彦、竹歳健治「活性汚泥処理における有機塩素化合物(2-クロロフェノール)の硝化阻」第 35 回下水道研究発表会講演集、pp.792-794、下水道協会、1998.7
- ・田中宏明、小森行也、南山瑞彦、豊田忠宏、竹歳健治、石井信之「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 3606 号平成 9 年度下水道関係調査研究年次報告書集、pp.229-234、平成 10 年 10 月
- ・小森行也、田中宏明、竹歳健治「有機物の生物化学的酸化に及ぼす有機塩素化合物(2-クロロフェノール類)の影響」第 33 回日本水環境学会年会講演集、p.381、日本水環境学会、1999.3

【参考文献】

- 1) Ahel M., Giger W. and Koch M. "Behaviour of alkylphenol polyethoxylate surfactants in the aquatic environment- I. Occurrence and transformation in sewage treatment" Water Research, Vol.28, No.5, pp.1131-1142, 1994
- 2) 小島節子、渡辺正敏 「名古屋市内の水環境中のアルキルフェノールポリエーテル(APE)および分解生成物の分布」水環境学会誌、Vol.21、No.5、pp.302-309、1998
- 3) 磯部友彦、佐藤正章、小倉紀雄、高田秀重「GC-MS を用いたニルフェノールの分布と東京周辺の水環境中における分布」水環境学会誌、Vol.22、No.2、pp.118-126、1999
- 4) 建設省河川局・都市局下水道部「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」建設省、平成 11 年 3 月
- 5) Kikuchi M., Tokai A. and Yoshida T. "Determination of Trace levels of linear alkylbenzenesulfonates in the marine environment by high-performance liquid chromatography" Water Research, Vol.20, No.5, pp.643-650, 1986
- 6) 日本下水道協会「下水試験方法・1997 年版」日本下水道協会、平成 9 年 8 月
- 7) 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内分泌攪乱化学物質の測定」第 36 回下水道研究発表会講演集(印刷中)

(田中、小森、岡安、竹歳)

2.7 水道水源河川における汚濁物質モデルに関する研究

研究期間：平7～平10

担 当：水質研究室

【要旨】

「特定水道利水障害の防止のための水道水源水域の水質の保全に関する基本方針」が求めているような、トリハロメタン生成能（以下、「THMFP」）濃度での指定水域の水質予測を行うためには、単に各種発生源での汚濁負荷量の調査のみならず、流達過程や閉鎖性水域での変化量を予測する必要があるが、現在のところこれらは十分に把握されていない。このため、トリハロメタンや全有機ハロゲン化合物といった消毒副生成物の原因となる生成能の水域でのモデル化を行うため、これらの物質の水域での消長の把握を行っている。

平成10年度は、生活排水由来のTHMFPの分解過程や底泥からのTHMFPの溶出等の実験及び利根川での実測値の解析を行った。その結果、THMFP

の分解に水温の与える影響は小さいこと、手賀沼底泥からの溶出量は田からの流出量と同じオーダーであること、利根川の期間平均値ではTHMFPとChl-a、CODとの間に正の相関があることなどがわかった。

1. はじめに

水道水源の水質を守るための法律として、平成6年3月8日に「水道水源水質保全事業の実施の促進に関する法律」と「特定水道利水障害の防止のための水道水源水域の水質の保全に関する特別措置法」が公布された。ここで、都道府県知事は、指定地域において特定利水障害を防止するため指定水域の水質の保全に関し実施すべき施策に関する計画を定めなければならないとしている。この中で水域の水質保全目標としては、トリハロメタン生成能濃度を定め、将来における汚濁負荷量の推移を推計し、これに伴う指定水域の水質を予測するとともに、目標水質達成のための負荷量削減計画を策定することとしている。

THMFP濃度で指定水域の水質予測を行うためには、単に各種発生源での汚濁負荷量の調査のみならず、流達過程での変化量や閉鎖性水域での変化量を把握する必要がある。このため、閉鎖性水域でのプランクトン増殖や河川における付着性の藻類等によるTHMFP濃度の変化を調査し、予測等に役立てることを目的として研究を行っている。

平成7年度は、室内実験により、藻類の対数増殖期及び死滅期におけるTHMFP、P-THMFP、D-THMFP、有機ハロゲン化合物生成能（以下「TOXFP」）、P-TOXFP、D-TOXFP濃度と種々の有機物指標との相関関係について研究を行った。その結果、対数増殖過程のP-THMFP及びP-TOXFPはChl-aと並んで一次反動的に増大する傾向が見られたが、それらの一次反応係数はChl-aの増殖速度係数ほどは大きくなかった。また、D-THMFPは対数増殖期でもあまり変化がなく、死滅期にはやや低下する傾向が見られ、D-TOXFPは対数増殖期に増加し、死滅期には横這いとなる傾向があった。

平成8年度は、試料を希釈してTOC濃度を一律にし、過剰の塩素と長時間反応させて生成したTHMを

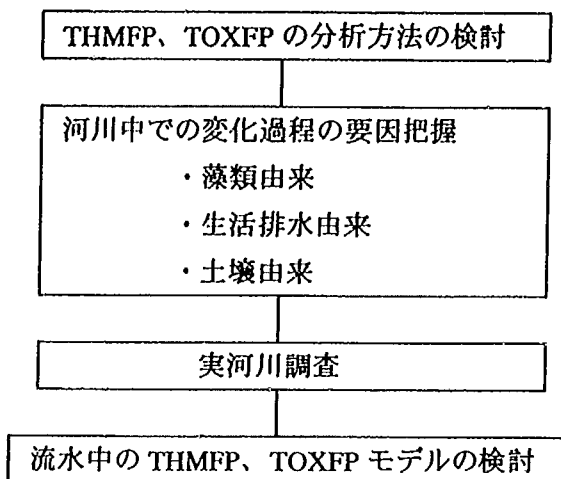


図-1 研究の全体概要

測定した。その結果、試料により 1 日目の値に対するピークの値の比率は試料により異なる結果となった。また、THM の生成量について一次反応式で近似できる場合が多く、その関係から求めた THM の最終生成量と反応係数は緩やかであるが負の相関があった。

平成 9 年度は、土壌由来、生活由来、藻類由来の THMFP、TOXFP の分解過程における変化を把握するために実験を行った。その結果、時間とともに、土壌由来の THMFP、TOXFP は変化せず、生活排水由来の THMFP、TOXFP は横這いもしくは緩やかに減少する傾向が見られた。藻類由来の THMFP、TOXFP はいったん増加してその後減少もしくは横這いであった。

平成 10 年度は、生活排水由来の THMFP、TOXFP の分解に対する水温の影響の把握、底泥からの THMFP、TOXFP 溶出速度の把握、利根川での実測値の解析などを行った。

2. 生活排水由来 THMFP、TOXFP 分解実験

2. 1. 実験方法

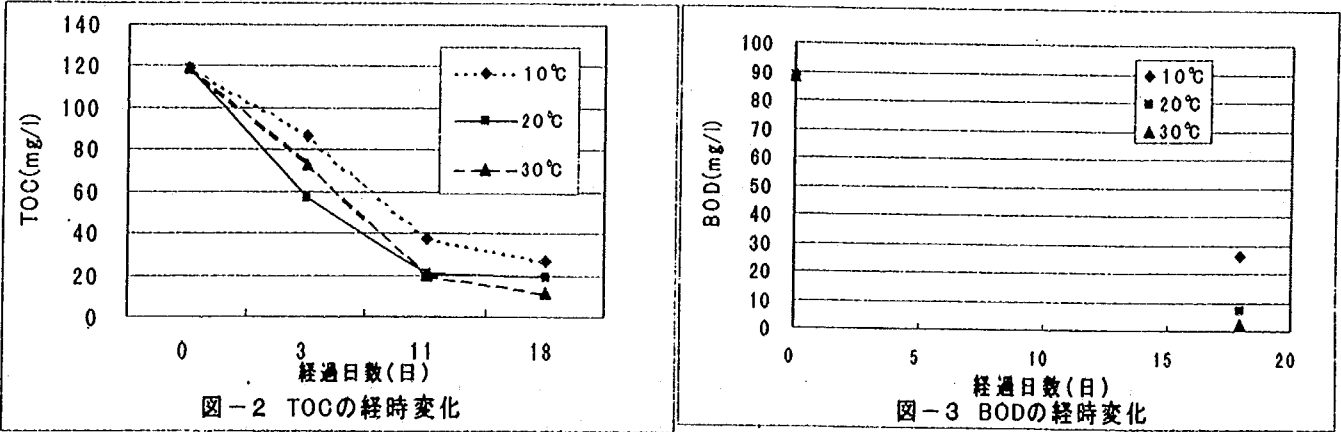
手賀沼流入河川の 1 つで、汚濁負荷が主に生活排水由来である大津川の藤心地区で、晴天時の午前採水を行い実験試料とした。試料は、200l のバケツに入れ、遮光、水中ポンプにより上下に循環させた条件で 10℃、20℃、30℃の恒温槽にそれぞれ静置した。試料の分析方法を表-1 に示す。なお、溶解性試料は孔径 1 μm のガラスファイバーろ紙を用いてろ過を行った後に分析を行い、TOC の分析は前処理として超音波による分解を行った。

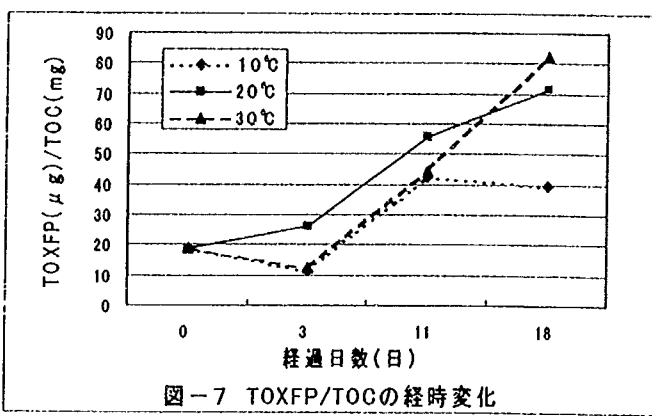
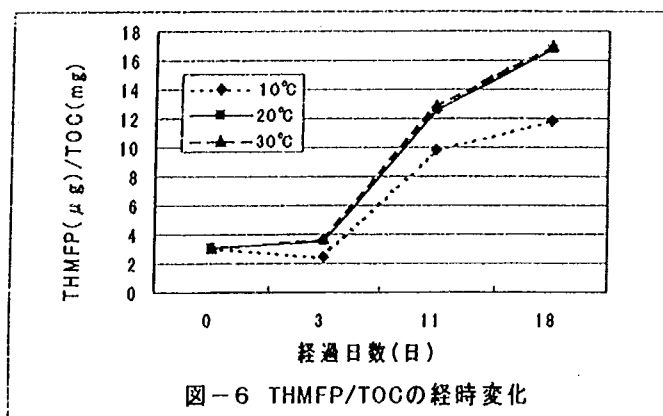
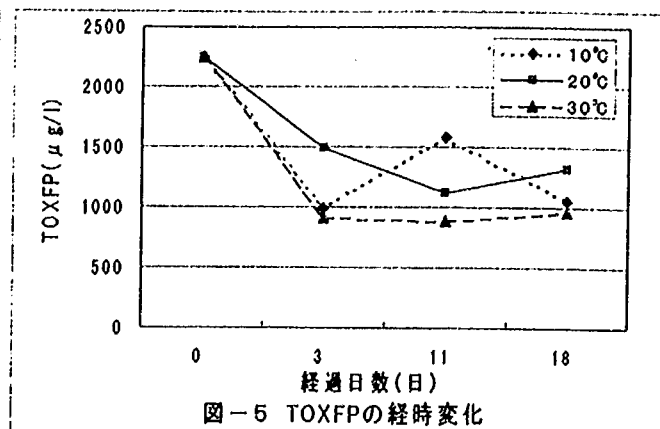
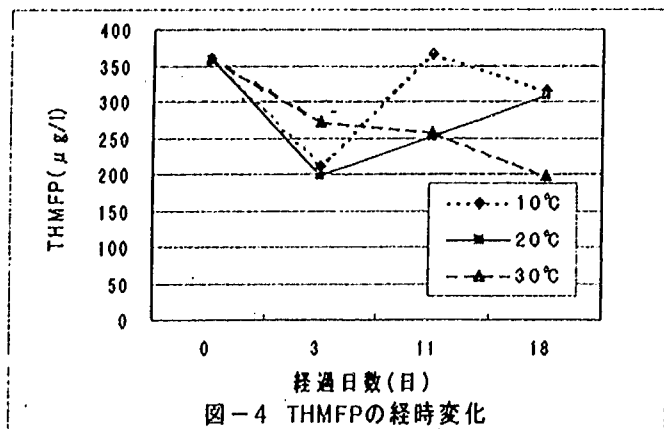
表-1 分析方法

分析項目	分析方法
BOD	河川水質試験方法（案）（1997 年版）
TOC	河川水質試験方法（案）（1997 年版）
THMFP	河川水質試験方法（案）（1997 年版）
TOXFP	上水試験方法（1993 年版）

2. 2. 実験結果及び考察

TOC、BOD、THMFP、TOXFP、THMFP/TOC、TOXFP/TOC の経時変化をそれぞれ図-2、図-3、図-4、図-5、図-6、図-7 に示す。





TOC については時間の経過とともに減少し、18 日目には実験開始時に対して 10 ～ 22 % まで減少した。BOD は 18 日目には実験開始時に対して 2.6 ～ 29 % まで減少した。THMFP は時間の経過に対して一様な減少を示さなかったが、18 日目には実験開始時に対して 55 ～ 87 % まで減少した。TOXFP は時間の経過とともにほぼ一様に減少し、18 日目には実験開始時に対して 43 ～ 59 % まで減少した。THMFP、TOXFP の減少割合が TOC の減少割合に対して小さいため、THMFP/TOC、TOXFP/TOC は時間の経過とともにほぼ一様に増加した。また、THMFP/TOXFP は実験開始時よりも 18 日目には増加していた。

水温の影響は、BOD を指標とした場合、水温が高いほど分解が速やかに進むことが確認されたが、その他の項目では明確に確認できなかった。

この結果から、生活排水由来の THMFP、TOXFP は、TOC などに比較して、生物分解性の低さや中間生成物の影響といった要因などから、TOC などの有機物指標を用いてその挙動を推測することは困難であることが確認された。また、THMFP、TOXFP の分解速度に水温が与える影響は小さいことがわかった。

3. THMFP、TOXFP の溶出実験

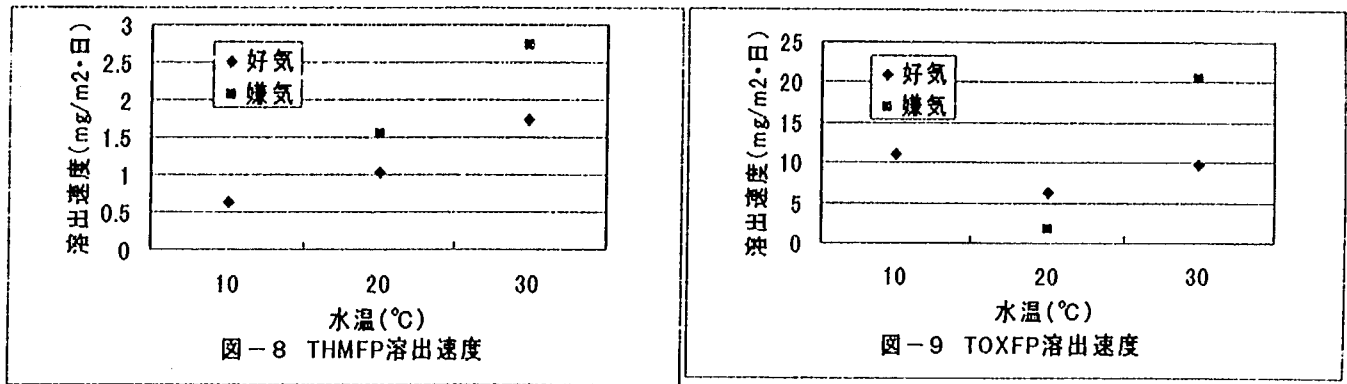
3. 1. 実験方法

手賀沼の左岸側（大堀川流入地点）で、エクマンバージ型採泥器を用いて採泥を行い、木の葉などを取り除いた後シリンダーに約 30cm の厚さまで充填した。次に、孔径 1 μm のガラスファイバーろ紙でろ過した手賀沼水を直上水として注入し、10 °C、20 °C、30 °C の恒温槽に設置した。直上水の条件は、実験開始時に

窒素曝気を行い嫌氣的な条件としたものと、実験期間中適宜曝気を行い酸素が存在する好氣的な条件にしたものの2ケースとし、採水は各シリンダーから全量採水により採取した。また、THMFP、TOXFP は保存性の物質ではないため、孔径1 μ mのガラスファイバーろ紙でろ過した手賀沼水中のTHMFP、TOXFPの濃度変化を別に測定し、この濃度の変化量を減じたものを底泥からの溶出量とした。分析方法は表-1の方法に従った。

3. 2. 実験結果及び考察

THMFP、TOXFPの溶出実験の結果を図-8、図-9に示す。溶出速度は、14日までの溶出量を底泥面積、日数あたりの溶出速度に換算した。



THMFPの溶出速度は、好氣的条件で0.62～1.7kg/km²・日、嫌氣的条件で1.5、2.7kg/km²・日となり、攪拌条件が異なるため単純に比較ができないが、同一の水温では嫌氣的条件の方が大きいという結果が得られた。また、水温が高いほど溶出速度も大きくなる傾向が見られた。TOXFPの溶出速度は、好氣的条件で6.3～11kg/km²・日、嫌氣的条件で1.7、20kg/km²・日となり、溶存酸素、水温の違いによる傾向は見られなかった。

THMFPの溶出速度は、合田等¹⁾による田の生育期の排出量0.3kg/km²・日、代力キ期の排出量3.8kg/km²・日と同オーダーの高い数値であった。

4. 利根川における調査結果

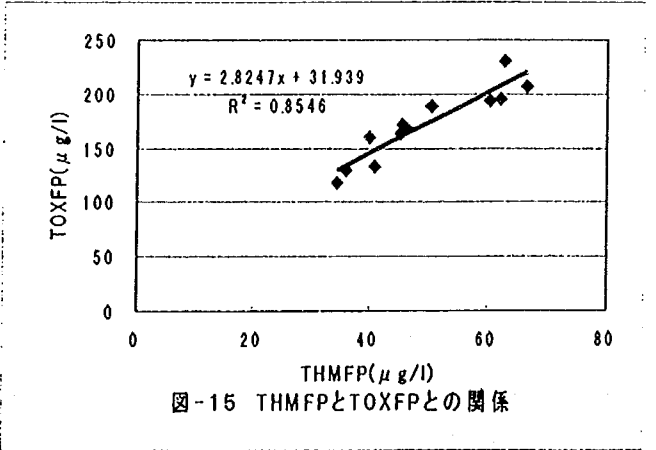
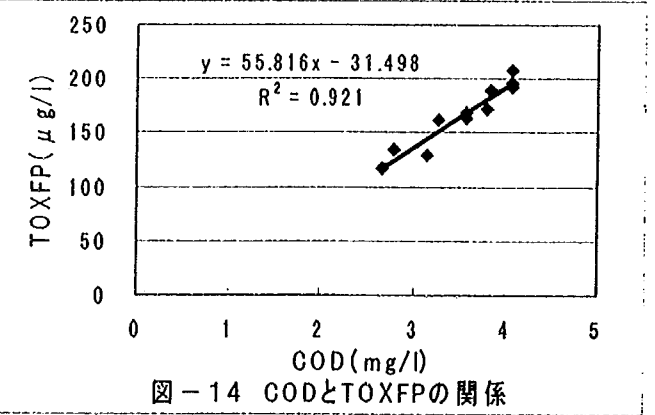
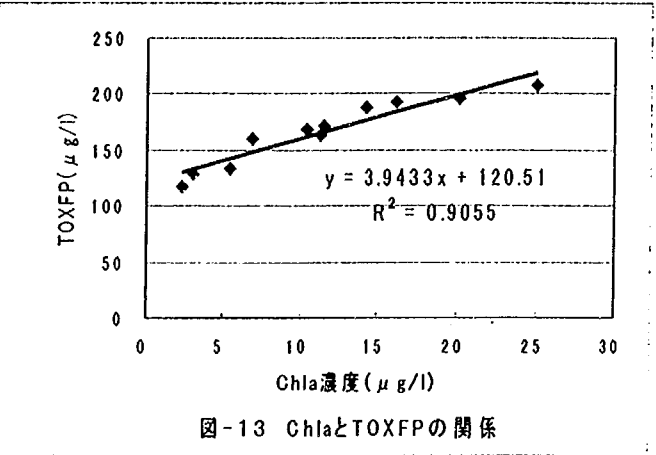
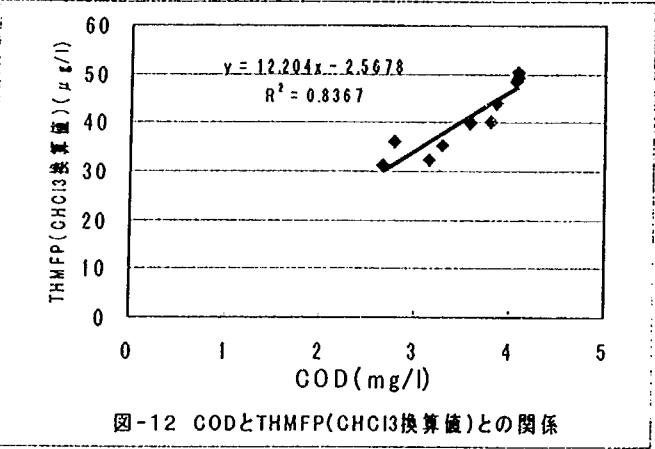
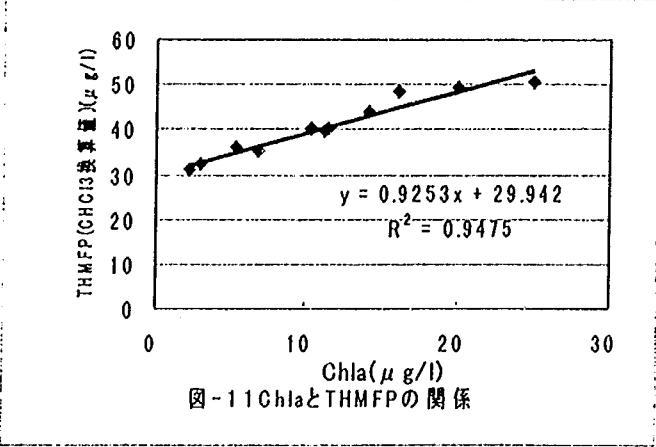
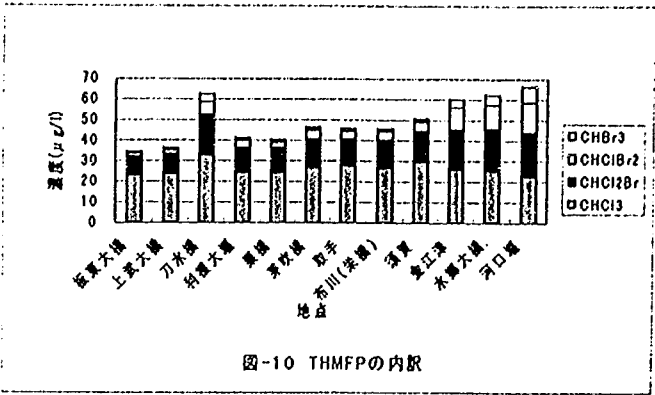
4. 1. 調査方法

水質測定計画に基づく定期水質調査に合わせ、平成8年9月から11年1月までの利根川各地点でTHMFP、TOXFP、Chl-a、CODMnを測定した。THMFP、TOXFPの分析方法は表-1に従い、Chl-a、CODMnは河川水質試験方法(案)に従った。

4. 2. 測定結果及び考察

THMFPの構成成分であるCHBr₃(プロモホルム)、CHClBr₂(ジプロモクロロメタン)、CHCl₂Br(ジクロロプロモメタン)、CHCl₃(クロロホルム)別の生成能濃度の平成8年9月から11年1月までの平均値を、地点毎に図-10に示す。全体としては、支川の流入直下でありその影響を受けていると考えられる刀水橋を除けば、下流になるに従いTHMFPは増加する傾向にある。また、下流の金江津、水郷大橋、河口堰では、ジプロモクロロメタンやジクロロプロモメタンといった臭素イオンの影響を受ける成分の増加が大きかった。

THMFP と Chl-a 及び COD の地点別、期間平均値の関係を図-11、図-12に、TOXFP と Chl-a、COD の関係を図-13、図-14に示す。なお、刀水橋データを除くとともに、THMFP では、臭素の原子量の影響を除くために、ブロモホルム、ジブロモクロロメタン、ジクロロブロモメタンの質量で表現される濃度をクロロホルムの質量で表現される濃度に換算した値を用いた。



この結果から、Chl-a、COD が大きくなれば THMFP (クロロホルム換算値)、TOXFP が増大するという傾向が確認された。図-11からは Chl-a の $1 \mu\text{g}$ の増加に対して、THMFP が $0.9 \mu\text{g}$ 増加するように見えるが、平成7年度の Chl-a と THMFP との関係を把握した結果からは Chl-a の増加だけで THMFP の増加量を説明することは困難であり、他の成分の影響も推測される。Chl-a 以外の要因としては、下流になるにしたがい (Chl-a の増加とともに) フィオフィン a が増加しており、これらの物質の影響も考えられる。

THMFP と TOXFP の地点別、期間平均値の関係を図-15に示す。THMFP の TOXFP に対する割合はほぼ一定であり、約36%であった。なお、Koch ら²⁾によれば、塩素消毒後の処理水の TOX にしめる THM の割合は25%とされており、この値よりは大きい値であった。

5. 平成10年度のまとめ

- ①生活排水由来の THMFP、TOXFP の分解に水温の与える影響は小さかった。
- ②生活排水由来の THMFP、TOXFP は TOC などと挙動が異なることが確認された。
- ③手賀沼底泥からの THMFP の溶出速度は好気条件で $0.6 \sim 1.7\text{kg/km}^2 \cdot \text{日}$ 程度、嫌気条件で $1.5, 2.7\text{kg/km}^2 \cdot \text{日}$ 程度であり、TOXFP の溶出速度は好気条件で $6.3 \sim 11\text{kg/km}^2 \cdot \text{日}$ 程度、嫌気条件で $1.7, 20\text{kg/km}^2 \cdot \text{日}$ 程度であった。
- ④利根川下流部では上流部に比べ、THMFP の測定に際し、ジブロモクロロメタンなどの臭素化合物の増加が見られた。
- ⑤利根川では平成8年9月から11年1月までの期間平均、地点別の THMFP、TOXFP は Chl-a、COD と正の相関があることが確認された。ただ、THMFP 等の増加の要因は Chl-a の増加だけではないと推測される。

6. 過去の成果と課題のまとめ

- ・藻類由来の THMFP 等の挙動の傾向はある程度明らかになったが、増殖段階や藻類種により特性が異なるため、定量的な予測を行うためには、詳細な研究さらに必要である。
- ・土壌由来の THMFP 等は、既に生物分解を受けているためか、経時的には変化が見られなかった。
- ・生活排水由来の THMFP 等の挙動は TOC 等の有機物指標と挙動が異なることが確認され、定量的な予測を行うためには、流下時間や過去の生物分解の履歴等を考慮する必要がある。
- ・河床藻類の単位面積あたりの THMFP 生産量は $5.0 (\text{kg/km}^2 \cdot \text{日})$ と代カキ期の田¹⁾と同程度の高い値となる場合があった。
- ・手賀沼底泥からの THMFP の溶出速度は好気条件で $0.6 \sim 1.7 (\text{kg/km}^2 \cdot \text{日})$ 、嫌気条件で $1.5, 2.7 (\text{kg/km}^2 \cdot \text{日})$ であった。

7. 主な研究成果物

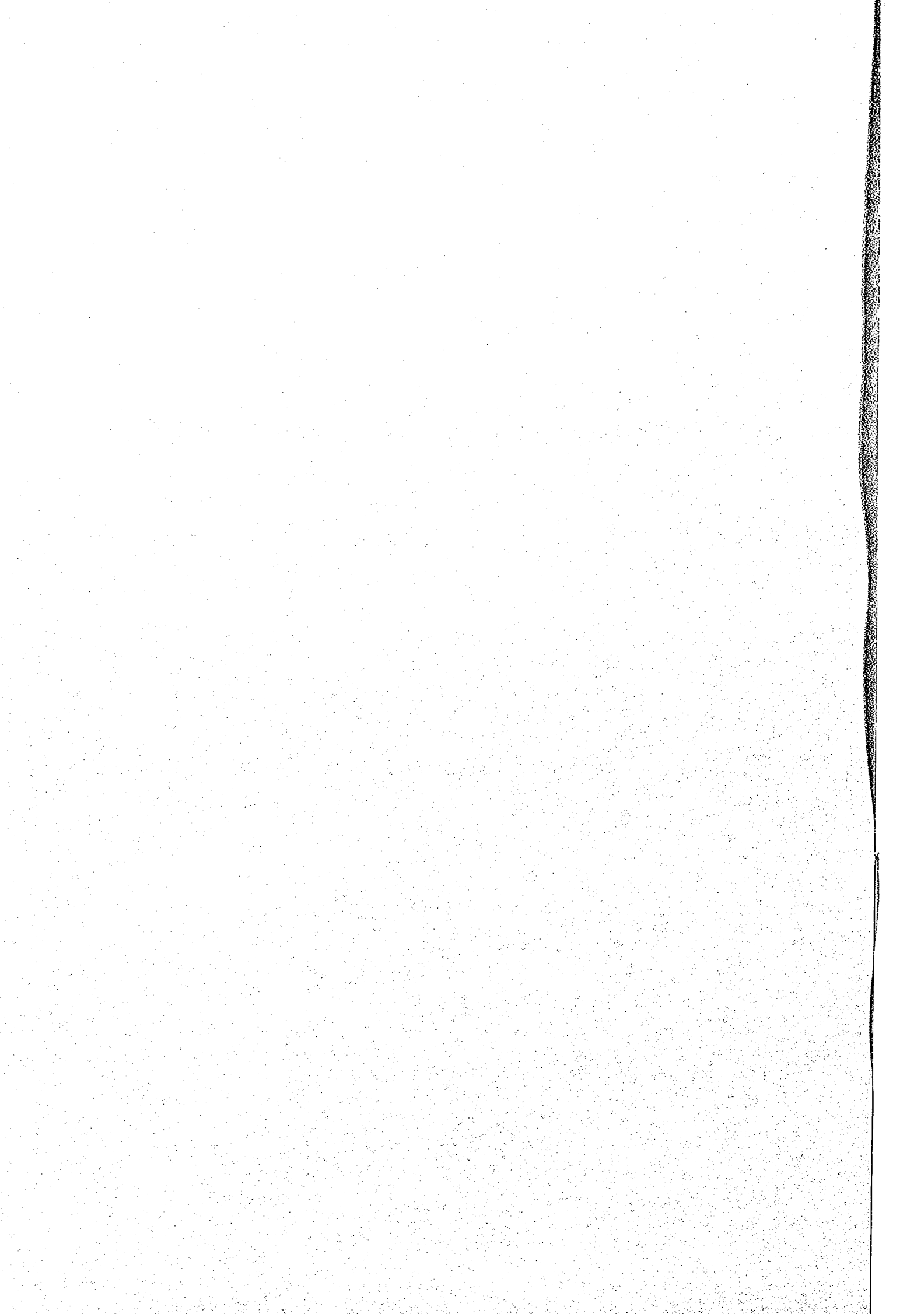
横田敏宏、田中宏明、水道水源保全のための基礎的調査 (II), 第34回下水道研究発表会講演集, pp212-214, 1997.7

参考文献

- 1) 合田健等: 低沸点有機塩素系化合物の生成要因物質の制御に関する研究, 土木学会, 1984
- 2) Koch, B. and Krasner, S.W. (1989) Occurrence of distribution by-products in a distribution system, Proceedings: Annual Conference sponsored by American Water Works Association, Pt.2, 1203-1230

(田中, 白崎, 岡安)

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



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

1. 研究の背景

近年、国民の自然環境に対する関心はとみに高まっており、自然環境の保全、生物とのふれあいに対する欲求が強くなっている。とりわけ、河川、湖沼等の水辺は人が自然とふれあう主要な場の一つであり、これらの自然環境の保全の必要性が高まってきている。建設省では平成 6 年環境政策大綱を発表し、「環境」を建設事業の目的の一つとし、さまざまな公共事業において自然環境の保全に取り組んできた。特に、河川事業においては、平成 9 年度には河川法を改正し、河川事業の目的に「環境の保全」を加え、自然との共生を図りつつ河川管理を目指してきた。このような中で、河川、湖沼の整備、管理における自然との共生について、より確かな技術が必要とされるようになってきている。

2. 研究の目的

河川、湖沼の環境条件の特徴は、流量、流速、水質、河床高等のさまざまな環境要素が地形、地質や気象等の影響を受けて激しく変動することである。自然との共生を図るには、これらを考慮した環境整備が行われなければならない。そこで、本研究では、これらの要素が生息、生育環境条件の形成にどのような影響を与えているかを解明し、生息、生育環境に配慮した河道計画技術を開発する。

また、本研究では、生物の生息、生育に適する環境を調査、実験によって明らかにし、個々の地点において、生物及び生息・生育空間の保全、整備技術、生息・生育空間の質に大きな影響を与える水環境の保全技術等を開発する。

3. 達成目標

- ① 河川の作用による生物の生息・生育空間の形成機構の解明、及び河道計画策定手法の検討
- ② 表面に植生の生育が可能な構造を持った化学繊維やコンクリート平板等の新材料を用いた河岸浸食防止工法の開発
- ③ 構造物と樹木を併用した溪畔林整備手法の開発
- ④ 多様な魚種が容易に遡上できる魚道の設計手法の確立
- ⑤ 河原植物の移植技術の確立
- ⑥ 生物及び水質を保全するための流量制御技術の確立
- ⑦ 人工生態礁を用いた水質改善の技術の高度化

4. 社会的な効果

河川、湖沼において多様な生物が保全されるとともに、水質が向上する。これによって、水辺がより快適なものとなるとともに、人間と自然とのふれあいの機会が増し、人間が精神的やすらぎを感じたり、知的、情緒的欲求を満たしたりすることができる。

－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

3.1 河川のハビタットに関する調査.....	(河川環境研究室) ... 64
3.2 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) ... 66
3.3 水域ネットワークの保全手法に関する研究.....	(河川環境研究室) ... 68
3.4 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.....	(河川環境研究室) ... 70
3.5 新素材・新工法を用いた防御工の開発	
(1) 新素材・新工法を用いた防御工の開発.....	(河川研究室) ... 72 (侵食防止シート、ポーラスコンクリート、連続栈工法、新型ふとんかご、河岸侵食予測手法)
(2) 新素材・新工法を用いた防御工の開発.....	(河川研究室) ... 78 (樹木群による破堤軽減工法)
(3) 新素材・新工法を用いた防御工の開発.....	(緑化生態研究室) ... 80 (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)
(4) 新素材・新工法を用いた防御工の開発.....	(コンクリート研究室) ... 84 (ポーラスコンクリート)
3.6 溪畔林を活用した流路整備に関する調査.....	(砂防研究室) ... 86
3.7 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) ... 90
3.8 浮島による湖沼の自然回復と水質浄化に関する研.....	(河川環境研究室) ... 92
3.9 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) ... 94
3.10 生態系の保全・生息空間の創造技術の開発.....	(河川環境研究室) ... 96

3.1 河川のハビタットに関する調査

研究期間：平9～平12

担 当：河川環境研究室

【要旨】 近年、河川の自然環境保全や復元の試みが全国で行われるようになってきたが、それを支える理論についてはまだ十分に確立しているとは言い難い。ここでは今後の理論的展開や議論の端緒となることを期待しなるべく広く、河川の自然環境を保全・復元する際に重要となる河川生態系に影響を及ぼす人為的要因および河川の自然環境の保全目標についてこれまでの考え方を整理した。

1. 研究結果

河川において自然環境を保全・復元しようとする際、河川の自然環境あるいは生態系をどのように捉えればよいのであろうか。これについては様々な捉え方があるが、河川の生態系に影響を及ぼす人為的要因を明瞭にし、そこから河川の自然環境の保全を考えるアプローチは有効な手段である。

Karr(1980)は、人間が及ぼす河川生態系へのインパクトを①エネルギー供給源、②水質、③ハビタットの質、④流量レジーム、⑤生物相互作用への影響の5つのカテゴリーに分けている。

①は河川の一次生産に対する河畔林から供給される有機物のサイズ、量、タイプ、利用できるエネルギーの季節変化への影響、②は水温、濁度、溶存酸素、栄養塩、有機系あるいは無機系の物質、重金属、有害物質、pH への影響、③は底質、水深と流速、産卵場、生育場、避難場、多様性（瀬、淵、沈木）などハビタットへの影響、④は、平常時の流量や洪水や渇水の頻度など流量レジームへの影響、⑤は競争、捕食、病気、寄生などへの影響をあげている。このカテゴリー分類はミシシッピー川上流域を中心とした北米では広く利用されている。この考え方は人為の影響を軽減しようとする際に、それぞれの影響をどのように軽減すれば良いかというアプローチをとることができるので有効である。しかし、土砂の項目が入っていない点、人の直接的なインパクトが入っていない点等が我国への適用にあたっては付加すべき点である。またハビタットの質は、流量レジーム、流砂、水質、生物及びそれらの相互作用によるので、それらについても考慮すべきである。

そこでここでは河川生態系の構造や機能に関係し、人が影響を及ぼす項目として①エネルギー供給源、②水質、③ハビタットの質、④流量レジーム、⑤流砂、⑥生物の相互作用、⑦人間活動による直接的影響の7つに区分する。⑤の流砂とは上流からの土砂供給量、供給される土砂の粒径分布、ある区間における土砂の粒径別の堆積、移動量などである。Karr のカテゴリーでは無機系物質は水質に含まれているが、流砂に含めた方が適切であろう。⑦は人の河川利用による直接的な生物の個体あるいは生息基盤の破壊のことである。たとえばオフロード車による河原系生物へのダメージなどがあげられる。

たとえば、溪畔林の伐採によって、リターの減少、水温の上昇がおこり、生態系の構造が変化する（中村、1995）。また河川改修による直線化によって、侵食・堆積状況が変わり、ハビタットが単調化すると、魚類相が影響を受ける（島谷、1994）。

また様々な帰化生物が在来生物に影響を与えている。ダムの存在は流砂、流量レジーム、水質などに影響を及ぼす。都市化はほとんどすべての項目に影響を及ぼす。

河川の自然環境の保全のためには、人為的インパクトがどの項目をどの程度変化させているかを明瞭にし、それに対して対策を講じる必要がある。河川の自然環境の変化をダムの影響と単純にしがちであるが、日本のダムは諸外国のダムに比して規模が小さく、流量レジームを大きく変化させるほどのダムは多くないので、本当にどの要因が環境に影響を与えているのかを明確にする必要があると思われる。

ハビタットについては、上記項目が相互に関連するので、もう少し詳しく言及する。

河川の自然環境の保全、復元が行われる場面として最も多く、またその保全の重要性が近年多く指摘されているのが河川のハビタットである（谷田 1998、奥田 1998、桜井 1998）。

ハビタットの質は、空間構造、底質、水質、植生、冠水頻度や洪水による攪乱の程度、人の利用などにより決定されている。空間構造は、河川内及び周辺の微地形に基本的に支配されている。河川微地形は水流、流砂、構造物および植生との相互作用によって形成されている（辻本 1998）。このようにハビタットの質は他の項目と複雑に関係している。たとえば高水敷上の池状の水域（backwater:後背水域）は空間形状のみならず本流との接続頻度が重要であるし、感潮部では塩分濃度の変化や冠水の程度が重要である。したがって河川におけるハビタットの質の保全は単なる物理的空間の保全にとどまらず、ハビタットの質を支配する攪乱などを含めたシステムの保全が必要である。

ハビタットの区分は従来、流程区分に加え、水域は瀬、淵、平瀬および川岸を基本的単位として（可児 1944、谷田 1998）また陸域は植生をベースに横断方向に区分されている（佐々木、1996）。

瀬や淵は河床形態と密接な関係がある。生態学から見た淵はR型、M型、S型の淵などに分類されるが、R型の淵は河川工学上、突起物の周りの洗掘、M型の淵は河川工学上、湾曲に伴う外岸側の深掘れ及び中規模河床波（砂州）の前縁部からの流水の落ち込み部、S型の淵は河床の対浸食力の差異にともなう深掘れなどに対応している。また瀬は中規模河床波の前縁部と対応していることが多い。

河床形態が階段状あるいはシュート状になった上流部では瀬、淵、川幅が広がった堆積部、倒木群および溪畔林などが重要なハビタットである。扇状地部では複数の滞筋、瀬、淵、河原、柳林、後背水域、湧水域などが重要である。近年、全国的に河原の陸化が進み、河原の減少、河原の樹林化が進んでおり（島谷ほか 1998、萱場ほか 1998、）、河原に依存する生物が影響を受けている（倉本 1995）。自然堤防地帯では瀬、淵、砂州、旧河道などの後背水域、後背湿地、柳などの樹林地などが重要なハビタットである。大部分の都市はこの区域に立地しており周辺環境の変化が著しい区域である。氾濫原的環境を代償していたと考えられる水田の構造変化の影響も大きく、氾濫原的環境は著しく減少しており、氾濫原に依存している生物が影響を受けている（片野、鷺谷 1998a）。下流域はアシ原、塩生湿地、干潟などが重要なハビタットである。これらの環境も全国的に近年減少している。

（島谷、萱場、林）

3.2 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】

河岸は水生生物にとって重要なハビタットとなるだけでなく、河川景観にとっても重要な要素である。本研究では、河道の拡幅や削等による河床の単調化が生じやすい中小河川において、堆積作用を用いて自然河岸を形成するための技術開発を目的とする。今年度は中部地方の河川を対象に自然河岸の形成状況に関する現地調査を行い、実態の把握、外力及び場の条件の把握を行った。この結果、自然河岸を形成パターンは4種類、考えられる形成要因は3種類に分類できた。場の条件と外力条件との関連性については次年度以降の課題であるが、形成要因によって関係する場の条件と外力条件の要素が異なることから、今後は要素により条件を絞り込んだ検討が必要となる。

1. 研究方法

東海4県を対象に各県河川課を通じて事例概査を行った。概査では改修した河川で、自然河岸の形成の有無、資料の存在状況等から参考となる河川を選定してもらい写真、横断図、平面図等を収集した。収集した事例は128河川である。次に、この中から30河川を選定し、全体計画書、改修経緯、測量成果、空中写真等の資料収集を行い、更に22河川を精査して以下の項目からなる現地調査を実施した。①平面形状の把握：みお筋、砂州、自然河岸の発達状況を写真及びスケッチで記録する。②横断形状：低水路、自然河岸の幅、高さをレベルで1断面測量する。③河床材料：代表的な地点で代表粒径を計測し、写真の撮影を行う。④ハビタット：瀬、縁等の分布を図面上に記入する。現地調査の結果を元に、自然河岸を含む地形の変化が生じていたケースを抽出し、そのパターンを分類した。また、地形が形成された要因を、既往の研究結果に基づき分析し、自然河岸の形成条件について考察した。

2. 研究結果

2. 1 自然河岸形成パターン

対象河川で見られた自然河岸の形態パターンは次のとおりである。

(1) 不規則に発生

このタイプは河床に土砂が不規則に堆積し、その一部が河岸となっているケースである。構成材料は基本的に河床材料と同じである。三重県の河川に多く見られる。

(2) 規則的に発生

①交互型：河岸が交互に形成されるタイプである。河岸が形成されていない場所は水面が直に護岸等に接している。構成材料は河床材料と同一である。後述するように交互砂州が要因となっている。

②内岸型：河道の湾曲部内岸側に形成されるタイプである。構成材料は比較的細粒分が多い。外岸側が護岸等に接していることが多く、ここに瀬がよく見られる。

③両岸型：両岸に土砂が堆積するタイプである。構成材料には細粒分が多い。根固工等の人工構造物が設置されている場合が多い。

2. 2 要因の分析

①中規模河床形態

(2) ①は中規模河床形態のうちの交互砂州に起因している。交互砂州は川幅－水深比や掃流力等の河道特性量がある一定の範囲にあると発生するが、上流からの土砂供給量が過大な場合には土砂が河道内に一様に堆積する傾向がある。この場合、当然のことながら僅かな微低地に沿ってみお筋が幾つにも分岐し、不規則な形態となり、これが(1)に相当するものと考えられる。いずれにしても、河岸の構成材料は河床材料とほぼ同一となる。

②湾曲に伴い発生する河床形態

(2) ②は湾曲に伴う二次流により内岸側に土砂が堆積することにより形成される。横断方向に河床材料がふるい分けられることが知られており、一般的に相対的に細かい材料が堆積する。

③細粒土砂の沈降

(2) ③では、通常なら堆積しない材料が掃流力の低下により沈降し河岸が形成される。堆積物質は河床材料の平均粒径に比して非常に細かい材料である。藤田らはウオッシュロードの堆積による高水敷の形成過程を詳細に論じているが、本事例では、ウオッシュロードとなる粒径と比べて相対的に大きな細砂や粗砂が堆積している場合も多かった。

以上、主要な要因を整理したが、これらの要因は直接の操作対象となっていない。そこで、これらの一次要因を支配する条件を「場の条件」と「外力条件」に整理する。図-1はこの結果を示す。外力条件としては、供給土砂量の量と質、流量時系列が上げられる。供給土砂量の質とは供給される土砂がどのような粒径集団から構成されるかを意味し、場の掃流力に対してどのような堆積の仕方をするかを支配する要因となる。場の条件としては、縦横断形状と河床材料、構造物、植生を挙げた。構造物は根固工等護岸近傍に設置されるタイプを意味する。これは、これらが洪水時に粗度として働き細粒分をトラップする働きを有する。これらの要素は流水と流砂との相互作用により出水時に地形を形成し、また、平水時には水深の大きさを支配する。自然河岸が形成されるかどうかは、出水時に形成される地形の高低差と水深の大小との関係で決まり、水深が相対的に地形の高さを上回る場合には河岸は水没してしまう。

2. 3 各条件と河岸形成との関係

現地調査を実施した河川を中心に外力条件、場の条件、河岸形成の状態を整理し表-1に示した。ここで、河岸形成タイプは2.1の結果を、土砂量はTAKAHASHIら(1997)が考案した式を用いた。本式から推定される土砂量は流域面積、標高差、実績雨量もしくは流量を含む。両岸型で堆積した(2)-(3)の場合には堆積域の下部に構造物が設置されていたケースが多く、ほんの僅かな微高地がきっかけとなって土砂が堆積するケースが多かった。詳細な検討は次年度以降に行うが、形成パターンにより関係する外力条件と場の条件との組み合わせが異なることから、次年度は各パターン別に現地調査及び分析を行う予定である。(島谷、萱場)

表-1 形成パターンと外力・場の条件

河川					外力の条件					場の条件					
No	河川名	県	河岸形成タイプ		流域面積	流路延長	土砂量	地質	洪水履歴	砂分分類	平面	B/H	粒径(mm)	摩擦速度	構造物
1	天王川	岐阜県		×	7.5	5.5	小	泥・砂岩	小1	2-1	直線	10.29	0.01	128.9	—
2	永原川	岐阜県	(2)-③	●	9.8	14.6	小	礫・砂岩	小1、大1	1	緩湾	4.68	50	708.2	—
3	飛鳥川	岐阜県	(2)-①、③	●	9.5	5.5	大	砂岩、珪石	小2	1	緩湾	8.72	70	1217.3	連続ブロック
4	浅瀬川	静岡県		×	2.4	3.54	大	泥層	—	2-1	直線	2.36	0.1	145.4	—
5	青野川	静岡県	(2)-②	▲ 造成の跡	60	11	中	凝灰岩	小3、中1、大2	1	緩湾	10.87	75	744.1	連続ブロック
6	仁科川	静岡県	(2)-③	●	58.4	14	大	凝灰岩	小2、大1	1	直線	18.81	50	1075.9	人工テラス
7	福生沢川	静岡県	(2)-①、②	▲ 不明瞭	63.3	14	中	凝灰岩	小1、中1	1	湾	12.8	100	1044.1	—
8	瀬井川	静岡県	(2)-③	●	102.4	30	中	玄武岩	小1、中1、大1	1	直線	12.05	50	1283.2	十字ブロック
9	小瀬井川	静岡県		×	20.2	25	大	火山砕屑物	小1、中1、大1	2-1	湾在	8.1	50	439.5	—
10	横田川	愛知県	(2)-②	●	18.2	7.5	小	各岩の互層	小4、中1	2-1	緩湾	12.23	56.5	480.5	—
11	御瀬川	愛知県	(1)	▲ 汚い	21.9	7.5	小	礫岩	小1	1	湾在	9.29	28.1	617.2	—
12	矢田川	愛知県		×	8.3	4.9	小	礫・砂・泥	小4、中1、大2	2-1	直線	7.02	—	474.6	—
13	駿河川	愛知県	(2)-③	●	14.1	5.2	小	礫・砂・泥	小4、中1、大3	2-1	直線	6.32	1.5	263.6	連続ブロック
14	阿久比川	愛知県	(2)-②、③	▲ 不明瞭	30.8	6	小	礫・砂・泥	小4、中1、大4	2-1	緩湾	7.75	9.2	448.4	フトン籠
15	奥前川	愛知県	(1)	▲ 不明瞭	2.2	2	小	礫・砂・泥	小4、中1、大5	2-1	直線	4.07	6.2	337.1	連続ブロック
16	飯野川	愛知県	(2)-①、②	●	15.9	4	中	花崗岩	小1	1	湾	4.57	16.4	1629.8	—
17	朝倉川	愛知県	(2)-①	▲ 造成の跡	12.1	7.5	中	砂層	小7、中1	1	緩湾	13.16	34.8	476.7	連続ブロック
18	飯内川	三重県	(1)	●	38.8	9	大	花崗岩	小9、中3、大2	1	緩湾	22.84	30	1194.9	—
19	戸上川	三重県	(1)	▲ 不明瞭	10.3	10	中	砂層・泥岩	—	2-1	緩湾	13.45	40	442.3	根固工
20	柳川	三重県	(1)	▲ 不明瞭	17	10.5	中	砂層・泥岩	—	2-1	直線	7.05	5	464.8	水制?

1) 8は1/2確率流量時の等流水深

2) 供給土砂量の大中小は1989-1997年の9カ年の平均 (ml/year) が 10^2 オーダー以下を小、 10^3 オーダーを中、 10^4 オーダー以上を大とした。

3) 洪水履歴は小洪水 (1/2-1/5)、中洪水 (1/5-1/10)、大洪水 (1/10以上) とした。

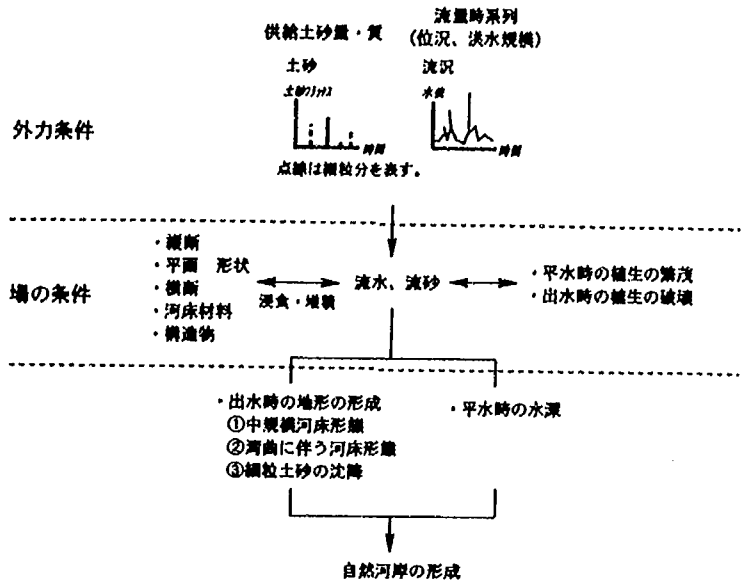


図-1 自然河岸形成の支配要因

3.3 水域ネットワークの保全手法に関する研究

研究期間：平 10～

担 当：河川環境研究室

傳田 正利

【要旨】

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、結果として河川の水域ネットワークを利用し生息する魚類に影響を及ぼしてきた。本研究では、千曲川を対象に、ワンド冠水時にワンドと本川の間に形成される水のつながりを水域ネットワークと考え、水域ネットワークの分断状況を冠水頻度という観点と捉えた。また、ワンドの冠水頻度が生息魚類に与える影響を考察した。その結果、冠水頻度の差がワンドの生息魚類相に影響を与える可能性が示唆された。

1. 研究方法

1. 1 水域ネットワークの形成形態の把握手法

ワンドの冠水頻度の算定には、対象区間の堤外地地形の標高及び本川水位が 0.25m ピッチで記されている千曲川ベースマップを用いた。このベースマップを基に本川の水位が 0.25 m 上昇するごとに冠水する箇所を推定して、水域ネットワーク形成図を作成した。杭瀬下流量観測所の平成 8 年度流量曲線と対象区間に設置した位況曲線から冠水頻度を算定した。なおこの区間においては流量変動に伴う水位変動はいずれの地点も同一と仮定した。

1. 2 魚類の調査手法

魚類採捕は魚種選択性が他の漁法に比べて少ない定置網を用いた。設置位置は、ワンド内の遊泳魚の通過点と思われる水域と水深の浅い水域に 1 張りづつ一昼夜設置し採捕した魚類の魚種、体長及び体重の計測を行った。

2. 研究成果

2. 1 各ワンドの水域ネットワークの形成

表-1 に設定水位と冠水するワンド、図-1 に本川の水位がベースマップより 0.25(m), 0.5(m), 0.75(m), 1.5(m) 上昇した場合の水域ネットワークの形成を示す。ワンドには 2 年に 1 回の短い周期で冠水するワンドと、6 年間の長い周期で冠水するワンドに分けられる。短い周期で冠水するワンドは低水路の拡大と高水敷上の低地を本川水が流下する出水時流路により冠水し、長い周期で冠水するワンドは高水敷上に広がった出水時流路により冠水する。ワンドの冠水を考える場合、この出水時流路を考慮することが重要になる。

表-1 設定水位と冠水するワンド

$\Delta h(m)$	算定流量(m^3/s)	冠水頻度(冠水回数/年)	冠水するワンド
0.25	120	10	③ ⑪
0.50	216	5	⑤ ⑥ ⑩
0.75	340	1/2	② ④ ⑦ ⑧ ⑨
1.00	492	1/3	
1.25	673	1/4	
1.50	882	1/6	①
2.00	1384	1/10	

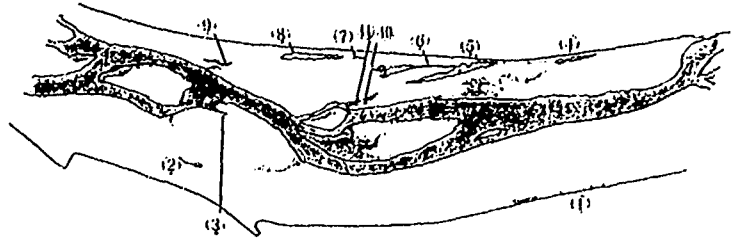
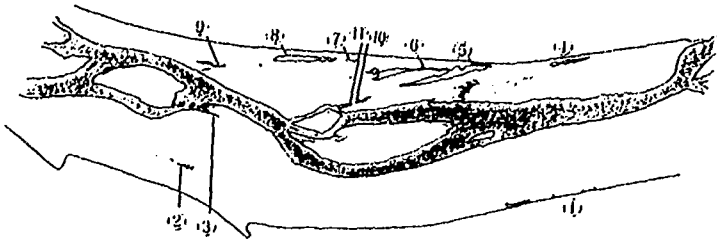
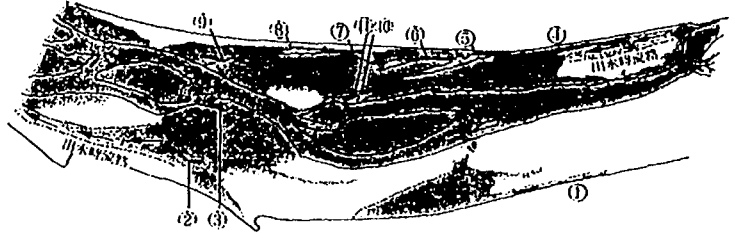
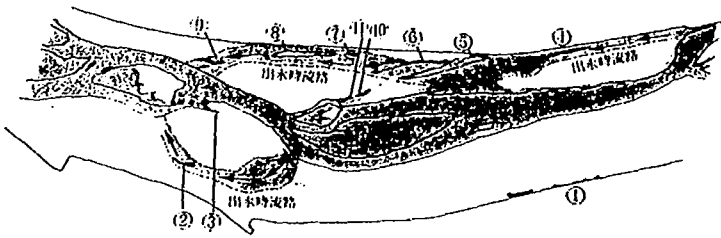
$\Delta h = 0.25 \text{ (m)}$ $\Delta h = 0.5 \text{ (m)}$  $\Delta h = 0.75 \text{ (m)}$ $\Delta h = 1.5 \text{ (m)}$ 

図-1 水域ネットワークの形成

2. 2 水域ネットワークの形成形態と魚類調査結果の関係

ワンド群での魚類調査結果と冠水頻度の関係を表-2に示す。水域ネットワークの形成形態との関係をみると冠水頻度の高いワンド②～ワンド⑩の魚類相とワンド①の魚類相は大きく異なる。冠水頻度の高いワンドでは、魚類相はコイ科の魚類で占められ、特にアブラハヤ、ギンブナ、オイカワが多い。冠水頻度が6年に1回のワンド①になると他のワンドとは著しく魚類相が異なり、ワンド①においてはドジョウ、トウヨシノボリなどの他のワンドとは異なる魚種が90%を占めた。冠水頻度が低く水域ネットワークが長期間分断されるワンドは魚類相が変化する可能性が示唆された。

冠水頻度			6年に1回	2年に1回					1年に5回			1年に10回		魚種別合計
目	科		ワンド1	ワンド2	ワンド4	ワンド7	ワンド8	ワンド9	ワンド5	ワンド6	ワンド10	ワンド3	ワンド11	
サケ	サケ	ヤマメ			2	1								3
	アユ	アユ										4		4
コイ	コイ	アブラハヤ		4	10	22	165	8	32	54	30	42	28	395
		ギンブナ		5	54	8	34		24	5	32	10	3	175
		オイカワ		8	70	1	40		14	26			1	160
		ウグイ		1	16	1	22		34	1		5	13	93
		モツゴ	1	28	9		8	2	7	13		6	2	83
		タモロコ		2	4		4	2	8	10	1			31
		ニゴイ		2						2				4
		タイリクバラタナゴ										1		1
	ドジョウ	ドジョウ	3	1	15							2		21
		シマドジョウ				1								1
スズキ	ハゼ	トウヨシノボリ	11					1			1			13
ナマズ	ナマズ	アカザ		2										2
ワンド別合計			15	53	180	34	273	13	119	111	71	86	51	

3. 主な研究成果物

・傳田正利、萱場祐一、島谷幸宏：千曲川におけるワンドの冠水状況の捉え方と魚類調査結果について、応用生態工学研究会第2回研究発表会講演集，pp37-pp40 ・傳田正利：千曲川におけるワンドの冠水状況の捉え方と魚類調査結果について、第37回土木研究所研究発表会論文集，pp1-pp4

(島谷，萱場，皆川，傳田)

3.4 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

研究期間：平10～

担 当：河川環境研究室

【要旨】

本調査は、自然共生研究センターを実験フィールドとして活用し、先端技術を用いた生物調査方法、河川工事完成後に魚類等の生物が生息していく過程、植物が定着・生育する過程、その過程における粗度の変化、自浄能力の変化、さらにそれらの結果と河川の空間構造や流量変動との関係を把握して河川の自然環境の保全手法を確立しようとするものである。

10年度はセンターの実験施設が研究目的の達成に十分な機能を有していることを確認するための予備的な調査として、自浄能力調査、生物調査、水位流量調査、微地形測量等幅広い領域の調査を行った。その結果、実験施設が相当な自浄能力を持つことが確認できた他、付着藻類の増殖状況、魚類・底生生物等の移入状況などについて基礎的な情報が得られた。

1. 研究方法

1.1 自浄能力調査

平成10年11月～平成11年3月の間に、岐阜県羽島郡川島町の木曾川河川敷内に建設省が設置した、「自然共生研究センター」の全長800mの3本の実験河川において、3回の人工洪水時及び13回の平常時水質調査を行った。調査水質項目を表-1に、調査地点を図-1に示す。実験河川上流と下流の主要地点では全項目を、また中流の補助地点では透視度以下の7項目のみを調査した。採水は全て昼間に行った。

なお3本の実験河川（A,B,C）の内、Aが直線的な形状で一部に護岸を施してあり、BとCが曲線的で多様な環境をもつ5つのゾーンから構成されており、BとCは同じ形状である。

表-1 調査水質項目

透視度、濁度、SS、導電率、pH、DO、ろ紙吸光法
BOD、溶解性BOD、粒子性BOD、クロロフィルa、フェオフィチンa
総窒素、溶解性総窒素、各態窒素(NH4-N、NO2-N、NO3-N、Org-N)
総リン、溶解性総リン、粒度分布

1.2 その他の調査

付着藻類、底生生物、魚類、鳥類、植生等の生物調査を行うとともに、人工洪水時の水位・流速等の分単位の計測、浮遊砂・掃流砂の調査、洪水前後の河床断面測量等を中部技術事務所と共同で実施したが、ここでは割愛する。

2. 研究結果

2.1 通水開始初期の自浄能力変化

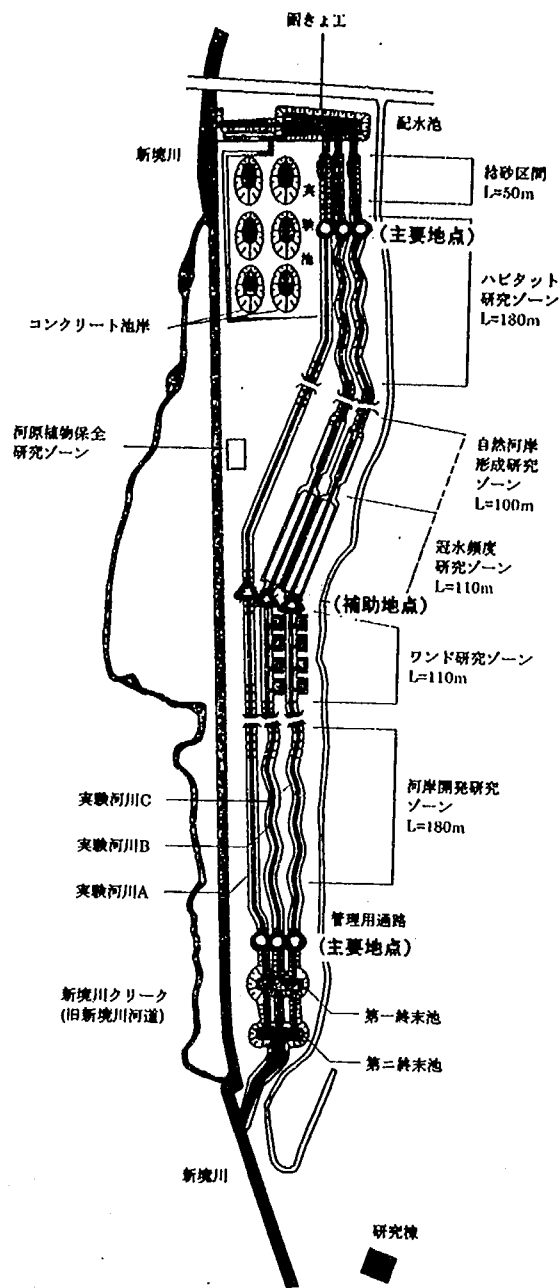


図-1 実験施設平面図、調査地点図
(○：主要地点、△：補助地点)

実験河川Cにおける通水開始初期の自浄能力の経日変化の一例を表-2に示す。ここで、SSを例に取るとΔの意味は、

$$\Delta SS \text{ (mg/l)} = \text{上流地点のSS} - \text{下流地点のSS}$$

$$\Delta SS \text{ (\%)} = 100 \times (\text{上流地点のSS} - \text{下流地点のSS}) / \text{上流地点のSS} \quad \text{であり、}$$

この値が正の場合は自浄作用が、負の場合は自濁作用が生じていることを示す。なお、洪水時には自浄作用はほとんどなく、掃流力による巻き上げ・剥離が生ずるが、増水時の水質変化が大きいため採水タイミングのわずかなズレにより異常値が生じやすい。

SSの場合、通水開始の翌日から洪水後に至る15日間、洪水時を除いて40%前後の比較的安定した自浄作用を示している。またBODも数値は10%程度と小さいものの、SSと似た傾向を示している。これらの減少は、実験河川を流下する間に、懸濁物質が沈降除去されていることによるものと考えられる。ここでBODの浄化率がSSよりかなり低いのは、実験河川の水質において、粒子性BODの占める割合が総BODの1/3程度に過ぎないためであろう。

一方、DOは通水翌日にはほとんど増減無しであるが、3日後以降は明らかに下流側のDO増加が認められる（DOに関して、これを自濁作用と呼ぶのは適当でない）。これは、河床に付着藻類が増殖し、光合成を開始したことにより、酸素が供給されているものと考えられる。このことに関連して、クロフィルaに注目すると、通水翌日には自浄作用を示していたものが、1週間後で明らかに自濁作用が生じ、2週間後にはさらに甚だしくなった。これは、河床に増殖した付着藻類が剥離し始めたものと考えられる。そして、人工洪水によって一気に剥離し、洪水翌日には通水開始1週間後に近い状態に戻った。

実験河川A、Bについても、かなりのバラツキはあるものの、上記と同様の傾向が認められた。

表-2 通水開始から人工洪水翌日までの自浄能力変化（実験河川C、平成10年11月25日～12月9日）

項 目	単位	通水開始 の 翌 日	3 日後	1 週間後	2 週間後 (洪水前日)	人工洪水 (増水時)	人工洪水 (ピーク時)	人工洪水 (減水時)	洪水翌日
Δ SS	mg/l	3.0	1.5	4.0	4.7	75	-373	-99	2.5
	%	44	32	57	45	82	-944	-635	36
Δ BOD	mg/l	0.21	-0.08	0.29	0.8	3.51	-3.76	-1.87	0.59
	%	9	-2	8	15	40	-63	-39	19
Δ DO	mg/l	-0.34	-2.09	-4.27	-3.46	データ無	データ無	データ無	-3.69
	%	-4	-24	-54	-41	〃	〃	〃	-47
Δ クロフィルa	μg/l	0.6	0.0	-1.5	-6.7	34	-39	-1.3	-0.9
	%	43	0	-65	-126	74	-1520	-25	-41

2.2 洪水後の自浄能力回復過程

平成11年2月下旬から3月中旬にかけて、約3週間にわたり、人工洪水後の自浄能力回復状況を調査した。実験河川Cでは、SSとBODはそれぞれ約30%及び約10%の、通水開始初期とほぼ同程度の比較的安定した自浄作用を示した。一方、DOとクロフィルaについては、経時的な変化傾向は通水開始初期と類似しているものの、その程度は一層顕著であり、DO供給が最大170%、クロフィルaの自濁作用が最大300%に達した。これは、通水開始初期の2週間では、付着藻類の増殖が不十分であったのに対し、この場合は通水が約3ヶ月継続されて、飽和状態に達していたためと考えられる。

2.3 まとめ

DO供給とクロフィルaの自濁作用が河床の付着藻類の増減により大きな経日変動を示したのに対し、SSとBODの自浄作用は比較的安定していた。また、通水開始初期及び洪水後の回復過程のいずれの調査においても、河川形状の差による自浄能力の差異は明確でなかった。これは、調査時期が冬季であったため、付着藻類を除いて水生植物が繁茂しなかったことが一因と考えられる。

(島谷、菌田、萱場、皆川)

3.5 (1) 新素材・新工法を用いた防御工の開発

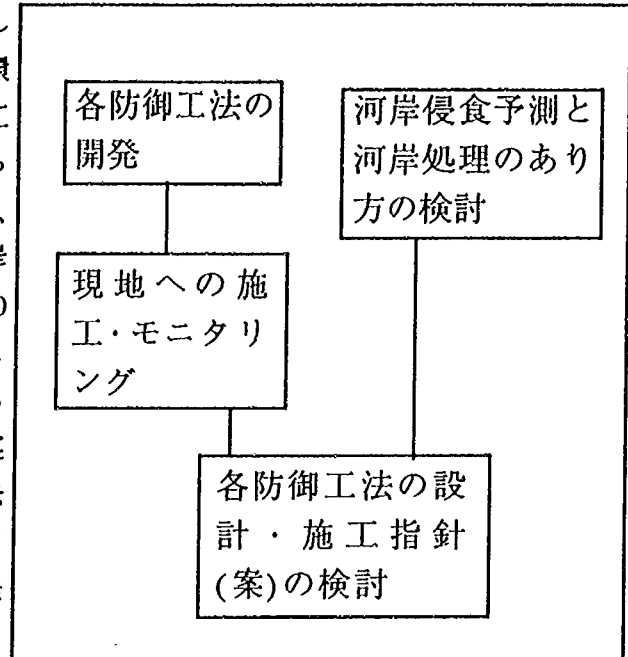
(侵食防止シート、ポーラスコンクリート、連続栈工法、新型ふとんかご、河岸侵食予測手法)

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として、従来と変わらない治水安全性はもちろんのこと、河川環境保全の機能、低コスト化が顕在化している。また、防御工設置の必要性についても明確な説明が求められるようになっている。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。10年度では、防御工の開発については実用化の目途をつけること(具体的には実用化上の問題点を整理し、その対策を明らかにすること)、河岸侵食については低水路法線形移動の実態を把握することを目的とした。その結果として、1)開発対象とした4種類の防御工ごとに実用化のためのキーポイントをまとめるとともに、2)約30年間に渡る河岸侵食量の経時変化データを収集・分析して実態を把握した。



本研究は、5つの小テーマに分割して研究が進められている。そこで第1章では小テーマごとに研究結果の概要をまとめて示し、第2章において全テーマに共通した成果である草丈の高い草本植物群落(例えばヨシ、オギ群落)の粗度の予測手法に関する成果の概要を示すこととする。

1. 研究結果の概要

1.1 侵食防止シート

1.1.1 研究方法

大きく分けて次の3種類、すなわち 1)実河川への小規模施工、2)実大規模の施工・植栽実験、3)水路を用いた耐侵食性の測定実験を実施した。これらによって、a)河川環境に関心を持つ市民グループからの改善意見の聴取、b)施工法の第一次案をまとめること、c)シート自体の侵食耐力、耐久性の実用的観点からの要求性能を明らかにすることなどができた。これらによって、侵食防止シートの実用化に際する問題点を明らかにするとともに、その対策を検討することができた。

1.1.2 研究結果

1)実河川への小規模施工

市民グループから得られた意見のうち、特筆すべきものとして以下の3つが挙げられる。

- シート自体が劣化してぼろぼろになり、水辺の動物に摂取されてしまうなどの悪影響への懸念
- なぜシート工法なのか？他の防御工法(水制や聖牛など)ではダメなのか？
- 環境ホルモンと疑われる物質含有の有無とそれがもたらす影響

これらについて、施工に先立ち事前に説明すること(アカウンタビリティーにも関連する)、様々な資料を用

意することが重要なことが分かった。これらについて試案を検討した。

2) 実大規模の施工・植栽実験

施工方法については、シート内への土砂充填法について重点を置いて実験を行った。種子吹き付け工法を応用した充填工法では、土砂の含水率が高すぎ、施工効率がきわめて悪いことが分かった。コンクリートポンプを応用した充填工法は、輸送効率がまだ悪いものの、トラブルが少なく実地的であることが分かった。植栽実験では、シート内にしっかり土砂が充填してあれば、いずれの侵食防止シートでもクサが良く繁茂できることが確かめられた。

3) 水路を用いた耐侵食性の測定実験

シートの透過性と流速低減効率に関する2つの水理パラメータを測定する実験を行った。その結果、今回作成した侵食防止シートのプロトタイプは、ほとんど全て実用的な侵食防止が行えるのに必要十分な低透過性であることが確かめられた。

4) まとめ

以上の結果を整理し、11年度でのプロトタイプの改善点についてまとめた。

1.2 ポーラスコンクリート

1.2.1 研究方法

ポーラスコンクリートの河川護岸への適用に当たっての課題として、1)植生が繁茂したポーラスコンクリートの流水中における力学的安定性、2)洪水時の流砂・小礫による摩耗に対する耐久性、3)洪水時の転石による衝撃に対する耐久性の3点を抽出し、それぞれについて水理模型実験等により検討した。それぞれの実験方法は以下のとおりである。

課題1): 9年度の植生実験で植生を繁茂させたポーラスコンクリート供試体を高流速水路に設置して通水し、植生や覆土材の剥離および滑動に対する安定性実験を行った。供試体に繁茂させた植物は、チガヤ、クサヨシ、バヒヤグラスの3種である。

課題2): 小礫によってコンクリート表面が摩耗する実験として、左右に振動するふるい分け試験器上にポーラスコンクリートと小礫を敷いて接触させ、摩耗量を測定する実験を行った。

課題3): 厚さ10cmと20cmの2種類のポーラスコンクリート供試体を地盤上に設置し、重量が約50kgfの礫を1～3mの高さから落下させる実験により、運動量と供試体の破損状況の関係を調べた。

1.2.2 研究結果

(1) 流水中の安定性

まず供試体が移動しないように固定した状態で通水実験を行い、流水中での植生の安定性について検討した。この通水実験では、通水実験に用いた供試体が植生を繁茂させてから2年目のものであり、繁茂した植物の根がポーラスコンクリート内にまで十分貫入していたこと、覆土が厚層基材であり粘着性が高かったことから、流水による植生の倒伏や覆土の一部に剥離が生じたものの覆土が大量に流失したり、植生が流失したりすることではなく、合計12時間、最高流速4.8m/sの通水でも植生は維持された。このことから、ポーラスコンクリート上に植生が繁茂し、その根がポーラスコンクリート内に十分貫入した状態では、流水の力だけでは容易に植物が流失することはないと判断された。さらに、植生が繁茂したポーラスコンクリートの流水中での滑動に対する安定性を検討するため、一辺50cm、厚さ10cmでバヒヤグラスを密に繁茂させた供試体を用いて通水実験を行った。その結果、流速4.7m/sで供試体の滑動が確認された。

(2) 耐摩耗特性

ポーラスコンクリートと普通コンクリートの摩耗量の相対比較を行った。実験開始から1時間程度までは、粗骨材より磨耗しやすいモルタル部分が多く摩耗したため、1時間後に比較して摩耗量が比較的に少なかった。この

傾向はポーラスコンクリートに特に顕著に見られた。それ以降は粗骨材の摩耗に移行することにより単位時間あたりの摩耗量が両コンクリートともほぼ同一の値となった。普通コンクリートよりもポーラスコンクリートの方が摩耗量が若干大きい、磨耗量自体が小さく、いまのところ実用上問題ないと考えている。

(3)耐衝撃特性

落下開始時には衝撃によって剥離した骨材が飛散する現象が見られた。また、厚さ10cmでは高さ50～70cmで、20cmでは高さ3mで破断面が発生し完全に破壊された。破断面の観察によると、骨材とモルタルの剥離ではなく骨材自体が割れていることが確かめられた。したがって、耐衝撃性は骨材の強度に負うところが大きいことが推察できる。

1.3 川底栈工法

1.3.1 研究方法

9年度までに系統立てて実施した実験の結果をとりまとめ、実用上の課題であった「流下方向に周期的に形成される深掘れ」の原因と対策について検討した。

1.3.2 研究結果

栈による河岸沿いの洗掘埋め戻し効果が卓越する栈配置(栈間隔=栈長さの1.5～2倍程度)での実験から、上記課題の原因が以下のものであることが判明した。すなわち1)栈配置範囲の上流端では栈周辺が大きく局所洗掘され、2)この洗掘により大きく露出した栈によって強いらせん流が発生し、3)その下流で過剰に堆積が進むことによって栈が埋め戻され、4)栈によって形成されるらせん流が弱まるとともに流速も増加し、5)その結果としてそのさらに下流で再び局所洗掘が進む、そしてまた2)～5)を繰り返す。このように連続栈を配置した河床変動が不安定になる傾向が見られた。そのきっかけとなる局所洗掘を置換工によって防止する実験結果をみると、「流下方向に周期的に形成される深掘れ」が発生しなくなることが確かめられた。以上より、栈工法を実用化するにあたっては、置換工など何らかの局所洗掘防止工の併用の必要性が高いと考えられる。その場合の新たな課題として、置換工併用による工事費の上昇を最小限にする置換材料とその設置範囲面積の最小化が挙げられる。

1.4 新型ふとんかご

1.4.1 研究方法

耐越水型堤防の法尻保護工にふとんかごを用いて、越流水による法尻付近の洗掘規模を小さくし堤防被災を防ぐ構造について水理模型実験により検討した。今回は特に、堤内地条件により法尻付近に大きな洗掘が生じる場合を対象として、法尻保護工の強化対策としてのふとんかご2段積み工法の有効性を検討した。

また、小礫を中詰め材に使う新型ふとんかごの開発として、鉄線を格子状に溶接した剛性の高いかごのプロトタイプを作成し、中詰め材の移動抑制効果に関する水理模型実験を行った。

1.4.2 研究結果

1)耐越水堤防法尻工：比較ケースとして水路下流端より高い位置にふとんかごを1段で設置した場合には、越流水深20cmでふとんかご直下流の局所洗掘がふとんかご基礎部にまで達し、ふとんかごの変形が生じた。これに対し、上段のふとんかごを比較ケースと同じ位置に設置してさらにその下に階段状にふとんかごを設置して2段積みとした実験では、越流水深を40cmまで増加させたケースにおいてもふとんかご直下流の局所洗掘が下段のふとんかご基礎部まで達することはなく、安定していることが確認された。

2)溶接金網を用いた新型ふとんかご：プロトタイプ試作の段階では上蓋の剛性が高いために、中詰め石の上面処理(平坦化)に注意しなければ上蓋の側板への接合に苦勞することが分かった。通水実験では通水後の変形形状の測定に止まっており、今後さらに実用化へ向けた実験を継続する必要がある。

1.5 河岸侵食予測手法

1.5.1 研究方法

小貝川 49.2km 地点の湾曲部外岸の河岸侵食について、1) 過去の定期横断測量および空中写真からの河岸法線測量、2) 河岸土質の調査を実施した。

1.5.2 研究結果

過去 30 年の測量結果から、出水規模による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、最大の侵食が生じた範囲は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た。また、土質調査より、河岸侵食を受けている左岸の構成材料は大きく分けて 2 種類 (砂質の灰色層とシルト質の褐色層) であり、平水位より標高が高い場所に褐色層、低い場所に灰色層が分布することが分かった。現地河岸形状の観察および出水直後の河岸崩落状況から、侵食過程は灰色層が流水による側方侵食を受け、その後褐色層が崩落すると予測された。対岸側では、低水路幅をある一定値に保つように、固定砂州の形成と砂州上への細粒分 (シルト~細砂) の堆積が生じていた。細粒分が堆積した場所は小高い丘のような地形になっており、植生がスキマなく繁茂している。長期間に渡る低水路法線形の変化予測では、外岸側の侵食と共に内岸側の堆積 (植生が繁茂した立地への) についても予測しなければならないことがわかった。

2. ヨシ群落の繁茂した大型水路を用いた現地スケール実験による抵抗則の検討

ヨシ・オギのような柔軟性に富んだ長い茎を有する草本

表-1 通水条件とヨシの諸元

植物群落の水理特性を把握するために、屋外大型水路にヨシ群落を繁茂させて実スケールでの水理実験を行った。さらに、山田ほか¹⁾が提案した乱流モデルを一部修正して抵抗則を求め、その有効性に関して検討を行った。

2.1 実験概要

実験には、最大流量 4.5m³/s が通水可能な幅 4m、高さ 2.5m、長さ 80m の水路を用いた。水路床にシルト~細砂を主成分とする山砂を厚さ約 50cm、勾配 1/1,700 で敷設した後、1996 年 8 月に草丈約 0.5m のヨシの苗を約 11 本/m²で植え付けた。植え付け後、1 年後に実施した実験シリーズを CASE I、2 年後を CASE II と呼ぶことにする。CASE I, II の通水条件、ヨシの諸元を表-1 に示す。電磁流速計による平均流速・レイノルズ応力の水深方向分布の測定と、水路側壁に設けた観察窓からの倒伏・揺動状況の観察 (CASE II のみ) を実施した。なお、全ケースともヨシが完全に水没した状態での実験である。

2.2 流れ場・粗度の観測結果

CASE II では、ボイルと思われる強い湧昇流による水面の盛り上がりで断面平均流速の大きなケースになるほど明瞭に見られた。それに伴って草丈の 1/2~1/3 (群落高さ $t=60\sim90\text{cm}$) までヨシが倒伏するとともに、先端部分のみが振幅 10~20cm 程度のゆっくりした上下運動をする (それ以外はほぼ静止した) 様子が観察された。この現象が穂波と呼ばれる揺動現象²⁾であるかははっきり分からない。揺動現象と一般に認められる条件の一つとして、ヨシが若干倒伏する (群落高さが草丈よりやや低くなる程度) とともに大きな振幅で周期的に揺れ動くような振動状態であることが挙げられる。今回観測した上下運動はこのような振動状態とはかなり異なる。また、CASE II における水面勾配 i とマンニングの粗度係数 n の関係を図-1 に示す。水深・群落高さ比 $h/t=2$ となった 3 ケースに着目すると、 i

CASE	断面平均流速 U (cm/s)	水深 h (m)	群落高さ t (m)	水面勾配 i	草丈 (m)	茎径 (mm)	葉の総面積 (cm ² /本)	葉の密度 (本/m ²)
I-1	27	1.09	0.81	1/1590	152	4.1	298	61
I-2	27	1.27	0.74	1/1850				
I-3	36	1.13	0.74	1/1310				
II-1	28	1.76	1.39	1/1010	205	5.4	342	79
II-2	42	1.77	1.13	1/704				
II-3	63	1.80	0.91	1/647				
II-4	75	1.50	0.75	1/402				
II-5	90	1.20	0.62	1/272				

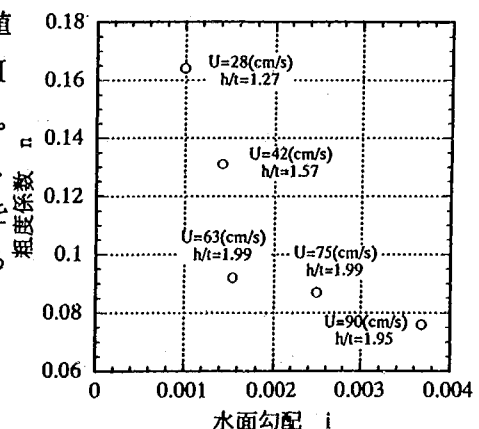


図-1 n と i の関係

とUの増大に伴ってnが単調に減少していることが分かる。この原因の一つとしては、h/tが同一であっても、ヨシが大きく倒伏する(tが小さい)ほど群落内の透過性が向上する(Kが大きくなる)ことが挙げられる。もう一つの原因として、上下運動が上記したように不活発であったことが挙げられる。北村³⁾によると揺動現象が卓越する場合には、揺動により活発になった乱流混合の影響が一つめの原因として挙げた透過性の増加より卓越してむしろnが増加すると予想される。この予想とは正反対にnの減少傾向が見られたことを考慮すると、今回の実験で観察されたヨシの上下運動が流れへ及ぼす影響は無視できる程度であると判断される。

平均流速uとレイノルズ応力 $-u'v'$ の測定結果の一例を図-2に示す。まず群落内(z<0)に着目すると、水路床に向かって指数関数的に低減する相似な分布型になること、その分布型は透過係数Kが一樣な群落模型を用いた実験結果から清水ほか⁴⁾が提案した式(1), (2)で近似できることがわかった^{1b)}。

$$u = u_{\infty} + (u_0 - u_{\infty}) \exp(\alpha z) \quad (1)$$

$$-u'v' = -u_0'v_0' \exp(\alpha z) \quad (2)$$

ここで、 α は低減しやすさを表すパラメータ、 $u_0, -u_0'v_0'$ はz=0における平均流速とレイノルズ応力、 u_{∞} は浸透流速($=K \cdot i^{0.5}$)である。非一樣な透過係数を有するヨシ群落にも式(1), (2)が適用可能であることは、群落内流れをモデル化する際にKを一定値と仮定できることを示唆するものである。次に群落上(z>0)に着目すると、平均流速が対数分布型になること、群落内との運動量交換に関わる混合距離 ℓ を調整すると式(3)で良好に近似できる¹⁾ことがわかった。

$$\frac{u}{u_0} = \frac{1}{K} \ln \left(\frac{z + \ell/K}{\ell/K} \right) + \psi_0 \quad (3)$$

ここでKはカルマン定数、 ψ_0, u_0 はz=0における流速係数と摩擦速度である。

2.3 抵抗則とその有効性

図-2に示したような群落内流れの運動方程式を式(4)で与える。

$$\nu_t \frac{d^2 u}{dz^2} - g \left(\frac{\lambda_p}{K} \right)^2 u^2 + gi = 0 \quad (4)$$

ここで、 ν_t は渦動粘性係数、gは重力加速度、 λ_p はヨシ群落の空隙率(=1)である。式(4)では群落内で ν_t とKを一定とした。 ν_t を一定とした(山田ほか¹⁾のモデルの修正点)のは、 $\nu_t = -u'v' \cdot (du/dz)^{-1}$ に式(1), (2)を代入・整理すると ν_t がzの関数とならないためである。泉ほか³⁾に倣って式(4)の第1次までの摂動近似解を求めると式(1)が得られる。また、 α は式(5)に示す関数になることがわかる。

$$\alpha = \left(\frac{2\lambda_p \sqrt{g u_0}}{\nu_t \sqrt{h - tK}} \right)^{0.5} \quad (5)$$

ここで、hは水深、tは群落の高さである。また、 ℓ, ψ_0 は式(6), (7)で与える¹⁾。

$$\ell = \frac{K}{\alpha} \left(1 - \frac{\alpha t \exp(-\alpha t)}{1 - \exp(-\alpha t)} \right) \quad (6) \quad \psi_0 = \frac{1}{\ell \alpha} + \frac{K}{\lambda_p \sqrt{g(h-t)}} \quad (7)$$

式(6), (7)で求めた ℓ, ψ_0 の計算値と実験値を比較すると、図-3, 4に示すようにおおむね良好に一致する結

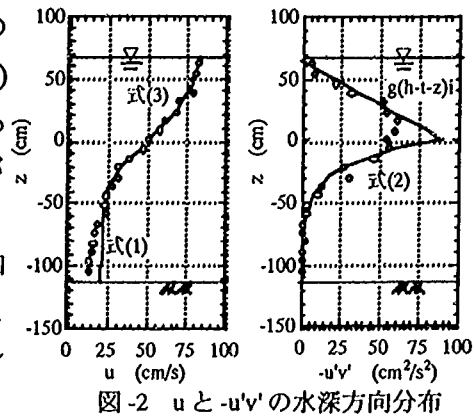


図-2 uと $-u'v'$ の水深方向分布

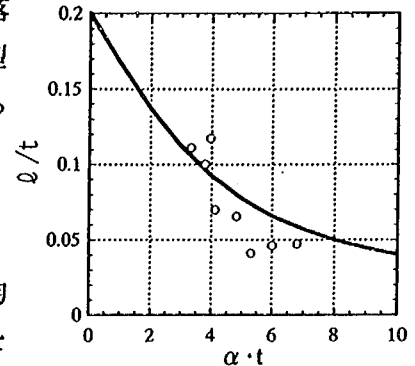


図-3 u/u_0 と αt の関係

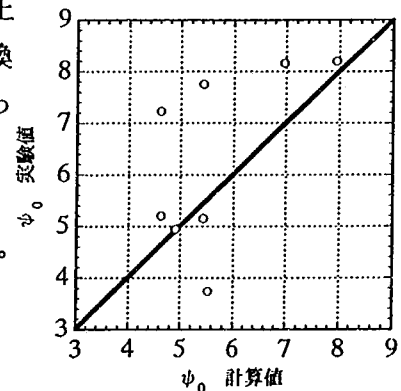


図-4 ψ_0 の計算値と実験値の比較

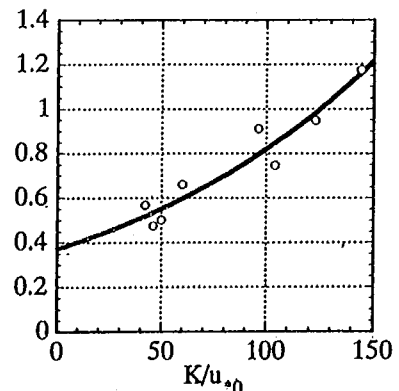


図-5 Cと $Ki^{0.5}/u_0$ の関係

果となった。式 (1), (3) を水深 h に渡って積分すると、断面平均流速 U と摩擦速度 $u_* = (ghi)^{0.5}$ の関係式 (つまり抵抗則) が式 (8) に示すように求められる。

$$\frac{U}{u_*} = \sqrt{\frac{h-t}{h}} \left[\frac{h-t + \frac{t}{\chi}}{\kappa h} \left(\ln \left(\frac{h-t + \frac{t}{\chi}}{\frac{t}{\chi}} \right) - 1 \right) + \psi_0 \left\{ 1 - \frac{t}{h} \left(1 - \frac{1}{\chi} \right) + \frac{1}{\alpha h} \left(1 - \frac{1}{\chi} \right) (1 - \exp(-\alpha t)) \right\} \right] \quad (8)$$

$$\chi = \psi_0 \frac{\lambda_p}{K} \sqrt{g(h-t)}$$

残された未定変数 ν_i の式を与えれば、式 (5) ~ (8) によりヨシ群落の粗度係数が求められる。そこで、式 (5) に実験値を代入して ν_i を逆算した結果を式 (9) および図-5に示すように整理した。

$$\nu_i = c \ell u_{*0} \quad c = 0.371 \exp \left(0.0079 \frac{K}{u_{*0}} \right) \quad (9)$$

式 (9) の関数型は、 $u_{*0}K$ が大きいほど組織的な乱れの強度が強かつ群落内での減衰が弱くなり、大きな運動量拡散が生じる (つまり ν_i が大きくなる) との考えに基づいて提案した。以上の式から構成される抵抗則に CASE I, II の実験条件 (h, t, K, i) を代入して求めた n の計算値と実験値とを比較した結果を図-6に示す。計算値は実験値の約1.2倍となる結果となった。この主原因は式 (7) による ψ_0 の予測が過小評価の傾向であるため (図-4参照) と考えられる。しかしながら、ヨシ群落の n の概略値を予測することが可能と思われる。

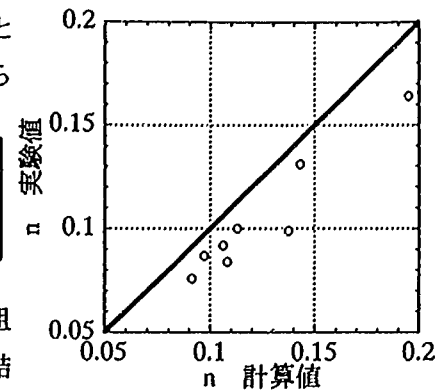


図-6 n の計算値と実験値の比較

注) 式 (1), (2) を実験値にフィットさせて求められる α の値が同一になるように定めた u_{*0} と、近藤ほか⁹⁾ に倣って推定した群落の K と各実験条件の i から求めた u_{*0} の値の比較を行った。その結果、10% 程度の差異 (流速差で $\pm 2\text{cm/s}$ 程度) があることが確かめられた。この程度の差異は流速測定の実験誤差に比べて十分に小さく、有意な差ではない。この結果は、「式 (1), (2) を用いて u と $-u'v'$ の分布を近似できなくはない」という結論を与えるものである。そこで、本研究では式 (1), (2) が適用できるとして、解析を進めることにした。

3. 主な研究成果物

- ・(財) 先端建設技術センター, 平成9年度版ポーラスコンクリート河川護岸設計・施工マニュアル (案), 78p., 平成10年3月
- ・服部 敦・藤田光一ほか: 粘性土からなる自然河岸の侵食に関する現地観測とその予測計算について, 水工学論文集, 第43巻, pp.713~718, 1999.

参考文献

- 1) 山田 正・川端規之: 浸透層上の流れの抵抗則に関する理論的研究, 土木学会論文報告集, 第325号, pp.69-80, 1982.
- 2) 池田駿介・館健一郎: スペクトル応答解析による穂波の成因に関する研究, 土木学会論文集, No.539, II - 35, pp.43-52, 1996.
- 3) 北村忠紀: 河川植生の流れ及び河道変化に及ぼす影響に関する水理学的研究, 京都大学博士論文, 1996.
- 4) 清水義彦・辻本哲郎ほか: 直立性植生層を伴う流れ場の構造に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.438, II - 17, pp.31-40, 1991.
- 5) 泉 典洋・池田駿介ほか: 流水抵抗及び浮遊砂濃度に及ぼす植生の効果, 第33回水理講演会論文集, pp.313-318, 1989.
- 6) 近藤和仁・藤田光一ほか: 草本類の繁茂したポーラスコンクリート護岸之流れに対する安定性, 第4回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集, pp.77-82, 1998.

(藤田, 松尾, 服部, 瀬崎)

3.5 (2) 新素材・新工法を用いた防御工の開発

(樹木群による破堤軽減工法)

研究期間：平9～平12

担 当：河川研究室

【要旨】

破堤防止の重要性は言うまでもないが、万一破堤した時の破堤地点の流況や地形変化を知ることは、それによってもたらす直接的被害や氾濫流の予測に役立つことはもとより、堤防自身の設計・強化・管理の方針策定にも重要な情報となる。実際に様々な破堤形態の規模や特徴が生じる原因の検討はこれまであまりなされていない。本研究では堤防沿いに繁茂している樹木群及び河道平面形と破堤形態・流況との関係を把握することを目的として種々の条件下で水理模型実験を行い、破堤の軽減として効果的な対策工を検討した。

1. 検討方法

実験に用いた水路は大きく2種類に分けられる。一つは現象を単純化するために堤防法線に対して直角方向の流れを与えた「正面破堤実験」、もう一つは実現象と同様に堤防法線に対して平行の流れを与えた「横破堤実験」である。模型の縮尺は1/50程度として、樹木群や堤防の諸元等の条件を種々変えて、移動床実験を中心に検討を進めた。移動床の材料は平均粒径 $d_m = 0.9\text{mm}$ 、分散 $\sigma = \sqrt{d_{84}/d_{16}} \approx 2.9$ の混合砂であり、これによって河床・堤防・堤内地盤を整形した。樹木群模型は堤防模型沿いに種々の密度・幅・長さを有し、いずれの樹木群模型も実験水路内の流水によって撓みが殆ど生じない剛性を有している。このうち樹木群模型 [a] は、直径 2mm の円柱状の竹ひごを 1m^2 当たり 900 本立てたもので、その空隙率は約 99.7% である。樹木群模型 [b] 及び [c] はプラスチックの糸状のものが空間的にほぼ等しく分布している多孔質体で、空隙率はそれぞれ約 97%、約 91% である。なお樹木群模型 [2a] は樹木群模型 [a] の2倍の密度を有する。

2. 実験結果

2.1 正面破堤実験

樹木群模型が堤外地に有る場合の実験手法の違いと氾濫流量低減効果の関係を示したものが図1である。同図の縦軸は樹木群模型無しの場合の氾濫流量を基準として求めたものである。この実験では堤内地の湛水深 8cm を維持するように上流からの流量を常に調節しており、この最終時点の流量を用いてデータ整理した。ここで「半固定床」は、堤防をモルタルで一定破堤幅 (1m) で固定し、河床は変形可能な条件とした実験である。「完全固定床」は一定破堤幅で堤防及び河床を固定し、また「完全移動床」は堤防及び河床を変形可能な条件とした実験である。ここでは密度の高い樹木群模型 [c] を用いたデータを扱っており、氾濫流量の低減効果が実際より過大と考えられるが、「完全移動床」では特に低減効果が高くなっていることが分

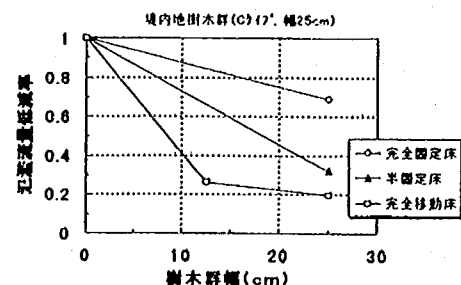
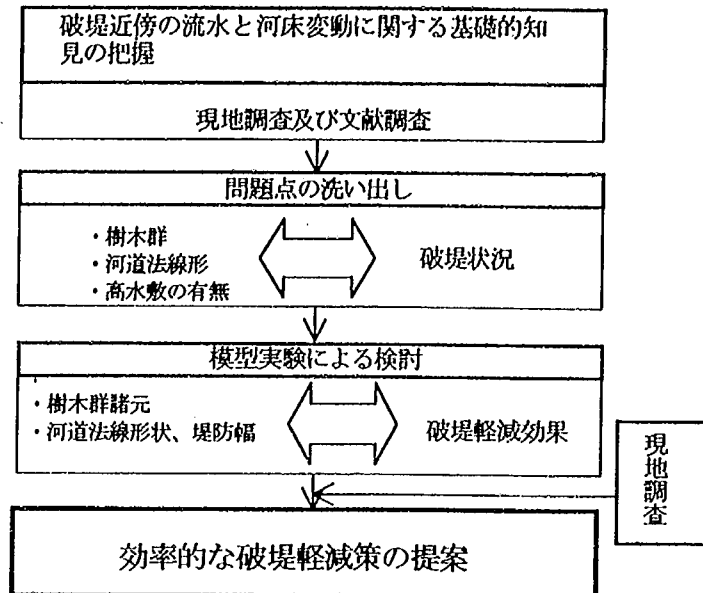


図1 模型条件と氾濫流量低減の関係

かる。このように実験手法によって状況が異なることは、樹木群の効果を検討する際に、落ち堀形状や破堤幅拡大過程さらには破堤部の流れ等の相互作用を考慮して検討することが重要であることを示す。

図2は樹木群模型（タイプ「b」、幅25cm、堤外地設置）が有る場合の通水20分後の地形変化を示したものである。図3の樹木群模型無しの状況と比較して洗掘範囲及び最大洗掘深が縮小し、樹木群模型による破堤の軽減効果が明確に現れている。

2.2 横破堤実験

本実験ではより実現象に近い検討を行うために、堤防と堤内地を移動床とし（河道内の河底は固定）、堤防法線に対して平行な流れ（定流）を与え、時間経過に伴って破堤規模の拡大と河道内水位の低下が生じる条件とした。河道部の形状は水路幅約1mの直線と湾曲（湾曲度2種類）の2種類とし、樹木群模型は主に〔2a〕タイプを用い、これを堤防近傍の所定の位置に設置した。

〔直線河道の場合〕

図4は樹木群模型〔2a〕を堤外地側の堤防沿いに設置し、その樹木群幅と破堤軽減効果（破堤幅の進行速度と氾濫流量）の関係について、樹木群無しの場合を基準に相対的に示したものである。これより樹木群幅は広くなると、樹木群幅がある程度までは破堤軽減効果が高まるが、それ以上樹木群幅が広くてもその効果は高くない。これは河道内で樹木群の占有率が高くなると、流水障害が大きくなり河道内水位の上昇が生じ、このことで破堤部での流量集中が助長されたことが一因と考えられる。以上のように、河道内の樹木群を考える場合、破堤軽減効果として効率的な樹木群幅が存在すると言える。

〔湾曲河道の場合〕

樹木群の無い状態で破堤拡大の規模が大きくなるのは、概ね湾曲内岸法線の延長線が湾曲外岸法線との交差点付近で破堤が開始された場合であり、樹木群を設置したケースではこの位置を破堤開始とした。

樹木群を河道内に設置すると、樹木群無しに比べて破堤拡大の進行が遅くなる。この状況は、樹木群の幅、位置、密度によって異なるが、図5に示すように破堤幅に関しては樹木群無しに比べて約1/2～1/3に小さくなり、破堤軽減効果が高くなる。なお氾濫流量に関しても破堤幅と同じ傾向を示す。

一方、樹木群を堤内地側に設置した場合には、樹木群無しと同程度の状況であり、樹木群の破堤軽減効果は小さい。

樹木群位置による効果については、破堤開始位置より上流に樹木群を設置した場合に最も有効である。樹木群の幅と密度の影響についてはあまり明確な差が生じておらず、直線河道と同様に樹木群の幅をある程度以上広くしても破堤軽減効果が上昇しない傾向が見られた。

3. まとめ

本検討は限られた条件下での実験結果であるが、樹木群の存在が破堤軽減にとって効果的であることを確認し、河道等の条件との関係を考慮した上で効率的な樹木群の諸元を見出すことを可能とした。

（藤田，坂野，平舘，二村）

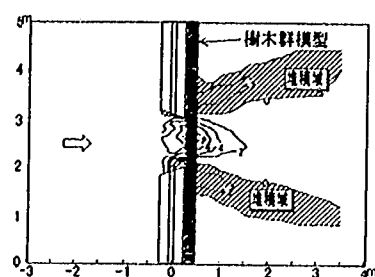


図2 樹木群設置の効果

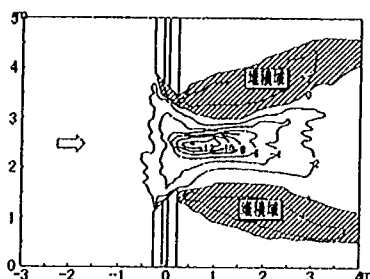


図3 樹木群無しの場合

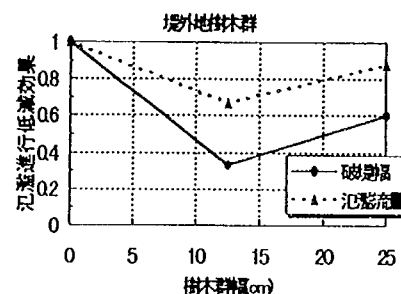


図4 氾濫低減効果—樹木群幅

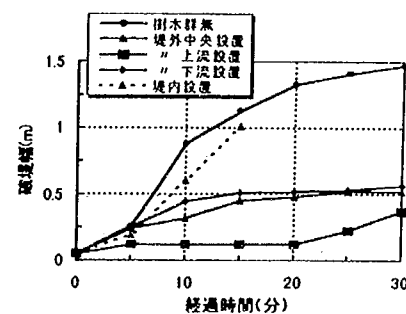


図5 破堤幅の経時変化

3.5 (3) 新素材・新工法を用いた防御工の開発

(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)

研究期間：平9～平12

担 当：緑化生態研究室

【要旨】

「自然を生かした川づくり」の実現化を図る一つの工法として、ポーラスコンクリートを用いて河川護岸を緑化させる技術の開発が求められている。

本研究は、河川護岸にポーラスコンクリートを用いて緑化することが可能な立地条件（勾配、流速、水分条件等）を明らかにするとともに、同一の条件下においては、どのような構造や工法のポーラスコンクリートが緑化に適しているかを明らかにすることを目的としている。

10年度においては、①護岸の勾配、方位、水面からの高さの違いによる適性の確認、②充填材の種類と工法の違いによる適性の確認、③孔開きモルタル平板上での緑化の可能性の確認について、土木研究所構内の実験河川等において試験施工を行い、一定の傾向を確認した。

1. 研究方法

1.1 試験区の設置

① 護岸の勾配、方位、水面からの高さの違いによる適性の確認

土木研究所構内に設置した東西方向に延びる実験水路の北向き及び南向きの内側法面を、それぞれ3分、5分、1割の法長2m+ α の法面に整形し、それぞれに厚さ1

0cm、15cm、20cmのポーラスコンクリート平板（ここで用いたものは、5号採石、連続空隙率25%で空隙部にはスラリー状の充填材を充填した1m×1mの平板）を法長2m幅4mとなるように敷設した。さらに、1割勾配の法面上には、これに併せて1m×1m×0.5m（高さ）の普通コンクリート製（鉄筋を含む）のU型部ブロックに、1m×1m×10cm（厚さ）のポーラスコンクリート平板を被せてボルトで固定し、中に土を詰めたブロックタイプのものをポーラスコンクリート面が表面に出るように2段重ねで法長2m幅2mとなるよう設置した。

各ポーラスコンクリートの表面は、10年3月に5cmの厚さの厚層基材吹付と、布で出来た袋状のものに土を詰めるタイプの植生マットでそれぞれ各試験区を2m幅で覆った（ブロックタイプは厚層基材吹付のみ）。なお、厚層基材吹付と植生マットには共に緑化植物として、リードカナリーグラス、クリーピングレッドフェスク、トールフェスクの種子をそれぞれ成立期待本数が2,000株/m²、1,000株/m²、500株/m²となるように配合した。また、発芽がほぼ出そろった1ヶ月後の4月末には、法長で下から50cmの高さまで水路に水を入れ、その後は水路内に藻が発生しない程度に緩く水を流し続けた。

研究の進め方

(9年度・10年度)

構造・工法の違いによる緑化特性の確認

緑化可能な適用箇所の確認

(11年度・12年度)

新技術の開発

自然条件での緑化の確認

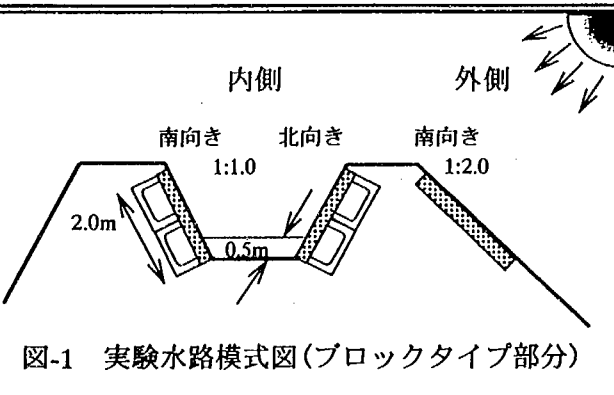


図-1 実験水路模式図(ブロックタイプ部分)

② 充填材の種類と工法の違いによる適性の確認

①で用いた水路の外側に位置する2割勾配の南向き法面を活用して、表-1に示す充填材の種類、工法の組み合わせからなる9通りの試験区を作り、植物の生育状況の比較試験を行った。ここで用いたポーラスコンクリート平板は、5号砕石、連続空隙率25%、40cm×40cm×10cm（厚さ）である。これを法面に縦に3段並

べ、それぞれ1試験区とした。また、各ポーラスコンクリートの表面は、10年5月末に、①と同様の種類、量の種子を配合した5cmの厚さの厚層基材吹付により覆った。

表-1 充填材の種類と充填工法

No.	平板製造	充填材の工法	充填材の種類	平板下の吸い出し防止シート
1	A社	スラリー状のものに平板を浸ける	a	無し
2	A社	スラリー状のものに平板を浸ける	a	有り
3	A社	スラリー状のものに平板を浸ける	b	有り
4	A社	スラリー状のものに平板を浸ける	c	有り
5	A社	粉体状のものを振動により充填	d	有り
6	A社	スラリー状のものを上から流し込む	e	有り
7	A社	充填材なし	—	有り
8	B社	スラリー状のものに平板を浸ける	a	有り
9	B社	粉体状のものを振動により充填	d	有り

③ 孔開きモルタル平板上での緑化の可能性の確認

②の試験区に並べて、①の実験水路の外側に位置する2割勾配南向き法面を活用して、表-2に示す13種の孔開き平板を、縦に3段ずつ並べた。さらに全ての孔には、粉体状の充填材を充填し、その後表面を10年5月末に、①と同様の種類、量の種子を配合した5cmの厚さの厚層基材吹付により覆った。また、対照とし、土壌区、無孔区、ポーラスコンクリート区の3区を設定した。

表-2 試験に用いた孔開き平板の種類

No.	試験区名	孔径 (mm)	空隙率 (%)	孔数 (個)	孔間隔 (mm)
1	土壌区	—	—	—	—
2	無孔区	—	—	—	—
3	φ5-2.5%	5	2.5	196	23
4	φ5-5%	5	5	361	15
5	φ10-5%	10	5	100	30
6	φ10-10%	10	10	169	18
7	φ10-15%	10	15	256	13
8	φ15-5%	15	5	49	44
9	φ15-10%	15	10	81	27
10	φ15-15%	15	15	121	19
11	φ15-20%	15	20	144	15
12	φ20-5%	20	5	25	59
13	φ20-10%	20	10	49	36
14	φ20-15%	20	15	64	26
15	φ20-20%	20	20	81	20
16	ポーラス	—	25 (5号砕石)	—	—

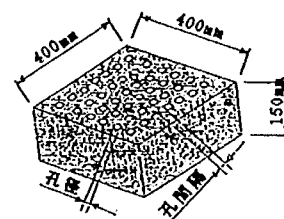


図-2 平板形状

1. 2 生育調査

① 護岸の勾配、方位、水面からの高さの違いによる適性の確認

試験区全体に、コドラートを示すために10cm×10cm画の金網を張った。区画された20段のコドラートのうち、水面から法長にして0～10cm(6段、下から以下同様)、20～30cm(8段)、30～40cm(9段)、60～70cm(12段)、90～100cm(15段)、130～140cm(19段)について、それぞれから8カ所を選定し、その中に生育している植物の生育本数と各草丈の測定を4月末から10月末にかけて1月間隔で行った。

② 充填材の種類と工法の違いによる適性の確認及び孔開きモルタル平板上での緑化の可能性の確認

20cm×20cmを縦横に4等分した金網のコドラート枠を各平板の中央に設置した。このコドラートを対象に、①と同様にその中に生育している植物の成立本数と各草丈の測定を6月末より9月末まで1月間隔で行った。また、4つのコドラートを1区画とし、3種の植物を合わせた緑被率の測定(目視により5%単位で判定)を7月の初めから10月の初めまで1週間間隔で行った。また茎葉の乾燥重量の測定を10月の中程に、平板の貫通本数の測定を11月の初めに行った。

2. 研究結果

① 護岸の勾配、方位、水面からの高さの違いによる適性の確認

- ・水面から常時水の供給のある範囲(6から8又は9)では、勾配、方位に関わらず、生育状況がよかった。
- ・水面から水の供給のない範囲では、南向きは北向きよりも全般的に生育が悪かった。これは、南向きの方が日射により乾燥し生育が制限されているためと推測された。
- ・勾配の違いでは、南向き、北向きとも緩い方が成育状況が良かったが、大きな差はなく3分の護岸においても、北向きでは十分に緑化が可能であった。
- ・1割勾配のみで試みたボックスタイプは、平板タイプより成育状況がよかった。このことより、護岸ブロックとして大きな自重が必要とされる場所や、平板を張ることが困難な急勾配においても、ボックスタイプにすることによりポーラスコンクリートを用いた緑化が可能となると考えられた。
- ・今回用いた植生マットは、当初に充填した土が硬く乾燥したためか、その後の成育状況も悪く、改良の必要があった。

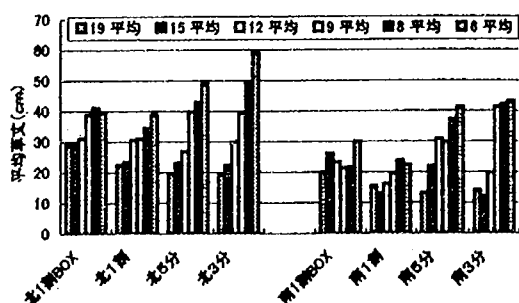


図-3 勾配・方位・高さの違いと草丈
(10cm厚・8月)

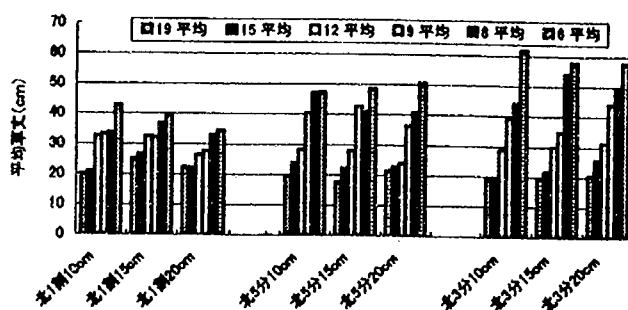


図-4 平板厚・勾配・高さの違いと草丈
(北向き・8月)

② 充填材の種類と工法の違いによる適性の確認

- ・充填材無しは、生育が一番悪く、今回用いた充填材の効果が確認された(No.7とその他)。
- ・充填材の種類、工法が同じものを比較(No.2と8及び5と9)すると、A社、B社の2社の製造したそ

それぞれのポーラスコンクリートによる差は少なく、ポーラスコンクリート本体に関しては、骨材径、連続空隙率を指定することで、緑化に関しては同様の性能を期待することができると考えられた。

- ・スラリー状の充填材に平板を浸けて充填したものと、設置後上から充填したものととの比較（No.2と6）では差は少なかった。
- ・充填材の成分比較（No.2と3と4）では、差は見られなかったが、充填材無しと比較するとどれも生育状況が良かった。このことより、今回用いた充填材の成分配合では、どれも効果が有ったことがわかったが、どの成分が効果が高かったのかについては確認することができなかった。
- ・平板下の吸い出し防止シートの有無の比較（No.1と2）では、不織布有りが無しより生育状況が良く、有りのものは充填材の流出防止に一定の効果があるものと推測された。
- ・スラリー状の充填材と粉体充填の比較（2と5及び8と9）では粉体充填の方が生育状況が良かった。なお、この結果は当初の充填量と雨水による流出状況に差があるものか、あるいは成分の差によるものかを確認するには至らなかったため、今後別途の試験で確認する必要がある。

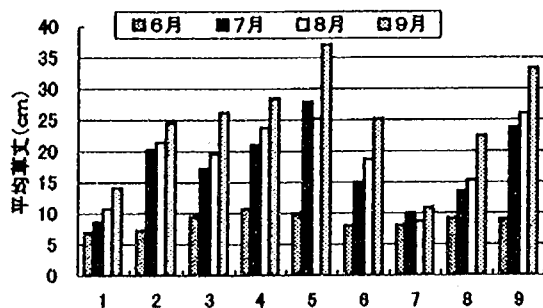


図-5 平均草丈の推移の比較

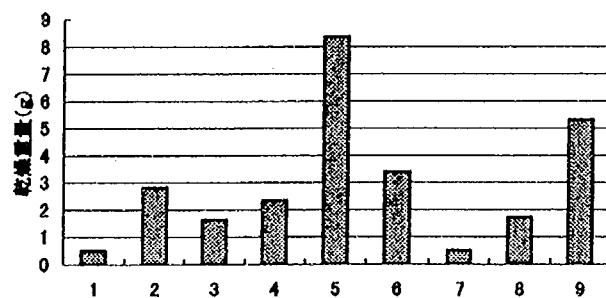


図-6 茎葉の乾燥重量の比較

③ 孔開きモルタル平板上での緑化の可能性の確認

- ・孔開きモルタル平板上に十分な緑化を行うことができた。
- ・孔径 5 mm の孔では、植物根の伸長・貫通が困難なため、植物の生育が抑制された。
- ・孔径 10 mm の孔では、植物根の伸長・貫通が容易なため、孔隙率が高まるに従って、貫通根数が増加し、その結果植物生育が向上するものと考えられた。
- ・植物生育に適する孔条件は、孔径 15 mm で孔隙率 15 % 以上、及び孔径 20 mm で孔隙率 10 % 以上であり、これらの孔条件では、茎葉の生育に必要な量の根茎が発達できるために、根茎が茎葉の生育制限要素ではなくなると考えられた。

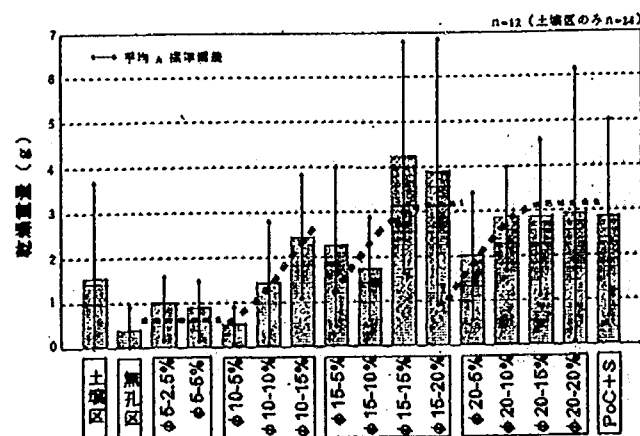


図-7 茎葉の乾燥重量の比較

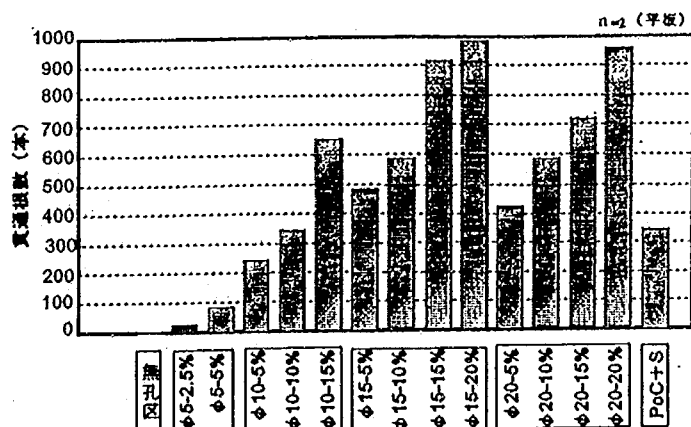


図-8 貫通根数の比較

(藤原, 松江, 伊神)

3.5 (4) 新素材・新工法を用いた防御工の開発

(ポーラスコンクリート)

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。10年度はポーラスコンクリートの凍結融解耐久性を明らかにする目的で凍結融解試験を実施した。この結果、厳寒地を除けば比較的広い地域でポーラスコンクリートの適応が可能であることが分かった。

1. 研究方法

試験に供したポーラスコンクリートの配合を表-1に、材料の物性を表-2に示す。

凍結融解試験は JSCE-G501 で規定されている水中での凍結融解試験法が一般的である。しかし、護岸を必要とするような流速を有する日本の河川で、水面から水深数十 cm にわたって凍結するような河川はよほどの厳寒地を除いて稀であろう。また水面から上部では浸透水はポーラスコンクリートの空隙を貫通するため、空隙が水で飽和される可能性はほとんど無い。

表-1 試験ケース

ケース名	W/C (%)	粗骨材 粒径	空隙率 (%)
1. 基本配合	25	4号碎石	25
2. W/C=30	30	"	"
3. W/C=35	35	"	"
4. 5号碎石	25	5号碎石	"
5. 6号碎石	"	6号碎石	"
6. 空隙率20%	"	4号碎石	20
7. 空隙率15%	"	"	15

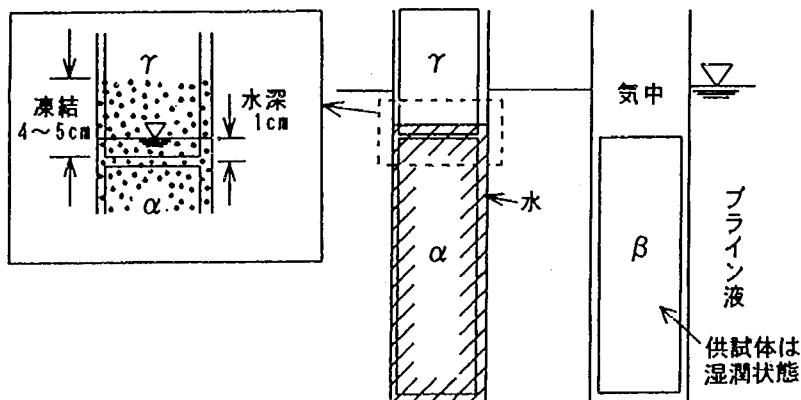


図-2 凍結融解試験方法

表-2 使用材料

セメント	高炉B種, 比重3.04, 比表面積3760cm ² /g
混和剤	高性能AE減水剤 (ケース2はAE減水剤, ケース3は使用せず)
粗骨材	笠間産硬質砂岩, 比重2.66~2.67, 吸水率0.42~0.46%
細骨材	大井川産河床砂, 比重2.60, 吸水率1.06% (ケース6, 7に使用)

表-3 実験ケース

	サイクル時間		温度範囲 (deg)	供試体寸法 (cm)	測定項目		備考
	凍結	融解			動弾性	質量	
α. 水中凍結融解	3 h	3 h	-18~+4	10X10X40	○	○	試験機能力からサイクル時間を決定
β. 気中凍結融解	2.5 h	1.5 h	-18~+4	10X10X40	○	○	供試体は湿潤状態
γ. 部分水中凍結融解	3 h	3 h	-18~+4	10X10X15		○	水中凍結範囲は4~5cm

このため今回の試験では表-3および図-2に示す3通りの試験を実施した。供試体本数は各3本とし、14日の水中養生後に試験を開始した。試験中は動弾性係数と損失質量を測定した。

2. 研究結果

2.1 水中凍結融解試験結果

相対動弾性係数の結果を図-3に示す。全ケースとも試験開始後のわずか数サイクルで値が大きく低下しており、水中での凍結融解耐久性はかなり低い結果となった。この原因は空隙中の水が凍結する際の膨張圧によってコンクリートに引張破壊が生じるためと考えられる。

2.2 気中凍結融解試験結果

相対動弾性係数の結果を図-4に示す。水セメント比が35%（最も貧配合）のケースでは相対動弾性係数が徐々に低下していく傾向を示したが、それ以外の配合では動弾性係数の低下はまったく見られなかった。このことから、水面から上部の位置ではかなり高い凍結融解耐久性を備えていると考えられる。

2.3 部分水中凍結融解試験結果

損失質量の結果を図-5に示す。この試験では水中凍結する部分のコンクリート質量は概ね600～800gであるが、その部分が凍結融解を繰り返すごとに徐々に崩壊していく様子が伺える。ただし6号砕石を使用したケースでは180サイクルまで崩壊が発生しておらず、骨材寸法の小さい配合であれば比較的高い耐久性を示すものと考えられる。

3. 今年度の成果のまとめ

今回の結果から、ポーラスコンクリートの凍結融解に対する耐久性を整理すると以下ようになる。

- (1) 水中での凍結融解に対する耐久性はかなり低いと考えられる。
- (2) 気中での凍結融解に対する耐久性は高いと考えられる。
- (3) 水際部のような部分的な水中凍結融解に対しては、骨材粒径を小さくすることで比較的高い耐久性を得ることが可能と考えられる。

以上の結果と日本の気象条件から考えると、厳寒地を除けばポーラスコンクリートの適用範囲は比較的広いものと考えられる。

凡例（図-3, 4, 5 共通）

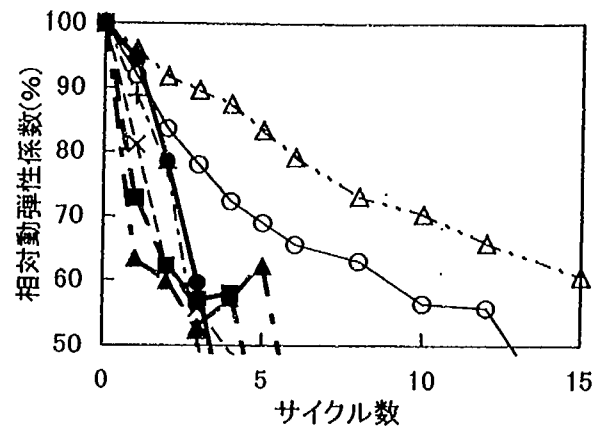
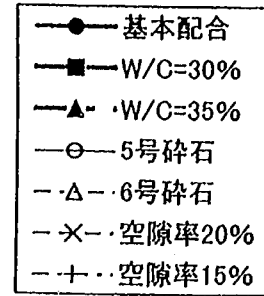


図-3 水中凍結融解試験結果

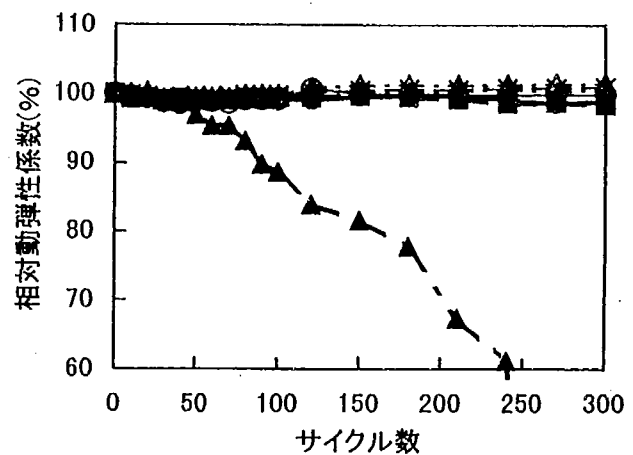


図-4 気中凍結融解試験結果

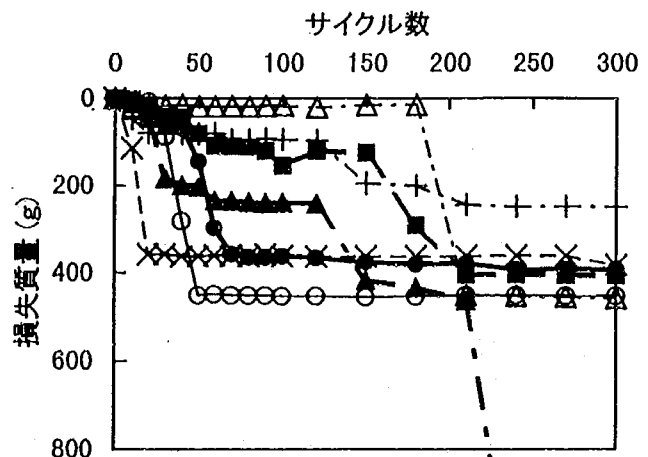


図-5 部分水中凍結融解試験結果

(河野, 片平, 古賀)

3.6 溪畔林を活用した流路整備に関する調査

研究期間：平 9 ～ 平 1 2

担 当：砂防研究室

【要旨】

今年度は、平成 10 年 8 月末に、栃木・福島県境での豪雨により引き起こされた流木の実態を把握することを目的に那珂川左支川・余笹川で空中写真判読と現地調査を行った。その結果、流木の発生源は主に河道内の植生であると判断した。これは過去長期間にわたり余笹川で大規模出水がなかったため、安定した河道内で樹林化が進行していたことが背景にある。山腹崩壊に伴う流木化は比較的少なかった。

また同時に水理模型実験により湾曲水路の兩岸にある樹林帯のもつ側岸侵食抑制効果について検討した。その結果湾曲水路兩岸にある樹林帯には侵食抑制効果があることが確認できた。

1. 余笹川流木災害調査

1.1 研究方法

平成 10 年 8 月下旬、福島県と栃木県の県境一帯では記録的な豪雨に襲われた。栃木県的那須町では、8 月 26 日 0 時～31 日 24 時までに総雨量 1,253mm、最大時間雨量 90mm(27 日 1 時～2 時)を記録した(気象観測所・那須)。この豪雨は県境に位置する那珂川流域において、洪水による溪岸侵食・河床堆積・流木等を引き起こした。中でも那珂川支川余笹川で発生した流木は、余笹川にかかる 5 橋を通行不能にするなど大きな被害を与えた。

本研究では、この余笹川の流木に着目し、その流木発生源と流木の挙動について明らかにすることを目的に、空中写真判読と現地調査を行った。判読に使用した空中写真の撮影時期は、平成 10 年 9 月と平成 5 年 10 月の災害前後である。撮影範囲は、那須山麓から那珂川合流点までとした。現地調査ではコドラート調査を溪岸・中州・山腹で行い、その植生分布状況を確認した。今回調査対象とした余笹川は、流路延長 37.2km、流域面積 95.09km²、平均河床勾配 4.6%である(図-1)。

1.2 研究結果

1.2.1 空中写真判読結果

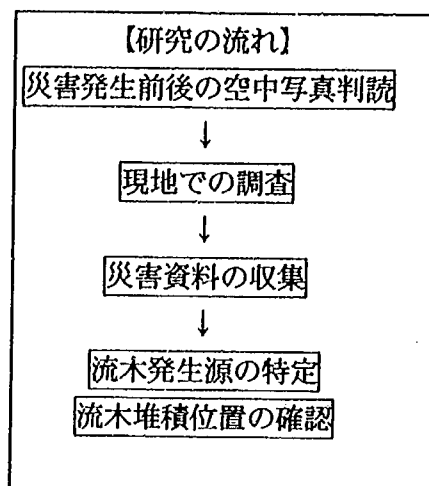
災害前後の空中写真判読を行い、流木の発生源と停止形態を確認した。上流から下流に向かって主要地点での空中写真判読結果を述べる。

①大谷開拓橋

災害後には川沿いの植生が失われ、裸地が形成されていた。よって主な流木の発生源は河道内の低位段丘上の植生であると考えられる。山腹崩壊に伴う流木は、その崩壊面積の小ささからそれほど多くないと考えられる。また中州上の樹林帯上流に流木が堆積している箇所もあったが、裸地から推定される発生流木量と比較すると小さかった。よってこの橋付近で発生した流木は大部分がより下流へと流れていったものと考えられる。

②苦戸川合流点

災害前は、河道内で樹林化が進行していた。災害後はこのような河道内の低位段丘上の植生が広い範囲で流木化した。この地点で捕捉されている流木の大部分は高津橋によるものであった。支川の苦戸川からの流木が多量に供給された形跡はなかった(図-2)。



③東北自動車道周辺

この付近は流路工区間であったので、河道内の植生は自然河道区間と比較して相対的に少なかった。よって流路工内の砂州上に成立していた植生が主な流木発生源であった。裸地化した砂州上に流木が散在していた。東北自動車道の橋脚には目立った流木堆積はなかったが、橋上流側で護岸が決壊していた。

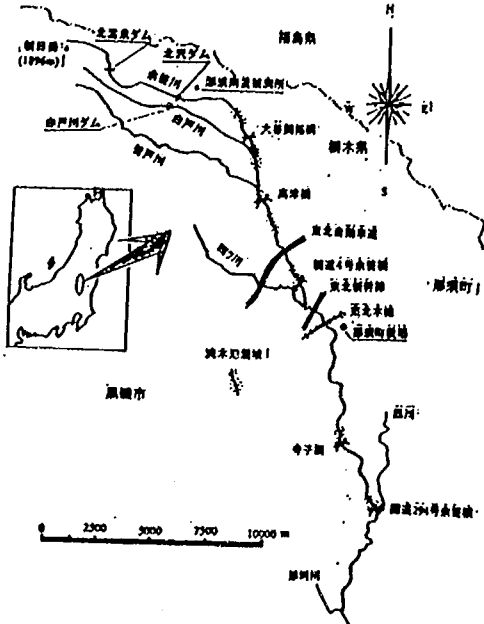


図-1 余笹川流域図



図-2 苦戸川合流点空中写真 (左：災害前、右：災害後)

1.2.2 現地調査結果

現地調査は植生状況を把握するため、大谷開拓橋直上流の溪岸・中州・山腹の三カ所を選択し、コドラート法で毎木調査を行った。優先種はそれぞれ、溪岸ではフサザクラ、中州ではイヌシデ、山腹ではコナラ・カエデであった。立木密度はそれぞれ、溪岸で 16.0(千本/ha)、中州で 3.6(千本/ha)、山腹で 4.0(千本/ha)であった。また溪岸・中州とも同じ樹齢と思われる植生が多く分布していることがわかる。これは過去の土砂移動か出水によって溪岸・中州がひろく裸地化し、その後一斉に植生が侵入したためと考えられる。著者は堆積した流木にはスギ・マツ類が多い印象を受けていた。しかしながらこの調査結果にはこれらが含まれていないことから、植生種によって流木発生源を推定することはできなかった。

1.3 まとめ

空中写真判読と現地踏査から流木の発生源と流木の堆積について以下のことが分かった。まず流木の発生形態は、①山腹崩壊型、②溪岸侵食型、③溪床侵食型、の三種類であり、③による流木生産が最も多かった。これには長期間大規模な出水がなく河道内で樹林化が進行していたことが背景にある。一般に河道内に洪水時通水能を妨げるほど樹林があれば、流木化・洪水の原因となると言われているが、この結果はそれを裏付けているといえるだろう。このような流木化を防ぐためには河道内の植生をある程度伐採することが必要である。また余笹川内の流木の停止形態には、①橋脚による捕捉、②樹林による捕捉、③砂州上の堆積、の三種類が主であり、特に①による流木捕捉量が最も多かった。これは余笹川では比較的小さいスパンの橋脚が多かったためと考えられる。推定される発生流木量と比較して、余笹川内の流木堆積量は小さかった。また大洗町～大洋村沿岸に多量の流木が堆積していたことから、多くの流木が河道内で堆積せずに海まで流れていったと考えられる。

2. 湾曲水路内樹林帯の側岸侵食抑制効果実験

2.1 研究方法

樹林帯には崩土や土石流を捕捉し、その林内において土砂の堆積を促進させる効果がある。本実験の目的は、そのような樹林帯の持つ土砂堆積促進効果量を評価する手法を確立することである。今年度は、湾曲水路における樹林帯の持つ側岸侵食抑制効果を検討するため水理模型実験を行った。

実験水路は図-1 の、長さ 18m、幅 1.5m、勾配 1/30 の二カ所の湾曲部を持つ水路である。今回実験対象としたのは上流側の湾曲部分のみである。水路内の河床は複断面であり、中央の幅 50cm の低水路と幅 50cm の高水敷から成っている。低水路と高水敷の高低差は 3cm、ともに縦断勾配 1/50 の移動床である。この水路内には床固工模型と樹林帯模型を設置した。床固工模型は、水通し幅 0.4m、幅 1.5m、法勾配 1:1.0 の断面形を有する木製である。床固工間隔は 0.75m と 0.5m で、床固工落差はそれぞれで 1.5cm と 3.0cm とした。樹林帯模型は直径 0.5cm、高さ 20cm の木製円柱を用いた。これを湾曲部の高水敷上に幅 30cm で設置した。樹木占有面積率は 0.4% のみとした。

模型縮尺は 1/50 を想定し、フルード相似則に基づいて実験条件を決定した。実験流量は $Q=1.0(\text{l/sec})$ を無給砂で 30 分、 $Q=3.0(\text{l/sec})$ を有給砂で 60 分供給した。なお最初の 30 分間の給水は滞筋を形成させることが目的である。給砂量は、芦田・高橋・水山の緩勾配式を用いて計算した掃流砂量 $Q_s=0.0388(\text{l/sec})$ とした。河床材料および給砂材料は平均粒径 1.3mm の混合砂を用いた。なお今回対象とした土砂移動形態は掃流のみである。実験ケースは全部で 3 ケースとした(表-1)。測定項目は、水位・河床高・侵食幅・流速である。

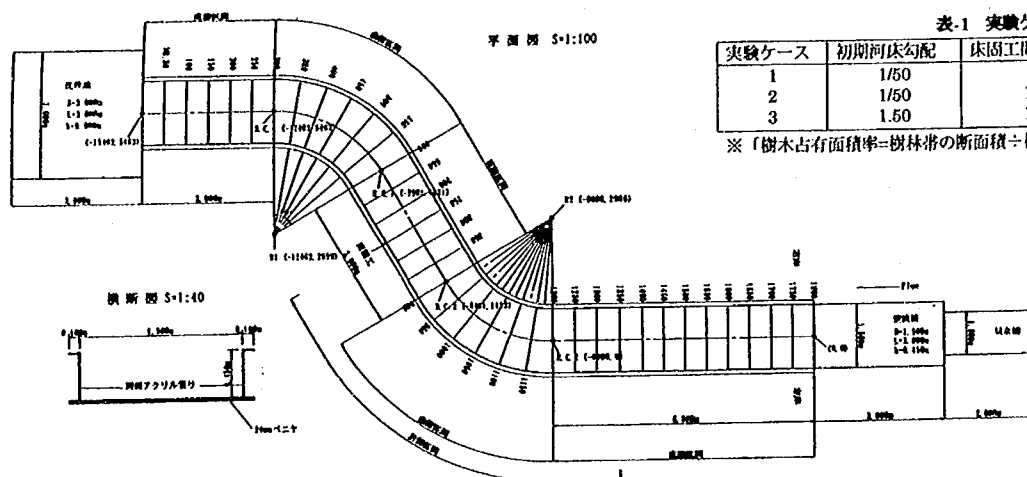


図-1 実験水路概要図

2.2 研究結果

2.2.1 流況観察結果

①ケース 1

$Q=1.0\text{l/s}$ の時、側岸侵食はほとんど生じず、はっきりした砂礫帯の形成はなかった。 $Q=3.0\text{l/s}$ 通水 20 分後頃河道中央に砂礫帯が形成され床固工間の中央部で側岸侵食が生じた。このとき曲線区間と直線区間の侵食幅には大差がなかった(侵食幅 5~10cm)。 $Q=3.0\text{l/s}$ 通水 40 分後頃より、内湾寄りに砂礫帯が形成されたが、主流路は大きく外湾側へ偏ることはなかった。

②ケース 2

$Q=1.0\text{l/s}$ の時、曲線区間において河道中央部に砂礫帯が形成され、外湾側の側岸侵食が生じた。 $Q=3.0\text{l/s}$ 通水直後、曲線区間において外湾側への流水の偏りが著しく、内湾側高水敷上には浸水がなく、逆に外湾側高水敷上では全幅が浸水した。 $Q=3.0\text{l/s}$ 通水 50 分後、No.900~1050 区間で侵食された高水敷部に砂

礫帯が形成された。 $Q=3.0\text{ l/s}$ 通水 50 分後には、曲線区間下流直線部で流真が河道中央に変化したため、砂礫帯中央部がフラッシュされ、河床は天然の複々断面を形成した。曲線区間下流側では、内湾側に砂礫帯が形成された。

③ケース 3

$Q=1.0\text{ l/s}$ 時に、曲線区間外湾側に小規模の砂礫帯が形成されたが、側岸侵食は生じなかった。この小規模砂礫帯は、 $Q=3.0\text{ l/s}$ 通水開始直後に掃流された。 $Q=3.0\text{ l/s}$ 通水 15 分後、曲線区間外湾側では、側岸侵食が始まった。このとき樹林前面(河道沿い)の流速は $35\sim 40\text{ cm/s}$ であり、樹林帯内では $25\sim 30\text{ cm/s}$ 程度であった。 $Q=3.0\text{ l/s}$ 通水 35 分後曲線区間での河床は、全体的に上昇するが、砂礫帯は形成されなかった。通水後は一旦侵食された内湾側高水敷部に砂礫帯が形成され、内湾側は複々断面化した。

2.2.2 側岸侵食面積

図-2 に、通水後における曲線区間での侵食平面図を示す。この侵食範囲は、低水護岸の側方侵食の範囲を示しており、高水敷の浸水に伴う縦侵食については考慮していない。床固工間隔の異なるケース 1(床固工間隔 75cm)とケース 2(150cm)について側岸侵食の面積を比較すると、明らかにケース 1 の方が小さいことが分かる。次に樹林帯を設置したケース 3 と、設置していないケース 2(ともに床固工間隔 150cm)について側岸侵食の面積を比較すると、ケース 3 の方が大きいことがわかる。曲線区間上流部・下流部での侵食面積の減少率は約 40%であった。これより樹林帯には湾曲区間での側岸侵食抑制効果があることが分った。

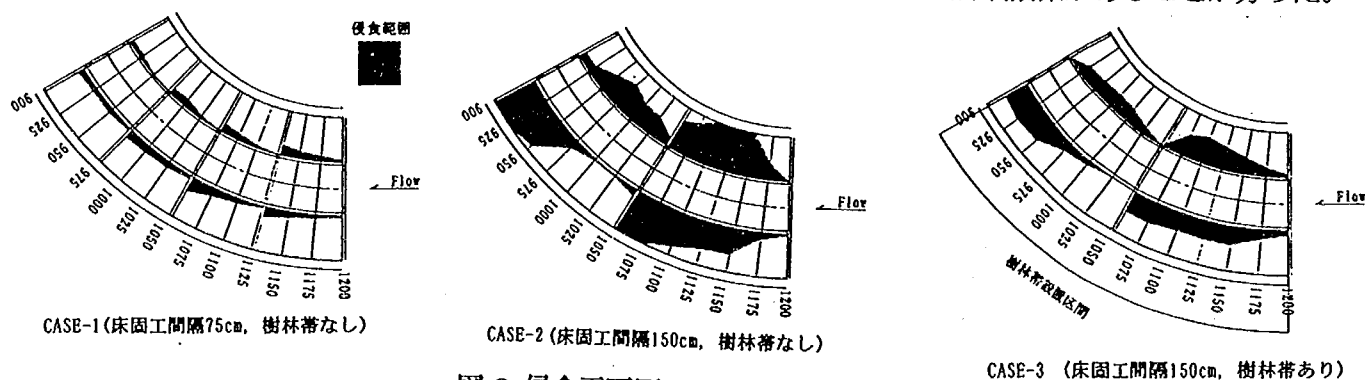


図-2 侵食平面図 ($Q=3.0\text{ l/s}$ 終了後)

2.3 まとめ

湾曲水路における樹林帯の持つ側岸侵食抑制効果について水理模型実験により求めた。その結果、本実験の条件下では、樹林帯を設置したことによって、曲線区間外湾部で側岸侵食が約 40%軽減された。また樹林のない曲線区間で、床固工間隔を 1/2 倍したことで曲線部外湾において側岸侵食が 70~80%軽減した。前者は樹林帯の、後者は床固工の側方侵食抑制効果である。これらは 3 ケースという限られた条件下での結果であるので、今後より広範囲での実験を行い、その効果を検証することが必要である。

参考文献

- 1)平成 10 年 8 月末豪雨による福島県南部・栃木県北部土砂災害緊急調査報告、反町雄二ら、土木技術資料、40-11、1998、pp.48-53

(南, 小山内, 竹崎)

3.7 変動を加味した正常流量に関する基礎調査

研究期間：平 9～平 12
担 当：河川環境研究室

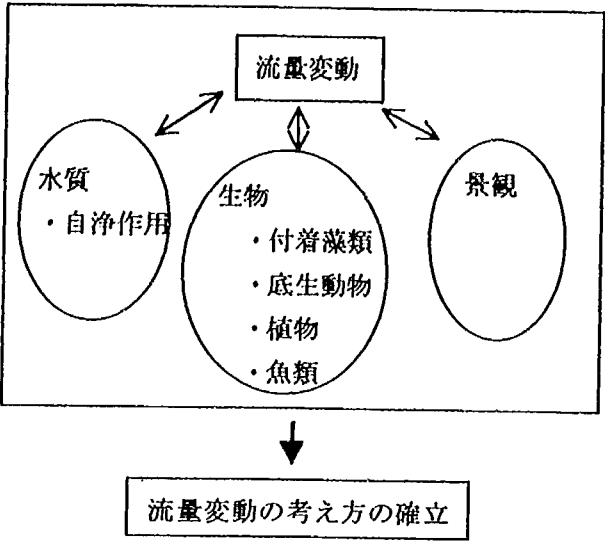
【要旨】

本研究は、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。

10年度は、洪水のフラッシュ効果に着目し、特に付着藻類に果たす役割を整理した。また、自然共生研究センターにおける洪水実験を行い、洪水と付着藻類剥離（量、質）に関する定量的把握を行った。

付着藻類に果たす洪水の役割は、自浄作用への向上効果及び自濁作用防止効果、質の向上効果、景観向上効果がある。

また、洪水実験から、今回の洪水流量においては、洪水前の現存量に係わらず、洪水後ある一定量までは剥離することが明らかになった。質については洪水前後で明瞭な差異が得られなかった。



1. 研究方法

1. 1 洪水が付着藻類に果たす役割

既存研究及び文献より、洪水等の流量変動と付着藻類の関係について整理する。

1. 2 洪水と付着藻類（量、質）への影響の検討

自然共生研究センター実験河川は、任意に洪水を起こすことができる。そこで、洪水前後の付着藻類（量と質）を比較し、洪水が与える付着藻類への影響を定量的に把握する。

調査は、自然共生研究センターB河川とC河川を用いて平成10年2月～3月にかけて計3回実施した。表-1に調査日、調査地点、サンプリング方法を示した。洪水の大きさは1.0m³/s～2.0m³/sで、ピーク時の洪水継続時間は約20分である。

表-1 調査内容

	実験河川	洪水実験日	ピーク流量	調査日		調査地点	サンプリング方法	分析項目
				洪水前	洪水後			
シリーズ1	B河川	2月3日	1.0m³/s	2月2日	2月3日	ハビタット研究ゾーン 平瀬 5地点	・ 30cm×30cm のコ ドレート内の石全 てを採取。	・ 乾燥重量 ・ 強熱減量 ・ Chl-a
	C河川	2月4日		2月3日	2月4日			
シリーズ2	B河川	2月24日	1.5m³/s	2月23日	2月24日			
	C河川	2月25日		2月24日	2月25日			
シリーズ3	B河川	3月17日	2.0m³/s	3月16日	3月17日			
	C河川	3月18日		3月17日	3月18日			

2. 研究成果

2. 1 洪水が付着藻類に果たす役割

洪水が付着藻類に果たす役割を以下に示す。

①質の向上効果

河川生態系において、付着藻類は第一次生産者として重要である。出水は一時的には付着藻類量を減少させるが、同時に、河床への沈殿物を含む活性の低下した藻類を剥離・流下させ、新鮮で活性の高い良質な藻類に更新する効果を有している。そのため、出水は、魚類や底生動物が補食物としての付着藻類の質の向上機能を有している。

②自浄作用への向上及び自濁作用防止効果

付着藻類は自浄作用に寄与する一方、出水によらなくても周期的に増殖と剥離を繰り返し、剥離・流下したものは自濁作用を起こす。そのため、出水による剥離・流下は、出水後の水質浄化作用を向上に寄与する他、自濁作用を防ぐ役割を有している。

③景観向上機能

付着藻類は、水質（水温、pH、濁り、有機物、栄養塩類）に影響を受ける。水質がよくない河川では栄養塩類が多いため、付着藻類量は増加し、景観的にもマイナス要因となる。そのため、適度な洪水は、河床をフラッシュするため、景観向上に寄与する。

2. 2 洪水による付着藻類（量、質）への影響

図-1 は、各洪水実験前後の Chl-a 量（現存量として考える）を平均値で示したものである。全てのケースにおいて洪水後は洪水前より減少し、第 2 回 B 河川を除き有意水準 5% で有意な差が認められ、洪水による付着藻類の剥離・流下が把握できる。洪水前は、各ケースで Chl-a 量はばらついてはいるが、洪水後のばらつきは小さく、洪水前の値に係わらず約 20~30mg/m² に集中している。このことは、洪水前の付着藻類の現存量によらず、剥離・掃流しないで残る現存量はほぼ一定であることを示唆するものである。図-2 は、洪水前の Chl-a 量と掃流率（洪水前後で剥離した割合）を示したものである。洪水前の Chl-a 量が大きいほど掃流率は大きいことがわかる。

洪水の規模と掃流量の関係については、洪水流量が最も小さい 1m³/s の場合でも掃流率は 71% と最も高く、今回行った 1~2m³/s 程度の洪水では、付着藻類の剥離・掃流に明瞭な違いはみられない。今後、洪水規模と付着藻類の剥離・掃流の関係を明らかにするためには、さらに小さい規模や大きい規模の実験を行い、データを積み重ねていく必要がある。

洪水前後の質の変化は、強熱減量と AI（Autotrophic Index：藻類の有機物量とその藻類に含まれる Chl-a 量との差で比）について検討したが、前後の明瞭な差異は得られなかった。評価項目などの検討が必要になる。

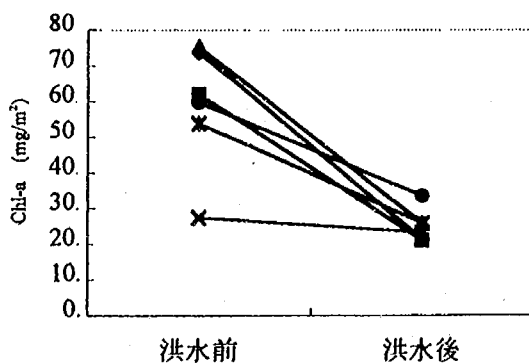


図-1 洪水前後の Chl-a 量の変化

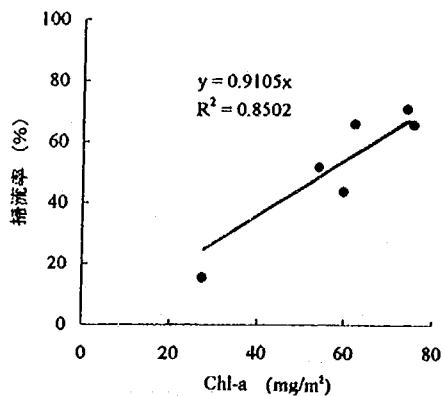


図-2 洪水前の Chl-a と掃流率

(島谷, 皆川)

3.8 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】

湖岸帯の植生の減少が多くの湖沼で問題となっている。その原因の一つは波浪による浸食であるといわれている。そこで、人工浮島を消波に用いて植生を保全する研究を行っている。10年度は霞ヶ浦に設置した実大規模の消波浮島の効果を明らかにするために、前年度に引き続き波浪・植生帯調査を行った。

1. 研究方法

1.1 実験地点

実験地点は霞ヶ浦（西浦）左（東）岸約6.2km付近の麻生町島並地区である。この沿岸には沖合方向に15m程度、沿岸方向に60m程度の植生帯があり、ヨシが優先している。

ここに、沿岸方向の長さ50m、幅10mほどの非連続型の消波浮島を設置した（図-1）。

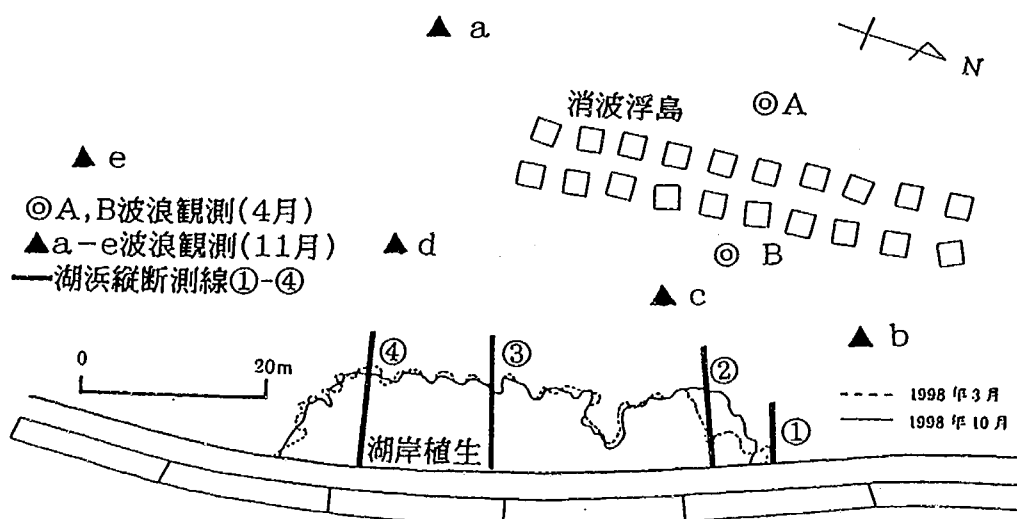
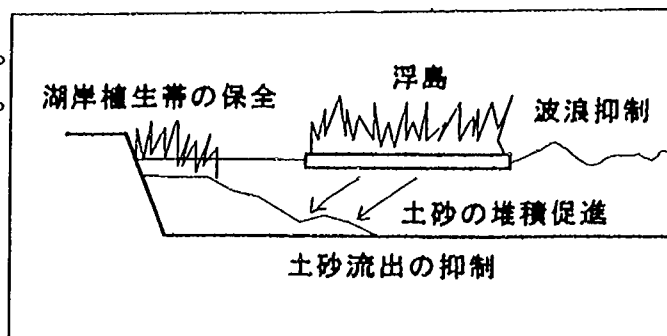


図-1 調査地点位置図

1.2 波浪調査

消波の確認および波浪推算の精度を確認するために波浪の現地観測を行った。波浪観測は平成10年4月に図-1に示すA,B地点で、また同年11月にa～e地点でそれぞれ2回行った。フロートの動きをビデオ撮影し、撮影結果を解析して波高・周期を測定して有義波高・周期を算定した。また、波向は現地で目視観測した。

1.3 湖岸植生帯調査

消波浮島の植生帯復元効果を把握するために、平成10年10月及び11年3月に植生調査を行った。図-1に示す湖岸植生帯および群落分布について、ラジコンヘリから撮影した空中写真を判読した。さらに現地踏査により湖岸植生の種類・繁茂域について詳細調査を行った。また、水中部の浸食状況を確認するために、湖岸植生帯の縦断形測量を図-1に示す4測線で行った。

2. 研究結果

2.1 波浪調査

消波浮島の消波性能は風向によって大きく異なることがわかった。図-2, 3にそれぞれ4月と11月の調査結果を示す。横軸には H_{max} (最大波)、 $H_{1/10}$ (1/10最大波)、 $H_{1/3}$ (1/3最大波) をとり、縦軸は波高値ならびに消波率を示している。入射波にあたるのが地点Aとeであり、地点Bとcは消波浮島背後の地点である。4月の調査では(図-2)、風向が南南西であり、ほぼ南北方向に設置された消波浮島に対し、平行に近い方向から波が寄せたため、消波率は約5%にとどまった。また、最大波においては消波率が負の値となっているのは、反射波の影響と考えられる。一方、風向が南西であった11月の調査(図-3)では、消波率が約40%であった。風向がやや南寄りであり、反射波の影響等も考えると、本浮島の設計消波率である53%に近い消波効果を有することが確認できた。

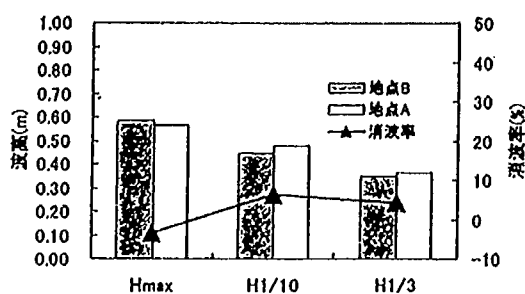


図-2 消波効果(4月)

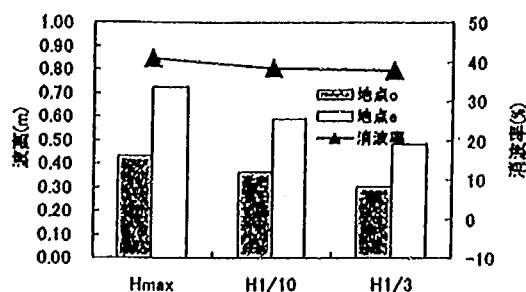


図-3 消波効果(11月)

2.2 湖岸植生帯調査

調査地点では湖岸から沖に幅約15mの植生帯が見られ、そのうち沖側5mほどが水中にある。また湖岸に沿った長さは約60mである。植生はヨシが優先しており、貴志川にササ類、ヤナギ類が生育し、セイタカアワダチソウ、タネツケバナ、スイバなどが見られる。

平成10年3月(9年度調査)と10月及び平成11年3月の湖岸植生帯の面積を比較すると、消波浮島設置前の平成10年3月が417 m^2 、同年10月が425 m^2 、11年3月が431 m^2 と1年間で3.4%植生帯の増加が見られ、消波浮島の効果が確認される。

また、3月から10月の間、湖岸植生帯の南側で植生帯が減少したのに対し、北側では増加した。逆に10月から3月の間は湖岸植生帯の北側が減少し、南側が増加していた。夏季に南側で植生帯が狭まるのは、南寄りの風が吹いて浮島の南側が強い波浪を受けることに起因すると推察される。冬季はこれと逆である。なお、植生帯の北側で、夏季において30 m^2 ほどの大きな増加が見られたが、この地点は消波浮島のほぼ中央の背後であり、もともと過去に植生帯が存在していたため回復が早かったと考えられる。一方、冬季においては、直立護岸に沿って発生する沿い波により、護岸に近接した北側植生帯が浸食される傾向が見られた。

2.3 まとめ

- ①消波浮島の消波率は観測で40%程度、反射・回折波の影響を除くと50%程度であり、設計値をほぼ満足した。
- ②消波浮島によって植生帯は1年間で面積の3.4%が復元した。
- ③冬季の季節風により護岸に沿って発生する沿い波を抑制することはできず、植生帯の北側の浸食は進行した。

(島谷, 中村, 依田)

3.9 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15

担当：環境計画研究室

【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、10年度は土師ダムでの隔離水界実験を行った。天候が実験に相応しくなく藻類の増殖が生じなかったため明瞭な差異は認められなかったが、表面の25%以上を人工生態礁で覆うことで透明度が上がるのが分かった。

1. 研究方法

1. 1 人工生態礁

湖沼では、植物プランクトン、動物プランクトン、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、植物プランクトンの異常増殖の抑制をねらいとしたものである。

土師ダムで試験的に設置した人工生態礁の概略構造を図-1に示す。人工生態礁の上部は、ヤシマット等の植生基盤を水深30～50cmに沈め、そこにスイレン等の浮葉植物を植え付け、それを基質として糸状藻類が生えるような構造とした。これは、動物プランクトンの生息空間の創造、糸状藻類による植物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た。

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い、縦横各10m、水深4mの隔離水界を設置し現地実験を行った。

各隔離水界は、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、コントロールの計6基とした。

人工生態礁の大きさによる影響の違い及び水界内栄養塩の収支の解明を目的に、実験期間中水質及びプランクトンの種類・数について定期調査を行い、実験終了時には、隔離水界内の全生物量を測定した。なお、隔離水界は、ダム湖内と水質を同等に保つため定期的に液肥を添加している。

2. 研究結果

10年度は、ダム湖本体でもアオコの発生がほとんど見られない等、気象状況は実験に適してはいなかったが、図-2に示すように水生植物を植栽した人工生態礁設置区画＞糸状藻類のみの区画＞対照区の順に透明度が高いことが分かった。

各水界内の水理状況の一例として、8月25日（晴れ）の観測結果を示す。図-3に見られるように各水界とも水温についてはほとんど変化がないものの、図-4のようにpHで比較した場合は透明度と同様

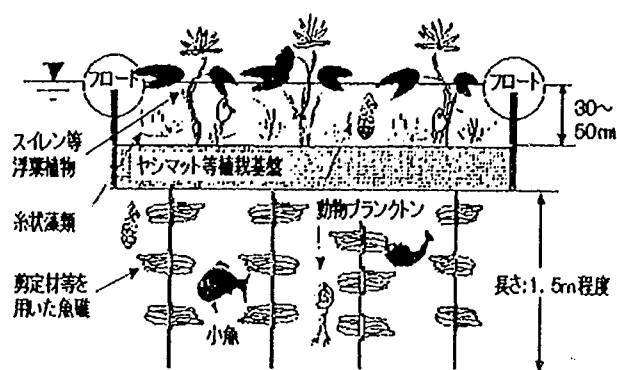


図-1 人工生態礁の模式図

に異なった傾向が見られた。

pHは植物プランクトンの活性と結びついており（光合成が活発に行われるほど二酸化炭素が多く消費されpHは上がる）図一2及び4により、透明度の差は植物プランクトンによるものと推察される。

2. 1人工生態礁の想定される効果

現段階では支配的な人工生態礁の効果を特定するに至っていないが、以下の効果が複合的に作用して水質改善に寄与していると考えらる。

①糸状藻類等の栄養塩の競合

図一5は、実験終了時に隔離水界の各部所毎に生物量を測定し、全リン換算した結果である。概算ではあるが、全体のリンの80%が水中ではなく、堆積物量及び壁面に生えた藻類量（112日間の積算値）等人工生態礁を設置する事で水中のリンが生物体に取り込まれたことがわかる。

②動物プランクトン等による捕食

定量的な評価は容易でないが、動物プランクトンによる植物プランクトンの捕食効果は十分に想定されるところである。堆積物量には動物プランクトンの排泄物も含むため、人工生態礁設置区画で堆積物量が増加していることは、動物プランクトンの捕食による影響とも考えられる。

③太陽光の遮へい効果

隔離水界は、人工生態礁によって最大水表面の36%が遮へいされている。各水界で明確な水温差は認められなかったが、植物プランクトンの現存量が太陽のエネルギー量によって規定されるとすれば、この太陽光の減少分が遮へい効果としてこれを減少させると考えられる。

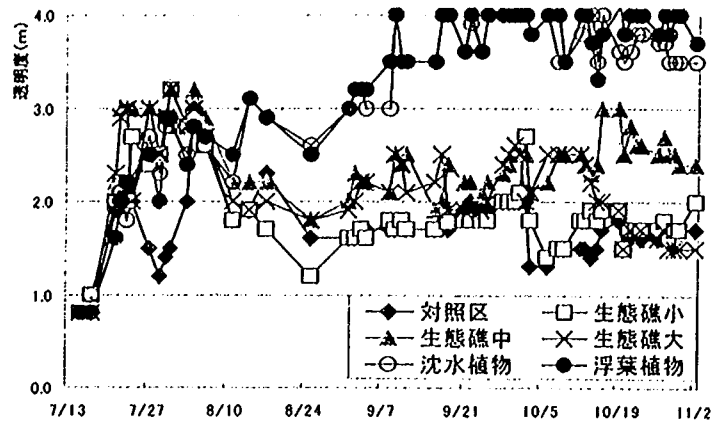
④糸状藻類の藍藻への影響

ある植物が近傍で他の植物が増殖するのを防ぐ現象（アレロパシー）が生じていた可能性もある。

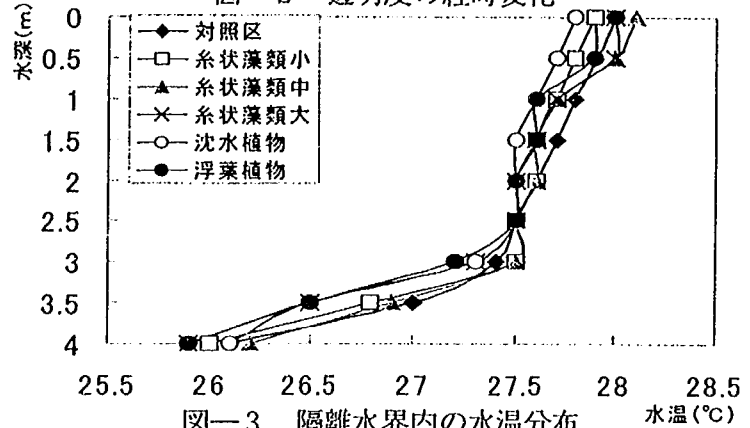
3. まとめ

隔離水界実験により、人工生態礁による物理的な影響の一部は計測できた。今後現地実験を継続し、上記効果、特に生物的な効果の定量的な把握に努め、環境負荷の少ない富栄養化対策として技術確立を目指す。

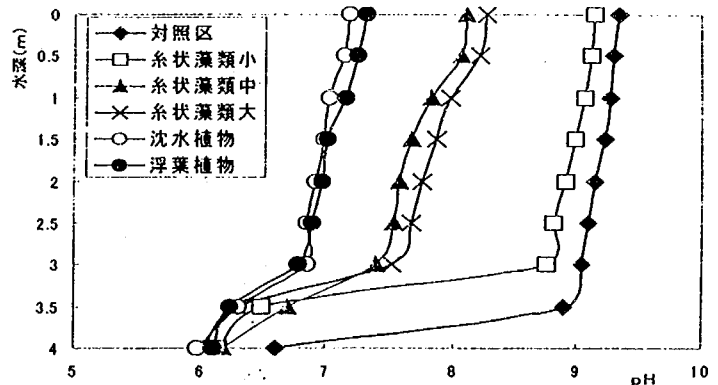
（寺川，天野，福渡）



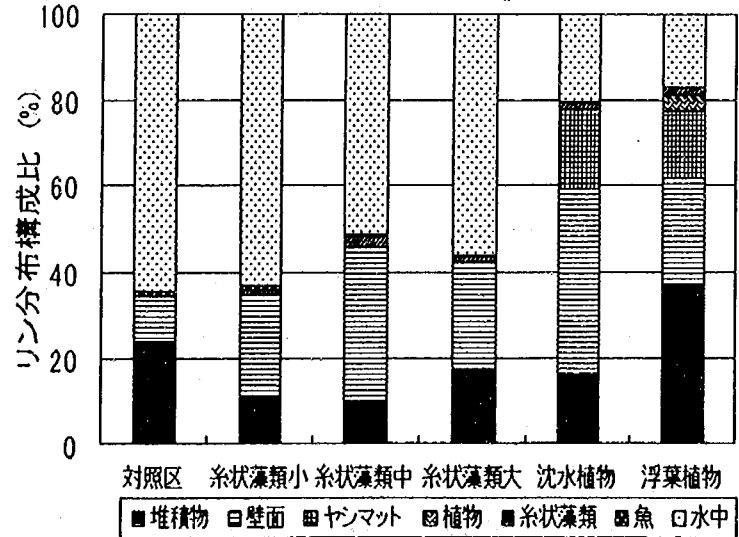
図一2 透明度の経時変化



図一3 隔離水界内の水温分布



図一4 隔離水界内のpH分布



図一5 隔離水界内のリン分布

研究期間：平8～

担 当：河川環境研究室

【要旨】

本研究では魚類の縦断方向と横断方向の移動に着目し、縦断方向の移動の分断回避を目的とした魚道と洪水時の避難場としてのワンドについて、現地調査、実験、事例収集等により研究を行う。

本年は全国における堰、頭首工等に設置されている魚道について溯上実態調査事例を収集し、魚道タイプによる魚類の溯上傾向の違いを、各魚道毎の溯上総数の算出により比較分析した。これにより多種の魚類の溯上が可能か、又は底生魚の利用も可能かという観点からは、デニール式<アイスハーバー式、アイスハーバー式<粗石付斜路式となる結果を得た。また、3タイプ並列（粗石付斜曲面式、アイスハーバー式、粗石積斜路式）の場合でも粗石付のものは同様の傾向があることが認められた。

河川の物理空間と魚類の行動	
↓	↓
縦断方向 「魚道」	横断方向 「ワンド」
↓	↓
魚道に対する知見 の取りまとめ	ワンドの保全手法 の確立

1. 研究方法

1.1 溯上調査事例収集

全国の直轄、水公団、都道府県その他が管理する堰等に設置されている魚道について、①溯上、降下調査実施の有無、②調査項目の詳細さ（時間、魚種、魚数、水理量等）、③経年実施の有無、④調査結果公表の可否等の項目に該当する魚道、さらに魚がのぼりやすい川づくり推進事業実施河川等、可能な限り調査資料を収集した。

1.2 対象河川の選定及び対象河川の概要

上記の中から、魚道のタイプ別に評価が可能で、同一地点または近接して異なるタイプの複数の魚道が設置されているA川（10km区間で3タイプ併設×4地点、2タイプ併設×1地点）、M川（2タイプ魚道併設×1地点）、O川（1タイプ魚道×2地点）を選定した。

1.3 対象魚道の概要

選定した河川（地点）に設置されている魚道は、①階段式、②デニール式(以下「D式」と記す。)、③アイスハーバー式(以下「I式」)、④粗石付斜路式(以下「S式」)、⑤粗石付斜曲面式(以下「SK式」)、⑥粗石積斜路式(以下「SS式」)、⑦扇状式の7タイプである。

階段式は水路内に隔壁を数断面有するタイプで各隔壁間がプール状になる。D式は阻流板式魚道ともいわれ、魚道内流速の低減を目的として多数の粗流板を設置したものである。I式は比較的良好に見える階段式の隔壁中央部に非越流部を設け、隔壁下流側に低流速域を設けたものである。S式は水路底面を斜めにし、かつ粗石を流速低減効果が望める程度に配置したものである。SK式は水路底面の勾配が左右で異なり、かつS式と同様に粗石を配した物である。SS式は階段式のプール中に粗石を敷詰めたものである。扇状式は水路平面形状を扇形になった階段式のもので、魚道下流側流速の低減効果をねらったものである。

1.4 溯上調査実施方法

各河川における調査方法は表-1による。なお、いずれの場合も水路上流側に仕掛網を設置し、昼間調査の場合は1時間毎に溯上魚の計数計測を行い、夜間調査(24時間調査時)の場合は前日夕方から翌日朝

方まで継続して仕掛網を設置し、朝方にまとめて計数計測を行っている。

表-1 各河川における調査実施の方法

河川名	実施年	回数	時間(時間帯)
A 川	H6~H9	3回~8回(調査地点で異なる)	8hr(10h~翌18h)
M 川	H8	9回(大潮時8回、小潮時1回)	24hr(17h~翌17h)
O 川	H7,8	22回(H7:10回 H8:12回)	24hr(17h~翌17h)

1.5 分析方法

分析は、流量や偶然性の影響を避けるため全調査期間で得た溯上数の合計値を用いた。なお、魚道の位置関係による影響も考慮すべき項目であると考えられるが、ここでは分析の対象としない。

2. 研究結果

M 川の結果を図-1、O 川の結果を図-2 に示す。

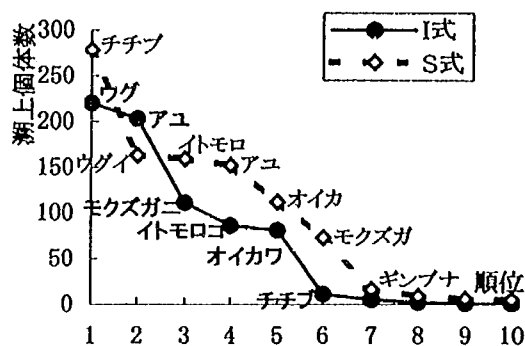


図-1 M川 魚道別溯上個体数の順位

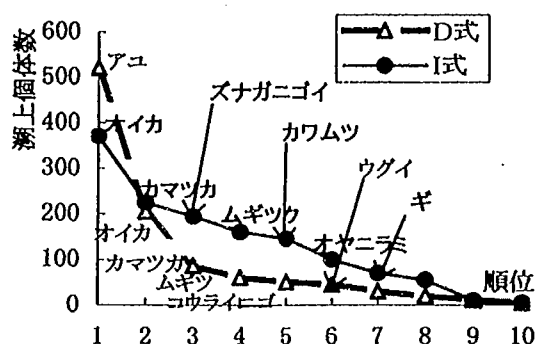


図-2 O川 魚道別溯上個体数の順位

M 川の場合、I 式は溯上数が多い順にウグイ、アユ、モクズガニ、イトモロコ、オイカワと比較的遊泳力があると考えられる魚種が多い事が分かる。比較して S 式の場合、同様にチチブ、ウグイ、イトモロコ、アユ、オイカワ、モクズガニ、ギンブナの順となり、底生魚のチチブの溯上が一番多い事が分かる。

O 川の場合、D 式はアユ、オイカワ、カマツカ、ムギツク、コウライニゴイ、ウグイの順。I 式はオイカワ、カマツカ、ズナガニゴイ、ムギツク、カワムツ、オヤニラミ、ギギの順。D 式では 1~3 番目の魚種が溯上魚の総数の約 8 割を占め、アユ、オイカワといった遊泳力のある魚種がこれらの 7 割にもなる。一方の I 式は 2~3 番目の魚種は底生魚であることに加え、アユ以外の上位 7 種では同種の魚類の溯上数が D 式の溯上数を上回る傾向にある。特筆すべきはオヤニラミ、ギギの溯上であろう。

A 川においても同様の比較を行ったが、他の 2 河川に比べて回数が少ない為又は、元々生息している魚種も 20 種程度と少ない為はっきりとした傾向はつかめなかった。しかし、I 式ではアユ、ウグイ、オイカワ等の遊泳魚の溯上が多く、SS 式ではシマドジョウの溯上が目立って多数であった。

3. まとめ

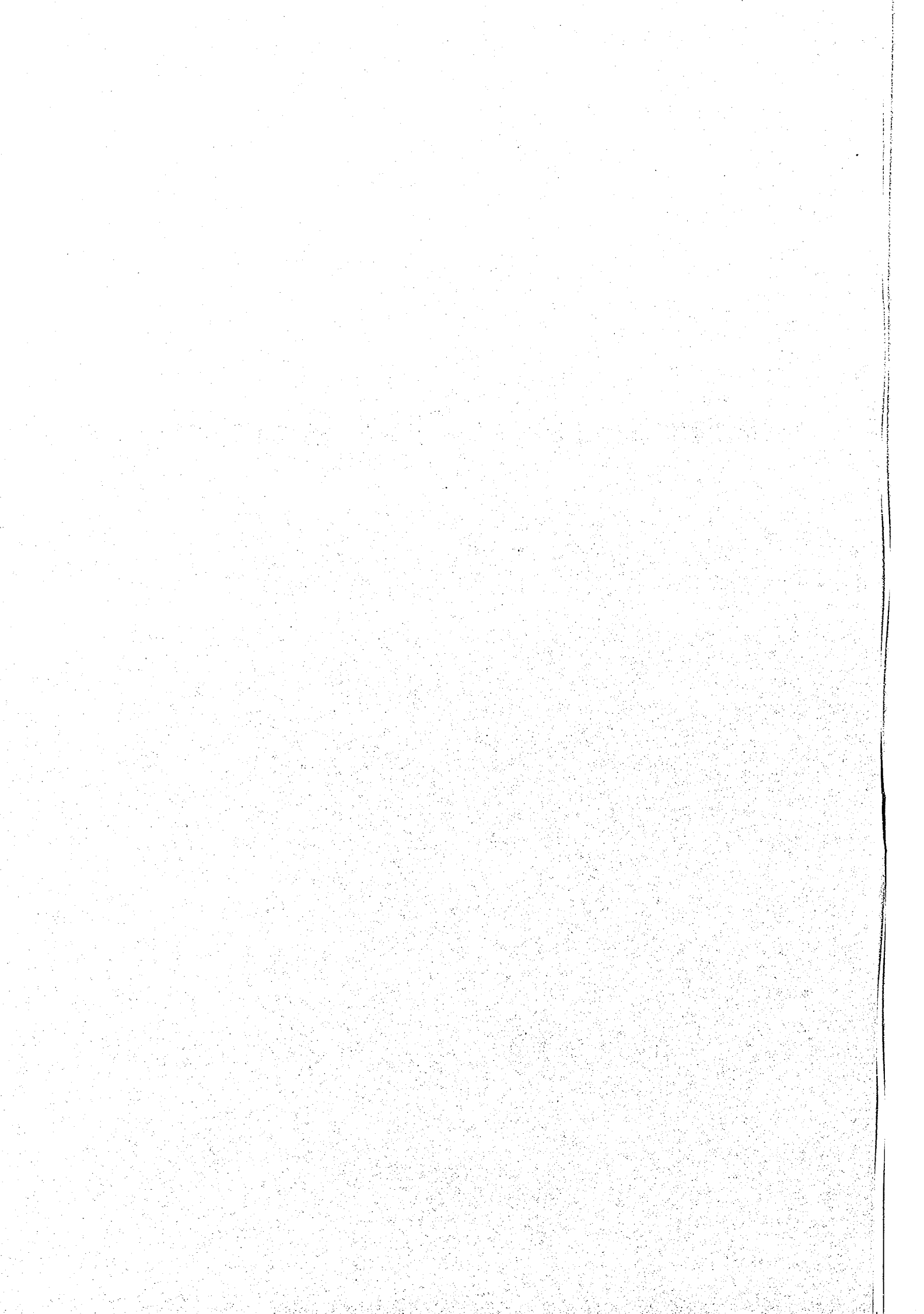
今回対象とした全魚道の溯上総種数は 45 種 5,279 個体、甲殻類も含めれば 48 種 5,473 個体である。比較的遊泳力が小さいと考えられるオヤニラミや底生魚のギギ、アカザ、ドジョウ類の溯上も相当数確認されており、これら底生魚への配慮の参考となり得るであろう。しかし今回は 3 河川のみでデータで分析していることや、魚道・河川の平面形状、魚道幅なども溯上数や種数に関係すると考えられる為、今回の分析結果が必ずしも一般的に成立するとは限らないことに留意すべきであろう。

4. 主な研究成果物

林貴宏、島谷幸宏、皆川朋子:魚道の溯上調査の分析—3 河川の事例より—、応用生態工学第 2 回研究発表会資料、1998

(島谷、皆川、林、傳田)

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



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

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低下させるとともに、冷房等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、人工排熱の増加や都市構造物のコンクリート・アスファルト化の進行、熱調整機能を有する水辺や緑地等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って、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、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って化石燃料の消費抑制のほか、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

- ① 都市における熱循環の実態を明らかにする。
- ② 緑被や水域の気温緩和効果のメカニズムを解明する。
- ③ 都市の熱環境のモニタリング手法と予測手法を開発する。
- ④ ヒートアイランド現象を軽減するために有効な対策メニューを提言する。

3. 達成目標

都市空間での気温形成に果たす社会基盤施設の役割を明らかにし、ヒートアイランド現象を軽減する対策を提示するための調査研究を行う。

- ① 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する。
- ② 緑被や水域の気候緩和効果を定量的に評価する。
- ③ 保水性舗装の水分、熱特性の改善及びその気温緩和効果の評価を行う。
- ④ 未利用エネルギーの活用技術の検討、評価を行う。
- ⑤ 対策の効果と費用の検討を行い、盛夏の気温を1℃から3℃程度低下させるためのハード、ソフト両面からの具体的な施策を提言する。

4. 社会的な効果

- ① 都市域における熱環境の改善や保全が図られる。
- ② 都市空間における排熱やCO₂排出量の削減を進めることができる。
- ③ ヒートアイランド現象の軽減にとどまらず、大気環境が改善される。
- ④ 持続可能型の都市改造が進められる。

—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

4.1 ヒートアイランド現象の実態及び影響の把握

- (1) 都市における屋上緑化可能地の推定調査…………… (緑 化 生 態 研 究 室) … 104
- (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) … 110

4.2 社会基盤等の活用と対策技術

- (1) 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……………
〔都市河川研究室〕 … 113
〔化学研究室〕
- (2) 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…………… (化学研究室) … 117

4.1 (1) 都市における屋上緑化可能地の推定調査

研究期間：平10

担 当：緑化生態研究室

【要旨】

ヒートアイランド現象の発生する都市内において、緑地は低温域を形成することが知られており、都市緑化の推進がヒートアイランドの軽減策として期待されているところである¹⁾。しかしながら、我が国の大都市では、すでに土地利用は過密状態にあり、公園整備などによる緑地の創出は、用地の確保において、物理的にも予算的にも困難な点が多いといえる。

一方、屋上や橋梁上、壁面などの無土壌地の緑化、いわゆる特殊緑化といわれる分野の技術開発が進展しており、従来、緑化が困難と考えられていた空間での緑地の創出が可能となってきた²⁾。用地の取得の困難な都市においては、緑化用地として、このような特殊空間が着目されるところであり、特に屋上緑化など建築物上での緑化は、植物による低温域の形成のほか、植栽基盤の形成が建物の断熱にも寄与し、冷房効率の向上の点からも、ヒートアイランドの抑制に貢献するものとして期待されている³⁾。

本調査では、このような位置付けを有する特殊空間緑化の中から、屋上緑化に着目し、ヒートアイランド軽減のための緑化政策検討の基礎資料とすることを目的として、国内の11都市において、緑被地の現存量と屋上緑化が可能な空間の総量の推定を空中写真を用いて行い、屋上緑化により期待される緑被増加量を算出した。また、既存行政資料を用いた簡易方法による推定を行い、空中写真による推定値との比較からその有効性を検証した。

その結果、空中写真を用いた推定からは、屋上緑化により都市の緑被が平均13%増加するとされた。また、既存行政資料を用いた簡易方法では、有効性の高い推定値を得ることはできなかった。

1. 調査方法

1.1 対象都市と区域

各地方を代表する大都市として、札幌、仙台、横浜、名古屋、大阪、神戸、広島、高松、北九州、福岡、東京区部の11都市を選定し、都市計画において規定される市街化区域を推定の対象区域とした。

1.2 緑被地現存量の推定方法概要

緑被地現存量は、航空写真により判読が可能な、高木の樹冠により被覆される土地の面積（高木緑被量）を求めることとした。そして、市街化区域全域にわたる判読は労力の点から困難であるため、土地利用形態が類似すると考えられる用途地域毎に、複数の調査区を設定し、調査区の高木緑被判読量から単位面積あたりの高木緑被量（原単位）を算出し、各用途地域の面積を乗じることにより、市街化区域全体の高木緑被量を算出することとした。

調査区の設定に際しては、市街化区域全域の空中写真による概査から、典型個所とされる地点を選定し、1ha（100m×100m）を標準とする調査区を、各用途地域あたり3ヶ所（東京都区部については各5ヶ所）を設定した。使用した空中写真は、1976～1990年の国土地理院撮影カラー空中写真である。また、都心部と周辺部、平野部と台地・丘陵部などの差異の平準化が図れるように、調査区の配置に配慮した。なお、都市公園には緑被が集散的に存在するため調査区に含めず、別に都市公園の原単位を設定し、用途地域の推定量に加えることとした。

1.3 屋上緑化可能地の推定方法概要

緑化可能性の高い建築物は、躯体構造が木造などに比べて堅固なコンクリート造や重量鉄骨造と考えられる。また、屋根構造については、瓦・スレート・金属葺などの軽荷重屋根より、コンクリートやALC（コンクリー

表-1 調査対象都市の用途地域および都市公園面積(1990)

(単位:ha)

都市名	第1種住居専用地域	第2種住居専用地域	住居地域	近隣商業地域	商業地域	準工業地域	工業地域	工業専用地域	都市公園面積
札幌	8,611	5,235	5,157	1,292	774	2,445	344	246	1,246
仙台	5,112	2,044	5,527	938	892	810	340	1,441	631
横浜	13,815	4,338	6,235	1,372	1,825	1,386	1,738	1,827	977
名古屋	5,843	2,365	10,438	2,425	2,351	3,436	2,635	642	1,135
大阪	0	2,488	6,808	418	3,244	4,349	996	2,147	771
神戸	7,388	4,054	3,681	643	631	2,116	653	1,104	1,958
広島	2,963	1,986	5,658	756	591	1,238	557	296	573
高松	747	1,094	1,311	308	220	752	143	158	190
北九州	3,192	3,266	5,176	765	1,137	1,366	447	3,645	851
福岡	3,951	2,351	4,690	303	1,351	1,670	584	41	867
東京区部	11,895	12,025	10,352	4,001	6,228	9,861	1,303	1,163	2,753

表-2 調査区高木緑被面積の1haあたり換算値

(単位:㎡/ha)

都市名	第1種住居専用地域	第2種住居専用地域	住居地域	近隣商業地域	商業地域	準工業地域	工業地域	工業専用地域	平均
札幌	1,193	465	743	301	188	307	518	194	489
仙台	608	2,185	531	304	513	266	207	136	594
横浜	1,005	1,114	704	455	189	275	204	136	510
名古屋	1,283	1,336	1,076	390	417	426	258	759	743
大阪	—	667	107	69	124	158	188	92	201
神戸	1,190	795	1,509	197	117	194	137	147	536
広島	1,309	1,714	752	485	492	450	620	585	801
高松	1,014	1,050	995	529	473	865	537	548	751
北九州	1,244	1,102	549	617	119	655	342	140	596
福岡	1,401	1,119	1,331	260	343	365	624	177	703
東京区部	640	708	256	298	306	106	236	382	367

ト床板) などの中・重荷重屋根の方が適しており、屋根傾斜は2/10程度までは緑化が容易と考えられる。

ここでは、このような条件を備えた建築物の屋根を「陸屋根等」と呼び、緑被の推定と同じ調査区、空中写真により、判読可能な10m×10m以上の屋根を抽出し、緑被の場合と同様に原単位を設定して、市街化区域での総量を推定することとした。なお写真判読では同時に棟数についても計数した。

また、より簡易な推定方法として、東京区部を除く10都市について、固定資産資料等の既存の行政資料を用いた推定を試行し、その妥当性について検討を加えた。

2. 調査結果

表-3 高木緑被面積推定値

(単位:ha)

都市名	第1種住居 専用地域	第2種住居 専用地域	住居地 域	近隣商 業地域	商業 地域	準工業 地域	工業 地域	工業専 用地域	小計	都市公 園	A 合計
札幌	1,027	243	383	39	15	75	18	5	1,805	374	2,179
仙台	311	447	293	29	46	22	7	20	1,173	189	1,363
横浜	1,388	483	439	62	34	38	35	25	2,506	293	2,799
名古屋	750	316	1,123	95	98	146	68	49	2,644	341	2,985
大阪	—	166	73	3	40	69	19	20	389	231	620
神戸	879	322	555	13	7	41	9	16	1,843	587	2,431
広島	388	340	425	37	29	56	35	17	1,327	172	1,499
高松	76	115	130	16	10	65	8	9	429	57	486
北九州	397	360	284	47	14	89	15	51	1,258	255	1,513
福岡	554	263	624	8	46	61	36	1	1,593	260	1,853
東京区部	761	851	265	119	191	105	31	44	2,367	826	3,193

表-4 調査区陸屋根等面積の1haあたり換算値

(単位:㎡/ha)

都市名	第1種住居 専用地域	第2種住居 専用地域	住居地 域	近隣商業 地域	商業地域	準工業地 域	工業地域	工業専用 地域	平均
札幌	43	136	100	365	3,498	963	44	51	650
仙台	51	0	308	472	887	210	0	0	241
横浜	245	257	432	855	1,504	255	761	401	589
名古屋	84	355	147	480	1,029	274	980	689	505
大阪	—	203	91	855	883	682	1,213	84	573
神戸	65	496	168	357	1,965	430	1,535	736	719
広島	45	280	293	641	1,069	900	1,158	729	639
高松	189	39	98	630	1,145	36	1,004	399	443
北九州	42	207	240	503	1,378	288	438	347	430
福岡	104	44	34	1,531	1,895	462	773	376	652
東京区部	128	434	560	800	2,645	958	670	390	823

2. 1 高木緑被面積推定

表-1に調査対象都市の用途地域別面積と都市公園面積を示す。各都市、各用途地域における調査区の高木緑被量判読結果を平均し、1haあたりの値に換算し、原単位としたものが表-2である。この原単位に表-1の面積を乗じて合算し、市街化区域の総量を算出したものが表-3である。なお、都市公園の高木緑被量は、建設省が実施した1995年度末の全国調査資料から、市街化区域に位置することが多い住区基幹公園と都市基幹公園の樹林面積率の値を平均し、一律に公園面積の30%とした。

2. 2 空中写真からの屋上緑化可能面積(陸屋根等面積)推定

緑被の場合と同様に原単位を算出したものが表-4である。また、同様に表-1の値を用いて市街化区域総量を推定したものが表-5である。ただし、一般に屋上には設備機器等が置かれ緑化不可能な部分があるため、並木

表-5 陸屋根等面積推定値

(単位:ha)

都市名	第1種住居 専用地域	第2種住居 専用地域	住居地 域	近隣商業 地域	商業地域	準工業 地域	工業地域	工業専用 地域	B 小計
札幌	37	71	52	47	271	235	2	1	716
仙台	26	0	170	44	79	17	0	0	337
横浜	338	111	269	117	274	35	132	73	1,352
名古屋	49	84	153	116	242	94	258	44	1,041
大阪	—	51	62	36	286	297	121	18	870
神戸	48	201	62	23	124	91	100	81	730
広島	13	56	166	48	63	111	65	22	544
高松	14	4	13	19	25	3	14	6	99
北九州	13	68	124	38	157	39	20	126	586
福岡	41	10	16	46	256	77	45	2	494
東京区部	152	522	580	320	1,647	945	87	45	4,299

4) の研究結果から、緑化可能な部分を屋上面積の86%とし、さらに都市公園の場合と同様にその30%が高木により被覆されると仮定して、すべての陸屋根等が緑化された場合の高木緑被面積を算出した。算出結果を現存緑地量(高木緑被量推定値)と合わせ表-6に示す。

表-6 屋上緑化による高木緑被の増加率

都市名	A 高木緑被 面積推定 値(ha)	B 陸屋根等 面積推定 値(ha)	C 緑化可 能面積 (ha)	D 緑被 面積 (ha)	屋上緑化 による緑被 の増加率 D/A
			$B \times 0.86$	$C \times 0.3$	
札幌	2,179	716	616	185	0.08
仙台	1,363	337	290	87	0.06
横浜	2,799	1,352	1,163	349	0.12
名古屋	2,985	1,041	896	269	0.09
大阪	620	870	748	224	0.36
神戸	2,431	730	628	188	0.08
広島	1,499	544	468	140	0.09
高松	486	99	85	26	0.05
北九州	1,513	586	504	151	0.10
福岡	1,853	494	425	127	0.07
東京区部	3,193	4,299	3,697	1,109	0.35

屋上緑化による緑被の増加可能性は、11都市において5%~36%、平均13%となり、大阪(36%)、東京区部(35%)などの巨大都市でその貢献度合いが大きいという推定結果を得た。

2. 3 既存行政資料からの屋上緑化可能面積(非木造建築物屋根面積)推定

推定に用いる行政資料は、都市計画関係の調査資料のほか、概要調書として公開される固定資産資料である。

都市計画関係の調査により建ぺい率が明らかにされている場合、市街化区域面積に建ぺい率を乗じることにより、市街化区域の総屋根面積の近似値が求められる。一方、固定資産概要調書には、市全域の建築物の木造、非木造別の延床面積と棟数が記載されており、ここでは、非木造建築物が、上記の陸屋根等に相当するものと考え、固定資産資料を用いて市街化区域の総屋根面積を木造と非木造に按分することを試みた。

まず、市全域の値である固定資産資料の各値をDID人口(市街化区域人口とほぼ同等)の比率を用いて、市街化区域の値に換算したものを表-7に、また、市街化区域総屋根面積の算出結果を表-8左欄に示す。ただし、建ぺい率の調査資料は東京区部(1990年、30%)と札幌(1989年、20%)しか得られなかったため、大阪につい

表-7 市域値(固定資産資料)から市街化区域値への変換(1991)

都市名	市域(固定資産資料より)				DID 地区 人口率	市街化区域(市域×DID 人口率)			
	木造延床 (ha)	非木造延 床(ha)	木造棟数 (万棟)	非木造棟 数(万棟)		a 木造延床 (ha)	b 非木造延床 (ha)	c 木造 棟数 (万棟)	d 非木造棟 数(万棟)
札幌	4,676	3,642	32.9	8.0	0.94	4,395	3,423	30.9	7.5
仙台	2,700	2,553	37.9	8.0	0.84	2,268	2,145	31.8	6.7
横浜	5,628	6,412	56.0	16.5	0.96	5,403	6,156	53.8	15.8
名古屋	4,590	6,504	53.0	19.8	0.97	4,452	6,309	51.4	19.2
大阪	4,490	9,136	69.4	38.7	1.00	4,490	9,136	69.4	38.7
神戸	2,460	3,771	28.2	21.4	0.92	2,263	3,469	25.9	19.7
広島	2,589	2,642	30.1	8.6	0.87	2,252	2,299	26.2	7.5
高松	894	913	12.2	4.0	0.68	608	621	8.3	2.7
北九州	2,132	2,640	25.0	9.6	0.89	1,897	2,350	22.3	8.5
福岡	2,440	3,272	25.8	7.8	0.94	2,294	3,076	24.3	7.3

表-8 階数の想定による1棟あたり屋根面積の算定

都市名	市街化区域屋根面積の算定			木造屋根面積の算定				非木造屋根面積の算定			
	E	F	G	a	H	I		b	J	K	L
	市街化区 域面積 (ha)	建ぺい 率	市街化区 域屋根面 積(ha) E×F	木造延床 (ha)	想定階 数	総屋根面 積(ha) H/a	1棟あた り屋根面 積(m ²) I/c	非木造 延床(ha)	計算階 数 b/K	総屋根 面積 (ha) G-I	1棟あた り屋根面 積(m ²) K/d
札幌	24,104	0.20	4,821	4,395	1.2	3,663	118	3,423	3.0	1,158	154
仙台	17,104	0.20	3,421	2,268	1.2	1,890	59	2,145	1.4	1,531	228
横浜	32,536	0.20	6,507	5,403	1.2	4,502	84	6,156	3.1	2,005	127
名古屋	30,135	0.20	6,027	4,452	1.2	3,710	72	6,309	2.7	2,317	121
大阪	20,450	0.30	6,135	4,490	1.2	3,742	54	9,136	3.8	2,393	62
神戸	20,270	0.20	4,054	2,263	1.2	1,886	73	3,469	1.6	2,168	110
広島	14,045	0.20	2,809	2,252	1.2	1,877	72	2,299	2.5	932	125
高松	4,733	0.20	947	608	1.2	507	61	621	1.4	440	162
北九州	18,994	0.20	3,799	1,897	1.2	1,581	71	2,350	1.1	2,218	260
福岡	14,941	0.20	2,988	2,294	1.2	1,911	79	3,076	2.9	1,077	147

ては東京区部の値、他の都市については札幌の値を代用した。

次に、木造建築物の階数を設定し、延床面積を階数で除することにより木造屋根面積を求め、市街化区域屋根面積から減じたものを非木造屋根面積とした。木造建築物の階数は任意に設定したが、設定の条件は、木造建築物の階数は1以上となること、また、非木造建築物の総屋根面積から逆算して得られる非木造建築物階数

は木造階数を上回ることを条件に1.1～1.6の範囲で試行を繰り返し、最も条件に当てはまる値として1.2を採用した。しかし、この場合でも北九州の非木造階数が木造階数を下回る状態が現れている（表-8中欄、右欄）。

このようにして得られた推定値と空中写真により得られた推定値を比較したものが表-9である。両方法により得られた値には、総面積、棟数、1棟あたり規模いずれにも大きな乖離があり、総面積では行政資料による推定値が大きな値（1.5～4.4倍、平均2.4倍）を示した。今回用いた行政資料による簡易推定の方法は、計算過程において、階数の矛盾等が生じたことから、妥当性が低いと言わざるを得ない。

その原因としては、建ぺい率の調査値が得られなかったこと、固定資産資料には、課税標準額（20万円）以下の建築物が含まれないこと、また、非木造建築物には緑化が困難な急傾斜の屋根の建築物が含まれることから、

非木造と陸屋根等には差異があることがあげられる。なお、今回の比較資料をもとに行政資料の推定値に補正を加えることも考えられるが、空中写真を用いた方法についても調査区の選定による誤差が含まれることから、補正の有効性は低いと考えられる。

3. おわりに

本調査で推定に用いた資料の多くは、建設省土木研究所と(財)都市緑化技術開発機構が平成3年度から平成5年度までの3年間に実施した官民連帯共同研究「緑化空間創出のための基盤技術の開発」の中で収集されたものである。共同研究においても緑化可能量を推定しており、その結果については、共同研究報告等²⁾⁵⁾により発表されているが、今回、重点プロジェクト「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」の一環として、推定方法に修整を加え、再計算を行った。当重点プロジェクトでは、気象モデルを用いてヒートアイランド現象と各種軽減施策のシミュレーションを行うこととしており、本調査の結果がモデルの構築の一助となればと考えている。

(藤原)

【参考文献】

- 1) 半田真理子：都市の熱環境の及ぼす緑被の効果に関する研究、土木研究所資料、第3578号、1998
- 2) 建設省：官民連帯共同研究緑化空間創出のための基盤技術の開発報告書（第一分冊）概要、（第二分冊）特殊空間緑化技術マニュアル（案）、（第三分冊）資料編、1995
- 3) 野島義輝：都市における植生からの蒸散による夏期の温熱環境改善力に関する研究、京都大学提出学位論文、1998
- 4) 並木裕：人口地盤緑化による波及効果、緑の読本、シリーズ25第28巻16号、pp. 20-30、1992
- 5) 半田真理子、石坂健彦：特殊緑化技術による緑の創造について、公園緑地、55-2、pp. 118-121、1994

表-9 両推定方法の比較

都市名	調査区からの推定値			行政資料からの推定値			両推定値の比
	B	M		K	d	L	
	陸屋根 等面積 (ha)	陸屋根 等棟数 (万棟)	1棟あ たり屋 根面積 (㎡) B/M	非木造 屋根面 積(ha)	非木造 棟数 (万棟)	1棟あ たり屋 根面積 (㎡) K/d	
札幌	716	2.6	313	1,158	7.5	154	1.6
仙台	337	2.1	213	1,531	6.7	228	4.5
横浜	1,352	4.5	374	2,005	15.8	127	1.5
名古屋	1,041	7.6	147	2,317	19.2	121	2.2
大阪	870	5.1	315	2,393	38.7	62	2.8
神戸	730	3.7	273	2,168	19.7	110	3.0
広島	544	3.4	133	932	7.5	125	1.7
高松	99	0.9	112	440	2.7	162	4.4
北九州	586	3.4	154	2,218	8.5	260	3.8
福岡	494	3.5	181	1,077	7.3	147	2.2

4.1 (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】

本研究は、土木研究所の重点プロジェクト「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」の一環として、都市とその周辺を含むメソスケールの都市気象を計算できるシミュレーションモデルの構築を行ったものである。

1. 研究方法

本研究で開発したシミュレーションモデルは、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（米国気象研究センター）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、都市気象の計算に適用することは不適當であったことから、いくつかの改良を施した。1つには、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フラックス算定ができるようにした。また、地表面水分量が直接、間接に都市気象に与える影響を考慮できるように、新たに地表面の水分移動過程と植物生理のサブモデルを境界層過程に組み込み、地表面水分量の変化を予測できるようにした。さらに、人工排熱の時空間的变化を接地層に与えた。日本の国土基本情報としては数値地図、国土数値情報などを利用できるようにした。このモデルを用いることにより、任意の都市、任意の季節を対象とした予測計算を行うことが可能となった。

2. 研究結果

本研究で開発された数値モデルを仙台平野と関東平野に適用した。各計算領域はメッシュサイズ6 kmの領域1とメッシュサイズ2 kmの領域2からなっている。領域1については客観解析データから境界条件、初期条件を与えて、時間積分を行う。領域2については領域1の計算結果を境界条件として時間積分を行う。また、領域2の計算結果を領域1にフィードバックする。

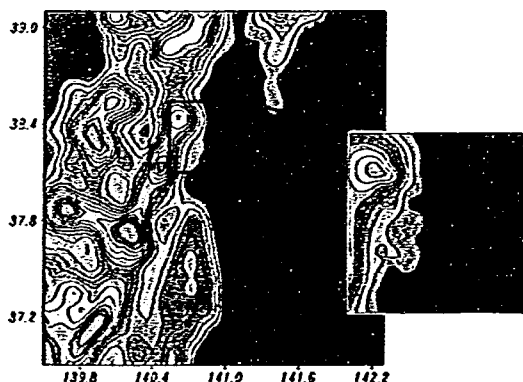


図1 計算領域（仙台平野）と等高線

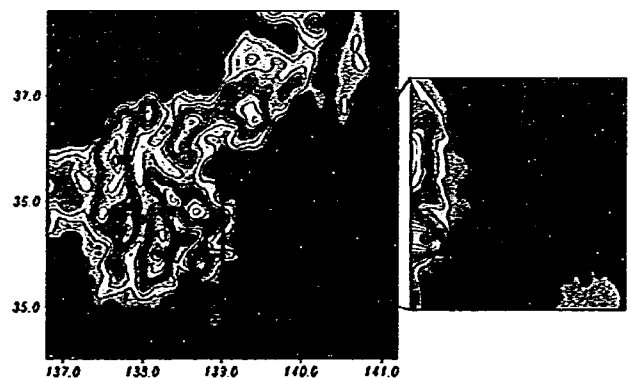


図2 計算領域（関東平野）と等高線

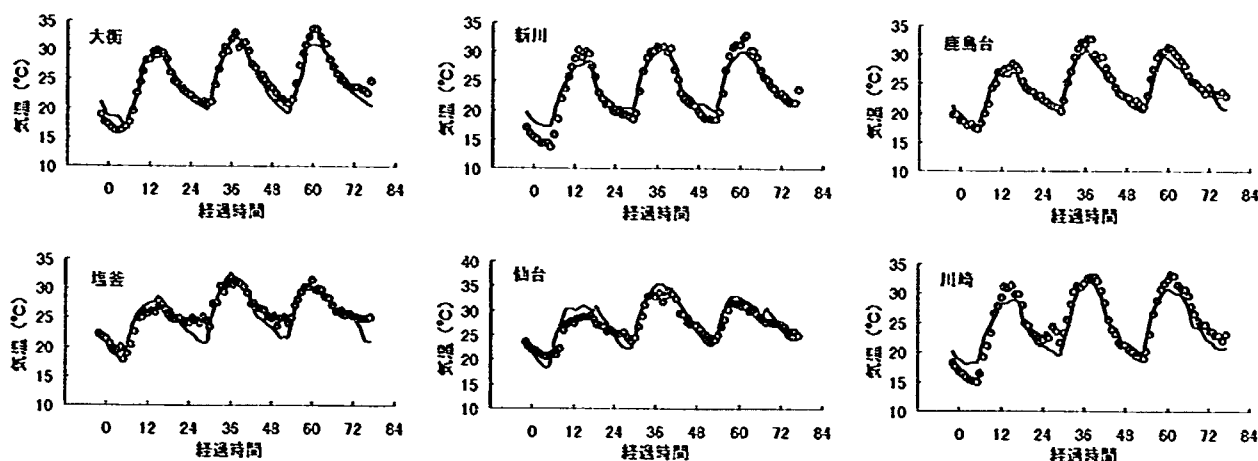


図3 地上気温（高度1.5m）の計算結果と気象観測結果（AMeDAS）の比較

仙台平野において、雲の全くない状態を想定した8月の3日間の計算結果と計算領域内6地点の観測データを比較した（図3）。計算結果は2km四方の平均値である一方、地点データには計測地点の局所的な地形、土地利用の影響があることに注意が必要であるが、各地点の全体的な特徴は良好に再現されていることがわかる。実際には雲により日射が遮られる時間があり、例えば仙台の経過時間12時間前後の気温が高めに予想されていることから、雲の取り扱いや放射モデルについて更に検討が必要である。

図4は仙台平野の郊外における気温（絶対温度で表示）の時間変化を表しており、縦軸は高度を示している。夜間から早朝にかけて接地逆転（大気下層が上空よりも低温化すること）が発生している様子がわかる。これは都市上空の暖かい空気が郊外上空に移流したためで、大気汚染物質の拡散速度が低下するという現象をもたらす。

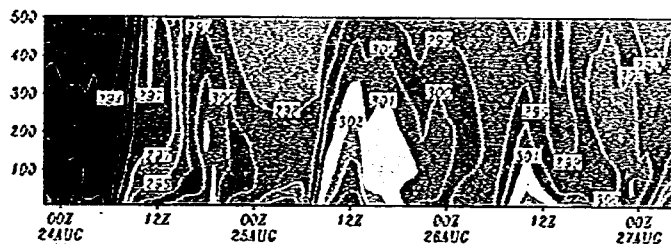


図4 郊外上空の気温変化

右の図は、仙台平野の計算領域2における正午と早朝の地上気温と水平風速を示している。赤い部分は気温が周辺よりも高くなっている地域を表しており、ちょうど仙台市の中心部に当たる。なお、図5右側の青い範囲は海に相当している。日中は海風の出現により、

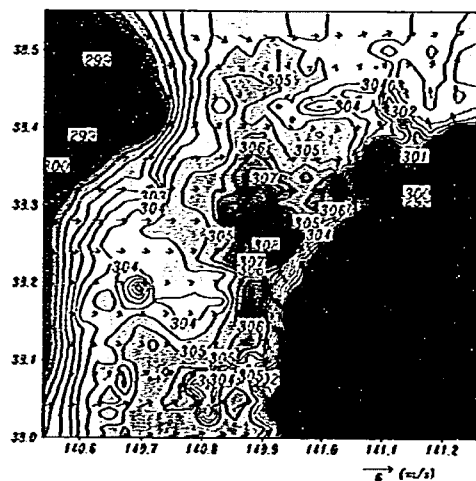


図5 地上近傍の気温と水平風速
（1995年8月19日PM12:00）

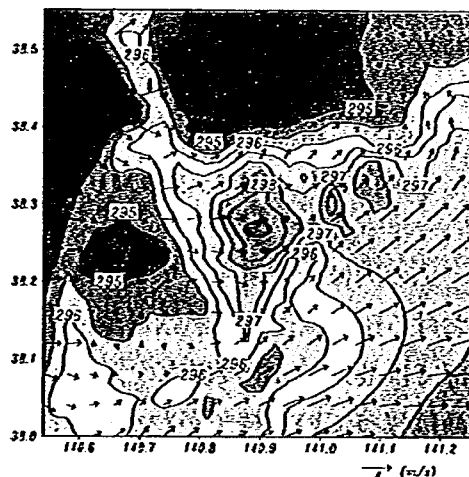


図6 地上近傍の気温と水平風速
（1995年8月20日AM6:00）

都市と郊外の境界部分で気温が急激に変化している様子がわかる。また、ヒートアイランド現象は晴天日夜から朝にかけて、穏やかな風の時に顕著に現れることが知られているが、この図でも熱の島が中心部に現れている。

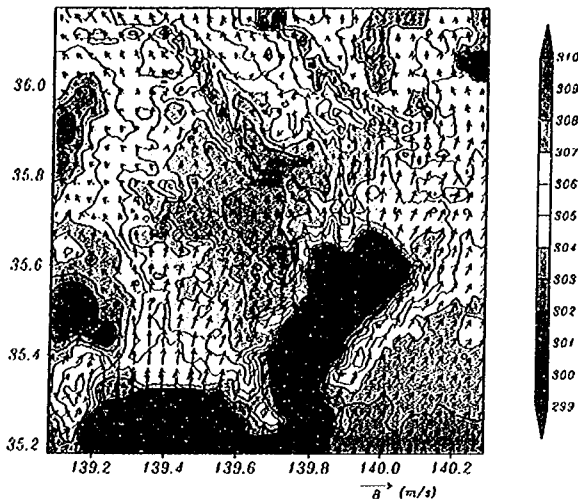


図7 地上近傍の気温と水平風速
(1995年8月25日PM12:00)

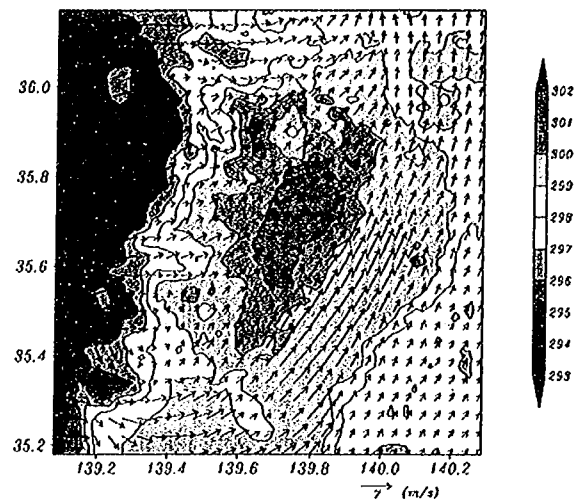


図8 地上近傍の気温と水平風速
(1995年8月25日AM0:00)

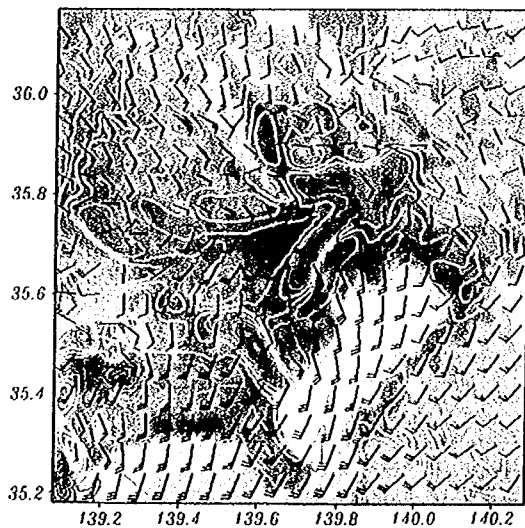


図9 顕熱と上空の風速分布
(1995年8月25日AM10:00)

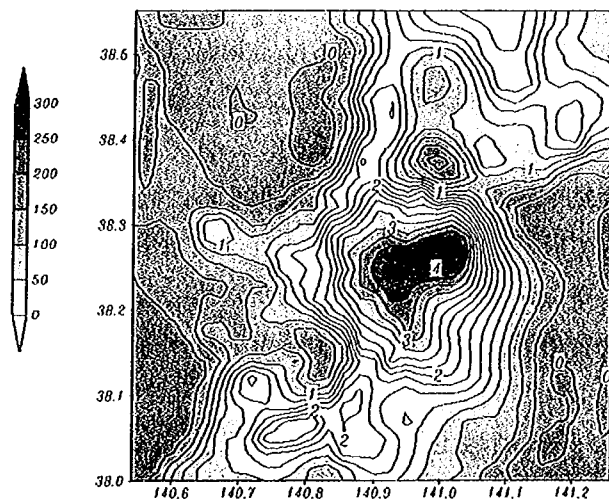


図10 人工排熱の有無による気温差
(1995年8月19日PM8:00)

上の図は、関東平野の計算領域2における日中と夜間の地上気温と水平風速、日中の地上500mにおける鉛直風速、顕熱輸送量、地上100mの水平風速の分布を示している。日中、東京湾上と東京都区部では最大で10度以上の気温差が見られる。夜間には海上との相対的な気温差は小さくなるが、熱の島は残っている様子がわかる。図9では都区部において筋状に鉛直風速の大きい部分（赤い等高線）が2カ所見られる。このうちの1つは俗に言う‘環八雲’の発生する場所に丁度あたっている。

各種対策の一つに人工排熱の削減が挙げられる。図10は仙台平野で仮に全く人工的な排熱がなくなった場合の高度10mにおける気温低減効果の計算結果を表しており、都市中心からやや風下側で気温低減が顕著に現れていることがわかる。これは非常に極端なケースでの計算であるが、今後、本研究ではより現実的なシナリオを描いて、それらの効果を予測する予定である。

4.2 (1) 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

研究期間：平 1 0 ～ 平 1 4

担 当：都市河川研究室

化学研究室

【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。舗装の熱を熱電半導体により電気に変換して活用するシステムの開発、都市河川等の水熱エネルギーの利用による排熱や排ガスの削減効果の検討、都市気候を再現する数値モデルの開発を行い、都市気候を緩和するのに有効な対策を提案することを目指としている。10 年度では、1996 年時点での人工排熱量の算出、2010 年時点での東京都 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・排ガス削減の効果の算定を目的とした。結果として、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知られた。

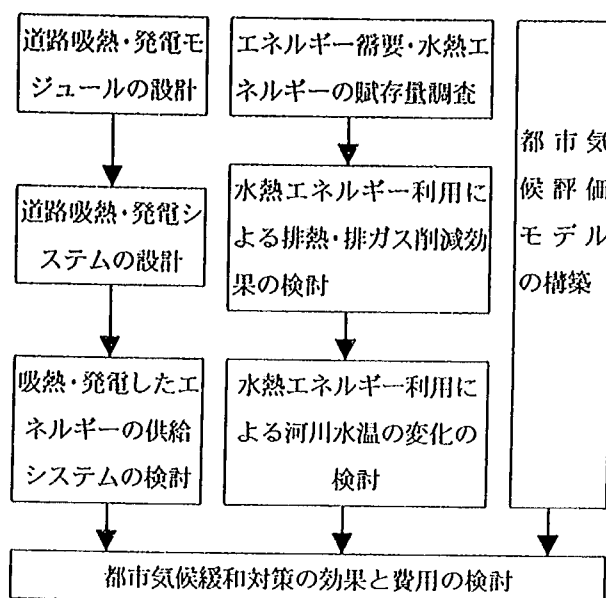


図-1 研究の全体計画

1. 研究方法

1. 1 検討の対象と手順

対象地区は東京都 23 区であり、エネルギー源としては河川、下水、地下水の水熱源を、エネルギーの利用方式としては電気ヒートポンプによる地域冷暖房を検討した。検討内容はエネルギー需要量・排熱量の推定、水熱エネルギー賦存量の算定、水熱エネルギー利用による効果の算定の 3 つに大別される。検討手順は図-2 の通りである。

1. 2 エネルギー需要量、排熱量の推定

1. 2. 1 エネルギー需要量の推定

東京都 23 区の土地利用現況調査結果（平成 8 年度）は GIS データベースとして整備されているが、これを基に 500m メッシュ単位で建物用途別の総床面積の算出した。また、都市開発事業や市街地再開発事業の動向を考慮して、将来（2010 年時点）での床面積の推計を行った。次に、建物用途別、使用用途別の需要原単位の年間値、季節別変動パターン、時刻別変動パターンを、（財）住宅・建築省エネルギー機構や（社）日本地域冷暖房協会の資料に基づいて設定した。この段階では、建物用途を 7 分類（業務、教育、医療、商業、住宅、宿泊、娯楽）に集約し、使用用途を 4 種類（冷房、暖房、給湯、電力）に分類した。

1. 2. 2 建物からの排熱量の推定

建物からの排熱の原単位は住宅・非住宅別に機器効率を考慮して設定した。これらのデータを利用して、現在および将来について、建物からの排熱量の時空間分布を 1 時間単位で推定した。

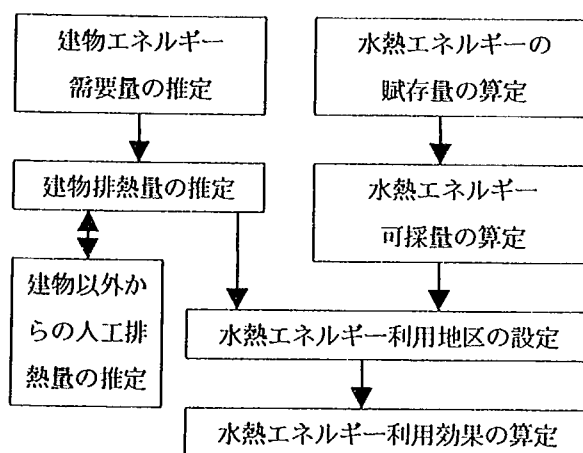


図-2 水熱エネルギーの活用効果の検討フロー

1. 2. 3 その他の人工排熱量の推定

23区での人工排熱量の全体像を把握するために、大きな排熱源である火力発電所、清掃工場、民間工場、自動車からの排熱量の推定を行った。火力発電所については、大井火力、豊洲火力の2施設を対象に、実績と設計熱効率をもとに算定した。また、清掃工場として、現在稼働している16施設に対して、ごみ焼却量の実績値とごみ熱有効利用率を用いて算定した。工場（製造業事業所）からの排熱については、平成10年度策定の「東京都エネルギービジョン（中間まとめ）」に記載のある鉱業・製造業エネルギー消費量を排熱量とみなし、都全体と23区との工業出荷額の比で按分することとした。なお、その時刻別変動に関しては既往の研究成果を用いた。また、自動車交通からの排熱の時空間分布の推計には道路交通センサスと燃料消費原単位を用い、幹線道路の位置するメッシュに排熱量を与えた。また一方で、「東京都エネルギービジョン（中間まとめ）」の運輸部門中の自動車によるエネルギー消費量を都全体と23区との登録自動車台数の比で振り分けることで23区における年間排熱量を推定した。

1. 3 水熱エネルギーの賦存量の算定

1. 3. 1 賦存量の算定

水熱エネルギー源として下水（下水処理場、汚水ポンプ所、下水幹線）、河川水、地下水を対象とした。

下水処理場においては二次処理以上の処理水（放流水）の利用を想定し、水熱エネルギー賦存量を放流量、ヒートポンプ設計温度差（5℃）、比熱から算出した。なお、放流量については、現状（1996年）では実績値を、将来については処理能力の増強と新設の処理場を考慮して推計した処理場別放流量を使用した。ポンプ所については、安定なエネルギー利用が可能である汚水ポンプ所を対象とした。水熱エネルギーは汚水揚水量とヒートポンプ設計温度差、比熱から算出した。現状については、稼働中の55のポンプ所での汚水揚水量の実績値を用いたが、将来については55のポンプ所はそのままとし、揚水量は下水処理場の処理能力の増加率を考慮して想定した。さらに、下水幹線のエネルギー利用は1幹線につき1箇所とした。水熱エネルギーの賦存量は、末端の下水処理場への流入量合計を流量比率で配分することにより推定した各幹線の流量と、ヒートポンプ設計温度差、比熱より算出した。

対象河川は、荒川、隅田川、神田川、日本橋川、渋谷川の5河川である。水熱エネルギーは低水流量や浄化水の導入量（平成9年度の実績値）、ヒートポンプ設計温度差、比熱から算出した。なお、将来の流況は現況と変わらないものとした。

地下水利用には様々な揚水規制がある。ここでは、東京都区部における地下水の全揚水量、ヒートポンプ利用温度差（高崎市の事例に基づき7℃に設定）、比熱より算出した。また、将来も現在と変わらないものとした。

1. 3. 2 水熱エネルギー可採量の設定

水熱エネルギー量としての可採量の算定に際しては、水熱源の水量変動や取水上の制約、需給間での距離的・エネルギー的なバランスなどを考慮することが必要である。可採量は日量単位で把握することとし、冬期・通常期別の設定、通年で安定的に利用可能な水量の設定、取水制限の考慮を行った。

下水処理場（汚水ポンプ所、下水幹線）での日可採量は、それぞれの賦存量に最低日放流量（揚水量、下水量）を乗じることで算出した。

河川の日可採量は、河川別取水限度流量、利用温度差（冬期3℃、通常期5℃）より算出した。

地下水の日可採量については、揚水限度流量に利用温度差（7℃）を乗じて算定した。

1. 4 水熱エネルギー利用の効果の算定

1. 4. 1 利用地区の設定

水熱源と需要地との位置関係、熱量的バランスなどを踏まえて水熱エネルギー利用地区を設定した。熱源水の搬送距離を最大1km、したがって500mメッシュでは水熱源の位置するメッシュおよびその周囲1メッシュの範

囲である。なお、水源から河川や運河を横切って到達するメッシュは対象外とした。利用地区や利用水源の設定に関しては、現実的な普及・促進を行う場合（ケースA）と積極的に利用・拡大をはかる場合（ケースB）の2ケースについて行った。ケースAでは、需要地として水熱源メッシュの周囲1メッシュ内で、都市開発事業予定地区または既存の地域冷暖房地区のみを対象とした。水熱源としては下水処理場、ポンプ所、河川のみを対象とし、その順序を利用の優先順位とした。ケースBでは、需要地としては水熱源メッシュの周囲1メッシュ内の全てのメッシュを、水熱源としては全種類の水熱源を、水熱源の利用優先順位は下水処理場、ポンプ所、下水幹線、河川、地下水とした。地下水については他の水熱源が利用できないメッシュのうち、熱需要の高いメッシュ順に1メッシュ当たり1箇所として設定した。

1. 4. 2 水熱エネルギーの利用効果の算定

上記の2ケースに対して、水熱源別の可採量を基に水熱源ヒートポンプによる製造可能熱量を算出した。23区全体での月別冷温熱需要量の比率を考慮して、5月から10月は冷熱製造、11月から4月までは温熱製造とした。また、ヒートポンプの成績係数を利用水源別、月別に設定した。供給可能熱量は熱需要量と製造可能熱量のうち小さい方の値とした。水熱エネルギーを利用しても不足する冷温熱源需要に対しては従来の同様の機器を利用し続けるものとした。

水熱エネルギーの利用促進による省エネ効果、排ガス（ CO_2 、 NO_x ）削減効果、建物排熱削減効果の検討を行った。水熱エネルギー利用の効果を算定するために、燃料種別に燃料消費量換算値、1次エネルギー換算値、 CO_2 排出量の原単位、 NO_x 排出量の原単位を、既存の資料をもとに設定した。

2. 研究結果

2. 1 エネルギー需要量、排熱量の推定

2. 1. 1 建物エネルギー需要量

図-3に2010年における年間の建物総エネルギー需要量の面的分布を示す。1996年時点では千代田区、新宿区においてエネルギー需要の高いことが知られているが、将来はさらに周辺の港区、渋谷区、豊島区等に需要の高い地区が拡大することが予想される。図-4には、用途別の需要量の例として、夏期（8月）の代表日における1日の冷房需要量（2010年）を示している。年間総需要の分布より、都心部にさらに集中していることがわかる。

2. 1. 2 排熱量

2010年の夏期代表日における建物からの日排熱量を図-5に示す。図-4と同様に、都心部での排熱量が大きいことが顕著である。また、日排熱量が日射量を超えるメッシュ数が11個（1996年時点では4個）と予想される。主な人工排熱量の推計結果を表-1に示す。23区では、建物排熱が最も大きく、次いで自動車交通、民間工場、清掃工場、火力発電所と続いている。なお、排熱分布は1時間ごと

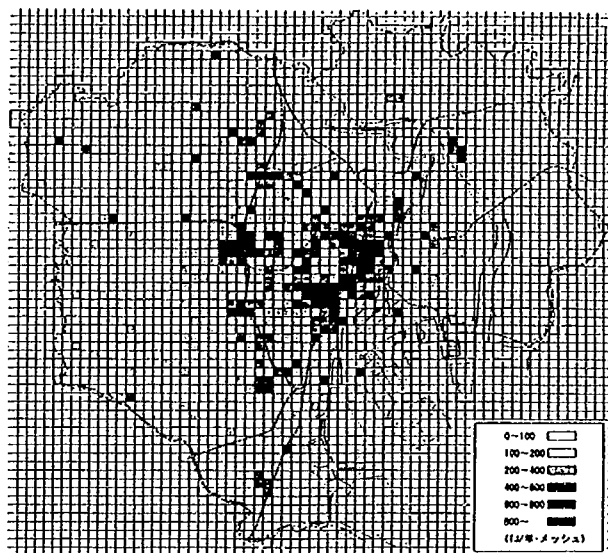


図-3 建物年間総エネルギー需要量

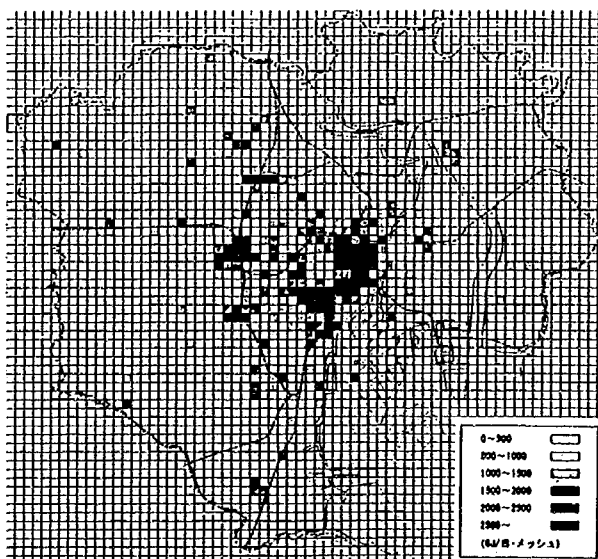


図-4 夏期代表日の日排熱量分布

に作成されており、次年度以降のヒートアイランド現象の数値解析に利用される。

2. 2 水熱エネルギー賦存量、可採量の推定

2. 2. 1 水熱エネルギー賦存量、可採量

水熱源別の賦存量は、下水幹線が最も大きく下水処理場、河川、汚水ポンプ所、地下水の順である。なお、1利用地点当たりにおける賦存量としては下水処理場が最大である。全賦存量は98,900(TJ/year)となり、23区内での建物熱需要(冷暖房と給湯需要)の半分弱である。2010年時点での23区全体での水熱エネルギーの可採量の順位も賦存量と同様であり、また、通常期に較べて冬期での可採量が小さくなることがわかった。

2. 2. 2 水熱エネルギー供給量

表-2に水熱エネルギーの供給熱量の結果を示す。ケースA、Bでは利用区域内の年間需要量の約64%、約21%を供給できることがわかる。なお、これらの冷温熱製造のためにヒートポンプが消費した電力量は、ケースA、Bで、529GWh/年、1,590GWh/年となっている。

2. 3 水熱エネルギー利用の効果の算定

水熱エネルギー利用による省エネルギー(1次エネルギー消費削減率)、排ガス(CO₂、NO_x)・排熱の削減効果を計算した。表-3は利用地区内での効果を年間値ベースで評価した結果を示している。水熱エネルギー利用により地区内では大幅な省エネ、環境保全効果が期待できることがわかる。なお、表中の括弧内の数値は23区全体からみたときの値であるが、23区全体から見ると当然のことながら効果は限られたものとなっている。

3. 今後の予定

今後、東京周辺のヒートアイランドの数値解析コードの開発・検証を進めるが、数値解析により、今回水熱エネルギー利用やその他の対策が夏期の気温をどの程度緩和するのかを定量的に評価する予定である。

4. 研究成果物

- 河原, 小林, 末次: 東京都23区における人工排熱量の分布特性について, 第54回土木学会年講, VII, 1999(投稿中)。

表-1 23区での年間排熱量の比較(単位: TJ/year)

建物排熱	火力発電所	清掃工場	工場	自動車
230,300	5,400	23,900	49,200	160,200

表-2 水熱エネルギー供給熱量(単位: TJ/day)

		利用地区数	利用地区内の熱需要量	利用地区内での供給熱量	利用地区内での供給率	23区全体の熱需要に対する供給率
ケースA	冷熱	59	6,180	3,660	59.2	4.0
	温熱		5,300	3,670	69.2	2.9
ケースB	冷熱	637	55,700	9,660	17.3	10.4
	温熱		50,600	12,500	24.7	9.9

(末次, 河原, 木内, 小林: 明嵐, 木嶋)

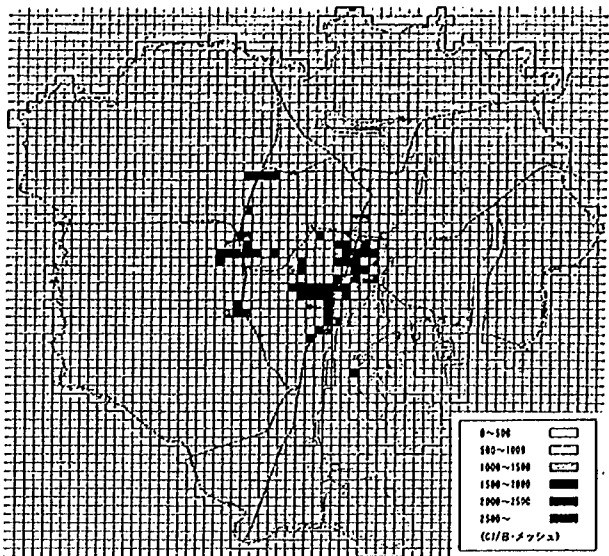


図-5 夏期の建物からの日排熱量分布

表-3 水熱利用による諸効果(対23区)

	ケースA	ケースB
省エネルギー率	28.7 (1.4)	10.2 (4.7)
CO ₂ 削減率	39.8 (1.9)	14.3 (6.4)
NO _x 削減率	42.5 (2.1)	15.0 (6.8)
排熱量削減率 (冷暖房・給湯のみ)	25.8 (1.3)	6.8 (3.3)
排熱量削減率 (総エネルギー需要)	12.9 (0.7)	3.4 (1.8)

4.2(2) 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

研究期間：平10～平14

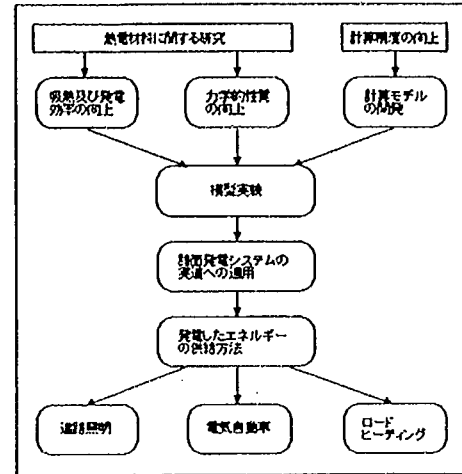
担 当：化学研究室

【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、さらにその現象は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熱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。

9年度は REGS の設置によるヒートアイランド現象緩和の効果を数値計算により把握した。10年度は、REGS を用いた基礎的な模型実験を行い、REGS の性能を実験的に把握することを目的とする。REGS の性能について基本的な確認実験を行い、REGS により得られる発電量について数値計算値と比較した。



1. 研究方法

1.1 REGS に関する実験

図-1に示すように、REGS を基層に挿入した舗装構造体が太陽光に照射される状況を恒温恒湿実験室内に再現する。舗装構造体は、30cm(幅)×30cm(長さ)×1m(高さ)の直方柱であり、下面は20℃の水を循環させた水槽に接触させて温度を一定に保っている。舗装構造の上方からはランプを照射し、表面が60℃の一定温度に保たれるようにしている。また、舗装構造を一次元熱伝導体と仮定できるように、実験装置の周囲を発泡スチロールにより断熱した。

舗装構造体は、上層より多孔質弾性舗装、REGS、砂の構成としている。砂は水分を含まない理想的なものを想定しており、その含水比は8.2%である。REGS の効果を把握するため、熱電対を埋め込んで温度の測定を行うと同時に発電量の測定を行った。

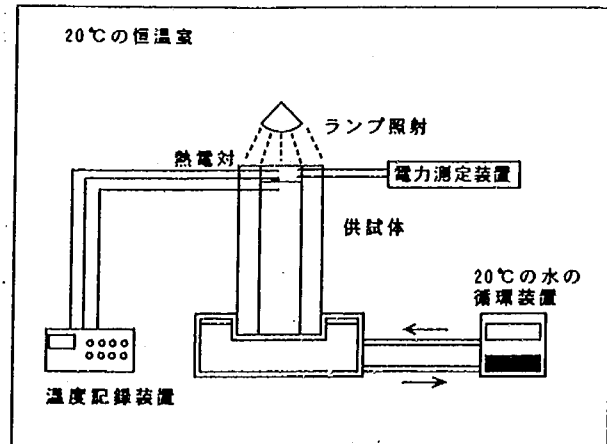


図-1 REGS に関する実験装置

REGS は、127 個の熱電素子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、それ以外の 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 の効果は、厚さ 5mm 程度の熱電半導体の効果と同等と見られる。

1.2 計算値との比較

REGS の性能に関して数値計算を行い、実験値と計算値との比較を行った。数値計算の実施にあたっては、舗装構造を一次元熱伝導体と見なしている。

2. 研究結果

2.1 REGS に関する実験

ランプが照射された状態で、REGS を基層に挿入した舗装構造体の温度分布を測定した結果は図-2に示す通りである。これまでの調査結果より、アスコンが基層にある通常の舗装構造体の温度分布が、地表面から地中に向けて連続的に低下することは知られている。これに対し、REGS を基層に挿入した時の温度分布は、REGS 周辺で温度分布が不連続に変化する傾向にある。特に、REGS 上下面において、温度差があまり生じていないことが分かる。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。

発電量を増大させるためには、REGS 上下面の温度差を増大させることが必要である。ここでは、図-3に示すヒートシンクを REGS 下面に接着させて、上下面の温度差を増大させようと試みた。また、ヒートシンクの長さを2種類に変えて、長さが発電量に与える効果についても検討を行った。実験の結果、ヒートシンクの設置により温度差が増大するということはなかった。また、ヒートシンクの長さの違いによる発電量の違いも見られなかった。今回の実験結果では、発電量を増加させようとしたヒートシンクの効果は余りないことが分かった。

2.2 計算値との比較

実験値と計算値との比較結果を図-4に示す。温度分布については比較的よく合っているが、発電量については定量的にかなり異なっていることが分かる。数値計算は、種々の REGS の効果を相対的に比較する場合に有効であると考えられる。

3. 今後の課題

9年度に実施した数値計算結果を見ると、REGS の挿入により気温が低下することが分かる。しかし、発電量について実験値と計算値とはかなり異なることが確認された。その原因として、①ゼーベック係数が異なっていること、②発電量を計測する抵抗に問題があること、③実験条件が一次元と仮定できないこと、等が考えられる。今後、これらの諸課題を解決して実験値と計算値との整合を図り、計算値の信頼性を高めていくことが必要である。また、システム開発に向けて、REGS を路面に設置した場合の力学的な挙動についても検討を行う必要がある。

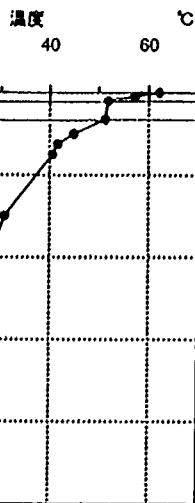


図-2 実験での温度分布

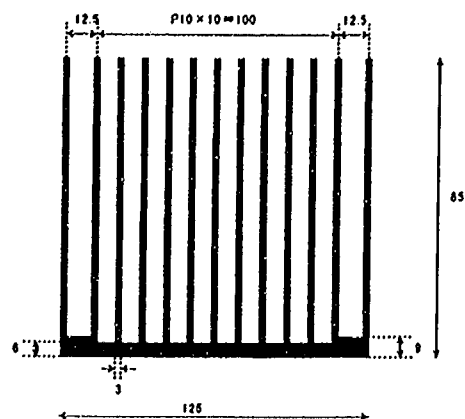


図-3 85mm のヒートシンク

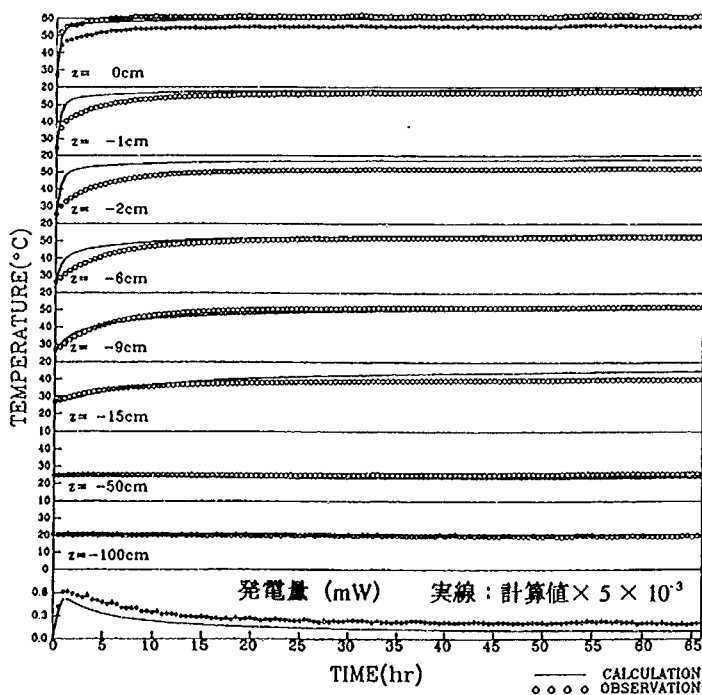
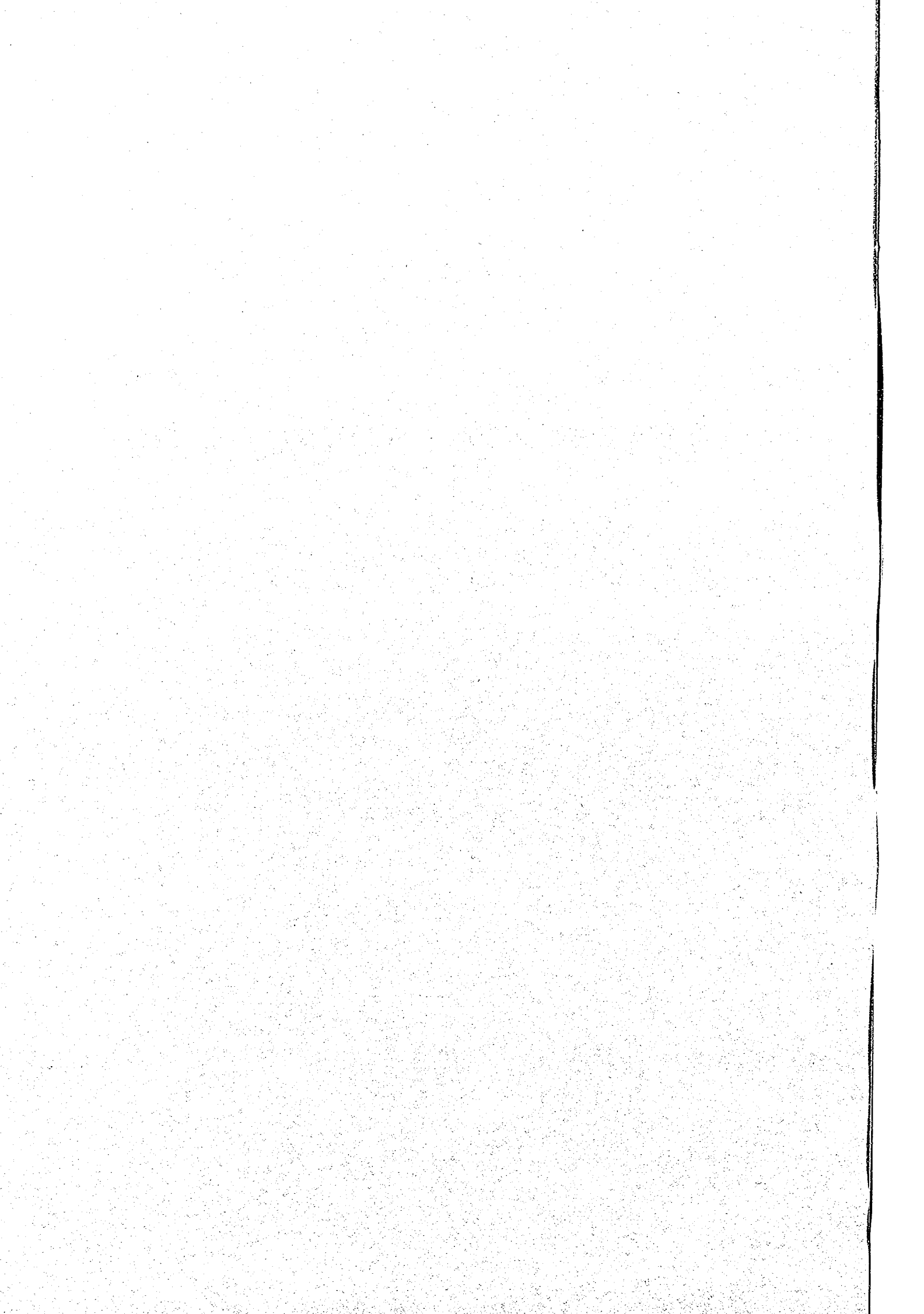


図-4 実験値と計算値との比較

(明嵐, 木嶋)

走行支援道路システム (AHS) に関する研究開発



走行支援道路システム（AHS）に関する研究開発

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、我が国をはじめとする欧米等各国において世界的な取組みがされている。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、交通渋滞、交通安全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。

我が国では、建設省をはじめとする関係 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 Systems）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状況、交通状況等の情報の提供、さらに運転制御の支援によって、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 AHS の基礎的な研究開発に着手し、民間との共同研究を通じて構内の試験走路での公開走行実験（1995 年 11 月）、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、AHS 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。土木研究所は AHS のコンセプトの評価並びに民間の開発する要素技術、システム、大学等による基礎的研究のトータルマネジメントの役割を担っている。

2. 研究の目的

第 1 段階として、AHS 機能のうち AHS-i（情報提供）及び AHS-c（制御支援）の一部による「安全に関わるユーザサービス」の実現に向けた研究開発を推進する。

3. 達成目標

2002 年までの目標は以下の通りとする。

- ① 要素システムの設計仕様書（案）の策定
- ② 優先システムの開発と実証実験（2000 年）、導入シナリオの策定
- ③ 優先システムの AHS 標準仕様書（案）の策定
- ④ スマートウェイ（知能道路）の実現に向けた制度、基準類の策定
- ⑤ 国際標準化（ISO、TC204 等）への提案

4. 社会的な効果

- ① 交通事故死傷者の削減
- ② 交通渋滞の削減
- ③ 道路交通環境の改善
- ④ 情報通信、自動車産業の新規展開

一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

5.1	AHS コンセプト・国際標準化等	
	(AHS：コンセプト・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) … 124
5.2	システムの設計・開発	
	(AHS：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) … 126
5.3	システムの評価	
	(AHS：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) … 128
5.4	AHS 要素技術開発	
	(1) AHS：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) … 130
	(2) AHS：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) … 132
	(3) AHS：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) … 134
	(4) AHS：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) … 136
	(5) AHS：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) … 138

5.1 AHS コンセプト・国際標準化等

(AHS：コンセプト・アーキテクチャの設計と評価に関する調査)

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】

AHSにはi(情報提供)、c(制御)の段階があり、道路交通の安全性向上に資するサービスを提供することが期待されている。本研究では安全に関する基本ユーザサービスを事故統計データ、交通データ等を用いて選定するとともに、基本ユーザサービスの実用化に資するリクワイアメント(第1次)を策定した。

リクワイアメントとは、図-1に示すように、AHSに対するニーズの分析によって得られたニーズ側の要求を記述したものであり、ニーズとシーズ(開発)を結びつける接点となる文書である。

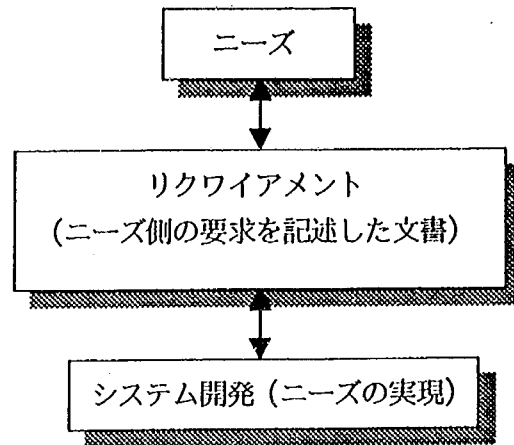


図-1 リクワイアメントの位置づけ

1. 研究方法

事故統計に基づいて、安全に関する優先的ユーザサービスの選定を行った。次に、事故要因の分析に基づいて事故対策の基本的考え方を整理し、その結果をまとめ、第1次リクワイアメントを作成した。

2. 研究結果

2.1 ユーザサービスの選定

図-2は、各ユーザサービスに対応する死者数を、発見の遅れ(AHS-iで対応可能)、判断・操作の誤り(AHS-cで対応可能)で分類したものである。図よりAHS-i、cが対象とする交通事故死者数、損失額の上位から、重点的に研究すべき安全に関する基本ユーザサービスを、7つ(①障害物衝突防止サービス②車線保持(直線)サービス、③車線保持(カーブ)サービス、④出会い頭衝突防止サービス、⑤右折衝突防止サービス、⑥横断歩行者衝突防止サービス、⑦安全車間保持サービスを選定した。

図-2は、各ユーザサービスに対応する死者数を、発見の遅れ(AHS-iで対応可能)、判断・操作の誤り(AHS-cで対応可能)で分類したものである。図よりAHS-i、cが対象とする交通事故死者数、損失額の上位から、重点的に研究すべき安全に関する基本ユーザサービスを、7つ(①障害物衝突防止サービス②車線保持(直線)サービス、③車線保持(カーブ)サービス、④出会い頭衝突防止サービス、⑤右折衝突防止サービス、⑥横断歩行者衝突防止サービス、⑦安全車間保持サービスを選定した。

2.2 第1次リクワイアメントの作成

前章で選定した安全に関する各々の基本ユーザサービスについて事故要因分析を行い、事故要因を類型化し、認知、判断、操作というドライバの運転操作を考慮して事故モデルを作成した。図-3に障害物衝突事故の発生プロセスを表す事故モデルを示す。図は一番左側のフローをたどれば事故が回避されることを示している。

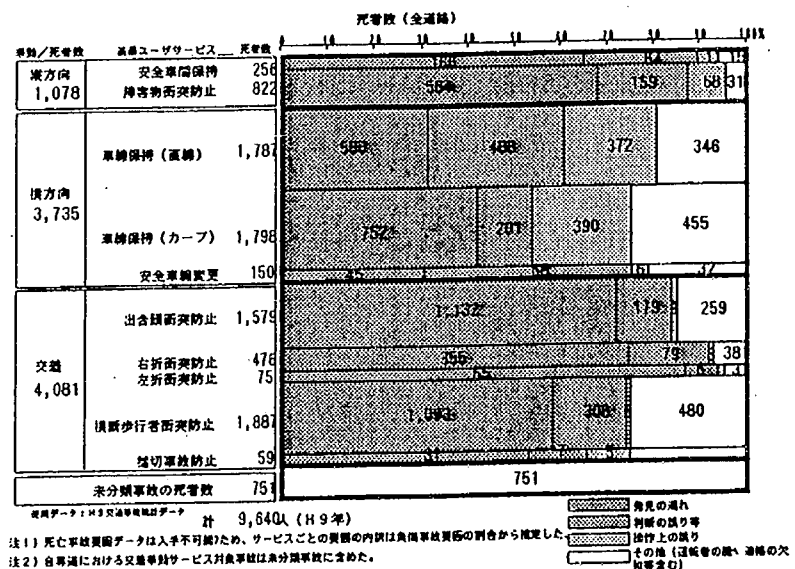


図-2 AHS基本ユーザサービスごとの要因別事故発生状況(平成9年)

しかし、実際には視認困難、ドライバーの発見遅れ、不適切な判断・操作といった要因によって事故が生じている。これに対し、AHSは事故をできるだけ早いタイミングで防ぐよう、即ち対象物の発見の遅れに対する情報提供、判断の誤りに対する警報、操作の誤りに対する操作支援を段階的に行うことで、事故防止の対策を行うこととしている。図-4に障害物衝突防止サービスにおける情報提供、警報、操作支援の提供タイミングと車両速度との関係を模式的に示したグラフを示す。図は情報提供により減速が行われた場合には実線のような緩減速を、減速が行われなかった場合には警報、急制動による操作支援が行われることを示している。第1次リクワイアメントは基本ユーザサービスにおける情報提供、警報、操作支援（右折衝突防止サービス、横断歩行者衝突防止サービスにおける警報、操作支援を除く）のタイミングや方法に関する定量的要件やサービスが提供される気象や道路環境等の条件をまとめたものである。AHSの実用化当初を対象とした考え方として、①事故の第1当事者となることを防止すること、②ドライバーの運転動作に対して過剰介入しないこと、③高速道路が通行止となるような悪天候下におけるサービスは対象外とすること等を前提としている。

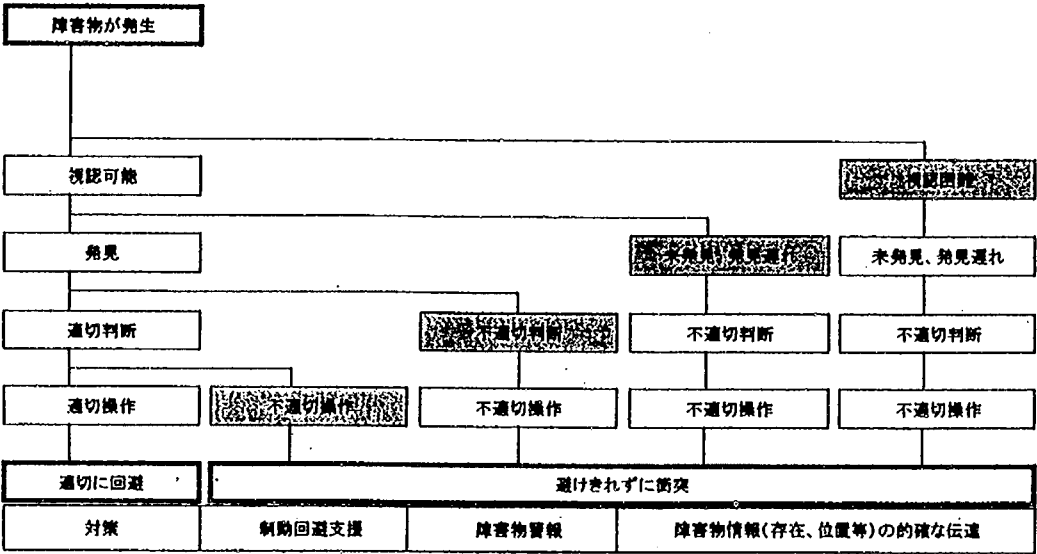


図-3 障害物衝突防止の事故発生プロセスの基本モデル

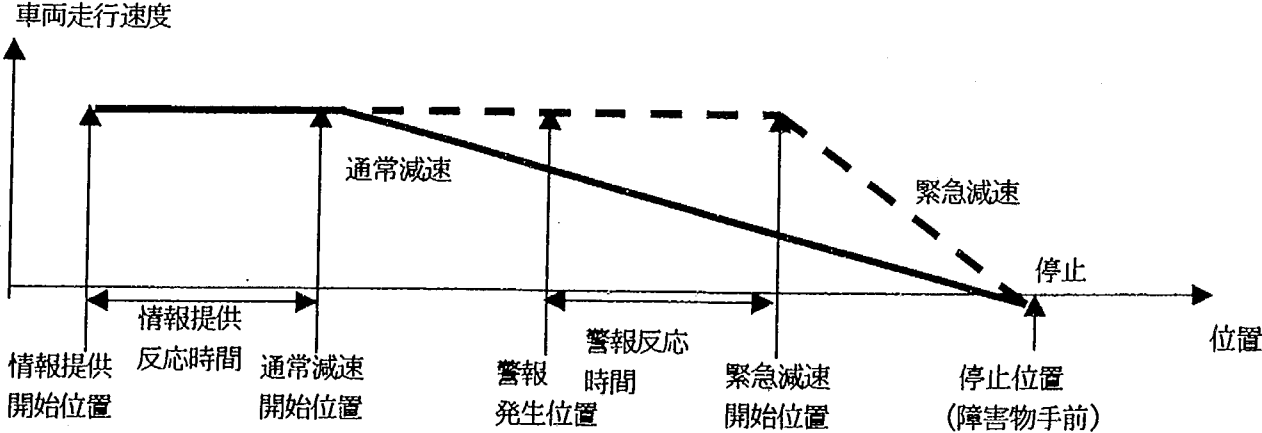


図-4 提供タイミング（障害物衝突防止サービス）

3. 今後の予定

第1次リクワイアメントを実現するシステムには様々な形態が考えられるが、実用化当初（AHS 車両の普及率が低い時期）から、第1次リクワイアメントに記述されている条件を全て満足するシステムを導入していく必要はない。そこで今後、AHSの普及に応じたシステムの発展プロセスを検討していく必要がある。

（上田、岩崎、田中、横地）

5.2 システムの設計・開発

(AHS：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】

本研究の目的は、情報・通信技術の活用した車や道路により、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に提供する事により事故の大幅な削減を図る走行支援道路システム(AHS)の基本ユーザーサービス毎に物理アーキテクチャの構築とシステム設計を行い、システムの仕様書を作成することである。現在、交通事故の削減を効果的かつ効率的に達成していく事は急務であるが、車両側のシステム機器は普及していないため、道路インフ

ラ単独のシステムとして先行的に車両の走行を支援するシステム（走行支援パイロットシステム）の導入を図ることを検討した。

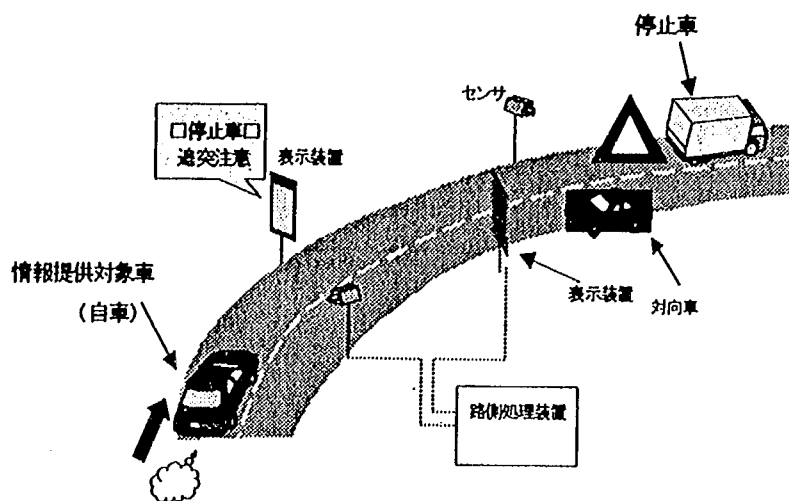


図1 システムイメージ

1. サービスの定義

走行支援パイロットシステムは、事故の多発するカーブ区間において、通過車両に対して停止車・低速車及び対向車の存在に関する情報を路側に設置した表示装置に表示する事によりドライバーの注意を喚起し、安全な走行を支援し、もって安全な交通を確保する事を目的としたシステムである。図1にシステムイメージを示す。

1.1 停止車・低速車検知サービス

カーブ区間において、停止車・低速車の存在を表示装置により後続車に情報提供する事により、後続車がカーブ区間に進入する前に減速するといった、停止車や低速車の存在を意識した安全な走行を促すサービスである。

1.2 対向車検知サービス

カーブ区間において、対向車とすれ違うことを表示装置を用いて予告的に情報提供する事により、対向車の存在を相互に意識した安全な走行を促すサービスである。

2 システムの設計

2.1 システム構成

走行支援パイロットシステムの機器構成は、センサ、路側処理装置、表示装置、センタ保守端末から構成する。センサは、車両の存在や挙動を検出するものであり、システムの早期導入を考慮し、実用実績の高い可視センサを標準とした。路側処理装置は、センサからの情報から事象判定を行い、ドライバーに提供する為の表示情報を作成して表示装置に提供し、システム全体の管理機能を有する。表示装置は、路側処理装置から提供された表示情報を表示する。センタ保守端末は、道路管理事務所等に設置され、機器の故障の発生時に自動的に通報を受けたり、操作介入によって動作条件の確認や変更を行う装置である。

2.2 表示装置に提供される情報

図2は2つのサービスを提供する時の情報表示の優先順位を示す。システムの表示項目の優先順位は、ドライバーに対する事象の重要度を考え、①システム異常、②走行車線上の停止車・低速車の存在、③対向車の存在、④事象なしである。

2.3 表示装置の設置位置

カーブ区間に進入する自車のドライバーにとって最も危険度の高い条件を想定して決定する。

2.3.1 停止車・低速車検知サービス用

停止車が事象検出開始地点に停止している場合を想定し、表示装置の設定位置を図3に示す通り決定する。表示装置の消失距離とは、自車が表示装置に接近するに従って、表示装置がドライバーの視野に入りきらなくなり、情報の判読が不可能になる地点までを言う。

2.3.2 対向車検知サービス用

カーブ区間に進入する自車のドライバーが対向車に関する最新の情報を取得できるように、事象検出開始地点に設置する事が望ましい。

2.4 センサの設置位置

2.4.1 停止車・低速車検知センサ

図3に示す通りカーブ区間の停止車・低速車をもれなく検出できるように配置する。

2.4.2 自車検知センサ

情報提供の効果を高めるため、情報提供対象の車両が表示装置の前方を通過するタイミングで表示装置に情報が表示されるように配置する。対向車検出センサと兼用する事が可能である。

3 今後の課題

今年度は、カーブ区間における安全対策として走行支援パイロットシステムについてシステム設計を行った。11年度は、土木研究所構内においてドライバーの受容性を評価する。また、悪天候下において車両の検出ができない等のセンサ性能の低下によるサービスの休止を行うために、システムの自己検知機能の検証を行う。

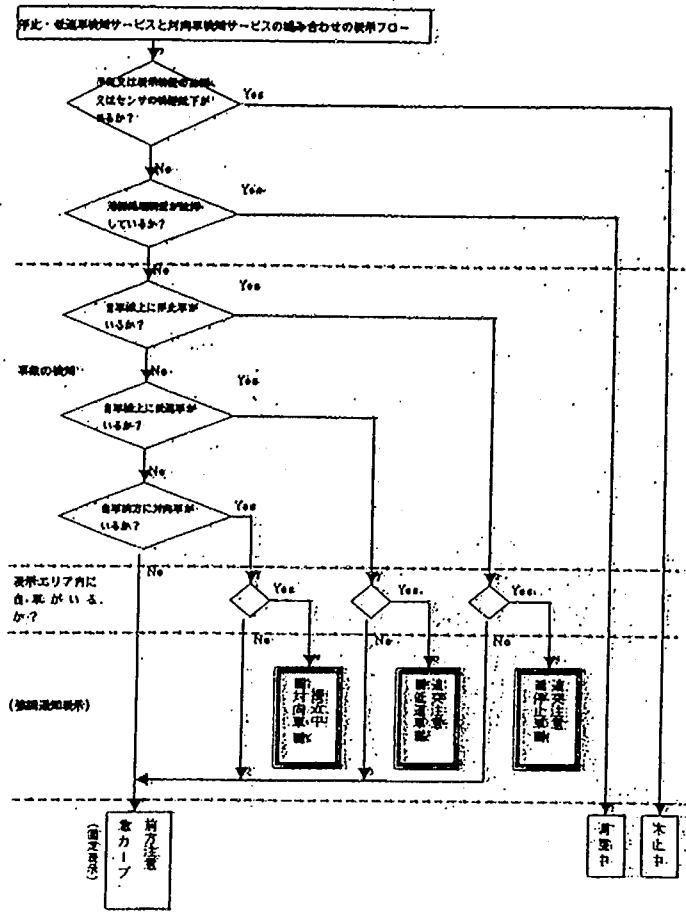


図2 サービス表示フロー

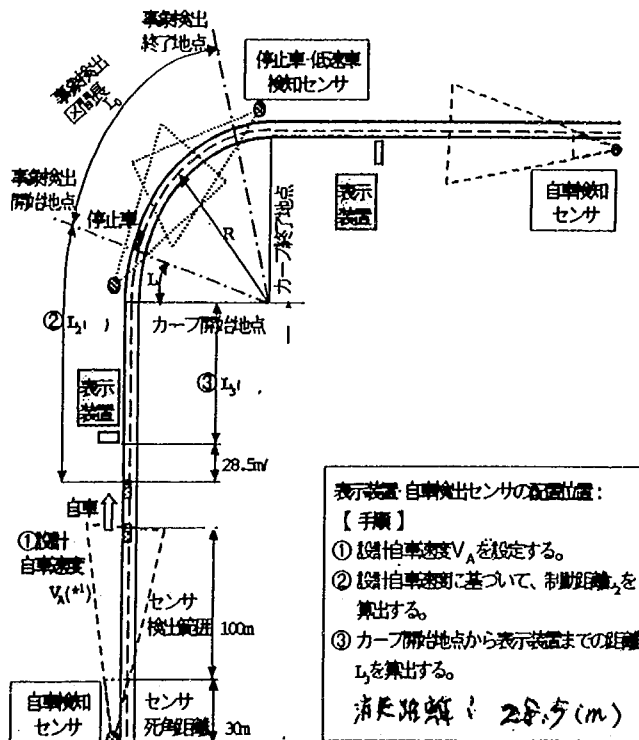


図3 表示装置配置位置

(上田, 岩崎, 田中, 村田, 小林)

5.3 システムの評価

(AHS：システムの評価に関する調査)

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の良い車両走行を実現する走行支援道路システム(AHS)開発において、そのシステムが効率的に開発されるために必要な体系的なシステム評価の計画を策定し、ユーザニーズからシステム構築までの開発全体のプロセスにわたって、そのプロセスと結果が、目的と目標に照らして妥当であるかどうかを評価し、検証することである。10年度は、ヒューマンファクタ評価装置を用いてドライバの運転行動データの取得を行いAHS交通シミュレータのモデルを修正するとともに、各基本ユーザー毎に走行支援（情報提供、警報、操作支援）タイミングと事故低減率の関係を算出した。

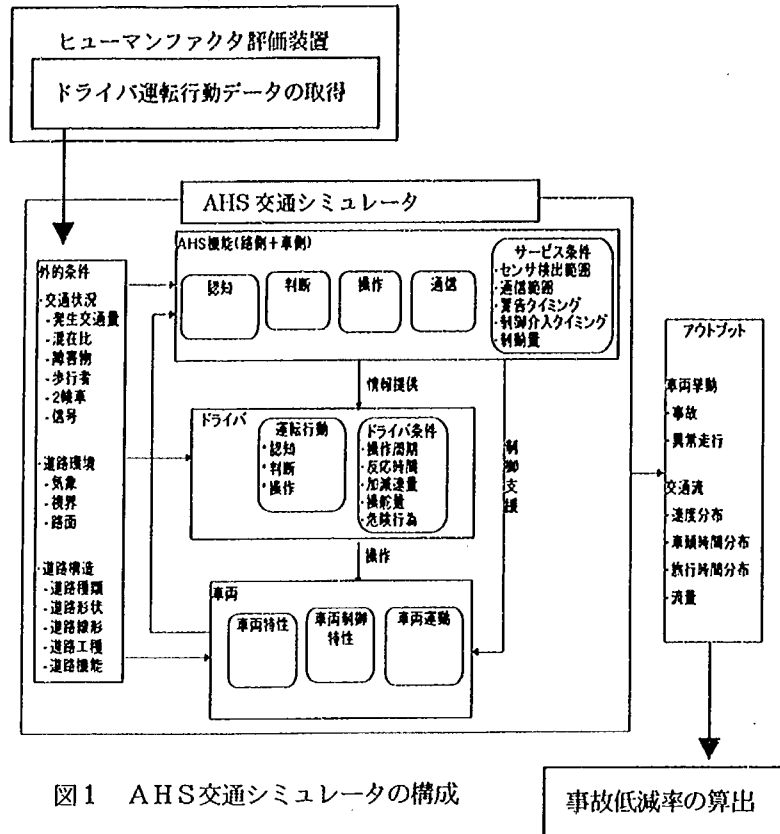


図1 AHS交通シミュレータの構成

1.研究方法

1.1 研究の手順

AHSの走行支援タイミングと事故低減効果の関係を算出するために、AHSが導入され走行支援が行われた場合のドライバーの行動データ（空走時間、ブレーキ立ち上がり時間、最大限速度（情報提供時、警報時））について、加減速を体感できる高性能なドライビングシミュレータであるヒューマンファクタ評価装置を用いて収集した。そして、収集されたデータを図1に示す構成のAHS交通シミュレータのモデルに組み込み、優先的に開発すべき基本ユーザーサービス「障害物衝突防止」「出会い頭事故防止」「右折事故防止」「車線保持（直線、カーブ）」「横断歩行者衝突防止」毎に典型的なサービスのシナリオを作成し、情報提供、警報、操作支援のタイミングを変化させて、その場合の事故低減率を求めた。事故低減率の算出手順を図2に示す。以下では、事故低減率算定の一例として、障害物衝突防止情報提供サービスのシミュレーション結果について説明する。

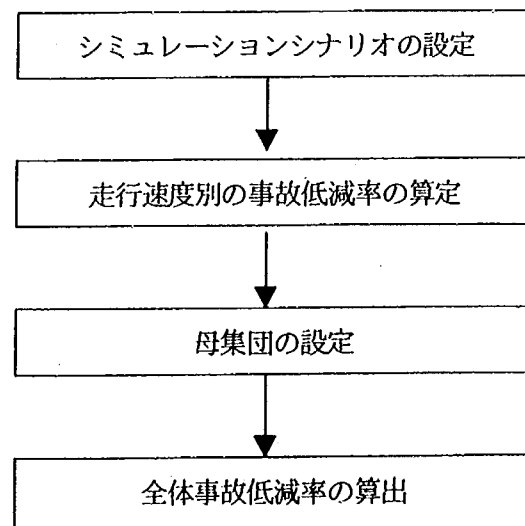


図2 事故削減率の算出手順

2.研究結果

2.1 事故低減率の算出

障害物衝突防止情報提供サービスが対象とする代表的な状況として、図3に示すような見通しの悪いカーブ区間に停止車両が存在しており、AHS車両が接近してくる状態をシミュレーションシナリオとして想定した。情報提供の効果を知るため、AHS車両は停止車両に関する情報提供があるまで停止車両に気がつかず、情報提供後に停止車両を発見し停止動作に入るものとした。シミュレーションは走行速度毎にドライバに停止車両情報を提供するタイミングを変えて事故低減率を算出した。事故低減率を求める際の母集団は、一般道における障害物衝突事故のうち発見の遅れによって生じた事故全体とし、事故が発生した時の速度分布を平成9年度の事故統計の危険認知速度をもとに求めた(図4)。走行速度毎の事故低減効果を母集団の速度分布によって重み付けすることにより全体としての事故低減率を求めた(図5)。その結果、停止車両に衝突するおよそ4秒前に障害物がある情報をドライバが知れば、約90%の事故が防げる事が分かった。(図6)

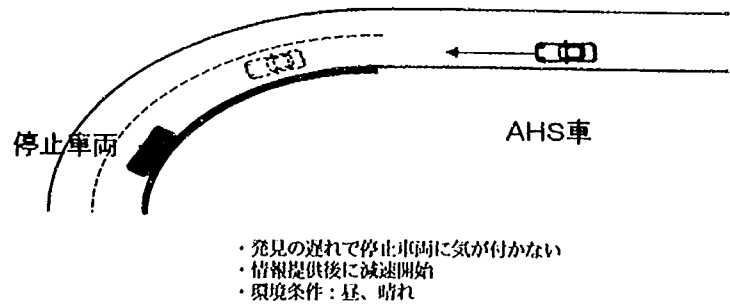


図3 障害物衝突防止情報提供サービスのシミュレーションシナリオ

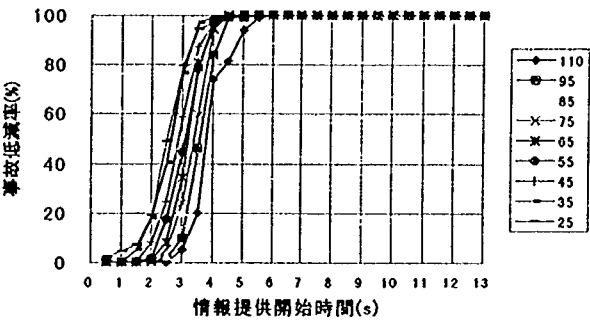


図4 速度別の情報提供開始時間と事故削減率

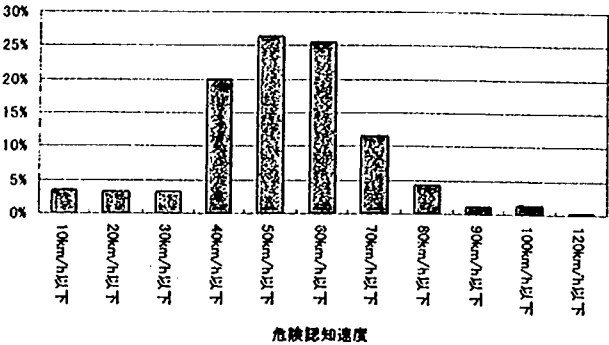


図5 母集団の速度分布

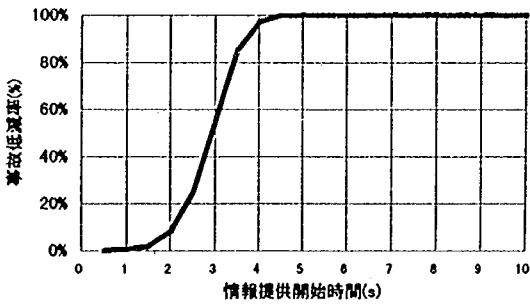


図6 情報提供開始時間と事故削減率

3.今後の課題

今回はユーザサービスの代表的なシナリオをもとに事故削減率を算出したが、今後はシミュレーションシナリオ(道路線形、天候、車両台数等)を変更してシミュレーションを実行して、ユーザサービスの効果の精緻化をすすめ、シミュレーション結果をシステム設計にフィードバックしていく。また、今後はシステム設計を踏まえて実機でAHSを構築し、実機を用いた実験によってもシステム設計の評価を実施していく予定である。

(上田, 岩崎, 田中, 村田, 小林)

5.4 (1) AHS：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】

走行支援道路システム（AHS）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。本研究はAHSの障害物衝突防止サービス、出会い頭衝突防止サービス、右折衝突防止サービス、横断歩行者衝突防止サービスの実現に必要な道路上の障害物、走行車両を把握できるセンサ技術の開発を行っている。

平成10年度においては、道路上の走行車両や障害物等の検出を目的とする道路状況把握道路システムを開発するため、可視センサ、赤外線センサ、ミリ波センサ等の障害物検出アルゴリズム及び走行車両検出アルゴリズムの改良を行い、その対環境性能を評価した。

1. 研究方法

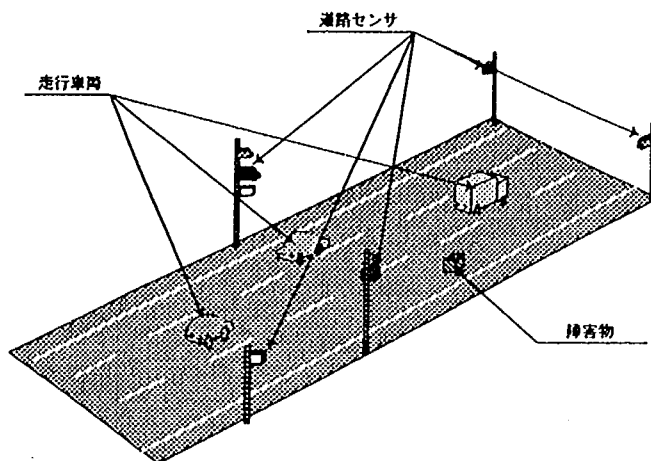
平成10年度は、可視センサ、赤外線センサ、ミリ波センサ等の障害物検出アルゴリズム及び走行車両検出アルゴリズムの改良を行い、雨霧環境実験施設によって創造された雨中及び霧中環境下において対環境性能を評価した。気象環境に関する実験パラメータとして、雨、霧の影響のないドライの状況、雨に関しては時間雨量20mm（霧雨）、55mm、100mmを行い、霧に関しては視程20m、50m、100mを設定した。センサの検出対象は障害物衝突防止サービス、出会い頭衝突防止サービス、右折衝突防止サービス、横断歩行者衝突防止サービスの実現に必要と考えられる歩行者、車両、自転車である。各センサとこれらの検出対象との距離を変化させ、センサが検出可能な距離データを収集した。

2. 研究結果

可視センサ、赤外線センサ、ミリ波センサの対環境性能について評価した結果は次の通りである。

2.1 可視センサ

可視センサは、可視カメラで取り込んだ映像に対して画像処理を施すことにより、検出対象物を認識するセンサであり、高速道路の監視カメラ（いわゆるCCTVカメラ）としての実用実績は豊富である。ドライの環境下においては、150m離れた距離において歩行者、車両、自転車を検出することが可能であった。基本的に人間が目視によって視認できるところ以上の性能は期待できないことは事前に予想されたが、降雨強度が強まるとともに検出性能は劣化し、また霧中においては全く対象物を検出することはできないことが確認された。この原因は検出対象物と周辺環境との間の輝度差不足や遠方における検出対象物をとらえる画素数の少なさが影響していると考えられる。したがって、検出アルゴリズムの改良によって雨霧の悪天候下における検出性能を向上させることはできない。悪天候下における検出性能を向上させるためには、画素数の多い高輝度カメラの開発を待たなければ



ばならない。

表 1. 可視センサの雨霧環境実験結果 (単位:m)

	ドライ	雨:20mm/h	雨:55mm/h	雨:100mm/h	霧:視程100m	霧:視程50m	霧:視程20m
人間	150	50	100	30	検出不能	検出不能	検出不能
車両	150	125	100	30	30	検出不能	検出不能
自転車	150	150	100	50	検出不能	検出不能	検出不能

2. 2 赤外線センサ

赤外線センサは、赤外線カメラによって撮像される画像を解析し対象物を検出するセンサである。赤外面像は温度に敏感であることから、昼夜を問わず動作可能であるが、夏季と冬季においてそれぞれ異なる検出アルゴリズムを開発する必要があることなどの課題があり、道路交通分野への実用化には至っていない。実験の結果、高い温度を発生させている車両の検出性能は優れており、逆に熱を発生させない自転車の検出性能が劣ることが確認された。ドライ環境においては、150m離れた距離において歩行者、車両、自転車を検出することが可能であった。可視センサと同様に、霧中環境下においては検出不能となった。降雨強度 20mm/h において検出不能となっているのも、霧雨であったことが影響したものと考えられる。

表 2. 赤外線センサの雨霧環境実験結果 (単位:m)

	ドライ	雨:20mm/h	雨:55mm/h	雨:100mm/h	霧:視程100m	霧:視程50m	霧:視程20m
人間	150	検出不能	50	検出不能	検出不能	検出不能	検出不能
車両	150	検出不能	150	100	50	検出不能	検出不能
自転車	150	検出不能	75	30	50	検出不能	検出不能

2. 3 ミリ波センサ

ミリ波センサは、ミリ波をアンテナより放射して検出対象物からの反射波を受信し、その受信データを信号処理することによって検出するセンサである。ミリ波を送受信するミリ波集積回路が高価であることなどの理由により、道路交通分野への実用化には至っていない。ミリ波センサは車両の場合 100m、自転車の場合 80m、人間の場合 50m が検出の限界であるが、悪天候下での検出性能の低下はほとんど見られないことが確認された。

表 3. ミリ波センサの雨霧環境実験結果 (単位:m)

	ドライ	雨:20mm/h	雨:55mm/h	雨:100mm/h	霧:視程100m	霧:視程50m	霧:視程20m
人間	80	80	80	50	80	80	80
車両	100	100	80	100	100	100	100
自転車	50	50	25	25	50	50	50

3. 今後の課題

実際の降雨・降雪・霧の中におけるセンサの性能を評価するため、継続して実験を実施していく必要がある。さらに、悪天候下においては、センサ自身が障害物等の検出性能が劣化していることを認識する機能について開発する必要がある。

(上田, 平澤, 佐々田)

5.4 (2) AHS：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)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に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システムである。路面状況把握道路システムはAHSの6つの基本ユーザサービス(①障害物衝突防止サービス、②出会い頭衝突防止サービス、③右折時衝突防止サービス、④車線逸脱防止サービス、⑤横断歩行者衝突防止サービス、⑥安全車間保持サービス)の実現に必要な路面の状況を把握する。平成10年度は、路面状況の検出が可能と思われる各種センサのアルゴリズムを開発し、その検出性能を評価した。

1. 研究方法

平成10年度は、表1に示すセンサの路面状況判別アルゴリズムの開発を行った。表1に各センサの路面状況を検出する原理や特徴について解説する。

表1. センサの種類と特徴

センサ名	路面状況を検出する原理と特徴
赤外画像センサ	波長や偏光の異なる赤外線カメラで撮像した画像を解析することにより、路面の温度分布や水分の存在を検出する、比較的広範囲を計測することが可能な非接触型センサ。
レーザレーダセンサ	パルスレーザ光を路面に向けて照射し、路面の光反射強度とセンサから路面までの距離を計測する非接触型センサ。別途路面温度を計測することにより水膜と氷膜を判別する。
湿潤センサ	水分付着による電気抵抗の変化から路面の水分量を計測する路面埋設型センサ。センサに内蔵された路面温度を計測する機能によって水と氷の違いを判別する。
光ファイバーセンサ	路側に埋設された光ファイバーによって計測される路面温度、気温・日射量・降水量等の道路気象データ、路面管理データと熱収支モデルによって路面状況を推定する広域型センサ。
電波放射計	天空と路面からの放射エネルギー(物質の持つ温度から放射される弱い電磁波)の違いを検出することによって路面状況を把握する非接触型センサ。
光式センサ	路面に対して赤外光を照射し、その反射波の特性から路面の水分含有率を計測する非接触型センサ。
電波散乱計	送信した電波信号の路面からの反射強度を測定することで路面状況を推定する非接触型センサ。
路面巡視センサ	路面からの反射光の中心周波数成分と低周波数成分の特性に基づいて路面状況を把握する車載の非接触型センサ。

2. 研究結果

表1に示すセンサの乾燥・湿潤(水膜状態を含む)・積雪(新雪・圧雪・シャーベット・圧雪氷板)・凍結路面の検出性能を評価するため、土木研究所テストコースの散水装置を利用した水膜実験、雨霧環境実験施設を利用した対環境性実験、土木研究所新潟試験所構内を利用した寒冷地フィールド実験を行った。以下に、乾燥・湿潤・積雪・凍結路面の判別が可能と思われる代表的なセンサの性能や今後の開発課題について評価した結果を記す。

(1)レーザレーダセンサ

図1にレーザレーダセンサで計測された路面反射強度と路面までの距離(レーザ光を放射してから路面反射を受けるまでの時間差)の関係を示す。路面に水膜が発生したり、積雪があると、センサと路面までの距離が短くなり、また、雪や氷はレーザ光の反射強度が強いという傾向がある。様々な路面状態に対する反射強度と時間差のメンバーシップ関数を用

いてファジー推論することによって路面状況が判別される。ただし、湿潤(水膜)と氷膜の間にセンサと路面までの距離やレーザ光の反射強度の差はほとんどないため、別途路面温度を計測してその違いを判定することが必要である。また、降雨・降雪時には、レーザ光が雨の粒子や雪の結晶によって散乱するため、検出精度が劣ることが確認された。実験では4m×4mの範囲を対象として路面状況の判定を行ったが、実道への適用を考えると、1基のセンサで複数車線の路面状況を検知することが必要と考えられる。

(2) 光ファイバーセンサ

図2は平成10年2月に国道18号に敷設された光ファイバーセンサと気象観測装置等を使用して推定された路面状況と実測の路面状況の違いを時間的な変化として整理したものであるが、最大で約6時間の誤差が発生している。誤差の大きさを見ると、まだ実用の域に達しているとは言いが、道路に沿って線的に路面状況を検出できるという点が優れている。現在の熱収支モデルには、車両が発生する熱により路面が暖められる効果、除雪作業や凍結防止剤の散布作業等による路面状況の人為的な変化の影響を取り入れられていない。これらの影響を熱収支モデルに取り込むことによって、時間的な誤差は改善されるものと期待される。

図2は平成10年2月に国道18号に敷設された光ファイバーセンサと気象観測装置等を使用して推定された路面状況と実測の路面状況の違いを時間的な変化として整理したものであるが、最大で約6時間の誤差が発生している。誤差の大きさを見ると、まだ実用の域に達しているとは言いが、道路に沿って線的に路面状況を検出できるという点が優れている。現在の熱収支モデルには、車両が発生する熱により路面が暖められる効果、除雪作業や凍結防止剤の散布作業等による路面状況の人為的な変化の影響を取り入れられていない。これらの影響を熱収支モデルに取り込むことによって、時間的な誤差は改善されるものと期待される。

(3) 電波放射計

図3に電波放射計で計測された垂直偏波と水平偏波の差と水平偏波の放射率の関係を示す。乾燥路面が降雨によって路面が濡れ始めると水平偏波の放射率が低下し、反対に乾燥路面に降雪が始まると水平偏波の放射率は上昇する。この傾向を利用することにより、電波放射計は精度よく路面状況を判別することが可能である。悪天候下における性能実験はまだ実施されていないが、電波放射計は悪天候に強いことが確認されているミリ波を検出しているため、様々な天候下において動作可能と期待される。

3. 今後の課題

実道における路面のわだち掘れの影響、道路を走行する車両の影響、実際の降雨・降雪・霧の中におけるセンサの性能を評価するため、今後とも継続して実験を実施していく必要がある。また、実道におけるセンサの方式選定に当たっては、センサの性能評価だけでなく、経済性、施工性、設置したときの美観、保守性等についても検討する必要がある。

(上田, 平澤, 佐々田)

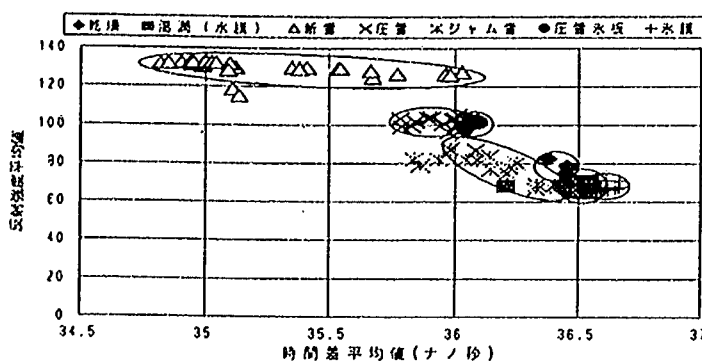


図1. レーザレーダセンサの計測結果

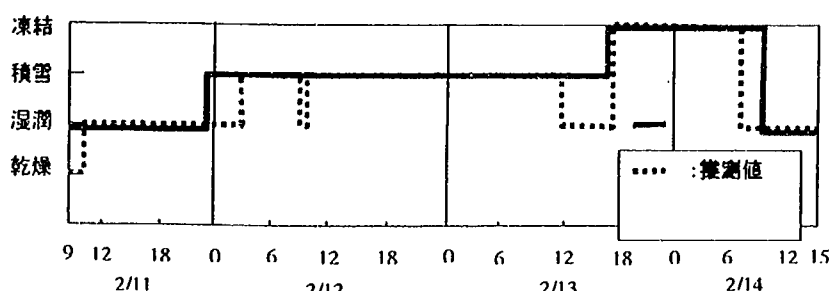


図2. 光ファイバセンサの計測結果

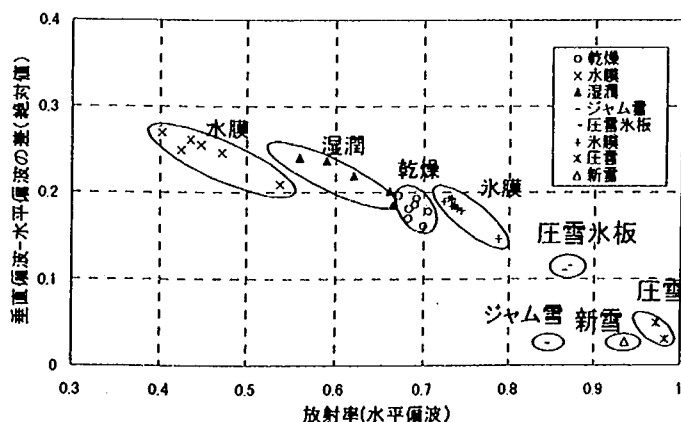


図3. 電波放射計の計測結果

5.4(3) AHS：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、AHS（走行支援道路システム）において、道路に設置したセンサーから道路状況、路面状況の情報を収集し、路車間通信を用いてAHS車両へ提供することにより、ドライバーへ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提供するシステムである。10年度は、安全に関する基本ユーザサービス（①障害物衝突防止、②車線保持（直線）、③車線保持（カーブ）、④出会い頭衝突防止、⑤右折衝突防止、⑥横断歩行者衝突防止、⑦安全車間保持）を実現するために必要な情報の内容や提供方法に関する検討を行った。

1. 研究目的

10年度の研究目的は、7つの安全に関する基本ユーザサービスの実現に必要な情報内容を整理し、それぞれの基本ユーザサービス毎に路車間通信を用いて路側と車側の間でどのように情報がやりとりされ、サービスが実現されるべきかについて検討を行った。

2. 研究方法および結果

表－1は基本ユーザサービスを実現するために必要な路車間通信に求められる情報について整理したものである。

表－1 路車間通信に求められる情報項目

路車間通信に求められる情報項目(案)		通信方向と方法			サービス名称						
		車→路 (アップリンク)	路→車 (ダウンリンク)		安全のサービス						
		個別	個別	同報	障害物衝突防止	車線保持（直線）	車線保持（カーブ）	安全車間保持	出会い頭衝突防止	右折衝突防止	横断歩行者衝突防止
1.車両の登録【インフラがサービス車両を認証するために必要】											
1) 車両認証情報	車両が車両IDやi.c.a等の車両保有機能をインフラへ伝達して提供サービスの認証を得るための情報	○			○	○	○	○	○	○	○
2.情報識別子【インフラおよび車両間の情報を正しく解釈するために必要】											
1) セキュリティー情報	インフラおよび車両からの情報の信頼性を確保するための路号化を解釈するためのキー情報		○		○	○	○	○	○	○	○
2) 道路方向の識別子	進行方向毎に編纂されているインフラからの情報を車両側へ		○		○	○	○	○	○	○	○
3.提供サービスの種類【インフラが提供するサービスの種類とその提供範囲】											
1) 提供サービスの種類	インフラが提供しているサービスの種類とその範囲			○	○	○	○	○	○	○	○
4.インフラセンシング情報【車両へ提供するためにインフラが収集した情報】											
1) 路面状況情報	乾燥、湿潤、積雪、凍結などの路面状況に関する情報			○	○	○	○	○	○	○	○
2) 障害物情報	停止車両、低速車両などの障害物情報			○	○						
3) 車両走行情報	走行している車両の位置、速度などの情報		○						○	○	
4) 歩行者情報	道路を横断している歩行者の位置情報			○							○
5.道路関連情報【車両が走行するために必要な道路に関する情報】											
1) 道路基準点情報	障害物や走行車両の位置を示すための基準点を緯度/経度で表した座標			○	○	○	○	○	○	○	○
2) 道路線形情報	車線幅、勾配など道路線形を表す情報			○	○	○	○	○	○	○	○
3) 交差点情報	交差点の位置や接続道路数などの情報			○					○	○	○
4) 横断歩道位置情報	横断歩道の位置情報			○							○
6.車両センシング情報【個々の車両が収集した情報】											
1) 自車両情報	車両の諸元や位置、速度などの情報	○			○	○	○	○	○	○	○
2) センシング情報	車両が収集した路面状況や障害物等に関するセンサ情報	○			○	○	○	○	○	○	○
7.個別車両情報【自車の周辺を走行している車両に関する情報】											
1) 個別車両情報	車両の周辺を走行している車両の位置、速度などの走行情報に関する情報		○		○			○	○	○	

5.4 (4) AHS：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道路システム（AHS）において、道路上の車両位置のリアルタイム検出なら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。10年度調査では、9年度に土木研究所テストコースに敷設したレーンマーカの改良とその評価を実施するとともに、各種レーンマーカの特徴を生かした共有化・統合化システムの開発を行った。

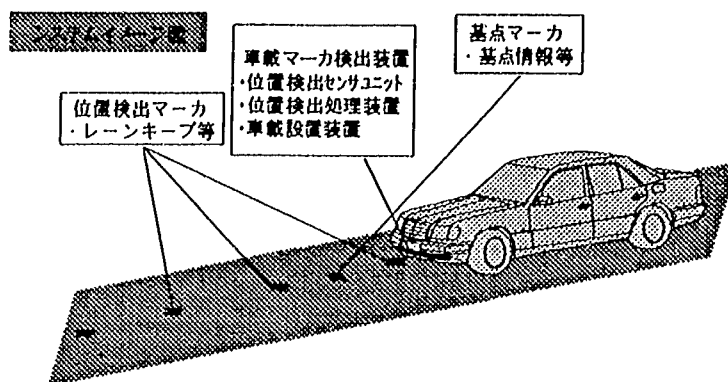


図-1 システムイメージ

1. 研究方法

10年度においては、磁界強度分布から車両位置を検出する磁気式マーカシステム（ネイル型、プレート型）、共振反射波及び変調反射波の受信電磁波の強度分布によって車両位置を検出する電波式マーカシステム（中長波共振反射式、中長波変調反射式）、さらにその組み合わせシステムについて改良設計を行うとともに、土木研究所テストコースに敷設した各マーカを用いて車両の横位置検出に関する動的性能を詳細評価した。

2. 研究結果

2. 1 マーカシステムの改良

2. 1. 1 磁気式マーカの耐性の改良

9年度調査結果より位置検出精度に影響があった外乱磁界に関して、磁気外乱が大きいと思われる山地部、橋梁部、トンネル部、発電所近郊で磁気外乱の実測調査を行い、そのデータ基にシミュレーション分析を行って、路面直上30cm垂直磁界強度2 Gの磁気式マーカに改良した。また、磁気強度を保ちつつ、構造、素材、形状などで設計の最適化を図った。

2. 1. 2 電波式マーカの耐性の改良

9年度調査結果より、検出精度への影響が懸念された車種による自車ノイズと踏切等の場所によるノイズについて実測調査を行い、ノイズ影響、給電性能、および電波法などを考慮し、使用周波数、送受信アンテナの設置位置、マーカの反射レベル等のシステム改良を行った。

2. 1. 3 磁気式・中長波変調電波式共用化システムの設計

位置検出性で優位な磁気式と基点情報等の位置情報検知で優位な中長波変調電波式マーカの原理的共用可能性を机上及び実験にて検証し、両者の優位性を生かした磁気式・変調反射電波式の共用化システムを設計した。

共用化は磁気式マーカ、変調反射電波式マーカ、変調反射電波式マーカ中に磁気式マーカを組込んだ共用化マーカと車載情報送受信アンテナ、複数の磁気センサを有する検出器で構成されるシステムであり、位置

は垂直・水平磁気強度、基点情報等は路面への電波照射によるマーカ基点情報の変調反射を検出することにより得るものである。

2. 1. 4 共振反射・変調電波方式の電波統合化システムの設計

9年度で整理した中長波電波式車両位置情報システムにおいて位置検出性で優位な共振反射式マーカと基点情報等の位置情報検出性で優位な変調式マーカを1種類の車側検知器で読取り可能なシステムを構築することを目的に統合化の検討を行った。位置は検出器からのキャリア電波を間欠照射による共振反射波の受信出力から検出し、基点情報はキャリア電波を受信した復調信号によりマーカ位置情報を検知するものである。

2. 2 横位置検出精度の評価

横位置検出精度について、土木研究所テストコースに埋設した缶体に、磁気式マーカ、中長波変調反射電波式マーカ、中長波共振反射電波式マーカおよび電波統合化式、磁気電波共用化式マーカを同一条件で設置し、検出器を車載した実験車の走行結果から動的な横位置検出精度を評価した。横位置検出精度の動的評価結果を表-1に示す。なお、検出器通過位置とはマーカと検知器中心との水平距離を表す。マーカの種類によって車載実験装置の形状が異なっているため、検出器の設置高さが一定ではないので、マーカの性能に関する正確な相互比較はできないが、現時点の結果に基づいて比較評価を行うと次の通りである。

磁気式マーカは検出器の通過位置が中心から300mm以内においては ± 20 mmを越えない範囲の誤差の精度で位置検出できることが確認できた。共振反射電波式マーカでは、アンテナを垂直と水平に設置した場合の実験を実施したが、検出精度については両者とも $\pm 20 \sim 35$ mmの範囲でありほとんど差は認められなかった。変調反射電波式マーカは最大で ± 50 mm程度の誤差を有し、これは実験したマーカの中で最も劣る結果となっているが、実用上許容できる誤差範囲と考えられる。電波統合化式マーカの検出誤差は $\pm 20 \sim 35$ mmの範囲で共振反射電波式マーカと同等の性能を有していることが確認された。磁気・電波共用化式マーカは実験例が十分ではないが、磁気式マーカに近い性能を有する可能性がある。

表-1 横位置検出精度の動的評価

(単位:mm)

方式			磁気式		共振反射電波式				変調反射電波式		電波統合化式		磁気・電波共用化式	
			ネイル型	プレート型	390mm		200mm		200mm		200mm		300m 200m	
(検出器設置高さ)			磁300mm電	300mm	アンテナ垂直		アンテナ水平							
検出器通過位置			0	300	0	300	0	300	0	370	0	300	0	
走行速度	10km/h	精度 2σ	± 8	± 8	± 13	± 13	± 18	± 22	± 17	± 23	± 45	± 32	± 20	± 25
	40km/h		± 11	± 15	± 10	± 15	± 20	± 25	± 19	± 23	± 48	± 9	± 20	± 25
	70km/h		± 8	± 8	± 18	± 18	± 23	± 28	± 25	± 27	± 54	± 12	± 25	± 30
	100km/h		± 6	± 13	± 7	± 18	± 29	± 33	± 30	± 35	± 44	± 12	± 30	± 35

3. 今後の課題

本年度までに実施した横位置検出精度の評価によれば、磁気式マーカが最も優れているという結果が得られた。また、その他のマーカについても大きな差異は見られなかった。今後、AHSのユーザサービスの実現に適したマーカ方式の選定するにあたっては、大型車を考慮した検出器設置高さでの動的評価を行うとともに、基点情報等の検知を目的としたマーカの性能評価やコストや設置性、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。

(上田, 平澤, 佐々田)

5.4 (5) AHS：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】

走行支援道路システム（AHS）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。本研究はAHSの基本ユーザサービス（①障害物衝突防止サービス、②車線逸脱防止（直線）サービス、③車線逸脱防止（カーブ）サービス、④出会い頭衝突防止サービス、⑤右折衝突防止サービス、⑥横断歩行者衝突防止サービス、⑦安全車間保持サービス）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10年度においては、AHSの基本ユーザサービスを実現するための通信手順について検討を行った。

1. 研究方法

AHSの基本ユーザサービス毎にシナリオを設定し、サービスを実現する際に行われる路車間通信における通信手順について検討を行った。さらに、AHS基本ユーザサービスを実現するために路車間通信に求められる機能について検討を行った。

2. 研究結果

2.1 路車間通信手順の概要

以下では、AHS基本ユーザサービスの内、障害物衝突防止サービスを例にして説明する。図-1は障害物衝突防止サービスについて、AHS車両の走行位置、路車間通信の情報内容、ドライバーへの情報提供や警報ならびとAHS車両の走行支援（緊急制動）の関係を表わしている。

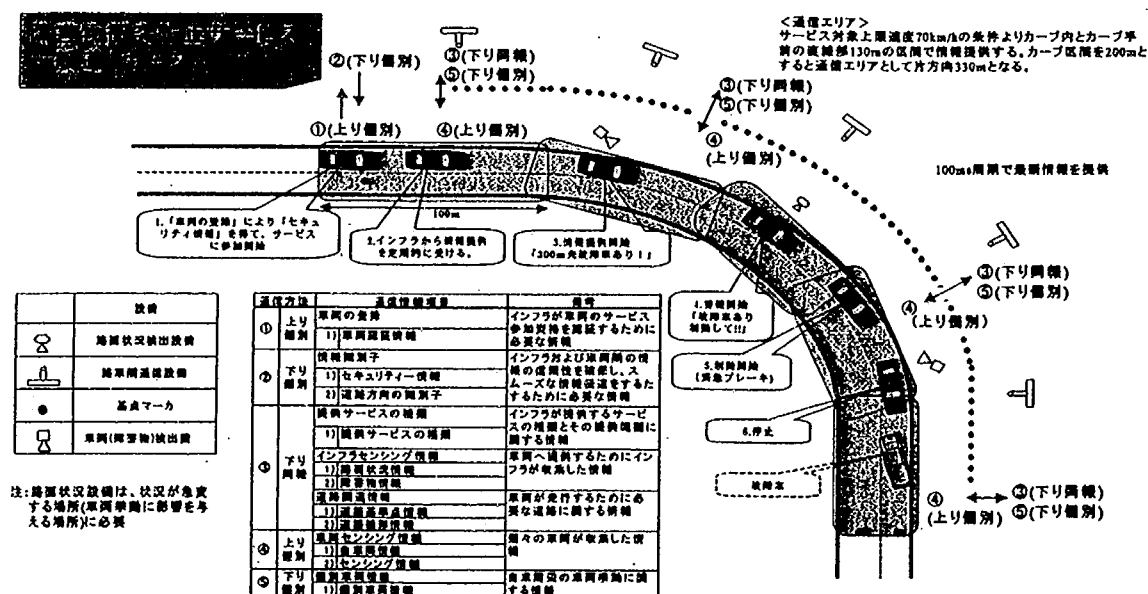


図-1 路車間通信手順（障害物衝突防止サービス）

AHS車両が無線通信ゾーン内に入ると、車両の登録（上り個別通信）が行われてから、インフラはその車両が正規ユーザであることを認証し、符号化に関するセキュリティ情報を提供（下り個別通信）する。インフラは路面、車両、歩行者、道路線形等に関する符号化された情報を通信ゾーン内のAHS車両に提供（同

報通信)し、車両はセキュリティ情報に基づきこの情報を解読する。また、個々のAHS車両の位置や速度の情報およびAHS車両がセンシングした情報は符号化されてインフラに提供(上り個別通信)される。インフラはこの情報を取りまとめ処理し、情報提供が必要と考えられる個々のAHS車両に対して提供(下り個別通信)する。例えば、図-1に記載された車両の直後を走行している車両に対しては、障害物の手前で車両が減速していることが提供(下り個別通信)される。

一方、車両では、提供された情報に基づいて、障害物に衝突しないようにドライバーへ情報提供を行う。障害物(故障車)までの距離に関する情報については、無線通信ゾーンの開始地点が不明確であるため、車両は路車間通信からの情報だけでは開始点を認識することができない。そこで、路面に基点マーカを敷設する必要がある、この位置を情報の開始点と認識する。情報提供を受けた車両は、走行速度や路面の状況に応じて、適切な位置でドライバーへの情報提供を開始し、ドライバーが情報を認識しない場合には、警報で注意を喚起したり、緊急制動を行う。

2.2 路車間通信の特徴的機能

図-1に提案されている通信の手順の特徴的な機能としては、基本ユーザサービスの提供が必要とされる区間において連続通信を行っていること、無線通信ゾーン内でAHS車両の進行方向を判別する必要があること、通信のセキュリティを確保していること等がある。このような特徴を必要とした根拠は、以下に示す通りである。

(1) 連続通信の必要性

障害物衝突防止サービスを実現するためには、車両が無線通信ゾーンに入った後、サービスの対象区間を脱出するまで連続通信による情報提供が必要である。もし、車両が無線通信ゾーンに入った直後だけ情報提供を行うとすると、車両がサービスの対象区間を走行している間に交通状況が変化する可能性があるからである。例えば、故障車ではなく渋滞の末尾がカーブ区間に発生した場合を想定すると、連続通信でなければ、時間的に変動する渋滞末尾の情報を正しく提供できない。

(2) 無線通信ゾーンの形成と車両の進行方向の判別

電波の有効利用とアンテナ設置コストの経済性を考えると、1つの無線通信ゾーンで道路の上り車線と下り車線をカバーすることが望ましい。この場合、1つのゾーン内でインフラからは上り車線と下り車線の情報が提供されることとなり、車両は提供された情報がどちらの車線の情報かを判別する必要がある。そこで、基点マーカを設置し、上り車線(例えば、フラグ1)と下り車線(例えば、フラグ2)の識別子を車両に提供し、インフラからの情報にも識別子を付加する。この識別子により車両は上り下りのどちらを走行していて、どの情報を取得すればよいのかを識別可能となる。なお、自動車専用道のように上下線が分離されている道路等では、上り車線と下り車線を別々の無線通信ゾーンでカバーする必要がある。

(3) 符号化

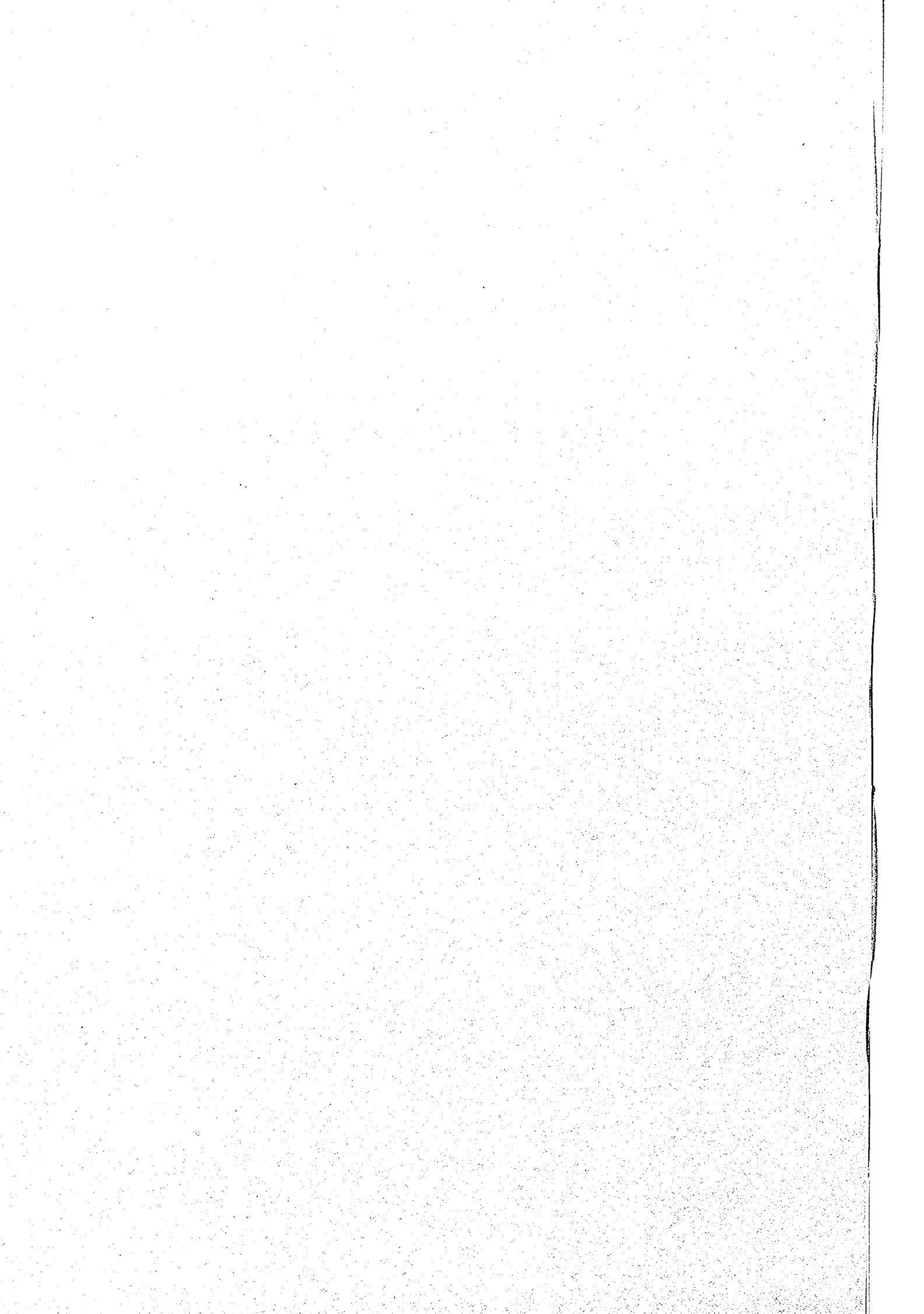
AHSにおいて誤った情報を提供することはドライバーを混乱させるだけでなく、場合によってはドライバーの生命に関わる重大な事故を引き起こす可能性があるため、ビーコンからの情報は十分な信頼性とセキュリティを確保しなければならない。このため、情報交換に際し情報はすべて符号化する。情報交換に符号化を取り入れることによって、正しく符号化されているデータはインフラおよび車両からの正しい情報であることが確認できる。

3. 今後の課題

本年度はAHSを実現する際の通信手順を明らかにし、情報項目を抽出した。さらに、AHSに必要な情報通信に関する機能について検討を行った。今後は、情報項目の表記方式やその情報量を定めるとともに、AHSにおける情報通信システムを設計・構築をおこなっていく予定である。

(上田, 村田, 山谷, 小林)

建設事業のコスト縮減に関する研究



建設事業のコスト縮減に関する研究

1. 研究の背景

公共工事のコスト縮減は今日の重要な行政課題であり、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、間接に公共事業のコスト縮減に資する研究開発に取り組んでいる。

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重点的、戦略的に行われているとはいえず、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のが実情である。

このため、まず、事業プロセスも含めた建設事業のコスト構造の解明が必要であり、これを踏まえて、中長期的な視点から研究開発の重点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
- ② 技術開発ターゲットの明確化、研究開発のプライオリティづけ
- ③ 土木研究所の研究開発の重点化
- ④ 民間技術開発誘導へのインセンティブ付与

3. 達成目標

- ① 積算実績データベースをもとに、建設コスト構造モデルを構築
- ② 研究開発のコスト縮減効果を計測、予測
- ③ 土木研究所における研究開発指針（コスト縮減）を策定
- ④ 民間に対する技術開発ニーズ（コスト縮減）を提示

4. 社会的な効果

- ① 建設事業のコスト構造を明らかにすることによって、設計 VE 等をはじめとするコスト縮減に向けての各種の取組みをサポートする（データベース等の作成）。
- ② コスト縮減のため、官民の戦略的、重点的な技術研究開発を促す。
- ③ 公共事業執行の効率化の面での発注者のアカウンタビリティをバックアップする。

ー建設事業のコスト縮減に関する研究ー

個別研究課題目次

6.1	道路構造物の建設コスト縮減に資する設計標準化に関する調査……………	(建設システム課)	… 146
6.2	事業プロセスにおける建設コスト縮減方策の調査		
(1)	道路事業プロセスにおける建設コスト縮減方策の調査……………	〔建設マネジメント技術研究官〕 〔建設マネジメント技術研究室〕	… 148
(2)	河川事業プロセスにおける建設コスト縮減方策の調査……………	〔建設マネジメント技術研究官〕 〔建設マネジメント技術研究室〕	… 152
6.3	地形改変を低減するのり面对策工法に関する調査……………	(土質研究室)	… 156
	ー山岳道路への軽量盛土工法の適用ー		
6.4	擁壁構造物の設計合理化に関する調査……………	(施工研究室)	… 160
6.5	小規模シールド工事のコスト縮減化に関する調査……………	(施工研究室)	… 162
6.6	長大橋の橋面構造の合理化に関する調査 (経済性に優れた新しい橋梁の走行面に関する試験調査(その1))…	(舗装研究室)	… 166
6.7	軟弱地盤の合理的な沈下すりつけ対策に関する調査……………	(土質研究室)	… 168
6.8	管渠システムのコスト縮減に関する調査		
(1)	管渠システムのコスト縮減に関する調査……………	(下水道研究室)	… 170
(2)	管渠システムのコスト縮減に関する調査……………	(建設システム課)	… 172

6.1 道路構造物の建設コスト縮減に資する設計標準化に関する調査

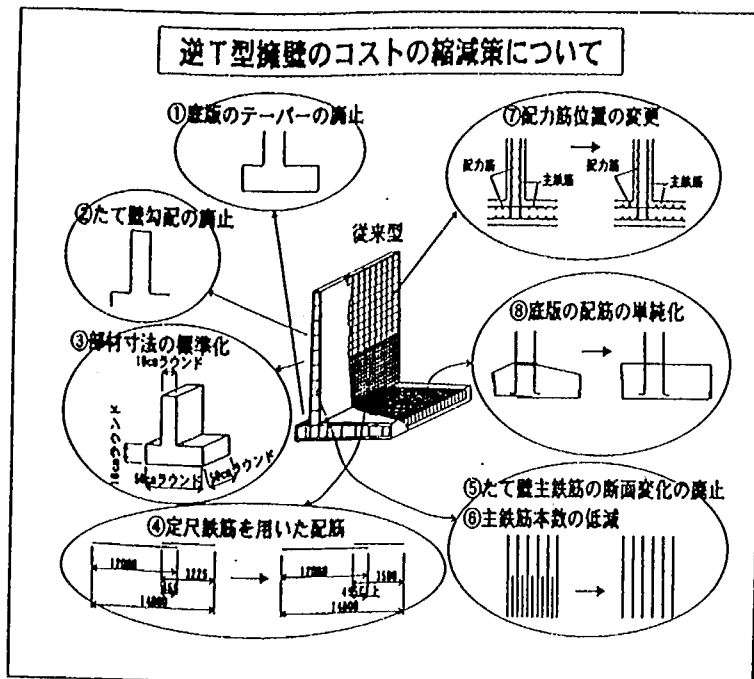
研究期間：平8～平10

担 当：建設システム課

【要旨】

本調査は、建設コストを縮減するための合理的な設計手法について検討を行うものである。検討に当たっては、労務費が材料費に比べ相対的に高い経済環境等を背景に、道路構造物の設計思想を従来の使用材料を最小とする「材料ミニマム」から施工手間をより重視した「労働量ミニマム」への転換が重要であるとの認識に立ち、これまで、上記視点を実証するための試験工事を中心に諸検討を進めてきた。

10年度は引き続き、試験工事全45件の施工調査データを分析しており、一定規模以下の条件であれば「労働量ミニマム」という設計の考え方は、コスト縮減に極めて有効であることが明らかとなった。そして、試験工事の結果等を踏まえ、「労働量ミニマム」に繋がる合理的な設計手法を「土木構造物設計マニュアル(案)」としてとりまとめた。



1. 調査内容

- ①擁壁・カルバート等の道路構造物について、現場施工の効率化といった観点から現行標準設計の問題点を抽出し、コンクリート、型枠及鉄筋の各作業に係わる労働量低減化方策を提案する。
- ②労働量低減化方策を実際の工事に適用し、労働量の低減効果及び設計・施工上の問題点を明らかにする。
- ③建設コストの縮減効果を、一般的なモデルについて検証する。

2. 調査結果

2.1 コスト縮減に資する労働量低減化方策の提案

(1) 現場施工の効率化といった観点からの現行標準設計の問題点

擁壁のたて壁や底版等に代表されるようにテーパ部材が多く、構造物の形状が全体的に複雑である。鉄筋については、構造物の形状が複雑なため、加工形状が複雑化し、加工形状の種類も多くなっている。これらは、コンクリート、鉄筋等の材料数量を最小にする「材料ミニマム」という設計の考え方に起因したものである。

(2) 提案した労働量低減化方策

上記の問題点を踏まえて、下記に示すような労働量低減化方策を提案した。

- ①擁壁；底版上面のテーパの廃止、たて壁勾配の禁止、定尺鉄筋を用いた配筋、たて壁主鉄筋の断面変化の廃止、主鉄筋本数の低減、配力鉄筋位置の変更
- ②カルバート；下方ハンチの除去、定尺鉄筋を用いた配筋、主鉄筋本数の低減、配力鉄筋位置の変更

表－１ 試験工事实施件数

構造物名		工事件数
土工 構造物	片持ばり式擁壁	10件
	ボックスカルバート	18
橋梁 下部工	逆T式橋台	9
	壁・張出し式橋脚	8
合 計		45

２．２試験工事による労働量低減化方策の検証

（１）試験工事件数

試験工事における対象工種及び試験工事の実施件数は表－１のとおりであり、全工種とも、場所打ち方式によるＲＣ構造である。

（２）労働量の低減効果の分析結果

表－２は労働量の低減効果に関する分析結果である。特に、型枠及び鉄筋作業において「労働量低減方策」による効果が高い結果となっている。

２．３建設コストの縮減率の推定

上述の分析結果をもとに、コスト縮減率を以下の手順で推定する。検討した擁壁・カルバート・橋台・橋脚の全てにおいて、労務費の低減率が材料費の増加率を上まわり、「労働量ミニマム」の設計思想はコスト縮減に繋がることが実証された。以下では擁壁・カルバートに対する推定結果を示す。

①標準的な試算モデルを想定し、現行設計、労働量低減化方策を取り入れた合理化設計の各々について詳細設計を実施する。

②①の結果の材料数量及び現行歩掛・試験工事における労務人員等をもとに、両者の直接工事費を算出する。

③②の結果における両者の工事費の比率をもってコスト縮減率とする。

（１）片持ばり式擁壁

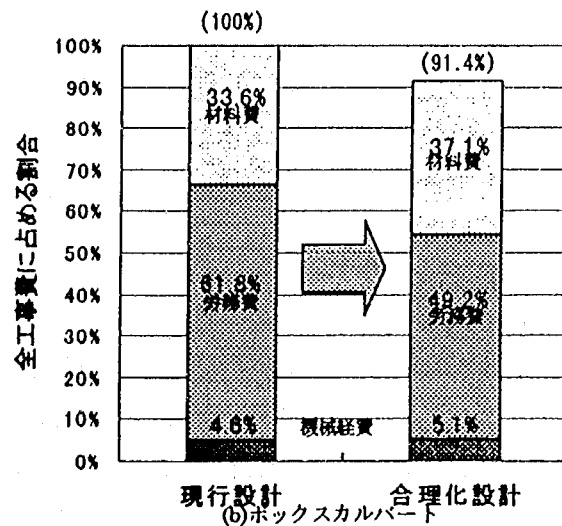
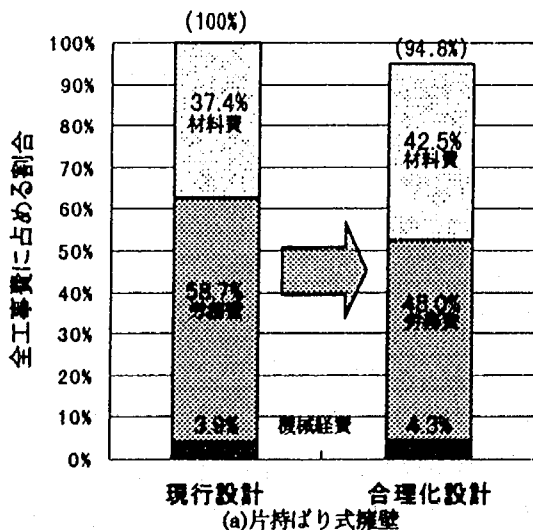
①試算モデルは、擁壁の全高を9 m、6 m、3 mの3ケース、土圧の大きさに係わる裏込め土の種類を砂質土、礫質土の2ケースとし、それらの組み合わせ計6ケースである。

②現行設計における直接工事費を100%（工事費換算による全6ケースの平均）とした場合の材料費と労務費等との関係を図－１（a）に示す。合理化設計における材料費は5.1%の増加に対して、労務費が10.7%の低減となり、工事費全体では約5%のコスト縮減率となる。

（２）ボックスカルバート

①試算モデルは、内空寸法（幅×高さ）を2×2 m、4×5 m、6×5 mの3ケース、作用荷重の大きさに係わる土かぶりを2ケースとし、それらの組み合わせ計6ケースである。

②推定結果の図－１（b）より、合理化設計の材料費の増加率が3.5%、労務費の低減率がそれを上回る12.6%となり、工事費全体では約8%のコスト縮減率である。



図－１ コスト縮減効果の推定結果

（大澤，村椿）

6.2 (1) 道路事業プロセスにおける建設コスト縮減方策の調査

研究期間：平9～平10

担 当：建設マネジメント技術研究官
建設マネジメント技術研究室

【要旨】

公共工事のコスト縮減は政府全体で取り組むべき重要課題であり、その推進に際しては、定期的な評価と、結果をわかりやすく国民に提示していくことが求められる。

本研究は、コストウエイトの大きな工種の抽出、様々なコスト縮減施策の事業プロセス全体からみた事後評価、計画段階の概算費用算出に適用可能な簡便なコスト構造モデルの開発を目指す。

10年度は、9年度に検討した道路事業モデルについて、工事積算書を分析し、土木工事積算システムの工事工種体系のレベル2（工種区分）相当毎にコスト要素を簡素化するとともに、モデル実用化の課題、計画段階における事業プロセス全体のコストの推計への適用拡大の可能性について検討した。

本研究で、積算モデルを用いて事業全体のコストを簡便に表現するモデル構築の可能性が確認できた。

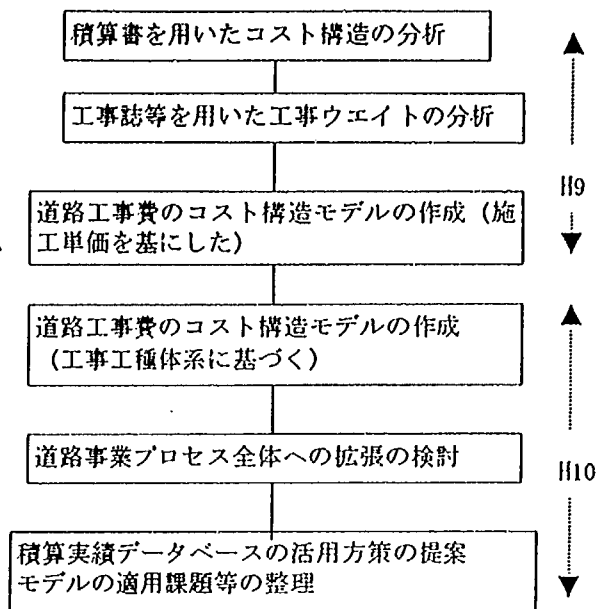


図1 研究の全体計画

1. 研究方法

1. 1 コスト構造モデルの作成

1. 1. 1 コスト構造モデルの考え方

標準的な道路1kmのコスト構造モデルがあれば、ある道路プロジェクト全体のコストの妥当性を確かめるのに役立つ。本研究では、建設コストの変動は、構成する要素の単価もしくは数量の変化を把握することで可能と考え、ここに積算モデルの活用を考えることとした。

積算の工事工種体系は、積算要素を工事区分（レベル1）、工種区分（レベル2）、種別区分（レベル3）、細別区分（レベル4）とツリー状に分類表現したもので、この順に i, j, k, l とすると、ある事業（プロジェクト）の全体コスト C_o は次のように表現できる。

$$C_o = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l X_{ijkl} \cdot a_{ijkl} \quad \dots\dots\dots \text{式1}$$

ここで、 X_{ijkl} ：積算数量 a_{ijkl} ：積算単価

このモデルは、積算と同じ膨大な作業が伴うばかりか、詳細設計が終了していない段階で、レベル4（細別区分）で使用するコスト要素の数量と単価に関する情報が必要となり、実用性はほとんどない。

現在の工事工種体系では、工事発注の契約単位であるレベル4（細別区分）より上位のレベルには数量、単価の概念がない。もし、全レベルの全要素に数量、単位が設定（「標準数量」、「標準単価」と呼ぶ）できれば、あるレベルの標準単価は配下のレベルの標準数量と標準単価の積を全て集計（「レベル集約」と呼ぶ）して算出でき

る。本研究ではこのレベル集約によって式1を大幅に簡素化し、コスト構造モデルの推計を試みる。

1. 1. 2 道路新設・改築事業のコスト構造モデルの考え方

単位事業規模当たり（道路工事延長1Km当たり）の工事コストは次のように表現できる。

$$\begin{aligned} \text{道路1km当たり工事費} &= \text{工事延長1km当たり道路改良工事費} + \text{工事延長1km当たり橋梁工事費} \\ &\quad + \text{工事延長1km当たりトンネル工事費} + \text{工事延長1km当たり舗装工事費} \\ &= \text{道路改良1km当たり工事費} \times \text{道路改良ウェイト} \\ &\quad + \text{橋梁1km当たり工事費} \times \text{橋梁ウェイト} \\ &\quad + \text{トンネル1km当たり工事費} \times \text{トンネルウェイト} \\ &\quad + \text{舗装1km当たり工事費} \times \text{舗装ウェイト} \end{aligned}$$

ここで、ウェイトは各工種の工事延長1Kmに対する延長割合だが、単位がkmの標準数量でもある。

また、レベル1のあらゆるコスト要素は、それを構成するレベル2の要素で表現することができることから、例えば、道路改良（レベル1）を、レベル2で表現すると次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{道路改良工事費} &= \text{道路土工} + \text{地盤改良工} + \text{法面工} + \text{擁壁工} + \dots + \text{仮設工} \\ &= \text{道路土工標準数量} \times \text{標準単価} + \text{法面工標準数量} \times \text{標準単価} + \text{擁壁工標準数量} \times \text{標準単価} + \dots \\ &= \sum \text{道路改良工事を構成するレベル2の標準数量} \times \text{それに対応する標準単価} \end{aligned}$$

なお、上述の工事費は直接工事であるため、間接費を含めた工事費（工事価格）は、直接工事費に諸経費率を乗じて算出する必要がある。諸経費率＝工事価格／直接工事費－1、工事価格＝直接工事費×（1＋諸経費率）

結局、道路工事延長1km当たりの道路工事費Cotは次のように表すことができる。

$$Cot = \sum_{i=1}^4 \left((W_i \sum_{j=1}^n S_{ij} \cdot t_{ij}) \cdot (1 + \alpha_i) \right) \dots \dots \dots \text{式2}$$

ここで、i：1＝道路改良工事 2＝橋梁工事 3＝トンネル工事 4＝舗装工事

w：道路工事延長1Kmに対する各工事ウェイト

s：各工事1Km当たりのレベル2標準数量

t：sに対応する標準単価

α：各工事の諸経費率

1. 1. 3 レベル集約方法

全国の地方建設局で新土木工事積算システムで作成した7～9年度発注の1億円以上の積算書のうち、道路新設・改築事業区分に関するもの計76サンプルを用いて分析を行い、レベル2ないしはレベル3毎に数量、単価を設定することとした。なお、道路1Kmのレベル1（工事区分）ウェイトは、このサンプル数では推計困難なため、道路統計年報を用いて算出する。

1. 2 道路事業プロセス全体への拡張の検討

積算モデルを用いたコスト構造モデルは、工事費のみしか表現できないため、プロジェクトのライフサイクルに渡って順次拡張する必要がある。ここでは、プロジェクトの開始から供用までに要する全ての費用（プロジェクトの調達コスト）を推計するところまでのモデル拡張を検討する。工事費以外のコスト要素、すなわち積算体系にないコスト要素は、具体的なプロジェクトの工事誌に記録されている情報を用いて設定する。

2. 研究結果

2. 1 コスト構造モデルの作成

道路統計年報を用いてウェイトを算定した結果を表-1に示す。なお、道路延長全てに舗装するものとした。

ただし、改良工事延長は予算事業量であり、また、トンネル、橋梁の各年度の工事延長が不明で、現況施設延長の各年度の増加量を工事延長と見なした。

表-1 レベル1（工事区分）のウェイト

	道路改良	橋 梁			トンネル	計	舗装
		計	鋼橋	コンクリート橋			
延長 (km)	477.0	22.1	14.5	7.6	13.7	512.9	512.9
比率 (%)	93.0	4.3	2.4	1.9	2.7	100.0	100.0

レベル2を構成するレベル3（種別区分）では、工法等が異なるだけで、計量単位が異なるものがある。この場

合はレベル2（工種区分）の機能から見た計量単位をあてはめることで集約が可能であることがわかった。例えば、地盤改良工（レベル2）は、路床安定処理工（m2）、置換工（m3）、固結工（本）等の異なる単位を持つ。どれくらいの規模の面積の地盤を改良するかと考えると m2 が単位として適当となる。

式2のパラメータ推計結果は次のようになった。

$$\begin{aligned}
 \text{Cot} = & 0.930 * \left(\sum_{j=1}^n S_{1j} \cdot t_{1j} \right) * 1.425 + 0.043 * \left(\sum_{j=1}^n S_{2j} \cdot t_{2j} \right) * 1.372 \\
 & + 0.027 * \left(\sum_{j=1}^n S_{3j} \cdot t_{3j} \right) * 1.395 + 1.000 * \left(\sum_{j=1}^n S_{4j} \cdot t_{4j} \right) * 1.439
 \end{aligned}$$

このモデルでは、道路延長ウェイトでは93%とほとんどを占めていた道路改良が、金額ウェイトでは58%に大幅に低下した。延長ウェイトが4%の橋梁は金額ウェイトで20%と増え、トンネルは6%と逆に減った。また、舗装の金額ウェイトは16%であった（よって前文では金額ウェイトを0.84で除すべきだが傾向は同じ）。

2. 2 道路道路新設・改築事業プロセス全体への拡張の検討

第2阪神国道、第2阪和国道、山陽自動車道、国道9号、国道181号の工事誌を用いて工事費以外のコスト要素を含む道路事業の調達コストを検討した結果、図2のように表現するのが実用的であることがわかった。

建設デフレーター等を用いて各コスト要素を平成9年度に換算した後、事業費全体に対する割合を算出した結果、工事費が59%、用地補償費が27%とこれだけで事業費全体の86%を占め、測量試験費、工事諸費を含めると、97%とほぼ全額を占めることがわかった。

従って、プロジェクトの調達コストを推計するためには、用地補償費、

測量試験費及び工事諸費のコスト内訳を継続的に把握する必要がある。

今回の検討から、工事費以外のコスト要素を工事費と同じように体系化し、工事費以外のコストを建設コスト構造モデルに組み込むことは可能と考えられるが、以下の課題が残った。

- ① 用地及び補償費は、道路規模、施工場所（市街地、山間地等）等によって補償物件、補償単価が大きく異なっていた。特に補償物件は路線毎の差異も大きかった。
- ② 測量試験費の測量、設計、地質調査費は道路規模、地形、地質、構造物（橋梁等）の規模・数によって大き

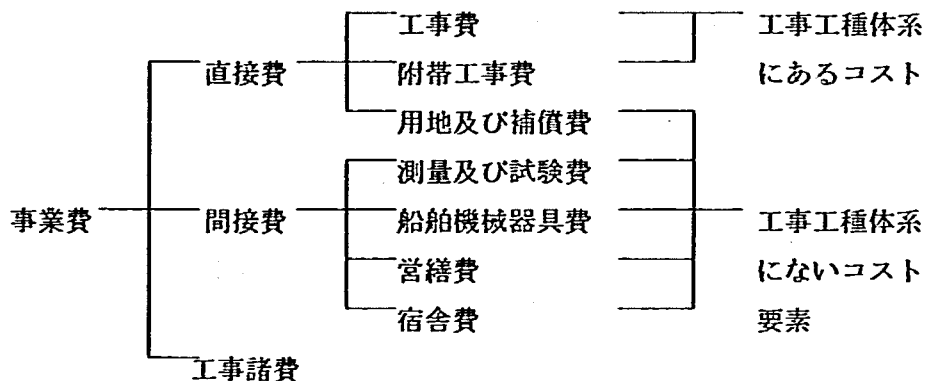


図2 プロジェクト全体の調達コストの構成

く異なっていた。

この分析が可能な資料の収集と、これらを区分・整理し、その単位、数量の設定方法を検討する必要がある。

2. 3 実績データベースの活用方策の提言

レベル集約された標準単価や標準数量は、積算書のデータを蓄積し、大量のデータを用いて推計することが望ましく、現在開発中の実績データベースに、レベル集計（数量、金額、単価の集計算出等）が自動的にできる機能を組み込むことが有効である。しかし、データベースに保存される積算書ファイルは他システムでの分析をほとんど考慮していないため、次のような課題を解決する必要がある。

- ① 積算者独自の単価表の作成は極力行わず、工事工種体系に沿った、設計書を作成する。
- ② 現状の設計書は、積算者独自の入力がかかなりあり、統一的な分析、集計が困難である。
- ③ 積算実績データに、次の情報を収録する。（設計書に情報としてもたせ、CALS 等で自動的に積算入力できるのが望ましい。）
 - ・工事概要：工事延長、舗装面積、主要構造物等
 - ・構造物（レベル3）の単位設定と数量（擁壁の延長、水路の延長、ブロック工の面積等）
 - ・構造物（レベル3）の規模（擁壁の高さ、水路の内径等）同じ機能の構造物で、単価が大きく異なる場合の場合分けに必要
- ④ 各レベルの管理コードを公開するとともに、コード自体に拡張性、柔軟性を持たせ、工事工種体系の見直しによって、過去のデータとの比較分析ができなくなることを防ぐ。
- ⑤ 施工実態をすみやかにモデルに反映させるため、歩掛（ぶがかり）調査等の施工実態調査結果をもとに短い周期で工事工種体系を見直すのが望ましい。

2. 4 コスト構造モデルを計画段階のツールとして適用するための課題

コスト構造モデルを用いて、プロジェクトの調達コストを推計できることがわかったが、計画段階のツールとしてモデルを使用するためには、なお次のような推計精度向上やモデル拡張に関する課題が残っている。

①プロジェクトの条件による場合わけ

計画条件によって1kmあたりの事業単価が大きく異なるため、今回行った平均モデルではなく、モデルを次のような計画条件で場合わけする必要がある。

道路の規格：1種、2種等、道路幅員、車線数；施工条件：山間部、都市部

②構造物規模等に対応した数量・単価の設定

工事費は、橋梁等構造物の形式・規模等によって大きく異なる場合もあり、計画条件のうち構造物の規模等数量・単価を支配する要素を抽出して、標準数量・標準単価の場合わけの基準を設定する必要がある。

③維持管理、更新までを対象とした事業プロセスコスト

今回のような単一時間断面のコスト構造モデルで、維持、更新などの時間ファクターの入ったコストを扱うのはきわめて困難であるといわざるをえない。社会的割引率や減価償却の考えを導入したモデルを別途開発する必要があると考えられる。

④環境対策、渋滞などの外部コストを含めた事業プロセスコスト

外部コストは定量評価と貨幣換算に課題が多く残存しており、実用的なモデルの推計そのものに限界がある。しかし、環境ニーズの高まりなどで内部化が進む傾向にあるため、事業プロセス全体のコストとしては、可能な限り、外部コストまで取り組む必要があると考えられる。外部コストや総コストに関する長期的なシナリオ分析の際にも、本研究のコスト構造モデルを活用する場面があると考えている。

（木下：奥谷）

6.2 (2) 河川事業プロセスにおける建設コスト縮減方策の調査

研究期間：平 9 ～ 平 1 0
担 当：建設マネジメント技術研究官
建設マネジメント技術研究室

【要旨】

公共工事のコスト縮減は政府全体で取組むべき重要課題であり、その推進に際しては、定期的な評価と、結果をわかりやすく国民に提示していくことが求められる。

本研究は、コストウエイトの大きな工種の抽出、様々なコスト縮減施策の事業プロセス全体からみた事後評価、計画段階の概算費用算出に適用可能な簡便なコスト構造モデルの開発を目指す。

10年度は、9年度に検討した河川事業モデルについて、工事積算書を分析し、土木工事積算システムの工事工種体系のレベル2（工種区分）相当毎にコスト要素を簡素化するとともに、モデル実用化のための課題、計画段階における事業プロセスコストの推計への適用拡大の可能性について検討した。

本研究での検討結果、プロジェクトの開始や終了等の定義が難しいなど河川事業の特性に基づく困難性を除けば、積算モデルを用いて事業全体のコストを簡便に表現するモデル構築の可能性が確認できた。

- 1. 研究方法
- 1. 1 コストモデルの作成
- 1. 1. 1 コスト構造モデルの考え方

標準的な河川改修区間 1 km のおおまかな調達コストについて簡明に説明できることが、ある河川改修プロジェクト全体のコストの妥当性を確かめるのに役立つ。本研究では、建設コストの変動は、構成する要素の単価もしくは数量の変化を把握することで可能と考え、ここに積算モデルの活用を考えることとした。

積算の工事工種体系は、積算要素を工事区分（レベル1）、工種区分（レベル2）、種別区分（レベル3）、細別区分（レベル4）とツリー状に分類表現したもので、この順に i, j, k, l とすると、ある事業（プロジェクト）の全体コスト C_o は次のように表現できる。

$$C_o = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l X_{ijkl} \cdot a_{ijkl} \quad \cdots \cdots \text{式 1}$$

ここで、 X_{ijkl} ：積算数量 a_{ijkl} ：積算単価

このモデルは、積算と同じ膨大な作業が伴うばかりか、詳細設計が終了していない段階で、レベル4（細別区分）で使用するコスト要素の数量と単価に関する情報が必要となり、実用性はほとんどない。

現在の工事工種体系では、工事発注の契約単位であるレベル4（細別区分）より上位のレベルには数量、単価の概念がない。もし、全レベルの全要素に数量、単位が設定（「標準数量」、「標準単価」と呼ぶ）できれば、あるレベルの標準単価は配下のレベルの標準数量と標準単価の積を全て集計（「レベル集約」と呼

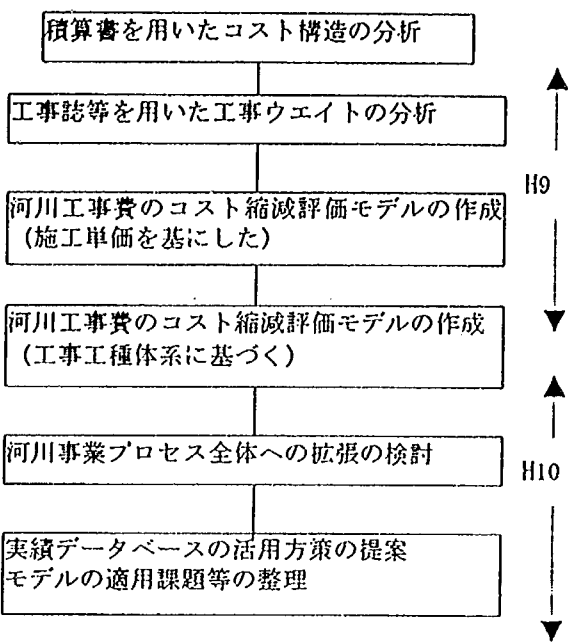


図 1 研究の全体計画

ぶ) して算出できる。本研究ではこのレベル集約によって式1を大幅に簡素化し、コスト構造モデルの推計を試みる。

1. 1. 2 河川事業のコスト構造モデルの考え方

河川改修区間延長1 Km 当たりの建設コストは次のように表現できる。

$$\begin{aligned}
 & \text{河川改修1 km 当たり工事費} = \text{改修区間延長1 km 当たり築堤・護岸工事費} \\
 & \quad + \text{改修区間延長1 km 当たり浚渫工事費} \\
 & \quad + \text{改修区間延長1 km 当たり樋門・樋管工事費} \\
 & \quad + \dots\dots\dots \\
 & \quad + \text{改修区間延長1 km 当たり床止め・床固め工事費} \\
 & = \text{築堤・護岸1 km 当たり工事費} \times \text{築堤・護岸工ウエイト} \\
 & \quad + \text{浚渫1 km 当たり工事費} \times \text{浚渫工ウエイト} \\
 & \quad + \text{樋門・樋管1カ所当たり工事費} \times \text{樋門・樋管工ウエイト} \\
 & \quad + \dots\dots\dots \\
 & \quad + \text{床止め・床固め1カ所当たり工事費} \times \text{床止め・床固めウエイト}
 \end{aligned}$$

ここで、ウエイトは改修区間延長1 km 当たりのレベル1 (工事区分) の標準数量である。

レベル1は、それを構成するレベル2で表現することができる。例えば、築堤・護岸 (レベル1) を、レベル2で表現すると、次式のようになる。

$$\begin{aligned}
 & \text{築堤・護岸工事費} \\
 & = \text{河川土工} + \text{地盤改良工} + \text{護岸基礎工} + \text{矢板護岸工} + \dots\dots\dots + \text{仮設工} \\
 & = \text{河川土工標準数量} \times \text{標準単価} + \text{地盤改良工標準数量} \times \text{標準単価} + \text{護岸基礎工標準数量} \\
 & \quad \times \text{標準単価} + \dots\dots\dots \\
 & = \Sigma \text{築堤・護岸工事を構成するレベル2の標準数量} \times \text{それに対応する標準単価}
 \end{aligned}$$

なお、上述の工事費は直接工事であるため、間接費を含めた工事費 (工事価格) は、直接工事費に諸経費率を乗じて算出する。諸経費率 = 工事価格 / 直接工事費 - 1、工事価格 = 直接工事費 * (1 + 諸経費率)

結局、河川改修区間延長1 km 当たりの河川改修工事費Cotは次のように表すことができる。

$$\text{Cot} = \sum_{i=1}^6 \left(\left(W_i \sum_{j=1}^n S_{ij} \cdot t_{ij} \right) \cdot (1 + \alpha_i) \right) \dots\dots\dots \text{式2}$$

ここで、i : 1=築堤・護岸 2=浚渫 3=樋門・樋管 4=堰 5=排水機場 6=床止め・床固め工

w : 河川改修延長1 Km に対する各レベル1 工事のウエイト

s : 各工事1 Km 当たりのレベル2 標準数量

t : s に対応する標準単価

α : 各工事の諸経費率

1. 1. 3 レベル集約方法

1.1.2.1 レベル1 工事区分のウエイト算定方法

全国の地方建設局で新土木工事積算システムで作成した7～9年度発注の1億円以上の積算書のうち、河川改修事業区分に関するもの計30サンプルを用いて分析を行い、レベル2ないしはレベル3毎に数量、単価を設定することとした。なお、河川改修区間1 kmのレベル1 (工事区分) ウエイトは、このサンプル

数では推計困難なため、具体的なプロジェクトの工事誌を用いて算出する。

1. 2 河川改修事業プロセス全体への拡張の検討

積算モデルを用いたコスト構造モデルは、工事費のみしか表現できないため、プロジェクトのライフサイクルに渡って順次拡張する必要がある。ここでは、プロジェクトの開始から供用までに要する全ての費用（プロジェクトの調達コスト）を推計するところまでのモデル拡張を検討する。工事費以外のコスト要素、すなわち積算体系にないコスト要素は、具体的なプロジェクトの工事誌に記録されている情報を用いて設定する。

2. 研究結果

2. 1 コスト構造モデルの作成

千代川改修、由良川、瀬田川、菊地川、球磨川の工事誌を用いてレベル1のウェイトを算定した結果を表-1に示す。

式2のパラメータ推計結果は次のようになった。

$$\begin{aligned} \text{Cot} = & 0.653 * \left(\sum_{j=1}^n S_{1j} \cdot t_{1j} \right) * 1.395 + 6832 * \left(\sum_{j=1}^n S_{2j} \cdot t_{2j} \right) * 1.395 \\ & + 0.7056 * \left(\sum_{j=1}^n S_{3j} \cdot t_{3j} \right) * 1.391 + 0.0377 * \left(\sum_{j=1}^n S_{4j} \cdot t_{4j} \right) * 1.391 \\ & + 0.0108 * \left(\sum_{j=1}^n S_{5j} \cdot t_{5j} \right) * 1.391 + 0.4902 * \left(\sum_{j=1}^n S_{6j} \cdot t_{6j} \right) * 1.391 \end{aligned}$$

このモデルを用いてコスト計算を行った結果、河川改修区間1Km当たりの工事費は886百万円、うち築堤・護岸ウェイトが80%とほとんどを占めていた。モデル推計に用いるサンプル数をさらに増やして、この傾向をさらに確認する必要がある。

2. 2 河川改修事業プロセス全体への拡張の検討

河川改修事業のプロセスコ

ストは図3のように、構成されている。

工事誌を用いて各コスト要素の割合を算出した結果、工事費40%、用地補償費20%、附帯工事費10%と直接費が70%を占め、測量試験費、工事諸費を含めると、これらで97%とほぼ全額を占めること

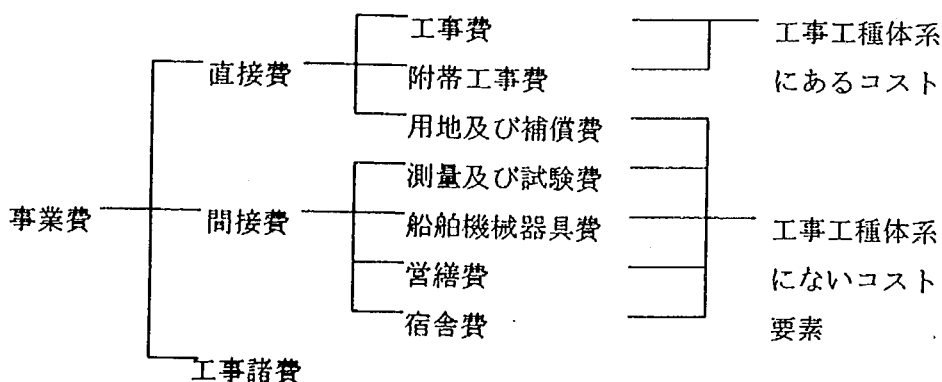


図2 河川改修事業費の構成

がわかった。なお、割合の算定に当たっては、建設デフレーター等により、平成9年度に金額換算した。

今回の検討からみて工事費以外のコスト要素を工事費と同じように体系化し、各要素に標準数量と標準単価を設定することは可能と思われるが、特に次の点に留意する必要がある。

- ① 用地及び補償費は、改修内容、施工場所（市街地、山間地等）等によって補償物件、補償単価が大きい

く異なる。特に補償物件は事業により大きく異なっていた。

- ② 測量試験費の測量、設計、地質調査費は地形、地質、構造物（橋梁等）の規模・数によって大きく異なっていた。

2. 3 実績データベースの活用方策の提言

レベル集約された標準単価や標準数量は、積算書のデータを蓄積し、大量のデータを用いて推計することが望ましい。これには、現在開発中の実績データベースに、レベル集計（数量、金額、単価の集計算出等）が自動的にできる機能を組み込むことが有効であるが、次のような課題が残っている。

- ① 積算者独自の単価表の作成は極力行わず、工事工種体系に沿った、設計書を作成する。
- ② 現状の設計書は、積算者独自の入力がかかなりあり、統一的な分析、集計が困難である。
- ③ 積算実績データに、次の情報を収録する。（設計書に情報としてもたせ、CALS等で自動的に積算入力できるのが望ましい。）
 - ・工事概要：工事区間延長、主要構造物等
 - ・構造物（レベル3）の単位設定と数量（ブロック工の面積等）
 - ・構造物（レベル3）の規模（樋管の内径等）同じ機能の構造物で、単価が大きく異なる場合の場合分けに必要
- ④ 各レベルの管理コードを公開するとともに、コード自体に拡張性、柔軟性を持たせ、工事工種体系の見直しによって、過去のデータとの比較分析ができなくなることを防ぐ。
- ⑤ 施工実態をすみやかにモデルに反映させるため、歩掛（ぶがかり）調査等の施工実態調査結果をもとに短い周期で工事工種体系を見直すのが望ましい。

2. 4 コスト構造モデルを計画段階のツールとして適用するための課題

コスト構造モデルを用いて、プロジェクトの調達コストを推計できることがわかったが、計画段階のツールとしてモデルを使用するためには、なお次のような推計精度向上やモデル拡張に関する課題が残っている。

①プロジェクトの条件による場合わけ

河川改修事業区間の計画条件や工事構成はプロジェクトによって異なり、これによって1 kmあたりの事業単価が大きく異なるため、今回行った平均モデルではなく、モデルを次のような計画条件で場合わけする必要がある。

河川規模：河川幅員、流量 立地条件：山間地、市街地

②構造物規模等に対応した数量・単価の設定

工事費は、堰、樋門等構造物の形式・規模等によって大きく異なる場合もあり、計画条件のうち構造物の規模等数量・単価を支配する要素を抽出して、標準数量・標準単価の場合わけの基準を設定する必要がある。

③維持管理、更新等までを含む事業プロセスコスト

今回のような単一時間断面のコスト構造モデルで、維持、更新などの時間ファクターの入ったコストを扱うのはきわめて困難であるといわざるをえない。社会的割引率や減価償却、リスク評価を導入したモデルを別途開発する必要があると考えられる。

④自然環境への影響などの外部コストを含めた事業プロセスコスト

河川事業は環境保全が内部目的化されており、事業プロセス全体のコストとしては、可能な限り、外部コストまで取り組む必要がある。外部コストは定量評価と貨幣換算に課題が多く残存しているが、実用的なモデルの推計に、本研究のモデルが活用できると考えられる。

（木下：奥谷）

—山岳道路への軽量盛土工法の適用—

担 当：土質研究室

全体研究計画フロー

山岳道路への軽量盛土工法の適用
に関するフィジビリティ・スタディ

- ① 新設道路の断面法設計、従来工法との比較検討 (H9)
- ② 道路拡幅の断面法設計、従来工法との比較検討 (H11)
- ③ 軽量盛土工法の適用条件及び各種軽量材の選定基準の検討 (H9~H11)

急斜面上の高盛土となる
軽量盛土の地質時・安定性の検討

- ④ 傾度法による安定対策工法設計 (H9)
- ⑤ 動的・静的実験による地質時・挙動把握、安定対策工の効果検討 (H10~H11)
- ⑥ 数値解析による地質時安定対策工の検討 (H11)
- ⑦ 削岩設計法の検討 (H12)

↓

道路計画段階での適用によるケース・スタディ

↓

軽量盛土工法の山岳道路への適用に関する計画・設計手法の提案

従来工法（切土主体の工法）

長大切土のり面の発生

軽量盛土を用いた工法

型枠材
(70x70x100)

軽量盛土材
(気泡コンクリート)

地山の保全

↓

地形改変が大きい

- ・ 自然環境の保全
- ・ のり面的管理の簡素化
- ・ 地盤発生土のリサイクル
- ・ 建設コストの削減

1. 研究方法

表-2 実験ケース

		配合 (1 m ³ 当たり)		輸布稀密度 (t/m ³)		湿潤密度 (g/cm ³)		備考
				7日	28日	7日	28日	
気泡混合土	材料土量 (kg) 180 水 (kg) 241 固化材料 (kg) 135 気泡量 (l) 582	4.7	8.6	0.577	0.582	※原料土：関東ローム (自然含水比92.6%) ※固化材及び安定剤： 普通型A1型 ¹⁾ 2kg ※起泡剤：ジオハート2		
発泡スチロール混合軽土	材料土量 (kg) 717 水 (kg) 37.2 安定材料 (kg) 37.2 発泡スチロール量 (l) 690	7.3	7.7	0.772	0.792			

軽屋盛上 タイプ	実機 ケース	新築/築上 工事 考慮の状況	軽屋盛上高さ 模 型	実物大	静荷重 遠心加速度	入力波形
気泡 混合 上	No. 1	なし	0.25m	12.5m	50G	正弦波 75Hz (図2)加振0
	No. 2	アンカー工				
	No. 3	地山段切り				地震波神ノ戸N-S (図2)加振0
	No. 4	なし				
	No. 5	アンカー工				
	No. 6	地山小段				
混合 積上	No. 7	なし	0.25m	12.5m	50G	正弦波 75Hz (図2)加振0
	No. 8	地山段切り				
	No. 9	目付盛積材				地震波神ノ戸N-S (図2)加振0
	No. 10	なし				
	No. 11	地山段切り				
	No. 12	目付盛積材				

2. 研究結果

2.1 変形特性

レーザー変位計を用いて盛土体の水平方向及び鉛直方向の応答変位を測定した。本実験では遠心載荷，加振，遠心除荷を繰り返し行うため，各加振ステップにおける測定結果の累積値を残留変形量として整理した。

2.1.1 盛土体の変形状況

気泡混合土と発泡ビーズ混合軽量土を比較すると，一般に気泡混合土のケースにおいて大きな残留変形量が観測された。例えば，CASE1（気泡混合土，正弦波，対策なし）では，加振加速度150gal程度で盛土体上部にクラックが生じ，以降加振レベルの上昇に伴い顕著な水平方向変位及び沈下がみられた（図-3参照）。これは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支持力破壊が生じたためと考えられる。一方，CASE7（発泡ビーズ混合軽量土，正弦波，対策なし）では，加振加速度400gal程度で盛土体底部から中央部にかけてすべり面（盛土底面となす角約70°）が発生するものの，残留変位はCASE1の1/5程度となっている。



図-3 盛土体の変形状況 (CASE1, 588gal 加振後)

図-4に盛土肩部における水平変位と鉛直変位（沈下量）の関係を示す（変位量の値は1G場換算値）。変位量の小さい一部のケースにおいては初期段階において沈下のみの進行がみられるものの，両者はほぼ1:1の関係にあることがわかる。以下の考察においては，盛土肩部における水平変位に着目して整理を行う。

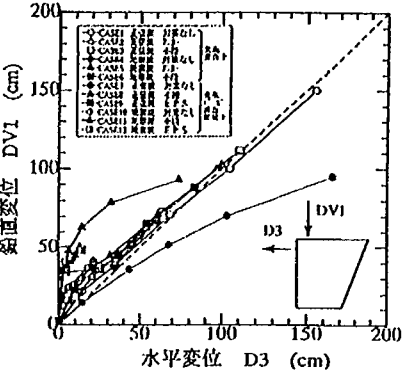


図-4 水平変位と鉛直変位の関係

2.1.2 入力波形の違いによる影響

地震波で加振を行ったケースでは，同じ加振レベルの正弦波による加振に比べて，クラックやすべり面の発生，残留変位ともに小さい傾向がみられる。

図-5に入力波形と盛土肩部の残留水平変位量の関係を示す。変形量の大きい気泡混合土のケースにおいて入力波形の違いの影響が特に顕著にみられる。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，擁壁の耐震性に関する動的遠心模型実験⁹⁾においても確認されている。

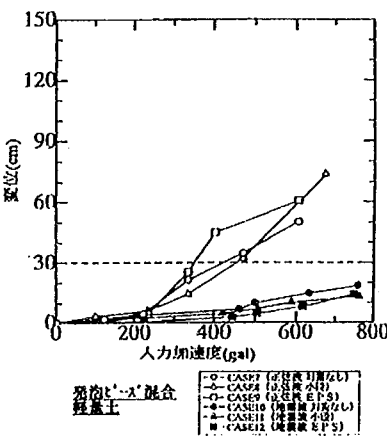
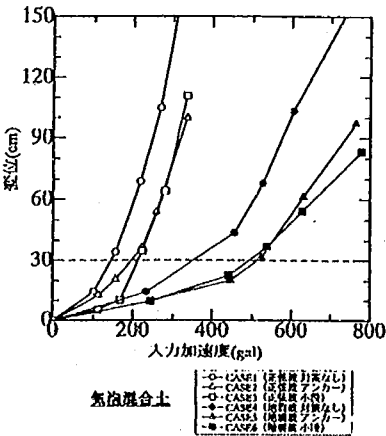


図-5 入力波形，対策工と盛土肩部の水平変位量の関係

2.1.3 対策工の効果

発泡ビーズ混合軽量土については，①地山段切り，②前面壁体への土圧緩衝材 (EPS) の設置を対策工として考慮したが，対策工の有無に拘わらず，加振に伴う変形量が全般に小さく，本実験においては対策工の明確な効果は認められなかった。

気泡混合土については，①アンカー工の設置，②地山段切りの対策工を施したケースでは，対策なしのケースと比較して残留変位が小さく，対策工の効果が確認された。許容変位レベルを30cm（盛土高さの約2.5%）と仮定すると，許容変位量に達する加振加速度レベルは，CASE4（地震波，対策なし）では350gal程度であるのに対して，CASE5（地震波，アンカー工）及びCASE6（地震波，地山段切り）では500gal程度となる（図-5参照）。但し，本実験で考慮した対策工は，高い入力加振加速度レベルに対しては効果が小さく，特に地山段切りについては，小段の部分からクラックが発生し，逆に弱点箇所となる現象もみられた。こうした現象は，後述する鉛直方向応答加速度の影響によるところが大きいと推定され，鉛直方向の応答を抑制するための対策工を検討する必要があると考えられる。

2.2 加速度応答特性

各ケース各加振ステップ毎に得られた振動台加速度と盛土肩部及び盛土底部における応答加速度の最大値により、軽量盛土体の地震時加速度応答特性について考察した。なお、応答加速度の最大値は、正弦波入力ケースでは測定結果1波毎のピーク値の平均値とし、地震波入力ケースでは測定結果全体のピーク値とした。

2.2.1 水平方向応答加速度

盛土底部及び盛土肩部の水平方向応答最大加速度について、地震波入力の場合の測定結果例を図-6に示す。盛土肩部の水平方向応答最大加速度の応答倍率値は、発泡ビーズ混合軽量土/正弦波の一部のケースにおいて2.0~2.5倍程度の若干高い値を示す以外は、概ね1.0~1.5倍の範囲に収まっている。混合軽量盛土体は、一般の土砂材料による盛土に比べて固有周波数が非常に高い周波数域に存在し、地震動の卓越周波数に対して応答周波数帯が異なることにより、共振作用を受けにくい構造体であると考えられる。

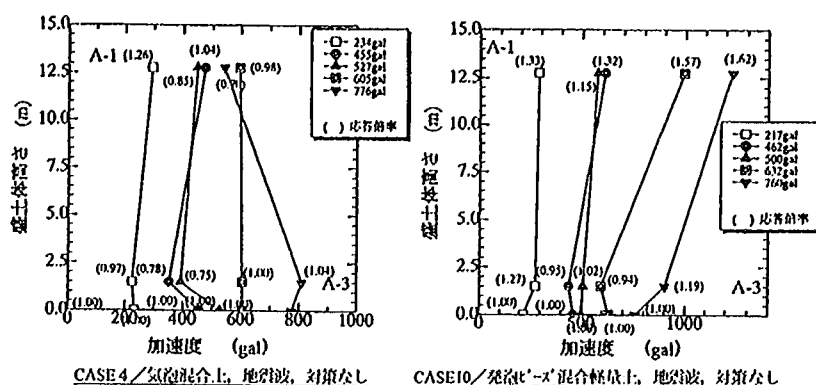


図-6 水平方向応答最大加速度分布

2.2.2 鉛直方向応答加速度

鉛直方向応答加速度は、ほぼ全ケースにおいて水平方向応答加速度と同程度もしくは大きな値が観測され、特に発泡ビーズ混合軽量土のケースにおいて大きな鉛直加速度が認められた。盛土肩部の鉛直方向応答最大加速度に着目すると、盛土体に顕著なクラックやすべり面などの変状が生じた後の加振ステップにおいて非常に大きな応答加速度を示す傾向がみられる。

2.2.3 応答モードに関する考察

トップヘビーなEPS盛土では盛土体前面においてロッキング的な応答により鉛直方向の応答加速度が生じることが既に知られている³⁾が、本実験においても大きな鉛直方向応答加速度が観測されたため、応答加速度ベクトル分布(図-7)に基づき応答モードの考察を行った。

気泡混合土/正弦波入力のケースでは、200gal程度以上の加振レベルになると盛土肩部において大きな鉛直動が発生することが確認される。地震波入力のケースでは応答モードが若干異なり、加振レベルの増加に伴い盛土体底面においても大きな鉛直動が発生する。これは、盛土全体に単なるスウェイモードでなく、鉛直動を伴った回転モードが卓越したためと考えられる。

発泡ビーズ混合軽量土/正弦波入力のケースにおいて、加振レベル300gal程度以上で大きな鉛直動を伴った節のある応答モードが確認され、盛土前面側に鉛直動を伴いながら盛土全体が滑動していると考えられる。一方、地震波入力のケースでは、鉛直動に比べて水平動が卓越した応答特性を示す。

対策工を設置したケースについては、CASE2(気泡混合土、正弦波、アンカー工)において鉛直動を若干抑える効果がある以外は、対策なしのケースと応答加速度ベクトルに大きな違いはみられない。本検討で確認された大きな鉛直動を伴う応答モードは、盛土体が地山と分離して応答していることに起因すると推定され、鉛直動の発生を低減させる対策工として、地山と盛土体の定着を強化する必要があると考えられる。

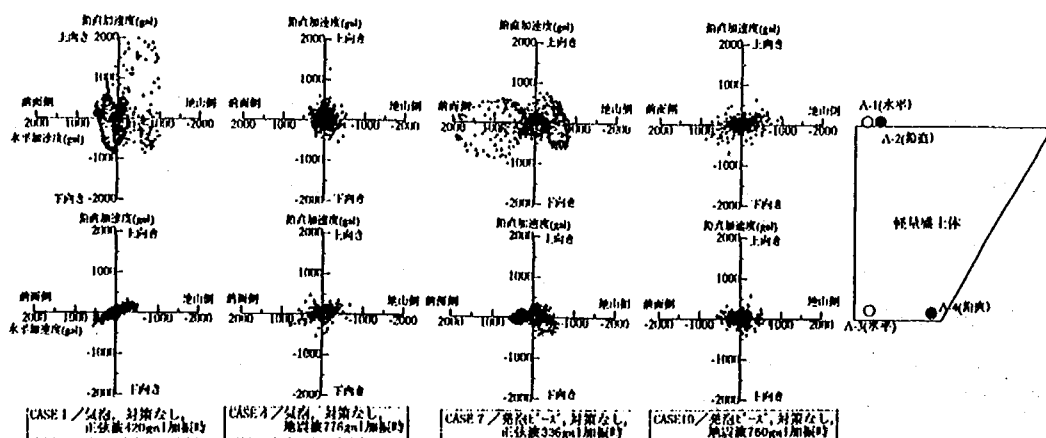


図-7 応答加速度のベクトル分布

2.3 鉛直方向加速度の気泡混合土支持力への影響

気泡混合土のケースで観測された顕著な沈下量に関して、鉛直応答加速度を考慮した気泡混合土の支持力検討を行った。検討にあたっては、盛土基部と盛土肩部の観測値をもとに盛土体内部の鉛直応答加速度分布を直線分布と仮定し、盛土高さに応じた加振時鉛直荷重を算出した（図-8参照）。その結果、鉛直応答加速度が急増した加振ステップ（図-8中黒印で示す）では、盛土体下部において支持力を上回る鉛直荷重が作用したことがわかった。これにより気泡混合土の圧壊が生じ、大きな沈下量が観測されたと考えられる。

なお、盛土体の重心位置に、前述の鉛直応答加速度分布により推定した同位置の鉛直応答加速度を作用させた場合、鉛直応答加速度が急増した加振ステップにおいて作用する鉛直荷重は、最大でも静的荷重の1.5倍程度となる。このため、トップヘビーな高盛土となる気泡混合土において、地震時の鉛直応答加速度の影響を考慮する場合、常時設計の1.5倍程度の設計強度を適用する必要があると考えられる。ただし、道路土工擁壁工指針における地震の影響を考慮する場合のコンクリート許容応力度の割り増し係数は1.5であり、現行のコンクリート擁壁の設計に準じて気泡混合土盛土体の設計を行えば、特に問題はないといえる。

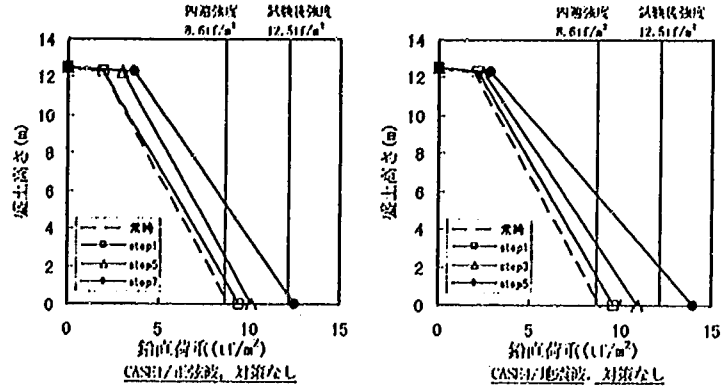


図-8 気泡混合土盛土体内の鉛直荷重分布

2.4 発泡ビーズ混合軽量土前面壁体への作用土圧

各加振段階において発泡ビーズ混合軽量土盛土前面壁体に作用する土圧の最大値を図-9に整理した。加振加速度レベルの上昇に伴い、作用土圧の振動成分が増加しており、この傾向は、高い加速度応答倍率が観測された盛土体上部における水平方向土圧で特に顕著である。

また図-10に、作用土圧測定値より算出される土圧合力の実測値と、観測されたすべり面及び応答加速度測定値に基づいて地震時慣性力（鉛直方向を含む）を考慮した試行くさび法により算出される土圧合力の計算値の関係を示す。正弦波入力の場合における顕著なすべり面発生後の加振レベルを除いて、両者はほぼ一致していることがわかる。以上より、設計震度の与え方について検討の必要はあるものの、発泡ビーズ混合軽量土前面壁体への地震時作用土圧は、地震時慣性力を考慮した試行くさび法により推定可能であると考えられる。

なお、土圧緩衝材(BPS)を設置したケースについては、本実験では対策なしのケースとの顕著な違いはみられなかった。

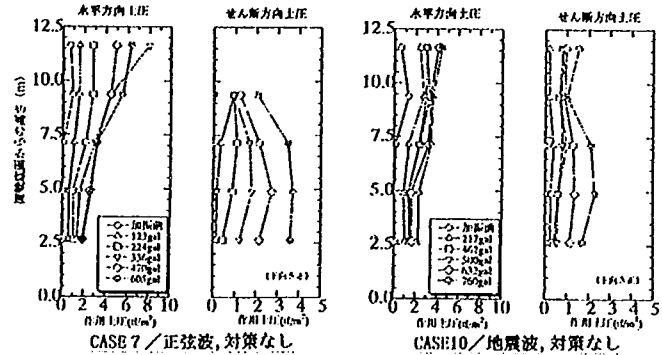


図-9 加振時の前面壁体への作用土圧分布

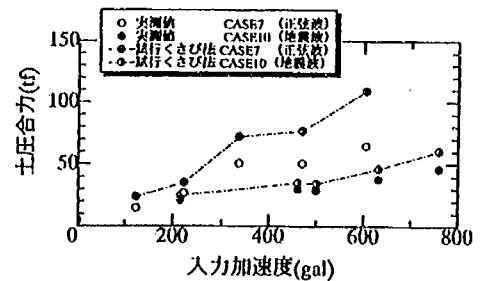


図-10 作用土圧合力実測値と計算値

3. 今後の課題

来年度以降、地震時安定対策工の数値解析及び試設計、既設道路の拡幅を行う場合の断面試設計、道路計画路線への適用によるケーススタディを行う予定である。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所土質研究室, (財) 土木研究センター, 他 14 社: 混合補強土の技術開発に関する共同研究報告書一気泡混合土利用技術マニュアル, 共同研究報告書第 170 号, 平成 9 年 3 月
- 2) 建設省土木研究所土質研究室, (財) 土木研究センター, 他 16 社: 混合補強土の技術開発に関する共同研究報告書一発泡ビーズ混合軽量土利用技術マニュアル, 共同研究報告書第 171 号, 平成 9 年 3 月
- 3) 建設省土木研究所土質研究室: EPS 盛土の耐震性に関する検討, 土木研究所資料第 2946 号, 平成 3 年 3 月
- 4) 日本道路公団: 気泡混合軽量土を用いた軽量盛土工法の設計・施工指針, 平成 8 年 9 月
- 5) 菊池, 竹内ほか: 軽量混合処理土の動的変形特性, 第 32 回地盤工学研究発表会 pp1285-1286, 1997
- 6) 斎藤, 松尾, 堤ほか: 擁壁の耐震性に関する動的遠心模型実験(その 1), (その 2), (その 3), 土木学会第 53 回年次学術講演会Ⅲ-A pp340-345, 1998. 10

(三木, 中野, 小橋, 藤井)

6.4 擁壁構造物の設計合理化に関する調査

【要旨】

近年、高さ10mを越える大規模な補強土壁が増加しており、こうした構造物の合理的な設計法を確立する必要がある。また、現場発生土の有効利用、コスト削減の観点から建設発生土を利用した擁壁構造物の提案が求められている。10年度は比較的細粒分の多い盛土材にも適用可能な多数アンカー式補強土壁に、含水比の高い関東ロームを盛土材として使用し、アンカープレート周辺を改良土により部分改良することによって現場発生土の適用性について検討した。その結果、各項目に対して、次のような評価、提案を行った。

- ① 内的安定はプレート周辺改良により可能
- ② 外的安定は改良体のせん断力の大きさによって評価可能
- ③ アンカー引抜けのメカニズムの解析および引抜け抵抗に対する設計手法を提案

1. 研究方法

実験は土木研究所構内の実験用土槽(H=4.0m、L=8.0m、B=4.0m)を用いて行った。実験ケースは表1に示す。CASE1は無改良、CASE2は改良土による二重壁構造で内的安定に着目し、CASE3は外的安定に着目した。盛土材は含水比約100%

に調整した関東ロームを使用し、人力によって層厚0.5mで締固め、高さ4.0mまで盛り立てた。CASE2の改良土は、自然含水比状態の関東ロームに固化材料として石膏を12%混合したものをを用いた。1日強度は平均98kN/m²であった。CASE3の改良土では、自然含水比の関東ロームにセメント系固化材を13%混合したものをを用いた。1日強度は平均490kN/m²であった。各ケースとも4.0mまで盛り立てた後、0.4m余盛りを行い載荷板を設置した。載荷板の設置位置は、CASE1、2では内的安定の検討のため、壁面ブロックから改良土まで、CASE3では外的安定の検討のため、改良土背面以降に設置し、それぞれ載荷試験を行った。また、各ケースとも載荷試験終了後、タイバーの引き抜き試験を行った。

2. 研究結果

2.1 内的安定

施工終了時および上載荷重載荷時の壁面変位分布を図-2の示す。CASE1の場合、最大300mm以上の変位が施工終了時に現れており、許容壁面変位量 $s=120\text{mm}(=0.03H)$ を大幅にオーバーした。これは、軟弱な盛土材のために、アンカープレート周

研究期間：平8～平11

担当：施工研究室

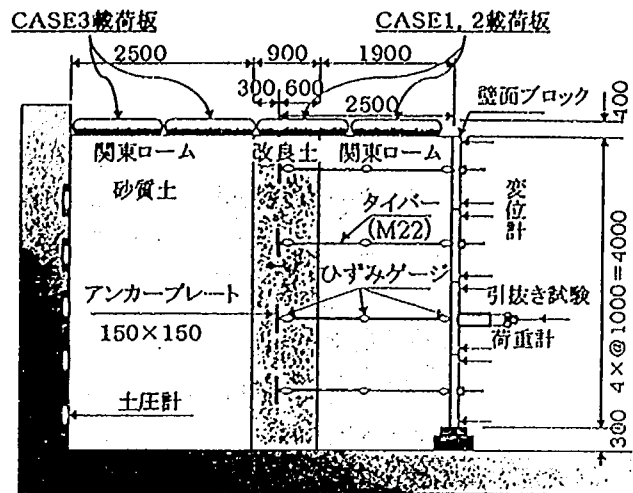


図-1 実験用土槽断面図

表-1 実験条件

	CASE1	CASE2	CASE3
改良材	無	石膏(12%)	セメント系固化材(13%)
一軸圧縮強度	—	98kN/cm ²	490kN/cm ²
項目	内的安定		外的安定
載荷位置	壁面～改良土		背面盛土
盛土材料(前面)	江戸崎産関東ローム土		江戸崎産関東ローム土
盛土材料(背面)	江戸崎産関東ローム土		砂質土

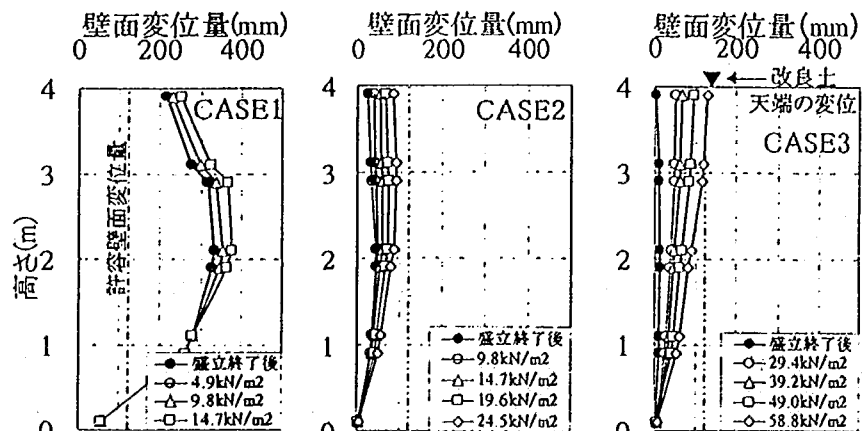


図-2 各ケースの壁面変位量

辺の拘束効果が得られずに引き抜けたためである。また、盛立終了時での変位量は改良土の強度が大きいCASE3で一番小さかった。CASE2では、上載荷重に伴い壁面の変位が増大するが、CASE1に比べて変位量は小さい。観測結果として二重壁間に含水比の高い関東ローム土を用いたとしても、アンカープレート周辺を改良することで拘束効果が発揮され補強土壁の安定が高まることが確認された。

2. 2 外的安定

外的土圧による壁面変位は、壁上部の前方への変位が卓越することが認められた。また、アンカープレート周辺の改良体も壁面パネルと同様な変位を生じていることが確認されており、外的土圧による補強領域は一体となったせん断壁面挙動を示した。一方、タイバー張力(図-3)の増加は下から2段目において顕著であり、この位置は解体時に観測された改良体のせん断破壊の位置と一致している。壁面変位が大きい上部2段のタイバー張力の増加が小さいことから、壁面パネルと改良土中の十分な引抜き抵抗力を有するアンカープレートにより拘束された補強領域は一体化されていたと言える。今回確認した十分な引抜き抵抗力を有する場合における二重壁構造の多数アンカー式補強土壁は、外的安定に対しても安定した構造物であることが確認できた。また、外的安定性に関する検討は、改良壁のせん断抵抗力に対する外的土圧(せん断力)の大きさ(比率)で評価できることがわかった。

2. 3 アンカー引抜けのメカニズム

アンカーの引抜き抵抗を算定する手法を検討した。破壊形式は、図-4に示すように、塑性破壊タイプ、パンチング破壊タイプ、荷重分散破壊タイプの3タイプを設定して検討した。その結果設計に際し、圧密非排水三軸試験で得られる短期強度(非排水全応力強度)を用いるのが妥当である。荷重分散破壊タイプでは分散角 θ を 15° とするのが良いとわかった。設計に用いる引抜き抵抗値としては、図-5の3タイプの破壊形式について計算された引抜き抵抗値のうち最小のものをを用いるのが安全側の設計として望ましいと思われる。

3. 主な研究成果物

1) 青山ら：現地不良発生土を改良して用いた多数アンカー式補強土の大型室内実験(その1～その3)、第34回地盤工学研究発表会(投稿中)

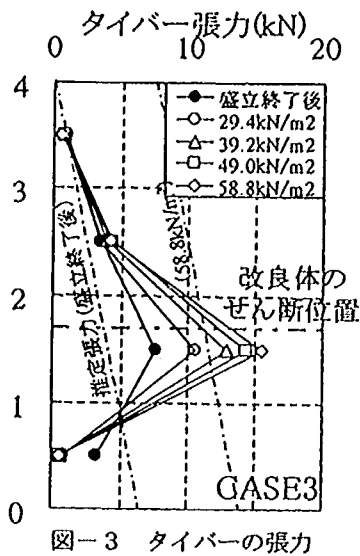


図-3 タイバーの張力

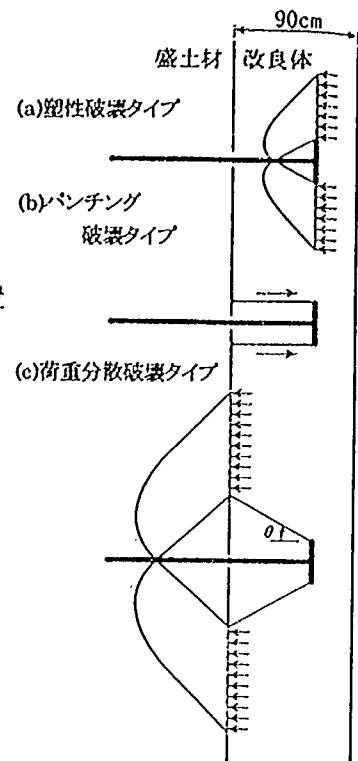


図-4 改良体の破壊タイプ

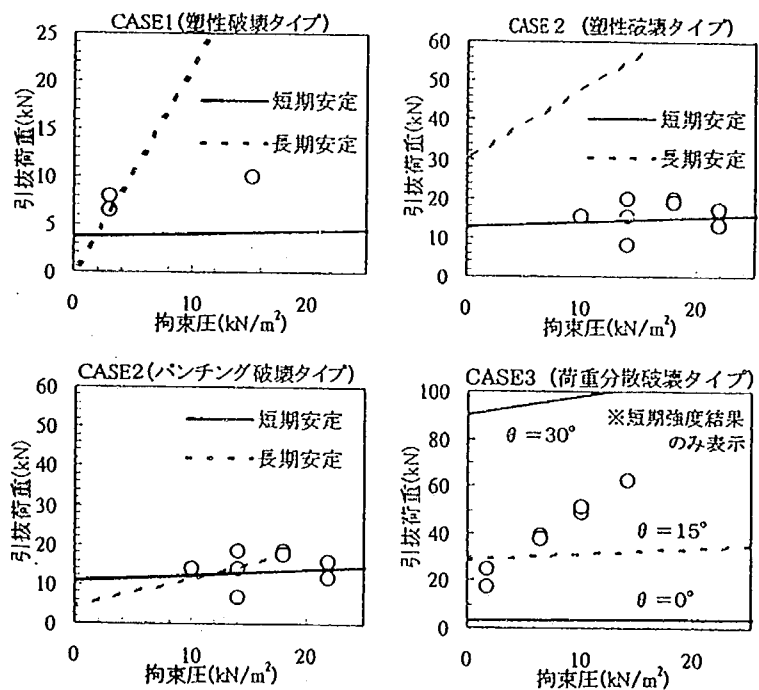


図-5 拘束圧と引抜荷重

(大下, 青山, 橋本, 井谷)

6.5 小規模シールド工事のコスト縮減化に関する調査

研究期間：平 10～平 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」¹⁾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」²⁾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。10年度は、小規模シールド工事の合理化に向け、現状の課題を整理するとともにコストアップの要因となっている項目を調査し、現状基準で対応可能な合理化案を検討するとともに、縮減効果を試算・分析した。

1. 実態調査

1-1 小規模シールド工事の実態

小規模シールド工事の合理化案を策定するための基礎資料の収集を目的として、過去に行われたシールド工事の実態について調査・分析を行った。主な調査項目は、トンネル径、セグメント、施工延長、シールド等とし、調査対象は、過去5年間の工事でトンネル仕上り内径が3m以下のシールドトンネル1589件とした。

図-1～図-3に小規模シールド工事の占める割合、使用目的別割合、形式別割合を示す。シールド工事総実績数に対する小規模シールド工事の占める割合をみると、全体の7割程度と多勢を占めている。シールドトンネルの使用目的別では、小規模シールド工事が上下水道工事に集中していることが確認できるが、これは、道路、鉄道あるいは共同溝等を目的としたシールド工事の大部分が仕上り内径3m以上であるためである。シールド形式別では、泥土圧式の61%が最も多く、次いで泥水式23%、土圧式10%となっている。泥土圧式および土圧式はいずれも土圧によって切羽の安定を図る方式であり、この2種類で70%以上を占める。これは、シールド設備を考えた場合、泥水式シールドに比べて土圧系シールドの設備が小規模であり、作業基地用地を確保しやすい等の要因があるためと考えられる。

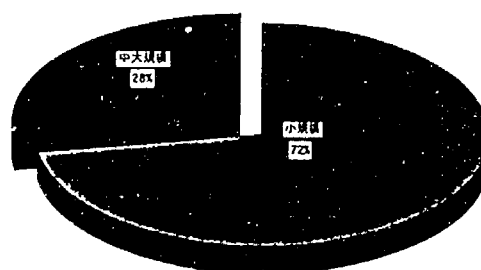


図-1 小規模シールド工事の割合

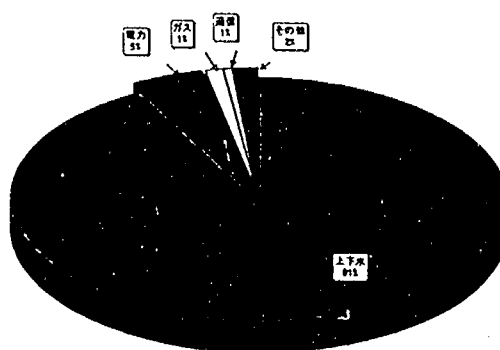
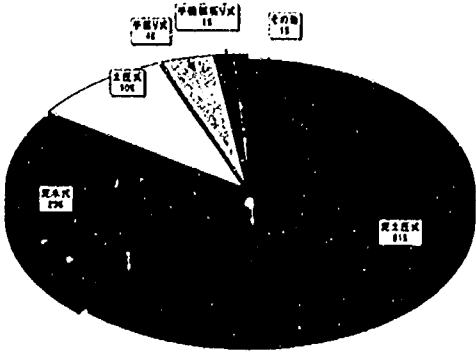


図-2 使用目的別割合

1-2 小規模シールド工事の特性

表－1 に小規模シールドと大規模シールドの規模別特性を示す。計画段階では、小規模シールドのほうが自由度が多いが、設計段階やセグメント構造、シールドマシンについては、掘削断面が限られている等の理由から大規模に対して自由度が少ない。このため、各項目ごとの制約条件を十分に考慮しながら合理化を検討する必要がある。



図－3 シールド形式別割合

2. 合理化に関する検討

2-1 合理化に向けた検討課題

小規模シールドの現状と特性を踏まえ、合理化に向けた各項目毎の検討課題を表－2 に示す。セグメント、二次覆工およびシールドマシンが主な検討対象となるが、これらの合理化の検討を進めるとともに、品質を確保するための施工管理要領等についても検討する必要がある。

表－1 シールド工事の規模別特性

項 目	小規模シールド	大規模シールド
計画	平面線形	自由度が多い
	用地問題	地上設定が少ない
	地上部への影響	小さい
設計	断面力算定法	(慣用法が多い)
	セグメント形式	鋼製セグメント
		RCセグメント
セグメント形状	幅	1,000mm以下
	分割数	固定
	継手構造	ボルト締結多勢
シールドマシン	掘進管理	マニュアル
施工		自由度が多い

表－2 小規模シールド工事の合理化に向けた検討課題

項 目	期待できる効果	検 討 課 題
セグメントの 拡幅化	組立リング数の低減による日進量の向上	積算基準見直しの必要性に関する検討 ・日進量の試算 ・シールド設備容量の検討
	セグメント費の縮減	モデルケースによるセグメント費縮減効果の確認
セグメント分割数の低減	組立時間の短縮による日進量の向上	積算基準見直しの必要性に関する検討 ・日進量の試算
セグメントの 合理化	ボルト締結数の低減による日進量の向上	積算基準見直しの必要性に関する検討 ・日進量の試算 ・シールド設備容量の検討
	ボルト締結作業の削減による作業の省力化 (ボルトレスセグメント)	積算基準見直しの必要性に関する検討 ・切羽作業人員の検討 ・シールド設備容量の検討
	セグメントの軽量化に伴うセグメント費の縮減	・セグメント費縮減効果の検討 ・セグメント構造の検討
	セグメント構造の合理化	各種セグメントの特徴を考慮できる構造解析手法の適用性
二次覆工の省略	工事費の縮減 ・二次覆工費 ・トンネル規模縮小に関連した工種	・防食・防水に対する考え方の整理 ・従来の二次覆工に代わる代替工法の検討 ・防食性・耐久性の高い二次覆工材料の検討 ・防食・防水機能の高い一次覆工用材料の検討
シールドマシンの 合理化	機械設備費の縮減	シールドマシンの転用に関する検討
	掘進速度の高速化による日進量の向上	積算基準見直しの必要性に関する検討 ・日進量の試算 ・シールド設備容量の検討
品質・施工管理要領の整備	品質・施工管理基準の標準化	・小規模シールド工事の品質・施工管理要領(案)の検討

2-2 コスト比率と合理化の重点

小規模シールドの効果的な合理化を検討するため、表-3に示すようなシールド形式や仕上がり内径の異なる3タイプのモデルケースを設定し、直接工事費のコスト構造を分析した。

図-4に各ケースの工種別コスト比率を示す。最も構成比率が高いのは一次覆工で平均48%程度、次いでセグメント費の27%程度、二次覆工（コンクリート費を含む）の12%程度となっている。このことから小規模シールド工事でも、セグメント構造の合理化や二次覆工省略等について重点的に検討することによって、コスト縮減に繋げられるものと考えられる。

表-3 モデルケース

ケース 施工条件	ケース1	ケース2	ケース3
施工延長(m)	1,000		
シールド形式	泥水式	土圧式	泥水式
セグメント形式	鋼製		
仕上がり内径(mm)	1,650	2,400	3,150

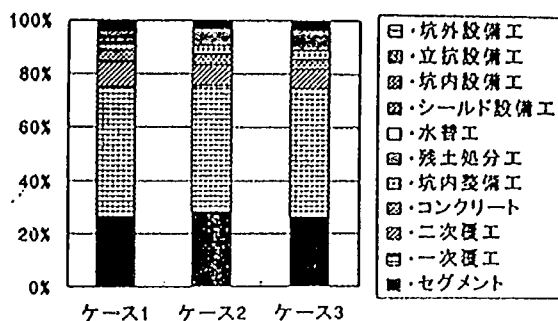


図-4 各ケースの工種別コスト比率

3. コスト縮減効果の検討

以上の結果から、セグメント構造の合理化や二次覆工の省略について重点的に検討することが、コスト縮減の可能性が高いことが確認できた。そこで、今回は二次覆工の省略に着目し、従来工法と合理化案のコストを試算し、コスト縮減効果および工期短縮効果を検証した。

表-4 モデル工事条件

項目	従来工法	合理化案Ⅰ	合理化案Ⅱ	合理化案Ⅲ
施工延長		1400m		
セグメント形式	鋼製セグメント	RCセグメント (すりへり代無し)	RCセグメント (すりへり代25mm)	鋼製中詰めセグメント (すりへり代25mm)
セグメント幅		1,000mm		
二次覆工	250mm	省略		
仕上がり内径		2,000mm		

3-1 算出条件

表-4に従来工法と合理化案の直接工事費を算出するための条件を示す。従来工法が鋼製セグメントなのに対し、合理化案では二次覆工を省略するためにRCセグメントと鋼製中詰めセグメントを採用した。

3-2 コスト比較

図-5に各ケースのコストの算出結果を示す。鋼製中詰めセグメントを用いた合理化案のコスト縮減効果は1%弱とほとんど期待できないものの、RCセグメントを用いた合理化案では5~7%程度のコスト縮減が期待できることになる。

3-3 工期比較

図-6に従来工法と合理化案の工期を示す。合理化案は、3ケースとも二次覆工省略に関わる日数のみが短縮されるため、同日数とみなした。総工期としては、合理化案によって194日（約6.5ヶ月；28%）の工期が短縮できることになり、従来工法

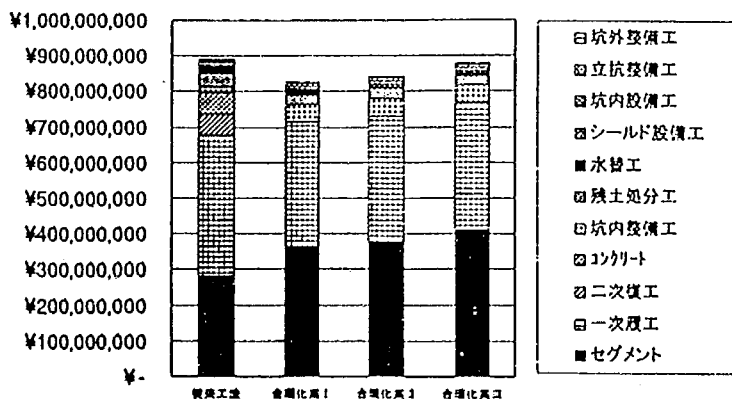


図-5 コスト算出結果

と比較すると3割程度の工期短縮効果が期待できることになる。

以上の検討結果より、小規模シールド工事において合理化によるコスト縮減効果を従来工法と比較した結果、工期としては、二次覆工を省略することによって30%程度の工期短縮を図ることができるが、工事費をみると1～7%程度の縮減効果に留まる結果となった。これは、二次覆工省略による縮減効果（工事費全体の13%程度）および断面縮小による縮減効果（工事費全体の約6%）に対し、二次覆工の省略が可能なRCセグメント

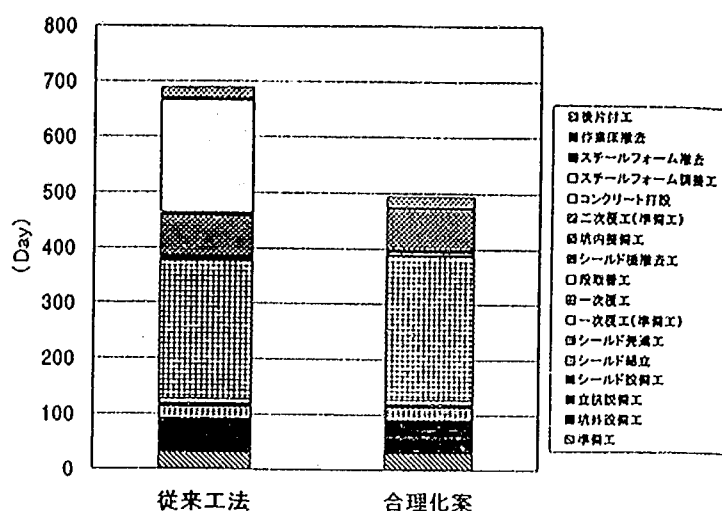


図-6 工期比較

および鋼製中詰めセグメントの採用によるコスト増（10～15%程度）と二次覆工の省略によって継手目地コーキングやボルトボックス穴埋め費を坑内整備工に計上したことによるコスト増（4%程度）が見込まれるためである。近年では、耐腐食性の高いFRPM管やセグメント内面に樹脂を被覆する工法、あるいは、セグメント組立直前にセグメント外側を不透水シートで被覆することで止水性を向上させる工法等が開発されており、これらの工法を採用することにより、合理化を図る有効な手段となるかを、今後、詳細に検討する必要がある。

4. 今後の課題

10年度は、小規模シールド工事の実態および特性を調査・整理し、その結果に基づき合理化案を策定し、二次覆工省略によるコスト縮減効果を試算・分析した。今後は、合理化案として提案した検討項目に対し、①セグメント構造の合理化によるコスト縮減効果の確認、②二次覆工の省略に伴う防食・防水に対する考え方の整理、③日進量、作業人員、機械設備に関する積算基準の見直しの検討、およびシールドマシンの転用等の諸問題に対して詳細な検討を行い、コスト試算および縮減効果を検討し、更に効果的な合理化案を策定する必要がある。また、小規模シールド工事は、全国の自治体で数多く行われているのが現状であり、品質や施工精度の確保の観点から、施工管理要領の策定についての検討も行う予定である。

5. 主な研究成果物

森、大下、井谷：小規模シールド工事の特性と合理化に向けた課題、土木学会第54回年次学術講演会、1999年（投稿中）

参考文献

- 1) 政府「公共工事コスト縮減対策関係閣僚会議」、公共工事コスト縮減に関する行動指針、平成9年4月
- 2) 建設省都市局下水道部、下水道事業におけるコスト縮減の取り組みについて、平成9年4月
- 3) (社)土木学会・(社)日本下水道協会、シールド工事用標準セグメント、平成2年4月

（大下，森，井谷）

6.6 長大橋の橋面構造の合理化に関する調査

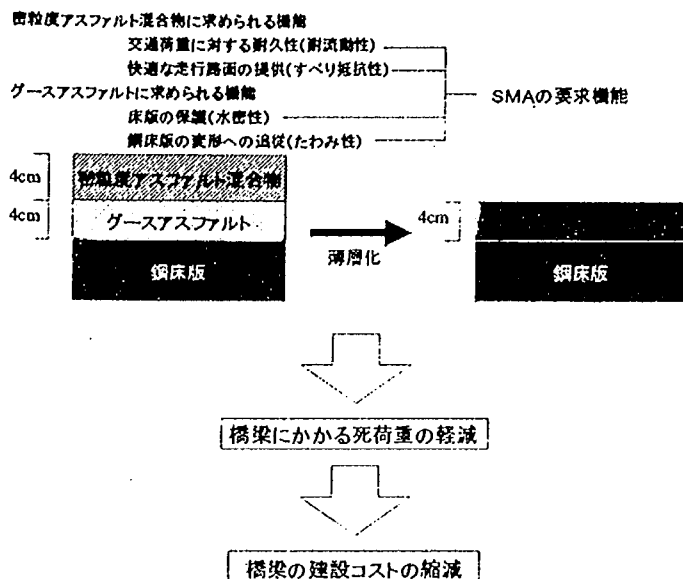
(経済性に優れた新しい橋梁の走行面に関する試験調査 (その1))

研究期間：平10～平12

担当：舗装研究室

【要旨】

橋梁建設のコスト削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トリックスアスファルト (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

薄層舗装を実現するための技術としてSMAを取り上げ、骨材の粒度分布を3種類変化させたSMA (配合A：粗粒度、配合B：細粒度、配合C：中間粒度) と従来橋面舗装の下層用材料として利用されてきたグースアスファルトの混合物特性を比較することによりSMAの薄層舗装としての妥当性を検証する。

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水浸マーシャル安定度試験 (耐水性)
- ③曲げ試験 (たわみ追従性)
- ④透水試験 (水密性)
- ⑤引張り接着試験 (床版との接着)
- ⑥回転式すべり摩擦測定器による動的摩擦係数の測定 (すべり抵抗性)

である。

2. 研究結果

図-1にホイールトラッキング試験の結果を示す。ここで、グースアスファルトには耐流動性を向上させる目的でプレコート碎石を表面に圧入している。この図より特にSMA (配合A) の耐流動性が高いことが分かる。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⁾、SMA (配合A) は重交通道路でも適用可能であると言える。

図-2に水浸マーシャル安定度試験の結果を示す。SMAの耐水性はグースアスファルトには及ばないものの配合Aは残留安定度の目標値である75%以上¹⁾をクリアしてい

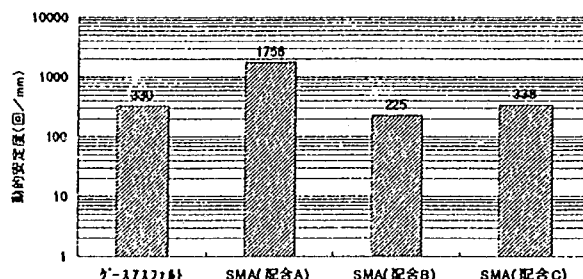


図-1 ホイールトラッキング試験結果

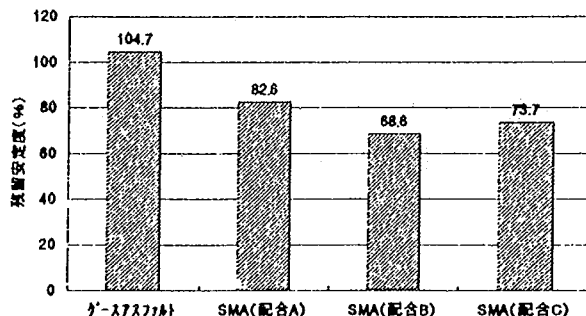


図-2 水浸マーシャル安定度試験結果

る。

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⁾ SMAはグースアスファルトの目標値は満足しないものの密粒度アスファルト混合物の目標値は満足している。

透水試験結果はグースアスファルトならびにSMAとも試験可能な下限値である 1×10^{-9} を下回り、各混合物とも不透水と見なすことができる。

図-4に引張り接着強度試験結果を示す。SMAの場合、接着層の有無により接着強度に極端な差が見られるが、接着層があれば接着強度の目標値である1.4MPa以上²⁾を満足している。

図-5に回転式すべり抵抗測定器によるすべり摩擦係数測定結果を示す。図中のグースアスファルト改とは、すべり抵抗性を向上させることを目的としてアスファルトをプレコートし6号砕石（プレコート砕石）を供試体表面に散布し、骨材の1/3が表面から出る程度に圧入したもの、密粒度混合物とは比較として示した通常の密粒度アスファルト混合物の測定結果である。この図より、通常のアスファルト舗装に対してプレコート砕石を圧入したグースアスファルトは良好なすべり抵抗性を示しているものの、SMAでは粗めの粒度に設定したSMA（配合A）でも全体的に0.1以上低いすべり抵抗性を示すにとどまっている。

3. まとめと今後の課題

薄層舗装に求められる性能として示した6項目のうち、配合によってばらつきはあるものの、耐流動性、耐水性、水密性については要求を満足する結果となった。また、たわみ追従性については今回バインダとして使用したストレートアスファルトをたわみ追従性を向上させた改質アスファルトに変更することにより破断ひずみの目標値を満足すると考えられる。床版との接着についても接着層を施工すれば特に接着強度に問題は見られない。すべり抵抗性については比較的細かめの粒度に設定した配合Bでは密粒度アスファルト混合物よりも0.3以上低い値となり、表層用には粗めの粒度を選択する必要があることが分かった。

今回の検討では、SMAの骨材粒度については文献調査等によりほぼ標準的と思われる粒度範囲を設定し、その範囲内で粗粒度、細粒度、中間粒度を設定した。その結果、粗粒度として設定されたSMA配合Aの性状が最も良好であったことから、今後は特にすべり抵抗性の向上を目的としてSMAの骨材粒度に関する検討を実施し、あわせて耐久性向上を目的とした改質アスファルトの使用も検討していく予定である。

<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

(池田(拓), 久保, 池田(雄))

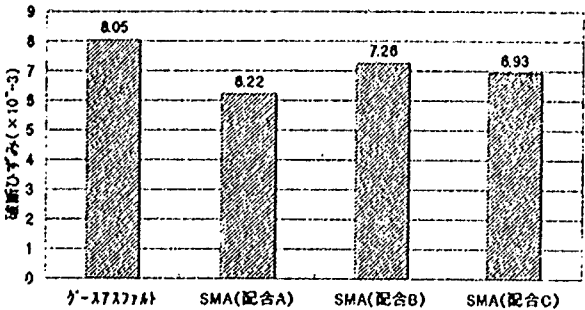


図-3 曲げ試験結果

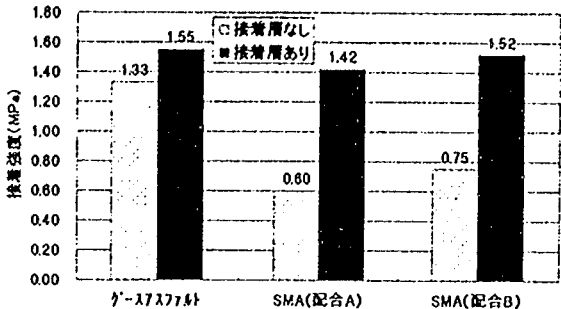


図-4 接着試験結果

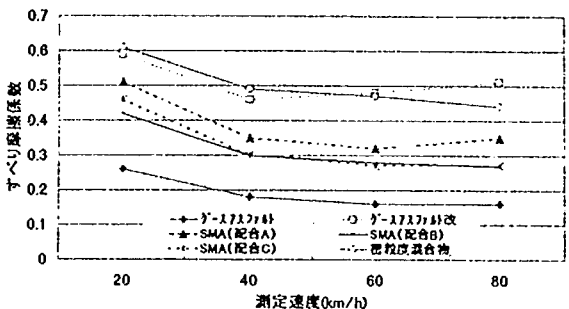


図-5 すべり抵抗測定結果

6.7 軟弱地盤の合理的な沈下すりつけ対策に関する調査

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、合理的な設計法を提案することを目的とする。

10年度は、試設計により各対策工法の適用性を比較検討した。さらに、すりつけ対策の一つである低改良率深層混合処理工法に関する実験的検討を行った。

試設計の結果、盛土高が低い場合は、供用後の補修を必要としない発泡ビーズ混合軽量土工法の適用性が高い等、各工法の適用性が明らかになった。また実験の結果、ジオグリッドや表層安定処理工法などを併用することにより、未改良部に作用する荷重が小さくなり、深層混合処理の低改良率化を図ることができることが明らかになった。

1. 研究方法

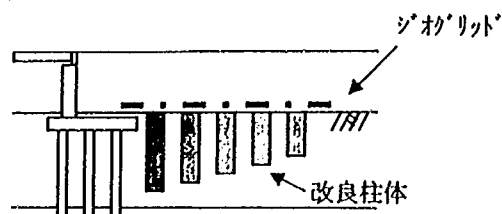
1.1 試設計による対策工法の適用性の検討

設計モデルとして、新設道路の構造物取付盛土を想定し、図-1に示すような形状とした。盛土高(H_E)と軟弱層厚(H)を変えた18ケースの試設計を行い、工費(路面補修費および橋台施工費を含む)および工期を算出した。今回対象とした対策工法を表-1に示す。また橋台形状は、図-1に示すような、凸型の断面とし、普通盛土、EPS盛土および発泡ビーズ混合軽量盛土に対してそれぞれ寸法を決定した。路面の補修は段差が3cmとなった時点で行うものとした。

1.2 低改良率深層混合処理工法に関する模型実験

地盤沈下発生装置内(図-2)に砂質土を用いて盛土を作製した。盛土は高さ2mとした。その後、下部の沈下板の一部を下降させることにより不同沈下を発生させた。実験ケースを表-2に示す。実験中は、固定板および沈下板に設置された

・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

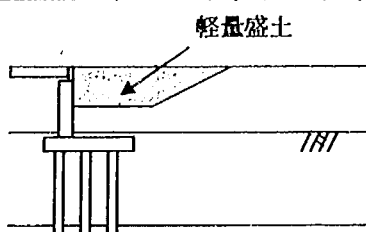


図-1 試設計モデル

表-1 対象とした対策工法

対策工法	略称
サト・ドレーン工法	SD
サト・コンバクション工法	SCP
プレート工法	PL
	(+SD,SCP)
深層混合処理工法 (着底)	DMM(着)
〃 (フローティング)	DMM(F)
荷重軽減工法 (EPSブロック)	EPS
〃 (発泡ビーズ混合軽量土)	発泡B

表-2 実験ケース

ケース	沈下幅	備考
1	1.3m	併用なし
2	(換算改良率)	ジオグリッド 1枚
3		ジオグリッド 3枚
4	14.8%	鉄網
5		併用なし
6	1.8m	ジオグリッド 1枚
7	(換算改良率)	ジオグリッド 3枚
8		鉄網
9	10.0%	安定処理土

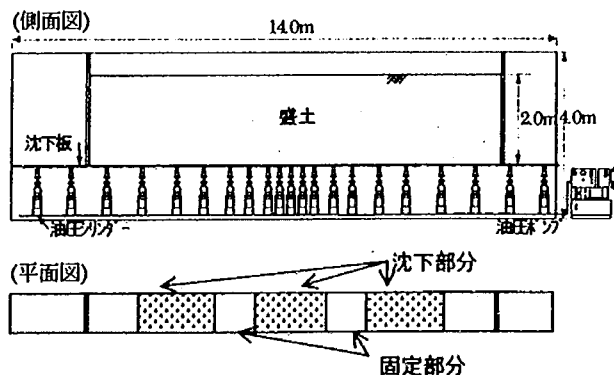


図-2 実験概要

ロードセルによって鉛直荷重を測定するとともに、色砂を用いて沈下観測線を作製し、正面のガラス面より盛土の変形を観測した。

2. 研究結果

2.1 試設計結果

試設計結果を表-3に示す。

盛土高が小さい場合は、路面補修を必要としないフローティング式のDMM工法や発泡ビーズ混合軽量土工法が安価となった。これは、盛土高が低い場合、路面補修費が全工費に占める割合が高いためである。

盛土が高い場合は、軟弱層厚が大きくなるに従い、側方流動の判定で許容値を越えるため従来工法を適用できなくなり、DMM工法やEPS工法の適用性が高くなった。

また、盛土材の違いによる橋台施工費の差は盛土高が大きいほど顕著ではあるが、工費に占める割合は小さい。

2.2 実験結果

実験結果の一覧を表-4に示す。

沈下が進むにつれ、固定部分と沈下部分の境界にアーチ状のせん断面が発生した。(図-3参照)せん断角はその後ほぼ一定の値を示した。また、いずれのケースにおいても、応力分担比(固定部分と沈下部分に作用する鉛直応力の比)は一定値に収束した。このことから、沈下が進むとせん断面に沿って働くアーチ作用によって盛土荷重が固定部分、すなわち改良柱体に伝達され、沈下部分、すなわち未改良部に作用する鉛直荷重は軽減されると考えられる。また、ジオグリッドなどの併用により、未改良部に作用する荷重が軽減され、盛土表面の不同沈下量も抑えられた。特に表層安定処理工法の併用が最も効果的であった。

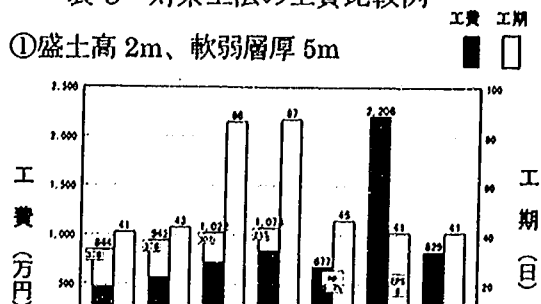
2.3 まとめ

- ①低盛土の場合、全工費に占める路面補修費および橋台施工費の割合は比較的大きく、路面補修を必要としない工法の適用性が高い。また盛土高が大きくなると、全工費に占める路面補修費および橋台施工費の割合は小さく、軟弱層厚が小さい場合は従来工法の適用性が高い。また、軟弱層厚が大きい場合には新工法のみ適用可能となる。
- ②低改良率の深層混合処理工法に関して、ジオグリッドなどを併用したり、表層安定処理をすることにより改良柱体間の不同沈下が緩和され、より低改良率化を図ることができる。

3. 主な研究成果物 三木他：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回土木学会年次学術講演会(投稿中)

表-3 対策工法の工費比較例

①盛土高2m、軟弱層厚5m



②盛土高10m、軟弱層厚30m

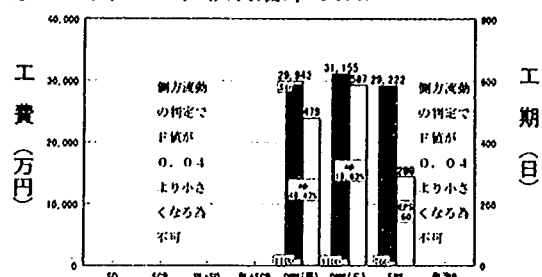


表-4 実験結果

ケース	せん断角 (°)	応力分担比		表面沈下量
		実験値	計算値	
1	62	6.8	5.3	3.7(cm)
2	68	8.3		2.5(cm)
3	70	8.5		1.6(cm)
4	70	8.5		1.8(cm)
5	71	3.6	4.0	4.4(cm)
6	71	4.2		4.4(cm)
7	68	5.0		4.3(cm)
8	67	7.0		3.5(cm)
9	71	9.8		3.0(cm)

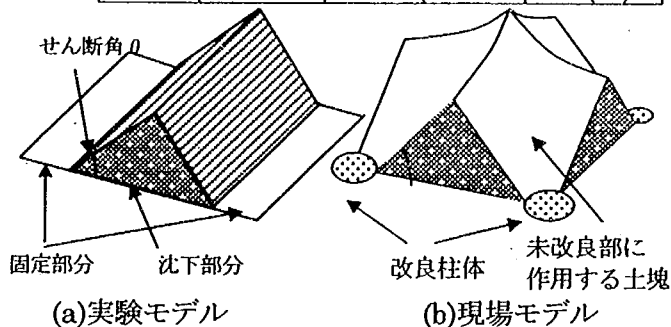


図-3 盛土荷重分布モデル

(三木, 古本, 井生)

6.8 (1) 管渠システムのコスト縮減に関する調査

研究期間：平 10 ～ 平 11
担 当：下水道研究室

【要旨】

下水道整備は今後とも一層の事業推進が求められているが、昨今の財政状況の元においては整備コストを一段と縮減することが求められている。下水道事業費のうち約 7 割を管きよ施設が占めており、管きよ施設のコスト縮減は急務である。管きよ施設のコスト縮減に当たっては、まずそのシステムの現況分析を行い、技術の発展に伴い見直すべき事項を抽出する。従来の設計基準の根拠について現時点での再検討が必要である。最終的には建設コストと維持管理コストの双方をふまえたライフサイクルコスト（LCC）により適正な管きよ施設のコスト縮減方を定める。10 年度には、管きよ施設に係る自治体のコスト縮減取り組み状況を調査し、それに伴う維持管理上の課題について検討した。さらに実績値より維持管理の各作業に係るコストを算出した。また新下水道システムの現況と問題点の調査を行ったが、システムとしての信頼性は高く新たな選択肢としての利用は可能であった。

1. 調査目的

社会資本の中でも下水道整備は国際的水準から見て立ち後れている事業である。今後とも一層の事業推進が求められているが、昨今の財政状況の元においてはその整備コストを一段と縮減することが必要である。下水道事業費のうち、管きよ施設の占める割合は約 7 割であり、整備コストを縮減するためには管きよ施設のコスト縮減は非常に重要である。管きよ施設のコスト縮減に当たっては、まずそのシステムの現況分析を行い、技術の発展に伴い見直すべき事項を抽出する。従来の設計基準の根拠について現時点での再検討が必要である。また近年開発されている新しい下水道システムの従来方法との比較しその適切な活用法を見いだすこともコスト縮減には有効である。この見直しについては、建設面のみならず維持管理面の課題を考慮しなくてはならない。最終的には建設コストと維持管理コストの双方をふまえた LCC を算出することにより適正かつ安価な管きよ施設の構築が可能となる。

2. 管きよに関するコスト縮減策の実施状況

現時点での自治体における管きよ施設に係るコスト縮減策実施状況についてアンケート調査を行った。結果を表 1 に示す。その結果 19 都市中 17 都市において何らかのコスト縮減策がとられていた。他の 2 都市においても今後縮減に取り組むと答えている。取り組みの方針は「下水道施設計画・設計指針と解説」¹⁾（以下 指針とする）の基準値との関係で 2 つに分かれる。一方は従来独自の基準で実施していたことを指針の基準値に合わせたものであり、もう一方は従来の指針の基準値をさらに厳しく見直して新たな基準値を設けるものである。後者の方向が本当の意味でのコスト縮減である。

具体的な内容では人孔の設置基準の見直しが最も多く、有効な削減要因であることを示している。人孔におけるコスト縮減の方法は 2 通りある。第 1 に指針で 50m とされている小口径管の人孔間距離の見直しである。主な

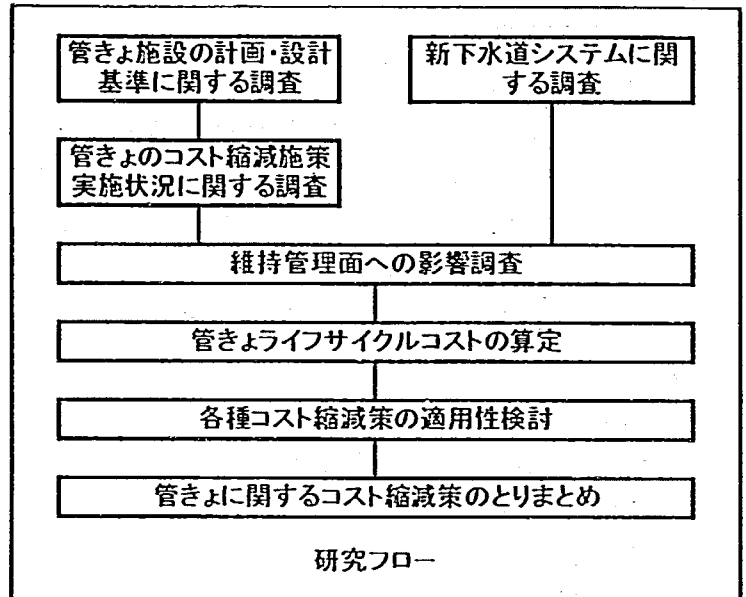


表 1 管きよ施設に係るコスト縮減策（有効回答数：19）

施策内容	実施都市数
人孔設置基準の見直し	13
管きよの緩勾配化	4
道路埋設基準の見直し	2
推進工事の長距離化	6
シールド工事の長距離化	4
その他	9

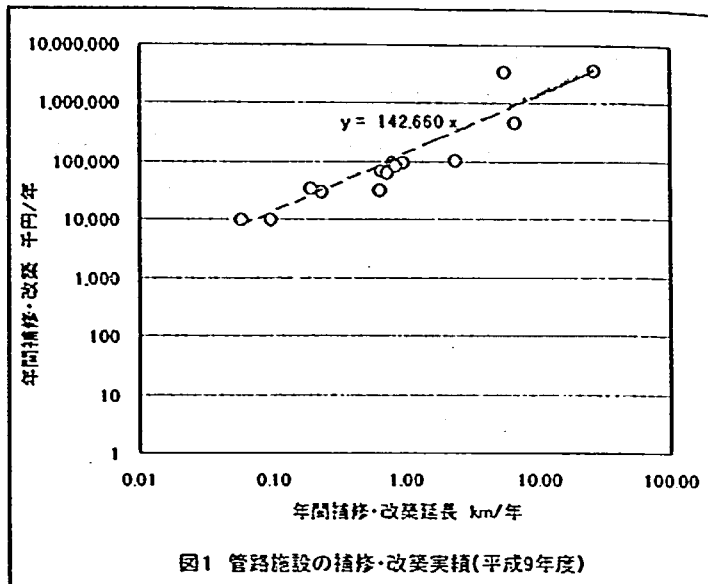
制限因子である管きよ清掃技術の進歩により長距離の清掃浚渫が可能となっている。それを受けて人孔間距離を最大100mまで延ばしている都市があり、その他の都市も70～80mを基準値に採用している。第2に人孔に従来の小型の人孔を採用し材料費の縮減を行うものである。同じような見直し方法として塩ビ管の場合、管きよ最小径について指針のφ200からφ150～φ100に下げた独自基準を設けている。

これらの基準見直しに際しての共通した課題は、道路・河川などの管理者との協議に加えて下水道部局内部の維持管理部門との調整が挙げられている。

3. 管きよの維持管理状況

今回のアンケート調査は、基本的に分流式下水道を採用し比較的早期から整備を行っている都市を対象に選んでいる。それは雨水が流入している場合、年間の降雨量に浚渫清掃が強く影響など他の要因に維持管理費が左右される恐れが強いためである。

2で述べたように計画・建設時にコスト縮減を図る際には維持管理面でのチェックが不可欠である。そこで管きよ維持管理についてもアンケート調査を行った。各都市とも管きよ施設全般にわたって点検、清掃、補修・改築を実施している。一部の都市ではそれに加えて樹と取り付け管についても実施している。これらの実績をまとめて各作業の単価を算出した。その結果、管きよ調査は673円/m、管きよ清掃は1,206円/m、そして管きよ補修・改築は142,660円/mとなった。(図1参照)



4. 管きよのLCC構築のための基礎調査

コスト縮減方策について最終的な評価を与えるには、管きよのLCCが必要である。10年度は、これを構築するために必要なデータを自治体が保有しているかを調査した。その結果当初算出が困難だと予想されていた事務人件費は、建設・維持管理の別まで含めて過半数の都市において算出可能であった。維持管理費についても同様であり調査、清掃等項目別に分類出来る。しかし建設費に関しては逆に過半数の都市が不可能か一部可能であった。早期に下水道事業に着手したため、初期の建設費のデータが、保存年限を超えてしまい保存されていないことが理由と考えられる。従って管きよのLCCは、データの保存・整理が十分な都市の選定し、さらに2で算出した各作業単価をその他必要な項目でも算出することにより算定可能と考えられる。

4. 新下水道システムの状況

真空式下水道は平成8年度末までに21市町村で使用されている”。うち8市町に対してアンケート調査を行った。真空式採用のメリットの一つである管きよの小口径化について調査した結果、主にφ100～φ150、一部ではφ75の管きよが使用されていた。管きよに係る維持管理上の問題も特に生じていないことから、真空式ではこの程度の小口径管が適当と判断できる。最も古い地区で30年経過しているが、真空ポンプ・ユニットなどの機械部分や管きよでの空気漏れについても維持管理の問題は生じておらず、システムの信頼度は高い。同じく圧力式に関してもシステムは安定して稼働している。

管きよ施設の計画に当たってはこれら新下水道システムを含めた総合的な見地から、現地の状況に合わせてコスト面・管理面双方から最適なシステムを採用しなければならない。

参考文献 1) 田中、笹部他「下水道管路施設の建設費縮減に関する検討」,土木研究所資料第3638号,1999

2) 下水道施設計画・設計指針と解説 前編 1994年版,(社)日本下水道協会

3) 下水道統計平成8年度版,(社)日本下水道協会

(笹部、楢物、吉田)

6.8 (2) 管渠システムのコスト縮減に関する調査

研究期間：平10～平11
担 当：建設システム課

【要旨】

建設省では平成9年4月に策定された「公共工事コスト縮減対策に関する行動指針」を踏まえ、下水道事業の様々なコスト縮減施策に現在取り組んでいる。コスト縮減割合の算定には、各工事の具体的なコスト縮減前後の建設費を比較し、削減コストを積上げる方法により把握できるが、日本全体の下水道事業又は下水道事業の採択単位である1処理区単位でのコスト縮減効果をマクロ的につかむ手法は確立されていない。本研究は処理区単位の管路建設コスト構成を分析し、各コスト削減施策の効果を算定する方法を確立すると共に、今後コスト縮減をより効率的に進める上で必要となるコストの生成割合（構造部位別、機労材別、本設仮設別など）を把握することを目的とする。

10年度は1処理区当たりの管渠建設コストを管径別、工法別に検討した。

1. 研究方法

下水道管渠には末端管渠から中心となる幹線管渠まで様々な管径の管渠から構成されているため、1処理区当たりの管渠建設平均単価を求め、下式のようにこの値の大小により建設コストの削減効果が算出できる。

$$1 \text{ 処理区当たり管渠建設平均単価(円/m)} = \sum \{ \text{管径別建設単価(円/m)} \times \text{処理区当たり管径別延長割合(\%)} \}$$

同一管径でも埋設される土被りにより建設単価は大きく異なるが、全体的なコスト把握には工法別（開削、推進、シルド等）で単価を把握することにより土被りの相違によるコスト変動を表すことができるものとした。管径別建設単価の算定には、全国の地方自治体から収集した平成9年度発注工事設計書260件を管径・工法別に分解し、335管渠区間を抽出し直接工事費ベースで分析した。管径別管渠埋設工法の割合は平成10年度「日本の下水道」¹⁾に記載されている総工法別延長、管径管種別発注延長をもとに算定した。また処理区当たりの管径別延長割合は、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された33都市の管径別管渠延長をアンケートにより収集しその総計により算出した。

2. 研究成果

(1) 処理区当たりの管径別延長割合

下水道管渠は管径が大きくなると急激にその延長割合は低下するため、管径別延長割合の算定には管径とその管径以上の管渠が占める占有率の関係を累乗曲線で近似し利用した（図-2）。その際、管径200mmを

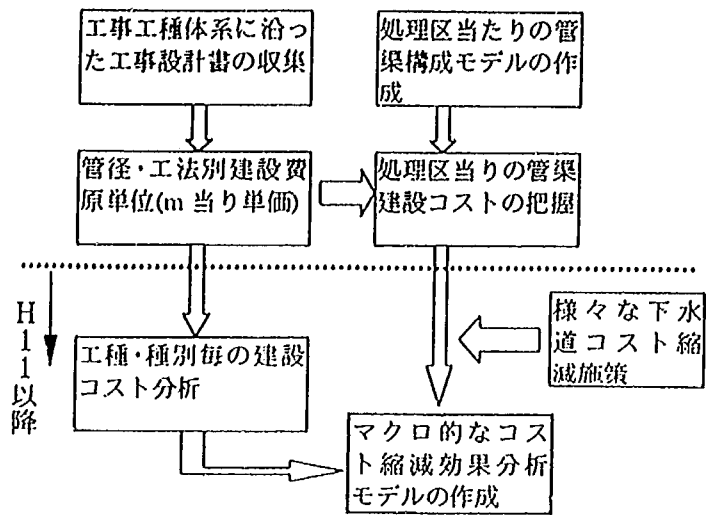


図-1 研究フロー

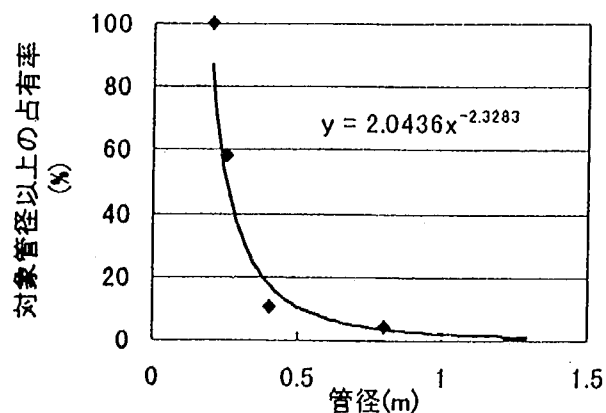


図-2 処理区当たりの管径分布

最小管径（200mm 以上の管径占有率 100%）とした。下水道管渠の約 90%が管径 400mm 以下の小口径管渠であることがわかる。

(2) 管径別管渠布設工法割合

管渠の布設工法によりその建設単価は大きく異なるが、文献 1) の 8 年度管径・管種別発注延長より算定される管径別開削、推進、シールド各工法の延長割合を処理区全体の管径別工法延長割合とした（図-3）。管渠延長全体では開削 91%、推進（小口径を含む）8%、シールド 1%である。全体的に管径が大きくなるほど推進、シールド工法の割合が大きくなることがわかる。

(3) 管径・工法別平均建設単価

図-4 に管径・工法別平均建設単価（直接工事費ベース）を示す。管径 2000mm 以上についてはデータ数が少ないため単価のばらつきが大きい。推進・シールド工法が管径 1000mm 以上で急激に単価が高くなることがわかる。

(4) 処理区当たりの管径・工法別建設コスト割合

上記結果から処理区当たりの管径・工法別延長割合と建設コスト割合を示したのが、図-5、6 である。一般的に大口径管渠ほど管渠延長割合は少なくなるものの、m 当たり単価が大きいため、建設コストが占める割合は高くなる。全体的な結果として、300mm 以下の開削管渠が建設費の約 50%、900mm 以下の小口径推進を中心とした推進管渠が約 30%、350mm 以上の開削管渠が 10%強、1000mm 以上の推進・シールド管渠が 10%弱、それぞれ占めることがわかる。

＜参考文献＞ 1) 平成 10 年日本の下水道、建設省都市局下水道部監修、日本下水道協会発行

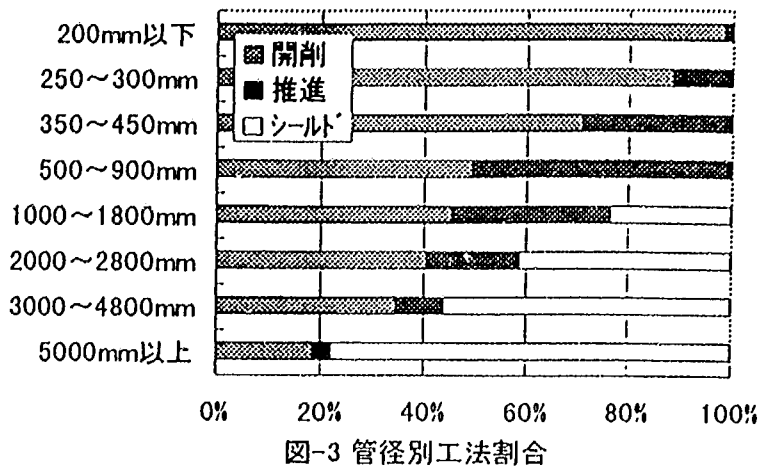


図-3 管径別工法割合

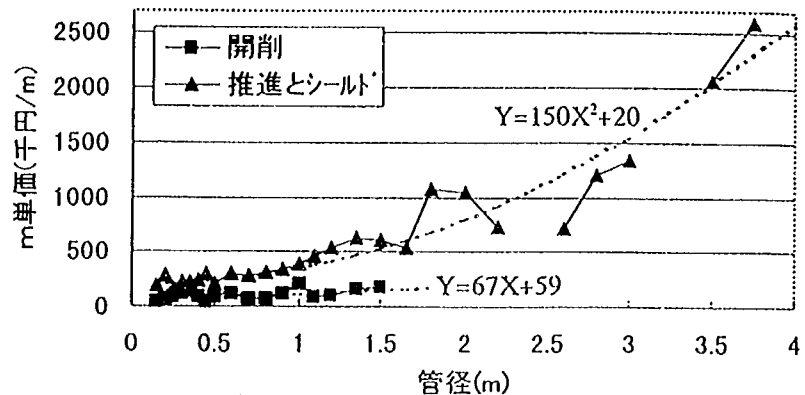


図-4 管径別m施工単価(直接工事費ベース)

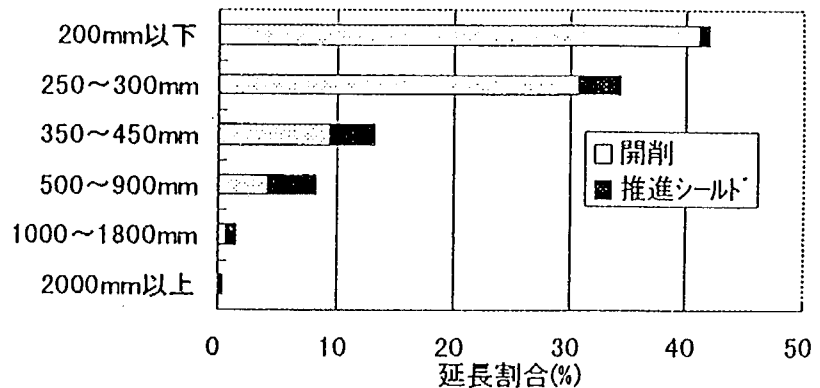


図-5 1処理区当たりの管渠延長割合

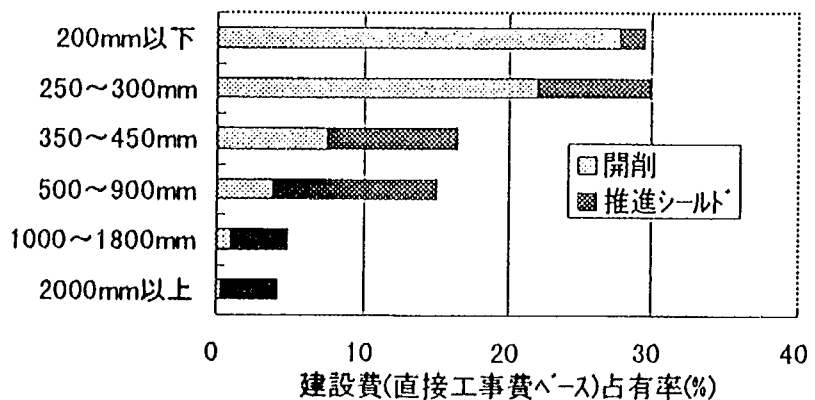
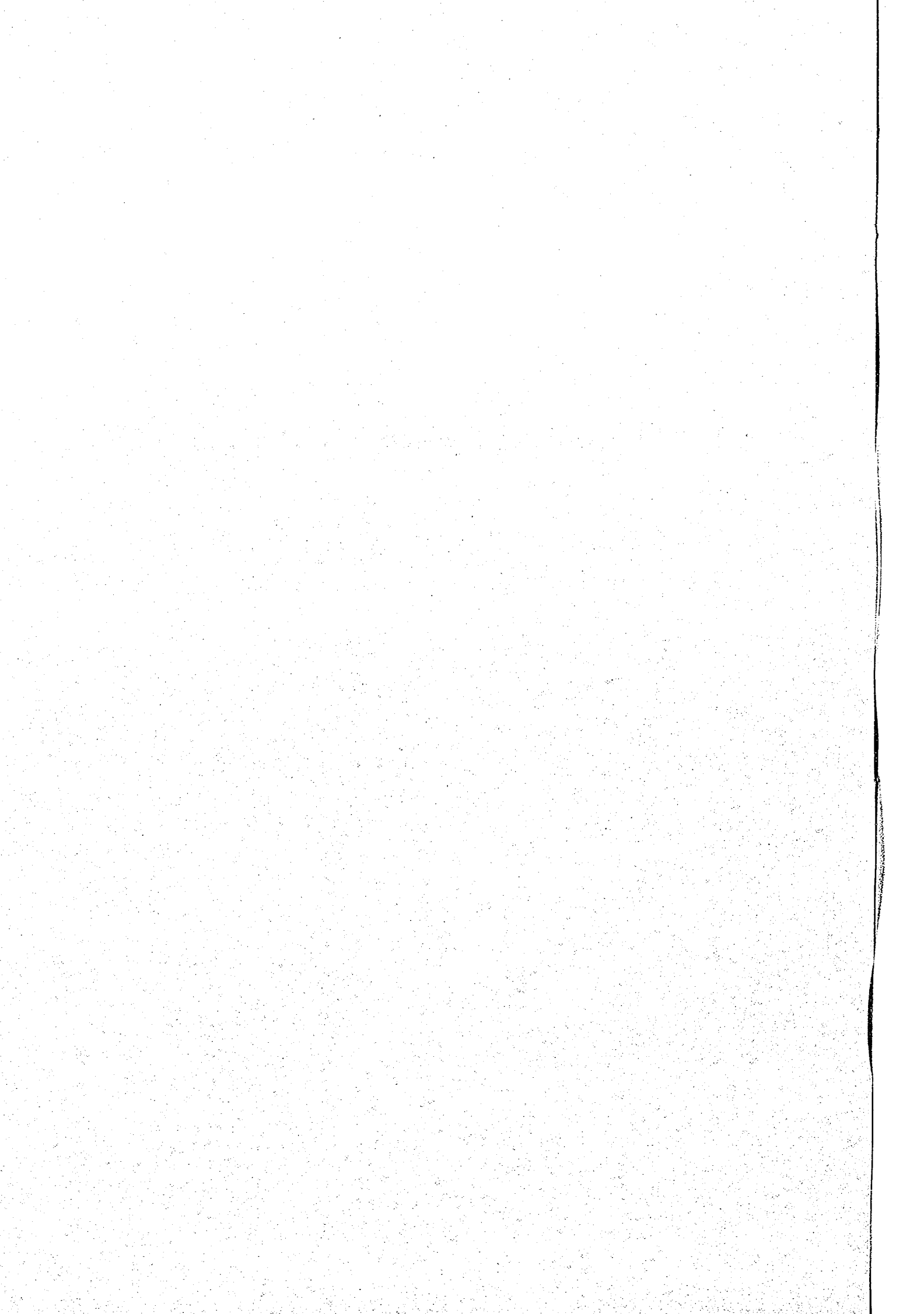


図-6 1処理区当たりの管渠建設費占有割合

(大澤, 小林)

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



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

1. 研究の背景

直面する公共工事のコスト縮減とともに、事業実施にあたっては、地球環境や生活環境等への影響も考慮した総合的な観点からの建設事業コストの低減が重要な課題である。

一方、環境影響の低減、維持管理コストの低減等の技術開発が進められても、事業に採用するにあたっての評価手法が未整備なため、新技術の活用、普及が進んでいない。

このため、外部コスト*の内部化による総合的な建設事業コストの評価手法を明らかにし、現場への新技術の導入の推進を図ること、技術研究開発の活発化を促すことが求められている。

*) 外部コストとは、施設の建設、維持管理等のライフサイクルを通じて外部不経済をもたらす社会的費用の総称であり、天然資源消費、廃棄物処理等に伴う地球環境への影響や工事に伴う騒音、振動等の生活環境への影響、工事实施に伴う生活利便の損失等（費用化されていない部分）を想定している。

2. 研究の目的

- ① 外部コストの発生実態把握とコスト換算手法の開発
- ② 外部コストを組み入れた総合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 民間で開発された新技術を効果的に活用するためのシステムの整備

3. 達成目標

- ① 外部コストの計測手法、コスト換算指標の整備
- ② 建設事業コスト評価マニュアルのとりまとめ
- ③ 省資源化技術、リサイクル促進技術のほか、既存ストックを有効活用するとともに、補修等にあたって施設機能の低下を抑える補強技術等について開発目標を明確化し、技術開発を促進
- ④ 建設事業コスト低減技術の活用指針（案）の策定
- ⑤ 技術総合評価方式等の運用手法（指標等）具体化
- ⑥ 新技術情報の流通システムの提案

4. 社会的な効果

- ① 総合的な建設事業コストの低減
- ② 外部不経済の内部化による資源配分の適正化
- ③ 技術イノベーションによる建設コストの低減

—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—

個別研究課題目次

7.1 建設分野における外部コストの評価手法の開発に関する研究

- (1) 建設分野における外部コストの評価手法の開発に関する研究……（環境計画研究室）… 180
- (2) 建設分野における外部コストの評価手法の開発に関する研究……（緑化生態研究室）… 182
（都市公園の経済評価調査）
- (3) 建設分野における外部コストの評価手法の開発に関する研究……（道路研究室）… 184

7.2 建設副産物の発生抑制・再利用拡大技術の開発

- (1) 建設副産物の発生抑制技術の開発……（施工研究室）… 188
- (2) 建設副産物の発生抑制・再利用拡大技術の開発……（コンクリート研究室）… 190

7.3 環境負荷低減のための材料・構造物補修改修技術の開発

- (1) 維持補修分野における外部コスト縮減対策……（施工研究室）… 194
- (2) 環境負荷低減型材料の開発……（化学研究室）… 196

7.4 建設コストに含まれるコスト構造の明確化及びその低減技術の研究

- （建設事業の外部コストの内部化に関する調査）……（建設マネジメント技術研究官）… 200
（建設マネジメント技術研究室）

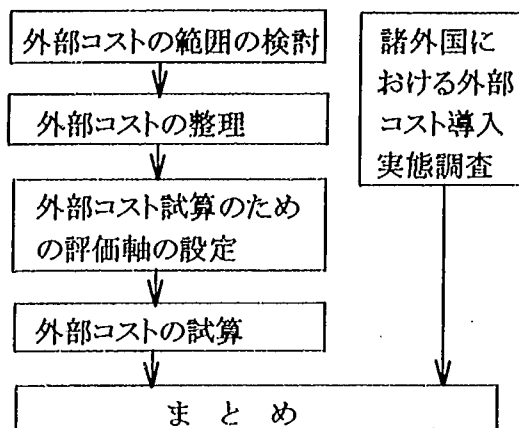
7.1 (1) 建設分野における外部コストの評価手法の開発に関する研究

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)を明示的に算出する手法の開発を目指すものである。本年度は、研究の初年度として、外部コストの範囲の検討、諸外国における外部コスト組み込みの実態調査、外部コスト算出を行う際の評価軸の検討及び具体的な項目に関する事例計算(ケーススタディー)を行った。ケーススタディーでは、外部コストの評価指標のうち重要度と評価・算出の難易度を考慮し、建設副産物の中間処理場の立地・稼働に伴う外部コストをヘドニック法によって試算した。その結果、処理場1箇所1年当たり1.8億円の外部コストが生じていることが算出された。



1. 研究方法

本研究では、費用と便益を図-1のように分類するものとする。ここで、私的便益とは、事業者が本来目指していた効果、外部便益とは事業の副次的な効果(良い影響)とし、私的コストとは事業費そのものを意味し、それ以外の社会的なコスト(事業の悪い影響)を外部コストと整理した。さらに、外部コストを環境に関するものと環境以外のものの2つの部分に分類して整理した。また、外部コストの制度的扱いに関する諸外国の情報を収集整理した。

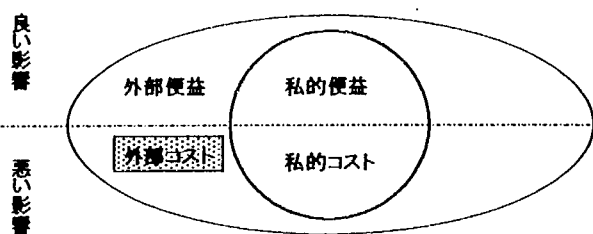


図-1 外部コストの範囲の概念図

2. 研究結果

(1) 諸外国における外部コスト導入事例の収集

諸外国における公共事業への外部コスト導入事例を整理するため、アメリカ合衆国、イギリス、ドイツの3ヶ国について、文献の収集を行った。その結果、ヘドニック法、CVM法等の外部費用評価手法を導入して、公共事業の評価を行っている事例は存在しなかった。アメリカ合衆国においては、スーパーファンド法によって環境被害の賠償を求められることがあり、その際にCVMによって金銭評価がなされている事例はあるが、事業実施に際してこのような経済性評価手法が導入されない根本的な理由としては、主要な環境法において、例えば「安全性に対して十分な余裕をもって、公衆の健康を守ることができる (Clean Air Act, 大気清浄法)」レベルというような表現で、完全を目指しているものが多く、そのことが経済性評価のような環境とのトレードオフを許す手法が導入されない原因となっていることが指摘されている。

(2) 外部コストの整理手法の検討

建設事業における私的便益・私的費用および外部便益・外部費用について、表-1に示すように重要度(事業規模、発生頻度、影響範囲)、計測・評価の難易度、コスト区分の各指標より整理を行い、試算を行う項目の選定を行った。

表－1 外部コスト項目を整理するための指標

指 標		内 容	
重要度	事業規模	大規模	建設事業全体、道路
		中規模	河川、下水道
		小規模	公園
	発生頻度	頻度多	工事の度に発生
		頻度少	工事によって発生する場合あり
	影響範囲	地球規模	全地球的に何らかの影響を与える
		周辺地域	当該工事を含む周辺地域まで影響を与える
当該工事		当該工事の範囲内に影響がとどまる	
計測・評価の難易度		可能：実績多	計測・評価が可能であり、計測・評価の実績も豊富
		可能：実績少	計測・評価が可能であるものの、計測・評価の実績が小数
		困難	計測・評価について、方法が確立されていないか、データ不足等の理由により困難

(3) 評価項目の選定

試算を行う外部コストの項目の選定条件は、以下のとおりとした。

＜選定条件＞

- 1) 「重要度」： 事業規模が大きくインパクトの大きいものが選定項目として望ましいため、事業規模が「大規模」であり、影響範囲が「地球規模」もしくは「周辺地域」レベルであるものを選定する。
- 2) 「計測・評価の難易度」： 計測・評価が可能であることが前提条件であるが、計測・評価の実績が既に多いものについては対象外として、「可能：実績少」であるものを選定する。

(4) 外部コストの試算

(3)での選定条件を考慮した結果本年度は、建設副産物の処理・処分に伴う環境悪化の外部コストの試算を行った。外部コストとしては、建設副産物を処理・処分する際に発生する騒音、振動、悪臭やダンプトラック出入りなどの総和としてのコストと理解される。試算方法は、中間処理場の周辺地価の下落の程度をヘドニック法により定量化することによった。使用した地価データは、公示価格及び相続税路線価であり、被説明変数である地価を説明する変数として①処理・処分場までの直線距離、②最寄り駅までの道路距離、③最寄り小中学校までの道路距離、④用途地域、⑤処理・処分場の立地地域を設定した。

試算では、N社処分場 337 サンプル、T社処分場 215 サンプル、Ni社処分場 397 サンプル、合計 949 サンプルに関する被説明変数および説明変数のデータを収集し、地価関数の推定を行った。その結果、処理・処分場までの距離、最寄り駅までの距離、最寄り小中学校までの距離のすべてを半対数形とした場合の決定係数が 0.85 と大きな数値となった。なお、これら 3 つの説明変数を線形とした場合の決定係数は 0.82 となった。

以上の設定により、建設副産物の処理・処分場の運営に伴う環境悪化の外部コスト E を推計すると、

$$E = 1.80 \times 10^6 \text{ (円/年・箇所)}$$

という結果を得た。

3. まとめ

本年度は、外部コストの整理、諸外国における状況調査及び外部コストの一つの試算を行ったが、外部コストは十分大きな額になるという試算結果を得た。平成11年度以降には、調査対象とする外部コスト項目を複数個選定し、外部コストの計測適用の範囲を広げると共にその精度の向上方策について検討し、最終的には、建設事業コストの総合化に関する手法の提案を行いたい。

(寺川、並河)

7.1 (2) 建設分野における外部コストの評価手法の開発に関する研究 (都市公園の経済評価調査)

研究期間：平 1 0

担 当：緑化生態研究室

要 旨

公共事業の費用対効果の計測の必要性がいわれている中、公園緑地のような環境質は非市場財であることから、直接的に市場からの情報によりその効果を計測することはできない。そのため、このような環境質の場合、代替法、旅行費用法、ヘドニックアプローチ、仮想市場法 (Contingent Valuation Method: CVM) 等を利用して効果の計測を行っている。

しかしながら、公園緑地の場合、CVM を用いて便益を計測した事例はまだ少なく、その有用性について十分な検証は行われていない。

本調査では、既存の国営公園公園に CVM を適用して経済価値を計測し、CVM の有用性について検討を行うことを目的としている。

1. 研究方法

1. 1 評価対象項目の設定

本調査では、検討対象公園として、既存の国営公園を対象とし、公園整備により生じる価値のうち、特に間接利用価値の都市環境の維持改善、都市景観を中心として評価対象項目を設定する。

1. 2 アンケートの設計

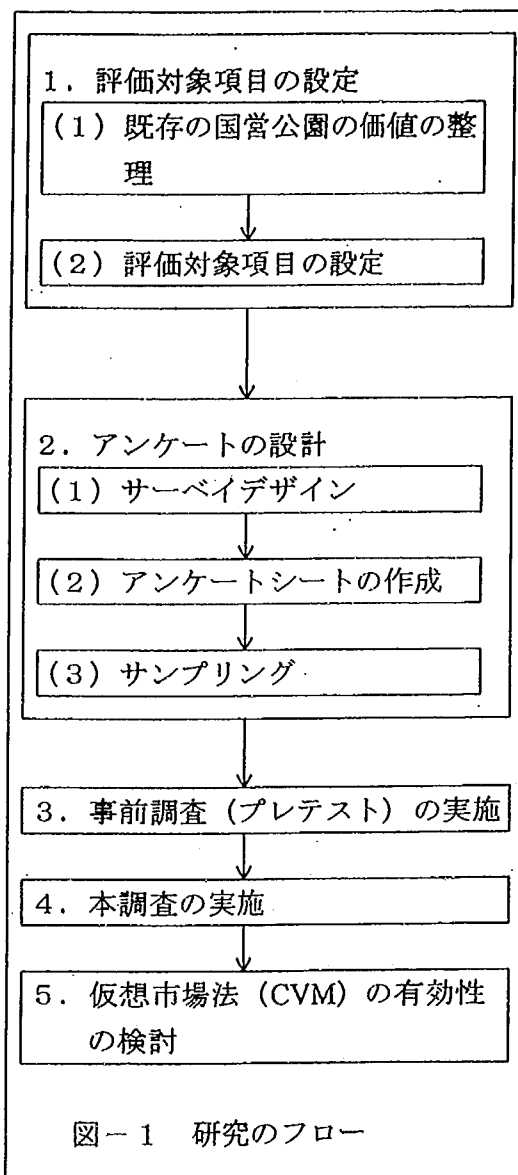
①サーベイデザイン

どのような仮想状況を設定することが望ましいかを様々な角度から検討し、アンケートで具体的に想定する仮想状況の設定方法の整理を行った。

上記の仮想状況を踏まえて、どのような形で公園整備について支払意思額 (WTP) を質問するか検討した。

②質問項目の作成

①で検討したサーベイデザインに則り、具体的なアンケートの質問項目を作成した。



作成にあたっては、可能な限り NOAA（アメリカ大気海洋局）ガイドラインに則って作成することとした。

③サンプリング

以下の方針に従ってサンプリングを行った。

- ・対象地域

上記便益計測対象公園周辺市町村

- ・想定回収率

30 %

- ・サンプリング数

アンケート規模は、回収目標を 300 票とし、1,000 票をサンプリングした。

- ・アンケート方法（郵送回収法）

NOAA ガイドラインでは、個人面接方式の採用を進めているが、ここでは、郵送回収法を利用した。

1. 3 事前調査（プレテスト）の実施

本調査の 1 割程度の規模で事前調査を行った。事前調査を通じて、金額提示額の妥当性や難解な設問箇所等のチェックを行い、アンケートシートの改良を行った。

1. 4 本調査の実施

1. 3 の事前調査を経た後、1. 3 の設計に従い本調査を行う。

1. 5 仮想市場法（CVM）の有効性の検討

（4）で実施したアンケート結果を用いて、CVM を利用した場合の上記対象公園の便益額を推定した。

他手法による上記対象公園の便益計測結果と CVM による計測結果を比較等を行い、公園緑地の効果計測に CVM を利用した場合の有効性や限界について検討を行った。

2. 研究結果

自然環境向上や避難誘導等間接利用価値を始めとするいわゆる存在効果を評価対象項目として、既存の国営公園の便益について CVM を用いて計測を行い、公園の価値を計測する上で、CVM の有効性について検討を行った。

3. まとめと今後の課題

本研究では、CVM を利用して公園便益を計測することの有益性について検討を行った。今後の課題としては、本研究では対象とならなかった公園価値について、CVM も含めてどのようなアプローチで便益効果を計測していくかを検討することがあげられる。

（藤原，山岸）

7.1 (3) 建設分野における外部コストの評価手法の開発に関する研究

研究期間：平10～平14

担 当：道路研究室

【要旨】

本研究の目的は、公共事業、特に道路事業の外部的なコストまでを含めた総コストを対象としてコスト縮減を行うことである。このため、本研究は、その前段階として、道路事業全体についてコスト構造を把握するものである。

本年度は、コスト構造把握のための第1段階として、計画開始から完了までについて、道路事業費の経年的変化を調査することを行った。具体的には、過去に完了した道路事業（仙台西道路）について、過去の工事の記録等を元に、計画段階から工事完了までの総コストの経年変化を算出した。ここで言う総コストとは、従来の総コストである工事費、調査費、用地費等に対し、新たに行政人件費を経費に加えたものである。

また、仙台西道路では事業初期段階において、住民との交渉を早期に解決するため長大トンネル案が採用されたが、次年度以降の研究のプロローグとして、長大トンネル案を採用しなかったと仮定した場合の事業費を推計し、実際にかかった経費との比較を行った。

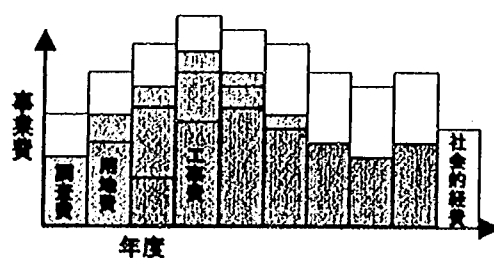


図 プロジェクトのコスト

1 背景と目的

財政構造改革の流れのなか、公共事業のコスト縮減が重要な課題になっている。この流れのなか、平成9年4月、関係閣僚により「公共工事コスト縮減移管する行動指針」、建設大臣により「公共工事コスト縮減対策に関する行動計画」が決定された。同行動指針、同行動計画は、いずれもコスト縮減の対象を単年度の工事としており、今後の課題としてプロジェクトの開始から終了までのプロジェクト全体のコスト縮減が考えられる。

従来から、プロジェクト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、プロジェクト費用について、間接費用も含めた、事業期間全体におけるコストを算出するためケーススタディを行うものである。

2 調査の概要

本研究においてはケーススタディの対象として、過去に工事が完了した実際の道路事業（仙台西道路）について行うこととした。調査は基本的に工事史、予算資料等を用いて行い、必要に応じてヒアリング等を行った。

2-1 対象事業

対象となった事業はインターチェンジと市街地を結ぶ道路の改築事業である（図1）。

また、本事業における主な課題は、1）都市決定区域外における用地交渉の難航、2）市街地部におけるコミュニティの分断等の沿道環境対策、3）用地補償件数を減らすため山岳部において結果的に採択された長大トンネル案実施のための技術的問題が主要な課題である。主要課題に着目して事業期間を分類した結果が図2である。なお、図2で、直轄事業採択以前を未動期としているが、この間は県が中心となって事業が行われており、直轄事業として見た場合の未動期である。また、後の分析は、直轄事業の事業費を対象としているため、この期間の分析は対象外とした。

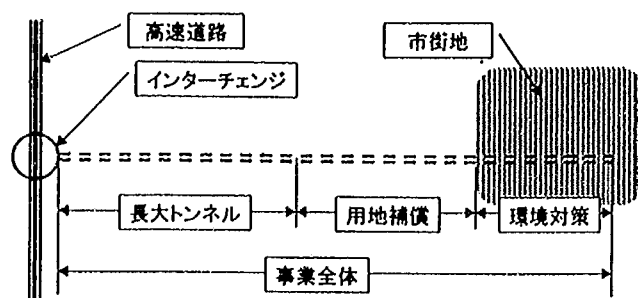


図 1 事業の概要

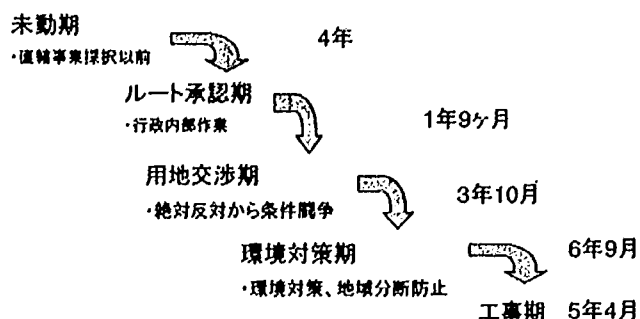


図 2 事業のタイムスケジュール

2-2 コスト分類

本調査では、以下のコストに分類にしたがって集計を行ったが、その結果が図 3 である。本プロジェクトには長大トンネルが含まれていたため、トンネル事業費が非常に大きな比重を占めている(図 4)。

① 工事費（建設に要した費用）

工事当時の平均的な事業費（行政人件費を除く）に占める工事費の比率が 6 割程度であるのに対して、当該工事に閉める工事費の割合は約 77% となり、工事費の比率の高い事業であった。これは、長大トンネル案を採用したことによると考えられる。

② 用地費等（用地・補償に要した費用）

工事当時の平均的な事業費に占める用地補償費の割合は 2～3 割程度であるのに対し、当該工事における用地補償費の比率は 7% 程度であり極めて工事費の比率の高いプロジェクトである。

③ 機械損料等（機械損料、工事諸費等に要した費用）

工事当時の平均的な事業費に占める機械損料等の割合は 1～2 割程度であるが、当該工事における用地補償費の比率は 16% 程度であり標準的な比率である。

④ 調査・設計費（調査に要した費用）

工事当時の平均的な事業費に占める調査費の割合は不明であり比較を行うことはできないが、当該工事における調査・設計費比率は 2% であった。

⑤ 行政人件費

行政人件費の算出は、過去の工事の記録等を参考にして、次の手順により行政職員の人件費を推計した。交渉には、地元自治体の協力が不可欠であり、本来行政経費にはこうした費用も含めるべきであるが今回の研究では推計が非常に困難であるため対象外とした。

1) 各年度における当該工事事務所内の各課における当該事業の占める業務の比率を推計した。

2) 各年度の推計は、基本的に当該工事事務所における現在の構成員の業務分担状況を前提として、特定事業の課全体業務に占める割合を推計した。

3) 当時の回想録等を基に比率を修正。

本事業の試算結果から、事業期間全体を通じた行政コストの割合は概ね 6% 程度である。

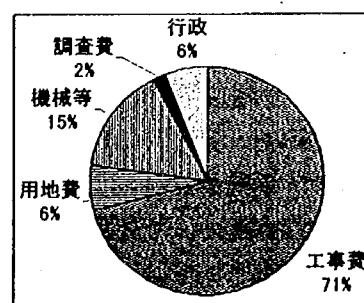


図 3 事業費の内訳

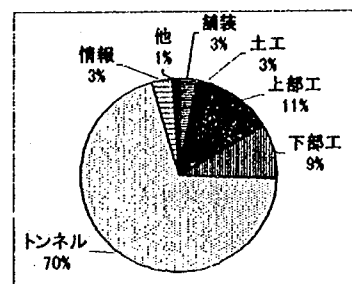


図 4 工事費の内訳

2-3 経年的変化

事業費の経年的変化は図 5 の通りである。事業着手後、約 2 年間、用地交渉に時間を要しており（図 2）、その後の 3 年目～6 年目において用地費が多くなっている。7 年目～13 年目については、環境対策が問題になったと同時に、当時としてはあまり経験のない長大トンネル建設のための技術的検討に多くの労力を要したため、調査費が多くなっている。このように、事業費の内訳の変遷は事業の状況を良く現していることがわかる。

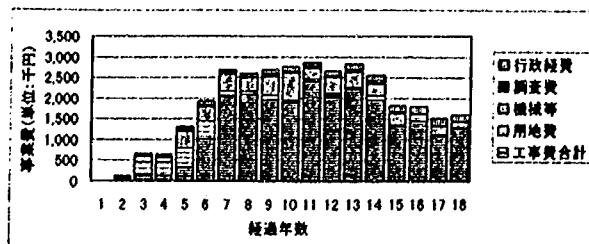


図 5 事業費の経年的変化

2-4 行政コストの傾向

次に行政コストの傾向について、分析してみた。

- ① ここでは、以下の通り行政コストの内訳を次の通り分類した。

- 1) 幹部：事務所長、副所長
- 2) 設計部門：調査（第二）課長、同課員
- 3) 施工部門：工務（第二）課長、同課員、出張所長、同所員
- 4) 用地部門：用地課長、同課員
- 5) 設備部門：機械課長、同課員、電気通信課、同課員、共同溝課、同課員
- 6) 管理部門：道路管理（第 1、第二）課、同課員、交通対策課、同課員

- ② 以上の分類に従って、行政経費を分類して事業段階毎に算出した。

本プロジェクトの場合、長大トンネルを採用したため、施工にあたっての技術的検討に労力を要したため、行政費全体に占める施工部門での割合が多くなり、同様に施工期における比率も高くなった。

- ③ 工種毎の行政経費の比率を算出した。

次に、各部門の行政経費と各部門が実施したと見られる事業費の比率を求めることにした。各部門別の事業費の算出にあたっては、調査・設計部門の事業費の分類が困難であったが、発注名から調査部門が発注したと思われるものと施工部門が発注したと思われるものに分類した（表 1）。

結果としては、予想通り調査、設計部門で行政費の比率が高くなった。設備部門については、トンネル工事が多かったことを反映して機械損料が増大したためか、行政費の比率が低い値となった。

3 計画変更前後の比較

本プロジェクトの当初案は、市街地を出た後、山裾を経て、山岳部をトンネルで抜ける案であった。直轄事業に採択される以前に事業が硬直状態に陥った原因として、山裾における集落において、住民の側に十分な合意が成立していなかったことが挙げられる。こうした状況で、4 年間の間、事業はほとんど進まなくなってしまった。

3-1 長大トンネル案

本プロジェクトの最終案は、直轄事業になってから住民合意に時間を要する当初案から、長大トンネル案へと変更を行った（図 6）。当時のトンネル技術からすると、ここまでの長大トンネルを建設することは相当の決断であったことが回想録、打合せ議事録等からわかる。このため、常に詳細な検討を行いながら工事を実施していくことになり、結果的に施工部門の行政経費も多くなった。

表 1 部門毎の行政経費／事業費

単位: 百万円			
	事業費	行政経費	比率
施工部門	22,929	1,142	5.0%
管理・設備部門	5,824	456	7.8%
設計部門	206	89	43.0%
用地部門	211	123	58.6%

3-2 建設コストは増加

本研究では、仮に当初案どおり事業が行われた場合の事業費の推計を行った（図 7）。長大トンネルの採用によって、トンネル工事費の上昇、集落を避けることによる補償費の減少、道路の絶対延長の減少、等の影響を差し引いた結果どうなるのかに推計したものである。その結果、原案に比べて、長大トンネル案事業費の方が3割程度高くなるとの推定結果が出た。

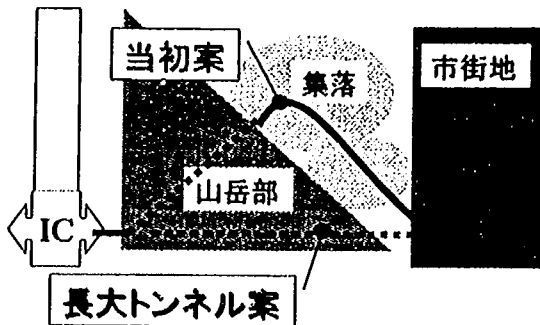


図 6 長大トンネル案の採用

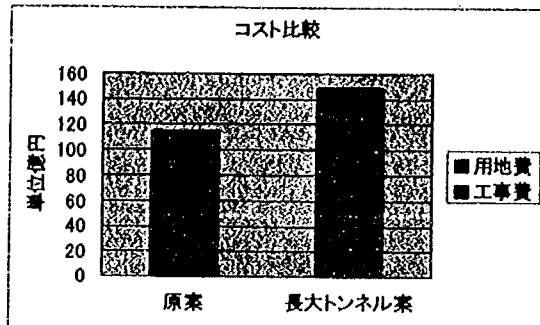


図 7 当初案と最終案比較

4 考察及び今後の課題

今回の研究は一般的に困難とされていた特定の道路プロジェクト全体のコスト把握を行うことが可能であることが判明した。また、行政コストについても、打合せ記録、関係者へのインタビュー（ここでは主に回想録を用いたが）等を用いることで算出できることが明らかになった。

4-1 住民との対話コスト

今回は、国のみを対象として、行政コストの推計を行っていった。調査を行っていく過程で明らかになったことは、用地交渉、環境問題に関する話し合い等の場において、国、地方公共団体だけでなく住民の側も、公聴会や討論会参加するなどして非常な負担を強いられていることであった（図 8）。よって、用地交渉、アセスメント、都市計画決定の段階において、国、地方公共団体、住民の各者のコスト負担について研究を行う必要があると考える。



図 8 住民との対話

4-2 便益及び機会の損失

今年度の研究では、実際に採用された案（長大トンネル案）と途中で廃止された案（当初案）の比較を行った。その結果、実際に採用された案は方が廃止された案よりも遥かに多くの事業費を要するものであったことがわかった。しかしながら、案を変更する以前には、事業が硬直状態に陥っていたことを考えれば、長大トンネル案を採用したことで事業が進み出したとも考えられる。つまり、工事完了の遅れによる便益の減少又は投資した事業費の機会損失を考慮しなければこうした行動を説明できないことになる。今後の課題として、便益及び機会の損失の見積り手法について研究を行う必要があると考える。

（濱田，曾根，田中）

7.2(1) 建設副産物の発生抑制技術の開発

研究期間：平10～平14

担 当：施工研究室

【要旨】

建設工事に伴って副次的に発生する建設汚泥は、建設副産物の中でもリサイクル率が14%（平成7年度：減量を含む）と極めて低い状況にあり、その大部分を最終処分している。しかし、最終処分場の逼迫などから不適正処理や長距離輸送などによる環境負荷（外部コスト）が増大しており、問題となり始めている。本研究では、内部コストと外部コストを同時に考慮した社会的コスト（建設事業コスト）の低減を図ることを目的とし、建設汚泥の適正な利用を検討する。平成10年度は、現状の建設汚泥の発生・処理・輸送の状況およびそれぞれのコストを調査し、今後の課題を整理した。

1. 調査方法

発生量の調査では、トンネル年報等に表示されている年度毎の事業計画から全体発生量を調査した。調査工事は、発生量が多いシールド工事および地中連続壁工事等とし、発生量 $V(\text{m}^3)$ は地山換算とした。例えばシールド工事では、掘削断面積 $A(\text{m}^2)$ * 完成トンネル延長 $L(\text{m})$ となる。この調査方法は、処理過程の量の変動に左右されず、発生量の経年変化の傾向を把握するには有効である。さらに、過去に行われた調査の報告書等から、関連するデータを参照した。また、個別の事例およびコストを調査するためにアンケート調査（各地方建設局他）を行い、データの整理と傾向分析を行った。

2. 調査結果

2. 1 建設汚泥の発生状況

発生量の経年変化を図1に示す。発生量は、下水道・鉄道・道路事業の3分野が多く、経年変化は、下水道・鉄道事業が比較的安定しているのに対し、道路事業は年度により大きな変動がある。これは、大規模プロジェクトが実施された年に発生量が増加しているためと考えられる。

工種別調査では、シールド工事、連続壁工事の順で発生量が多い。（図2：平成9年度土工協調べ）

地域別では、事業区域からの搬出量で調査した場合、関東が全体の49%、中部、近畿がそれぞれ15%となり、3地域で79%を占める結果となった。（地建アンケート調査より）

以上の結果から、建設汚泥のリサイクルの促進を図るには、発生量の多い下水道、鉄道事業について重点的に取り組むことが有効であり、道路事業については、大プロジェクトが計画されている時期に、特に重点的な措置を図る必要がある。また、地域的には、都心部、特に関東地方での促進が急務である。

2. 2 処理方法・輸送および処理技術

建設汚泥の処理にはリサイクルと最終処分があり、具体的な処理方法には以下の4つがある。

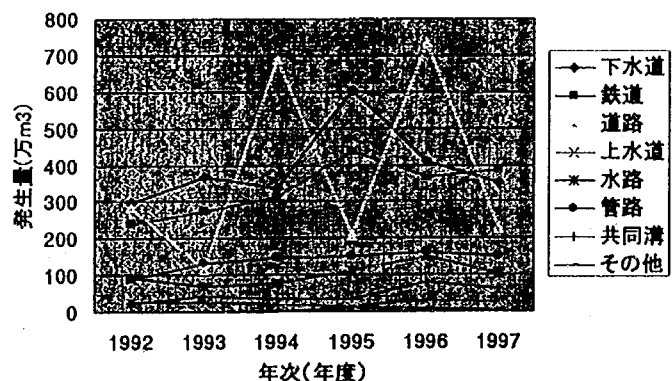


図1 発生量の経年変化

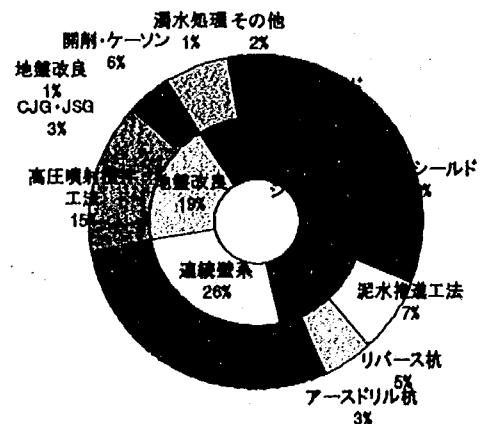


図2 平成9年度土工協調べ

- ①自ら利用（有用性を高めて自らの現場で利用）
- ②有償売却（有用性を高めて他者に売却）
- ③再生利用の制度を活用して利用
（個別指定制度、再生利用認定制度）
- ④委託処理（中間処理場（再資源化施設）へ委託して利用または処分）

アンケート調査によれば大部分が④委託処理により行われており、次いで①自ら利用となっている。②および③は本調査では無かったが、再生利用認定制度は本年度に4例が認定され、来年度も近畿地方で申請が検討されている。ここでは、主な処理方法である④委託処理について、委託先（処分先）および輸送とそれぞれのコストについて整理したので、以下に記す。

- ・輸送距離は10～30kmが多い。都心部では処理場が多く平均しているが、地方では処理場が少なく位置条件に左右される。
- ・大量に発生する現場では近くの処理場へ搬入し、発生量が少ないと遠距離輸送が見られる。（図3）
- ・委託費用は5,000～20,000円/m³程度、輸送費用は3,000～10,000円/m³程度となった。

なお、現状の処理技術と用途について表1に示す。アンケート結果では、脱水および安定処理による利用が大半を占めており、処理コストは、同様の処理でも建設汚泥の状態により大きな幅が生じた。

以上の結果から、大量に発生する工事では、輸送距離が短く大量に利用する現場との調整が必要であり、少量しか発生しない現場では、処理場へ搬出して利用を図ることが有効である。

3. 今後の課題

外部コストを定量的に評価するためには、発生量や処理コスト等を適切に把握する必要がある。しかし、建設汚泥は処理の過程で性状と体積が様々に変化するため、集計時の条件設定によって結果は大きく異なる。今後、発生量等の適切な集計方法を検討するとともに、個別事例におけるコストを試算し、コスト算出にあたっての条件設定を検討する必要がある。

一方、処理方法では、大半が④委託処理により行われており、他の方法の利用が進んでいない。①自ら利用では、明確な基準の策定と品質管理が必要であり、②有償売却では、再資源化施設を増やすとともに市場の形成が不可欠である。③制度の活用では、制度の簡素化および全国共通の利用基準の確立が望まれる。現在、リサイクルの促進を図ることを目的に、技術基準の策定と制度の適切な運用を示した「建設汚泥リサイクル指針」を作成中である。本指針は平成11年度に策定されるため、策定後と現状調査との比較により制度の明確化による効果の検証が可能となる。

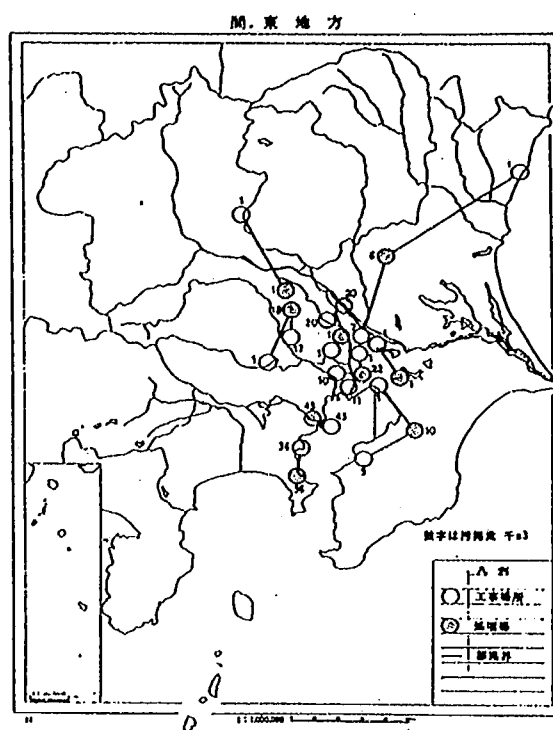


図3 発生現場と処理場の位置

表1 処理技術と用途例

処理技術	形状	主な用途
焼成処理	粒状	ドレーン材、骨材、緑化基盤、園芸用土、ブロック
スラリー化安定処理	スラリー状→固化	埋戻し材、充填材
高度安定処理	粒状、塊状	砕石・砂代替、ブロック
熔融処理	粒状、塊状	砕石・砂・石材代替
脱水処理	脱水ケーキ	盛土材、埋戻し材
安定処理	改良土	盛土材、埋戻し材
乾燥処理	土～粉体	盛土材

（大下，青山，石崎）

7.2(2) 建設副産物の発生抑制・再利用拡大技術の開発

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、解体したコンクリート副産物の取り扱いは大きな課題である。10年度はコンクリート副産物の発生状況とその性状について調査した。この結果、現状での再生クラッシャーランとしての利用法が妥当なものであることを確認した。

1. 全国の骨材生産の実態

国内における骨材全体の年間生産量は約8億tである。その内訳を各関係機関の報告¹⁾から推定すると図-2のようになる。コンクリート用骨材としては従来から砂利が用いられてきたが、良好な砂利の不足に伴い碎石の需要が増加し、現在ではコンクリート用骨材の約3割を占めている。また、碎石はコンクリート用骨材以外にも道路用路盤などに使用されている。

一方、建設副産物として発生するコンクリート副産物は年間3,700万t程度であり、このうち約2/3が再生プラント等で再び砕かれ、路盤用碎石等によりサイクルされている。この量は全骨材生産量の約3%程度である。

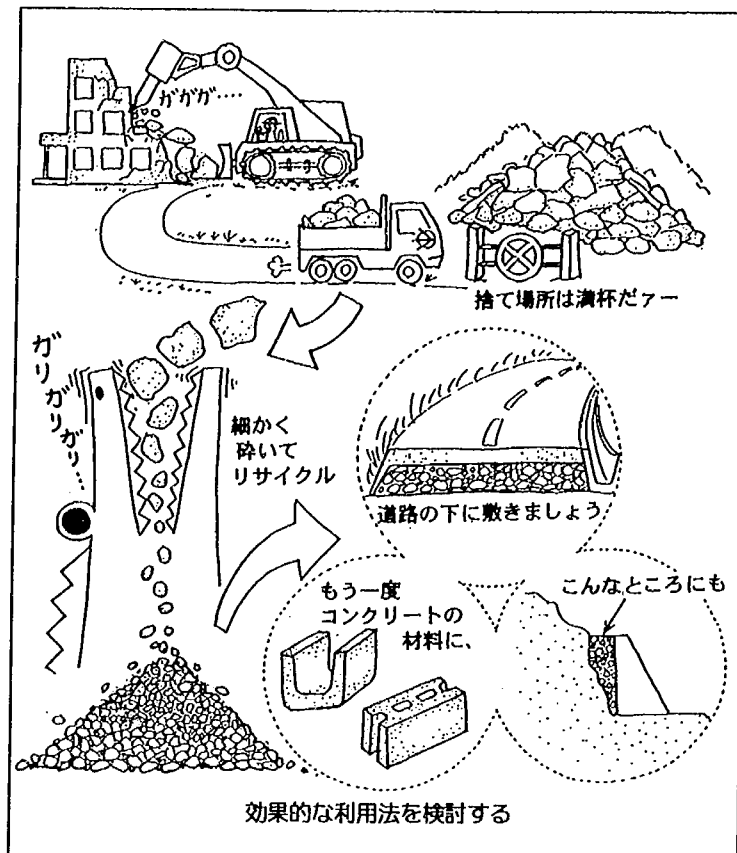


図-1 コンクリート副産物有効利用のイメージ

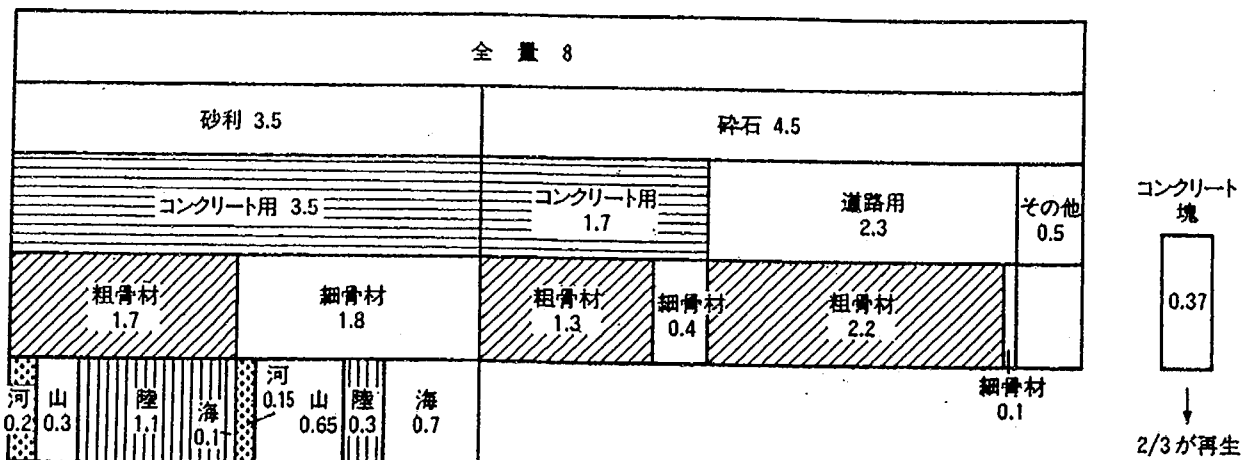


図-2 年間骨材生産量の内訳(概略)[単位:億トン]

2. コンクリート副産物の有効利用の実態

中国地方建設局が平成4年度に、全国のアスファルト・コンクリート副産物再生プラント 320 事業所を対象としたアンケートを実施している。アンケートの回答は 170 社から寄せられている。

このアンケート結果を整理すると以下ようになる。

事業所の大半は中小企業であり、再生品の大多数は再生クラッシャーランである。一部では再生粒度調整碎石やコンクリート用骨材にも利用されているが、再生設備（破砕設備）の充実度と生産品目との間に対応性は認められない。このため再生品の品質は生産品目によらず同程度で、吸水率 3～7 % (平均 6 %)、安定性損失質量 3～40 % の範囲である。

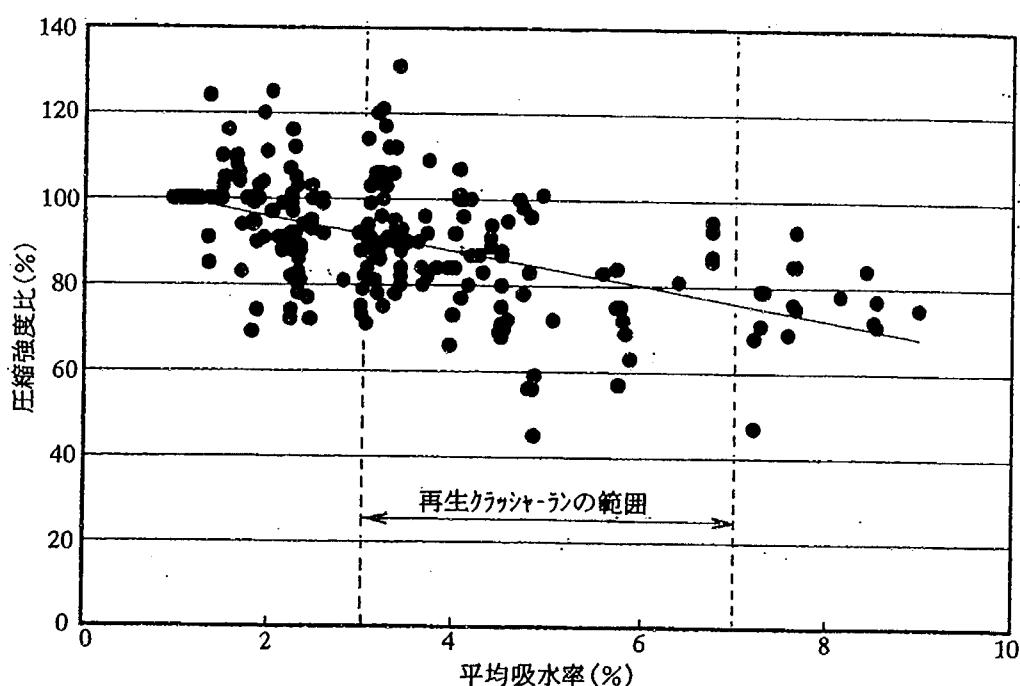
3. 再生骨材コンクリートの品質調査

上記のクラッシャーラン程度の再生骨材をコンクリートに使用した場合に、これがコンクリートの品質にどの程度の影響を及ぼすのかを検討した。過去 10 年間に各方面で実施された再生骨材コンクリートの強度、耐久性試験の結果を収集し、これらのデータを再整理・分析することで、再生骨材の品質がコンクリートの性能に及ぼす影響を調査した。対象としたデータは 10 力所の研究機関で実施された圧縮試験結果 276 本、凍結融解試験結果 128 本のデータ^{1)～14)}である。

なお、再生骨材の品質は吸水率と良い対応性があることから、以下の検討では骨材の平均吸水率を再生骨材の品質の指標とした。

3.1 圧縮強度

再生骨材の吸水率とコンクリート強度との関係を図－3 に示す。図の横軸は骨材全体の平均吸水率、縦軸は良好な骨材を使用した場合の強度を 100 としたときの強度比を示している。この図から、再生骨材の吸水率が大きくなるにつれて圧縮強度は徐々に低下する傾向を示した。再生クラッシャーランの吸水率は 3～7 %、平均で 6 % 程度であるから、これを用いた場合の平均的な圧縮強度は良好な骨材を使用した場合の 80 % 程度と考えられる。



図－3 平均吸水率と圧縮強度比の関係

3.2 凍結融解耐久性

平均吸水率と凍結融解に対する耐久性指数の関係を図-4に示す。この図は水セメント比が40～60%のもので、良好な骨材を使用すれば高い耐久性を示す配合である。しかしながら再生骨材の混入(平均吸水率の増加)によって耐久性指数は低下する傾向を示している。再生クラッシャーランの吸水率は3～7%であるが、この範囲では低い耐久性指数を示すデータが多く認められた。

次に、凍結融解耐久性に及ぼす再生材使用の影響を粗骨材と細骨材とに分けて検討してみる。図-5は細骨材の影響を整理したもので、横軸は細骨材の吸水率、縦軸は耐久性指数を示している。図中の矢線で結ばれた○と●(または◇と◆)は、細骨材の種類以外の配合条件が等しいもの同士であり、細骨材が普通骨材の結果を○(または◇)、再生骨材の結果を●(または◆)で示している。従って、これらの点を結ぶ矢線の勾配は細骨材が一般の骨材から再生骨材に置き替わることによる耐久性指数への影響割合を示すものである。同様に粗骨材の影響を図-6に示す。図-5, 6の比較から、再生材を用いる場合の耐久性への影響は再生細骨材では小さく、再生粗骨材で大きいことが判明した。

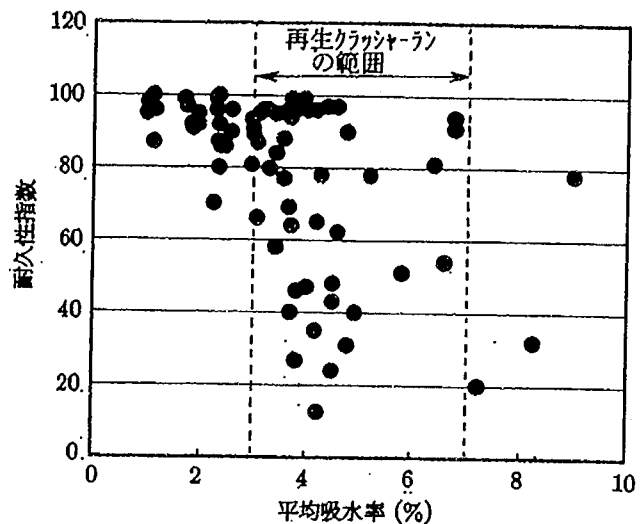


図-4 平均吸水率と耐久性指数の関係 ($40 \leq W/C \leq 55$)

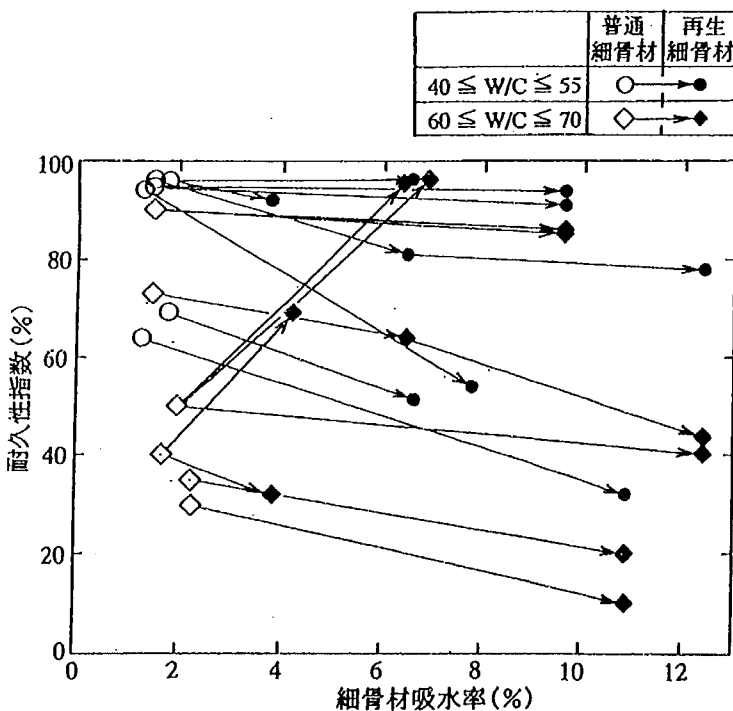


図-5 細骨材が再生骨材に置き換わった場合の耐久性指数の変化

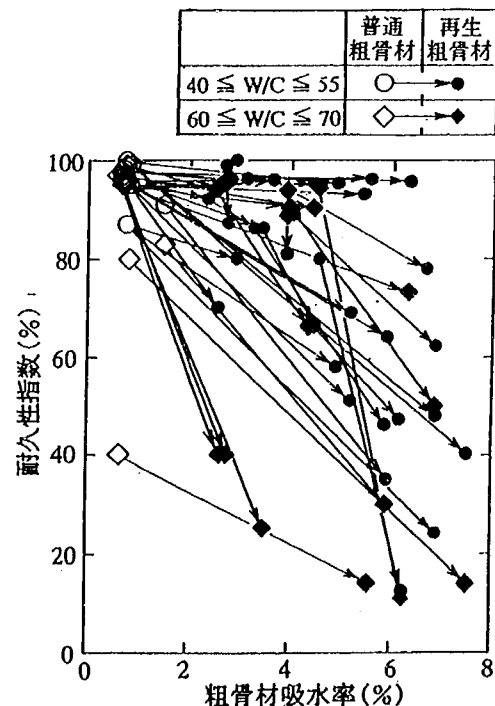


図-6 粗骨材が再生骨材に置き換わった場合の耐久性指数の変化

4. 現状での効率的な利用法と今後の課題

以上のように、現状での再生クラッシャーラン程度の再生骨材をコンクリートに使用すると、強度面での

低下はそれほど大きくなく、ある程度の余裕を見込めば現状を同様に使える可能性があるが、耐久性の面では大きく低下することが懸念され、十分な検討を要する。

再生設備を改善し、より充実することで、再生骨材の品質を向上させることは可能だが、現状では大きなコスト増加が伴う。また、破碎時の微粉の大量発生という新たな副産物対策も必要となる。コストをかけずに再利用する方法としては、要求性能の厳しくないクラッシャーランに利用する方法は理に適った方法といえる。

なお、破碎時に発生する微粉、細粒分の処理は大きな問題である。3.2 項で述べたように再生細骨材は再生粗骨材に比較してコンクリートの耐久性に与える影響は小さいと考えられるが、吸水率が大きいためにコンクリートの単位水量や品質のバラツキに与える影響が大きく、表面水の管理が課題となろう。また、解体材を再生処理するための機械設備の改善にはめざましいものがある。これらの点を含め、微粉の有効利用についても検討を行い、外部コストを考慮した有効利用をより一層推進する必要がある。

5. 主な研究成果物

片平博、河野広隆：再生骨材コンクリートの強度・耐久性調査，土木技術資料，VOL.40，NO.10，pp60～65，1998.10

参考文献

- 1) 特集／これからの骨材はどうなるのか，セメント・コンクリート，NO.618，pp6-92，1998.8
- 2) 建設事業への廃棄物利用技術の開発委員会土木構造物分科会：廃棄物の建設事業への利用可能性に関する調査報告書，(財)国土開発技術研究センター，1983
- 3) 建設事業への廃棄物利用技術の開発委員会土木構造物分科会：建設事業への廃棄物利用技術の開発に関する調査報告書，(財)国土開発技術研究センター，1984～1986
- 4) 南波篤志、阿部道彦、棚野博之、前田弘美：再生コンクリートの品質改善に関する実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.2，pp.65-70，1995
- 5) 南波篤志、阿部道彦、棚野博之、前田弘美：再生コンクリートの力学特性および乾燥収縮に及ぼす再生粗骨材の品質の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp.1047-1052，1996
- 6) 後藤彰、堺孝司：再生骨材を用いたコンクリートの耐凍害性と乾燥収縮，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.1105-1110，1997
- 7) 榑場重正、川村満紀、鳥居和之、竹本邦夫：再生骨材コンクリートの乾燥収縮および耐久性について，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.3，pp.89-92，1981
- 8) 鳥居和之、川村満紀、竹本邦夫、榑場重正：再生骨材の舗装コンクリート用骨材としての適応性，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.6，pp.85-88，1984
- 9) 川瀬清孝、飛坂基夫、柳啓：生骨材を混合使用したコンクリートの物性に関する研究・その3・凍結融解試験結果について，昭和58年度日本大学理工学部学術講演論文集，1983
- 10) 笠井芳夫、阿部道彦、柳啓：再生コンクリートの諸物性に関する実験的研究，セメント技術大会講演要旨，Vol.50，pp.346-347，1996
- 11) 西村新蔵、矢村潔、林昭富：再生粗骨材使用コンクリートの弾塑性的性質及び耐久性，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.6，pp.77-80，1984
- 12) 福田萬大、中丸貢：再生コンクリートの舗装への利用に関する実験，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.6，pp.89-92，1984
- 13) 新井暢、中村成春、榑田佳寛、阿部道彦：再生細骨材コンクリートの強度及び変形性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.1081-1086，1997
- 14) 鯉江利夫、吉兼亨、中島佳郎、木村孝之：生骨材の簡易コンクリートへの適応性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.1099-1104，1997
- 15) 長瀧重義、佐伯竜彦、飯田一彦：再生粗骨材を用いたコンクリートの諸特性，第52回セメント技術大会講演要旨，pp.400-401，1998

(河野，片平)

7.3 (1) 維持補修分野における外部コスト縮減対策

研究期間：平10～平14

担 当：施工研究室

【要旨】

現代の道路構造物の多くは、交通量の増加や車両の大型化に伴い劣化や損傷等が激しく、老朽化に合わせて災害の危険性も危惧されている。特に都市部においては交通量の増大により、構造物に与える影響が顕著になっている。そのため、公共事業費縮減の風潮でも、維持管理費の割合は今後増大することが予想され、より効率的な投資が必要不可欠となっている。しかし、維持管理事業を進めるにあたって、公共工事による環境・住民に与える影響を無視できない状況にある。現在、環境アセスメント法の制定や廃棄物処理法に関する規制がとられているが、各工事において、これらを考慮したコスト評価が確立していない。本研究テーマは、道路事業に関する維持・補修工事における外部コストを抽出し、これらをコスト評価（内部化）する手法等を検討することで、トータル的なコスト削減法を提案することを目的としている。（記載例として、外部コストの項目…交通渋滞等、工事…舗装工事等、工種…オーバーレイ等、作業内容…舗装切削等を表す。）

1. 維持補修に関する統計データの取りまとめ

・総維持費・補修費の推移

戦後インフラ整備が急速に行われ、それに伴い維持、補修に関わる経費も増加傾向にあることがわかる（図-1）。これは、戦後建設された土木構造物が、最近になって更新時期を迎えたためである。特に80年代以降は急激な伸びを示し、今後ますます増加の一途を辿ることが予想される。

・構造ごとの維持・補修費の推移

道路工事で維持・修繕に関わる事業費は総事業費の約20%を占める（1995 道路統計年報）。数多い維持修繕事業の中で舗装補修と橋梁補修に着目した。着目理由として

- ①：他の工法と比較して都市部においての事業が多い
- ②：工種の内訳が明確であり調査しやすい、といった理由が挙げられる。過去5年の経緯を把握するため、各工種ごとに工事費を算出した。舗装の維持補修は、各工種とも目立った工事費の変動は見られないが、オーバーレイ、表面処理が全体額の相当を占めており、今後、検討の余地を有すると思われる（図-2）。橋梁の維持補修費は、ここ5カ年で変動が見られる。特に、1995年1月の阪神淡路大震災による橋梁構造物の被害が大きかったため、1995年度予算は橋梁全工種に耐震補強事業費が投入され、工事費は大幅に増加した。また、1996年以降は、大震災による崩壊をまぬがれたが、早急な補強を有する工種を重点に予算が投入された。

特に下部工は、1997年12月に道路橋示方書が改訂されたことにより、従来の橋梁構造物に対して早急な補強対策が必要となり、工事費が多くなったと考えられ、今後も同様な傾向が続くと推測される（図-3）。

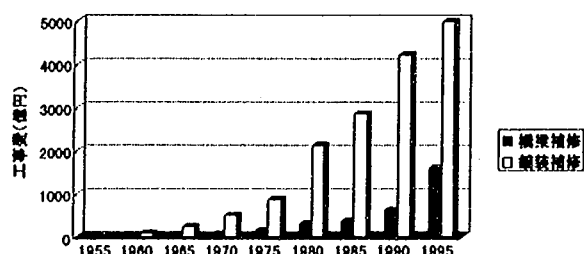


図-1 維持補修費の推移（全事業費）

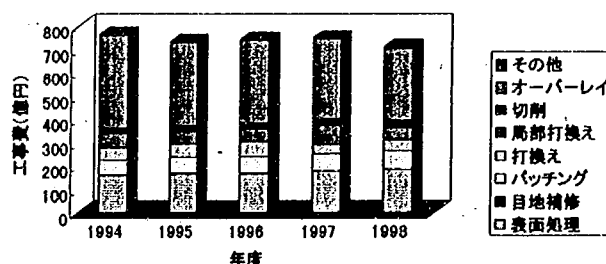


図-2 舗装の維持補修費の推移（直轄国道分）

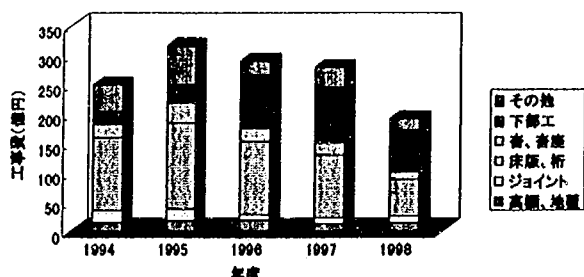


図-3 橋梁の維持補修費の推移（直轄国道分）

2. 外部コストと維持・補修工事との関係分析

1.で調査した維持・補修工事ごとに道路使用者や沿線住民に与える影響を評価するために、各工事の内容から外部に影響を与える工種を選定した。また、その作業内容の影響度を定性的に評価することで、各工種と外部コストの関係性を分析した。

・各補修工事での作業項目の整理

前項の図-2、3より維持・補修工事の中で工事費のウエイトが高い工種は、道路では舗装の打換え、橋梁では床版補修である。これらを対象として各工事において、外部コストとして考えられる対象項目の中で、周辺地域（住民）への影響を勘案した場合、交通渋滞、騒音、振動及び大気汚染が妥当であると考え選定した。そして、各維持・補修工事を作業項目毎に分解し、その中で外部コストに関係する作業内容について検討した（表-1）。

その結果、維持・補修工事の中で外部コストとして影響を与える工種は、道路では舗装切削、橋梁ではコンクリート撤去、また、共通項目として、交通規制、工事車両が大きく影響していると考えられる。しか

し、舗装打換え、床版補修のどちらの場合でも、行政の補修作業の方針や現場作業員、建設機械の能力、既存の補修工法を用いるか新工法（新技術）を用いるか等によって、交通規制の形態が変わって来たり、周辺地域に与える影響が大きく異なってくる。一般に、交通規制時間が短縮できる工法（新技術）を用いた場合、外部コストが小さくなると考えられるが、工事費自体が増加する傾向にある（表-2）。したがって、今後の維持・補修工事におけるコスト評価手法として、工事の評価は外部コストを含めた全体工事費で行う必要性がある。

・外部コストの影響度評価

各作業内容について外部コストの項目ごとにその影響度を定性的に3段階（大・中・小）に分類して評価し、一覧表にまとめた（表-3）。それに基づいて外部コストの項目の影響度と舗装打ち換え、床版補修の作業内容の程度を併せて各作業内容の評価した（表-4）。このように各工種を比較することで、今後の詳細な検討を行うための項目選定の基礎資料とする。

3. 今年度の成果および今後の課題

今年度の成果は、外部コストは施工方法により変化するため、評価方法は外部コストも含めた全体工事費で行う必要がある。また、交通規制の影響が大きい道路では舗装打換え、橋梁では床版補修に関して外部コストが大きくなる傾向がある。したがって、外部コストを含めた全体工事費を評価するため、外部コストの定量化が必要となる。また、最近の施工技術や新工法の進歩が著しいため、これらの情報を収集して、新技術を取り入れた場合の評価を行う必要がある。

表-1 周辺地域に影響を与える作業状況

対象項目	維持・補修工事での具体的事例		
	道路	橋梁	共通
交通渋滞		・ジャッキアップ時	・交通規制
騒音	・舗装切削時	・コンクリート撤去時	・工事車両
振動	・舗装切削時	・コンクリート撤去時	・工事車両
大気汚染	・舗装切削時	・コンクリート撤去時	・工事車両

表-2 交通規制時間と工事費（例）

打ち換え工法	交通規制のタイプ	工事期間(実働)	工事費(千円)
RC床版	全面交通止め	60日	12,000
現場打ちI型格子床版	常時片側通行止め	90日	20,000
プレキャストI型格子床版	夜間のみ片側通行止め	120日	29,000

※ 橋長 30m、全幅員 8.70m（歩道無し）の場合を想定。

工事費は直接工事費で床版、舗装のみでその他の橋面工は含まない。

表-3 外部コストおよび作業内容の影響度評価

外部コストの項目	影響度	程度		
		大(3.0)	中(2.0)	小(1.0)
交通渋滞	大(3.0)	全面通行止め	常時交通規制	夜間のみ交通規制
騒音	中(2.0)	・ブレーカー	・舗装切削機	・カッター ・チェーンソー ・工事車両
振動	中(2.0)	・ブレーカー	・舗装切削機	・工事車両
大気汚染	小(1.0)	・舗装切削機	・ブレーカー	・工事車両

表-4 各工種の外部コストに与える影響度

	交通渋滞			騒音			振動			大気汚染			影響度
	多量発生 の恐れ	中等発生 の恐れ	少量発生 の恐れ	多量発生 の恐れ	中等発生 の恐れ	少量発生 の恐れ	多量発生 の恐れ	中等発生 の恐れ	少量発生 の恐れ	多量発生 の恐れ	中等発生 の恐れ	少量発生 の恐れ	
舗装打ち換え	3.0			4.0		2.0	4.0	4.0	3.0	1.0			25.0
	4.0			4.0		2.0	4.0	4.0	3.0	1.0			22.0
	3.0	3.0		4.0		2.0	4.0	4.0	3.0	1.0			19.0
床版補修工事	3.0			4.0		2.0	4.0	4.0	3.0	1.0			26.0
	4.0			4.0		2.0	4.0	4.0	3.0	1.0			16.0
	3.0			4.0		2.0	4.0	4.0	3.0	1.0			25.0
	4.0			4.0		2.0	4.0	4.0	3.0	1.0			13.0
	3.0	3.0	3.0	4.0		2.0	4.0	4.0	3.0	1.0			22.0
			3.0	4.0		2.0	4.0	4.0	3.0	1.0			10.0

（大下，青山，橋本）

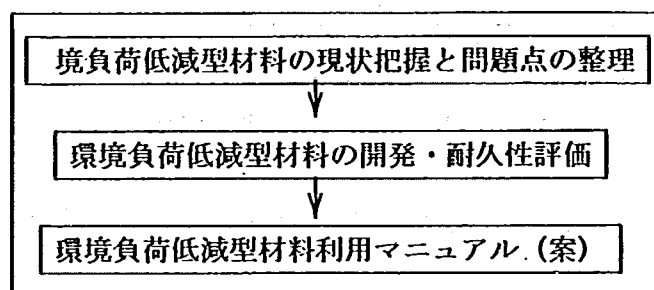
7.3(2) 環境負荷低減型材料の開発

研究期間：平10～平14

担 当：化学研究室

【要旨】

公共事業実施時の建設活動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）を考慮し評価した上で、建設事業による社会全体のコスト（建設事業コスト）の低減を図る必要がある。このため、外部コストの一つである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。



10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物質の原因物質の一つである揮発性有機溶剤(VOC)の発生源である溶剤型塗料を用いる構造物塗装について、その現状把握と問題点の整理を行い、開発目標を設定した。

1. 研究方法

1. 1 現状調査

現在、我が国において橋梁塗装などの公共事業に使用されている塗料及び塗装仕様の現状を把握するため、表－1の各種文献・資料を調査した。

表－1 調査した文献・資料

No	資 料 名	発 行 所	発行年月
1	地球規模環境大気中における炭化水素の動態	国立公害研究所報告書 No. 102, 1986, pp31～42	昭和61年
2	鋼道路橋塗装便覧	(社) 日本道路協会	平成2年6月
3	塗料産業におけるVOCの現状と将来像	(社) 日本塗料工業会	平成5年4月
4	鋼道路橋塗装工事実態調査報告書	(社) 日本鋼橋塗装専門会	平成10年3月
5	道路統計年報1997	建設省道路局監修	平成10年4月
6	環境にやさしい塗料の耐久性及び施工性試験	(社) 防錆技術協会；防錆管理 Vol. 42, No. 9, 1998, pp312～317	平成10年9月
7	ダム・堰施設技術基準（改訂案）	(社) ダム・堰施設技術協会	平成11年4月

注) 本文中の右肩上の数字は、本表のNo. を示す。

2. 研究結果

2. 1 塗料の現状

我が国では、塗料中に表－2の各種揮発性有機溶剤が年間約95万t使用されている⁹⁾。これら有機溶剤は、自動車の排気ガスとともに光化学スモッグをはじめとする大気汚染の原因物質の一つと言われている。我が国において人間活動によって大気中に放出される炭化水素量の約60%が工場などの固定発生源から排出されている。そのうち最も大きな割合を占めているのが塗料用有機溶剤であり、固定発生源の約54%を占めてい

表-2 有機溶剤の年間使用量

溶剤系の種類	溶 剤 名	使用量 (t/年)
脂肪族系炭化水素 87,213 t/年	ミネラルスピリット	78,901
	n-ヘキサン	2,229
	n-ヘプタン	1,596
	その他	4,487
脂環族系炭化水素 667 t/年	ジペンテン	388
	シクロヘキサン	204
	その他	75
芳香族炭化水素 423,136 t/年	トルエン	214,887
	キシレン	191,186
	スチレン	12,745
	その他	4,318
石油系混合溶剤 81,648 t/年	高沸点溶剤 (160~180℃) JPIA4種	30,266
	高沸点溶剤 (180~210℃)	24,899
	その他	26,483
アルコール系溶剤 127,537 t/年	メタノール	51,998
	イソプロパノール	31,744
	n-ブタノール	20,131
	イソブタノール	16,410
	その他	7,254
エーテル・エーテルアルコール系溶剤 44,781 t/年	ブチルセロソルブ	22,949
	エチルセロソルブ	8,681
	イソプロピルセロソルブ	5,642
	その他	7,509
エステル系溶剤 73,825 t/年	n-ブチルアセテート	27,747
	エチルアセテート	14,700
	エチルセロソルブアセテート	10,802
	イソブチルアセテート	9,091
	その他	11,485
ケトン系溶剤 63,817 t/年	メチルエチルケトン	21,778
	メチルイソブチルケトン	21,756
	アセトン	14,975
	その他	5,308
塩素系溶剤 11,496 t/年	1, 1, 1-トリクロロエタン	4,792
	メチレンクロライド	4,314
	テトラクロロエチレン	1,397
	その他	993
その他の溶剤		38,837
総計		952,957

る。塗料用有機溶剤の約50%が建設分野で使用されている¹⁾。自動車や家具などの塗装は、工場で行われるため有機溶剤の回収は可能である。一方、建設分野の塗装のほとんどは塗料中の有機溶剤を回収することが困難な現場塗装であり、そのまま大気中に放出されてしまう。このため、公共事業で使用される塗料に含まれる揮発性有機溶剤量を削減することが極めて重要である。

2. 2 公共事業における塗装の現状

2. 2. 1 橋梁塗装

平成8年4月1日現在、我が国の高速自動車国道、一般国道、都道府県道及び市町村道を合わせた道路実延長は、およそ1,140,000kmである。延長15m以上の道路橋は約130,000橋あり、そのうち鋼橋がおよそ50,000橋を占めている⁵⁾。橋梁塗装は、鋼道路橋塗装便覧に準拠して行われており、A塗装系（鉛系さび止め下塗り塗料～フタル酸樹脂塗料中・上塗り）、B塗装系（鉛系さび止め下塗り塗料～塩化ゴム系塗料中・上塗り）およびC塗装系（無機ジンクリッチペイント～エポキシ樹脂塗料下塗り～ポリウレタン樹脂塗料中・上塗りまたは、ふっ素樹脂塗料中・上塗り）が行われている。平成8年度の鋼道路橋の塗装面積は、およそ267万m²で、そのうち新設橋梁が約104万m²、塗替え橋梁が約163万m²であった。A塗装系が45.8%、B塗装系が5.6%、C塗装系が35.8%であった。ここ数年、C塗装系が急増している⁴⁾。現在、一般環境に最も多く適用されているA、B塗装系は、ほぼ7～10年周期で塗替え塗装が行われている。本州四国連絡橋などの厳しい腐食環境にある長大橋などに適用されている重防食塗装仕様であるC塗装系を、一般環境の橋梁に適用することによって、塗替え周期が大幅に延長され橋梁のライフサイクルにおける塗替え塗装の回数が削減され、橋梁の維持管理に占める塗替え塗装費用の削減が可能となり、鋼道路橋のライフサイクルコスト（LCC）が大幅に削減される。

2. 2. 2 河川構造物

河川構造物には、堰・水門・樋門・樋管・閘門などの河川管理施設と、放流設備や取水設備などのダム施設がある。河川管理施設のうち河川ゲート設備は、平成6年度末現在、建設省が直轄管理しているものが約6,500カ所、9,000門に達している。河川及びダムのゲート設備は、常時水中に没していたり汽水環境では海水の遡上があるなど非常に厳しい腐食環境にある。また、その塗装の塗替えは期間が洪水調整期を除いた渇水期に限られたり、予備ゲート設備が必要であるなど、多額の費用がかかるのが現状である。しかしながら、河川構造物は、流域の生命・財産を保護することも重要な使命であるため、その機能が腐食によって損なわれることがあってはならない。

河川構造物の防食は、ダム・堰施設技術基準に準拠している。基準は、平成11年4月に改訂が予定されており、防食方法にはLCCを考慮して耐久性に優れたものを積極的に採用している。塗装による防食は、その耐食性を向上させて、塗替え周期を延伸してメンテナンス費用を削減することを目的として、ジンクリッチペイントを防食下地とした重防食塗装仕様を全面的に採用し、その防食性能を完全に発揮させるため新設時は全工場塗装し現場での塗装を極力行わないこととされた。また、塗替え塗装においても重防食塗装へ塗装仕様を変更するとともに、現場塗装の機械化（プラスト処理・エアレス塗装の採用）によって防食性能を確保することを目指している⁷⁾。

2. 3 環境負荷低減型塗料・塗装仕様の開発の現状

一般に、塗装仕様は、鋼材を直接防食する下塗り塗料と、耐候性に優れた上塗り塗料、および下塗り塗料と上塗り塗料の付着性を確保するための中塗り塗料から成り立っている。塗装仕様として有機溶剤量を削減する手法として、下塗り、中塗り、上塗りのいずれかから有機溶剤を無くすか、あるいはすべての塗料から少しずつ有機溶剤を削減すればよい。VOCを削減した環境負荷低減型の新設用塗装仕様として、構造物のLCCを考慮して鋼道路橋塗装便覧のC塗装系（有機溶剤量771g/m²）の防食性能を確保したうえで有機溶剤量を

1/3以上削減した表－3に示す環境にやさしい塗装仕様が開発された。

表－3 環境にやさしい塗装仕様（新設用）

No	下塗り・中塗り・上塗り	溶剂量 g/m ²	削減率%
比較	無機シリケートペイント＋エポキシ樹脂下塗り（2回）＋ふっ素樹脂中・上塗り	771	—
1	無機シリケートペイント＋無溶剤形変性エポキシ樹脂下塗り＋ふっ素樹脂中・上塗り	487	36.8
2	無機シリケートペイント＋無溶剤形変性エポキシ樹脂下塗り（2回）＋ふっ素樹脂上塗り	396	49.6
3	無機シリケートペイント＋低溶剤形エポキシ樹脂下塗り＋ポリウレタン樹脂上塗り	472	38.8
4-1	無機シリケートペイント＋低溶剤形エポキシ樹脂下塗り＋水系ポリウレタン樹脂中・上塗り	398	48.4
4-2	無機シリケートペイント＋低溶剤形エポキシ樹脂下塗り＋水系アクリル樹脂上塗り	379	50.8
4-3	無機シリケートペイント＋低溶剤形エポキシ樹脂下塗り＋水系ふっ素樹脂上塗り	379	50.8
4-4	無機シリケートペイント＋低溶剤形エポキシ樹脂下塗り＋水系シリコン樹脂中・上塗り	379	50.8
5	水系無機シリケートペイント＋無溶剤形エポキシ樹脂下塗り＋水系ポリウレタン樹脂中・上塗り	73	90.5
6	無溶剤形変性エポキシ樹脂塗料（2回）	0	100

これらの塗装仕様については、つくば、北陸及び沖縄の3カ所で屋外暴露試験が行われており、C塗装系とほぼ同程度の耐久性が確認されている。また、施工性はNo. 1, 2, 3, 4-1については、実橋での試験塗装が行われ、ほぼ良好な施工性が確認された⁶⁾。今後、新設橋梁に試験的に適用しながら実用化をはかる必要がある。

しなしながら、塗替え塗装におけるVOCを削減して環境負荷を低減した環境にやさしい塗替え塗装仕様等の開発は行われていない。

2. 4 開発目標

文献並びに各種資料を調査した結果、公共事業における塗装工事から発生する環境負荷であるVOCを低減することが必要である。このための技術開発として、すでに新設塗装用の環境にやさしい塗装仕様が開発され、実用化を目指した調査・研究が進められているが、既鋼構造物の塗替え塗装における環境負荷を低減した塗装仕様は開発されていないのが現状である。

このため、現在、A塗装系やB塗装系で塗装されている鋼構造物の塗替え塗装周期を延伸してLCCを低減するとともに、VOCを削減した環境にやさしい塗替え塗装に関する以下に示す技術開発が必要である。

- ①現在の塗替え塗装仕様に含まれている有機溶剤量の1/3以上を削減する。
- ②旧塗膜との付着性が良い環境にやさしい塗替え塗装仕様の検討
- ③現場塗装の機械化等の検討

（明嵐，守屋）

7.4 建設コストに含まれるコスト構造の明確化及びその低減技術の研究

(建設事業の外部コストの内部化に関する調査)

研究期間：平10～平14

担 当：建設マネジメント技術研究官

建設マネジメント技術研究室

【要旨】

公共工事の建設コスト削減は、政府全体で取り組むべき重要な課題である。その一方で、地球環境や生活環境への建設活動の影響がますます重視される傾向にある。

このため、構造物の計画、設計、施工、維持管理、更新取り壊し、再利用に至る、建設事業のライフサイクルを通じて、建設コスト（内部コスト）及び、環境に与える影響などの外部コストの両方を含む社会コストとしての建設事業コストの低減を図る必要がある。

本研究は外部コストを可能な限り定量的に評価する手法を開発するとともに、建設事業コストを低減するためのリサイクル、ゼロエミッション化、構造物の長寿命化等の環境負荷軽減や建設コスト低減に資する技術の開発、さらには建設事業コストを低減するための建設事業マネジメント手法確立を目的とする。平成10年度は外部コストに関連した課題抽出、外部コスト項目の整理と重要度の検討、外部コストが内部化する仮説の設定及び内部化事例の調査を行った。

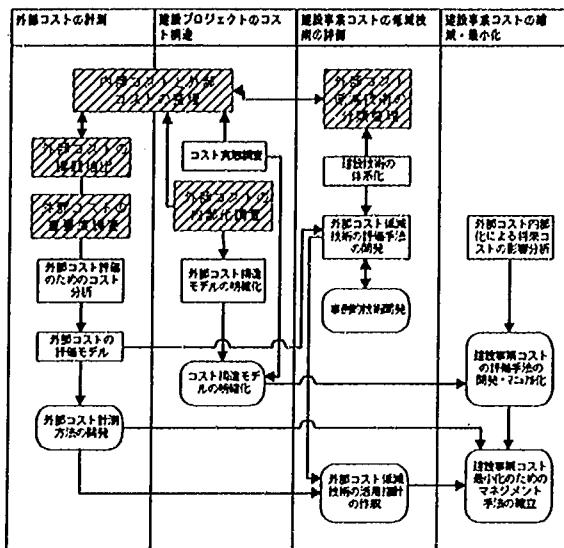


図-1 研究の全体フロー

//// H10年度実績

1. 研究方法

1. 1 内部コストと外部コストの整理

建設事業の調査計画段階から供用段階に至る内部コスト及び外部コストの項目について、建設マネジメントの各段階ごとにカテゴリー分けして網羅的に分類整理する。

1. 2 外部コストの関心度調査

新聞を対象として、外部コスト関連のキーワードを設定し、検索ヒット数の多少をもとに外部コストの関心度の数量化を行い、その傾向を分析する。

抽出した課題（キーワード）に対して、建設マネジメントの各段階における技術領域と対応させ、狭義の技術領域、マネジメント領域、事後評価領域の3領域における研究・開発動向をインターネット、文献

分野	キーワード		
環境	①環境	⑥環境保護	⑨自然
	②環境影響	⑥景観	⑩生態
	③自然破壊	⑦環境破壊	⑪温暖化
	④環境負荷	⑧自然保護	
副産物	①建設副産物	⑥ゼロエミッション	⑨建設廃材
	②リサイクル	⑥不法投棄	⑩建設廃棄物
	③建設残土	⑦残土	⑪再資源化
	④産業廃棄物	⑧建設汚泥	
災害・安全	①災害	④工事渋滞	⑦交通渋滞
	②安全	⑥労働災害	⑧交通規制
	③工事安全	⑥渋滞	

検索を通じて調査する。

1. 3 外部コストの内部化事例の収集

公共工事が完全請負化（昭和40年代）して以後の積算基準、土木工事共通仕様書の改訂の歴史的変遷において、従前外部コストであったものを、新たに内部化するように規定あるいは仕様が変更された事例を収集する。

1. 4 外部コスト低減技術の事業貢献度の調査

(1) 外部コスト低減技術の事例収集

総合技術開発プロジェクト、パイロット事業、技術開発評価制度等の施策で、開発・試行・認定された技術のうち外部コスト低減に資するものを網羅的に収集し、建設省直轄の工事現場での適用実績を調査する。

(2) 事業貢献度についての事例調査

上記のうち、現在建設省直轄の工事現場で継続実施中のもので最も事業貢献度が高いと推定されるものについて、当該事例が与えた建設コストへの影響を調査し、これらの結果を用いて事業貢献度について考察を行う。

2. 研究成果

2. 1 内部コストと外部コストの整理

内部コストをカテゴリーに分類し、外部コストに関連した課題との対比を行った。外部コストに関連した課題としては、環境破壊、自然保護といった領域での関心度が高く、これらを内部化するため、設計・施工段階に反映される調査・計画段階での事業評価が重要であると考ええる。

2. 2 外部コストの関心度調査

外部コストの関心度をみると、環境分野は15年前に比べて顕著に高くなっている。また、産業廃棄物、交通渋滞なども緩やかではあるが、年々関心度が延びており、時代に係わらず世論として問題視されている結果となった。

事業別にみると、道路事業の関心度が他の事業より高い傾向にあり、特に環境破壊、産業廃棄物、渋滞などが特化していた。

また、関心度が比較的高い道路事業を対象とし、技術領域との関連付けを行ったところ、狭義の技術領

大分類	中分類	業務領域（内部化関連領域）
調査	①測量	
	②ボーリング調査	
	③各種調査業務	災害対策、自然環境調査、公害対策等
計画	①上位計画との整合	効果調査（コスト削減）
	②環境アセスメント	環境影響評価
	③事業計画作成	景観評価
用地取得・補償	①施設協議	
	②用地交渉・補償	用地補償、地元協議、住民説明
	③用地取得	
設計	①設計図面作成	環境対策、福祉対策
	②数量計算	
積算	①工事積算	
	②単価更新	
発注・契約	①発注公告	国際化対応
	②競争参加資格確認	国際化対応
	③入札	
	④契約手続き	
工事施工	①施工計画作成	PR、騒音対策、工事渋滞対策、副産物処理、環境対策等
	②資機材調達	環境対策
	③施工管理	
	④設計変更	
	⑤完成図書作成	
	⑥完成図書作成	
維持管理	①施設運用・操作	
	②施設管理	
	③各種点検・パトロール	災害対策
	④修繕工事	災害対策
供用		渋滞対策、公害対策、災害対策

域においては、環境負荷軽減技術、スラグ等のリサイクル技術といった環境保護に重点をおいた研究・開発が多く見られた。マネジメント領域では、騒音・振動、排気ガスに関する予測評価手法が比較的多く研究されていた。なお、事後評価の領域においては、研究・開発はほとんど見られなかった。

2.3 外部コストの内部化事例の収集

土木請負工事工事費積算基準の外部コストの内部化の動向をみると、騒音・振動等、周辺環境に配慮したものが多く見られる。

また、公共事業の円滑な執行を図るべく、地域との連携に配慮したイメージアップ経費が計上されていることも外部コストの内部化として捉えることができる。

また、技術の導入（歩掛）では、遮音壁設置工、緑化ブロック積工等の追加がなされているが、外部コスト低減技術については特定パイロット事業等の実施を踏まえ、今後一層の技術導入の推進が必要であると考えられる。

土木工事共通仕様書については、昭和43年12月に制定されて以降、13回の改訂がなされている。

近年の改訂経緯をみると、平成5年度では、環境対策、現場作業環境の整備、再生資源の利用の促進を施工計画書に盛り込むことが義務づけられた。また、「建設副産物適正処理推進要綱」（平成5年1月、事務次官通達）、「再生資源の利用の促進について」（平成3年10月、技術審議官通達）を遵守し、建設副産物の適正な処理及び再生資源の活用を図ることが義務づけられた。平成10年度では、建設副産物についてより具体化され、建設発生土の搬出伝票、産業廃棄物の廃棄物管理票（マニフェスト）の提出、土砂、碎石、コンクリート塊等の工事現場の搬入・搬出する場合の、再生資源利用計画及び再生資源利用促進計画の提出が義務づけられた。

これらの、内部化事例の社会経済的背景は次のように整理することができる。

①土木請負工事工事費積算基準

内部化事例は、騒音・振動等、周辺環境に配慮したものが多く、その背景として、昭和42年に公害対策基本法が公布され、騒音規制法、振動規制法等により生活環境保全に関する規制がなされたことが挙げられる。

②土木工事共通仕様書

年	通達等	区 分	内部化要素
S42	騒音規制法	事業損失防止施設費	・騒音、振動、道路交差騒音等の防止のための費用
S56	植栽工事における割増積算	植栽工事	・新植栽の付具
S57	工事の一次中止に伴う増加費用等の積算上の取扱い	工事費	・住民反対等の理由により工事が一時中止となった場合の増加費用
S58	低騒音・低振動型建設機械指定要領について	機械経費	・建設機械材料費に割増率を設定し、開発費用を反映
H3	土木請負工事工事費積算基準の運用の一部改正について	現場管理費	・市街地等工事の一般交通、生活環境の影響に配慮した施工の時間帯制に対する労務費の補正
H3	排気ガス対策型建設機械指定要領	機械経費（トンネル工事）	・建設機械材料費に割増率を設定し、開発費用を反映
H3	公共建設工事における再生資源活用土木実施要領（土木について）	共通反設費、運搬費等	・建設発生土等の再資源化施設への搬出、工事現場への搬入に必要な費用の計上
H3	歩掛改正（21工種追加）	遮音壁設置工	・遮音壁の対峙壁から遮音板までの歩掛設定
H4	土木工事におけるイメージアップ経費の積算要領（案）	共通反設費、営繕費等	・仮設、安全施設、営繕施設のイメージアップにかかる費用の計上
H4	土木請負工事における安全・訓練等の実施について	現場管理費	・月1回半日以上の新修・訓練を義務づけ、労務者の日当として計上
H4	歩掛改正（6工種追加）	緑化ブロック積工	・法面保護及び緑化を目的としたブロック積、表土工、客土工の歩掛設定
H9	排気ガス対策型建設機械の制定	機械経費	・普及台数の多い建設機械5機種の排気ガス対策型建設機械の使用原則に伴い、対象機械を機械経費に反映

近年の改定をみると、建設副産物に関する改定が多く見られ、この背景として、産業廃棄物の搬出量に占める建設廃棄物の割合は、平成5年度厚生省資料によると21%と全産業で最も多く、その再利用・減量化率は、51%と産業廃棄物平均の79%に比較して低いといった実態がある。

2. 4 外部コスト低減技術の事業貢献度の調査

(1)外部コストの低減技術の事例収集

総合技術開発プロジェクトでは、平成8年度までに34課題が終了している。その中で外部コスト低減技術に関する技術開発としては、14の技術が等値される。技術開発の動向としては、景観、低騒音・低振動、通行規制緩和、リサイクル・産業廃棄物抑制といった領域での開発が主体となっている。

外部コスト低減技術の開発動向

区 分	技 術 名	終プロ	技術開発 評価制度	技術活用 評価制度	特定技術 評価制度	コスト削減 計画
景観	法面緑化工法（カカゲリ工法）	○		○	○	
	玉石グラブによる型枠撤去	○		○	○	
	アルファードの景観対策工	○		○		
	美観・耐久性に優れた型枠技術	○		○	○	
	景観化型枠工法	○		○		
	緑化舗装	○		○		
低騒音・低振動	小口型枠工法（パネリング工法）	○		○		
	低騒音舗装	○		○		
	騒音低減効果の高い遮音壁		○	○	○	
	高架橋面等への吸音板の設置基準		○	○		
通行規制緩和	QRP工法（急遽補修工法）	○		○		
	工機・構造物のグレイ化	○		○		
	共同溝部材のグレイ化	○		○	○	
リサイクル・廃棄物抑制	廃棄物を使用した盛土工法	○		○		
	流動化処理工を用いた埋戻し工法	○		○		
	建設汚泥の高効率・低含水比型枠水機・工法		○		○	
	ダム用カートの骨材生産の歩留まりの向上					○
作業環境改善	高効率・低騒音型の吹付コンクリート工法		○	○	○	
環境保全	石部材に併設する集砂スクリーン工	○		○		
	既存木の移植技術					○
大気汚染抑制	建設機械の排出ガス浄化装置の開発		○			

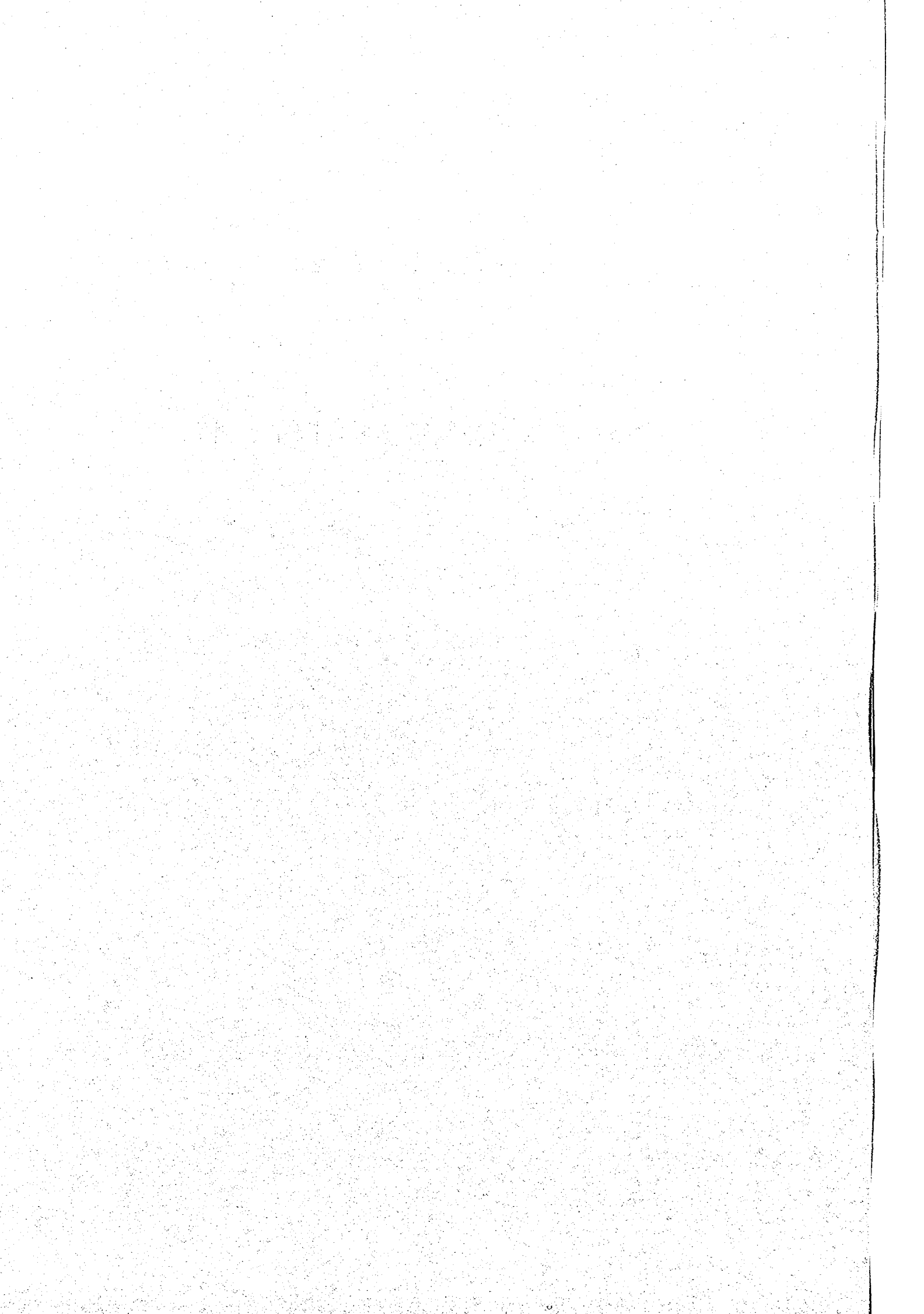
また、パイロット事業等その他の制度においても、同様の領域での技術の普及に向けた取り組みがなされている。関東地建の例でみると、78現場において試行されており、特に低騒音低振動技術の試行件数が最も多く、全体の約30%を占めていた。

(2)事業貢献度についての事例調査

前項で抽出した事例から、廃棄物抑制など外部コスト低減効果が高いと推定されるものについて事業貢献度についての調査を行ったところ、工期短縮や施工領域の拡大、使用時間や使用地域の制限の緩和など直接的な効果が伴わないと適用が進まない傾向にあること、外部コスト削減効果は事業の円滑な進捗に資するという期待を有することがわかった。なお、これらを定量的に評価するために、引き続き適用事例について調査する必要がある。

（木下：奥谷）

建設事業の品質管理体系に関する研究



建設事業の品質管理体系に関する研究

1. 研究の背景

現在、建設事業の分野においても国際化が急速に進展している。その中でも平成 7 年 1 月に WTO（世界貿易機構）の「貿易の技術的障害に関する協定（TBT 協定）」が結ばれ、各国の規格や基準と国際標準との整合性を図ることが求められている。このような中、ISO や欧州コードにおいては、構造物の性能を明示して発注する「性能規定」型の基準類の整備が進められつつある。これを受け、我が国でも建築分野ではその方向での基準法の改正がなされた。土木工事においても、今後、性能規定によって設計、施工、契約することの検討が必要となる。

2. 研究の目的

性能規定による設計、施工、契約は、現在の仕様規定によるものと比べて、構造物の性能を達成するための手段選択の自由度が広がるため、新技術や新材料等が適用しやすく、民間の創意工夫を活かすことができる。その結果、建設コストの縮減や工期の短縮等多くの利点がある。

その一方、性能規定への移行にあたっては、発注、契約において受注者が提示した設計法や設計図書が発注者の規定した性能を満足しているかどうかの判断基準、規定した性能を満足しているかどうかの施工時検査法、性能を満足していない場合の受注者、発注者間での責任分担のあり方など、性能規定の考え方を採用するため、新たな技術体系を研究する必要がある。

本研究では、性能規定への移行に必要な考え方を整理するとともに、必要な技術を体系的、総合的に構築する。

3. 達成目標

- ① 仕様規定化から性能規定へ移行するにあたっての技術的な課題の整理
- ② 性能規定に対応した品質管理の技術体系の整理、構築
- ③ 構造物に適合した性能規定法の開発
- ④ 非破壊検査法等、性能規定に対応した品質管理、検査技術の開発
- ⑤ 総合的品質管理体系の開発

4. 社会的な効果

- ① 基準類、発注方法を性能規定化し、適切な条件下で適用することによって、工事の設計者、施工者にとって自由度が増し、より良い社会資本をより安価に形成できる。
- ② 性能規定の考え方で基準類を見直すことによって、基準の各条文がどの部材の性能もしくは仕様を規定しているのかを整理することができ、より合理的な基準を得ることができる。
- ③ 性能規定化することによって、今後の国際化の進展の中で求められる日本の基準と ISO や他国の基準との調整が容易になる。

－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

8.1 性能規定化手法とそれに対応した設計・材料・施工・維持管理の品質管理体系の開発

- (1) 品質規格の性能規定化手法の開発……………（化学研究室）… 210
- (2) 要求性能と品質レベルの相関性の検討……………（構造研究室）… 212
－構造物の性能に与える品質の影響度－
- (3) 要求性能と設計・材料・施工・維持管理の品質管理……………（橋梁研究室）… 214
レベルの相関性の検討

8.2 品質管理・検査の合理化技術の開発

- (1) 施工情報活用による品質管理・検査の合理化技術……………（機械研究室）… 216
（シールド工）
- (2) 土構造物の品質管理技術の開発……………（施工研究室）… 218
- (3) コンクリート材料・構造物の品質検査技術の開発……………（コンクリート研究室）… 222
－非破壊検査・高知能検査等－
- (4) 鋼構造物の品質検査試験技術の開発……………（化学研究室）… 224
- (5) 鋼構造物の品質検査試験技術の開発……………（橋梁研究室）… 226

8.3 総合的品質管理体系（TQM）の開発

- (1) 公共工事の発注体系に関する調査研究……………（建設マネジメント技術研究室）… 228
- (2) 公共工事の性能発注に関する調査研究……………（建設マネジメント技術研究室）… 230

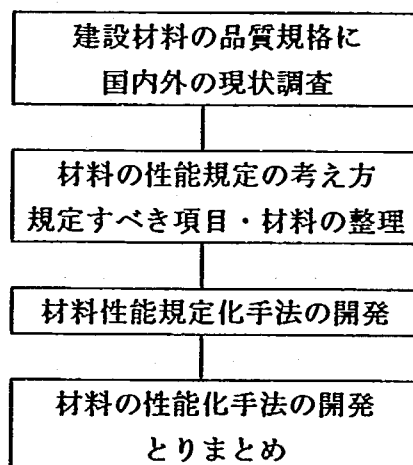
8.1(1) 品質規格の性能規定化手法の開発

研究期間：平9～平12

担 当：化学研究室

【要旨】

I S O（国際標準化機構）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（I S O 9000 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。10年度は材料の性能規定化の一例としてアスファルト舗装の要求性能や性能規定について検討した。また、アスファルト舗装を構成する材料の要求性能について検討した。



1. 研究方法

アスファルト舗装に要求される性能を調査し、各部材毎の階層化、性能の数値化、要求性能の検証方法などについて検討を行い、アスファルト舗装の性能規定化の試案を行った。

2. 研究結果

2. 1 舗装に要求される性能

舗装に対する要求性能は、図-1に示すような道路種別や沿道環境などの条件により異なってくるが、実際の道路では次に示すような性能が要求されると考えられる。

(1) 一般的な機能における要求性能

- 1) 耐久性：舗装の寿命
- 2) 走行安全性：走行時の操舵や制動性のよさ。
- 3) 走行安定性：走行時の乗心地のよさ。

(2) 沿道環境保全のための要求性能

- 1) 住宅地・公共施設地域等における環境。騒音、振動 等
- 2) 景観保護地、自然保護地区における自然環境・景観性 等
- 3) コミュニティーゾーン内道路における歩行者優先性、バリアフリー 等

2. 1 アスファルト舗装の性能規定

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。そのために、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。

アスファルト舗装は、従来は発注者が仕様規定に従って使用材料、混合物の規格のみではなく構造、出来形規格を設定することにより、舗装の品質を保証した。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。

改定された建築基準法における性能規定の概念では、要求性能項目、要求性能規準、性能検証方法、適合みなし仕様が規定されている。この性能規定の概念を参考にし、アスファルト舗装の性能規定を示すと表-1のようになる。

アスファルト舗装の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確定されていないこ

とである。要求性能を検証しようとした時、このような状況のもとでは、暫定的な適合みなし仕様を満足するか否かを検査することで要求性能を満足しているとみなすしかない。寿命や検証時期をどう考えるか。など更に

検討を加える必要がある。以下にアスファルト舗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

舗装に求める要求性能は、車が安全にかつ安定に走行することである。表-1にひび割れやわだち掘れはなく安全に走行できることとしたが、ひび割れやわだち掘れが要求性能を的確に表しているか否かは明確ではない。すなわち、運転者が、車を安全にかつ安定に走行させるには、舗装に対してどのような性能を要求されるかを確認する必要がある。

(2) 要求性能の検証

要求性能を規定した場合、使用材料や設計構造物あるいは完成物がその性能を満足しているか検証されなければならない。表-1に現状で要求性能を検証できると思われるアスファルト舗装の試験方法を示した。これが、性能を満足するかどうか検証できる試験方法になっているかは疑問である。当面は、表-1に示すように、見なし規定として、現状の試験方法で確認できる規定値を設定し対応していかざるを得ないものと思われる。しかし、この数値が要求する性能を検証しているかは明確になっておらず、各要求性能を検証できる試験方法を確立していく必要がある。

さらに、評価・検証は誰がするのか発注者ができるのか体制作りも含めて考える必要がある。

(3) 情報の開示

性能規定により何らかの工事を行うとする場合、入札参加希望者は特記仕様書により示された性能を満足するための材料、工法等の規格提案を行い参加する。規格提案に際しては、当該道路の設計条件、交通量、路床条件、路面性状、既設舗装の舗装構成、施工履歴等の情報を必要とする場合もあり、発注者は入札参加希望者にこれらの情報を開示する必要がある。そのため、情報の開示について一定のルールを設定しておく必要があると思われる。

2. 4 アスファルト舗装を構成する材料の要求性能

アスファルト舗装を構成する材料には、瀝青材料（石油アスファルト、改質アスファルト、天然アスファルト、石油アスファルト乳剤）、骨材（砂利、碎石、玉砕、砂、鉄鋼スラグ）、フィラー、樹脂系結合材、路床・路盤安定材（瀝青材料、セメント、石灰）、添加材料（はく離防止剤、繊維補強材など）などがある。

塗料など機能性材料は材料単体で要求性能を満足することができるため、要求性能を設定できる。これに対して、アスファルト舗装材料の場合、構造材料（材料単体で構造体にはなれず、いくつもの材料から構成される材料）である。施工時には、様々な材料の組合せが考えられ、要求性能を満足すれば材料は何でも良いことになる。よって、材料自体の要求性能の規定は難しい。

3. 今後の課題

アスファルト舗装の性能規定の試案を行ったが、性能規定の概念はまだ定まっておらず、今後さらに検討を加え確立していく必要がある。

(明嵐, 寺田)

表-1 アスファルト舗装の性能規定例

新建築基準法	要求性能項目	要求性能基準	性能検証方法	適合みなし仕様(例)
アスファルト舗装	耐久性	所定期間内にひび割れ、わだち掘れ、摩耗が余りなく車が安全に走行できること	ひび割れ測定方法 わだち掘れ量測定方法 粗さ測定方法	ひびわれ率 わだち掘れ量 摩耗量 〇〇%以内 〇〇mm以内 〇〇mm以内
	走行安全性	所定期間内、車がすべらず安全に走行できること	すべり抵抗測定方法	動的摩擦係数
	走行安定性	所定期間内、車が安定に走行できること	平坦性測定方法	平坦性 〇〇mm以内
	低騒音性	所定期間内、環境基準の騒音レベルを満足すること	騒音レベル測定方法	騒音レベル 環境基準を満足すること
	低振動性	所定期間内、振動規制法の振動レベルを満足すること	自動車振動測定方法	振動レベル 振動規制法を満足すること
	景観性	地域の景観にマッチすること		

8.1 (2) 要求性能と品質レベルの相関性の検討

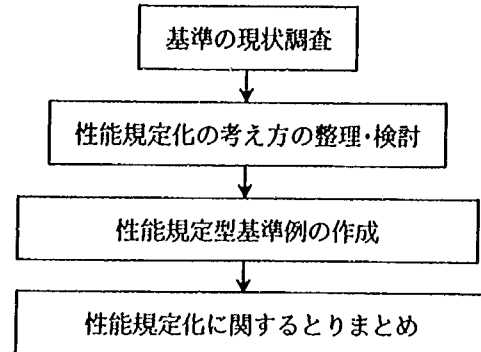
一 構造物の性能に与える品質の影響度一

研究期間：平 9 ～ 平 1 2

担 当：構造研究室

【要旨】

近年、建設コストの縮減、建築分野での国際的な性能規定化の動きに対し、国内の各土木構造物基準類においても性能規定化の研究が求められている。本課題は、一般土木鋼構造物の性能規定体系において必要な要求性能を整理するとともに、土木構造物に関する技術基準の一部を性能規定化して提案することを目的とする。10 年度は、一般土木鋼構造物に関する各基準に対して性能に関する分類を行い、規定方法の特徴を調査した。また、分類結果をデータベースとしてまとめた。



1. 研究方法

一般土木鋼構造物に必要な要求性能を体系付け、対応する仕様、検証方法を整理するために、一般土木鋼構造物に関する設計基準の規定内容を調査した。

表 1 対象基準

No.	基準名
1	土木学会鋼構造物設計指針 PART A
2	EURO CODE 3
3	ISO 10721-1、2

1. 1 対象基準

今回の調査の対象は、表 1 に示した国内外の、道路橋などの特定の構造物を対象とせず、鋼構造物一般の設計を示した基準とした。

1. 2 規定内容の分類

表 1 の基準類の各規定内容に対して、表 2 に示すような項目について分類を行った。性能は、安全性、使用性、耐久性、施工性、維持管理、経済性に関して、表 2 に示すような記述内容を対象として分類を行った。また、各規定項目を要求性能、検証方法、仕様に分類を試みた。また、仕様、検証方法と分類された規定について、安全性等の性能との対応付けを行った。また、分類結果をデータベースにしてまとめた。

表 2 基準の分類項目

対象構造		構造物全体、部材、連結部、材料
性能	安全性	・荷重（活荷重、地震、風）等の作用に対する安全性に関する記述 ・終局限界状態に関する記述
	使用性	・たわみ、振動など構造物の利用者の使用性に関する記述 ・使用限界状態に関する記述
	耐久性	・腐食、疲労、摩耗などの構造物の耐久性に関する記述 ・疲労限界状態に関する記述
	施工性	・施工に関する記述
	維持管理	・維持管理、検査、清掃、塗装、補修、補強などに関する記述
	経済性	・コストに関する記述
規定内容	要求性能	必要とする性能に関する記述
	検証方法	検証の際に使用する照査式および数値、係数に関する記述
	仕様	仕様、形状、形式、材料を指定する記述

2. 研究結果

2.1 性能による分類結果

図1に、各基準の規定内容を性能により分類した結果を、対象構造毎に集計した結果を示す。いずれの対象構造に於いても、安全性についての規定項目が大半を占めていることがわかる。たわみや振動などを規定した使用性については、主として構造物全体で規定されている。耐久性は構造物全体、部材、連結、材料のいずれの対象構造に於いても規定されているが、耐久性については鋼構造物の要求性能とする他に、表2に提示した各性能の時間的変化として考えることも出来ると思われる。また、経済性、環境性は、現状の設計基準では構造物全体で若干の記述があるだけであり、今後要求性能の示し方を検討する必要がある。

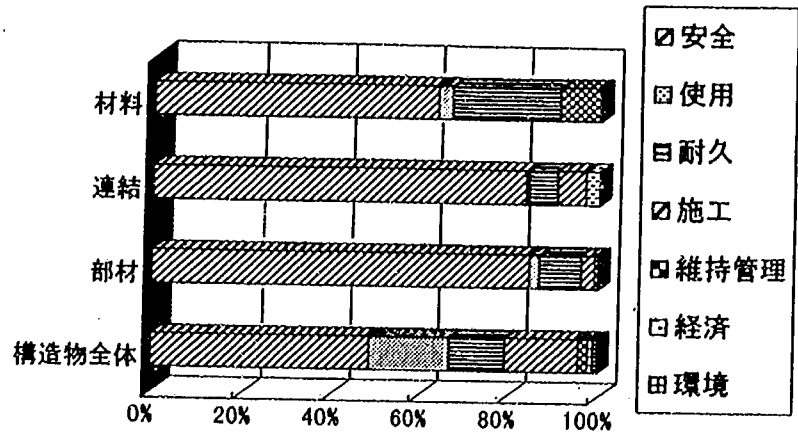


図1 性能による分類

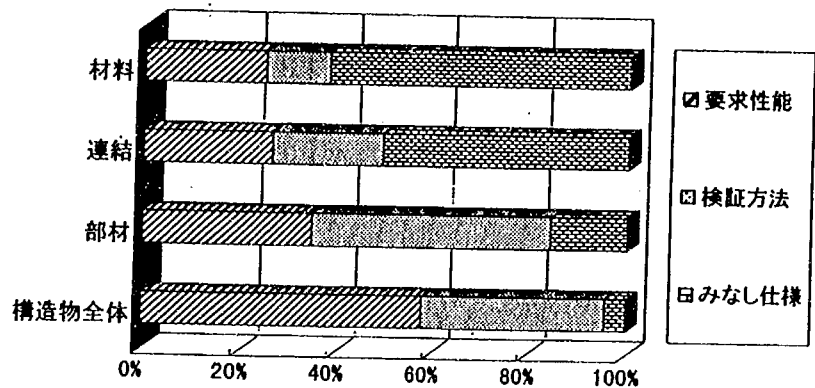


図2 規定方法による分類

2.2 規定内容による分類

図2に各基準の規定内容を規定方法により分類した結果を、対象構造毎に集計した結果を示す。構造物全体に関する規定は、ほぼ要求性能および検証方法によって記述されているが、連結、材料では、仕様で規定されている割合が高い。また、部材のうち応力照査が実施される部材では、検証方法が最も大きな割合を示している。

2.3 データベース

図3に今回の分類結果を基に作成したデータベースの画面の一例を示す。このデータベースを用いることにより、安全性や使用性などの性能項目および分類された規定方法から、対象基準類に規定されている内容を参照する事が出来る。

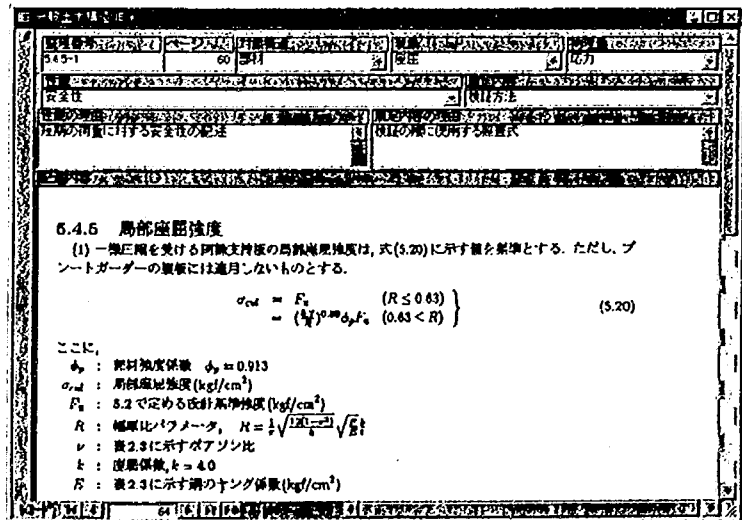


図3 データベース画面の一例

今後は、今回の分類結果をもとに一般鋼構造物に必要とされる性能を体系的に整理する予定である。また、これらの結果を用いて道路橋の耐風設計の性能規定化について検討する予定である。

(佐藤, 井上, 大儀)

8.1 (3) 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削減の動きに対し、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た。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指す。

10年度は、道路橋示方書について、性能規定の観点から分析を行い、性能規定型の基準を目標としたときに橋に要求される性能の枠組みについて整理を試みた。

1. 研究方法

1) はじめに (いろいろな階層)

ひとくちに性能といっても、何の性能か、という性能の捉え方は人によって異なる。道路橋とそれを取り巻く周辺のいろいろな階層は、おおよそ図-1のようになり、そのそれぞれの部分において、それぞれの要求があるものと考えられる。また、性能を要求する立場には、図-2のようなものが考えられ、それぞれの立場において、それぞれの要求があるものと考えられる。

2) 道路橋示方書の分析

上述のように、性能といってもいろいろな階層のそれぞれの立場において種々の性能があるものと考えられる。9年度に行った道路橋示方書の分析結果を図-3に示す。分析は、共通編、鋼橋編(ただし施工を除く)を対象とし、図-4に示すノルディック建築基準委員会(NKB)提案のモデルを参考に、道示の条文および解説中からキーワードを抽出している。これより、①現行の道示においては要求性能に関する記述はきわめて少ないこ

と、②要求性能の記述がある場合でも条文に具体的な構造細目や材料が規定され解説にその理由すなわち要求の記述例が多いこと、③橋全体の要求に関する記述が少ないこと、④それは具体的記述が難しいものが多いこと、⑤数値設定の根拠が明確でないものがあること(経験、実績等に基づく適合みなし仕様)、⑥それらは基準制定当時の情勢を反映したものであること、等がわかった。また、同じ要求性能中にも、活荷重や地震動のように非常に重要度の高いものと、構造細目や材料等のように比較的自由度の高いものがあり、NKBアプローチによる分類だけでは必ずしも要求性能についての整理が難しいことがわかった。

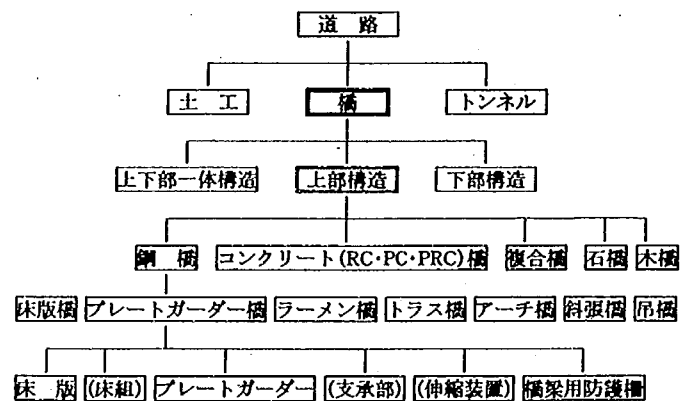
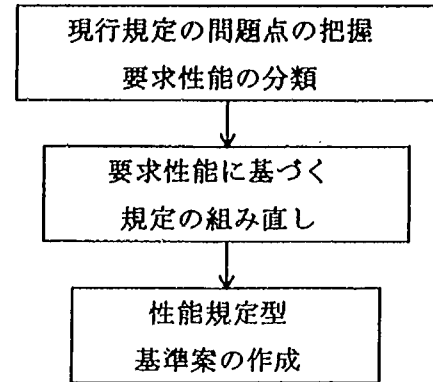


図-1 道路橋のいろいろな階層

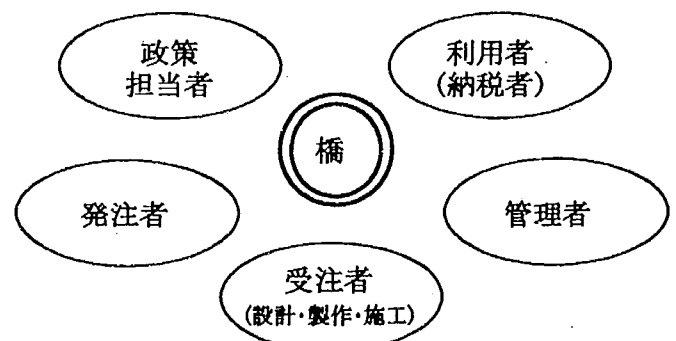


図-2 性能を要求する立場

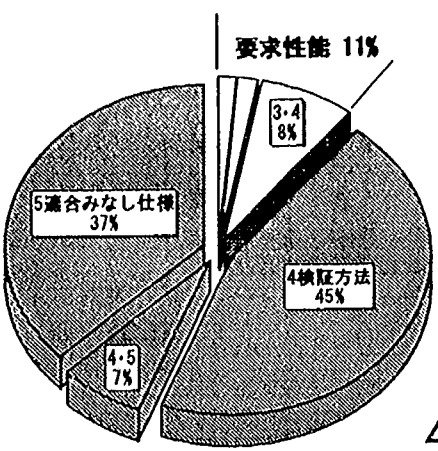


図-3 道示の分析結果

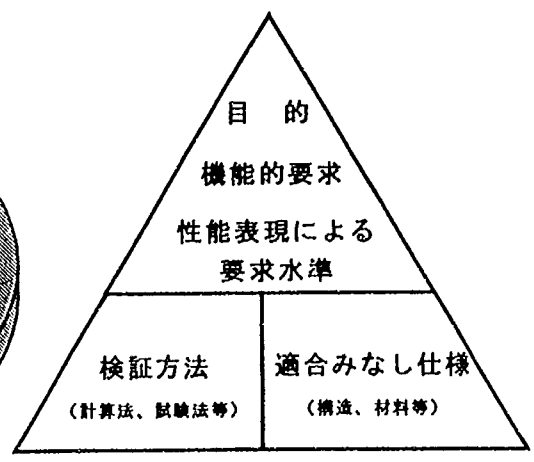


図-4 性能指向基準の理念的モデル

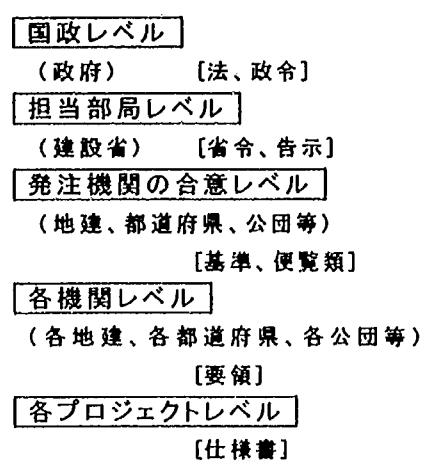


図-5 裁量と責任の階層

2. 研究結果

1) 裁量と責任

そこで、要求性能の重要度あるいは性能を要求する立場を考え、性能を要求できるものは責任を有する、すなわち性能の要求水準を決定できる裁量のある人は責任を有するとすると、その階層はおおよそ図-5のように考えられる。現行の道示は、制定当時の背景から、図中の比較的広い範囲の役割をこれまで担ってきたと考えられる。今後、性能規定型の基準を検討していくに当たっては、誰がその性能水準を要求するのか、責任分担を明確にしていくことが不可欠と考えられる。

2) 橋に要求される性能

図-5に示した中の比較的上位のレベルで、国民（納税者）の立場で橋に要求される性能の項目を整理してみると、おおよそ図-6のようになると考えられる。

ここでは、安全性とは橋そのものの構造物としての安全性であり、時間軸を含んでいる。利用性とは利用者側の要求であり使用性とも言われ、管理者の立場では供用性となる。環境適合性は、橋があることによって周辺環境に及ぼす影響である。これらはすべて橋の供用期間中（あるいはその前後を含めた期間）、満足しなければならない。経済性については、橋の供用期間のみならず、橋の架替まで含めた（架け替える場合には）十分に長い期間のライフサイクルコストを考える必要がある。以上のようにそれぞれの事項について、経年変化を含めて要求性能を満足しなければならない。このほか、要求性能を想像させるものに、施工性、維持管理性といったものがあるが、これらは図-6に示した要求性能を満足するための手段であると考えられる。

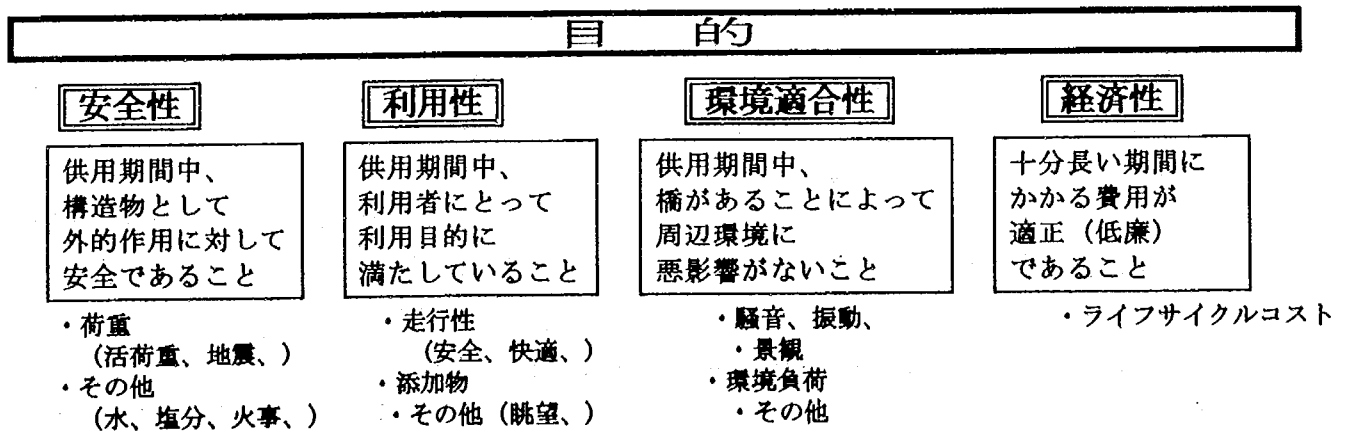


図-6 橋に要求される性能の項目

(西川, 上仙)

8.2(1) 施工情報活用による品質管理・検査の合理化技術 (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、国内建設事業においても、新技術開発導入の促進とこれによる生産効率向上のために、性能を重要視した技術仕様による設計・施工の自由度の向上が求められている。さらに、公共工事に着目すると、品質管理・検査の合理化等によるコスト縮減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、性能規定化を考慮した新しい品質管理体系の開発が有効である。しかし、これまで、土木分野における性能規定化の技術的手法は確立していない。

本研究は、シールド工事を事例として、性能規定化の技術的手法と、これを考慮した新しい品質管理体系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。10年度は、技術仕様の性能規定化のために、土木構造物における性能と品質の概念モデルを示すとともに、シールドトンネルにおける要求性能の検討を行った。

1. 研究方法

土木分野へ性能規定化を導入し、新しい品質管理体系を開発するためには、土木工事の技術仕様や各種技術基準等の性能規定化を行うとともに、土木構造物に求められている本来の要求を明確にすることが重要である。また、ISO9000's等の国際規格に基づく受注者による自主的品質検査結果の効率的活用による品質管理・検査の合理化の検討が必要である。本研究においては、シールド工事を事例として、これらの検討を行い、土木工事の技術仕様の性能規定化導入を検討するとともに、新しい品質管理体系の開発を行うものである。

2. 研究結果

2.1 性能と品質の概念モデル

土木構造物は、例えば、シールドトンネルの場合、一次覆工と二次覆工、裏込め材、さらに分割できるいくつかの要素に階層的に整理できる。性能規定化は、各要素について上位要素の目的・機能等、仕様の定められた原点に帰り、要素に求められる性能を明らかにすることにある。また、発注者は、この性能を検査する必要がある、受注者も証明しなければならないため、明示する性能は、検査・検証が可能であることが要求される。これらの条件を考慮し、土木工事の性能規定化のための性能と品質の概念モデルを検討した。

2.2 シールドトンネルにおける要求性能

一般的なシールドトンネル（道路トンネル）の要求性能には、大別して強度、形状・寸法、漏水、災害への耐力、これらの耐久性及び環境負荷の軽減がある。これらの要求性能を達成するために、個々の部材が設計されている。シールドトンネルの各部材の要求性能について、階層化整理した結果を図-1に示す。ここでは、強度に関する要求性能を、強度(goal1)、変形(goal3)、地震(goal4)に分類している。

性能規定化導入対象は発注者により決定される。そのため、シールドトンネル全体に対して性能規定化導入を検討する場合は、表-2に示すシールドトンネルの要求性能が要求目的となるが、例えば、セグメントに対して性能規定化導入を検討する場合、セグメントの要求性能（＝一次覆工の性能）が要求目的となる。また、要求目

表-1 研究計画

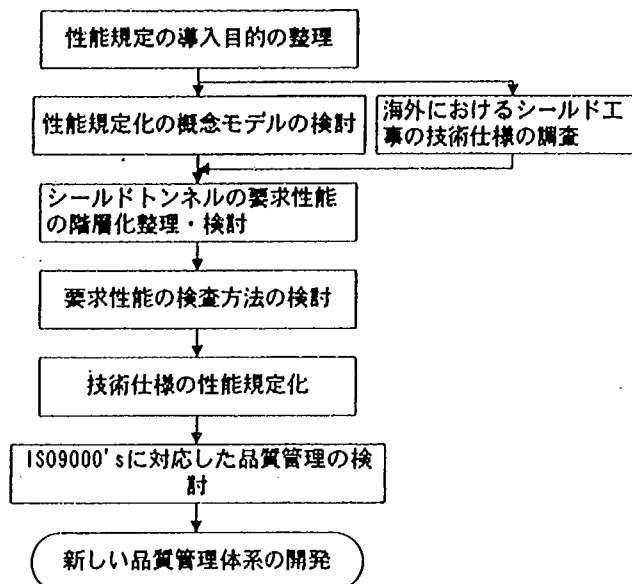


表-2 シールドトンネルの要求目的 (道路トンネルの場合の例)

項目	要求目的
goal1	トンネル外力に対して、構造上の必要な強度を有している。
goal2	トンネル用途に適合した断面形状を有している。
goal3	トンネル用途に障害となる変形を生じない。
goal4	トンネル外部から内部への漏水を目的とする漏水量以下に抑えることができる。
goal5	地震に対して強度的に安全である。
goal6	目的を阻害しない出来型(線形)と仕上がり状況を有している。
goal7	浮力に対して構造上安定している。
goal8	供用期間中に周辺環境に及ぼす影響がすくない。
goal9	火災発生時の熱に対してコンクリートの強度劣化を防止できる。
goal10	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。

表-3 要求性能の例

項目	内 容
S6	建築限界を満足するように、一次覆工と二次覆工に対する要求を決定する。
P2a2	【条件:二次覆工を行う場合】二次覆工と一次覆工を接して組み立てることができる。 【条件:二次覆工を省略する場合】目的とする内空断面を確保することができる。
P2b1	目的とする内空断面を確保することができる。

的に基づき、検査・検証方法を考慮して、性能規定の規定項目を決定することになる。これらの検討時に考慮する階層化整理上の各性能の関係の例として、断面形状に関する性能(goal2)を示す。goal2 (= P_{1a2}) の性能の達成のために、一次覆工は二次覆工が施工できる寸法及び内面状態である必要(P_{2a2})があり、二次覆工は所要の厚さを確保した上で所要の内空断面が確保されている必要(P_{2b1})がある。この際、goal2の達成に直接関与する P_{2a2} が P_{2b1} に優先するとする条件(S_6)が付加される。

3. 今後

今後、要求性能の整理結果に基づき、検査・検証方法を考慮しつつ、要求品質で規定された現状の技術仕様の性能規定化を検討する。また、ISO9000's等の適用による品質管理・検査の合理化の検討を行う予定である。

4. 主な研究成果物

田中和嗣・村松敏光, 土木工事における品質と性能の関係の概念モデル, pp.65-pp.72, 第16回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会, 1998.12.

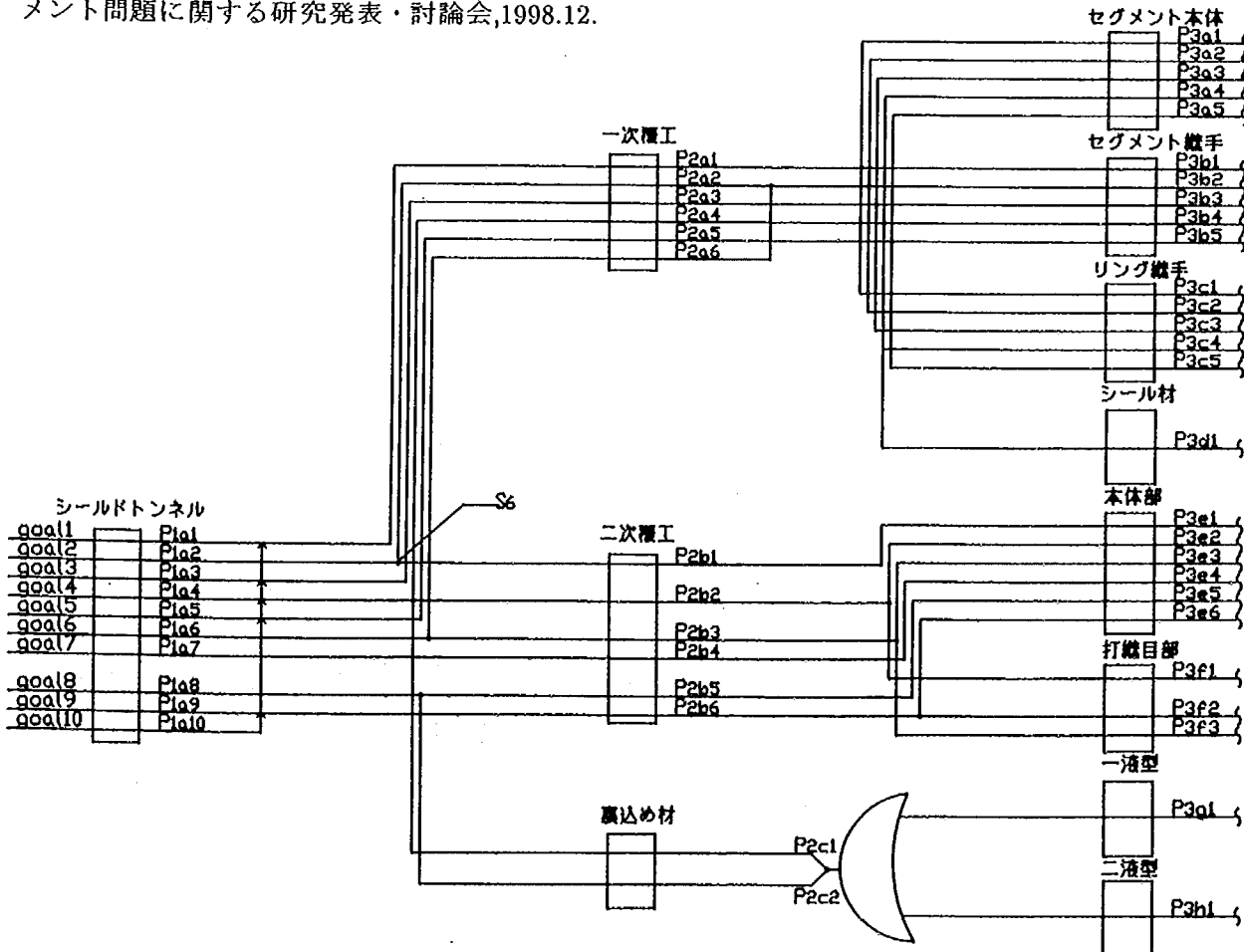


図-1 シールドトンネルの要求性能の階層化整理 (一部)

(村松, 持丸, 田中)

8.2 (2) 土構造物の品質管理技術の開発

研究期間：平 9～平 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。昨年度は、現状整理と性能規定化に向けた検討課題を抽出した。本年度は、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。

1 対象分野の選定

道路土工の性能規定化を考えた場合、現在の仕様規定的なシステムに問題を感じていない関係者が大多数であり、道路土工の全分野について性能規定化を図ることは、現場の混乱を招くだけで現実的な選択でない。また、一口に性能といっても、品質、コスト、耐久性、環境等の評価軸が存在し、性能の捉え方は、構造物やそれを取り巻く環境によって異なる。ここでは構造物に求められる品質に着目し、下記に示す5つの項目を考慮して品質規定化の対象分野を選定した。選定方法は、新土木工事積算対系¹⁾の工事工程体系のレベル3を参考に、各種の土構造物について評価項目毎に点数評価した。表-1に対象分野選定のための評価概要、表-2に評価の高い2分野の選定理由等を示す。

- 1) 工法が多数存在すること。
- 2) 成果物の品質を検査確認できる技術が確立されていること。
- 3) 性能を表す指標が設定しやすいこと。
- 4) 発注者・受注者ともに技術レベルが高いこと。
- 5) 品質の向上とコスト縮減が期待できること。

表-1 対象分野選定のための評価概要

工事工程体系			評価項目				総合評価 (点数)
レベル1	レベル2	レベル3	性能を表す指標が確立しやすい	完成後に品質を検査確認できる	類似工法数が多い	品質の向上とコスト縮減が期待できる	
土構造物	道路土工	路体盛土工(普通土)	3	3	2	3	11
		EPS(発泡スチロール)	3	1	1	1	6
	地盤改良工	バースカドレーン工	2	1	2	1	6
		締固め改良工	2	1	2	2	7
		固結工	3	3	3	2	11
	法面工	アンカー工	2	1	3	1	7
		フルーム工法	2	1	1	1	5
		地山補強土工法	2	1	2	1	6
	擁壁工	補強土壁工法	3	1	2	2	8
		石・ブロック積み(張)工	2	1	2	1	6

※評価方法:各項目について最高3点、

総合12点満点

- ・品質管理基準およびその規格値が直接的に性能を指標化できる場合を3点
- ・完成後に成果品の品質を検査確認できる技術が確立されている場合を3点
- ・類似工法数が10以上の場合を3点
- ・品質の向上とコスト縮減の両者が見込まれる場合を3点

表-2 品質規定化の対象分野

対象分野	対象工法	選定理由	備考
路体盛土工	盛土・締固め	・指針に性能規定的な取扱が明記されている。 ・成果品の品質を検査確認できる技術が確立されている。 ・品質を表す指標が確立しやすい ・品質の向上とコスト縮減が期待できる。	・道路土工 施工指針 ・RI, 砂置換法 ・締固め度 ・高まき施工 ・リサイクル材の利用
固結工	浅層混合処理工 深層混合処理工	・工法が多数存在する。 ・成果品の品質を検査確認できる技術が確立されている。 ・品質を表す指標が確立しやすい ・技術レベルが高い。 ・品質の向上とコスト縮減が期待できる。	・多数存在 ・チェック・リングの他に新しい非破壊検査的な手法の適用可能性大 ・強度・連続性 ・配合の適正化

以下、上記の2分野を中心に品質規定化に関する検討を行った。

2 品質規定化に関する検討

2-1 盛土工

昨年度に報告したように、道路土工—施工指針²⁾の「4-3-6(2)締固め規定」には、道路土工の「設計段階での変動要素が多い」「施工管理が困難」という特性を考慮し、「工法規定方式」と「品質規定方式」が記述されている。一方、土木工事共通仕様書³⁾の「第1編共通編—第4章土工—4-4-3 路体盛土工および 4-4-4 路床盛土工」には、以下に示すような仕様規定的な記述がある。

土木工事共通仕様書—第1編 共通編—第4章 土工

4-4-3 路体盛土工

6.請負者は、路体盛土工の施工においては、一層の仕上がり厚を **30cm以下**とし、各層ごとに締固めなければならない。

4-4-4 路床盛土工

5.請負者は、路床盛土工の施工においては、一層の仕上がり厚を **20cm以下**とし、各層ごとに締固めなければならない。

また、これまでは一般的に、実現場では8～20t級のタイヤローラによる締固め回数は5回とすることが標準とされてきている。これは、平成8年度までの建設省土木工事積算基準⁴⁾に表-2に示すような記述が存在し、参考にされていたためであると考えられるが、平成9年度以降の積算基準では積

表-2 仕上がり厚さと締固め回数

工種	仕上がり厚さ(m)	締固め機械	締固め回数
路体・築堤	0.3	ブルドーザ(15t)又は タイヤローラ(8～20t)	5
		ブルドーザ(21t)	4
路床	0.2	ブルドーザ(15t)又は タイヤローラ(8～20t)	7
		ブルドーザ(21t)	6

算の合理化が図られ削除されている。土木工事標準歩掛の活用に当たっての留意事項⁵⁾にも、「標準歩掛は、あくまでも標準的な施工を想定した予定価格を算出するためのツールであって、実際の施工における工法や

以上のように、土木工事共通仕様書で「守るべき図書」として指定されている道路土工指針に性能規定的な表現が盛り込まれているにも関わらず、共通仕様書には仕様規定的な記述が残されている。このため、実現場で道路土工指針の性能規定的な「品質規定方式」を適用する場合には、特記仕様書にその旨を明記する等の対応を図らなければ適用できない状況となっている。今後は、現場条件や環境によっては「品質規定方式」が採用できるように共通仕様書の記述を修正する必要がある。

2-2 固結工

固結工の適用すべき諸基準は、道路土工—軟弱地盤対策工指針⁷⁾であるが、「5.対策工の設計と施工 5-1.固結工法」には以下に示すような設計・施工上の留意点が記述されている。これは、現場の地盤条件に大きく左右されることから設計・施工各段階における改良効果確認の必要性を示している。一方、「品質管理基準および規格値」⁸⁾には、試験項目として配合試験および土の一軸圧縮試験を規定している。一軸圧縮試験は、簡便かつ早急に確認できるメリットがある反面、試験環境が地中深く施工された深層混合処理工法などの地盤の状態とは異なるため、地中の改良地盤の強度を再現しているとは言い難い。

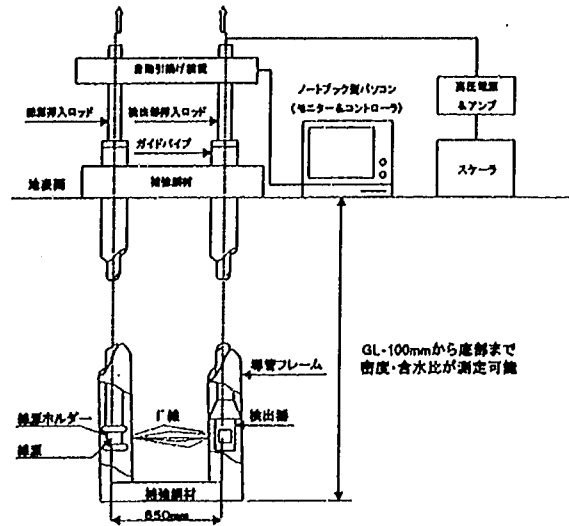


図-1 2孔式RI密度計の概要

軟弱地盤対策工指針－5.対策工の設計と施工－5-11.固結工法

・設計

原地盤での改良強度は、室内での配合試験強度を割引いて考えておく必要があり、現行では、室内強度の1/2～1/5の範囲内で設定することが多い。

・設計、施工上の留意点

安定材の添加量は、室内配合試験から一応の目安値が得られるが、地盤の成層状態、施工精度などにより改良地盤にばらつきが生じやすく、現場試験により改良効果を確認するとともに必要に応じて添加量の再検討を行う。

このため、固結工の品質の向上を図るには、目的に応じた要求性能を明確にした上で目標強度を設定し、現場再現性がある高精度の評価手法あるいは検査手法を導入することが望まれている。最近では、改良地盤強度の判定手法の1つとして、図-2に示す「ロータリーサウンディング(RPT)手法」等が開発されている。RPTは、改良地盤をボーリングしながら先端部のビットに装着したセンサーで推力、トルク、水圧

を計測することによって一軸圧縮強度（ q_u ）等の地盤強度を推定するものである。これらの手法を適用することにより、従来の品質管理が非連続的かつ信頼性の低かったのに対し、連続的かつスピーディに改良地盤の強度を判定できることから品質の向上およびコスト縮減が見込まれる。今後は、固結工の品質管理を「一軸圧縮強度（ q_u ）」に限定した評価だけでなく、RPT等の品質の高いデータが取得可能な検査手法を適用する場合には、「換算した一軸圧縮強度（ q_u' ）」により品質管理ができるように、「品質管理基準および規格値」等に盛り込むことが望ましい。

3 今後の課題

今年度の検討結果および今後の課題を以下に示す。

(1) 品質規定化の対象分野の検討結果

- 盛土工は、仕上がり厚さの規定以外に、2孔式RI手法等の確実な品質管理が可能な検査手法を導入することを条件として、仕上がり厚さを規定しない項目を盛り込むことが望ましい。
- 固結工は、一軸圧縮強度による品質管理の他にRPT等の精度の高い品質管理手法を盛り込むことが望ましい。

(2) 今後の課題

- 実現場における品質検査手法の精度と適用性の検証
- コスト縮減効果の検討
- 要求される性能（品質）と検査・検証方法の整理

参考文献

- 1) 平成9年度版 新土木工事積算大系の解説 建設大臣技術調査室監修 財団法人経済調査会
- 2) 道路土工施工指針 昭和61年11月 財団法人日本道路協会
- 3) 土木工事共通仕様書 土木工事必携 平成10年度版 関東地方建設局企画部監修 財団法人関東建設弘済会
- 4) 土木工事積算基準（共通編）平成8年度建設省
- 5) 建設省土木工事積算基準 平成9年度版 建設大臣官房技術調査室監修 土木工事積算研究会編
- 6) 土木研究所資料第3338号 フィルダム材料の現場締固め特性 平成7年1月 建設省土木研究所ダム部 フィルダム研究室
- 7) 道路土工一軟弱地盤対策工指針 昭和61年11月 財団法人日本道路協会
- 8) 品質管理基準および規格値 平成10年度版 関東地方建設局企画部監修 財団法人関東建設弘済会

（大下，市村，森，井谷）

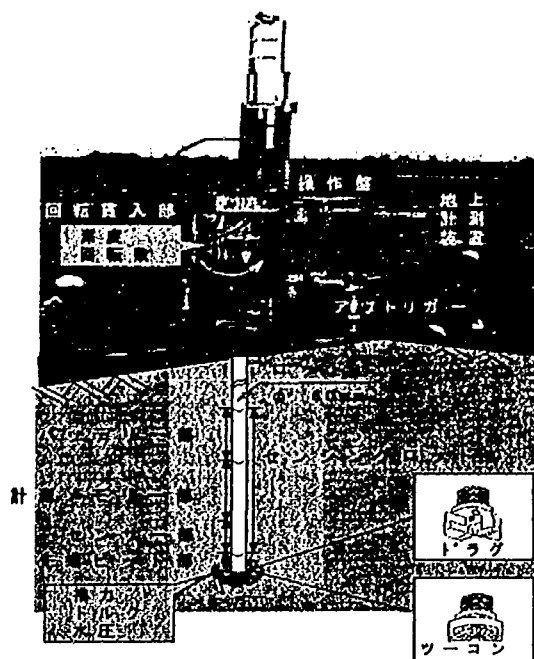


図-2 ローターサウンディング(RPT)手法

8.2(3) 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】

品質管理・検査の合理化に関する検討として、9年度に引き続き、フレッシュコンクリートの単位水量を現場で即時に推定する方法について検討した。10年度は加熱乾燥法に加え単位体積質量法についても試験を実施し比較を行った。また、ポストテンション型プレストレストコンクリートの施工時を対象にした、光ファイバーによるグラウト注入状況の管理方法についても引き続き検討を行った。

品質管理や検査の今後を考える上では、現在各分野で検討されている基準類の性能規定化を念頭に置く必要がある。そこで、コンクリート構造物の性能規定化手法に関する検討として、道路橋示方書に規定されている構造細目の一部について背景の整理を行った。

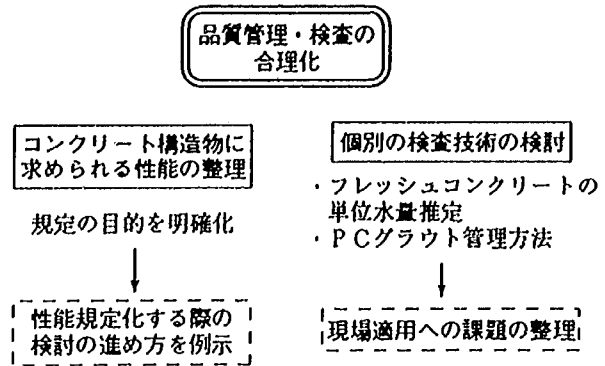


図-1 研究の概要

1. 研究方法および研究結果

1. 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

硬化後のコンクリート構造物が所定の品質を満足していないことが判明した場合、補修などに莫大なコストがかかることになる。そのため、現場に搬入されたコンクリートについて、フレッシュ時に硬化後の品質を推定する方法の確立が望まれており、コンクリート品質への影響が大きい単位水量の推定について、様々な方法が提案されている。10年度は、その中でも原理が単純で、現場への適応性が高いと考えられる加熱乾燥法と単位体積質量法について、室内試験を実施し、各試験法の特性を整理した。

加熱乾燥法は、9年度にも検討を行った方法で、乾燥炉でフレッシュコンクリートの水分を蒸発させ、乾燥前後の質量差から試料中の水量を測定し、配合データと照らし合わせて単位水量を推定する方法である。10年度は、炉内温度 600℃の乾燥炉を用い、1リットルの試料の乾燥時間は 10～15 分であった。乾燥後に試料を 5 mm ふるいで洗い、粗骨材のサンプリング誤差を修正した。より迅速に試験するために、試料をウェットスクリーニングしてモルタル分を抽出し、加熱乾燥する方法も検討した。

単位体積質量法は、コンクリートの単位体積質量を測定し、これと配合や骨材・セメントの比重から単位水量を推定する方法である。エアメータは容器の容積が既知（空気室圧力方法の容器では7リットル）であり、それに占める空気量も測定できるため、試料の質量を測定することで簡単に単位体積質量を求めることができる。広く使用されている空気室圧力方法のエアメータを用いた場合に加え、比較のために誤差要因が少ないものの作業に時間と労力が必要な容積方法のエアメータを用いた測定も行った。

コンクリートの配合は、最大粗骨材寸法：20mm、セメント水比：1.5～2.5、単位水量：150～200kg/m³の範囲で 20 ケース設定し、練り上がり直後、1 時間後、2 時間後に各手法により単位水量を推定した。推定した単位水量を真の単位水量に対する百分率で示した結果を図-2 に示す。

コンクリートを加熱乾燥する方法が最も高い推定精度を示し、逆に、ウェットスクリーニングモルタルを用いた場合は推定精度が低く、ばらつきも大きかった。容積方法のエアメータを用いた方法はコンクリート

の加熱乾燥法に近い推定精度をあげており、空気室圧力方法のエアメータによる方法は若干落ちる結果となった。ただし、空気室圧力方法のエアメータによる測定は、試験方法が簡便である点と、通常のコンクリートの受け入れ時に、これを用いた空気量試験が行われている点を考えると、現場適応性に大きな魅力がある。

なお、いずれの方法でも時間の経過に伴って推定単位水量が低下し

ていく傾向を示したが、これにはコンクリート放置中に水分が蒸発した影響等が考えられる。今後は、各試験方法の特性を活かした現場への適用方法について検討を進めていく予定である。

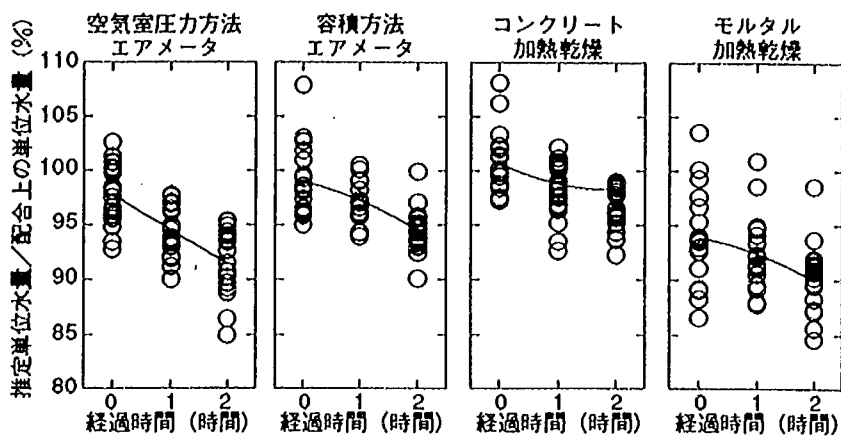


図-2 各方法による単位水量推定結果

1. 2 光ファイバーを用いたPCグラウト管理に関する検討

ポストテンション方式のプレストレストコンクリート（PC）では、PC鋼材を緊張後、PC鋼材とコンクリート間の付着を生じさせ、シース中のPC鋼材の腐食を防止するために、PC鋼材とシースの間にセメントを主成分とする注入材料を充填（グラウト）する。グラウト工の施工不良はPCの耐久性を著しく損なう可能性があるが、現状ではグラウト充填状況の確認方法はまだ確立されていない。そこで、9年度から、光ファイバー温度センサーを利用したグラウト管理法について基礎的な検討を行ってきた。10年度は、充填するグラウトの温度や充填距離等を現場の条件に近づけた室内試験を行い、光ファイバー温度センサーの検出能力をより明確にするための検討を行った。

1. 3 性能規定化手法に関する検討

10年度は、9年度の検討や文献調査をうけて、性能規定化の概念や目的についての整理を行った。また、各種基準類の中で材料や構造細目、検証方法等が細かく規定されている一方、それらの結果として実現される性能が明確でないという問題が指摘されていることから、コンクリート道路橋の構造細目の一部について、規定の背景やその目的を明らかにすることを試みた。その結果、基準の改訂の際や、類似した基準の記述等を参考に新たな規定が設けられる際に、規定の目的や根拠についての記述が十分に継承されていない場合があることが分かった。

一方、構造細目の規定があることで設計計算が簡易になっている面もあり、今後、各基準類の果たすべき役割を考慮した記述のあり方について、さらに検討を進めていく予定である。

2. 主な研究成果物

- ・田中秀和，河野広隆，加藤俊二：「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
- ・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
- ・田中良樹，河野広隆，鈴木雅博：「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」，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，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，片平，田中，古賀）

8.2(4) 鋼構造物の品質検査試験技術の開発

研究期間：平9～平12
担 当：化学研究室

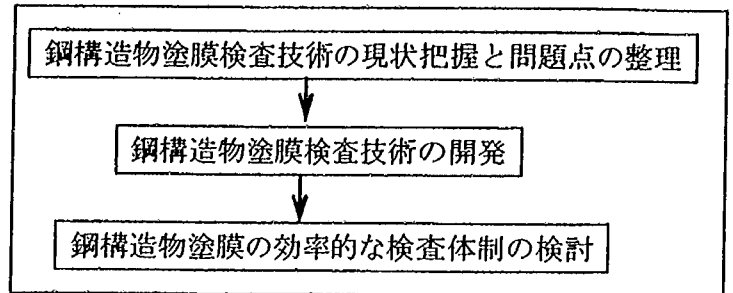
〔要旨〕

国際化並びにコスト削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の効率的で精度の高い検査技術の確立が求められている。

鋼構造物の塗膜検査は、塗料が十分に乾燥した

後、電磁式塗膜厚計で200～500 μ m程度を1ロットとして1ロット当たり測定数25点以上について、各点の測定を5回行いその平均値をその点の塗膜厚としている。塗膜厚の管理基準としては、ロットの平均値は目標膜厚の90%以上で、かつ最小値が目標値の70%以上であることとされている。しかしながら、塗膜は素地鋼材の表面粗さや塗装工の技量などによってばらつくものである。また、膜厚の測定は、膜厚計や測定者によるばらつきも大きく正確な膜厚が得られないのが現状である。

10年度は、効率的かつ精度の高い塗膜検査方法として、色調の変化によって一定以上の塗膜厚が得られる塗料を塗装した試験桁について、非破壊検査および破壊検査による塗膜厚測定との関係を調べた。その結果、塗膜検査方法として適用可能であることが明らかとなった。



1. 研究方法

1. 1 供試塗料

2液硬化形平成エポキシ樹脂塗料で、所定の膜厚まで塗装された時点で下地の色が隠ぺいされるように調色によって塗料の隠ぺい力を調整した塗料を供試した。この塗料の塗装作業性、乾燥性および塗膜の付着性を基盤目試験（5mm目）とアドヒージョンテスターで測定した。

1. 2 塗装試験

上記塗料を、高さ1.8m、幅1.7m、長さ6.5mの箱桁の試験桁にブラスト処理後有機ジンクリッチペイントを25 μ m塗装したうえに、膜厚が120 μ mとなるように調色した塗料を、エアレススプレー塗装、はけ塗り、ローラー塗装の3通りの方法で塗装した。エアレススプレー塗装は1回塗りで、その他の塗装方法は2回塗りで塗装した。十分に塗膜が乾燥した後、電磁式塗膜厚計で有機ジンクリッチペイントの膜厚を合算した塗膜厚を非破壊で測定した。また、破壊検査としてペイントボーラーで径が数ミリ程度の塗膜を円錐状に削り取り、その断面の左右2点について顕微鏡で塗膜厚を測定した。

2. 研究結果

2. 1 供試塗料

供試した塗料の塗装作業性は、エアレススプレー塗装、はけ塗り、ローラー塗装のいずれも特に支障はなかった。乾燥性も通常のエポキシ樹脂とほとんど変わりなかった。初期の塗膜の付着力は、塗装方法および塗装部位（側面と底面）の違いによる差異は認められず良好であった。

2. 2 塗装試験

箱桁に塗装した後、十分に乾燥してから塗膜厚を電磁式塗膜厚計およびペイントボーラーで計測した。そ

の結果を表－1に示す。

色調の変化によって膜厚を確保する塗料の膜厚は、おおよそ目標値が確保されていた。ただし、箱桁下面や塗装が午後であったため日陰となった南側側面がやや膜厚が小さくなったのは、色調変化を十分に確認しにくかったためと思われる。

(明嵐，守屋)

表－1 塗膜厚測定結果

塗装方法	測定位置	電磁式膜厚計 (μm)					ペイントボーラー (μm)		
		測定値					左側	右側	平均値
エアレススプレー	北側側面	199	211	187	199	184	200	193	197
		249	266	258	251	249			
		244	214	215	214	225			
		221	207	199	205	213			
		298	295	295	285	283			
	下面	300	303	271	266	285	121	129	125
		248	307	274	267	287			
		385	348	323	388	407			
		292	311	335	301	320			
		251	251	292	300	269			
	南側側面	230	218	234	236	228	143	107	125
		275	258	243	244	284			
		292	294	302	310	296			
		228	305	300	270	265			
		241	248	255	240	268			
はけ塗り	北側側面	266	283	302	275	293	250	250	250
		302	250	286	251	266			
		276	287	252	279	266			
		201	215	202	267	223			
		240	204	255	241	229			
	下面	218	227	214	214	200	—	—	—
		202	225	210	245	195			
		229	225	254	235	221			
		265	237	263	247	245			
		181	230	178	196	192			
	南側側面	260	285	279	267	264	214	164	189
		257	312	228	278	235			
		239	316	261	284	253			
		283	270	244	234	220			
		268	250	298	249	270			
ローラー塗り	北側側面	205	259	245	246	205	171	214	193
		272	258	260	320	323			
		238	278	230	239	263			
		229	195	205	221	213			
		204	243	286	224	202			
	下面	212	206	208	238	217	—	—	—
		201	252	261	204	217			
		202	227	200	246	256			
		195	192	185	191	168			
		239	226	213	232	199			
	南側側面	170	160	183	170	163	171	179	175
		200	219	208	186	169			
		187	221	161	211	233			
		167	200	177	228	168			
		219	239	223	244	208			

注) 電磁式膜厚計の測定結果には、有機ジンクリッチペイントの膜厚分を含む

【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た。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指す。

10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、極厚鋼板の溶接継手に各種の溶接内部欠陥を挿入した試験体に対する高サイクル疲労試験を行った。その成果として、内部欠陥の寸法と疲労強度の関係を明らかにし、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が確認された。

1. 研究方法

図-1に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。試験体板厚は50mmとし、鋼材質はSM490Cを用いた。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型開先のCO₂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。

疲労試験における载荷波形は正弦波として与え、繰返し载荷の周波数は5～10Hzとした。応力比R(=σ_{min}/σ_{max})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σ_{max}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ピーチマーク試験を行った。

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長さ(mm)を示しており、記号◆にアップラインが付いているもの(記号◆)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-2～4の試験結果により、BH試験体はD等級より疲労強度が高く、LF試験体は応力範囲が高い場合(応力範囲が250MPaの場合)にはD等級線より疲労強度が低くなった。CR試験体では、応力範囲が高い場合(応力範囲が200MPaの場合)、D等級より疲労強度が低くなるものがあった。

写真-1および写真-2に破断面の例を示す。これらの試験体に対しては、ピ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

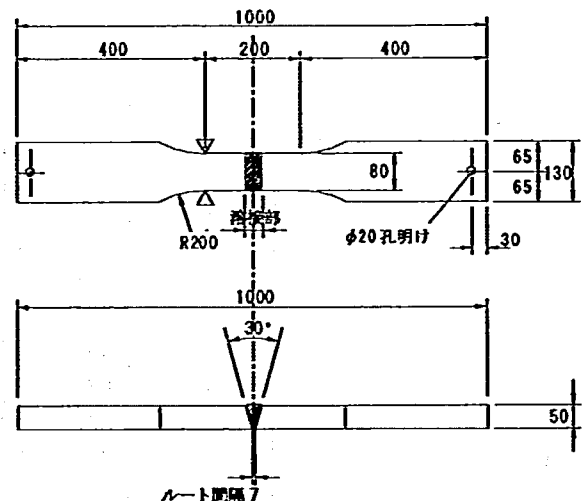
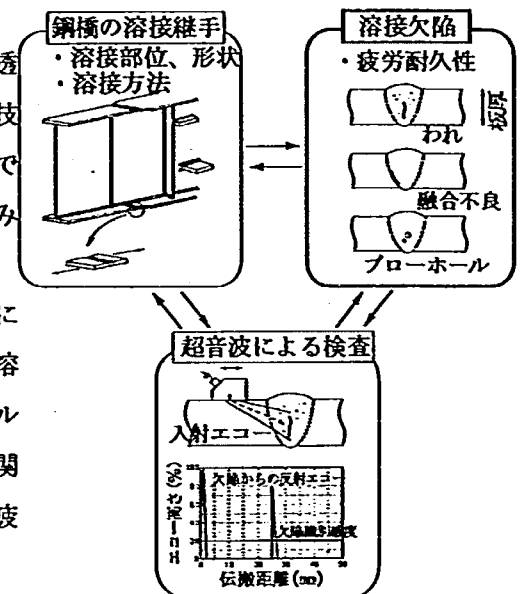


図-1 試験体の形状寸法

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	群集ブローホール	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

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。まず、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、円形の形のまま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、亀裂の進展方向が、欠陥を中心とした放射方向から裏波表面を起点とした余盛り側表面に向かう並進方向へと変換し、この亀裂進展方向の変化とともに進展速度も変化したため、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。写真-2はCR試験体において裏波側溶接止端部からの亀裂により破断した破断面である。写真-2のCR試験体の破面に関しては、縞状の模様(ビーチマーク)が刻み込まれていた。この縞模様により、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、上仙他：内部欠陥を有するV型開先突溶接継手の疲労試験、(社)土木学会第54回年次学術会講演概要集、平成11年9月(投稿済み)。

(西川、村越、上仙、高橋、川間)

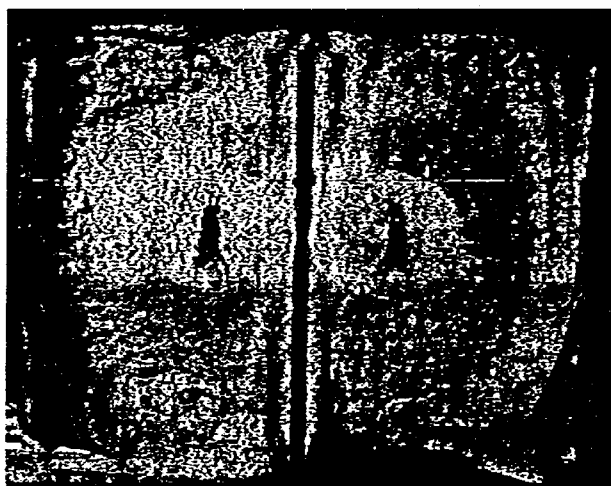


写真-1 破断面(LF試験体)



写真-2 破断面(CR試験体)

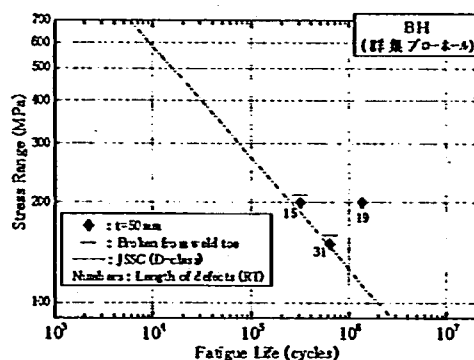


図-2 疲労試験結果(BH試験体S-N図)

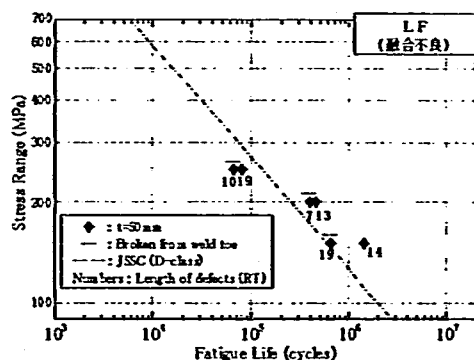


図-3 疲労試験結果(LF試験体S-N図)

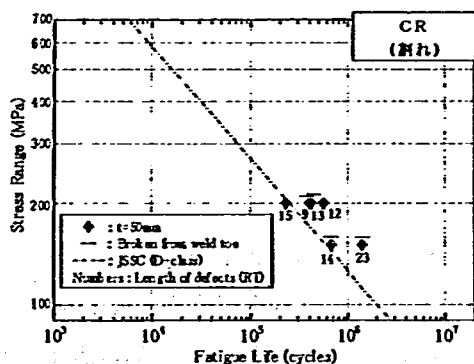


図-4 疲労試験結果(CR試験体S-N図)

8.3(1) 公共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、建設技術開発の成果として多くの新技術や新工法が提案されてきており、公共工事においても新たな発注方式として VE 方式や DB 方式などの試行が行われ、新技術の導入や技術の選択の自由度の向上が図られている。

しかし、新技術の導入にあたっては、過去の実績の蓄積による性能の担保がないため、採用リスクが伴う。また、DB 方式等の実施にあたっては、これまでと異なる役割分担、責任分担が発生することとなる。

本研究では、これら新たに発生するリスクに対する担保手段を確保するにあたり、米国等における保険制度の実態について調査を行ったものである。

1. 研究方法

本調査は、米国等において公共事業に携わる 3 者間（設計者、施工者、発注者）においてどのような保険制度が存在するか調査を行ったものである。

2. 研究成果

2. 1 コンサルタント・施工者に関する保険制度

米国及び英国におけるコンサルタントに関する損害保険制度の概略は表-1 に示すとおりである。

英国・米国共に、損害賠償保険は 1 年間を期間とした企業を対象とした保険であり、その保険対象はクレームによる法的支払い義務が生じた損害及び法廷費用となっている。

また、米国においては施工会社に入札、履行、支払い保証ボンドが適用されている。

表-1 コンサルタントに関する保険制度

	英国	米国
政府規定	・標準賠償責任保険への加入を義務づけ	・FAR により専門家賠償保険への加入が義務づけ
保険の種類	・専門家賠償保険 ・対人対物傷害保険 ・貸与品に対する物損保険（以下、専門家賠償保険について示す）	・年間包括保険 ・プロジェクト保険（以下、年間包括保険について示す）
保険料	—	・売上高の 1～5%（企業の実績と規模から設定）
DB の扱い	・DB は、通常の賠償責任保険とは別扱いとなっている。	・保険によっては、DB 業務上での損害を免責とするものもある。
委託費用への計上	・間接費に見込んでいる	・諸経費として計上

2. 3 DB における保険制度

DB の保険制度としてユタ州の DB による道路事業の事例について調査を行った。ユタ州では工期上の問題から本工事で初めて DB を採用した。本事業において、ユタ州では発注者保険プログラム(OCIP)という包括的な保険サービスを別途調達し、請負業者のリ

スクを特定の範囲でユタ州が負担した。ただし、請負業者は OCIP の限度額を超える分について指定された保険への加入が義務づけられている。OCIP による保証内容及び請負業者への加入義務づけを行っている保険を表-2 に示す。

表-2 OCIP の保険内容と請負業者の加入保険

OCIP による業者への保証事項	請負業者加入保険
・法定労働者補償と雇用者責任保険 ・商業一般責任保険 ・包括責任/超過責任 ・専門家責任保険 ・請負人汚染保険 ・鉄道保護責任保険 ・建設者資産危機保険	・商業一般責任保険 ・労働者補償保険 ・航空機責任保険 ・法定労働者補償と雇用者責任保険 ・商業一般責任保険 ・包括責任/超過責任 ・専門家責任保険 ・請負人汚染保険 ・鉄道保護責任保険 ・建設者資産危機保険

2. 4 DB の契約書と DB 契約におけるクレーム事例

土木工事に関する DB の契約書等は入手できなかったが、GSA(連邦調達庁)による裁判所建築 DB プロジェクトにおけるクレーム事例及び、関連する契約条項の整理結果を表-3 に示す。

表-3 不測事態と関連契約条項

不測事態	関連契約条項
建設途中で作業現場から油が発見され、その排除処理が必要となった。	・地質情報は、建設工事にのみ利用できる。 ・ボーリング調査実施地点間の地質条件を保証するものではない。 ・発注者は施工者がこの情報から導き出した解釈や判断について責任を負わない。 ・追加ボーリング等は施工者により行うこと。追加調査費用は認めない。 ・地下埋設物の調査を実施すること。 ・図示されてない埋設物が発見された場合は埋設物管理者の指示を仰ぎ、破損等があれば修復すること。
ニューヨーク州の耐震基準の改訂に伴う設計の見直しを行った。	建築物の構造は活加重、死加重、地震力、風に対して以下の基準を満たしていること。 ・New York State Fire Prevention and Building Code(NYSFPBC)

施工者は、この不測事態に対して、工期の 314 日間の延長と、約\$800 万の費用を考慮した契約の変更を要求した。結局、このクレームは契約紛争処理法に基づき契約紛争処理委員会に諮られ、施工者に\$280 万へ支払うことで和解した。

2. 5 まとめ

ユタ州の事例にも見られるとおり契約社会と言われている米国においても、DB の採用にあたっては特別な保険制度が用いられている。今後、我が国において性能発注により設計者、請負者の自由度及びリスクの負担範囲が増加するに伴い、成果・工事内容を担保する仕組みを構築していく必要がある。

(高野, 小澤)

8.3 (2) 公共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て土木構造物におけ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及び新技术採用の自由度向上をはかった際に発生する課題（リスク分担の問題等）を明らかにすることを目的として、橋梁をモデルとしたケーススタディを実施するものである。

1. 研究方法

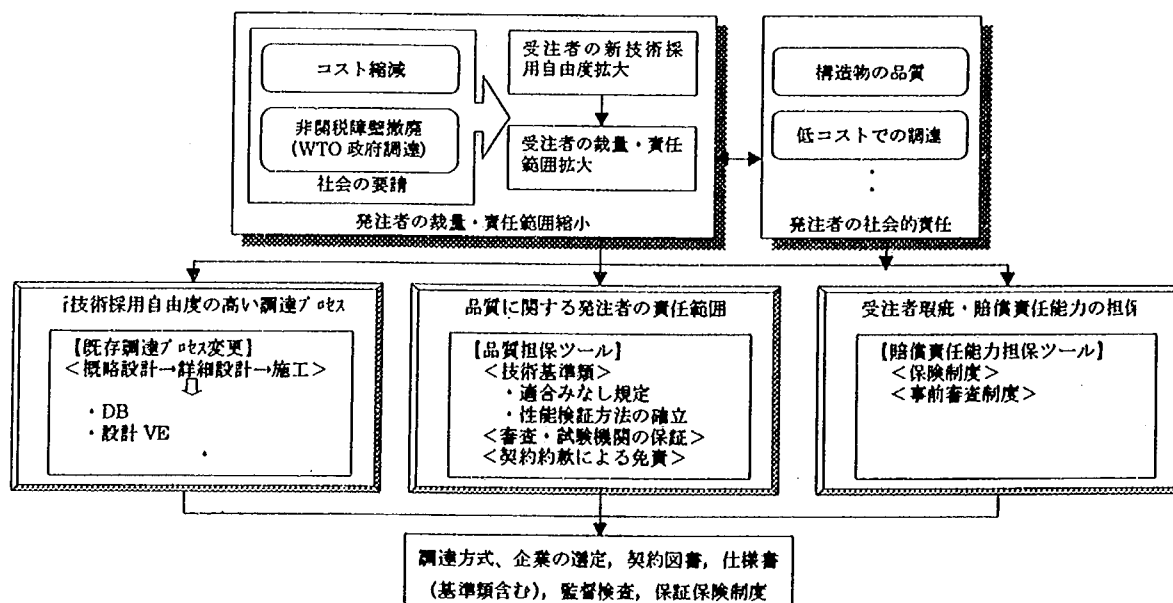
1. 1 調査の概要

本調査では、橋梁の架設において新技术の導入が必要になると想定される周辺条件を設定することにより、これら新技术へ対応するための調達プロセスのあり方や発生するリスクの発注者・受注者間の責任（リスク）範囲及びその担保方策についての課題を抽出すると共に契約図書のあり方について検討を行った。

2. 研究成果

2. 1 技術的自由度と品質確保

公共事業における技術的自由度の拡大をはかるには、受注者の技術的裁量及びそれに伴う責任範囲を拡大する必要がある、これは発注者の技術的裁量、責任範囲を狭めることともなりうる。しかし、発注者には国民に対して構造物の品質を確保すべき社会的責任があり、技術への介入機会の減少を補う新たな品質管理の仕組みを構築する必要がある。（図－1 参照）



図－1 技術的自由度の拡大と品質確保の枠組み

2. 2 ケーススタディ条件の設定

新技術の導入の観点から以下の3ケースを想定して、一般図のみで発注を行った場合のケーススタディを実施した。(ここで①のケース以外は、直接構造物の性能を要求しているわけではないが、新技術の採用という観点からケーススタディを実施した)

①海岸線における架橋：塩害対策の新技術採用をターゲットとする。

②都市部における架橋：新型 RC 橋脚・環境対策の採用をターゲットとする。

③下線部における架橋：急速施工技術の採用をターゲットとする。

2. 2 新技術と検証方法の現状整理

上記で設定したケーススタディの各ケースにおいて、想定される採用技術及び要求事項に対する検証方法等について整理した結果を表-1に示す。

表-1 各ケースでの採用技術及び要求に対する検証方法

周辺条件	海岸部の架橋	都市部の架橋	河川部の架橋
ターゲット技術	塩害対策	景観対策（細身の橋脚）	急速施工
設定要求事項	塩害による補修費の低減、寿命の延長。	・景観に優れたもの（数値設定困難）	・1年で竣工する。
既存技術基準等	塩害対策指針（案） →被りコンクリート	・道路橋示方書	—
想定利用技術	・アラミド等の新素材の採用 ・被覆ケーブルの採用	・繊維補強コンクリートの採用	・プレキャストブロックの採用
検証方法	・竣工時の検証方法は未確立。 （経年変化の計測）。		・竣工年月日で検証可能

2. 3 調達方式

上記の各利用技術により設計条件が異なることとなるが、現在これら技術の主な保有者は設計者ではなく施工者であり、技術の有効利用をはかるには施工者を設計に参画させる仕組みが必要となる。具体的には「DB方式」や「設計VE方式」により施工技術を設計に反映させることとなる。なお、DBによった場合、積算、予定価格の算出方法が課題として挙げられる。

2. 4 品質及び賠償責任の担保方策

(1)新材料の品質確保方策（海岸部、都市部、河川部の架橋）

新材料のリスク（強度、経年変化）は構造的な問題に発展する恐れもあり、どのリスクをどこまで受注者に負担させるか、若しくは発注者責任を全うするために必要最低限の介入範囲をどこまでとするかの議論が先決となる。これを踏まえた上で、受注者に負担させるリスクを担保するための保険制度や第三者機関による品質保証が必要となる。なお、当該材料が構造的な問題に発展しないと考えられる範囲（補修で済む範囲）では、予め補修費を受注者に負担させる契約を結ぶことにより品質の確保が可能と考えられる。

(2)工期の担保方策（河川部の架橋）

現在の契約約款においても工期のリスクは受注者が負担しており問題ないと考えられるが、他機関・地元との調整が必要な場合の取り扱いが課題となる。

2. 5 まとめ

受注者による新技術採用の自由度の拡大をはかるには、裁量・権限と共に責任を受注者に分配する必要が生じてくる。また、発注者としてこれら新技術の品質確保していくためには、新技術の影響範囲に応じた性能担保方策及び賠償責任能力確保方策を確立していく必要がある。

（高野，小澤）

(参考資料)

個別研究課題と予算科目について

個別研究課題と予算科目について

1. 耐震設計の体系化に関する研究

1.1 (1)	土木構造物の防災的見地からの第四紀断層に関する研究	行政部費
1.1 (2)	大規模地震を想定した設計地震動の決定手法に関する試験調査（その1）	道路事業調査費
1.1 (3)	大規模地震を想定した設計地震動の決定手法に関する試験調査（その2）	道路事業調査費
1.2	公共土木施設の耐震設計水準の横断的整合に関する研究	行政部費

2. 水環境における水質リスク管理に関する研究

2.1	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
2.2	下水処理水の安全性向上に関する研究	行政部費
2.3	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
2.4	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
2.5	生態系からみ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
2.6	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
2.7	水道水源河川における汚濁物質モデルに関する研究	行政部費

3. 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

3.1	河川のハビタットに関する調査	河川事業調査費
3.2	自然作用を活用した共生型川づくりに関する研究	河川事業調査費
3.3	水域ネットワークの保全手法に関する研究	行政部費
3.4	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	河川事業調査費
3.5 (1)	新素材・新工法を用いた防衛工の開発 （侵食防止シート、ポーラスコンクリート、連続浅工法、新型ふとんかご、河岸侵食予測手法）	河川事業調査費
3.5 (2)	新素材・新工法を用いた防衛工の開発（樹木群による破堤軽減工法）	河川事業調査費
3.5 (3)	新素材・新工法を用いた防衛工の開発（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）	河川総合開発事業調査費
3.5 (4)	新素材・新工法を用いた防衛工の開発（ポーラスコンクリート）	河川総合開発事業調査費
3.6	溪畔林を活用した流路整備に関する調査	砂防事業調査費
3.7	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
3.8	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
3.9	人工生態礁による富栄養化対策に関する調査	地方建設局等依頼経費
3.10	生態系の保全・生息空間の創造技術の開発	建設技術研究開発経費

4. 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

4.1 (1)	都市における屋上緑化可能地の推定調査	
4.1 (2)	都市気候の数値シミュレーションに関する研究	
4.2 (1)	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	行政部費
4.2 (2)	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	行政部費

5. 走行支援道路システム（AHS）に関する研究開発

5.1	AHS：コンセプト・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
5.2	AHS：システムの設計に関する調査	道路事業調査費
5.3	AHS：システムの評価に関する調査	道路事業調査費
5.4 (1)	AHS：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
5.4 (2)	AHS：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
5.4 (3)	AHS：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
5.4 (4)	AHS：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
5.4 (5)	AHS：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

6. 建設事業のコスト縮減に関する研究

6.1	道路構造物の建設コスト縮減に資する設計標準化に関する調査	道路事業調査費
6.2 (1)	道路事業プロセスにおける建設コスト縮減方策の調査	道路事業調査費
6.2 (2)	河川事業プロセスにおける建設コスト縮減方策の調査	河川事業調査費
6.3	地形改変を低減するのり面対策工法に関する調査（山折道路への軽量盛土工法の適用）	道路事業調査費
6.4	擁壁構造物の設計合理化に関する調査	道路事業調査費
6.5	小規模シールド工事のコスト縮減化に関する調査	下水道事業調査費
6.6	経済性に優れた新しい橋梁の走行面に関する試験調査（その1）	道路事業調査費
6.7	軟弱地盤の合理的な沈下すりつけ対策に関する調査	道路事業調査費
6.8 (1)	管渠システムのコスト縮減に関する調査	下水道事業調査費
6.8 (2)	管渠システムのコスト縮減に関する調査	下水道事業調査費

7. 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

7.1 (1)	建設分野における外部コストの評価手法の開発に関する研究	建設技術研究開発経費
7.1 (2)	建設分野における外部コストの評価手法の開発に関する研究（都市公園の経済評価調査）	建設技術研究開発経費
7.1 (3)	建設分野における外部コストの評価手法の開発に関する研究	建設技術研究開発経費
7.2 (1)	建設副産物の発生抑制技術の開発	建設技術研究開発経費
7.2 (2)	建設副産物の発生抑制・再利用拡大技術の開発	建設技術研究開発経費
7.3 (1)	維持補修分野における外部コスト削減対策	建設技術研究開発経費
7.3 (2)	環境負荷低減型材料の開発	建設技術研究開発経費
7.4	建設事業の外部コストの内部化に関する調査	建設技術研究開発経費

8. 建設事業の品質管理体系に関する研究

8.1 (1)	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
8.1 (2)	要求性能と品質レベルの相関性の検討（一）構造物の性能に与える品質の影響度一	建設技術研究開発経費
8.1 (3)	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
8.2 (1)	施工情報活用による品質管理・検査の合理化技術（シールド工）	建設技術研究開発経費
8.2 (2)	土構造物の品質管理技術の開発	建設技術研究開発経費
8.2 (3)	コンクリート材料・構造物の品質検査技術の開発（一）非破壊検査・高知能検査等一	建設技術研究開発経費
8.2 (4)	鋼構造物の品質検査試験技術の開発	建設技術研究開発経費
8.2 (5)	鋼構造物の品質検査試験技術の開発	建設技術研究開発経費
8.3 (1)	公共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
8.3 (2)	公共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