

I S S N 0386 - 5878

土木研究所資料第3773号

マイクロフィルム用資料

平成 12 年 度

土木研究所講演会
講演集

平成13年 2 月

国土交通省土木研究所

Copyright © (2001) 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12年度

土木研究所講演会 講演集

企画部企画課

要 旨

本資料は、平成13年2月2日に開催される「平成12年度土木研究所講演会」の講演内容をまとめたものである。この講演会は、土木研究所が実施している調査研究の成果や最近の土木技術に関する話題、動向などを各方面に紹介することを目的として、毎年1回開催している。

キーワード：土木研究所講演会、外部コスト、ダム貯水池、下水道、地震防災、
自然共生研究センター、走行支援道路システム、リスクマネジメント

目 次

外部コストを組み入れた 建設事業コスト低減について	建設マネジメント 技術研究官 藤 本 聡	1
社会生活を支えるダム貯水池の有効活用	ダム部長 高 須 修 二	23
下水道における雨水対策の過去・現在・未来	下水道部長 中 村 栄 一	43
特別講演「21世紀の日本社会と リスクマネジメントのあり方」	日本リスク研究 学会会長 酒 井 泰 弘	53
地震防災・耐震技術の新たな視点	耐震技術研究センター長 常 田 賢 一	61
自然共生研究センターにおける研究とその課題	生態保全技術研究官 佐 合 純 造	81
走行支援道路システム（AHS）実証実験について	道路部長 中 村 俊 行	103

外部コストを組み入れた

建設事業コストの低減について

建設マネジメント技術研究官

藤 本

聡

外部コストを組み入れた建設事業コストの低減について

建設マネジメント技術研究官 藤本 聡

1. はじめに

建設事業に携わる者は、「良質で安価な社会資本をタイムリーに提供すること」を使命としている。このために、品質の確保や公共工事のコスト縮減などの様々な施策が実施されている。特に、コスト縮減については、平成 9 年 4 月に「公共工事コスト縮減に関する行動指針」が全閣僚を構成員とする公共工事のコスト縮減関係閣僚会議において策定されたのを受け、建設省において、「公共工事コスト縮減行動計画」（平成 9 年度～11 年度）が策定され、当初目標をほぼ達成するに至っている、また、本年度から新たな行動計画（「新行動計画」と略する）がスタートするなど、なお一層の積極的な取り組みが図られているところである。

一方、建設活動は、事業実施に伴う生態系への影響や建設工事による騒音・振動・交通渋滞の発生など、地球環境や生活環境に様々な負荷を与えている。これらの負荷は、原因者である建設事業者が負担せず、広く社会一般が負担しているコストということができ、後世に人類が大きな代償を支払うことにもなりかねない。

これらのことから、今後さらに着実に建設事業を執行していくに際しては、建設コストの縮減を図ることはもちろん、環境への影響なども配慮した質の高い社会資本整備を図っていくことが極めて重要な課題となっている。

このため、現在建設事業者が負担しているコストに加えて、前述の環境負荷などをコストとして捉え総合化した上で、新たなコストの概念を構築し、その低減を図っていく必要があると考えている。（新行動計画には、その旨が盛り込まれている。）

国土交通省土木研究所では、この総合的な建設事業コストの低減を目的として、外部コストの評価手法、総合的な建設事業コストの評価手法、外部コスト低減のための新技術の開発等に取り組んでいる。

本稿は、これらの取り組みのうち、総合的なコストの評価に関わる研究の状況について報告するものである。

2. 外部コストを組み入れた総合的なコストの考え方

2.1 外部コストの考え方

本研究においては、前述の問題認識から、「建設活動によってもたらされる好ましくない影響で、事業主体が金銭負担せず、社会一般が何らかのかたちで強いられている負担」を「外部コスト」と称することとする。

なお、経済学の分野においては、これに類似する用語として「外部不経済」「外部費用」がある。この場合、経済主体の行動による他の経済主体への影響が市場を経由したか否かにより内部若しくは外部と定義する場合が多い（すなわち、市場を経由したものを内部、市場を経由していないものを外部）。しかし、ある経済主体の行動が他の経済主体に影響を与える現象を外部性と捉え、そのうち、市場を経由するものを金銭的外部性、市場を経由しないものを技術的外部性とする場合もある。建設事業の場合には、市場では適切に供給されない公共財を供給するのが本来の使命であることから、経済学における内部・外部の概念は当てはまらないが、前述の「外部コスト」は、意思決定主体の行動が他の主体に正当な補償なく影響を与えるという点では「外部費用」に類似した概念であるとも考えられる。本研究では、事業主体がその行動による負の影響を建設事業コストとして負担しているか否かがポイントとなるため、事業主体が直接負担する範囲を内部、事業主体以外が負担する範囲を外部として捉えている。

2.2 様々な外部コスト

建設事業における外部コストは、建設事業の計画から施工・維持管理さらには施設の解体廃棄に至るライフサイクルを通じて発生し、生活環境、自然環境、社会環境など様々な側面に影響を与えている。さらに、事業の種類や事業の各段階によっても発生する外部コストは異なってくる。騒音・振動・排気ガスの発生のような生活環境や自然環境に影響を与えるものから、工事による渋滞や合意形成の不調のような機会損失に関わるもの、さらには、景観の阻害といったものも外部コストと捉えることができる。（図 2-1）

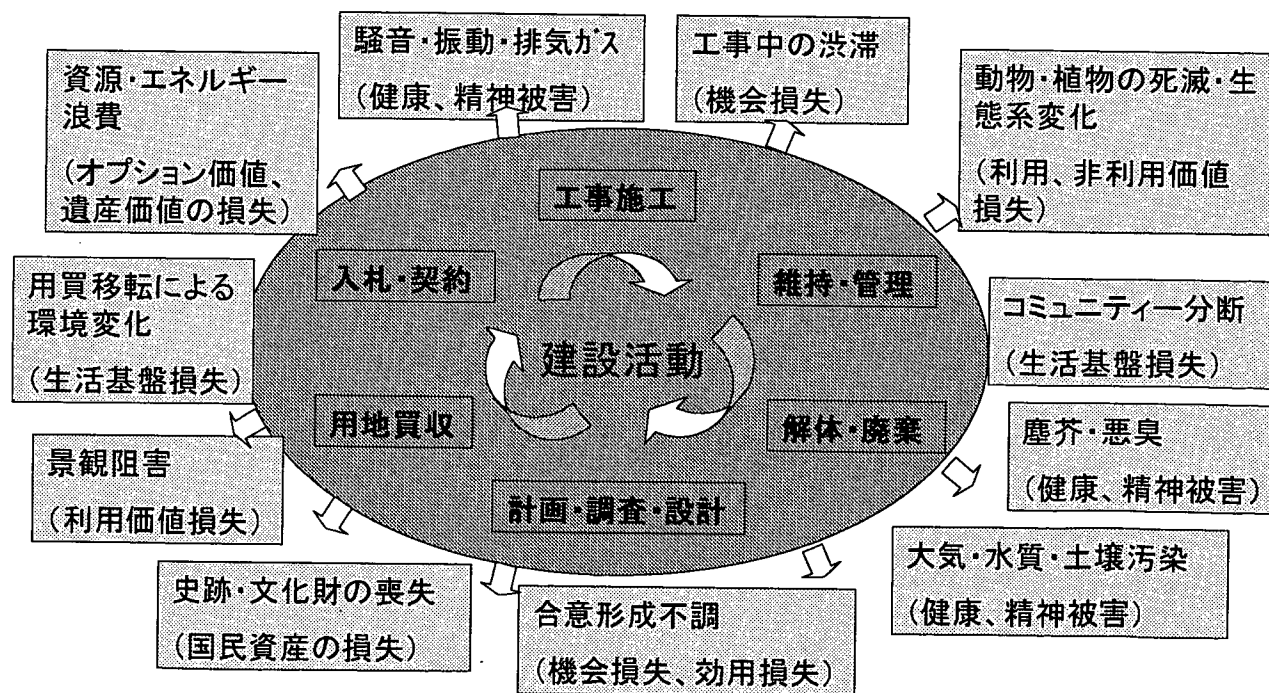


図 2-1 建設活動による様々な影響

建設事業に伴う外部コストを評価するにあたっては、発生する外部コストを網羅的に把握することが必要である。本研究では、ライフサイクルにおける段階区分、事業分野、環境区分を設定し、要因、発生事象、帰着先（影響の受ける先）が明らかとなる表現で外部コストの整理を行った。表 2-1 にその総括表の一部分を例示的に示す。

ここでは、ライフサイクルにおける段階区分を、①計画設計段階、②材料・機械製造段階、③施工・改修段階、④維持管理・運用段階、⑤解体廃棄段階、⑥副産物処理処分段階の 6 段階とし、建設事業の分野を、①河川・ダム・海岸、②道路、③公園、④下水道、⑤建築としている。

環境区分は、①自然界に影響を与えるものとして「自然環境」、②公害などのように人間の日常生活に直接影響を与えるものとして「生活環境」、③人間の経済活動・文化活動に影響を与えるものとして「社会環境」の区分を設け、さらに、その細区分として環境影響評価の区分をベースに、大気汚染・騒音・振動などの 22 区分の設定を行っている。

また、記載にあたっては、外部コストの帰着先を、地域住民の場合を「住民」、一般国民を「国民」、農業・漁業等の産業関係者の場合を「産業」として明示している。

2.3 建設事業におけるコスト評価の現状

建設事業は、その事業プロセスに応じて様々な意思決定を行いながら進められており、この意思決定は、建設コストに大きな影響を与えている。一般に、図 2-2 に示すように、事業着手以降、概略設計段階では選択の幅が大きいので、コストへの影響度も大きく、実施設計、工事の施工と進むにつれてコストへの影響度は減少していく。すなわち、事業の上流側での意思決定が建設コストを大きく左右することとなる。工事に伴う周辺への影響等の外部コストへの対応についても同様に、上流側では多くの選択肢が考えられることから外部コストへの影響度が大きく、事業の進捗につれ選択肢が限定され、外部コストへの影響度が小さくなると考えられる。

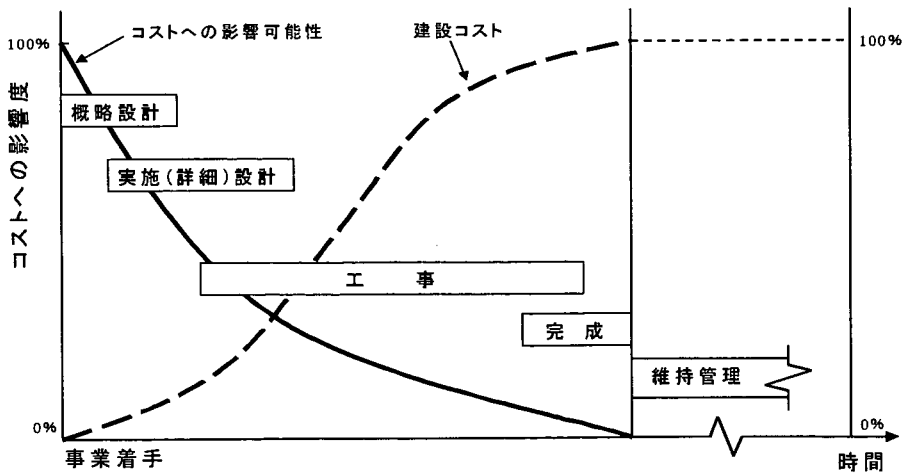


図 2-2 コストへの影響要因と時間との関係

表 2-1 外部コスト整理シート（総括表一例）

環境区分	ライフサイクル	(1)計画設計	(2)材料・機械製造	(3)施工・改修	(4)維持管理・運用	(5)解体廃棄	(6)副産物処理処分
自然環境	植物・動物		・ 原材料の採取ならびに運搬用トラック等が引き起こす周辺の植物・動物への影響（住民）（国民）（産業）	・ 建設工事が引き起こす建設現場周辺の植物・動物への影響（住民）（国民）（産業）	・ ダム・堰・護岸等建設による水生植物・動物への影響（住民）（国民）（産業）《河川・ダム・海岸》 ・ 道路交通が引き起こす道路周辺の植物・動物への影響（住民）（国民）（産業）《道路》		
	地形・地質			工事による重要な地形・地質（化石の産地等）の消失。（住民）（国民）（経済）			
	地下水		・ 原材料の採取による地下水の影響（住民）	・ 建設工事に伴う地下水位の低下及び汚染（住民）	・ 施設の存在による（トンネル等）による地下水位の低下（住民）		・ 副産物処理処分場の廃棄物による地下水の汚染（住民）
生活環境	大気質		・ 工場での製造ならびに運搬用トラック等から発生する NO _x 、SO _x 等（住民）	・ 施工・改修現場から発生する NO _x 、SO _x 等（住民）	・ 補修工事現場から発生する NO _x 、SO _x 等（住民） ・ 道路交通から発生する NO _x 、SO _x 等（住民）《道路》 ・ 空調等によって発生する熱の放出（住民）（国民）《建築》	・ 解体工事現場から発生する NO _x 、SO _x 等（住民） ・ 建物解体工事現場から発生するほこり等（住民）《建築》	・ 副産物処理処分場から発生する NO _x 、SO _x 等（住民）
	温室効果ガス等		・ 工場での製造ならびに運搬用トラック等から発生する CO ₂ （国民）	・ 施工・改修現場から発生する CO ₂ （国民）	・ 補修工事現場から発生する CO ₂ （国民） ・ 道路交通から発生する CO ₂ （国民）《道路》	・ 解体工事現場から発生する CO ₂ （国民）	・ 副産物処理処分場から発生する CO ₂ （国民）
	騒音		・ 工場での製造ならびに運搬用トラック等から発生する騒音（住民）	・ 施工・改修現場から発生する騒音（住民）	・ 補修工事現場から発生する騒音（住民） ・ 道路交通から発生する騒音（住民）《道路》	・ 解体工事現場から発生する騒音（住民）	・ 副産物処理処分場から発生する騒音（住民）
	振動		・ 工場での製造ならびに運搬用トラック等から発生する振動（住民）	・ 施工・改修現場から発生する振動（住民）	・ 補修工事現場から発生する振動（住民） ・ 道路交通から発生する振動（住民）《道路》 ・ 建築設備の運用による振動（住民）《建築》	・ 解体工事現場から発生する振動（住民）	・ 副産物処理処分場から発生する振動（住民）

（注）括弧（）内は外部コストの帰着先を表す。括弧《》は全事業分野共通ではなく個別事業分野に係るものを指す。

事業段階

道路事業のプロセス

意思決定要素

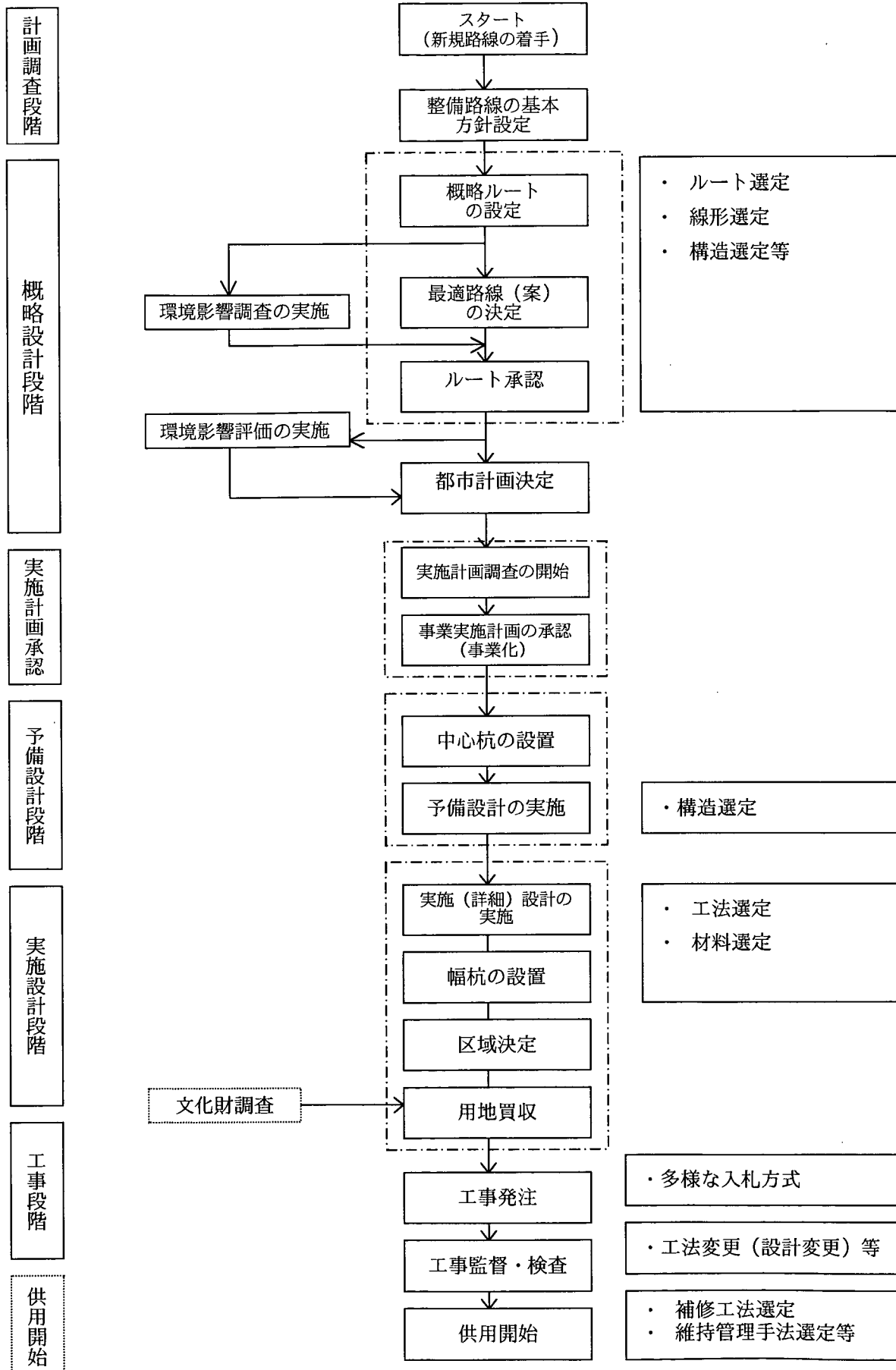


図 2-3 道路事業プロセス

道路事業の場合、図 2-3 に示すように事業の実施が決定されると、事業費に大きな影響を与える概略設計段階では、工事費や地形、周辺地域への影響などを考慮してルートを選定や線形選定、構造選定等が行われる。次のステップの予備設計においては詳細な構造の選定、実施設計段階では施工方法・機械の選定や使用材料の選定等が行われる。さらに、工事の施工段階においては現場での条件変更等により設計変更を、供用段階においては補修工法や維持管理工法を選択している。こうした選定は、これまでは事業費（工事費）による定量的評価と周辺地域への影響等の定性的評価の組み合わせにより行われていることが多い。

また、時代の要請に応じて、これまでに外部コストを低減させる様々な技術が開発されてきている。例えば、工事中の杭打機の振動による外部コストに着目すると、従来のバイプロハンマ（普通型）から、低振動型として、バイプロハンマ（高周波型）、同（可変高周波型）、同（可変超高周波型）さらには油圧式杭打機等様々な振動低減技術が時代の推移とともに開発されてきている。一般に、前述のような技術の採用による外部コストの低減量が大きければ内部コストである工事費（運転費）は大きくなる傾向にあり、特に、開発初期の段階では研究開発費用を回収するため、工事費（運転費）は高価になる。

従前より、建設事業においては、工事費（運転費）や法令上の規制値、周辺地域への影響等を総合的に評価した上で技術の選択がなされている。しかし、工事費や法令上の規制値は定量評価が可能である一方、周辺地域への影響等は定性的評価に留まっていることが多いため、従来工法と比較して高価な新技術の評価が適切に行われず採用されにくい傾向にある。

2.4 総合的な建設事業コストの低減

「総合的な建設事業コスト（総コスト）」は、事業者が直接負担する「内部コスト」と、事業者が直接負担せず社会全体として負担を強いられている「外部コスト」を合計したコスト概念として捉えるものである（図 2-4）。総コストによる評価を行うためには、外部コストを内部コストと同じものさしで計測する必要がある。すなわち、内部コストと同じように、外部コストについても貨幣価値で評価できれば、両者を足し合わせ

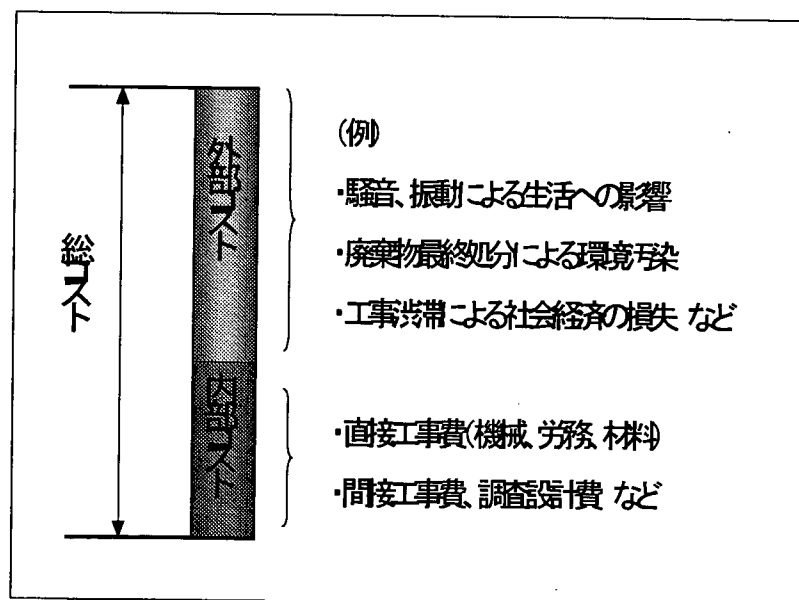


図 2-4 総コストの概念

た総合的な建設事業コストを比較することによって代替案の選択や新技術の評価が適切に行えるようになる。

従前のコスト低減は、「内部コスト」を主眼に取り組みられてきており、狭い意味でのコストの低減が図られてきたが、社会的にみて必ずしもコスト低減につながっていないという懸念もある。したがって、「内部コスト」だけでなく、「外部コスト」も含めた「総コスト」を低減することを考えていく必要がある。

例えば図 2-5 における対策 A を選択した場合、対策前と比べて外部コストが低減される。このとき、対策費用が必要となるが、それらを合わせた総コストは低減される。一方、対策 B の場合は、外部コストは低減されるものの、その効果を上回る対策費用が必要となるため、総コストは増大してしまう。

ただし、対策 B のケースでは、総コストが対策前に比べ増大することから採用されにくい傾向にあると思われるが、以下

のような留意も必要と考えられる。外部コストを低減させる新技術などは、前述の 2.3 で述べたように、実用化された当初は高価であることが多い。しかし、新技術が普及するにつれて、価格が低減し、総コストの低減が図られる場合も多いと考えられる(図 2-6)。したがって、新技術の採用が、その後の技術の普及を促進し、価格を低下させる効果を持つことにも留意する必要がある。

本研究では、以上のような総コストの考え方を、今後のコスト縮減施策の評価に適用すると同時に、事業の各段階の意思決定に活用しようとするものである。

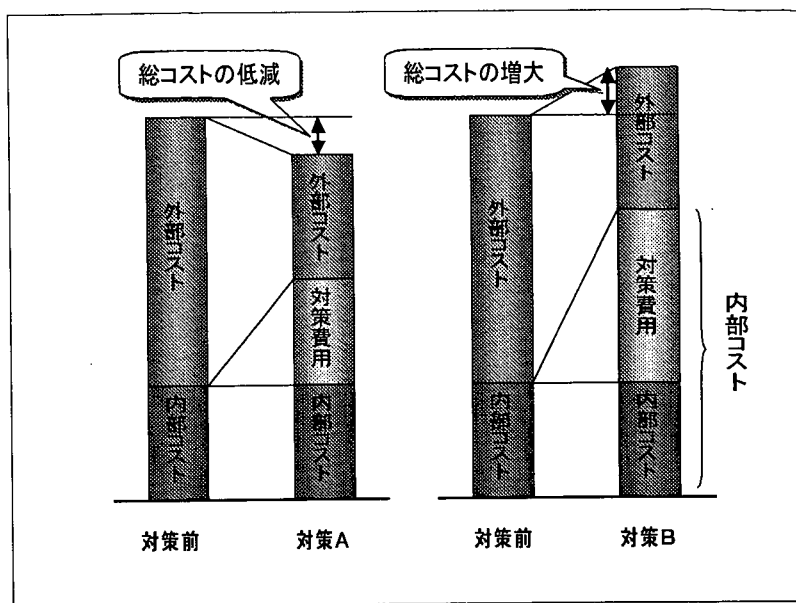


図 2-5 外部コストを低減させる対策

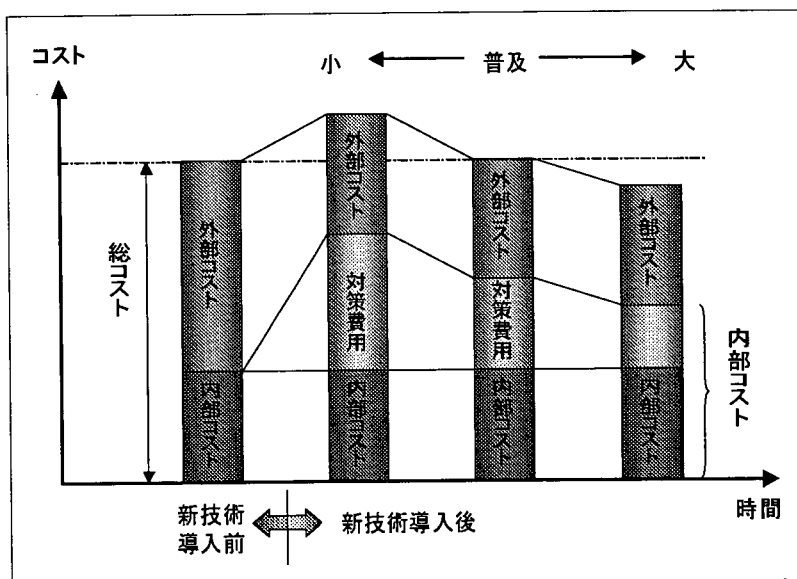


図 2-6 技術の普及による内部コストの低減

3. 外部コストの評価手法

ここでは、外部コストを貨幣価値で評価するための手順や計測手法について示す。

3.1 外部コスト評価の手順

外部コストを、計測漏れや二重計算なく適切に評価するためには、事業における意思決定場面毎に、図 3-1 で示した手順を踏まえて評価を実施する必要がある。

ただし、どのような評価手順が適切なのかについても絶えず見直しを行い、新たな知見を積極的に取り入れるなど、柔軟な対応を図っていくことも必要である。

以下、それぞれの手順について示す。

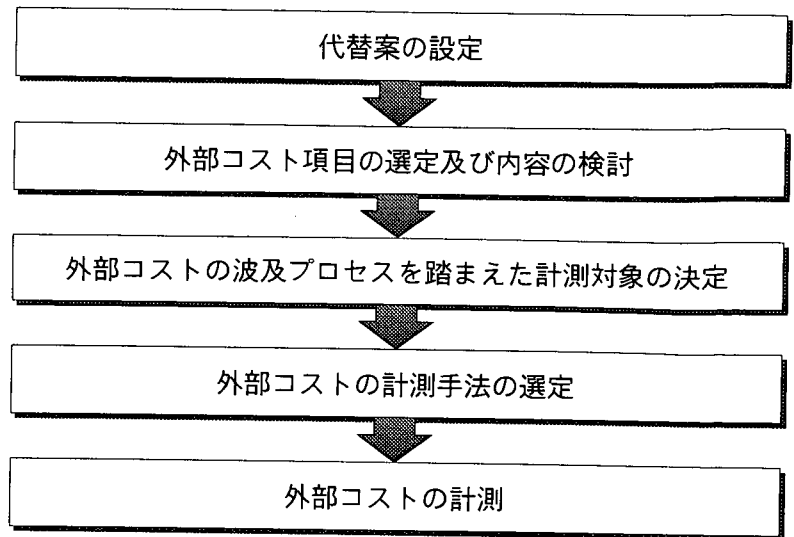


図 3-1 外部コスト評価の手順

3.2 外部コスト項目の選定及び内容の検討

建設事業の各意思決定段階において代替案を設定し、以下の手順に従い、評価対象とすべき外部コスト項目を選定し、代替案毎に外部コストの内容を検討する。

(1) 外部コストの体系的整理

まず、外部コストを広く漏れなく抽出することが大切である。そのため、「外部コスト整理シート」(表 2-1 の一例参考)などを活用しながら、事業の各段階で発生すると考えられる外部コスト項目を抽出する。

(2) 外部コスト項目の選定

代替案の選択において考慮すべきと考えられる項目について検討し、評価対象とすべき外部コスト項目を選定する。選定にあたっては、「社会的要請が高い」ものや、「内部化施策が不十分」と考えられるものを重点的に選定することが重要である。また、「安全・生命に与える影響」、「不可逆性・唯一性」、「不確実性」等にも十分留意する必要がある。また、代替案の選択において考慮すべき外部コスト項目を選定するという観点からは、「代替案の間で差が出る項目」を選定することが原則となる。言い換えれば、選択肢の間で全く差がつかない項目は選定する必要がないことになる。

(3) 外部コストの内容の検討

各代替案毎に、選定された外部コスト項目の内容について検討し、比較検討が可能とな

るように定性的な記述を行う。実際の外部コスト評価では、事業の種類や段階等により、重点外部コスト項目やその外部コストの内容は異なると考えられるため、一律に適用可能なルールは存在せず、ケースバイケースで対応すべきものである。

3.3 外部コストの波及プロセスを踏まえた計測対象の選定

外部コストの多くは、多段階に渡って波及していくと考えられる。この場合、一つの影響を異なる段階で計測して加算してしまったり、他の影響と相殺するために計測から漏れるといった誤りが発生しやすい。このような計測漏れや二重計算を防ぐために、外部コストの波及プロセスを分析した上で、計測対象を適切に選定することが必要である。例えば、以下に示すような手順に従って外部コストの波及プロセスを分析することが考えられる。

(1) 時間軸上での波及関係の整理

外部コストの計測対象の選定にあたっては、ライフサイクルの時間軸に沿って、事業における各段階での意思決定、その意思決定に基づく行為、その行為により発生する影響という3者の関係を整理することが有用である（図 3-2 参照）。意思決定から行為というプロセスでは、例えば計画段階での意思決定によってある事業案が選択された場合、その事業案に基づく用地買収、工事、改修等の行為が実施されることになる。また、行為から影響というプロセスでは、例えば、①コンクリートの使用という行為に伴い、原材料の製造段階での CO_2 の排出といった上流側での影響や、廃棄物の処理費用や環境汚染といった下流側での影響が発生するパターン、②建設機械の使用という行為に伴う騒音・振動などのように同時に影響が発生するパターン、③地形の改変という行為に伴う生態系への長期的な影響といった継続的に影響が発生するパターンなどが考えられる。したがって、適切

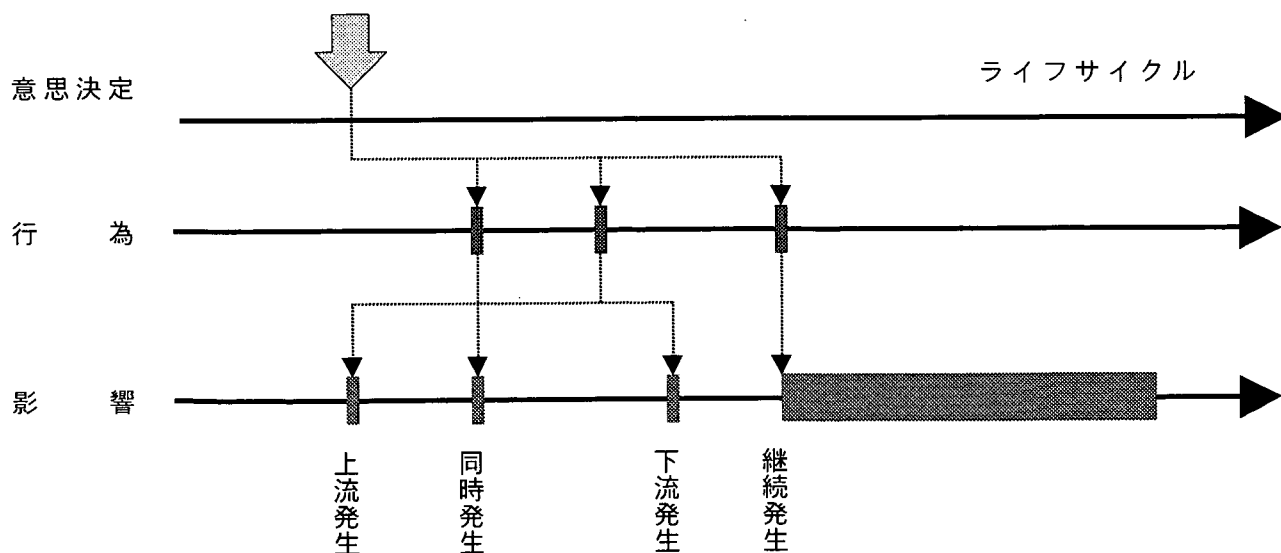


図 3-2 3つの時間軸と外部コストの波及関係

な意思決定を行うには、時間軸上において外部コストがどのようなパターンで発生するかについて十分に考慮する必要がある。

(2) 影響が多段階に渡って波及する場合

影響が多段階に渡って波及する場合、計測対象として捉える時点がいくつか考えられる場合や、行為が背反する性格を有し複合的影響を及ぼす可能性があることについても留意する必要がある。

例えば、工事実施時のコンクリートの使用は、セメント製造時の CO_2 の発生につながり、それが長期的に累積することにより大気中の CO_2 濃度の上昇、そして地球の温暖化につながるといわれている。また、地球の温暖化は海面上昇とそれによる低標高地の水没や、気候パターンの変化による水害・干ばつの発生を招く可能性がある(図 3-3 参照)。しかしながら、それらの影響については明確な因果関係が存在するわけではなく、外部コストの評価に水没地の面積や水害・干ばつの発生頻度などを用いるのは、困難である。一方、 CO_2 の発生という現象は、どこでどのようにして発生しても同等の影響が予測されることから、 CO_2 の発生量で影響を捉えることが適切であると考えられる。

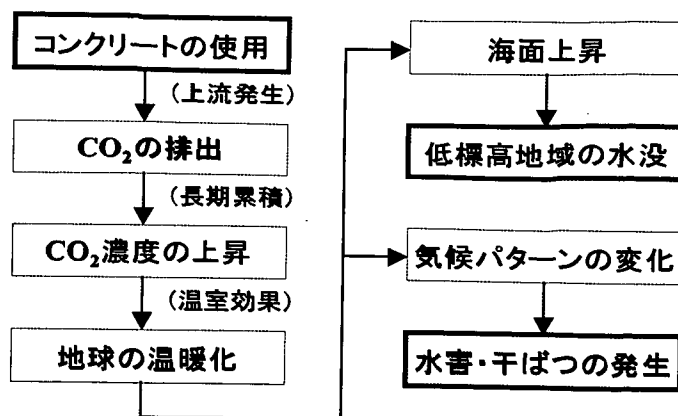


図 3-3 コンクリートの使用による影響

(3) 複合的な影響がある場合の留意点

ある行為が複合的な影響をもたらす場合については十分留意する必要がある。特に、背反する影響が現れる場合は、二重計算の誤りを犯しやすい。例えば、図 3-4 のように、道路の開通によって利便性が向上し、立地効用が増加することにより地価が上昇することがある。一方、道路の開通による騒音の発生が居住の効用を減少させ、地価の下落を引き起こすケースも考えられる。この場合、道路の開通による正負の効果が地価に影響し、差し引き正味額として地価の変動が観察されるが、これを利便性向上の便益と捉え、騒音による影響を別途計測して足し合わせれば、騒音によるマイナス便益を二重計算すること

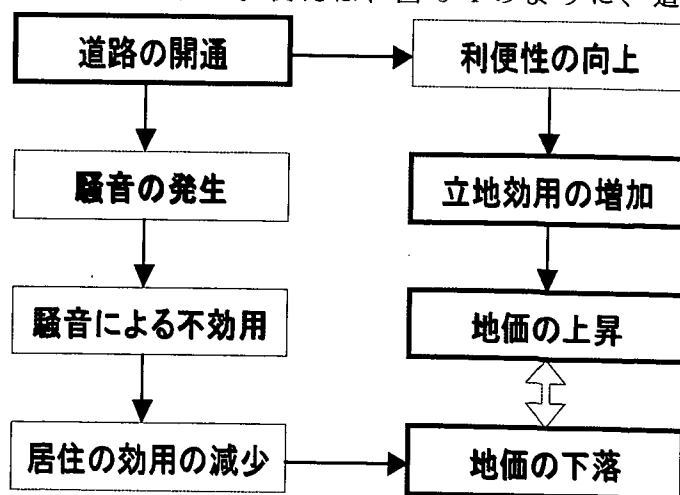


図 3-4 道路開通による複合的(背反的)影響例

になる。

このように、ある行為が正または負の一方のみの影響を引き起こすのではなく、正負両方の影響を同時に発生させることについても十分に留意する必要がある。

3.4 外部コストの計測手法の選定

外部コストの計測にあたっては、外部コストの類型や計測手法の適合性を検討した上で、適切な計測手法を選定する。以下に、外部コストの計測手法の選定の考え方を示す。

(1) 外部コストの類型の整理

各外部コスト項目は、それぞれ異なる特性を持っており、それにしたがって適用すべき計測手法も異なる。ここでは、市場価格の有無という観点から外部コスト項目を表 3-1 に示すように3つの類型に分けて計測手法について検討した。

表 3-1 外部コストの類型と計測方法

類 型	財の特性	計測手法
市 場 財	市場で取り引きされる財	・ 市場価値を計測 ・ シェドウ価格の算出
準市場財	市場で取り引きされていないが、貨幣価値で計測されている財	・ あらかじめ計測された貨幣価値から算定 ・ 便益移転(原単位法)
非市場財	市場で取り引きされておらず、貨幣価値が存在しない財	・ 便益移転(他事例からの移転) ・ 非市場財の貨幣価値換算法の適用 ・ 非貨幣価値計測(定性的計測含む)

(2) 便益移転による評価

準市場財や非市場財の性格を持つ外部コスト項目の計測手法として、既存の調査事例から当該事業における便益額を推定する便益移転が有効と考えられる（外部コストも負の便益と考えて同様に適用することが可能である）。現在、道路事業やその他の事業評価マニュアルで広く採用されている原単位を用いて便益や費用を推計する手法も、広義の便益移転の一つといえる。表 3-2 にそれらの特徴を整理する。

便益移転は、アンケート調査などの必要がなく、簡便に便益や費用を算出できるが、それらは原単位や移転元の調査事例に大きく左右されるため、その実用化には、計測事例の蓄積や移転時の信頼性の検証が必要である。

表 3-2 便益移転の特徴

方式	内容	事例	留意事項
原単位法	既存調査事例から予め便益額の標準的な値を設定	CO ₂ 排出量、時間価値	適用範囲のチェック
他事例からの移転	類似の調査事例から、評価額または便益関数を移転	アメニティ	類似性、適合度、精度のチェック

(3) 非市場財の貨幣価値換算手法による評価

非市場財の性格を有する外部コスト項目を計測するにあたっては、非市場財の価値を類型化し、それを踏まえた計測手法の検討が必要となる。図 3-5 に非市場財の類型化の例を示す。

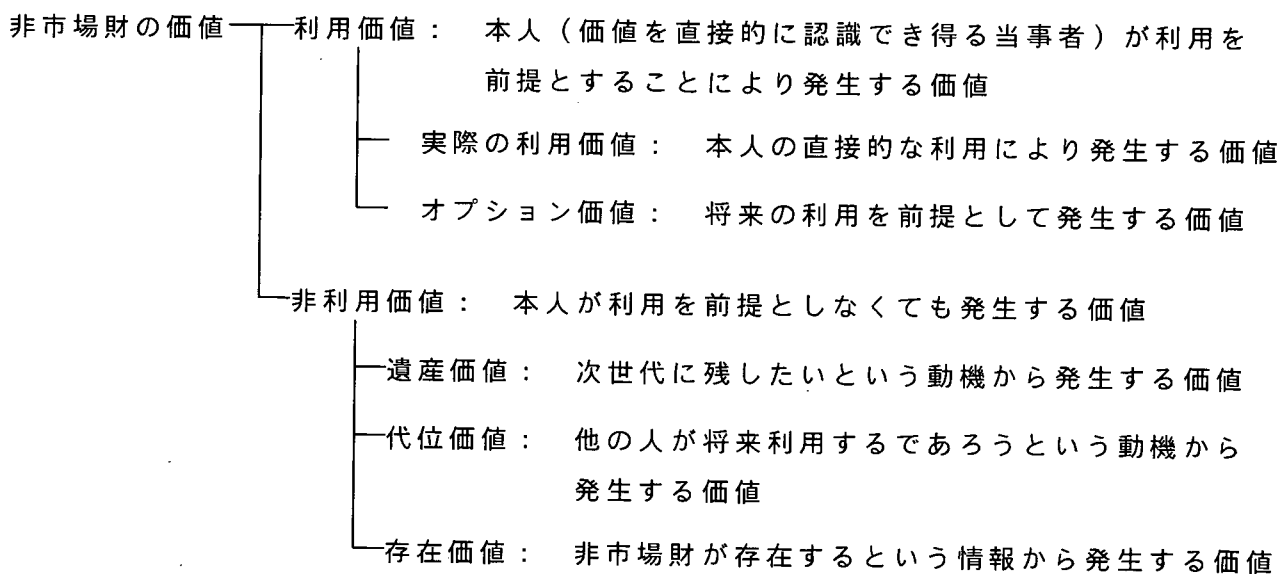


図 3-5 非市場財の分類（林山〔文献 2〕を基に簡略化）

非市場財の貨幣価値換算手法には、大別して、実際に市場に現れた現象を捉える顕示選好法(RP: Revealed Preference)と、人々の支払意志額(WTP: Willingness To Pay)等をアンケートにより直接尋ねる表明選好法(SP: Stated Preference)がある。両手法は、評価における恣意性の余地や直接的な計測の可能性という観点から、表 3-3 に示すような特徴を持ち、一長一短がある。

具体的な計測手法としては、近年様々な手法が発達してきており、事業の特性や前述の類型化を踏まえて適切な手法を選定する必要がある。表 3-4 は、代表的な 6 つの計測手法についての概略及び特徴と適合性を整理したものである。

表 3-3 顕示選好法と表明選好法の比較

	恣意性の余地やバイアス	直接計測性	代表的な計測手法
顕示選好法	市場に現れた現象を捉えるため、恣意性が入り込む余地が少ない	・適切な代理市場が必要 ・事前評価の場合には、便益移転となるため事例の蓄積と移転の信頼性の検証が必要	・ヘドニック法 ・旅行費用法
表明選好法	アンケートの質問方法やシナリオ設定などにより種々のバイアスが発生	・対象事業について直接的に支払意志額を尋ねることができる ・実現していない事業や非利用価値も評価できる	・CVM ・コンジョイント法

表 3-4 非市場財の計測手法の整理

計測手法	計測方法の概略	特徴と適合性
代替法	計測しようとする非市場財と同等の効用を生む市場財を想定して財の価値を評価	直感的かつデータ収集容易だが、適切な代替材や代替サービスが不可欠
ヘドニック法	環境質の価値が地価に反映することを利用し、環境質を含む諸属性と地価の重相関分析を行い、環境質の価値を評価	一括評価が可能だが、計測項目が地価関数に大きく反映される必要あり
CVM（仮想評価法）	評価対象となる財の内容を住民等に説明し、その財に対する支払意志額を問い、評価対象となる財の価値を評価	非利用価値も含め計測対象の制約はないが、表明選好ゆえのバイアスあり
TCM（旅行費用法）	評価対象施設を訪問する人が支払う交通費や利用のために費やす時間の機会費用を求め、評価対象施設の価値を評価	顕示選好のため恣意性は少ないが、利用価値の計測に限定される
コンジョイント法	評価対象財の様々な属性別に人々の選好を質問し、その結果から財の価値を評価	個別環境要素の原単位化可能だが、CVM同様の問題があり、適用例も不十分
産業連関分析	産業間の取引を記述した産業連関表をもとに、産業間に波及していく効果を計測	理論的に確立しているが、事前の貨幣化が前提

※ 産業連関分析自体は非市場財の計測手法ではないが、市場取引を経由して影響が波及した結果として CO₂ や廃棄物の排出といった外部コストが発生する場合に利用できる。

4. 外部コストの評価事例

4.1 都市トンネルの建設工法選定における外部コストの評価

4.1.1 概要

ここでは、ケーススタディとして、都市トンネルの建設工法（代替案として、山岳工法（NATM）、シールド工法、開削工法を設定）の選定（図4-1 参照）にあたり、これまでコストとして考慮していなかった地上部での交通規制、騒音等の周辺環境に与える様々な外部コストの評価を行った。

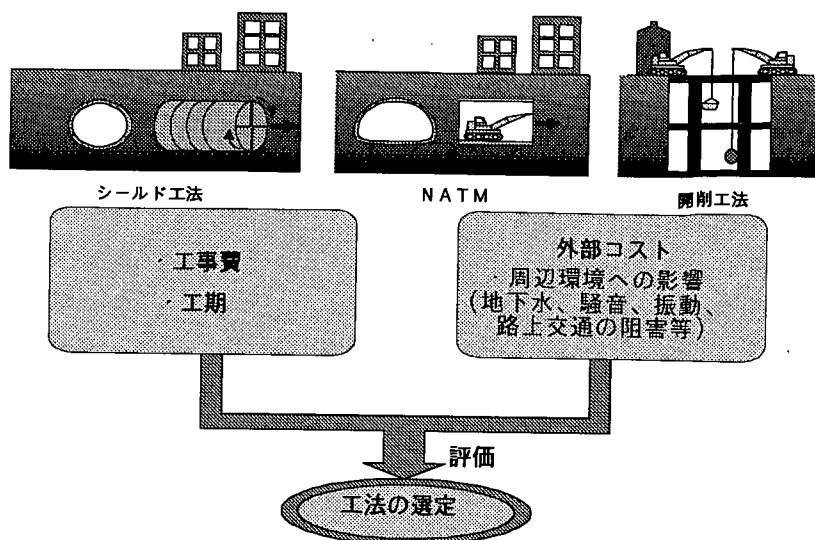


図4-1 都市トンネルのトンネル工法の選定

はじめに、都市トンネル施工時の外部コストを評価する上で必要となる情報（騒音・振動・交通規制による渋滞などの周辺環境へ影響）を収集し、外部コスト項目を選定した。次に、その内容を検討したうえで計測対象を決定し、計測手法を選定したのち、実際に施工した工事の外部コストの計測を行った。今回、実績調査及び外部コスト計測を実施した対象トンネルは開削工法 12 件、シールド工法 12 件、山岳工法 4 件である。

4.1.2 外部コスト項目の選定

都市トンネル施工時に考えられる外部コスト項目を、外部コスト整理シートを参考にし、外部コストの波及プロセスを踏まえて選定した。その結果、計測対象の外部コスト項目を、振動、地下水、地盤変状、騒音、建設資材の製造・運搬による大気汚染（ CO_2 及び NO_x の排出）、交通渋滞（走行時間損失、走行費用増大及び排気ガスによる CO_2 及び NO_x の排出）とした。

4.1.3 外部コストの計測手法の選定

本ケースは、都市トンネル施工工法選定のための外部コスト評価が目的であるため、①評価方法が普遍的であることが望ましいこと、②他の市場に置換するよりも直接評価項目の数量を用いて算定の方が根拠として明確であること、などの理由により、原単位法を用いて外部コストを算定することとした。基本的には「道路投資の評価に関する指針（案）」による原単位に基づいて外部コストを計測することとした。外部コスト計測の評価項目、計測方法を表4-1に示す。

表 4-1 外部コスト計測方法

対象	項目内容		外部コスト試算の主な条件	試算根拠
沿道・地域	振動・地下水・地盤変状		補償費による	—
	騒音		$2,400,000(\text{円}/\text{dB}/\text{km}/\text{年}) \times \text{工事増加騒音}16\text{dB} \times \text{影響範囲} \times \text{工事期間}$	道路投資の評価に関する指針(案): 日本総合研究所(平成10年)、騒音値はある特定の工事の調査結果を適用
地域外社会	大気汚染	建設資材の製造	二酸化炭素CO2 対象ガス発生量 $\times 2300\text{円}/\text{t}$	道路投資の評価に関する指針(案): 日本総合研究所(平成10年)
		建設資材の運搬	二酸化炭素CO2 対象ガス発生量 $\times 2300\text{円}/\text{t}$	
			窒素酸化物NOx 対象ガス発生量 $\times 2920000\text{円}/\text{t}$	同上
道路利用者	交通渋滞	時間損失		道路投資の評価に関する指針(案): 日本総合研究所(平成10年)、環境面から見た地下鉄建設工法の評価: トンネルと地下1999.11
		消費燃料増加		道路投資の評価に関する指針(案): 日本総合研究所(平成10年)、環境面から見た地下鉄建設工法の評価: トンネルと地下1999.11
		自動車排ガス増加	二酸化炭素CO2 対象ガス増加量 $\times 2300\text{円}/\text{t}$	道路投資の評価に関する指針(案): 日本総合研究所(平成10年)
			窒素酸化物NOx 対象ガス増加量 $\times 2920000\text{円}/\text{t}$	

4.1.4 外部コストの計測結果

図 4-2 に各工事の単位掘削体積あたりの外部コスト計測結果を示す。これより、各工事の外部コストは大きく異なり、開削(12)、シールド(1)(8)(10)が特に高いことがわかる。図 4-3 は外部コストの構成比率を示したものであるが、外部コストが高い開削(12)、シー

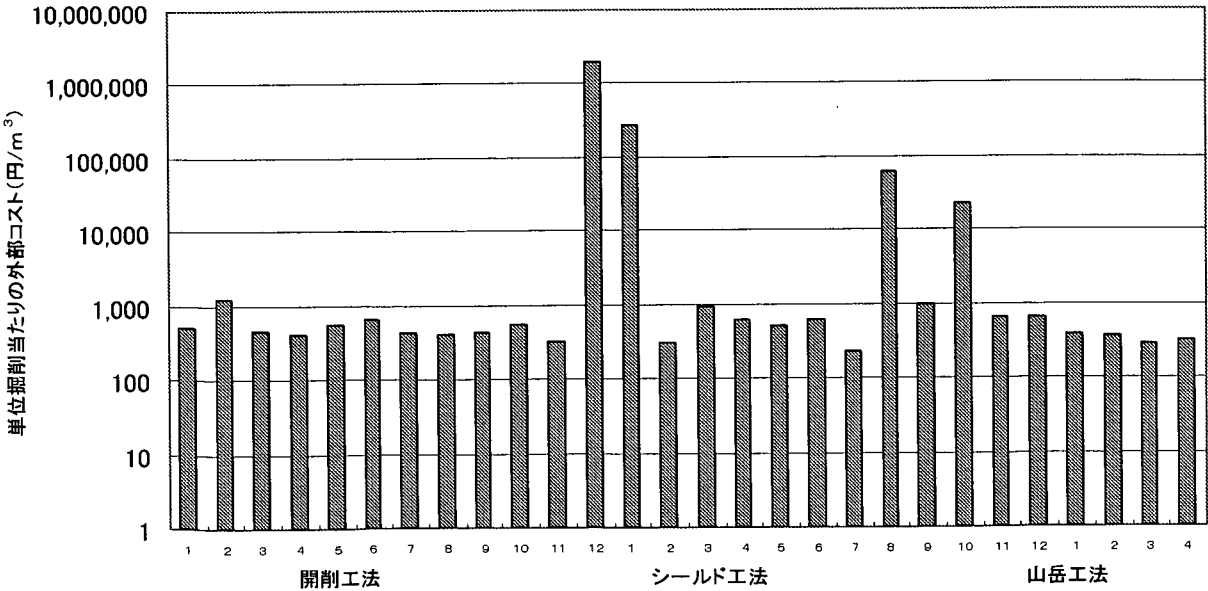


図 4-2 単位掘削体積あたりの外部コスト計測結果(円/m³)

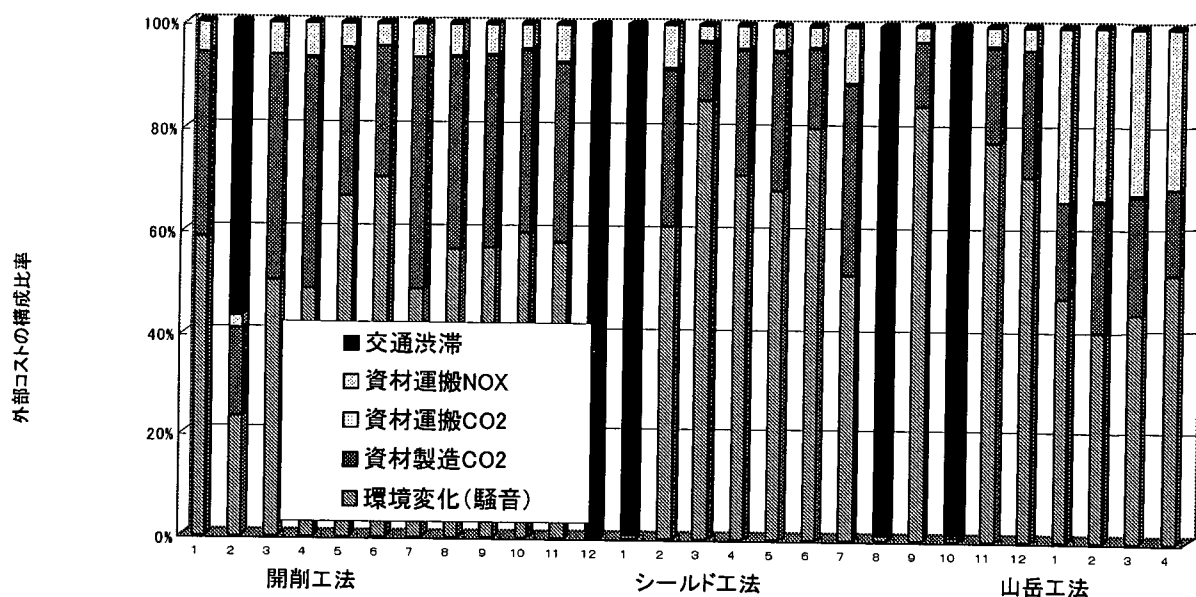


図 4-3 各工事の外部コストの構成比率

ルド(1)(8)(10)は交通規制による外部コストの比率が非常に高く、これらの工事の外部コストが高い原因に交通規制が大きく寄与していることがわかる。また、山岳工法(1)～(4)では資材運搬による NO_x 排出が他の工事に比べて比較的大きな比率を占めている。その原因として、今回対象とした調査工事では、山岳工法の方が開削工法、シールド工法に比べてトンネル断面積が大きく、かつ土被りも比較的大きく、トンネル工事の規模が大きかったためと考えられる。

また、図 4.4 に交通規制が実施された工事のみを対象とした、交通規制による外部コスト構成比率を示す。この際、外部コスト項目としては、渋滞による走行時間損失、走行費

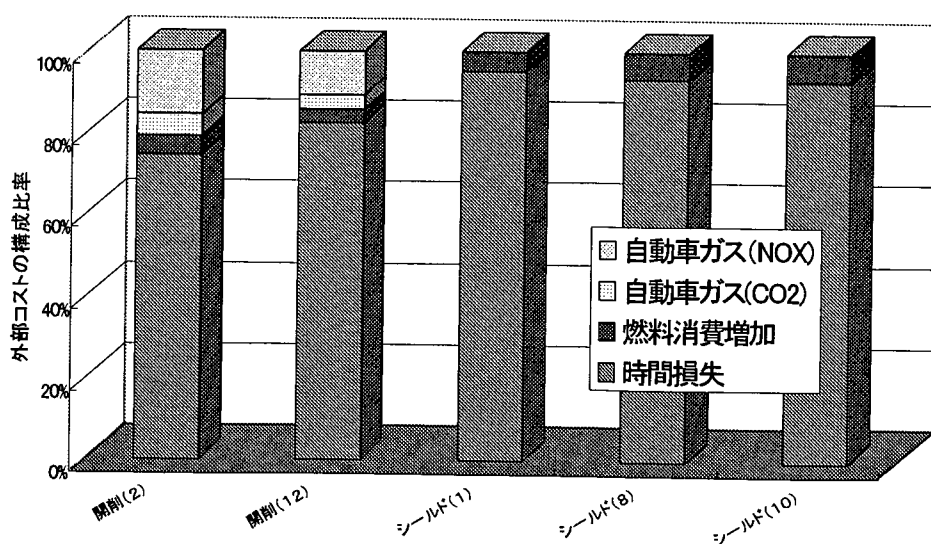


図 4-4 交通規制における外部コスト構成比率

用増大（燃料消費増加）及び排気ガスによる CO₂ 及び NO_x の排出を設定した。これより、交通規制による自動車排ガスおよび燃料消費増加による外部コストに比べて道路利用者の走行時間損失が大きいことがわかる。また、今回のケーススタディーではトンネル施工時に交通規制を伴う場合には、外部コスト全体に占める交通渋滞による外部コストの割合が非常に高くなり、外部コストの総額も大きくなる傾向がみられた。

4.1.5 今後の課題

今後は、対象トンネルを想定したケーススタディーを実施し、内部コストに外部コストを加えた総コストによる比較・分析を行い、都市トンネルの工法選定手法を提案する必要があると考えている。

4.2 維持補修分野における外部コストの評価

4.2.1 概要

維持・補修分野において工事費の割合が大きい舗装工事について、実際の工事を対象として、工事に伴う外部コスト項目を選定し、騒音や交通量などの現地の実測データを基に外部コストを計測した。この結果、舗装補修工事の外部コストは工事費と比較して、著しく小さい値であった。次に、シミュレーションとして、交通規制方法、工事方法および交通量を変化させた場合の工事費および外部コストを試算し、各ケースについて総コストで評価を行った。

4.2.2 外部コスト項目の選定

外部コスト整理シートを参考に、舗装補修工事の実施に伴う外部コスト項目として、騒音、振動、大気汚染、地球温暖化、廃棄物、交通渋滞の6つを抽出した。これらの6つの項目について、社会的要請（沿道住民や道路利用者への影響度）や現状の計測技術・貨幣換算手法の有無を考慮し、計測対象の外部コスト項目として、騒音及び交通渋滞（走行時間損失、走行費用増大）を選定した。

4.2.3 現場計測

実際の舗装補修工事における外部コストを算出するために、交通量、走行速度、騒音について下記の現場で計測を行った。

〔計測概要〕

工事箇所：一般国道15号東京都大田区東六郷地先

対象区間：工事規制の影響が考えられる区間

規制時間：平日の20時～翌6時

計測期間：工事規制時間帯を含む24時間

計測項目：交通量、走行速度および騒音

4.2.4 実測からの外部コストの計測手法の選定と計測結果

(1) 外部コストの計測手法の選定

外部コストの計測手法は、現段階でコスト評価手法が確立されている「道路投資の評価に関する指針（案）」における原単位法を用いた。

(2) 外部コストの計測結果

1) 走行時間損失及び走行費用増大

今回の調査では交通規制による渋滞は認められず、走行時間損失及び走行費用に関する外部コストは発生しない結果となった。

2) 騒音影響

騒音の影響による外部コストは、表 4-2 に示すとおり、10 時間（工事規制時間）当たり数千円程度とわずかな値であった。

表 4-2 騒音影響に関する外部コスト

	上り		下り		備考
	平常時	工事 規制時	平常時	工事 規制時	
環境影響 (dB(A))	67	75	68	74	
騒音影響貨幣評価値 (円/10時間)	53,760	59,720	54,080	58,944	工事期間の値
外部コスト (円/10時間)	5,960		4,864		

(3) 実工事費と外部コスト

今回の調査箇所は、前後にボトルネックがあるため交通量が少なく、図 4-5 に示すように実工事費（内部コスト）に対する外部コストの割合は著しく小さい結果となった。しかし、今回の舗装補修工事では舗装切削時の騒音が一時的に環境基準値を超えたこともあり、舗装工事に適した貨幣評価原単位を検討することが望ましいと思われる。

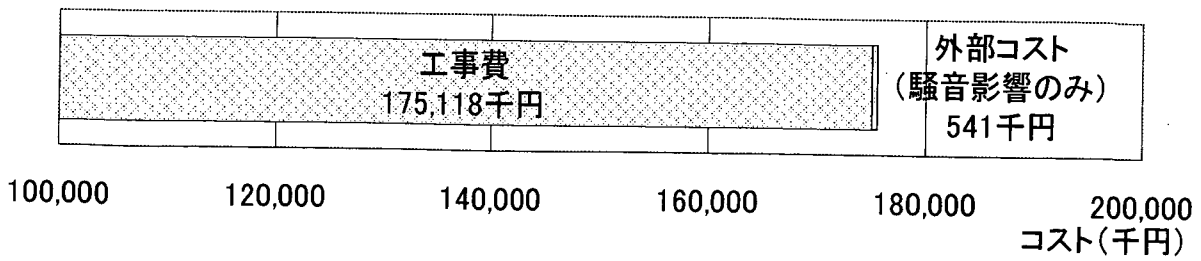


図 4-5 実工事費と外部コスト

4.2.5 シミュレーション

今回の調査箇所では渋滞の発生が認められず、外部コストも著しく小さい結果となった。そこで、工事形態、規制形態、交通量が変化した場合の外部コストへの影響を分析するためシミュレーションとして表 4-3 に示す 6 ケースについて、概算工事費と外部コストを試算した。

(1) 概算工事費（内部コスト）の算出

実際に現場で行われた舗装補修工事の工事費（内部コスト）に基づき、表 4-3 に示す各検討ケースについて、車道部のみの舗装打換えの概算工事費（内部コスト）を試算した。その結果を表 4-4 に示す。

表 4-3 シミュレーションの検討ケース

ケース	工事形態	規制形態	交通量割増
1	夜間	夜間 2 車線	1.00・1.10・1.15・1.30
2	〃	夜間 1 車線	1.00・1.10・1.15・1.30
3	昼間	全日 2 車線	1.00・1.10・1.15・1.30
4	〃	全日 1 車線	1.00・1.10・1.15・1.30
5	全日	全日 2 車線	1.00・1.10・1.15・1.30
6	〃	全日 1 車線	1.00・1.10・1.15・1.30

表 4-4 概算工事費

ケース	工事形態	規制形態	工事費 (千円)	規制期間 (日)
1	夜間	夜間 2 車線	175,118	50
2	〃	夜間 1 車線	175,118	50
3	昼間	全日 2 車線	122,079	49
4	〃	全日 1 車線	122,857	51
5	全日	全日 2 車線	123,300	25
6	〃	全日 1 車線	124,078	26

(2) 外部コストの計測

前述した方法と同様に、走行時間損失、走行費用増大および騒音影響それぞれに関する交通量の割増に応じた 1 日当りの外部コストを試算した（ここで、交通量の割増とは、前述 4.2.3 に示した現場での実測交通量に対する割増のことである）。

(3) シミュレーションの検討結果

各ケースの検討結果を図 4-6 に示す。同図から以下のことが確認できた。

- ・実際に現場で行われた工事（夜間 2 車線規制・工事）では、渋滞が発生しない結果となった。外部コストは騒音影響のみで、内部コストに対する割合は 0.3% 程度である。

- ・夜間規制以外は、交通量が増加するに従って、走行時間損失による影響が非常に大きくなる。

- ・夜間規制以外は、交通量が増加しても、走行費用や騒音の影響は小さい。

- ・交通量割増し 1.30 以上では、夜間工事の総コストが最も経済的となる。

(4) 外部コストを検討する上での課題

舗装補修工事における外部コストは、渋滞による走行時間損失に関するウエイトが非常に大きく、交通量が多くなると、その傾向が特に卓越することが確認できた。

その一方で、渋滞による走行費用増大および騒音影響に関する外部コストは極めて小さく、交通量の影響等にもほとんど影響されないことが分かった。

したがって、外部コストの低減を行うためには、渋滞による走行時間損失に関する外部コス

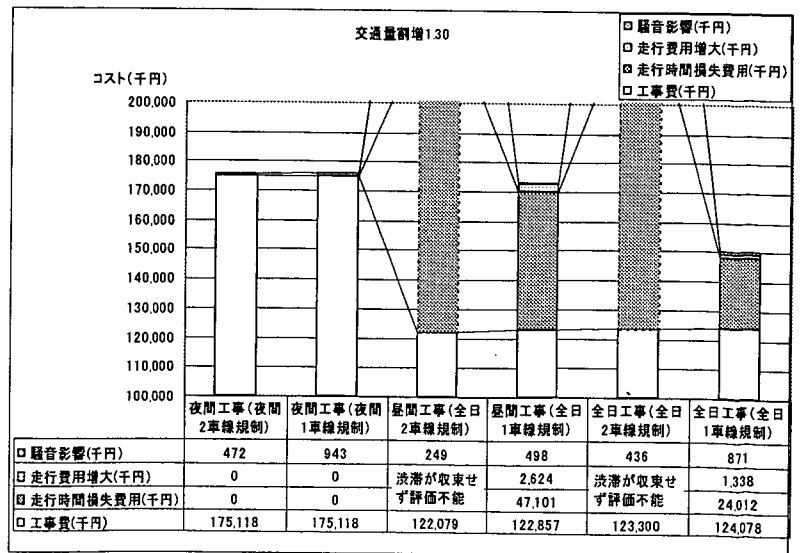
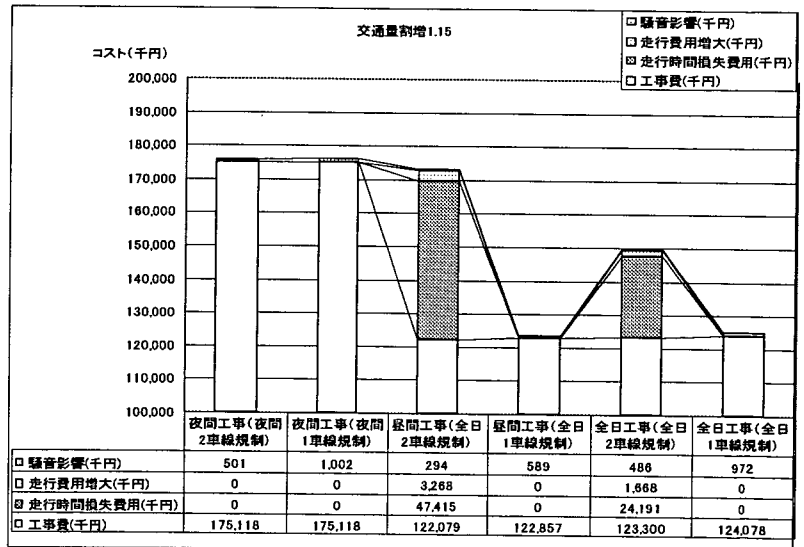
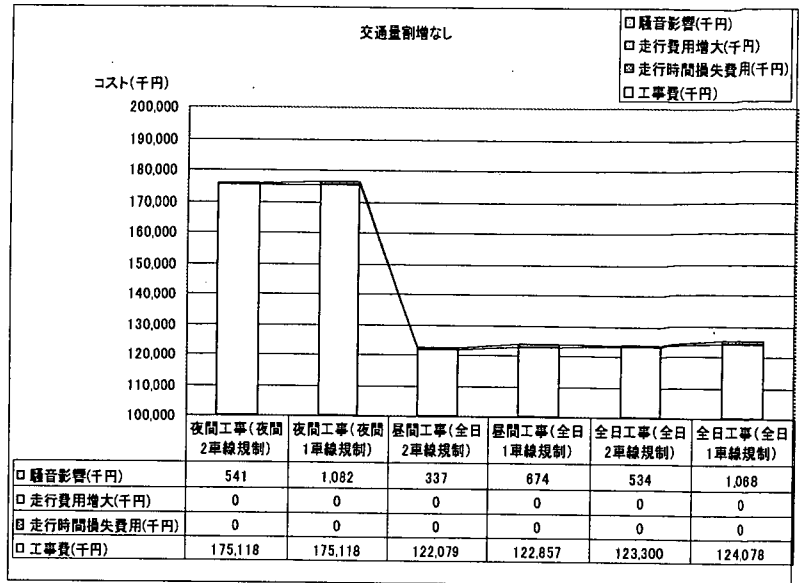


図 4-6 シミュレーションの検討

ト、すなわち渋滞を少なくすることが最も有効な手段と考えられる。渋滞を低減するためには、遅れ時間の低減と交通規制期間の低減が必要となる。ここではその2点に着目して検討した。

1) 遅れ時間の低減

遅れ時間（渋滞）は、交通量と交通規制の形態とで関係づけられると考えられ、遅れ時間を低減するためには、断面交通量を遅滞なく流せる車線の確保が重要である。

そのためには図4-7のような検討が必要となる。このフローを活用するためには、交通センサスから得られる時間当たり交通量や現地の交通規制形態（規制車線数、規制時間等）を勘案し、現場条件に適した形状を検討することが必要である。

2) 交通規制期間（工事期間）

前述のように、渋滞が発生する場合は、交通規制期間を短くすることが外部コストを低減する大きな要因の一つである。舗装の施工では、アスファルト合材の品質向上や施工性に富んだアスファルトフィニッシャーなどの導入で施工性は向上しているものの、交通規制に関しては、道路車線数や地域性、周辺道路状況によって大きな違いがある。この限られた現場条件の中では、交通規制の抜本的な改善策がないのが現状であるが、各現場において規制形態に最大限の配慮が必要がある。

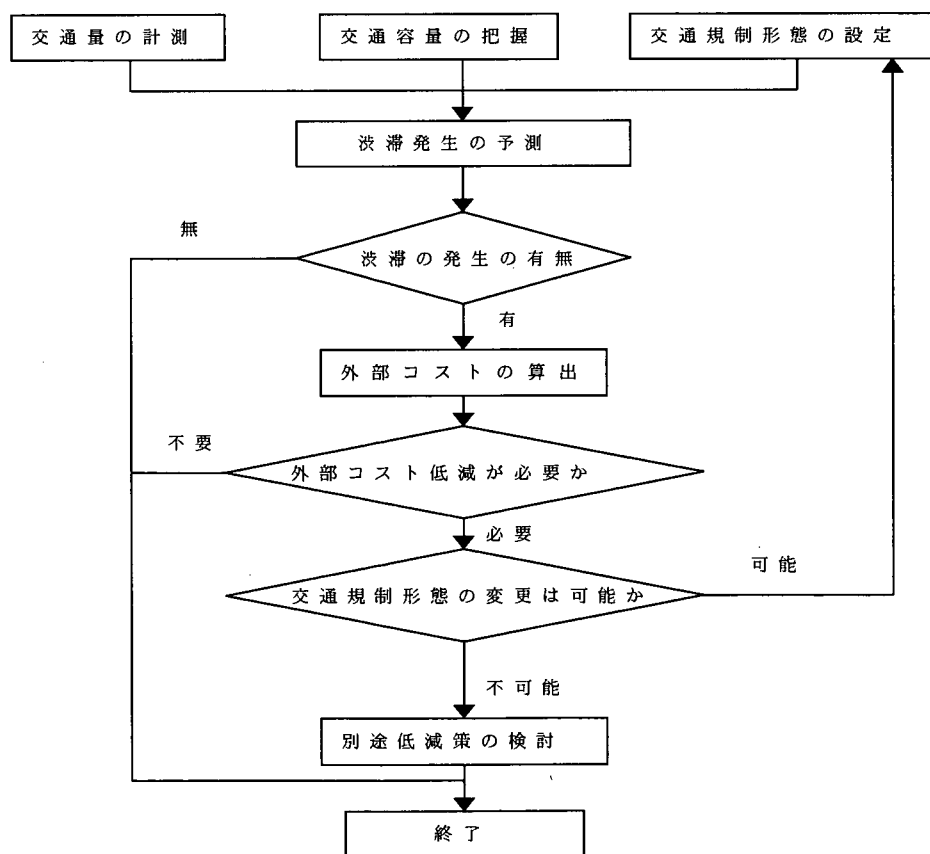


図 4-7 交通規制形態検討フロー

5. おわりに

総合的なコストの概念で建設事業コストを定量的に評価することは、「新行動計画」に基づくコスト縮減の推進と建設事業者の適切な意思決定を行う上での有効な手段となり、その結果として建設活動が与える様々な負の影響を低減させることにつながると思慮される。この際、建設事業において発生する外部コストは、事業の段階やその事業がおかれている状況によって、求められる精度や重要性などが異なってくると考えられ、その適用にあたっては十分な検討が必要となる。

本研究では、これまで概説したように建設事業の各意思決定場面における総合的なコスト評価手法について開発・検討しており、最終的には、実務の中で活用できる成果として取りまとめたいと考えている。

参考文献

1. 大阪市立大学経済研究所編、経済学辞典、岩波書店第3版、1992.3
2. 林山泰久、非市場財の存在価値、土木計画学研究・論文集16、平成11年9月、pp35～pp48
3. 道路の交通容量、(社)日本道路協会、1984、pp68
4. 道路環境整備マニュアル、(社)日本道路協会、1989、pp1～pp257
5. 環境影響評価法（平成9年6月13日）
6. (財)日本総合研究所、道路投資の評価に関する指針（案）、平成10年6月、pp45～pp89]
7. 西淳二、清木隆文、加藤貴也、田中正：環境面からの地下鉄建設工法の評価、トンネルと地下、平成11年11月、pp47～pp53]

社会生活を支えるダム貯水池の有効活用

ダム部長 高 須 修 二

社会生活を支えるダム貯水池の有効活用

ダム部長 高須修二

最近の社会的状況等から、公共事業における既存施設の有効利用が強く要請されるようになっている。また、着実に蓄えられてきた社会資本を適正に維持することも重要であり、そのコストの縮減も重要な課題となっている。ダム事業も例外ではなく、行政面での対応が積極的に行われており、また、土木研究所でもこれらの課題に応えるため、幅広く関連研究を進めてきている。本論文では、安全かつ安心な社会生活を支えているダム貯水池に係わる課題として、段階的河川整備への適正な対応、多目的ダムの貯水容量の効果的な利用、並びに自然環境保全への対応等ダム機能の多様化等を取り上げ、将来のダム貯水池のあり方を含めたダム貯水池管理の方向性を論じるものである。

1. まえがき

ダム貯水池は、水資源開発、洪水防御あるいは電源開発という目的をもって造られる社会資本であり、我々の社会生活を支えていることは論を待たない。また、そこには新たな自然環境や社会環境が育まれ、湖面や湖岸は多様な利用がなされている。一方、生態系の保全や安全な水の確保のために、ダム貯水池を良好な状態に保つことが必要であり、環境問題、水質問題等の課題に対して実態調査に基づいた研究も鋭意進められてきている。このように、ダム貯水池は極めて価値の高い種々の機能を有するものであり、それらは永続的にバランス良く維持されなければならない。

さて、新しい事業を実施するにあたっては、自然環境問題と地球環境問題、さらには社会的な合意形成への積極的な取り組みが必要とされている。一方、頻発している渇水や不安定取水の実態を考慮すれば、安定した水資源の供給は最優先課題であり、節水、漏水対策や下水処理水の再利用などを推進するとしても、自然の営みにより循環する水の利用率を上げるためにはダム貯水池による貯水は依然として必要である。さらに、流域全体を見据えた洪水防御の効果の点からも、ダムの必要性は評価されてしかるべきである。

しかし、最近の財政事情や社会情勢からみると、今までのペースで水供給施設などを充実していくことは難しく、将来とも水需給は余裕のない緊迫した状況で推移せざるを得ない。このため、長期的視点に立てば、堆砂対策を駆使して既存貯水池の機能を確実に維持していくこと、容量の振り替えや運用の効率化など現時点での効果を高めること、あるいは、ダムサイトを貴重な資源として利用すること等が求められている。実際、そのための施策も数多く打ち出され、実施されている。貯水池の機能を修正するためにはハード、ソフト両面での対応が必要であるが、ハード的な改造はもちろんのこと、ソフト的な運用の

変更でもそう容易なことではない。しかし、時代の流れに応じたこのような要請には適切に対応していかなければならない。

ダム建設そのものは目的ではなく、河川や流域に求められている治水、利水、環境という目的を達成するための手段である。この観点から既設ダムの有効利用を考えてみると、それは新規ダム計画と比較することに意義があるのではなく、どちらも目的達成手段の一つであり、その選択肢を拡げることには意義があるとすべきである。

これらの選択肢の中には、既設ダムと新規ダムの組み合わせ、複数ダムを組み合わせた新規事業、また、既設ダムを連携させることにより、有効利用を図る手法も含まれる。既設ダムの連携には、導水トンネルなどで連結するハードな対応や補給量を相互に調整するソフト的な対応が含まれる。既設ダムの有効利用として、ダムを嵩上げて貯水池の容量を増やすこともあるが、上記の観点からは、既設ダムと新設ダムの組み合わせの一形態と考えることもできる。

また、ダムの有効利用には、それを実現するため、水を制御する放流設備などの改造、新設も含まれることになる。しかし、嵩上げにしろ、機能増強にしろ、既設ダムにハード的な手を加える場合には、工事中のその機能の代替えを確保できるかが重要な検討事項であるが、余裕のない社会状況にある現在、工事段階で課せられる制約条件は大変厳しいものとなる。

なお、ダム全体としては管理費用の低減も考慮した計画や設計がなされてきているが、貯水池の有効利用を図るためには高度な管理が求められ、管理費用が高くなるという関係があることから、総合的に判断が求められることになる。

このように、既存貯水池に手を加えることについては、「言うは易く、行うは難し」のことわざ通り、行政的、社会的あるいは技術的に課題が山積している。特に、権利者の調整は重要であり、また、河川管理施設等構造令に抵触する部分も数多くある。

しかし、技術的な面から、何処までできるのかを見極めることが、これからの施策を進める上で極めて重要であり、この観点から、関連する研究を整理し、技術的な課題を明確にすることが必要不可欠である。

さて、二十世紀の開発は生活環境の向上を優先課題として行われてきている。そして今、科学や技術は環境を軸として再構成されるようになり、生物の多様性の確保及び自然環境の体系的保全と調和した社会資本の整備が志向され、既存のダム貯水池においても良質の自然環境を回復、創造する努力が払われている。一方で、既存のダム貯水池は新たに形成された自然の一部となっており、また、風景にとけ込んだダム貯水池も多く、機能の保全や増強・回復においても現存する環境に対する配慮が必要である。

環境は人間の生活を豊かにする資源、財産であり、人間の営みを否定しない健全な共存関係をつくりあげるため、新しい価値観、見方で社会資本整備を行っていく必要がある。既存貯水池の有効利用は、環境に与える影響を小さく押さえることができる場合が多いと考えられるが、全ての事業が自然環境や社会環境も含めて総合的に評価されることから、

その中で整理できるものとする。

2. 貯水池の運用形態

「今、日本にはどのようなダム貯水池があるのか？」

この点をわかりやすく整理したものが表1である。数の上ではかんがい目的をもつダムが圧倒的に多いが、これらは小規模な専用貯水池がほとんどである。次に多いのが多目的ダムであるが、これは洪水調節を目的に含むものが大半であり、不特定用水や上水道の補給を目的に含むものも比較的多い。また、発電を目的にもつダムでは専用ダムの比重が高い。

「今、ダム貯水池はどのように使われているのか？」

この質問について、国土交通省所管のダム貯水池で考えてみる。ダムの機能は流域の個性を反映したものとなるので、平均的な議論はあまり意味をもたないが、日本の洪水調節を目的にもつ貯水池の全体的な傾向は知ることができる。

ダムは流水を貯めることを目的としている。洪水の大きな流量の一部をダムに止めることによって、下流の災害を軽減する。また、流量の豊富なときに水を蓄え、不足するときに放流し、下流の水利用を助け、河川環境を向上させる。前者が治水ダムの機能であり、後者が利水ダムの機能となる。また、両方の機能を兼ね備えたものが多目的ダムである。

既存のダム貯水池の水は、図1並びに表2のように使われている。この表は国土交通省所管 344 ダムの容量全体の配分を示したものであるが、総貯水容量は約 88.6 億 m³、有効容量は約 73.1 億 m³となっている。有効容量のうち、洪水調節容量が洪水期に約 35.1 億 m³。利水容量が非洪水期に 60.3 億 m³である。また、堆砂容量は約 10.8 億 m³となっている。なお、日本全体の貯水池の総貯水容量は約 220 億 m³となっている。

さて、治水容量と利水容量が洪水期、非洪水期により異なるダムが数多くある。容量の兼用は、すなわち容量の有効利用であり、これが多目的ダムの特長である。洪水期の利水容量が約 39.7 億 m³であるが、この共通部分の容量は約 20.8 億 m³はサーチャージ容量の約 12.6 億 m³と比較してかなり大き

表1 ダムの建設状況
(1998年3月現在のダム数)
—ダム年鑑2000年版による—

ダムの目的	専用ダム	多目的ダム	合計
洪水調節	90	450	540
不特定用水	1	325	326
かんがい	1513	184	1697
上水道	102	294	396
工業用水	14	127	141
水力発電	383	199	582
全ダム	2103	544	2647

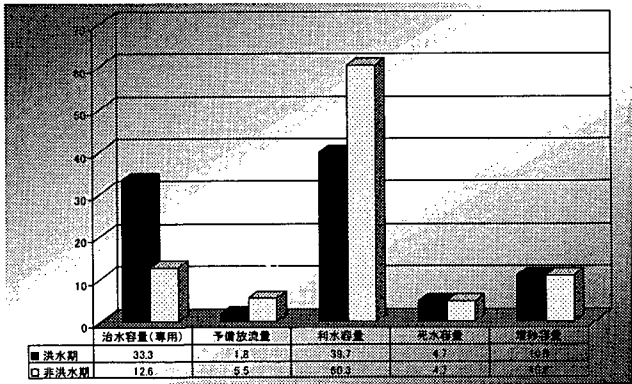


図1 貯水池の容量配分(億m³)

表2 貯水池の容量配分(億m³)

		洪水期	非洪水期
総貯水容量		88.6	88.6
有効容量		73.1	73.1
	治水容量 (予備放流量)	35.1 (1.8)	18.1 (5.5)
	利水容量	39.7	60.3
	死水容量	4.7	4.7
	堆砂容量	10.8	10.8

い。

また、洪水の発生が見込まれるときに、利水のために確保している水を放流し洪水調節のための容量を確保することがある。想定される洪水の規模に応じて、確保する容量は異なるが、その最大のものが予備放流容量と呼ばれるもので、洪水期に約 1.8 億 m^3 ある。なお、非洪水期の予備放流は、サーチャージ水位と常時満水位が一致している貯水池で、非洪水期に出水に対応するため確保されるもので約 4.7 億 m^3 あるが、この水位にある時間は極めて少ないので、実質的には運用されていない。

また、堆砂容量の上に死水容量のあるダムがある。これは効率的な発電のために必要とされる水深を確保するために、常に貯留しておく容量で全体では約 5.9 億 m^3 あるが、計画上は水としては利用されない部分である。

既設ダムの有効利用は、それぞれの目的の中での容量配分の変更や有効利用を試みるものと、目的間で容量の配分を変更するものがあるが、次章では各容量の内容についてまとめる。

3. 貯水池容量

表3 貯水の目的

理解を助けるために容量配分が単純な例により、それぞれの課題を整理する。

貯水池では表3に示すように、低い位置から順に、堆砂容量、利水容量、治水容量、超過洪水処理の容量が確保されている。超過洪水処理の容量は、利用水深を規定することにより確保されているもので、容量そのものは計画論上あまり意味を持たないが、運用上はかなり期待できるものである。

超過洪水対応の容量	計画を上回る洪水を処理する容量(サーチャージ水位の上に水位として確保)
治水容量	洪水調節のための容量(すり付け操作に必要な容量を含む)
利水容量	各種利水目的のための容量(季節的な発電専用容量を含む)
堆砂容量	流入土砂の堆積のための容量

3. 1 堆砂容量

ダム貯水池の機能保全の課題の中で、堆砂は貯水池の寿命を左右する最も重要なもので、通常は 100 年分を確保することとしている。この 100 年という値は、ダム管理の上で特別の措置を執らないでも、十分に長い期間ダムの運用に問題が生じないことを期待したもので、100 年経てば貯水池を放棄するということではない。その機能を継続させるために、それぞれの貯水池に応じた対策を講じることを想定したものである。

「日本のダム貯水池にはどのくらいの土砂がたまっているのだろうか？」

1997 年 1 月時点で日本には 100 万 m^3 以上の貯水容量をもつ貯水池が 758 あり、その合計の貯水容量は約 176 億 m^3 で、そこに堆積している土砂の合計は約 12 億 m^3 で総貯水容量

の 7 % 弱の土砂が堆積していることになる。この堆積土砂量は、1989 年からの 7 年間に約 1.3 億 m^3 増加しており、平均の年増加量は約 0.2 億 m^3 である。なお、既存ダムの年平均堆砂量の増加は約 0.45 億 m^3 であるから、最近は堆砂の増加率が少なくなっている。

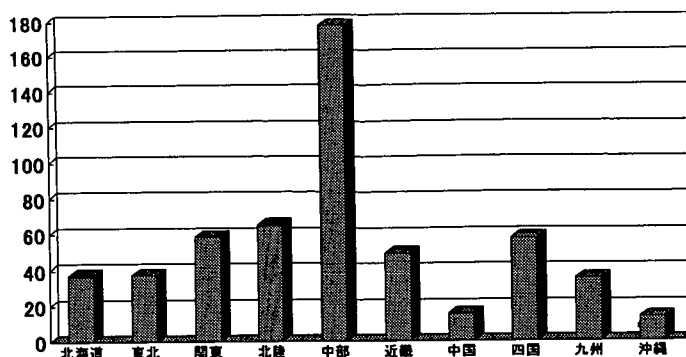


図2 全国ダムの堆砂実績
(1ダム当たりの年平均堆砂量: 千 m^3)

日本の貯水池堆砂の現状は、図 2 に示すとおりであり、かなり地域性

がある。中部地方が全体の約 35 % (74 ダム・堆砂率 21%) を占め、次いで北陸地方の約 20 % (128 ダム・堆砂率 6%) である。水系別では、中部地方の 3 水系 (天竜川・大井川・木曾川) と北陸地方の 2 水系 (黒部川・庄川) のダム湖で堆砂量が多く、総貯水容量に対する平均堆砂率が 10 % を越えている。上位 5 水系のダム湖の堆砂量は、全国のダム湖の総堆砂量の 45 % に当たる。特に中部地方では古くから電源開発が行なわれてきたこともあり、堆砂率はきわめて大きくなっている。

国土交通省所管の 337 ダムでの実績をみると、総貯水容量約 89.6 億 m^3 に対して、実績堆砂量は約 3.9 億 m^3 で約 4.4 % である。これは、計画堆砂量 10.8 億 m^3 に対して約 36 % の堆砂率となる。大洪水や流域の地形・地質等の要因による異常な土砂の流入が生じたものを除いて、ほとんどのダムの堆砂量は計画に沿って推移している。しかし、計画時点では十分な資料も得られていないこともあり、現時点では古いダムを中心に利水容量や治水容量が堆砂により侵されている事例もみられる。堆砂量の多い貯水池の経年的な変化を調べてみると、完成後に異常な土砂流入が何度かあり、それが堆砂量の大半を占めていることが一般的である。これらの対策として、排砂バイパスやフラッシング排砂、浚渫・掘削等が計画されてきた。

この貯水池堆砂の対策を進める基本的な考え方は、今後の貯水池の機能維持のための対策と貯水池容量を有効利用するための対策により異なる。現状のまま推移しても長期的には、ほとんどのダム貯水池で対策が必要となることは明らかである。一方、排砂対策により、確保すべき容量を減らすことができ、空き容量の新たな利用を図ることも考えられる。

3. 2 利水容量

洪水期の利水容量は 33.2 億 m^3 あるが、その内訳は図 3 に示すように、環境用水を補給するための不特定容量が約 8.8 億 m^3 、都市用水が約 9.7 億 m^3 、かんがい用水が約 4.2 億 m^3 である。かんがい用水は歴史的に古くから利用されてきており、ダムによる新規開発は、主として都市用水の確保を目的として行われてきている。非洪水期に発電容量が比較的大きく示されているが、洪水期に必要な容量が非洪水期に比べて大きい貯水池で、発電

量を増加するために高い水位を維持するために利用されているものがかなりの部分を占めている。

治水専用ダムにも環境用水を補給するため容量を確保してきた。慣行水利権としての水利用から、下流の環境を保全することも含めて、水の補給が行われている。一方で、この容量を確保するためには、堆砂容量もあわせて確

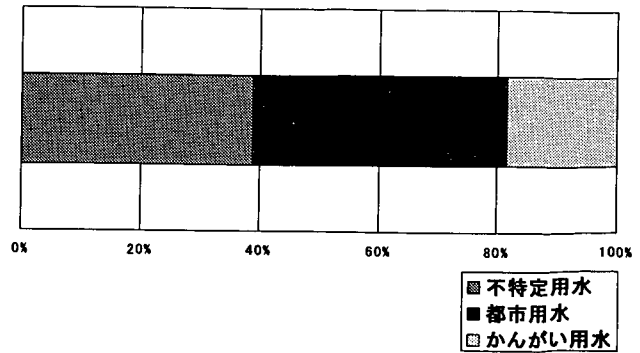


図3 利水容量の配分

保されなければならないことから、環境用水の必要性、その時期について流域の状況を十分に見据えた検討が極めて重要である。

今までも、水供給のための容量の配分の見直しは行われてきているが、今後さらに事例が増えるものと考ええる。しかし、既設ダム貯水池で利水容量を増加させるには、放流設備の放流能力の増大が必要となることが一般的である。

既設貯水池では、貯水池の環境や下流河道の水質を維持するために、利水のための補給時に選択取水が行われるようになっている。富栄養化対策が、主として湖内の環境を良好に保ち、水利用に支障が生じないように行われている。また、放流水の濁水長期化や冷水対策が、下流の水環境を維持するために行われている。既設ダムで、このような選択取水機能を持つ設備が設けられておらず、かつ水質問題が生じているダム貯水池では、その機能を強化する観点から、新たな取水設備の設置が行われるようになってきている。

また、発電専用ダムでは、水利権更新時に、環境用水を新たに補給することや魚道の設置に伴う必要水量を確保することなどが行われている。

利水容量を治水容量に振替えることもおこなわれている。すなわち、1982年7月の長崎水害の後長崎水害緊急ダム事業が採択され、既存のダムの利水容量を治水容量として振り換えることとなった。これは長崎市の水道専用ダムである本河内低部ダム、西山ダム及び浦上ダムに治水機能を持たせるもので、合わせて堤体の補強あるいは新設を行うものである。この結果、低減することとなる利水機能については別の新設2ダム等で対応することとしており、広域的な再開発事業となっている。

3.3 治水容量

容量の有効利用で一番着目されているのは、治水容量である。

治水容量の有効利用には二つの視点がある。

一つは、確保された治水容量を、下流での被害軽減のために効率よく使う方法を考えるものである。他の一つは、治水容量が通常時には使われていないことから、洪水時以外のときには水を貯留しておいて、有効に使うということである。

前者は、①②の洪水調節及び③の弾力的な洪水調節の中で論じる。また、後者は④の予

備放流の中で論じる。

ダム貯水池の治水容量は、計画上必要とされる容量に余裕としてその2割の容量を付加して確保している。実際の貯水池管理では、この2割の余裕を含めた治水容量を適切に運用することが重要である。また、計画上必要とされる容量は、洪水調節方式により大きく異なる。このため、流域全体の治水の合理性や効率化という観点から、治水効果の内容を吟味することで、新たな容量を生み出すことも可能と考える。

一方、洪水調節操作に付随して放流開始後のすり付け操作等種々の関連操作が必要となっており、実運用上はそれに応じて治水容量の一部が利用されていることも考慮しなければならない。

多目的ダムとしては、本来の主旨から利水・治水で容量を譲りあうことが行われてきている。しかし、これも洪水期という期間を明確に定めて画一的に運用している。また、多目的ダムで治水容量と利水容量を完全に分離するオールサーチャージ方式は、のり面の裸地対策を考慮して積極的に用いてきた。この場合、冠水の頻度を考えることで植生を管理することができる。このオールサーチャージ方式の場合、ダムの目的を多目的とするものの意義は、ダム規模当たりの貯水池容量を大きくできることにある。これは、堆砂容量を兼用できること、谷が上方に開いていることによるものである。

一方、予備放流を適切に行うには高度な降雨予測が求められるが、十分な体制や十分な支援装置を確保することが、維持管理の簡素化の観点から適当でないことも多く、管理者の負担やその判断に過誤が生じることを避けるため、あまり採用されてこなかった。このため、全体の治水容量に対して予備放流の容量は表2に示すように5%程度と小さくなっている。

治水能力の増加は、利水容量の振り替えによる場合には、放流設備を低位置へ設置することが求められる。また、河道への負担を増加することによる場合には、設備の放流能力を増やす必要がある。

① 洪水調節方式（その1）

我が国で用いられている洪水調節方式には図4に示すように、種々のものがあるが、基本となる洪水調節方式は、自然調節方式および一定量放流方式である。

自然調節方式は、ゲートのない越流頂や放流口により、放流量を制限する方式で、結果的に流水の一部が貯留されるものである。最も単純な調節方式で、計画時点では詳細な検討が必要であるが、運用時には操作のための情報や施設、要員の要求レベルを低く押さえることができる。

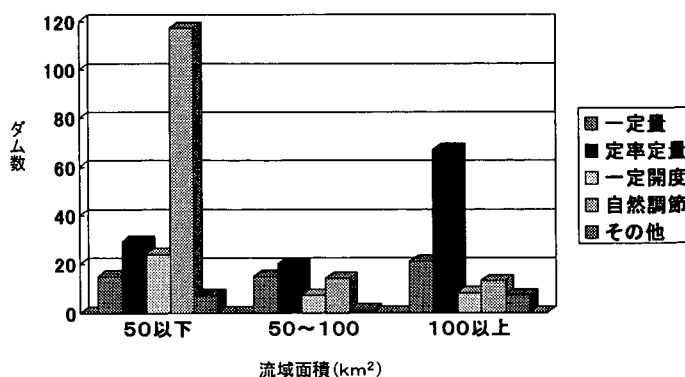


図4 洪水調節方式
(国土交通省所管365ダム)

一定量放流方式は、下流河道の整備が進んでいる場合に、それに対応する流量以上の放流を避ける方式である。貯水池水位が上昇すれば、放流設備の放流能力が高まるため、水位に応じてゲートを閉める操作を行う必要がある。また、洪水初期に流入量に応じて、ゲートを開ける操作が必要となる。このため、運用時には操作のための情報収集や施設、要員のレベルを高いものとしなければならない。

両者を比較したものが図5である。自然調節方式では①と②が調節量で③が放流量となり、一定量放流方式では①が調節量で②と③が放流量となる。これらの関係から、洪水調節に必要な治水容量も②の分だけ異なることがわかる。すなわち高度な管理を実現して容量を減らすか、容量を大きく確保して、高度な管理を避けるかの選択が求められるのである。

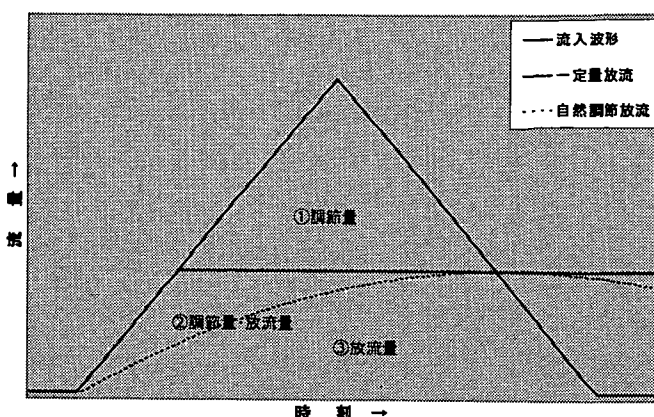


図5 洪水調節方式の比較

一方、下流河道の整備が十分でなく、中小洪水に対して調節効果を発揮する必要がある場合には、流入量に応じて放流量を規制する方法が有効となる。この方式は、一定量方式と自然調節方式の中間に位置する方式であるが、代表的なものとして、一定率一定量放流方式がある。一定率一定量放流方式は、河道内を含めて災害が発生しない流量を超えた場合、その超えた量の一部を一定の割合で貯留し、また、放流量が大災害を生じるような一定流量に達した場合、それ以上の放流を避けるよう、放流を調節する方式である。この方法はゲート操作を伴うことから、一定量方式と同じような管理レベルを必要とする。

ダムの流水管理は、情報を収集・処理して放流設備の操作や通知・警報等の情報発信を行うものであるが、洪水時にはこれらの作業が短時間のうちに集中し、管理職員の負荷が極めて大きくなる。

自然調節方式ダムのように洪水時に制御すべきゲート設備をもたないことは、管理の負荷を大幅に軽減することになり、管理の簡素化に貢献する。これは、管理費の低減にも寄与するもので、貯水池容量の利用効率が悪くても、ダムの寿命の長さを考え合わせるとライフサイクルコストに対しても効果的と考えられる。しかし、設備運用の自由度が失われることになるため、計画・設計時に設備運用に対するきめ細かい配慮が必要となる。

一方、安定した水供給や洪水調節機能の増強という視点に立てば、新しい施設の建設が追いつかない状況の下では、貯水池の容量を効率的に使う計画も考えなくてはならない。例えば本川に設けられたダムでは、ダムでの調節が直接的に河道の負担を減らすことになり、逆に河道の疎通能力を最大限活用する放流を行えば貯水池容量が温存され、洪水のピーク流量のカット量を大きくすることができる。

このようなきめ細かい運用は管理の高度化の一例と言えるものであるが、ゲート操作の信頼性は高水準のものが必要となり、操作時のトラブルに対する危機管理が極めて重要で管理職員の負担は大きくなる。

今までのダム管理の合理化の方向は、予備放流の解消に代表されるように、水理・水文事象により運用を変化させるような曖昧さを排除するという流水管理の簡素化であったが、この管理の高度化に向けての動きの中で、より明確なダム管理の方向性を示なければならない。

② 洪水調節方式（その２）

前項の説明は、ダムからの放流が直接的に、治水を考えている地域に影響を与える場合のものであるが、ダム下流の河川が途中で本川に合流したり、大きな支川が合流している場合には若干異なる。

自然調節の場合には、洪水ピーク時の流量を所定の流量に落とせれば、それ以降に放流量が多少増加しても支障のない場合が多くなる。この場合は、一定量放流方式に比較して、最大放流量を大きくできる。この条件の場合、容量の面だけをみれば、一定量放流方式は無駄な貯留を行っていることになる。ある限られた時間だけ大きな調節を行えば、対象とする地域に対して十分な効果をもたらすことができるのに、全ての洪水時間中調節をすることになるからである。

また、合流する本川や合流してくる支川の流量を監視して、必要量を調節することも考えられる。この方式は、鍋底調節方式と呼ばれているものであるが、この場合、さらに高度な洪水予測や降雨予測を行うことが求められることは容易に理解できる。ここでも、治水容量の効率的運用と管理のレベルの相対的な関係が認められる。

なお、本川流域での治水効果を高めるため、支川に設けられるダムは全量カットに近い運用が求められることが多々ある。この場合、洪水後の後期放流はダム直下流の河道の機能を維持する観点から、極めて重要となる。

③ 弾力的な洪水調節

治水容量を弾力的に運用することが可能だろうか。流域全体をみて、その時々安全かつ効果的に治水容量を利用することが期待されていることは明らかである。計画と管理は異なるものであり、その要請に応えるべく努力することは必要であるが、所定の調節が遂行できなくなるリスクを負うことも十二分に考慮しなければならない。

弾力的な運用とは、そのときの状況に応じて適切に対処するということであり、大きな間違いを起こさないためには、適正な情報を十分に確保することが必要不可欠である。また、同時に適切な判断を下すための支援ツールが整備されていなければならない。

近年、河川管理者は非常に有効な情報を入手できるようになっている。例えば、気象衛星からの画像があり、レーダー雨量計も日本全国をカバーしている。また、データ通信技

術も格段に進歩し、多量の情報を送受信することもできる。単純な状況、例えば流域に多量の降雨をもたらすような雨域は認められないような場合であれば、その時の状況に応じたそれなりの対応をとることはできるであろう。しかし、もう少し複雑になった場合に必要とされる支援ツールや情報の精度は未だ十分とは言えず、重要な研究課題となっている。

治水容量は、非常に大きな洪水に対しても効果を発揮できるように計画されているが、そのような状況にある大きな流域を考えると、想定される降雨のパターンは多様である。計画時点では未経験であった大洪水を、ダム流域あるいは下流の流域がダム完成後に経験していることも少なくない。この観点からも弾力的な運用の余地はあるが、検討すべきことが多く残されている。

さらに、地球温暖化の進行にともなう、降雨パターンの大きな変化を想定しても、多くのことを念頭に置かなければならない。

④ 予備放流方式

ここには、利水容量の確保に対する義務と治水のための管理のレベルの相互関係が現れている。すなわち、降雨あるいは洪水の的確な予想が求められている。

現在、試行されている、ダムの弾力的管理の中で、治水容量の一部を他の目的に使うため、水位を上昇させておくことが行われている。すなわち、国土交通省では 1997 年度から既設ダムの洪水調節容量の一部に流水を貯留し、適切な放流を行い、ダム下流の河川環境の整備と保全に資する弾力的管理の試みを、7 ダムで実施してきている。2000 年度からは、この試行結果を踏まえて、安全性の確保及び弾力的管理の有効性が検証されたダムについて、操作規則に位置づけ、本格的な運用を行っている。また、新たに、弾力的管理を実施するダムについては、おおむね 3 年程度の弾力的試験を実施し、安全性や効果などを確認した上で本格的な運用を行うこととしている。2000 年度は全国の 15 ダムで弾力的試験が計画された。

⑤ 下流放流制限

河川管理は、洪水等による災害の発生の防止、適正な利用および流水の正常な機能の維持、河川環境の整備と保全を図るために行われる河川についての総合的な管理であるが、河川の利用に伴う災害の発生を防止することも含まれている。ダムの流水管理は、この河川管理の理念に基づいてダムの目的を達成するもので、ダムからの放流による危害の防止を確実に果たす必要がある。

特に洪水初期の操作には多くの課題がある。例えば、下流河道における水難事故を防止するために、下流放流に対する制限が設けられている。これは通常、下流河川で 30 分当たり 30cm 以上の水位上昇が生じないように放流量を規制しているものであるが、通常の河川水位の上昇と比べてかなり小さなものとなっている。これは、警報・通報と密接に関わっているもので、自己責任の範囲をどのようにとらえるかにより、対応が大きく異なっ

くる。

ダムからの放流により下流河川の流量が急激に変化する場合には、関係機関への通知の他、河川内利用者および河道に立ち入ろうとする人々に危険を予め周知させる必要がある。周知の方法は、立札・サイレン・スピーカ等によっているが、なかなか対応してくれないため、放流に遅れを生じることもある。本来、河川は危険な部分を持ち合わせている空間であり、その空間を利用するためには、社会的知識やルールが求められる。そのルールを守ってもらうためには、川を利用する人々がそれぞれの川を知ることが重要で、啓蒙と学習の方法について一緒に考えていくことが重要である。ダム放流とは関係のない水難事故ではあったが、多くの死者を出した玄倉川・道志川の事故や一の倉沢川の事故でみられるように、研究すべきことが多々ある。

人の手が加わり自然が変化することで、今までの経験や常識が当てはまらなくなる場合には、きめ細かい直接的なサポートを長期間実践していく必要があるが、「河川における危害の防止とは何か」についての議論を深めることが重要で、ダムの効率的な運用という立場を軽視するべきではない。

⑥ 段階的河川整備

河川整備基本方針に基づいて河川整備計画が策定されるが、河川整備のプロセスのそれぞれの段階での最適な水管理が求められている。流域の社会・経済・自然それぞれの状況を考慮した段階的な整備計画に対応して、河道との分担を考えつつ、ダムの運用を変化させていくことが必要となる。具体的には、洪水調節計画の弾力性が求められていることになる。これは、治水容量を絞り込むことだけを意図するものではなく、与えられた貴重な治水容量を如何に効果的に利用するかということを重視するものである。

3. 4 超過洪水のための容量

設計洪水水位とサーチャージ水位の間の容量は超過洪水処理のために用いられる容量であり、確実なゲート操作ができることを考慮して、利用水深を規定することにより確保されているものである。水深で見ると、1～4 m程度が大半を占めているが、その容量は図5に示す通りであり、治水容量に対して10%～40%の貯水池がかなりある。ダムの安全性を損なうことなくこの容量を使うことができれば非常に効果的である。

サーチャージ水位を超える、すなわち放流量が計画最大放流量を上回ることが想定される場合、非常用洪水吐きを操作する「ただし書き操作」に移行することとなるが、その操

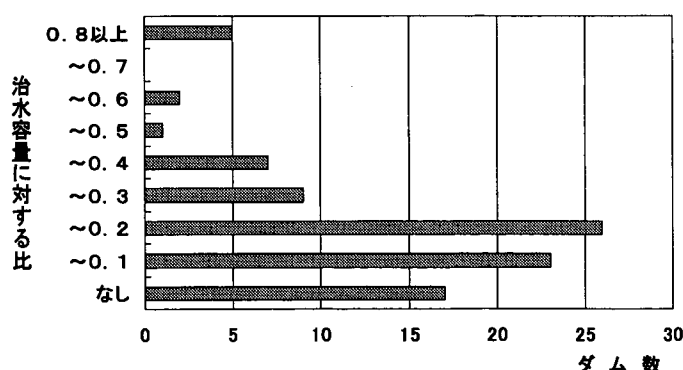


図6 超過洪水対応の容量
(直轄・水公団管理91ダム)

作は基本的には、貯水位とゲート開きを連動させてたものとしている。具体的には、初期の立ち上がりを緩くし、また、早い段階でゲートが全開となるように操作を定式化している。早い段階でゲートを全開することとしているのは、ゲートが全開して流れが自由越流の状態になって初めて、非常用洪水吐きとしての機能に移行したものと考えからである。サーチャージ水位に敷高を合わせた自由越流頂はこの典型である。

この容量を、付加的な治水容量として有効利用できる可能性がある。最近の約 20 年のダム設計では、流域が小さく適正なゲート操作ができないダムには、ゲートを有しない自由越流頂を非常用洪水吐きとして採用してきていることから、ゲートを有するダムでは高度な管理体制が確保されていると考えることができるので、対応は可能である。具体的には、洪水規模に応じた治水効果を設定するもので、今までの計画論の修正を求めるものである。それぞれの対応に対して、洪水規模をランク分けして考えることが必要となり、総合的な判断が求められる。

なお、設計洪水位の上部には波浪以外にも余裕が設定されており、洪水吐きゲートのないコンクリートダムを基本として、ゲート操作を要するダムでは 0.5 m を、フィルダムではさらに 1 m を加算することになっている。

4. 有効利用技術

前章で論じてきたように、貯水池の計画を変更し、その機能を増強しあるいは効率を高めることが期待されているが、これらを実現するためには関連するハード技術の向上あるいは開発を図らなければならない。これまでも排砂技術、放流設備の機能強化あるいはダム・貯水池の機能強化などに対応するための関連技術の開発・適用が図られてきているので、以下の節でその現状について述べる。

4. 1 排砂対策

ダムの計画論が100年という数字を基本にしていることもあり、ダムの寿命は100年といわれることがある。しかし、適地に造られたダムの総体としての寿命はそんなに短いものではなく、適正な管理を行っていけば安全性が損なわれることもない。二十一世紀を迎えた今、1960年前後から急速に整備されてきたダムも40年以上活躍してきたことになるが、あと何年もたせるということではなく、新しいダムを含めて永く活躍できるように環境を整えることが求められている。排砂対策は、貯水池の機能維持を図るための主要課題である。なお、貯水池は一洪水で数百万 m^3 の土砂をため込むこともあり、下流河道の災害防除としての機能も果たしてきている。このため、排砂については貯水池の機能維持だけではなく、下流の環境も含めて流域全体で評価することも必要である。

堆砂対策としては、表4に示すものが考えられる。その代表的なものとして、以下に示す、土砂バイパス、フラッシング排砂、浚渫・掘削が挙げられる。

表4 貯水池の堆砂対策

(1)流入の抑制	① 土砂バイパス ② 貯砂ダム
(2)堆砂の排除	① フラッシング排砂 ② スルーシング排砂 ③ 掘削・浚渫

①土砂バイパス

1980年前後には、天竜川水系の美和ダムの堆砂対策が検討され、貯水池をバイパスする排砂トンネルを設置する土砂バイパス計画が立案され、実現へ向けての研究が実施されてきた。

これは、貯水池の末端部に分派堰を設け、洪水時に分派堰上流から貯水池を迂回する水路により、流入する土砂の一部を下流河道に排出するもので、土砂バイパスと呼ばれる。流入部では、河床面付近を流動する掃流砂や浮遊砂を流水とともに取り込み、バイパス水路を通して下流へ流下させようとするもので、効率よく土砂を取り込むための構造が重要な研究対象とされている。なお、貯水位が高い状態で排砂設備を操作しても、設備から少し離れると流れはほとんどなくなってしまうため、土砂を動かすことができず、貯水容量の確保の効果はない。

このシステムは、貯水池運用上、水位を低下するのが難しい多目的ダムの堆砂対策として有効である。

②フラッシング排砂

1970年半ばからは、黒部川の宇奈月ダムの排砂計画の立案と並行して、大量の土砂を通過させる本格的な排砂設備の研究が進められてきた。

貯水位を低下させることにより貯水池内の掃流力を限界掃流力以上に回復させ、堤体の下部に設けられた排砂設備によって堆積土砂をダム下流へフラッシュさせるものである。貯水池全体にこの効果を及ぼすためには流水の貯留を否定することとなり、ダムの目的と相反する運用が要求される。発電ダムで取水口近傍の堆積土砂の排出を目的とするもの以外の実施例は少ないが、洪水調節だけを目的とするダムでは水位を低下させるのが容易であり、今後、実施例も増えてくるものと思われる。貯水池への流入土砂の大半は洪水時のものであり、これを速かに排出することは粘土分や有機物を含む堆積物の固結化や嫌気化防止などの観点から望ましい。このため、下流環境への影響の軽減などを考慮して、排砂時期としては洪水の末期が想定されている。水位低下に伴う土砂の排出は、みお筋による側岸および底面の侵食によるもので、みお筋は地形や時間により変化する。このため、堆積土砂の一部は河岸段丘のような形で貯水池内に残り、容量の回復の効率を妨げる。

この排砂方式は水位の低下が容易な治水専用ダムなどの堆砂対策の切り札と考えられるが、水位低下に伴う侵食過程の解明が重要である。また、排砂設備は多量の土砂を流下させることとなるため、摩耗対策を十分考慮し、またゲートは確実に開閉できるように土砂の噛み込みなどを防止できる構造としなければならない。

これからの主要課題は、排砂の効率を高めることや下流の水環境を保全することであり、計画論を含めた検討が行われている。これらは、環境、経済性を考慮して、流水の力を利用しようとするものであるが、それだけでは限界があり、部分的には機械力の助けを得ることも考えることが必要である。

③浚渫・掘削

これは貯水池内の堆積土砂を掘削・浚渫により排出するもので、排出した土砂の一部は建設骨材として利用されている。この方法では、作業効率を高めるための作業条件の整備、適切な施工機械の選定、掘削あるいは浚渫土砂の輸送・処分・濁水処理対策などが問題となる。

表5 浚渫・掘削の実施例
(国土交通省所管ダム:1994年まで)

ダムの管理者	管理ダム数	掘削を実施したダム数	浚渫を実施したダム数	掘削あるいは浚渫を実施したダム数
国土交通省	70	15	6	18
水資源開発公団	15	5	0	5
都道府県	244	21	10	26
合計	329	41	16	49

また、貯水池末端部に小さなダム（貯砂ダム）を設けて土砂を堆積させ、貯水池の運用による水位低下後に機械類により掘削・搬出を行なう方法も採用されている。貯砂ダムの位置および高さは、ダム貯水池の運用、背水の影響、計画堆積土砂量、土砂の排出方法などを考慮して決められる。1997年度時点では、国土交通省所管の管理中の46ダムに貯砂

ダムが設置あるいは計画されていた。

1970年頃に、堆砂対策の総括的な研究が建設省を中心に行われ、建設骨材への有効利用を含めた掘削・浚渫マニュアルが策定されて、活用されてきており、表5に示すように国土交通省所管の管理ダム329のうち、1994年時点で掘削・浚渫を実施したのあるダムは貯砂ダムでの掘削を含めて49に上っている。しかし、山間部における処分地の確保が難しいことなどから、その浚渫・掘削量は約24万m³と限られている。

最近では、下流への土砂供給を目的として掘削した土砂をダムの下流に置土する手法の研究も進められている。

4. 2 放流設備の機能強化

放流設備の機能強化の代表的な事例を表6に示す。主として、放流設備の放流可能量の増加と低標高への新設、貯水池や下流河道の水質管理への対応であり、重力式コンクリートダムの堤体に孔を開けたり、地山にトンネルを新設したり、取水設備を新設したりする工事が行われている。

放流設備を新設または改造する場合には、ダムの堤体あるいは地山に新たに空洞を設けなければならない、このような空洞に対して、ダム堤体及び地山の安定性を確保することが重要である。

堤体や岩盤内に空洞を設けると、その周辺には大きな引張応力が発生する。コンクリートダムの堤体内に設ける空洞は、構造設計上鉄筋で補強する必要があるが、既設ダムに空洞を設ける場合には、鉄筋による補強は不可能である。このため、空洞を開けることにより既設堤体に悪影響を及ぼさないか事前に応力解析を行い確認しておく必要がある。

表6 放流設備の機能強化の事例

(1)放流設備の新設・改造	①洪水吐きの機能向上	藤井川ダム、笹生川ダム、笠堀ダム、福地ダム、五十里ダム、天ヶ瀬ダム
	②利水放流設備の機能向上	旭川ダム、鎧畑ダム、福地ダム、松原ダム、秋葉ダム(発電施設)、内場ダム
(2)選択取水設備・表面取水設備の新設		下久保ダム、旭川ダム、松原ダム、小河内ダム、菅野ダム、五十里ダム



写真1 鎧畑ダム堤体の孔開け

① 洪水吐きの機能向上

笹生川ダムは、完成後計画を上回る洪水が数回発生したことから、洪水吐きの能力を増大させるため新たにトンネル式洪水吐きを設置している。

笠堀ダムも、完成後計画を上回る洪水が発生しダムの安全性を脅かすこととなったことから、洪水吐きの能力を増大させるため堤体を切欠、新たに Crest Gate を設置している。

五十里ダムは、上流の湯西川ダムの建設に伴う新たな洪水調節計画に対応するため、洪水調節用放流設備を設置するものである。既設ダムの放流設備は下流での減勢を考慮して適切な位置に配置されているが、五十里ダムのように新たに大規模な放流設備を配置する場合、水理的に非常に厳しい条件を課せられることになり、詳細は水理実験などにより定める必要がある。

天ヶ瀬ダムは、洪水調節計画の変更、上水道への新規供給及び揚水発電の増電を目的に再開発が進められている。そのため、放流能力の増強のためのトンネル洪水吐きを地山内に設ける計画としている。トンネル内には利水放流設備も併設される。

② 利水放流設備の機能向上

旭川ダムでは既設貯水池の死水容量を有効に利用するため、新たに貯水池内の表面取水設備と地山トンネルの利水放流設備が設けられている。

鎧畑ダムには、上流に建設される玉川ダムで開発された流量を通過させるため、新たな利水放流設備がコンクリート堤体内に設置されている。堤体の掘削断面は直径 4.4 m で、工事にあたって試験施工をおこない、堤体の他の部分に悪影響を及ぼさずかつ掘削効率のよいトンネル掘進機が採用されている。また、放流管呑口の施工をドライの状態で行うため鋼製の仮締切を堤体上流面に設置している。

秋葉ダムは発電専用ダムであるが、余水を利用した新たな発電施設が設置されている水圧管路はコンクリート堤体にスロットドリリング工法により孔を開け設置したもので、掘削断面は直径 6.5 m である。この他、発電ダムでは環境用水補給のための放流設備の新設が求められる例が出てきている。

③ 選択取水設備・表面取水設備の新設

表 6 に示すように、既設ダムに選択取水設備あるいは表面取水設備を設置する事例が増えている。

この場合、既設利水放流設備との接続あるいは機能分担が課題となり、詳細な検討が行われている。なお、旭川ダムは新設利水放流設備に表面取水設備をもつ取水口を設置しており、五十里ダムでも同様な計画が検討されている。

4. 3 ダム・貯水池の機能強化

ダム・貯水池の機能強化の事例には表7に示すものがある。その概要について以下で説明する。

表7 ダム・貯水池の機能強化の事例

重力式コンクリートダムの嵩上げ (旧堤高m/新堤高m) 同:新旧堤体が同軸 下:新堤体軸が旧堤体軸の下流	王泊ダム(63. 5/74. 0)同 三川ダム(48. 0/53. 0)同 川上ダム(46. 5/46. 5)同 新中野ダム(53. 0/74. 9)同 萱瀬ダム(51. 0/65. 5)同 木屋川ダム(41. 0/51. 5)同 新丸山ダム(計画中)下 津軽ダム(計画中)下 夕張シューパーダム(計画中)下
フィルダムの嵩上げ (旧堤高m/新堤高m) E:アースダム R:ロックフィルダム	宿の沢ダム(E25. 5/E30. 0) 大谷内ダム(E15. 0/E23. 0) 白川ダム(E25. 5/E30. 0) 狭山ダム(E17. 4/E18. 5) 山王海ダム(E37. 4/R61. 5)

① コンクリートダムの嵩上げ

コンクリートダムを嵩上げする場合には、嵩上げ後の堤体の力学的安定性を確保することが重要であり、堤体の頂部だけを嵩上げするだけではなく、堤体自体も増厚し、さらに既設ダムと新設部分の一体性を

確保することが必要となる。また、増大する荷重と水圧に対して、基礎岩盤に十分な力学的安定性と遮水性を確保することなどが調査、設計上の課題となる。さらに、嵩上げ工事期間中は既設ダムの機能を維持したまま工事を行うことが多く、洪水処理や利水補給を行いながら安全に工事を行うことが、施工上の課題となる。

嵩上げの方法としては、以下の方式が考えられる。

① 図7に示すように、ダム軸を既設ダムと同位置とし、既設ダムの下流面に新堤体を打継ぐ方式

② 図8に示すように、ダム軸を既設ダム軸の下流に設定し、既設ダム（下流減勢工を含む）の一部に新堤体を載せる方式

③ ダム軸を既設ダム軸の上流に設定し、既設ダムの上流面に新堤体を腹付けする方式
日本のこれまでの事例では①の方式が多いが、施工中の洪水処理の問題から②の方式を選定する事例も増えてきている。

この他、下流にダムを新設して、結果として既設ダムを水没させる事例として、沖浦ダムを水没させた浅瀬石川ダムがあり、また、石淵ダムを水没させる胆沢ダムや管野ダムを水没させる長井ダムなどの計画がある。これら既設ダムそのものの嵩上げではないが、機

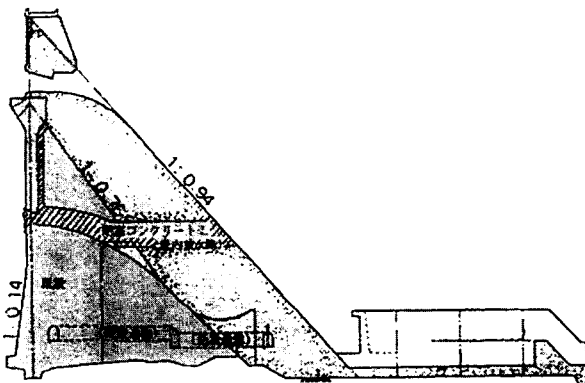


図7 萱瀬ダム嵩上げ概要図

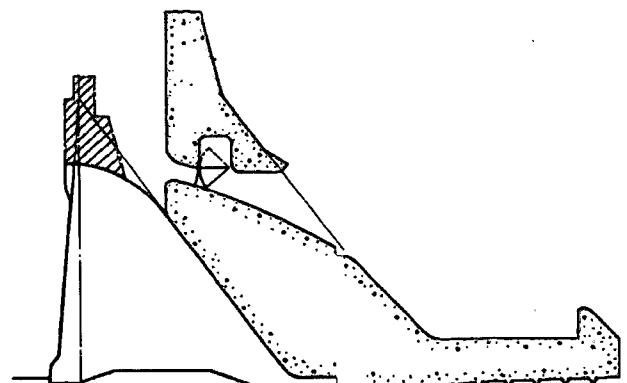


図8 新丸山ダム嵩上げ概要図

能強化の一形態と考えることができる。

③ フィルダムの嵩上げ

フィルダムの嵩上げは表 7 に代表的な例を示すが、全てアースダムの嵩上げである。図 9 はアースダムの典型

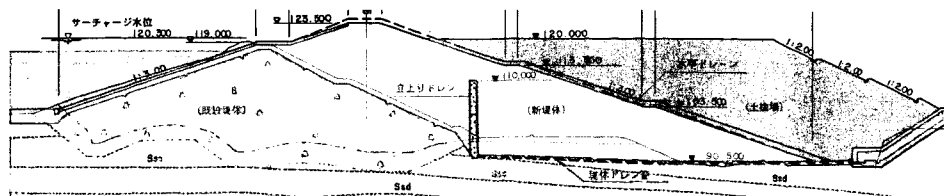


図9 白川ダム嵩上げ概要図

的な嵩上げの事例である白川ダム嵩上げの概要を示したものである。アースダムには、古い時代に築造されて当時の設計・施工に関する資料が残っていないものが多く、嵩上げを行う場合には、既存堤体や基礎地盤に関する詳細な調査が新たに必要で、その調査手法の研究が急がれている。また、小規模な農業用ため池では、古くから堤体の補修や嵩上げが行われてきているが、そこには経験的な技術により築造されたアースダムの決壊、補修の歴史がみられる。ロックフィルダムの嵩上げは、既存堤体の止水を受け持つコアゾーンの補強や新旧堤体の止水構造の接続が難しく、困難である。山王海ダムはアースダムを大規模に嵩上げしてゾーン型ロックフィルダムとしたもので、上流側の堤体ロック下部に既存堤体を取り込んだ形式となっており、コアゾーンは既存堤体の下流に離れて設けられている。

④ ダムの連携

貯水池の規模に比較して流域面積が大きく流入量の多いダムでは、貯水容量がオーバーして、流入水を余水として放流してしまう水量が多くなる。一方、相対的に流域面積が小さく流入量が少ないダムでは、貯水量が一度減ると再び水位を回復するのに時間を要する。このような貯水池同士をトンネル水路等で連結できれば、効率的な水利用が可能となる。代表的な例として、鬼怒川水系の川治ダムと五十里ダムの連携事業が進められているが、この他にも既設ダムの連携あるいは連携を考慮したダムの新設計画が計画されている。

⑤ 堤体の補強

貯水池の機能やダムの安全性を維持するため、種々の対策が行われてきている。

例えば、古くから活用されている発電専用ダムのなかには満砂に近い状況で運用され、発電機能は阻害されていないものの、土砂の流下に伴う堤体下流面や下流水叩きの損傷が著しい例がある。このため、ダムの安全性や放流に伴う下流の安全性を維持するため、堤体下流面の補修や摩耗対策が行われている。

また、堤体コンクリートの老朽化等に対応するため、バットレス形式の笹流ダム(1923年完成)やマルチプルアーチ形式の豊年池ダム(1930年完成)では補強のための大規模な補修が行われている。

一方、兵庫県南部地震にみられるような直下型の大地震に対するダムの耐震性能の評価を踏まえて、必要に応じて堤体の補強が行われている。図 10 は東京都水道局の山口貯水池ダムで実施しているフィルダムの堤体補強の概要図である。このダムでは堤体の上流面と下流面を補強している。

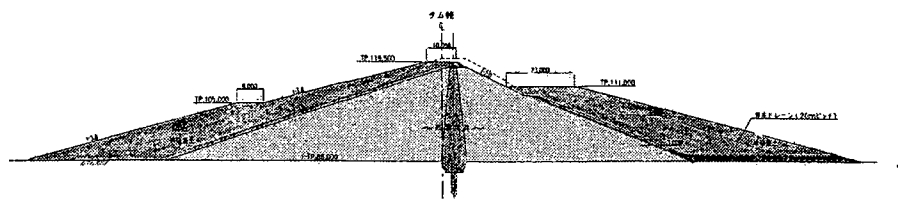


図10 山口貯水池ダム堤体補強概要図

5. あとがき

多目的ダムを中心に、既存施設の有効利用の可能性を論じてきた。多目的ダムに限らず、公共事業に対する逆風は極めて厳しい状況にある。しかし、エネルギー供給、水供給、水環境の保全そして洪水による災害に対しては、地域性はあるにしてもその必要性はまだまだ大きいものがある。貯水池容量の余裕を今の時代にとことん絞り出してしまうて良いのかとの議論はきちんとしなければならないが、時代の流れに沿った適切な対応の一つとして、既存貯水池の有効利用は必要と考える。

さて、地球環境に目を向けてみると、二酸化炭素など温室効果ガスの濃度上昇のために温暖化が進んでおり、石油や天然ガスの埋蔵量の限界から生じるエネルギー問題は、この二十一世紀の早い時期には消費の制限へと変化し、環境問題に取り込まれる様相を見せている。

水は太陽エネルギーの恩恵を受け、循環資源として自然や人間の営みを支えている。水を貯留することはエネルギーを蓄えることであり、このような恵みを意識して、水利用を評価する必要がある。

二十一世紀のエネルギーは、水力、太陽光、地熱、風力など多種多様なものが重要となると考える。また、水供給という面でも、海水淡水化装置などエネルギー大量消費型の水資源開発には自ずと限界があり、ダム貯水池の存在価値は益々高まると思われる。こういった点からも、ダム貯水池の機能を維持することは極めて重要である。

今、59 億人の世界人口は増え続け、二十一世紀末には 100 億人に達すると予想されているが、この人口問題は、エネルギー問題はもとより水資源問題、食糧問題へと波及するものである。

地球全体の水需要量は二十世紀の 100 年間に約 10 倍となっており、二十一世紀においても、さらに増加するであろう。また、地球温暖化にともなう気候変動により降雨特性が変化し、貯水池による河川流量の平準化機能も低下すると考えられ、世界的に水需給が逼迫することになる。

一方、日本の実状を国際的な視点で見えてみると、穀物の自給率 30 %と、食糧の多くを輸入に頼っており、水使用量の 2/3 が農業用水での利用であることを考え合わせると、実質的には水資源の大量輸入国となっている。二十一世紀後半を睨んだ超長期的な水需給を

考える場合には、ボーダレス化の進んだ地球全体の食糧問題や水資源開発の動向も見据えて行かねばならない。

食糧や水資源の確保に対する環境との調和や効率的な水利用を含めた国際的な取り組みは今まきに行われなければならない重要な課題と考えている。

参考文献

- ① 高須修二：ダム放流設備と放流操作、ダム技術 No.142、pp.3-8、1998.7
- ② 藤本 成：多目的ダム放流設備最近の諸問題、水工学に関する夏期講習会、土木学会、1982
- ③ 今村瑞穂：ダム貯水池による洪水調節の合理化に関する2、3の考察、ダム工学 No.30、1998
- ④ 高須・野口・須田：自然調節方式ダムの機能、ダム技術 No.46、1990.7
- ⑤ 高須・新屋敷・宮本：非常用洪水吐きとしての自由越流頂の機能、ダム技術 No.62、1991
- ⑥ 上阪恒雄：貯水池の土砂管理、ダム技術 No.159、pp.4-23、1999.12
- ⑦ 松岡・若槻・門脇・川上：重力式コンクリートダムの再開発における堤体貫通工事の現況、ダム技術 No.145、pp.41-57、1998.10
- ⑧ 則松秀晴：わが国におけるコンクリートダムの再開発技術、大ダム No.148、pp.12-29、1994.6
- ⑨ 坂本・山住・米崎：日本における洪水調節を含む多目的ダムの再開発事業について、ダム技術 No.108、pp.3-17、1995.9
- ⑩ 長谷川高士：フィルタイプダムのかさ上げについて、ダム工学会第5回講習会概要集、pp.1-25、2000.1
- ⑪ Jose Toran Pelaez：ダムの嵩上げ（国際大ダム会議課題20総括報告訳）、大ダム No.11、pp.25-51、1959
- ⑫ 藤沢侃彦・安田成夫：嵩上げ重力式コンクリートダムの設計について、ダム技術 Vol.2-2、pp.31-39、1984

下水道における雨水対策の過去・現在・未来

下水道部長 中村 栄 一

下水道における雨水対策の過去・現在・未来

下水道部長 中村 栄一

1. はじめに

下水道は、都市でも農村でも、汚水の排除・処理と雨水の排除を通じて、生活環境を改善し、公共用水域の水質を保全するナショナル・ミニマムの施設となっている。さらに最近では、都市における水環境再生の要として、また、施設の有効利用により、都市生活の利便性、快適性の向上を図る等、新たな役割の模索が行われている。しかしながら、新たな役割の模索の一方で、依然として「下水道における雨水対策」が重要課題に挙げられている。下水道による都市域からの雨水排除は古くからの課題であるが、未だに合理的、効率的な解決策が見出されていない。その問題を分類すると次の4点に集約される。

(1) 下水道による雨水排除は、放流先河川に何らかの影響をもたらす。下水道の雨水排除が効率的になればなるほど、受け入れ河川の負担は大きくなり、流域全体として見た場合の安全性評価は不明である。また、速やかな雨水排除は河川環境への影響も大きい。

(2) 合流式下水道からの雨天時下水の放流による水質汚濁問題がある。汚水と雨水を同一の管渠で収集・排除する合流式下水道では、強雨時に未処理下水や簡易処理下水が公共用水域へ放流され、水質汚濁の一因となっている。合流式下水道越流水(Combined Sewer Overflows)による水質汚濁問題は、その頭文字を取りCSO問題と呼んでいる。

(3) 分流式下水道においても、雨水排除に伴う水質汚濁問題がある。とくに降雨初期の雨水は汚濁が進んでおり、下水道普及率の向上とともに汚濁負荷源としての比重は高まり、分流式下水道の雨水汚濁対策はこれからの重要な課題と言える。ちなみに、この問題は雨水排水(Storm Water Overflows)の頭文字を取り、SWO問題とか、都市のNPS(Non Point Sources)問題と呼んでいる。

(4) 分流式下水道の污水管にも、強雨のときには管渠容量や処理施設能力を上回る雨水が侵入し、汚水が管渠から溢水、あるいは簡易処理や未処理で放流される。しかしながら、実態は定かでなく、水質汚濁のインパクトは不明である。この水質汚濁問題は、污水管渠からの越流水(Sanitary Sewer Overflows)の頭文字を取り、SSO問題と呼んでいる。

以上のように、下水道における雨水対策は多くの課題を抱えているが、解決は容易ではない。ここでは、過去から現在までの下水道発展の様子、下水道による計画雨水量の算定手法や過去の雨水対策事例、また、現在の雨水対策について紹介する。さらに、これからの下水道における雨水対策の課題について述べる。

2. 近代下水道の成立

生活排水や雨水を排除する排水施設は、古代文明の諸都市にも見られる。しかしながら、暗渠により計画的、合理的に下水を収集・排除する、いわゆる近代下水道の建設は、19世紀半ばからである。この背景には、産業革命による都市への急激な人口集中による、労働者階層の住環境の悪化がある。当時、汚物はアパート中庭に設けられた桶や枡に溜められ、定期的に汲み取られていた。しかし、急増する人口により増大する汚物量に回収が間に合わず、桶や枡からは汚物が溢れ出ている。また、排水施設のない場所にアパートが林立されたため、ひと雨降れば至る所ぬかるみという状況であった¹⁾。

このような劣悪な住環境、さらにはコレラ、チフス等の伝染病の蔓延もあり、労働者階層の病死者は増大し、生産活動にも影響が出るまでになった。このため、欧米の大都市の多くは、1850年代辺りから暗渠による下水管渠の建設に着手した。下水管渠の流末付近の河川では、大量に排出される汚物や汚水のため臭気や水質汚濁が問題となり、1880年代には下水処理も導入された。当時の管渠の大きさは、一人一人が作業できる幅で決められ、どれも概ね成人男子の肩幅よりやや広い大きさであった¹⁾。

わが国における初期の下水道建設の背景も概ね同様である。大阪市、仙台市は、当時の日本政府が招聘したパーマーやバルトンなどの指導を受け、管渠施設の建設に着手した。しかしながら、欧米諸国に比較すると下水道建設の進捗は遅々としていた。東京では1880年代に、今日「神田下水」と呼ばれる暗渠が神田で建設されたが(写真-1)、一部区間が建設されたのみで事業は途中で打ち切られた。わが国の下水道建設が遅れた原因は、明治初頭から多くの死者を出したコレラ、チフス等の伝染病には水道建設で対応が取れたこと、国および地方の財政事情が下水道建設への投資を許さなかったこと、さらに、一般に衛生概念が普及していなかったこと等が挙げられる。

わが国における本格的な下水道建設は、大正年間の1910年代からと言える。1907年(明治40年)、中島鋭治らによって当時の東京市の市街地全体を対象とした下水道基本計画が策定された。この基本計画は、計画人口を飽和人口の考えから300万人、排水区は3分区から成り各々で汚水処理を行う、排除方式は合流式、計画汚水量は1人1日平均6立方尺(約167L)、計画降雨強度は時間1.25インチ(約31.7mm)、さらに、京橋・日本橋一帯の低地排水のため銭瓶の地(東京駅八重洲北側)に中継ポンプ場を設ける、という画期的な計画であった。総事業費は、3,366万円が見込まれた。これは1907年の東京市総財政規模の2.5倍を越えるものであり、事業費確保が大きな課題となったが、1911年に内務大臣、大蔵大臣の認可を得て実施の運びとなった²⁾。

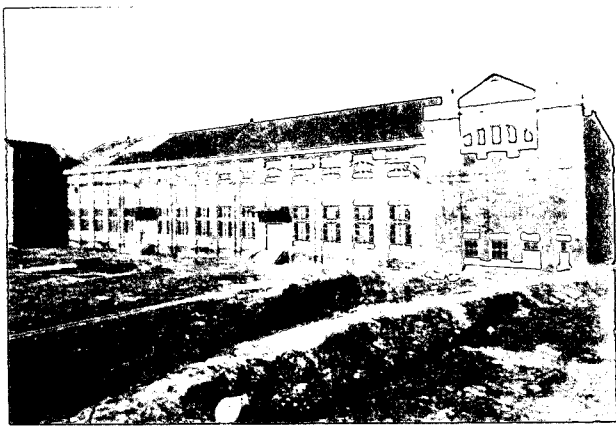
大阪市においては、パーマーやバルトンなどの指導により、部分的な市域について既存水路(太閤下水)を水密性にして暗渠化を図るなどの事業が進められていたが、本格的な下水道事業の着手は東京などと同様、1910年代からである。即ち、1906年に下水道基本計画調査に着手し、まず既成市街地約1,220haについて基本計画が作られた。この計画で

は、対象地域は 10 排水区に分けられ、合流式下水道で市街地の汚水、雨水の排除を行うとされたが、下水処理については、財政の制約から将来の課題とされた。この計画に基づく事業は 1911 年に開始された。

この間、1900 年には下水道法が制定され、他の大都市でも、概ね東京、大阪と同様の時期に下水道基本計画が策定された。この結果、下水道事業が全国的な展開を見せる条件はそろったが、1914 年の第一次世界大戦のぼっ発や、大戦景気によるインフレなどの影響により、十分な予算確保ができない状況であった。このような中で、下水を収集する枝管、幹線や処理場の建設事業は細々と続けられ、1922 年（大正 11 年）3 月、東京三河島でわが国最初の下水处理場が稼働の運びとなった（写真－2）。



写真－1 現在の神田下水



写真－2 三河島処理場ポンプ場

3. 下水道による雨水対策の変遷

3. 1 雨水量算定手法と浸水対策

処理場を有した近代下水道の完成は見たが、汚水の収集や雨水排除のための下水管渠網建設には多大な年月を要した。わが国の下水道における雨水排除は、速やかに集め、速やかに排除するというのが基本になっていた。このため、下水管渠の大きさを決定する計画雨水量の算定は重要であり、下水道による浸水対策の効果を左右する重要要因である。

古くに下水道事業に着手した都市は、当初、経験式あるいは実験式と呼ばれる手法で計画雨水量を算定していた。1880 年、スイスの 2 人の技術者が提案した雨水量算定方式は、彼らの名前を取って、ビュルクリー・チグラーの式と呼ばれ、地表面勾配が比較的きつい地域に適しているとされた。その後、比較的平坦なベルリン市の雨水量算定のため、ビュルクリー・チグラーの式と類似のブリックスの式が提案された。

1889 年、エミール・クイヒリングによって、合理式と呼ばれる雨水量算定式が提案された。東京では、中島鋭治らの下水道基本計画策定後に浸水が多発したこともあり、下水道

基本計画における雨水量算定も合理式による見直しが行われた³⁾。今でも合理式は、わが国の多くの都市における計画雨水量の算定に用いられている。

経験式や合理式は、計画降雨に対して発生する最大雨水量を算出する方法であり、雨水を遅滞なく流下させる管渠の大きさを決める方法として簡便である。速やかな収集と排除が雨水排除の基本である場合はよいが、1960年代後半からは大規模な住宅地・工場地の造成に伴い、雨水を一時的に貯留する雨水調整池を設ける事例がでてきた。この場合、調整池容量の決定には、調整池に流入する時系列雨水量（ハイドログラフ）が必要になる。当時、下水道排水区のような小規模流域用のハイドログラフ予測手法として、単位図法⁴⁾、や等価粗度法（kinematic wave 法）⁵⁾などが知られていたが、解析に必要な定数決定のための十分なデータの蓄積がなかった。このため、便宜的に合理式を改良した方法により、比較的長時間降雨に対してハイドログラフを作成する方法が、下水道における雨水調整地の計画に用いられた⁶⁾。

合理式によるハイドログラフは、実降雨による検証が難しく、また、後述する合流式下水道の水質対策立案の上でも、より精度の高いハイドログラフの予測方法が求められていた。このため、英国の下水道排水区でのハイドログラフの予測方法である RRL 法をわが国の都市向けに改良した修正 RRL 法⁷⁾が、下水道におけるハイドログラフの予測方法として指針に加えられた^{8)、9)}。

以上の雨水量算定方法は水文学的手法であり、流末の1箇所において雨水量を予測することから集中型モデルと呼ばれる。これに対し、1970年代に下水管渠系内の流れを追跡計算し、任意の地点で雨水量を予測する分布型モデルが提案された（表-1）。米国では、1972年の水清浄法（Clean Water Act）により、全ての汚濁源に対して放流先の水質影響を予測することが義務化されたため、EPAの援助により開発された SWMM (Storm Water Management Model) を初めとして、下水管渠内の水量、水質を追跡計算するモデルがいくつも提案された¹⁰⁾。わが国でも、幹線管渠系を追跡計算する方法が研究されたが¹¹⁾、適用事例は2、3の都市に限定された。この背景には、当時は国全体の下水道普及率も低く、污水管渠と処理場の建設に投資が集中し、雨水対策予算が十分に確保できなかったこ

表-1 代表的な分布型モデルの特性¹⁰⁾

モデル名	計算タイプ (*)	水理計算	満管流 (**)	制御施設 (越流堰等)	水質項目数	貯留 (**)	処理	計画・設計 (***)
DR3M-QUAL	C,SE	kinematic	Y	N	4	Y	Y	P,D
HSPF	C,SE	kinematic	N	N	10	Y	Y	P,D
ILLUDAS	SE	kinematic	Y	N	なし	Y	なし	D
SWMM	C,SE	dynamic	Y	Y	6	Y	Y	P,D
TR55	SE	kinematic	N	N	なし	Y	なし	D
HEC-1	SE	kinematic	N	N	なし	Y	なし	D

(*)C: 連続シミュレーション、SE:単一降雨シミュレーション、(**)Y:yes, N:no、(***)P:計画適用可、D:設計適用可

と、また、一般に用いられていたコンピューターの性能が、分布型モデルの計算に追いつかなかったことなどがある。

分布型モデルは、任意のマンホール地点で水位、水量の計算結果が得られ、また、水理現象をかなり忠実に再現しようという試みがなされている。したがって、これからの下水道における雨水対策、あるいは河川管理と連動した下水道施設の運転操作を実施する上で有用なツールになる可能性は高い。しかしながら、同時、多地点での水位、水量の計算値と実測値の比較を行った検証例がほとんどないので、現時点では分布型モデルによる計算結果を施設設計にまで用いている事例はない。モデルが精緻になると、集中型モデルでは無視できたことも、その影響を無視し得ないことがある。例えば、建設後数年も経過した管渠は地震や近接工事等の影響で沈下や蛇行により流下能力が変化するが、このような局所的な変化による影響を表せるまでにはなっていない。また、合流部や満管時のマンホール部での損失機構は解明すべき点が多々あり、課題となっている¹²⁾。

下水道における雨水対策は、現在でも速やかに集め、排除する方法が基本になっているが、政令指定都市を中心として雨水調整池、あるいは後述する合流式下水道対策としての雨水滞水池方式が広まりつつある。また、沿岸部の都市には、大規模集水管渠により放流先を河川から海域に変更するところある(図-1)。また、ポンプ場運転の支援のため、レーダー雨量計や高密度地上雨量計の設置を行っている都市もある¹³⁾(表-2)。

このような浸水防除の努力により、大都市では年平均の浸水面積や被害家屋数は減少する傾向にあるが(図-2)、人の動き、物の動きを支える都市交通が高度になったためか、あるいは単位面積辺りの資産価値が上昇したためか、単なる路面冠水でもその被害は大きくなる。このため、大都市では間接被害も含めたトータルの浸水被害は改善されているとは言い難く、単位面積当たりでは増加していることとなる(図-3)。

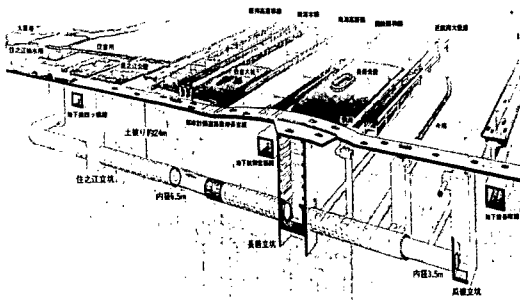


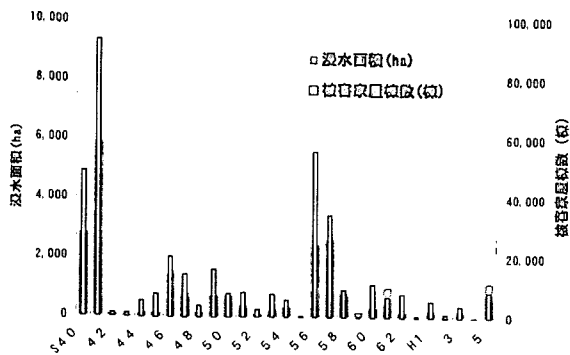
図-1 なにわ大放水路

表-2 主なレーダー雨量計特性¹³⁾

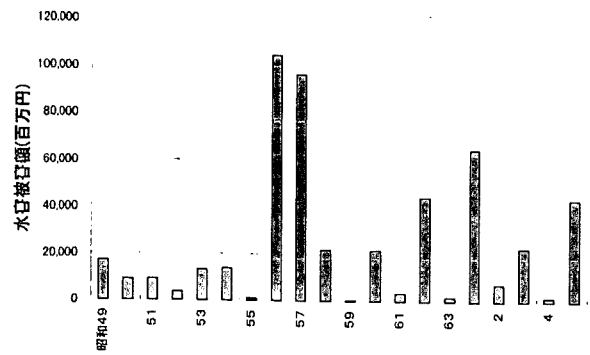
システム	単位メッシュ	観測半径	周期	周波数	降雨強度
	m	km	分		mm/hr
SNET/札幌	1,000	100	5	Xハント*)	**)
東京アメッシュ 500	500	40	2.5	Xハント*	0～250
レインネット川崎	500/1,000	100	2.5	Xハント*	0～255
レインアイ横浜	250/500/1,000	50	2.5	Xハント*	0～255
ASアイズ*/大阪	250/500/1,000	80	2.5	Xハント*	0～255
レインマップ* 神戸	250/500/1,000	80	2.5	Xハント*	0～255

*) 気象観測用周波数帯の一つ、周波数 9.3~9.5GHz

**) 降雪レーダー使用のため降雨強度算出はしていない



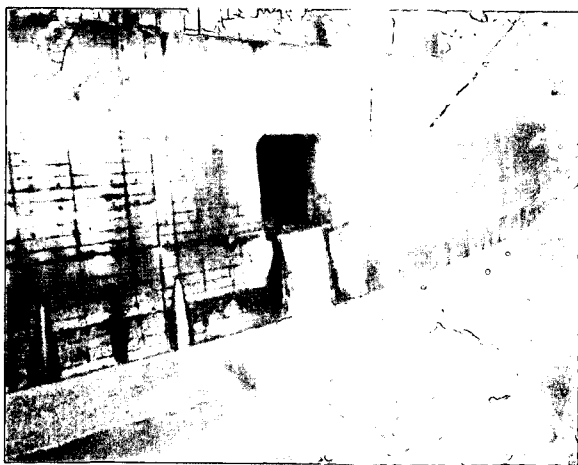
図－2 浸水被害の変遷（東京）



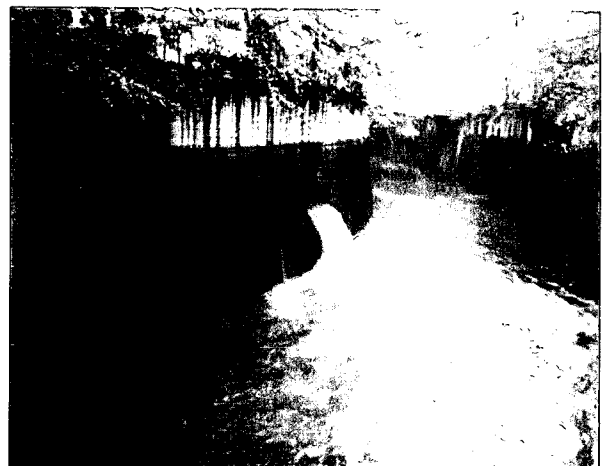
図－3 浸水被害の額の変遷（東京）

3. 2 合流式下水道対策

合流式下水道においては、主として経済的な理由から、汚水と雨水が混合した雨天時下水の一定量のみが処理場まで運ばれ、超過した下水（CSO）は未処理で雨水吐き室あるいはポンプ場から放流されている（写真－3、4）。処理場まで送水する雨天時下水は遮集下水と呼ばれ、その量は晴天時下水水量との比率を取って遮集倍率と呼んでいる。遮集下水を処理場まで運ぶ遮集管の大きさ、すなわち遮集倍率は、処理場の簡易処理施設の必要能力とともに CSO の頻度、量に大きく影響する。一般的には、降雨特性や放流先水域利用特性等から決められる。東京における初期の下水道計画では、汚水量＋1/100 インチ（0.25mm）の雨水量が遮集管容量とされた。また、名古屋市では放流先の河川で 10 倍以上の希釈が期待できるよう、遮集量を設定した¹⁴⁾。



写真－3 小降雨時の CSO



写真－4 強雨時の CSO

現在、わが国における遮集管渠容量は、晴天時下水量（ Q ）に対し3倍量（ $3Q$ ）を目安に設定されているが、遮集する雨水量を絶対値で定め、 $Q+2\text{ mm/hr}$ とする方が合理的である⁸⁾。一般に希釈倍率を大きく取れば越流頻度、越流負荷量は減少するが、これらの関係は、雨水吐き、ポンプ場毎に異なる。ちなみに、米国では平年での越流頻度を5回以下に、また、英国では晴天時の日平均汚水量の8倍量というのが遮集管容量決定の目安となっている。

合流式下水道の雨天時下水の水質予測あるいは汚濁負荷量予測は、CSOの影響や対策を評価する上で重要である。わが国では、雨水の集中型モデルの開発と同時期に、雨天時下水の汚濁負荷量予測手法が提案され¹⁵⁾、修正RRL法により雨水量予測を行い、BOD、COD、SSを対象に対策効果を予測するモデル¹⁶⁾が、CSO対策指針に適用されている⁸⁾。

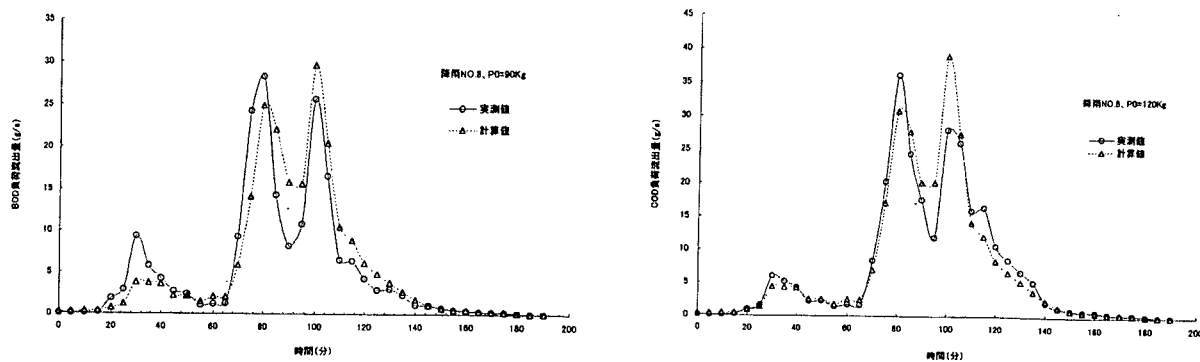
CSO対策としては、遮集管増強、雨水滞水地、雨水の貯留・浸透そして雨天時下水の処理などが実施されている。遮集管渠対策は、汚水量が計画よりも超過した場合には必要な対策であるが、放流地点を上流から下流へ移すだけの効果しかないこともある。このため、現在のCSO対策の主流は、雨水の貯留・浸透、CSOの一時貯留・処理であるが、下水処理場における簡易処理の高度化も進められている。

3. 3 分流式下水道の雨水対策

分流式下水道区域からの雨水による汚濁負荷量は、排水区域の土地利用に影響される。一般市街地の場合、例えばCODでは年間 $100\sim 200\text{ kg/ha}$ 程度である（中村、1993）。汚水のCOD負荷量原単位を 30 g/人/日 とし、処理場での除去率を90%と仮定すれば、人口密度が 100 人/ha の排水区での処理水による年間放流COD負荷量は約 330 kg/ha となり、雨水による汚濁負荷量は軽視できないことがわかる。このため、下水道事業の中で雨水による汚濁対策事業が制度化され、現在、指定湖沼の水質改善を図ろうとする県を中心として、初期雨水の貯留・処理の事業化が進められている。

分流式下水道区域からの雨水の水質予測、汚濁負荷量予測は、そのインパクトや対策の効果を評価する上で重要である。集中型モデルではあるが、合流式下水道の雨天時下水の汚濁負荷量モデルと類似の考え方により、雨水による汚濁負荷流出モデルが作成され¹⁷⁾、検証されている（図-4）。

分流式下水道の污水管からの溢水等、SSOの問題については実態の解明はほとんどなされていない。表-3は、合流式区域を含まない、100%分流式下水道区域の処理場20箇所における年間処理水を流入水量、汚水量（有収水量）、そしてその差を侵入水量としてまとめたものである。侵入水量には地下水量もあるが、管渠が埋設されている深さの地下水は雨水の浸透水が多いと考えられ、基本的には雨水起源である。降雨時に侵入水が増大したときの対策も、これからの下水道の雨水対策の重要な位置を占めよう。



図－４ 雨水による汚濁負荷量の再現計算検証例

表－３ ２０箇所の分流式終末処理場の侵入水の実態

処理区	年間水量 (m ³)	年間汚水量 (m ³)	侵入水量 (m ³)	侵入水比率 (%)
A	1,125,899	894,212	231,687	20.6
B	2,776,520	1,491,725	1,284,795	46.3
D	3,009,910	1,256,334	1,753,576	58.3
E	1,783,096	1,227,205	555,891	31.2
F	1,164,262	1,120,661	43,601	3.7
G	843,456	607,360	236,096	28.0
H	2,137,450	1,411,205	726,245	34.0
I	2,531,388	644,225	1,887,163	74.6
J	3,045,853	2,321,251	724,602	23.8
K	5,277,171	3,765,693	1,511,478	28.6
L	894,777	684,581	210,196	23.5
M	24,466,944	22,863,965	1,602,979	6.6
O	4,659,698	2,663,807	1,995,891	42.8
P	1,779,980	1,221,332	558,648	31.4
Q	8,319,260	5,615,160	2,704,100	32.5
R	8,079,283	7,911,086	168,197	2.1
S	885,023	869,153	15,870	1.8
T	1,126,398	713,717	412,681	36.6
U	596,781	319,740	277,041	46.4
V	943,018	788,400	154,618	16.4

４．これからの雨水対策の課題

浸水対策、CSO、SWO、SSO など、下水道で取り組むべき都市の雨水対策の課題は多様である。下水道が今まで都市の雨水に対して取ってきた対策の基本は、速やかに集めて排除する、というものである。最近、下水道事業においても雨水の貯留・浸透が進められ、場所によっては雨水利用と併用されている。しかしながら、現実には一部の政令指定都市や通常下水道普及率が高い都市が、先駆的に雨水対策を進めているのが実態で、国全体として見た場合には、下水道の雨水対策は下水道普及率向上の陰で取り残された課題であると言える。ここでは、浸水対策、CSO、SWO、SSO の各課題について、問題解決のた

めの主要な研究課題について述べる。

都市機能が高度化し、また、地下街などの発展により物理的にも都市構造が変化している中にあって、下水道と河川だけで都市の雨水排除を完結するのは困難になりつつある。しかしながら、近年の豪雨は局所的であり、流域をまたぐと全く降っていないことがよくある。したがって、既存施設の有効活用という観点から、レーダー雨量計、地上雨量計の活用により、大規模バイパス管渠や調整池をリアルタイムで制御する手法の開発が効果的である。また、既存管渠のネットワーク化による管渠スペースの有効活用技術の開発も、安価な、新しい対策である。ただし、計画規模を超える超過外力は必ずあり、被害を最小化する氾濫のさせ方についても研究が必要であろう。このためには、地上における氾濫水位等の同時多地点データの収集を行い、精度の高い氾濫モデルの確立が急務と言える。また、最近の都市の浸水による被害は間接被害が主流と考えられ、被害の内容や発生機構を明確にして、被害最小化の方策を探る必要があると考えられる。

CSO に関しての最大の懸案は病原性微生物の排出である。ウイルス、病原菌、原虫など、汚水に生息する病原性微生物は、CSO 中にも高い濃度で存在すると考えられるが、正確な把握はされていない。病原性微生物の放流実態を把握し、場の特性に応じて適切な対策を確立する必要がある。わが国では、疫学的な指標として大腸菌群が用いられているが、CSO の大腸菌群数は高い値を示している。処理場であれば何らかの消毒が可能であるが、自然流下の雨水吐き室のように、わずか数秒という時間での消毒技術は未確立であり、重要な課題であろう。

SWO に関しては、構造物的対策としての初期雨水の貯留と処理が確立されている。構造物的対策としては、他にも人工湿地、浸透地などがあり、基準の作成が急務である。また、路面清掃や市民団体による街の清掃運動など、ソフト対策の展開も必要であろう。通常の下水处理と異なり、費用を誰が負担するか不明な領域であり、計画段階から市民参加型の事業計画作りが必要な分野と言える。

最後の SSO は、実態の把握が急務であろう。CSO についても言えるが、わが国では雨天時の下水の放流に対しても水質汚濁防止法の排水基準をあてはめるという、技術的には考えられないことが行われている。このような状況下では、結果が公開されることを前提とした調査をさせてくれる都市を見出すのは至難である。自治体の独自調査を待つか、下水道行政の指導の一環として国が行うか、市民への一日も早い情報公開・情報説明が求められよう。

5. おわりに

下水道における雨水問題の実態、対策、およびこれからの課題等について述べた。現在、わが国の下水道普及率は 60% を上回ったが、これは汚水を基準とした汚水の収集可能区域

居住人口の比率であり、概ね、汚水の二次処理率と考えてもよい。下水道の普及が遅れたわが国にあっては、下水道普及率は重要な指標であったが、浸水防止、水環境保全という機能からみると、レベルの高い下水道ではない。とくに、本論で述べたように、都市の雨水への対応という観点から、今の下水道を評価すると、機能面での質的向上が急務と言えよう。

参考文献

- 1) 大場英樹：水はめぐる・現代の博物誌（水）、現代教養文庫、社会思想社、1976
- 2) 東京都下水道局：下水道東京100年史、1989
- 3) 米元晋一：下水管の雨水流量、土木学会誌、Vol.1、No.3、1915
- 4) 土木学会：水理公式集、昭和38年増補改訂版、1963
- 5) 建設省土木研究所：下水管路施設設計の合理化に関する調査研究報告書、土木研究所資料第366号、1968
- 6) 日本下水道協会：下水道施設設計指針と解説、1972
- 7) 山口高志、松原重昭、山守隆：都市域における降雨流出調査（第2報）、土木技術資料、Vol.14, No.11、1971
- 8) 日本下水道協会：合流式下水道越流水対策と暫定指針、1982
- 9) 日本下水道協会：下水道施設設計指針と解説、1983
- 10) WEF、ASCE：Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems, 1992
- 11) 中村栄一：ポンプ排水区での雨水排水対策、土木技術資料、Vol.22、No.9、1977
- 12) Yen, B. C., : Urban Drainage Hydraulics and Hydrology, 12th IAHR, 1987
- 13) 中沢均、鈴木建、山本賢一：降雨レーダーを活用した総合的な浸水対策システムに関する調査、技術開発部報1999、日本下水道事業団、2000
- 14) 杉戸 清：下水道学、技報堂、1957
- 15) 山口高志、中村栄一、山守隆、杉山勉：都市域からの雨天時汚濁流出調査報告、土木研究所資料第1019号、1975
- 16) 中村栄一：合流式下水道対策の検討(II)、第16回衛生工学討論会、土木学会、1980
- 17) 中村栄一：雨水流出水による汚濁負荷の流出特性、下水道協会論文集、Vol.30、No.9、1993

特別講演「21世紀の日本社会と

リスクマネジメントのあり方」

日本リスク研究学会会長 酒 井 泰 弘

21世紀の日本社会とリスクマネジメントのあり方

日本リスク研究学会会長 酒井 泰弘

1. 鬼は外、福は内——はじめに

我々はいよいよ21世紀に突入した。今世紀最初の節分の日を迎えて、私たち日本人は例年より一層高らかに、こう叫びたいものである。

「鬼は外、福は内！鬼は外、福は内！」

だが、日本社会を取り巻く状況は厳しく、リスクに満ちみちている。だから、日本社会におけるリスクマネジメントのあり方も転換点を迎えている。従来型のリスク管理がなお有効なのか、有効でないのか——それが問題である。

今から100年ほど前のことである。近代小説の父と称せられる夏目漱石は名作『三四郎』の中で、「ひげのある男」に变身し、主人公の三四郎にこう語らせた。

「こんな顔をして、こんなに弱っていては、いくら日露戦争に勝って、一等国になっても駄目ですね」

三四郎は少し狼狽して、

「しかし、これからは日本もだんだん発展するでしょう」

と弁護した。すると、ひげの男はすましたもので、

「亡びるね」

と言った。

それからの日本はひたすら富国強兵の道を歩み、「軍事大国」となり、その結末が真珠湾攻撃と広島への原爆投下だった。明治以降、日本の経済社会はだんだん発展したが、滅びる寸前のところまで行った。

55年前の敗戦以後、日本は奇跡的に復活し、世界第二の「経済大国」になるまで発展した。だが、バブル崩壊以後の1990年代は「失われた10年」と形容されるほど、日本人の多くはふらふらし、自信を失ってしまった。もしこのままの調子が続くと、日本社会は本当に亡びかねないだろう。「カントリー・リスク」という言葉は、従来は日本とは全く無縁だと信じてきたが、今ではそうとも言い切れないようである。

私見では、日は昇り、沈み、また昇るだろう。思うに、昇った日は沈むに易しいが、沈んだ日を再び昇らせるのは大変難しい。わが「日本丸」を沈没のリスクから救うためには、強力な羅針盤と操縦技術が必要である。そのためにも、私たちは21世紀の初頭に一度立ち止まり、リスクマネジメントのあり方を再考しなければならないだろう。

2. 日本の「安全神話」を揺るがす大事件の数々

リスクとは何であろうか。少し厳密に定義すると、それは人間の生活維持や社会経済活動にとって、「望ましくない事象」の不確かな程度、およびその結果の大きさの程度である。要するに、リスクとは人間生活にとって「望ましくないもの」の総称である。

リスクが大きいとは、望ましくないものの被害の程度が大きいこと、その発生確率が大きいことを意味する。例えば、自転車と自動車と比較しよう。自転車と比べて、自動車は「便利のよい乗り物」ではあるが、「リスクの大きい乗り物」である。自動車事故が起これば被害額も大きいし、事故の確率も数段に高い。世にいう「ハイリスク、ハイリターン」とは、まさにこのことである。現代の人間は、文明の利器を獲得した代償として、「リスクに満ちみちた社会」に住んでいる。

しかし、上述の議論はいわば一般的な「総論」にすぎない。もっと具体的な「各論」に入ると、リスクの程度や有り様、およびリスクマネジメントのありかたは、国や文化や歴史の違いによって実に多種多様なのである。この点に関して、ペンダサンこと山本七平氏は名著『日本人とユダヤ人』（1970年）の中で、次のような鋭い指摘を行った。

「日本は、安全も自由も水も、常に絶対に豊富だった（少なくとも過去においては）。だから、それがいかに大切だからといって、そのためにカネを払おうとする人はいない。だが、砂漠に行けば、水筒1本の水が時には1万円のジョニ黒より価値があり、場所と環境によっては、おカネの余裕が十分ないのに最高級のホテルに泊まることもしなければならない。」

過去の日本は、安全と水がタダの国であった。だが、ごく最近においては、事情が随分変化しつつある。一方において、水道の水はもはや安心して飲めないし、ボトル入りのミネラル・ウォーターがスーパーの人気商品のひとつとなっている。他方において、日本の「安全神話」を脅かす事件・事故が続発している。それらの若干をドキュメンタリー風に列挙すれば、次のようになる。

第1の事件——「雪印食中毒事件」、2000年6月末から7月にかけて発生。雪印乳業大阪工場で製造された低脂肪乳が原因で、1万人以上の人々が食中毒。品質期限の切れた乳製品が加工乳の原料として再加工。炎天下のなかでバケツを用いた手作業。後に、別の原因が浮上。北海道の大樹工場で製造された脱脂粉乳の中から、問題の黄色ブドウ球菌が検出。これが廃棄されずに、全国の工場へ流通。トップブランドという安心感の崩壊。

第2の事件——「東海村原発事故」、1999年9月30日。茨城県東海村にある原発関連工場JCOで臨界事故。放射能漏れで2名死亡、工場で働く人や住民の多数が被爆。裏マニュアルの存在と飛ばし作業、バケツで手作業。風評被害。ヒューマン・ファクターの存在。

第3の事件——「地下鉄脱線事故」、2000年3月8日。営団地下鉄日比谷線の中目黒付近で、脱線事故が発生。3人が死亡、数十人が重軽傷。「地下鉄は安全だ」という過信と補修管理の怠慢。

第4の事件——「欠陥車のリコール隠し」。三菱自動車会社は多年にわたって欠陥車の公表を行わず、密かにリコール車を回収して修理。その間に、欠陥車の事故が多発。情報の非対称性、信頼の崩壊。

いずれの事件においても、「ヒューマン・ファクター」が微妙に絡んでいるのに注意されたい。リスクの事前対応においても、事後処理においても、最後の「決め手」はやはり人間である。人間の信頼なくしては、社会は成り立たないし、リスクの対応処理が上手くいかない。学際的・総合的なリスク科学の樹立が急務であろう。

3. リスク観の日米比較——社会心理学的アプローチ

たとえ同じリスクであっても、国や文化や歴史の違いを反映して、その認識が大きく異なる。このような点を浮き彫りにする日米比較研究があるので、以下に紹介しよう。

広瀬弘忠教授（東京女子大）らの研究グループは、1992年から93年にかけて国際的なアンケート調査を行った。図表1が示すように、日本およびアメリカで分析対象となった共通のリスク要因は、核廃棄物、エイズ、麻薬、原子力発電、火力発電、電磁場の六つである。それぞれの要因に関して、社会全体にとってどの程度のリスクがあり、また本人や家族にとってどの程度のリスクがあるかが問題となる。もし各要因について「社会全体へのリスク」と「本人や家族へのリスク」がほぼ一致すれば、それに対応する点は45度線の近くに位置するはずである。

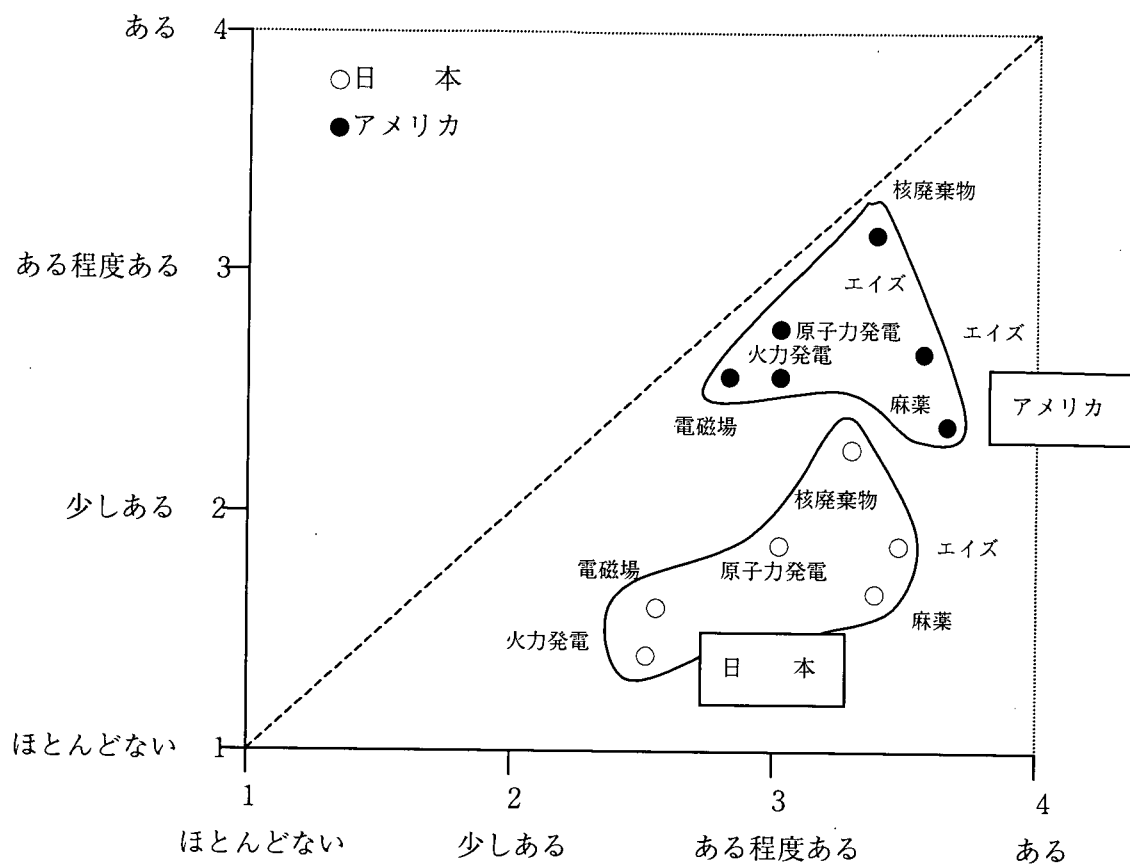
図表1から直ちに読みとれることがある。それは、日本においては、たとえ社会全体でリスクが相当あるとしても、自分や家族の生活は特別に守られているという「安全保護意識」が非常に根強いことである。これに対して、アメリカは日本よりややリスクの大きい社会であるばかりでなく、本人や家族が個人レベルで各リスクに対処しなければならない。

日本人のリスク全体についての意識は、確かに変化しつつある。地域社会や家族間の結びつきが弱まる一方で、個人主義の傾向が強まりつつある。しかし、このような傾向をもって、日本人のリスク観が欧米型に一方的に収束しつつあると即断するのは、あまりにも行き過ぎであろう。

日本にはアメリカにない風土と歴史があり、これは将来も変わらない。「水戸黄門」や「遠山の金さん」が庶民の味方として活躍するのは、日本独自の精神風土があつてのことであり、恐らくアメリカ人にはよく理解できないだろう。他方、アメリカの西部劇に見られるように、宿場町の人々が各自武装し、自前の保安官を雇い、悪漢の襲撃に備えるという姿は、日本人のメンタリティから乖離しているように感じられる。

去る1995年、阪神大震災が起こり、5千人以上の人々が死亡した。そのような大災害の中において、店舗襲撃と略奪・乱闘など、アメリカ流のパニック現象が全く発生しなかったことは特筆すべき事柄である。その際、住民同士の助け合い運動が最も効果的であったことを忘れてはならない。日本社会においては、人々がお互いに手を差しのべ合うことが現在でも生きている。リスクに対処する社会全体の枠組みのようなものが存在している。

〈本人や家族へのリスク〉



〈社会全体へのリスク〉

図表1 リスク観の日米比較
(出所) 広瀬弘忠氏らのアンケート分析

4. 環境リスクと意思決定——経済学的アプローチ

すべての物事には、光と影の両面がある。1950 年代の日本には、国は破れたものの、美しい山河が至るところにあった。しかし、1960 年代の高度成長以降、多くの場所において、山が削られ、大気が汚れ、河川に魚貝が住めなくなってしまった。成長か環境か——これは古くして新しい難問題である。

1980 年代になると、遺伝子工学や情報処理システムなど、ハイテクといわれる産業技術が飛躍的に発展した。このため、大量消費と大量廃棄の同時発生という新しい事態が生じた。例えば、発電所・エンジンなどから排出される微量な浮遊化学物質、新素材・溶媒などから出る発癌性の物質、廃棄物焼却場から大気中に放出されるダイオキシンの問題などがあり、環境リスクは質量ともに増大しつつある。しかし、リスクを文字通りゼロにするのは、技術の面でもコストの面でも「ミッション・インポシブル」であろう。私たちはしたがって、社会的に許容可能な環境リスクの範囲内で、さまざまな意思決定を行う必要がある。

環境リスクと意思決定の関係の問題に関して、有力な経済学的アプローチがある。そのアプローチとは、期待効用理論に基づく「コスト・ベネフィット分析」(cost-benefit analysis)である。問題の所在を知るため、私たちは特定地域に火力発電所を建設するか、原子力発電所を建設するか、という選択に迫られていると想定しよう。

図表 2 を眺めよう。2 つのタイプの発電所では、事故率が異なっているのが普通である。仮に、火力発電の事故率が p 、原子力発電の事故率が q と特定化できると想定する。

発電の種類	状 態	
	無事故	事故
火力発電	3 0 0 (確率 $1 - p$)	- 4 0 0 (確率 p)
原子力発電	5 0 0 (確率 $1 - q$)	- (6 0 0 0 + α) (確率 q)

図表 2 火力発電か原子力発電か

簡単化のために、火力発電の場合、無事故のときの経済利益が年間 300 億円であり、事故発生の被害額が 400 億円であると仮定する。それに対して、原子力発電の場合には発電単価が低いので、年間 500 億円の経済利益が上ると仮定する。だが、原子力発電の事故は物凄く破壊的なので、被害額は少なくとも 6,000 億円、および予め推定不可能な「プラス・アルファ」があると仮定しよう。

この場合、人々は火力発電と原子力発電の中で、どちらを選択するのが「合理的」だろうか。ここで期待効用理論を適用すると、火力発電からの期待効用 EU (火力) と原子力発電からの期待効用 EU (原子力) は、それぞれ次のように計算されよう。

$$EU(\text{火力}) = (1-p)U(300) + pU(-400)$$

$$EU(\text{原子力}) = (1-q)U(500) + qU(-6000+\alpha)$$

もし EU (火力) が EU (原子力) を上回る (または下回る) ならば、火力発電 (または原子力発電) のほうがベターな選択だろう。両者の大小を決めるファクターはいろいろあるが、とくに次の四つのものが重要である。

① 効用関数 $U(\cdot)$ の特定化と形状。原子力発電に対しては、人々の間で特別な恐怖感が存在する。住民全体の合意に基づく集計的な効用関数というものが、はたして特定化できるだろうか。

② 火力発電の事故率 p 。事故率 p の客観性に多少とも疑問があり、しかも立地場所の自然条件 (地震・火事・台風など) にも依存している。

③ 原子力発電の事故率 q 。この事故率は恐らく火力発電の事故率 p より低いだろうが、実際どれだけ低いのかについては、住民の間で不信の念が少なくない。そもそも、原発事故は繰り返し実験可能な事故ではないのだ。

④ 原子力発電事故の被害額 (「プラス・アルファ」 α のファクター)。1985 年 5 月末に、旧ソ連チェルノブイリで発生した原発事故を想起してほしい。原子力発電所の炉心が熔解し、広島の前爆投下のときを数倍上回るほど大量の放射能が大気中に放出されたという。

この場合、放射能汚染が今後数十年にわたって地域住民に及ぼす環境・健康両面のリスクについて、私たちはどれほど正確な推定値を与えることができるだろうか。さらに、1999 年 9 月末の東海村の臨界事故においては、「原子力の村」のイメージが大幅にダウンしたが、このような被害を具体的数値で表わすことは至難の業であろう。

現在において、環境リスクの人間に及ぼす悪影響はとどまるところを知らない。例えば、地球温暖化・オゾン層破壊・放射能廃棄物・ダイオキシン汚染などの地球環境問題、富栄養化・農薬汚染・産業廃棄物汚染などの屋外環境汚染、タバコ受動喫煙・ラドン吸引・アスベスト吸引などの室内環境汚染などがある。これらの環境リスクのリスク度と被害額が一体どの程度なのか——これは単に科学的・技術的観点からだけでは明らかにすることができない大問題である。

リスクと不確実性が支配する世界では、私たちは常に大きく社会的・経済的・文化的制約を受けている。したがって、環境リスクの評価やマネジメントにあたっては、学際的・総合的アプローチがどうしても必要不可欠である。

5. 「生活者」の視点の重要性——おわりに

時は、1894年1月27日、今から100年以上も前のことである。ラフカジオ・ハーンこと小泉八雲は、旧五高（現熊本大学）の職員や生徒を前に「極東の将来」というタイトルで英語の講演を行い、人々の間に深い感動を与えた。この結びの言葉は次のようである。

「日本の将来が偉大になれるかどうかは、九州魂ないし熊本魂、すなわち簡素で純良でシンプルなものを愛し、生活上の無用な贅沢と奢侈を憎む心を保持すること如何にかかっています」

小泉八雲の言葉は、21世紀を迎えた今日においても生きていると思う。私たちがリスクマネジメントのあり方を考える際、ただ金銭や効率性のみを追求する「経済人」であってはならない。今こそ、精神のゆとりと自由、美しい環境を作り出す「生活者」の視点が大変重要である。

新しい世紀には、新しい視点と目標を掲げよう。20世紀の日本は「軍事大国」の道を突き進んで失敗し、その後は「経済大国」への道をひたすら歩み頓挫した。21世紀に入った今日、私たちは一層高い次元に立ち、一層しなやかな気持ちで、ゆたかでゆとりのある生活を保証する「生活大国」を目指す必要があるだろう。

地震防災・耐震技術の新たな視点

耐震技術研究センター長 常 田 賢 一

地震防災・耐震技術の新たな視点

耐震技術研究センター長 常田賢一

はじめに

平成7年(1995年)1月17日の阪神淡路大震災から6年が経過したが、その間海外ではトルコ(1999年8月)や台湾(1999年9月)で内陸直下型の大地震が発生している。一方、我が国においても、平成12年(2000年)7月～8月の伊豆諸島における群発地震や同年10月の鳥取県西部地震が発生しており、改めて地震災害に対する危機管理意識を喚起させることとなった。

このような状況の下で、国土管理の基本の一つである地震防災については、地震災害の教訓等に基づいて、新たな視点で技術研究開発に取り組んでいるが、ここでは土木研究所における最近の地震防災・耐震技術に関する研究開発の現状を紹介するとともに、今後の研究開発の課題、方向について述べる。

1. 土木研究所における地震防災分野の研究開発体制

現在、土木研究所において地震防災の研究開発に従事している組織および主たる研究項目は次の通りである。

環境部 : 地質研究室・・・活断層・ハザードマップ

ダム部 : フィルダム研究室・・・ダムの耐震設計

材料施工部 : 施工研究室・・・基礎の耐震補強

コンクリート研究室・・・コンクリート上部構造の耐震設計

構造橋梁部 : 基礎研究室・・・基礎の耐震設計・耐震補強

橋梁研究室・・・鋼製橋脚・鋼上部構造の耐震設計

耐震技術研究センター

: 防災技術課・・・強震観測・地震防災計画・地震危機管理

振動研究室・・・地震動・ハザードマップ・地盤の耐震性・地盤～構造物の相互作用

耐震研究室・・・構造物の耐震設計・耐震補強

動土質研究室・・・土構造物の耐震設計・液状化対策・斜面の地震時安定性

主要な研究課題として、**第5次土木研究所研究五箇年計画(平成11～15年度)**【参考1】の下で推進している重点研究プロジェクトのうち、地震防災分野に関係する課題は以下の通りである。

○耐震設計の体系化に関する研究：平成10～14年度【参考2】

(1) 活断層を考慮した設計地震動の設定手法および地震ハザードマップの作成技術の開発

(2) 性能規定型の耐震設計技術の開発

(3) 耐震性能の横断的な評価・整合技術の開発

本研究は地震防災および耐震設計の共通かつ横断的な課題を体系的に整理・評価するものであ

り、その成果は今後の地震防災、耐震設計における個別の研究開発課題に展開する礎となる。

○先端技術の国土マネジメントへの応用に関する研究開発：平成 11 ～ 15 年度【参考 2】

(1) 総合的な震災対策支援システムの研究開発

(2) 震災対策体制の評価技術に関する研究

また、**新道路技術五箇年計画（平成 10 ～ 14 年度）【参考 3】**の重点課題のうち、耐震関係の課題は以下の通りである。

○地域性を考慮した地震動の評価および次世代耐震設計技術

(1) 断層を考慮した合理的な設計地震動設定手法の開発

(2) 道路橋の耐震設計法・耐震補強法の開発

(3) 地中構造物・土工構造物の耐震設計法の開発

○地域の連携と交流を促進する新交通軸形成技術

(1) 長大橋の耐震設計技術（設計地震動、上部工耐震設計、下部工耐震設計）

さらに、新たな課題として下記の課題が考えられている。

○リアルタイム地震災害情報技術の高度化

(1) モニタリング情報に基づくリアルタイム施設被害評価と情報提供

なお、上記の重点的な研究プロジェクト以外に基盤研究が実施されているが、その概要は【参考 4】を参照されたい。

2. 新たな研究開発

2. 1 研究開発の流れ

最近の地震防災・耐震設計に関する研究開発の視点の変化は、表-1 のように概観できる。

表-1 地震防災・耐震設計の視点の変化

	従来	新たな視点（付加・変更）
想定大地震：	関東地震級（プレート境界型地震）	→ 兵庫県南部地震級（内陸直下型地震）
対象地震：	点震源	→ 線・面震源：断層
地震動：	加速度・速度	→ 断層変位
耐震性評価：	仕様規定	→ 性能規定
	応力度・安全率	→ 変位・塑性率・変形量（沈下量・浮き上がり量）
	各部材	→ 構造全体系
	静的照査	→ 動的照査
地震防災：	単一施設	→ 施設間
危機管理：	事前防災	→ 直後リアルタイム防災・情報公開（IT化）
社会ニーズ：	安全性	→ コスト縮減

2. 2 新たな研究開発課題

1) 地域性を考慮した設計地震動の設定

現行の道路橋の耐震設計（平成 8 年 12 月）においては、次の 2 段階の設計地震動を考えることになっている。

○橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動

（レベル 1 地震動）

○橋の供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動（レベル2地震動）

さらに、レベル2地震動は次の2タイプの地震動を考慮することとしている。

○タイプⅠの地震動：大正12年の関東地震の際の東京周辺における地震動のように発生頻度が低いプレート境界型の大規模な地震による地震動

○タイプⅡの地震動：兵庫県南部地震のように発生頻度が極めて低いマグニチュード7級の内陸直下型地震による地震動

そして、各レベルとタイプ毎に標準的な加速度応答スペクトルを設定して地震の違いを考慮しているが、地域毎に異なる個々の地震の特性を考慮するものではない。海外においても日本と同様、大規模なプロジェクトでは個別に設計地震動が評価されている例もあるが、一般的には個々の地震の特性が設計地震動に反映されてはいない。

しかし、本来、設計地震動については、建設地点周辺における過去の地震情報、活断層情報、プレート境界で発生する地震の情報、地盤条件、既往の強震記録等を適切に考慮して設定することが基本と考えられ、そのためには設計地震動の設定手法が必要となる。特に大きなプロジェクトの場合は必然的に固有の設計地震動の設定が検討されることになる。

レベル2地震動の設定法について、現在研究あるいは実用化されている手法は表-2のように整理できる。特に、地震動の地域性を踏まえて精度良く推定するには、地震の規模だけでなく、個々の断層の位置、規模、破壊過程を考慮することが重要であり、その手法の一つとして断層運動を数値的に表現した断層モデルによる地震動の評価手法がある。

一般に、断層モデルは断層面を図-1のように長方形と仮定し、くい違い量や破壊速度等を数値で与えることによってモデル化する。断層を小断層に分割し、小断層ごとに破壊開始時刻やくい違いの時間変化を与えることによって、現実に近い破壊過程をモデル化することも行われる。このような断層モデルにおいて各小断層から発生する地震動を重ね合わせることで、個々の断層の特性を精度良く取り入れた地震動の推定を行うことができる。

各小断層から発生する地震動は、表-2に示す経験的手法、統計的手法および理論的手法によって計算することが可能である。土木研究所では、主に上記の経験的手法と統計的手法を用いた地震動推定手法や断層パラメータによる地震動の変動特性に関する

表-2 設計地震動の設定手法の分類例

手法		概要
距離減衰式		地震の規模や距離から加速度応答スペクトル等を統計処理により求める
断層モデル	経験的手法	想定地震の震源域近傍で発生した小地震による地震記録を重ね合わせることで、大地震の地震動を推定する
	統計的手法	多数の地震記録の統計的性質に基づいて小地震による地震動を作成し、それを重ね合わせることで、大地震の地震動を推定する
	理論的手法	地震動の発生、伝播を理論的にモデル化して計算することにより地震動を推定する
実測の強震記録に基づく方法		

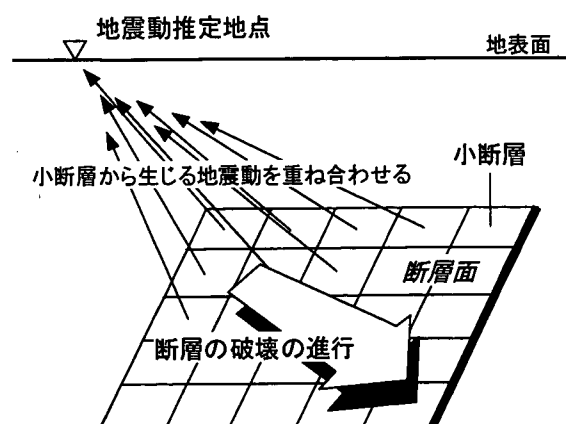


図-1 断層モデルを用いた地震動の推定

る研究を行うとともに、将来発生する地震の断層パラメータの設定法等に関する研究を行っている【参考5】。

また、推定した地震動に基づいて設計地震動を設定する手法についても検討を進めているところであり、今後、海峡横断道路プロジェクトのための設計地震動の設定や改訂される道路橋示方書のフォローアップのための研究を実施することになっている。

2) 活断層による地表面変位の予測と対策

阪神淡路大震災の教訓を踏まえて、地震による災害から国民の生命、身体、財産を保護することを目的とし、地震防災対策特別措置法（平成7年7月18日施行）が制定された。この法律に基づいて、地震に関する調査研究を推進するために、地震調査研究推進本部が総理府に設置された。地震調査研究推進本部では、兵庫県南部地震、トルコ・イズミット地震、台湾・集集地震で危険性が再認識された活断層に関して、社会的、経済的に与える影響の大小などを考慮して98の断層または断層帯を「基盤的調査観測の対象活断層」として選定し、活断層で発生する地震の規模や活断層の活動性等に関する調査を推進している【参考6】。

こうした状況を踏まえ、土木研究所では活断層に起因する地震に対しては、地震動だけでなく、断層変位に対しても合理的な予測および対策を行うことを目標として、地表面における断層変位量の予測手法やそれに対する構造物の計画手法、設計法に関する研究に着手している（図-2参照）。

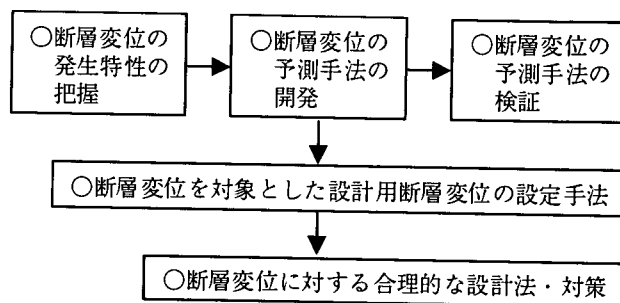


図-2 断層変位に関する研究の流れ例

活断層やその活動に伴う断層変位については地震学等の理学分野を中心に現在精力的に研究が進められているが、土木研究所はこれら異分野での研究成果を工学的な視点から検討して、実務化するため、平成12年度から「地表面における断層変位の予測法」に関して公募型委託研究を実施している。

◎活断層に対する姿勢は？

竹林氏【参考7】は活断層に対する設計哲学、礼儀として、「1 避け・2 平面・3 盛・4 切・5 単純」を示している。これを参考にして、断層の変位量により構造物への影響度合が異なることを考慮して、構造物の計画・設計に際しての活断層に対する姿勢を考えると、表-3のような整理ができる。

活断層の変位量の予測は今後の研究成果に待つところとなるが、具体策例に示すように想定する活断層の変位量に応じた対応が考えられるので、対応構造の設計法およびその適用性に関する研究開発が今後の課題として考えられる。

表－3 活断層に対する姿勢のイメージ

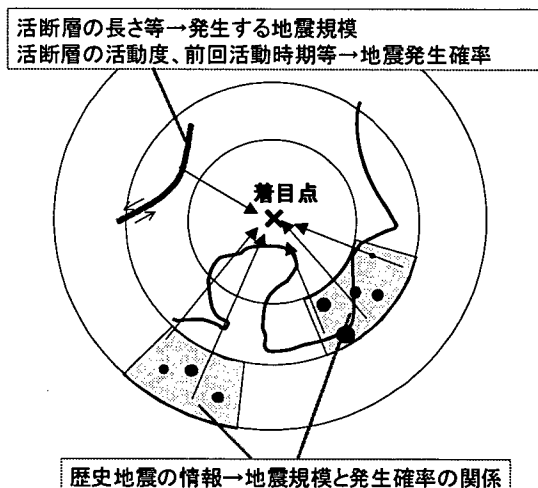
活断層の変位量	影響	姿勢	具体策例
大（10 m程度以上）	機能破壊・修復不可	避ける	位置変更
中（数m程度）	機能欠損・修復可	一緒にずれる	平面構造・盛土構造
小（1～2 m程度）	機能維持・修復不要	吸収する	ダンパー・落橋防止構造

3) 地震ハザードマップの作成技術

現行の各種の耐震設計基準類では、既往の地震ハザードマップに基づく地域別補正係数により地震動の地域性を考慮し、設計地震動を規定している。しかし、既往のハザードマップ作成のベースとなっているのは、主として千年程度の地震情報（震源位置、マグニチュード等）であるので、数千年以上とされる活断層の地震発生間隔を考えると、十分な期間の情報が用いられてきたとは言えない。従って、合理的な地震防災計画の策定や設計地震動の設定のためには、活断層の発生も考慮した地震動の地域性を適切に考慮する必要がある。

そのため、土木研究所では既往の地震情報および活断層情報の双方を考慮した合理的な地震ハザードマップの作成手法の研究開発を行っており、これまでに基礎的な解析手法を開発している【参考8】。図－3に地震ハザードマップの作成法のイメージを示すが、既往の歴史地震に加えて、近年蓄積されつつある活断層の規模や活動履歴等を考慮して、面的な地震動の分布図を作成し、地震ハザードマップとするものである。

今後は、活断層で発生する地震の規模の不確実性や活動履歴の不確実性を考慮した地震危険度解析の高度化を図る予定である。このように作成される地震ハザードマップは、地域毎に異なる地震の発生頻度や発生地震の規模などを反映しているため、地域毎の地震危険度を予め把握することができるので、地震防災計画の策定や構造物の耐震設計に活用できる。



図－3 地震ハザードマップの作成のイメージ

4) リアルタイム地震災害情報の収集と被害予測：情報技術（IT）

(1) 地震計ネットワークシステムと震害予測システム

1995年に発生した兵庫県南部地震においては、地震直後の被災地域の特定や被災状況の把握に時間を要し、初期対応を十分に行えなかった。この教訓を受けて、施設管理者の初期対応における意志決定を支援するために、国土交通省は平成7年度から地震計ネットワークの整備を開始し、平成11年3月に全国697点の観測点が稼働し、オンライン化されるに至った（図－4参照）。

土木研究所では、当該地震計ネットワークを活用するために、観測された地震動情報をもとに地震後15分程度で所管施設（橋梁、河川堤防）の被害予測ができるリアルタイム震害予測システム（Seismic Assessment Tool for Urgent Response and Notification :SATURN）の開発を行っている。

【参考9】

- ・ 国道の液状化危険度 約 6,000 区間、約 2,300km
- ・ 橋梁の被害予測 約 300 箇所
- ・ 河川の液状化危険度 約 550 区間、約 170km
- ・ 河川堤防の沈下量予測 約 550 区間、約 170km

- ・被害大：長期間車輛の通行が不可となる可能性がある
- ・被害中：応急対策を施すことにより、ある程度の期間で車両の通行が可能

今後の課題は、将来地震による被害に基づくシステムの予測精度の検証、改良および他の地方整備への普及導入の促進である。

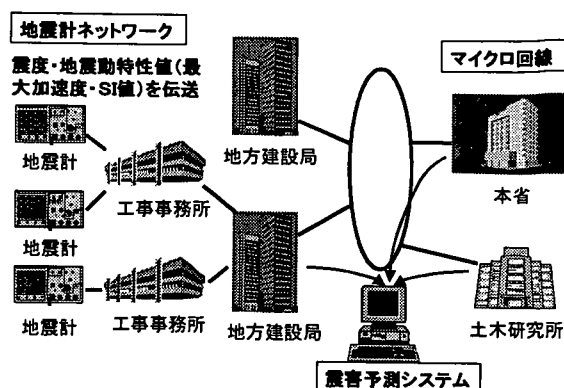


図-4 地震計ネットワークの観測情報の流れ

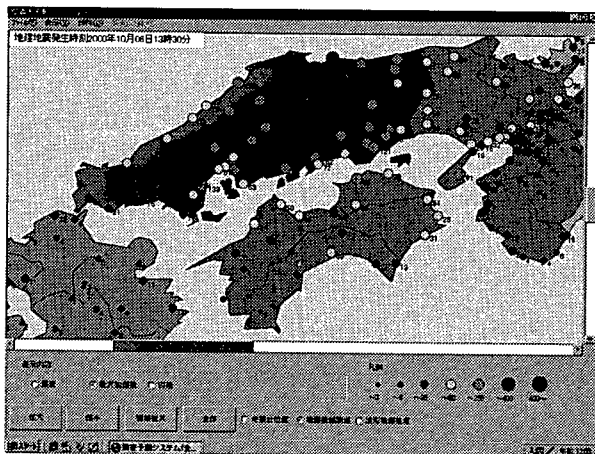


図-5 地震動(最大加速度)分布の表示例

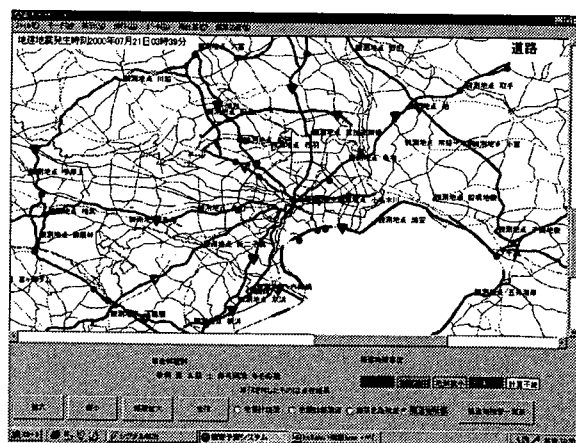


図-6 道路橋の被害予測結果例

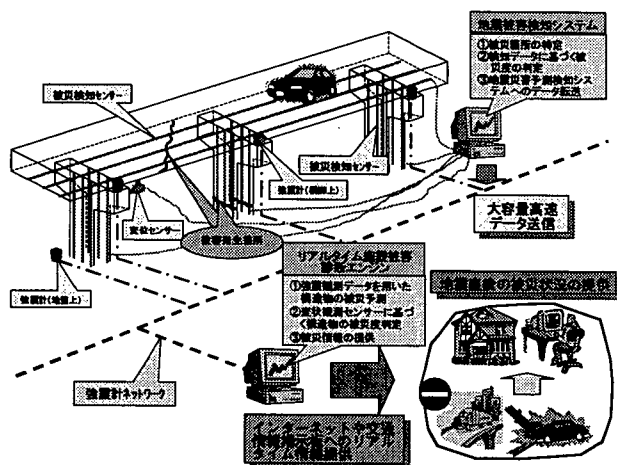
(2) 震害の即時モニタリング・診断システム

大規模地震の発生直後は、発災時間帯、参集人員、通信回線の輻輳等の制約が予想され、広範囲に分布する施設等の被害状況を把握することは容易でない。しかし、近年進歩の著しい検知技術、通信技術を活用することにより、実被害状況を迅速に把握することが可能となっている。

土木研究所では、現位置センサー・衛星センサー等による震害状況のモニタリング技術の開発、検

知情報による施設被害の診断技術、施設被害をGIS（地理情報システム）上への表示技術、インターネット・携帯電話等による自治体・住民等への情報提供技術の研究開発を計画しているところである（図－7参照）。これらの諸技術は、実証フィールドにおいてプロトタイプシステムを構築し、地震防災実務への適用性を検証する予定である【参考10】。

なお、本システムは被害の実現象を把握するものであるが、前記（1）の地震計ネットワーク・震害予測システムによる予測情報と連携して活用することが有効である。



図－7 モニタリング情報による震害診断のイメージ

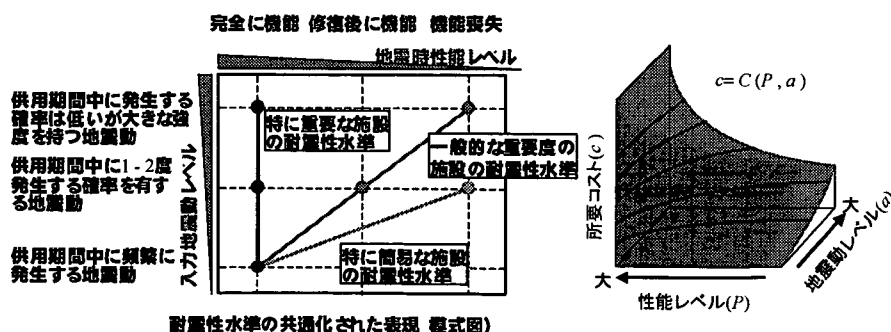
5）土木施設間の横断的な耐震性能の評価

道路・河川管理施設等の社会基盤施設の耐震対策に際しては、地域で想定される地震動に対する地震時性能が国や地域の要求を満たすとともに、各施設に対する適切な投資配分のもとでリスクが最小化される必要がある。現在のところ各施設の耐震設計には施設毎に異なる基準が用いられており、地域全体として必ずしも耐震性水準、耐震対策投資が最適化されているとはいえない。

このため、土木研究所では異なる社会基盤施設の耐震性水準について、相対的な整合性を合理的に評価するために有力である『パフォーマンスマトリックス（Performance Matrix：PM）』の設定手法について研究を行っている。【参考11】

これまでに、耐震対策コストを勘案した耐震性水準の合理的な選択に資するため、パフォーマンスマトリックスの概念を拡張し、耐震性水準～耐震対策コストの共通化された表現方法（IOCカーブ）を提案するとともに、道路・河川管理施設等についてパフォーマンスマトリックスの具体化を図るために、社会基盤施設の耐震性水準の概念整理および各種構造物の耐震設計体系（入力地震動、計算モデル、性能評価パラメータ等）の横断的な比較分析を行っている。

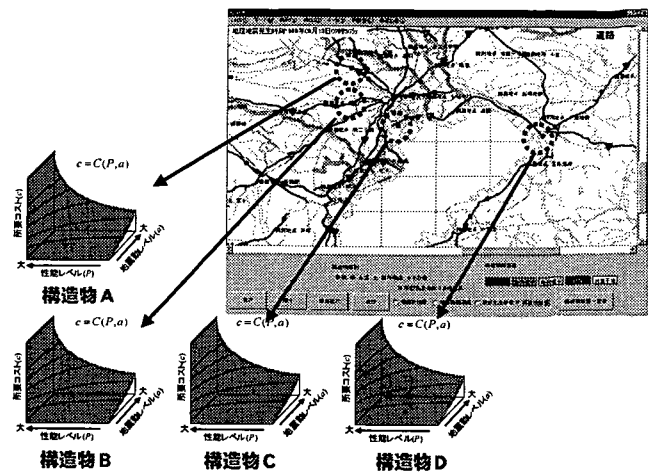
今後は、各種土木施設の目標耐震性能を費用対効果および重要度に基づいて合理的に設定できる手法の開発に向けて研究開発を進めるが、本手法の開発により、公共施設間のネットワーク性および相



図－8 パフォーマンスマトリックスとIOCカーブの概念

関性を考慮した費用対効果の観点から、最適な目標耐震性能の設定が可能となるので、新設構造物の耐震性水準の最適な設定および既存構造物の耐震補強の優先度の定量的評価に資することが可能となる。

参考：PMとは、構造物にかかる作用の大きさ、要求される性能水準、および重要度の対応関係をマトリックス（行列）形式に整理してまとめたものである。



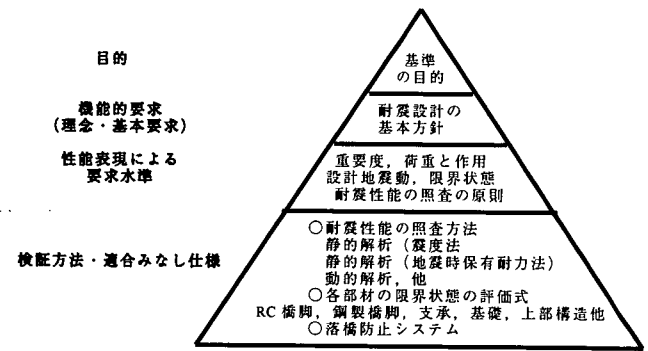
図－9 IOCカードの施設間相互比較の概念

6）土木構造物の耐震性能の規定化

現在、道路橋示方書において、①国際化（市場解放、海外との技術交流、ISO）への対応、②多様な構造・工法への対応、③維持管理、耐久性の重視、④コスト縮減等の成果の早期導入を実現する基準のあり方として、「性能照査型基準」への第一次改訂（平成12年度内予定）に向けた作業が進められている。具体的には、平成8年の耐震設計編に規定された耐震設計で考慮する地震動と目標とする橋の耐震性能の考え方を基本として、橋の耐震性能の中に考慮されている様々な観点をより明確にするとともに、規定された要求性能を満足させるために橋全体系として考慮すべき限界状態および各部材毎に考慮すべき限界状態をより明確に示すことにより、性能照査型基準としての体系的な整理を行っている。

今後は、第二次改訂（平成14年度予定）に向けて、信頼性理論を基礎とした部分安全係数法による耐震性能設計体系、性能に基づく新たな実験的・解析的性能評価手法の開発を行い、性能照査型基準の高度化を図る予定である。

なお、平成12年度から「道路橋の耐震信頼性評価に用いる部分係数の解析手法」に関して公募型委託研究を開始している。



図－10 設計基準の性能規定化の概念

表－4 耐震性能の観点（道路橋）

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

7) 耐震性能の評価技術

上記6)に示したように、土木構造物の耐震性能を適切に評価するためには、各種構造部材及びこれから構成される構造物の限界状態を適切に把握することが不可欠である。特に、大規模地震時には、損傷が生じるという構造部材の破壊過程に踏み込んでその性能を評価することが必要とされる。このような観点から耐震性能の評価技術に関する研究を進めている。

①耐震性能の評価のための標準試験方法の開発

性能評価技術が異なることが結果として設計される構造物に大きな影響を及ぼす。このため、耐震性能を評価する試験方法について標準モデルの作成方法、標準載荷パターン方法について国際共同研究として研究を実施している。

②鉄筋コンクリート部材の耐震性能評価法

鉄筋コンクリート部材の変形性能を精度良く判定するための評価式の開発に関する研究を実施している。変形性能に及ぼす指標、寸法効果の影響【参考12】、損傷領域の判定法【参考13】、終局限界の評価式に関する研究を実施している。さらに、柱梁接合部のようなジョイント部の耐震性能に関する研究を実施している【参考14】。また、配筋の合理化を図るために、必要な変形性能を確保するために鉄筋に必要とされる性能を明確化するための研究を実施している。

③鋼製部材の耐震性能評価法

従来、鋼製部材に関しては、非線形域の特性の評価方法が十分に確立されていない。このため、鋼製部材の実験的研究、解析的研究を通じて、鋼製部材の非線形域の変形性能の評価方法に関する研究を実施している【参考15】。

8) 土木構造物の震災復旧技術・耐震補強技術

平成7年の兵庫県南部地震においては、それまでの想定を越える強い地震動により道路橋にも多大な被害が生じ、広域・甚大な道路被害に対する迅速な復旧技術の重要性が再認識された。また、兵庫県南部地震の経験を踏まえ、内陸直下型地震などによる強い地震動を耐震設計で考慮するようになり、道路橋については、震災対策緊急橋梁事業として平成7～9年に緊急性の高い約3万橋脚の補強対策が実施された。さらに、平成10～14年の新道路整備五箇年計画において、緊急輸送道路の約2万2千橋脚の補強対策が進められているところである。

しかし、こうした耐震性能の向上のための耐震補強コストが今後の既設橋の維持管理に大きな負担となるといった問題があり、コスト縮減につながる、合理的かつ確実に耐震安全性を向上するための技術開発が必要とされている。

これまでに、迅速な震災復旧を行うために不可欠な被災調査、応急対策、本復旧技術の開発を目的として、「兵庫県南部地震の経験を踏まえた道路橋の震前対策および震災復旧の考え方と事例集」【参考16】を作

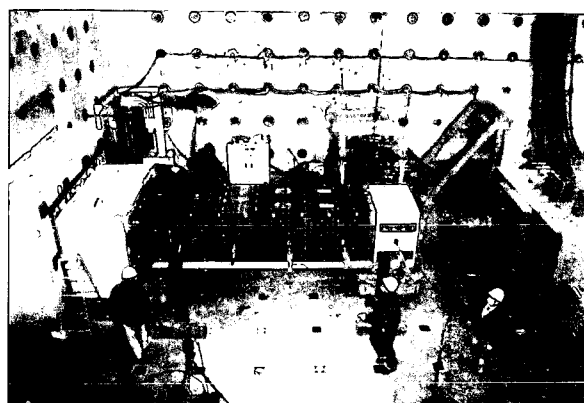


写真-1 耐震補強に関する載荷実験例

成中であり、耐震補強技術を含めた震前対策・震災復旧の基本的な考え方を再整理している。なお、本資料の一部は、道路震災対策便覧に反映される予定である【参考 17】。

今後は、耐震補強コストの縮減および施工空間など施工条件の厳しい橋に対する耐震対策技術、橋梁全体系を考慮した合理的な耐震補強技術の開発を行う予定である。

9) 次世代高性能耐震構造

構造物の耐震設計は、一般に鉄筋コンクリートや鋼材を用いて設計で想定する地震力に耐えられるように構造物を造ることを基本に行われる。しかし、大規模地震に対して全く被害を生じないようにどこまでも構造物を強く造ることは困難であり、また経済的な観点からも合理的ではない。このため、一般に、希に起こるような大規模地震に対しては想定する部材に適切に損傷を誘導し、ここで確実に振動エネルギーを吸収することにより、大規模地震による強い地震力に対して構造全体としての所要の耐震性能を確保するような耐震設計が考えられる。

これは、大規模地震時には何らかの損傷が構造物に生じ得ることを考慮することから、甚大な地震被害を受けにくく、また被害を受けたとしても地震後の診断・修復が容易な構造物が実現できれば地震後の早期の機能回復に有効と考えられる。

表－5 次世代高性能・高機能耐震構造の可能性

分 類		特性・性能	高性能・高機能耐震構造の構造イメージ
地震被害を受けない、あるいは、受けにくい耐震構造	構 造 の 高 性 能 化	高耐力構造	・ 高強度材料（高強度鉄筋、P C 鋼材、高強度コンクリート等）を用いた高曲げ耐力構造、高せん断耐力構造
		高弾性構造・高剛性構造	・ P C 鋼材等弾性限の広い高強度材料を用いた弾性変形領域の広い構造 ・ 高弾性特性を有する高性能材料を用いた高剛性構造
		超弾性構造（弾性変形吸収構造）	・ 地震時の変形を弾性変形吸収部材、弾性変形吸収装置により吸収する超弾性構造
		高じん性構造	・ 圧縮側材料（コンクリート等）の高拘束と引張側材料の伸び性能・低サイクル疲労特性を高性能化した高じん性構造 ・ 損傷を分散させ、特定の箇所に集中させない損傷分散制御構造
	地 震 の 影 響 の 低 減	地震時慣性力の影響の低減（免震構造）	・ 高免震構造（高性能すべりタイプ支承等を用いた高免震構造等） ・ 桁間あるいは桁と橋台間等で緩衝構造を介して衝突を積極的に発生させることにより桁の振動エネルギーを吸収する衝突免震構造
		地震時地盤変位の影響の低減（変位免震構造）	・ 連結桁の伸縮上部構造（伸縮桁構造） ・ 高性能伸縮構造 ・ 大変位に対する支持機構を有する構造
地震被害を自己検知する耐震構造		自己診断構造	・ センサーネットワークを配置したモニタリング構造 ・ センサー材料と構造材料の両特性を有するインテリジェント材料（C FGFRP、TRIP 鋼等）を活用した構造
容易に復旧可能な耐震構造		高復元性構造	・ 残留変形を小さくすることが可能な高復元性構造 ・ 残留変形を小さくすることが可能な 2 次剛性の大きい非線形履歴特性を有する構造 ・ 損傷を分散させ、特定の箇所に集中させない損傷分散制御構造 ・ 残留変形を自己復元可能なインテリジェント材料（形状記憶合金等）を用いた構造

このため、以下の3点を地震に対する高性能化・高機能化として設定し、研究を実施している【参考18, 19】。

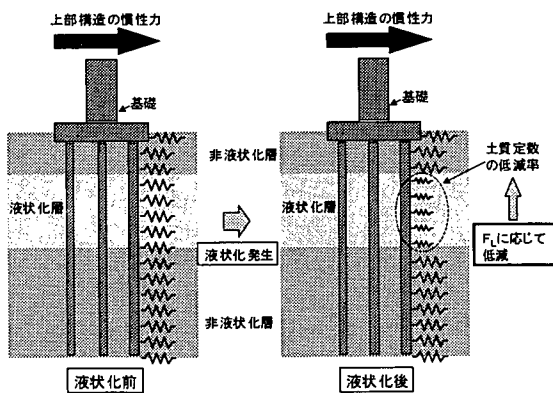
- (1) 地震被害を受けない、あるいは、受けにくい耐震構造（弾性限界・終局限界の高性能化）
- (2) 地震被害を自己検知する耐震構造（自己診断機能）
- (3) 地震被害を受けても容易に復旧可能な耐震構造（自己修復機能）

このような観点で従来にはない高性能・高機能耐震構造の可能性について例を挙げてみると、表5のような構造が考えられる。この中には、高強度材料やインテリジェント材料を活用する等の新しい高性能材料を用いて高性能化・高機能化を図るといった材料面の考え方と、構造的に高性能化・高機能化を図るといった構造面の考え方がある。

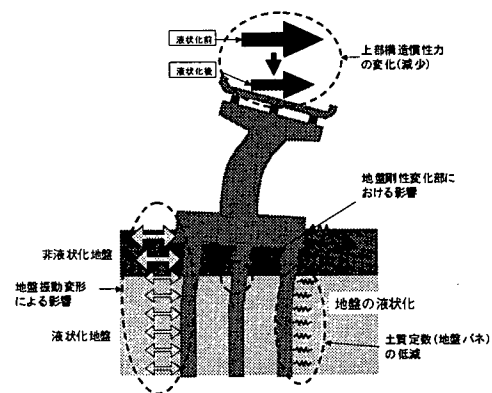
10) 地盤の液状化・流動化のメカニズムを考えた設計法

通常、地盤の液状化に対する橋梁の耐震性については、上部構造の慣性力を基礎に作用させ、地盤は液状化に対する抵抗率に応じて土質定数を低減させた設計を基本としている。しかし、液状化が生じた場合、橋梁に及ぼす影響の要因としては、①地盤剛性の低下による地盤の支持力の減少に加えて、②地震による構造物及び地盤の慣性力、さらに③地盤の変形等の現象が考えられる。これらの要因を耐震設計上考慮すべきか否かを判断するためには、各現象が構造物に及ぼす影響の解明が必要である。その際、各現象は相互に関連しているので、液状化の進展過程（＝メカニズム）に従って詳細な現象分析が必要となる。

このように、今後は一連の液状化過程において、各現象の発現状況、構造物に及ぼす影響、損傷した構造物の挙動の解明および設計への反映方法が課題である。



図－1 1 液状化に対する従来の耐震設計のイメージ



図－1 2 液状化に関する今後の検討項目

一方、液状化に伴う地盤の流動化については、阪神淡路大震災の経験に基づいて、道路橋示方書の耐震設計編では、特に臨海部の橋脚について所定の流動力に対する耐震性の照査を行うことにしているが、土木研究所では同照査法の提案並びに橋梁基礎に及ぼす流動化の影響の解析手法に関する研究を実施してきている【参考20】。

今後の課題は、複数列の杭基礎に対する流動力の作用メカニズム、河川部における流動化のメカニズム等が考えられる。なお、流動化については、ライフラインとしての地中構造物に対する影響も重

要となるが、その場合は流動による変位の予測手法が課題となる。

1 1) 構造物の変形量を考えた耐震性評価

(1) 土構造物の地震時変形量

阪神地震以前は、道路盛土、河川堤防について特別な場合（特に軟弱な地盤上に築造する場合、特に重要な区間）を除いて耐震設計は行われていなかった。しかし、阪神地震以後、土木研究所では阪神地震における被災事例解析、模型実験等により、レベル1地震動、レベル2地震動に対応した土工構造物の耐震設計法を提案（道路土工指針、河川砂防技術基準（案）などに反映）するとともに、地盤改良工法を中心とした耐震対策技術を開発し、その設計法を提案（液状化対策工法設計・施工マニュアル（案））してきている。

ここで、レベル2地震動といった強い地震動に対する土構造物の耐震安全性の評価のためには、従来のすべり安全率による評価では不合理であり、土構造物の残留変位の予測、評価が必要とされている。しかし、現在、残留変位の解析法は研究途上にあり、今後の重要な課題である。

道路盛土や河川堤防等の盛土構造物の地震被害事例を概観すると、表-6ように類型化することができる。同表の通り、顕著な被害の多くは基礎地盤の液状化によるものである。この他、山岳部の盛土では沢部での被害が目立つが、これも液状化と同様に地下水で飽和した盛土部分の強度低下による。

表-6 盛土構造物の既往地震被害の特徴

河川堤防	沖積地盤部における基礎地盤の液状化
道路盛土（平地部）	沖積地盤部における基礎地盤の液状化
道路盛土（山岳部）	浸透水の影響を受けやすい沢部
	長大な急傾斜地山上の盛土

基礎地盤の液状化による盛土の変形量の予測に関しては、近年各種の手法が開発提案されてきている。そこで、土木研究所ではこれらの手法を開発された研究者の協力を得て研究会を組織し、予測手法の予測精度、実務への適用性に関する検討を進めている。既往検討によれば、予測精度について一般的に論じるのは極めて難しいが、実務への適用にあたっては次の視点が重要であるとされている。

- (1) 予測手法の特徴、適用限界を理解した上で活用すること
- (2) 従来行われてきた地盤調査試験に比べて、より綿密さが求められること
- (3) 計算結果の妥当性を工学的に判断する、より高度の能力も求められること

(2) 地中構造物の浮き上がり量

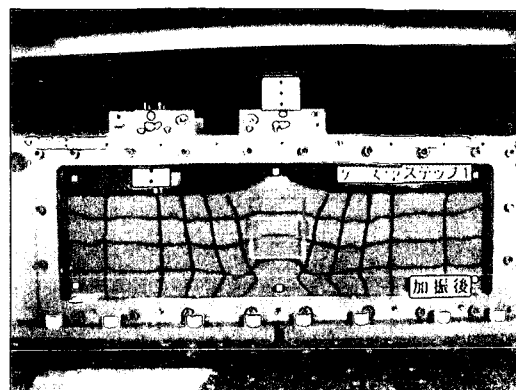
兵庫県南部地震により各種の構造物に大きな被害が発生したことを受けて、道路橋示方書（日本道路協会、平成8年12月）、下水道施設の耐震対策指針と解説（（社）日本下水道協会、平成8年12月）、水道施設耐震工法指針・解説（（社）日本水道協会、平成9年3月）等の耐震設計基準類が既に改訂されている。

現在、共同溝設計指針（（社）日本道路協会、昭和61年3月）についても、土木研究所においては関係する調査研究を進めているが、下記が主要な課題と考えられている。

- (1) レベル 2 地震動の設定
- (2) レベル 2 地震動に対する耐震設計法（縦断方向＋横断方向）
- (3) 浮き上がりに対する判定法の改良
- (4) 浮き上がり対策（矢板締め切り工法）の設計法の合理化

特に、液状化に起因する浮き上がりについて、現行指針では浮き上がりに対する安全率により、安定性の評価を行うことになっているが、より合理的な判定法としては浮き上がりの程度、浮き上がり量を考慮することが必要であり、これにより合理的かつ経済的な液状化対策ができることになると期待される。

土木研究所では大型動的遠心力载荷試験を用いた地中構造物の浮上がり実験（写真－2 参照）、および兵庫県南部地震で液状化地盤中に存在した共同溝の事例解析等を実施



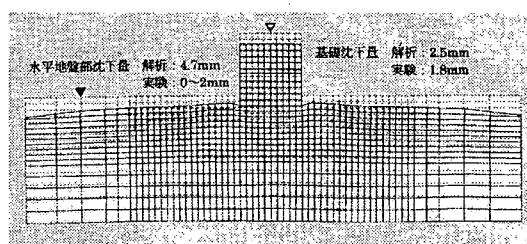
写真－2 地中構造物の動的遠心模型実験

している【参考 2 1】。
 今後は、これらの結果を踏まえて、地盤密度、地震動の大きさ等の影響を考慮した浮上がり量の予測法の開発を行う予定である。

(3) 長大橋梁の基礎の沈下量・回転量

海峡横断プロジェクトでは東京湾口、伊勢湾口等において中央径間が 2,000m を超えるような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域に位置し、極めて厳しい地震環境下にある。これらの地域で耐震性の高い橋梁基礎の建設を合理的に行うためには、従来用いられてきた外力と抵抗力の釣り合いに基づく耐震設計法ではなく基礎の変位量を照査する耐震設計法を開発することが重要であり、そのためには地震時の変位予測手法を確立することが必要である。

土木研究所では、これまでに動的遠心模型実験により長大橋梁基礎及び基礎地盤の地震時挙動を詳細に調べると共に、基礎の地震時変位量予測法の適用性の検討や改良に取り組んでいる。代表的な手法としては、ひずみ軟化理論による地盤剛性の劣化を考慮した残留沈下量予測法があり、これによって遠心模型実験結果をある程度説明できることを明らかにした（図－1 3 参照）【参考 2 2】。



図－1 3 直接基礎の残留沈下量解析結果

現在、基礎の変位量予測法に関しては研究途上であるが、今後は回転変位量予測法の確立と予測精度の向上を図る予定である。

1 2) 土構造物の液状化対策工法

土構造物の液状化対策工法については、既に述べたように、阪神地震の後に設計施工マニュアルを

作成し、その後実務において広く活用されているところである。ただし、河川堤防を対象としたこのマニュアルは設計地震動としてレベル1地震動を想定しており、照査方法は震度法によっている。平成11年に改訂された「道路土工のり面工・斜面安定工指針」によれば、道路盛土についても路線の重要度や復旧の難易度によってはレベル2地震動への対応も必要とされている。したがって、レベル2地震動に対する変形照査を考慮した液状化対策工の設計法の開発も重要である。

このため、液状化対策工の中でも代表的な工法である地盤改良工法を対象に、変形量に基づく簡易設計法の開発に取り組んでいる。ここで、基礎地盤の液状化による盛土の被害（主として沈下）は、主に盛土直下地盤の側方への変形および体積圧縮等により引き起こされる。盛土の側方に地盤改良を施すことにより、液状化した地盤の側方への変形を抑制することができる。写真-3に堤防のり尻部における地盤改良による液状化対策の効果に関する実験例【参考23】を示すが、このような実験を通して、改良体自体の側方への残留変形量の予測手法等に関する研究を進めている。

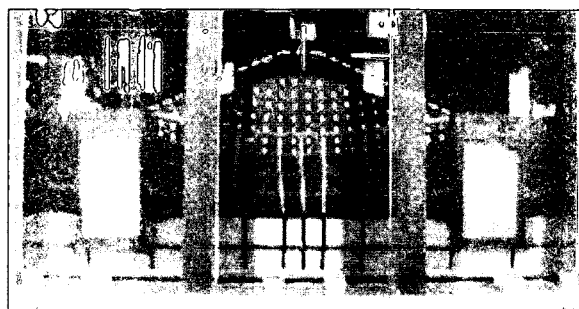
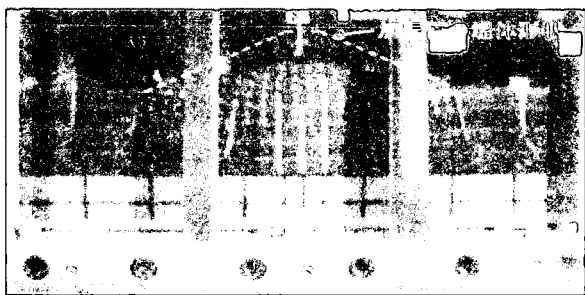


写真-3.1 地盤の液状化による無対策堤防の沈下

写真-3.2 法尻地盤改良による堤体の沈下抑制

2.3 技術水準の現状

本節では、2.2に示した様々な調査研究開発の課題について、国内および海外（欧米先進国）の技術水準について概観する。そのため、ここでは技術水準を次の3形態に分類することとしたが、この分類は厳密なものではなく、日頃の情報収集の範囲において主観的かつ感覚的な判断に基づいて、国内外の相対的な比較を試みたものである。

基礎：まだ着想・模索・調査段階にあり、技術の方向が未確定で基礎的な段階

応用：室内実験による検証等、技術の方向が確定しており、実用化のための応用的な段階

実用：基準の刊行、試験フィールド・パイロット事業の実施等、既に実用に供され始めている段階

表-7に分類した結果を示すが、これによれば以下のような傾向が読みとれる。

- (1) 概ね国内と海外は同水準にあるが、(2)以降について、差異がある。
- (2) 活断層の地表面変位の予測法は、我が国で新たな取り組みとなっているが、海外では対策に目が向けられている。
- (3) ハザードマップは海外で先行している。

- (4) パフォーマンスマトリックスは米国が先行しているが、I O Cカーブといった新たな概念は我が国独自である。
- (5) 震害即時モニタリング・診断システム、地中構造物の浮き上がり量予測法は、国内外ともに基礎的水準にある。
- (6) 長大橋梁基礎の変位量の予測について、我が国は先行している。
- (7) 液状化対策工法は、震度法から変形照査に移行しつつある。

表－7 技術水準の国内・海外比較例

研究開発課題	国内			海外		
	基礎	応用	実用	基礎	応用	実用
断層モデルによる設計地震動の設定法		○			○	
活断層の地表面変位の予測法	◎			—	—	—
活断層対策法	○				◎	
地震ハザードマップの作成法（断層考慮）		○				◎
地震計ネットワークの整備			○			○
リアルタイム震害予測システム			○			○
震害即時モニタリング・診断システム	○			○		
パフォーマンスマトリックス	○				◎	
性能規定型設計法		○	△		○	△
橋梁の耐震補強技術			○			○
次世代高性能耐震構造		○			○	
土構造物の変形予測法		○			○	
地中構造物の浮き上がり量予測法	○			○		
長大橋梁基礎の沈下量・回転変位予測		◎		○		
液状化対策工法（震度法）			◎		○	
液状化対策工法（変形照査）		○			○	

◎：比較上、相手（国内あるいは海外）に先行していると考えられるもの

3 研究開発基盤としての施設の整備・活用

3.1 実験施設の位置づけの再認識

技術の研究開発の進め方は現地計測、室内・屋外実験、数値解析等多様であるが、室内実験は実現象の再現、数値解析のモデル化、設計法の検証等の有効な手段である。従って、研究開発の基盤としての実験施設については、目的に合致した施設の計画・設計・整備および運用が今後益々必要となる。

例えば、道路橋示方書は性能規定型の設計法とすべく現在改訂作業中であるが、V耐震設計編においても「耐震性能の照査において、規定された限界状態を超えないこと等の規定に対する照査方法の一つとして、実験による照査も適当と位置づけること」が考えられている。つまり、耐震性能の照査のための実験あるいは解析に基づく耐震性能の照査のための解析モデルの設定のための要素実験が考えられているが、目的に応じて適切な実験手法を選定するとともに、実験結果の妥当性について十分な検討が必要と考えられている。

表－8は、実験の目的と適用する実験手法の選定例であるが、実験の位置づけが再認識されることにより、実験が有効に実施されることが望まれる。

表－８ 実験の目的と適用する実験手法の選定例（橋梁の場合）

実験の観点	実験により検討しようとする項目	適用する実験手法例
橋全体系の挙動	・実験のみによる耐震性能の照査 ・橋全体系の振動特性や減衰特性等の動的特性の検討 ・入力地震動の位相差が橋の地震応答に及ぼす影響の検討	振動台実験
部材間の相互作用	・地盤－基礎系の動的相互作用の検討 ・橋脚－支承－上部構造系の動的相互作用の検討 ・橋脚－基礎系の動的相互作用の検討 ・上部構造端部の衝突に関する検討 ・地盤－基礎系における基礎の耐力、変形特性、履歴復元力特性の検討 ・上部構造と橋脚が一体となった構造の耐力、変形特性、履歴復元力特性の検討	振動台実験 ハイブリッド実験 正負交番 載荷実験
部材の動的特性	・橋脚の地震時非線形挙動の検討 ・上部構造本体の耐力、変形特性、履歴復元力特性の検討 ・橋脚の耐力、変形特性、履歴復元力特性の検討 ・基礎本体の耐力、変形特性、履歴復元力特性の検討 ・支承本体の動的特性の検討 ・落橋防止構造の検討	振動台実験 正負交番 載荷実験 衝突実験
基礎的力学特性	・コンクリートの応力度－ひずみ関係の検討 ・鋼材の応力度－ひずみ関係の検討 ・コンクリートと鉄筋の付着特性の検討 ・地盤のせん断弾性係数－せん断ひずみの関係の検討 ・液状化の判定に用いる繰返し三軸強度比の検討 ・地盤の液状化時の挙動	圧縮載荷実験 引張り試験 付着実験 繰返し中空ねじりせん断実験 繰返し三軸試験 遠心力載荷実験

3. 2 施設の特性と実験内容

土木研究所のつくば本所には 53 の実験施設があるが、地震防災関係の主要施設は次の通りである。

三次元大型振動台	8 m×8 m、水平 2 方向上下 1 方向、最大搭載重量：2.94MN 最大水平加速度：± 2G、最大水平速度 ± 200cm/sec、 最大水平変位：± 60cm
二次元大型振動台	6 m×8 m、水平 1 方向鉛直 1 方向、最大載荷重量：0.98MN 最大水平加速度：± 0.7G、最大水平速度 ± 80cm/sec、 最大水平変位：± 7.5cm
一次元中型振動台	2 m×3 m@4 台、水平 1 方向、最大載荷重量：0.245MN 最大水平加速度：± 0.7G、最大水平速度 ± 60cm/sec、 最大水平変位：± 7.5cm
正負交番載荷試験装置	最大速度 100cm/sec、最大荷重 1.47MN：3 台
静的載荷試験装置	最大荷重 2.45MN：2 台
大型遠心力載荷装置	有効半径 6.6m、最大積載容量 400G・ton、最大加振容量 40G・ton

1) 三次元大型振動台

本振動台では、兵庫県南部地震クラスの地盤加速度記録を再現できるとともに、橋梁の支承部の実験など、構造物の上部の応答を再現することを考慮して、振動台上に 0.98MN の実験模型を搭載した状態で、水平方向に最大加速度で ± 2 G まで入力できる。

平成 8 年度に設置されて以来、以下のような研究課題に関する数多くの実験を行ってきており、その成果は道路橋示方書など様々な耐震技術基準に反映されている。

- 鉄筋コンクリート橋脚の耐震補強
- ケーソン基礎の耐震性
- 地下免震構造

- 地盤-基礎系模型を用いたハイブリッド振動実験：注） 等
- 注）ハイブリッド振動実験施設【参考24】

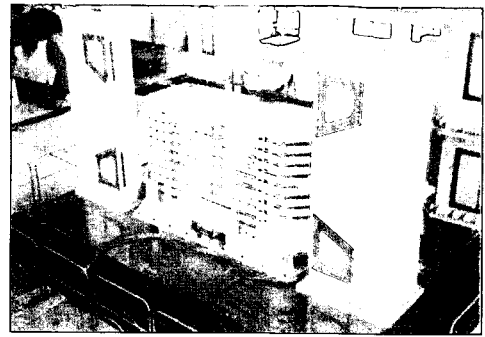
また、上記以外に、2次元大型振動台および1次元中型振動台（4台同時加振可能）があるが、これらにより下記のような実験が実施されている。

二次元大型振動台

- 液状化地盤における橋梁基礎の応答特性
- 橋梁基礎に及ぼす流動化の影響
- 液状化地盤中の地中埋設管の挙動 等

一次元中型振動台（4台）

- 吊り橋に対する入力地震動の位相差の影響 等



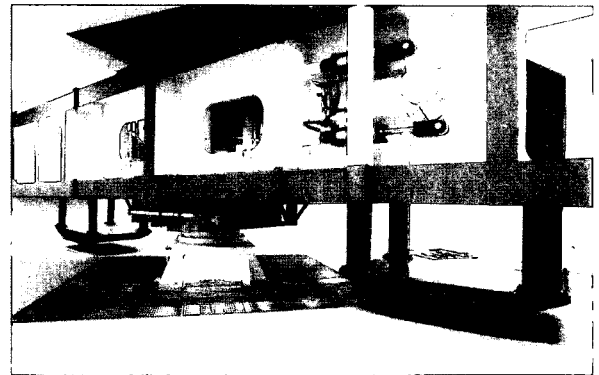
写真－4 3次元大型振動台による実験

2) 大型遠心力載荷装置

遠心力載荷装置は、小規模な模型（例えば、実物の1/50の大きさ、数十cm～数m程度）を作成し、遠心力を加えて高重力場（例えば、地球の重力の50倍）に置くことにより、地盤あるいは土構造物の実物と同じ応力レベルの状態を再現するものである。この高重力場において模型に対して加振実験を行えば、大きな土槽を用いずに小さな模型により実物の条件を再現した振動実験が可能となる。

平成7年阪神地震での震災被害を契機として平成8年度に導入されたが、これまでに以下のような研究課題に関する実験が実施されている。

- 地盤の液状化・流動化
- 土構造物の地震時挙動
- 地中構造物の地震時挙動
- 擁壁・補強土の安定性
- 杭と地盤の相互作用
- 液状化対策工法の効果 等



写真－5 大型遠心力載荷装置の外観

3) 正負交番載荷試験装置等

本実験施設は、反力壁と反力床から構成する実験ピット、高速加振機、静的載荷試験装置、軸力載荷装置などの各種載荷装置から構成されているが、高速加振機は大型の供試体を実際の地震に近い状態で載荷し、静的載荷装置は実物大規模の橋脚を用いた載荷実験を行うことができる。

本施設は実物大あるいは縮尺模型に対する動的あるいは静的な載荷実験により、道路橋等の構造部材の動的耐力やじん性能を実験的に検証することができるが、兵庫県南部地震以降は被災構造物の復旧技術の開発、既設構造物の補強技術の開発のために数多くの載荷実験を行っており、その模型供試体の数は地震発生以後250体以上に上っている。

上記の装置は単独あるいは組み合わせて使用することができ、本装置を用いて以下の研究課題に関する載荷実験を行っている。その実験結果は道路橋示方書Ⅴ耐震設計編、東京湾横断道路シールドト

ネルの耐震設計をはじめ、各種の技術基準に反映されている。

- RC 橋脚、鋼製橋脚、SRC 橋脚の耐震性能評価
- 免震支承の耐震性能評価
- 地震により損傷を受けた橋脚の補強法
- 既設橋脚の耐震補強法
- シールドトンネルの耐震性能評価
- 杭基礎の耐震性能評価

等

3. 3 国内・海外における施設の整備状況

振動台、遠心力載荷装置および正負交番載荷装置について、国内外の整備状況を概観する。

1) 振動台

【参考 2 5】により国内の約 50 機関、海外（北米、ヨーロッパ、アジア）の約 30 機関が保有する振動台について、例えば、振動台の寸法（縦・横の大きい方）および最大載荷重量の関係を整理すると図-14 が得られる。これによれば、海外の振動台は寸法で 6 m 以下、載荷重量で 0.98MN 以下であるのに対して、我が国には寸法で 20 m、載荷重量で 11.76MN といった超大型の振動台が建設中である。おおよそ半数が三次元振動台であるが、土木研究所が保有する三次元振動台は寸法・載荷重量に加えて、加振性能（最大水平加速度：± 2G、最大水平速度 ± 200cm/sec、最大水平変位：± 60cm）の点からも高い水準にある。

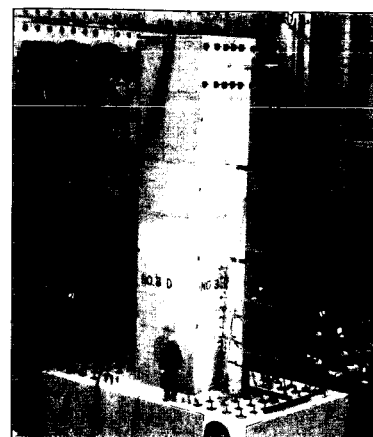


写真-6 正負交番載荷実験

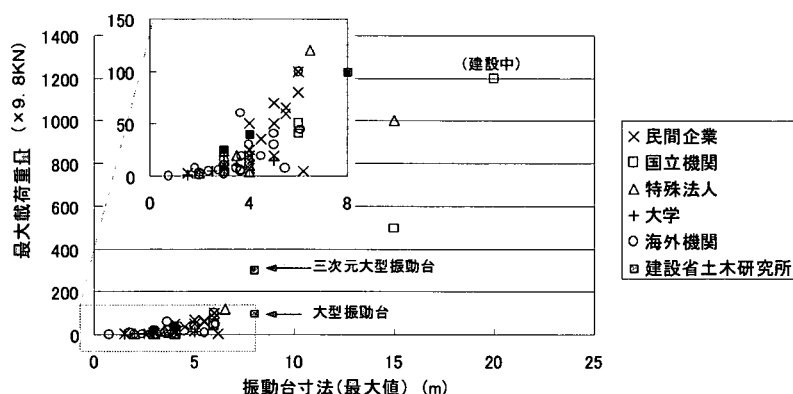
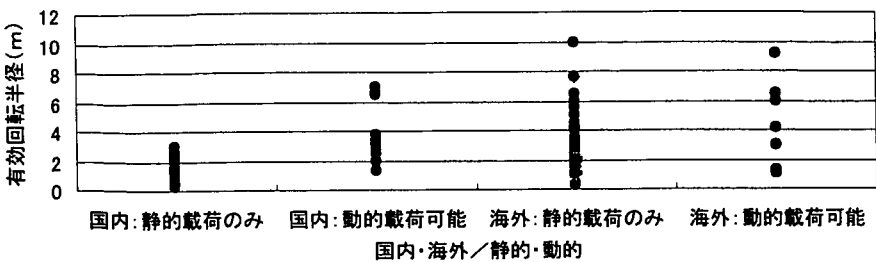


図-14 国内・海外における振動台の性能比較

2) 遠心力載荷装置

【参考 2 6】では 1998 年 9 月時点における国内・海外の遠心力載荷装置の整備状況を整理しているが、性能緒元が不明なものを除くと、国内では 37 基（うち、1 基は著者が追加）および海外では 62 基に上り、総数で 99 基となる。遠心力載荷装置には、静的載荷だけの機能を保有するものと、加えて動的（＝振動）載荷が可能な機能を保有するものに大別できるが、上記の 99 基について、国内・海外別および静的載荷・動的載荷別に整理すると、図-15 のようになる。これによれば、動的

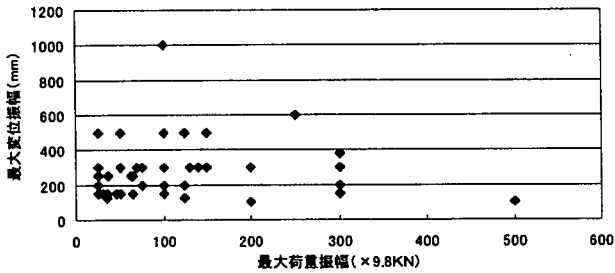
載荷が可能なものは全体で22基であるが、そのうち14基は我が国にあり、動的載荷の実施環境の水準が高いと言える。また、動的載荷が可能で有効回転半径が4 m以上のものは、全体で7基あるが、そのうち土木研究所の他、3基が国内にある。



図－15 国内・海外における遠心力載荷装置の比較

3) 正負交番載荷装置

正負交番載荷装置は振動台あるいは遠心力載荷装置と比較して整備水準は高いと想像されるが、【参考25】により国内の23機関について見ると、載荷装置（アクチュエータ）の総数は64基であるが、最大荷重振幅と最大変位振幅の関係は図－16のようになる。同図から荷重振幅と変位振幅には相関があるとは言えないが、土木研究所の保有する装置は最大荷重振幅（±2.45MN）と最大変位振幅（±600mm）とでバランスがとれた高い水準にある。



図－16 国内における正負交番載荷装置の比較

おわりに

技術は人間社会の活力、国の力を高揚し、地球環境の保全を実現するために必要なツールであり、持続的な発展が必要とされる。そのためには、国民あるいは次世代の技術の後継者に対して、技術あるいはその研究開発の意義を正しく理解し、認識してもらうことが必要である。

ここで、技術の意義の認知についても産学官の役割の分担および連携が必要である。つまり、官においては「技術の方向を示し、リードする」、学においては「技術の基本理念・理論を育む」、民においては「技術を具現する」ことが主たる役割として考えられるが、加えて「技術の夢、誇り、倫理感を持たせる」ことは三者が共通的に担う役割である。

このような役割を果たしながら、技術者、研究者を育成し、技術を着実に継承してゆくことが必須である。【参考27】

参考文献

- 1：建設省土木研究所：第5次土木研究所研究五箇年計画（平成11年度～15年度）、平成11年4月
土木研究所ホームページ：<http://www.pwri.go.jp>（平成12年12月現在）＊第5次研究5箇年計画
- 2：平成11年度土木研究所重点研究プロジェクト成果報告書、土木研究所資料第3753号、平成12年3月
- 3：建設省道路局・土木研究所：新道路技術五箇年計画、平成10年11月
建設省ホームページ：<http://www.moc.go.jp>（平成12年12月現在）＊道づくり＊新道路技術五箇年計画
- 4：土木研究所ホームページ：<http://www.pwri.go.jp>（平成12年12月現在）＊研究成果概要
- 5：片岡・田村：断層モデルを用いた震源近傍における地震動の推定、土木技術資料、Vol.42、No.8、2000.8
- 6：科学技術庁：第4回活断層調査成果報告会予稿集、平成12年11月
- 7：竹林征三：風土工学の視座と展開⑩活断層に対する礼儀、日刊建設工業新聞 次世紀へ 所論、平成12年8月28日付
- 8：振動研究室：活断層を考慮した地震ハザードマップ、土木技術資料 研究テーマ紹介、Vol.42、No.8、2000.8
- 9：杉田：リアルタイム地震対応を目指した地震計ネットワークの整備、土木技術資料、Vol.40、No.2、1998.2
- 10：杉田・大谷：地震時危機管理の近未来像ーリアルタイム地震防災ー、土木技術資料、Vol.43、No.1、2001年1月
- 11：野崎・杉崎：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、1999.1
- 12：土木研究所、道路公団、首都公団、阪神公団：鉄筋コンクリート橋脚の耐震性に及ぼす寸法効果の影響に関する共同研究報告書、平成11年10月
- 13：土木研究所：軸方向鉄筋の座屈解析による鉄筋コンクリート橋脚の塑性ヒンジ長に関する研究、土木研究所資料第3748号、平成12年9月
- 14：土木研究所：鉄筋コンクリートラーメン橋脚の柱・梁接合部の動的耐力および変形性能に関する実験研究、土木研究所資料第3671号、平成12年1月
- 15：土木研究所：鋼製橋脚の終局変位の解析方法に関する研究、土木研究所資料第3670号、平成12年1月
- 16：土木研究所：「兵庫県南部地震の経験を踏まえた道路橋の震前対策および震災復旧の考え方と事例集」（作成中）
- 17：（社）日本道路協会：道路震災対策便覧（震前対策編・震災復旧編）、（平成12年度改訂出版予定）
- 18：土木研究所：鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形性能に関する実験的研究、RC橋脚の高性能化の検討、土木研究所資料第3740号、平成12年8月
- 19：運上・足立・星隈：次世代高性能・高機能耐震構造に関する実験研究、土木技術資料、Vol.42、No.9
- 20：東・田村：液状化に伴う地盤の流動が橋梁基礎に及ぼす影響の解析手法、土木技術資料、Vol.43、No.2
- 21：佐々木・松尾・田本：地中構造物の浮き上がり対策工に関する動的遠心模型実験（その2）、土木学会第55回年次学術講演会、平成12年9月
- 22：岡村・松尾・白井：軟岩上直接基礎の地震時沈下量に関する簡易手法の適用性、第35回地盤工学研究発表会、平成12年6月
- 23：松尾・岡村・田本：法先固化改良による盛土の耐震対策効果に関する動的遠心模型実験、土木研究所資料、第3688号
- 24：振動研究室：実時間ハイブリッド振動実験について、土木技術資料 研究テーマ紹介、Vol.40、No.4、1998.4
- 25：エムティエスジャパン（株）の資料を図化
- 26：<http://geotec.cv.titech.ac.jp/~cen/98/Library>
- 27：常田：技術の復権と継承、土木技術資料 論説、Vol.42、No.9

自然共生研究センターにおける研究とその課題

生態保全技術研究官 佐 合 純 造

自然共生研究センターにおける研究とその課題

環境部生態保全技術研究官 佐合純造

1. はじめに

現在、どのような事業を実施する場合にも、自然環境に対する配慮は不可欠なものとなっている。以前でも環境調査は行われていたが、漁業補償のためなど関係者への説得材料的なものが多かった。また、それ以外の場合でも金銭的価値の高い動植物や貴重種の保全が対象で、地元に対する補償的色合いが強かった。

しかし、最近では「地球環境問題」の深刻さや関心の高まりから、生態系をいかに保全するかが大きなテーマとなっている。大規模な事業は環境アセスメントが義務づけられているのは周知の通りである。

河川の分野も例外ではなく、ダムや堰の建設問題が大きな話題となっており、様々な視点からの環境調査が実施されている。また、河川改修においてもコンクリート護岸主流の整備手法が方針転換され、「多自然型川づくり」など自然環境に配慮した河川改修が全国各地で積極的に行われるようになって10年余が経過した。全国で様々な川づくりが取り組まれており、その必要性や認識はますます高まっている。また「河川環境」に対する考え方は時代とともに変遷しており、それとともに必要な検討課題も変化している。特に親水や景観重視といった人間から見て望ましい川づくりだけでなく、川に生息する動植物のことも考えた生態系を重視した川づくりが強く求められるようになった。しかし、そのような計画や管理方法は、緒についたばかりであり、それぞれの現場で担当者の工夫や意欲に任されている面が大きい。

このような現状のもと、河川事業において計画や管理を行う際に工学的な観点も踏まえつつ、河川生態系の捉え方、具体的影響の評価方法、自然との共生の考え方、さらには河川環境の保全・復元手法を明らかにすることが期待されている。

本稿では河川環境についての最近のいくつかの研究を概説するとともに、特に土下研究所で実施している「自然共生研究センター」の研究状況を詳述する。また、生態系を組み込んだ河川環境関連の研究の見通しや課題について述べる。

2. 河川環境に関する最近の研究動向

現在、河川環境に関して上記の視点から土木研究所が関係して研究が進めているものには、「自然共生研究センター」、「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」、「河川生態学術研究」、「多自然型河川工法の開発」、「河川水辺の国勢調査」、「環境アセスメント関連」等がある。以下、これらの動向について述べる。

2-1 自然共生研究センター

自然共生研究センターは平成10年11月に設立され、河川・湖沼の「空間」、「水」、「生物」、「人」の相互関係性の理解とそれに基づいた適正な河川計画・管理手法を明らかにするための研究を行っている。これらの研究を効果的に進めるため、研究施設である実験河川や実験池は空間の形状や流量をコントロールすることができるように作られている。研究は生態学や河川工学などの分野の境界領域にあり、実験やその解析は種々模索しながら行っている。研究施設や研究内容については後述する。

2-2 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⁾

この研究は土木研究所の重点プロジェクトの1つで、平成10年度～14年度で研究を行っている。その目的は河川・湖沼における自然との共生を図るため、生物生息状況と環境条件との関係や河川・湖沼の環境条件の変化機構を把握した上で、以下の3つの技術開発を目指している。なお、自然共生研究センターの研究もこの中の一部に含まれる。

- ①河川空間の保全を計画的に行うための「河川作用による生物の生息・生育空間形成技術」
- ②人為的影響を受けた空間に生物の生息・生育空間を再生・創出する「河川の生物生息・生育空間創出技術」
- ③生息・生育空間の形成や質に影響を与える水の制御・改善のための「水環境の保全・制御技術」

2-3 河川生態学術研究²⁾

本研究は平成7年より開始され、生態学的な観点から河川を理解し、川のあるべき姿を探ることを目的として行っているもので、以下のようなテーマを設定して多分野の研究者が集まって研究が進められている。

- ①河川流域・河川構造の変貌に対する河川の応答を理解する。
- ②生物の生息・生育場所（ハビタット）の類型化とその変動（自然、人為による）あるいは適正な分布を明らかにし、今後の河道管理と流量管理の基礎資料を得る。
- ③特定区間における生物現存量、生物種構成、種の多様性、物質循環、エネルギーの流れを明らかにし、河川生態系モデルを構築する。これらを用いて河川の環境容量を推定し、今後の河川管理に資する。
- ④河川に再自然化工法など環境インパクトを与え、その効果の影響を明らかにし、評価の手法を確立し、河川の自然復元の手法を探る。
- ⑤①～④に関する結果を総合し、生態学的な観点より河川のあるべき姿を探る。

具体的には全国に数カ所の研究地区を設定し、同一地点において長期にわたる系統的、時系列的なモニタリングが実施される。研究に当たっては、場合により環境にインパクトを与える。それらの情報は相互に交換し分析する。また、このための研究手法の確立を図

ることとされている。

このため、平成7年度から多摩川と千曲川、平成10年度から木津川、平成11年度から北川（宮崎県）において、それぞれ研究が開始されている。

2-4 多自然型河川工法の開発

戦後、大災害の頻発に伴い、その復旧や予防対策が急がれ、効率的に治水工事が行うため、昭和30年代からコンクリート護岸の普及が進んだ。これは限られた予算と時間の中で安全性向上を重視する反面、大量生産方式で河川を単に水を流す用排水路のように単調なものに変えてしまった。しかし、環境問題の重要性や関心の高まりから、上記に対する反省と河川の自然環境の保全・復元の必要性の認識から、ここ10年「多自然型河川工法」のような河川の自然環境を配慮した工法の開発や実河川での実施が積極的に進められるようになった。

多自然型河川工法は河川生態系から見ると、河川における生物の生息場（ハビタット）をいかにうまく保全できるかが課題となる。

現在、全国で様々な多自然型河川工法が実施されている。中には首を傾げるものもあるが、多自然型河川工法と言えるものを整理すれば以下ようになる。

- ①河道内に小規模な施設を設置して流れを誘導することにより、土砂堆積や侵食作用などの自然の力を利用して、植生、瀬や淵、ワンドなどの再生を図る³⁾。
- ②自然の生産物である木、石、植生等の利用や「伝統的工法」を積極的に活用する。
- ③従来のコンクリート護岸等の上に覆土することで河岸を復元する。
- ④河岸の背後に矢板設置や地盤改良等を行うことにより自然河岸を残す。
- ⑤新素材や新工法の活用した護岸工法（「ポーラスコンクリート護岸」や「新素材を用いた侵食防止シート」等）。

多自然河川工法はこれまで経験的に施工されるケースが多かった。今後は効果的な実施のため治水効果だけでなく、生態系の変化についても定量的予測や評価の検討が必要である。また、事前及び事後に継続したモニタリングを行い、その結果が予測と異なる場合には、工法の改良や追加を行うなどの対応が必要である。

2-5 河川水辺の国勢調査⁴⁾

平成2年度から建設省及び都道府県等により、全国109の一級水系の河川及び主要な二級水系の河川や直轄・水質源開発公団管理のダム及び補助ダムについて、河川を「環境」という観点で捉えて基礎情報の収集整備を目的とした「河川水辺の国勢調査」が実施されている。調査の内容は「魚介類調査」、「底生動物調査」、「植物調査」、「鳥類調査」、「両生類・爬虫類・哺乳類調査」、「陸上昆虫類等調査」の6つの生物調査、さらに河道の瀬・淵や水際部の状況等を調査する「河川調査」、河川空間の利用者などを調査する「河川空間利用実態調査」の合わせて8項目である。

生物調査は、同一年度に全国 109 の一級水系の河川等の全てについて、同一の調査項目を一斉に実施するのではなく、例えば一級水系の河川については、毎年各項目を 109 水系の 1/5 程度で実施し、5 カ年で各調査が一巡するように実施されている。

また、河川調査及び生物調査の実施に当たっては、地方ブロック毎に調査に関し専門的知識を有する学識経験者を「河川水辺の国勢調査アドバイザー」として委託し、調査計画、調査実施、調査成果などについての助言を得つつ実施されている。今後、蓄積されたデータの有効な活用方法や一層合理的な調査方法の検討を行っていく必要がある。

2-6 環境アセスメント関連

平成 9 年に成立した「環境影響評価法」においては、環境影響評価の対象となる「環境」の範囲が公害の防止や貴重種の保全に限定せず、環境基本法に対応して地球環境、生態系、身近な自然などを含む幅広いものとなった。特に自然環境については、生物多様性の確保や自然環境の体系的保全の観点から評価されることになり、「生態系」が新たな評価項目として追加された。このため、従来の貴重な動植物だけではなく身近な自然等も含めた幅広い観点からの評価が行われることになった。

生態系の環境影響評価に関する技術手法については、主に地域を特徴づける生態系に関して、上位性・典型性・特殊性等の視点から注目種・群集を複数抽出し、これらの生態、他の生物との相互関係、生息・生育環境の状態を調査し、これらへの影響を把握する方法がとられている。これらはこれまでの貴重種中心の調査ではなく、一般種まで踏み込んだ調査であり、従来の手法から大幅に進んだものである。しかし、十分生態系の全貌を捉えているとは言えず、研究の余地が残されている。

3. 自然共生研究センターの研究について

3-1 研究の基本方針

自然共生研究センターでは、「多自然型川づくり」をより具体化し、生態学等の考え方も取り込んだ「人と自然が共生した川づくり」の手法の開発を目的にしている。これは、治水、利水、景観といった「人間のため」だけではなく、魚類をはじめ、川に関わる生物全体にとっても棲み心地のよい川にすることである。

このため、河川・湖沼の構造や流水などの環境条件が変化した場合の生態系に与える影響を客観的に求める手法や河川・湖沼の自然環境の保全・復元する手法について研究する。また、環境をわかりやすく表現したり理解できる手法についても研究する。

自然共生研究センターの主な具体的研究テーマを以下に示す。

- ① 自然を活かした川づくりに関する研究
- ② 流量変動を加味した流水管理に関する研究
- ③ 河川と外来植物

④環境展示に関する研究

⑤自然を活かした湖沼の水質浄化技術の開発

これらのためには、工学だけでなく学際的な知見も必要である。このため、多くの分野の学識者の方々からなる「研究アドバイザー委員会」を設けて、公開の形で研究テーマや成果について議論や意見を頂きながら研究を進めている。

3-2 研究施設の概要

自然共生研究センターは岐阜県羽島郡川島町の本曾川の河畔に設けられ、現在、土木研究所と中部地方整備局が共同で研究を進めている。また、先進的な施設でもあることから、多方面からの関心も高く、オープン以来、1万5千人を越える見学者が訪れている（平成12年12月現在）。

センターの研究施設は「実験河川」、「実験池」、「河原植物保全研究ゾーン」の実験施設と「研究棟」から構成されており、その配置概要を図-1に示す。

このうち実験河川と実験池は河川や湖沼の生態系が実際に近い形で把握できるスケールで作られている。以下にこれら各施設について具体的な構造を述べる。

(1) 実験河川

実験河川は、以下の条件を満たすように作られている。

- ①生物が棲むことができるスケールであること。
- ②河川形状の違いが表現でき、変更も可能であること。
- ③流量のコントロールが可能であること。

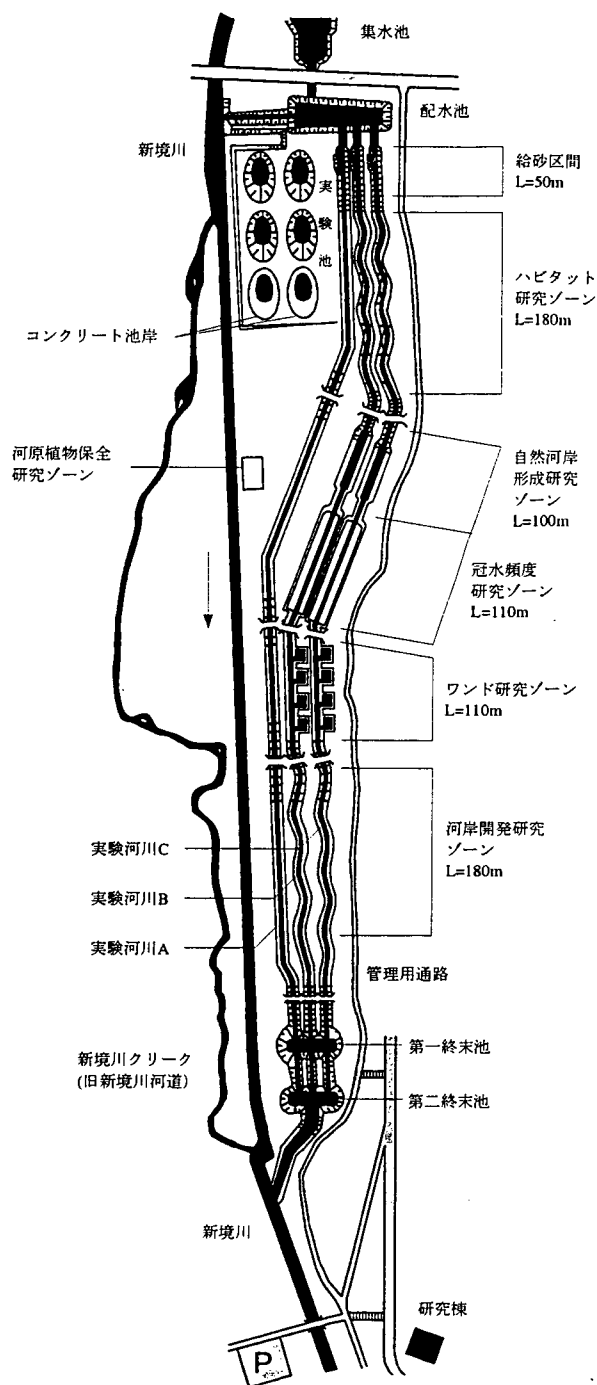


図-1 研究施設の配置概要

- 実験河川は、河川形状や流量を任意

このうち、実験河川 A はほぼ直線で一部コンクリート護岸となっており、改修済の河川をイメージしている。実験河川 B 及び C は、ともに同一構造に作られており、蛇行した自然河川をイメージしたハビタット研究ゾーンをはじめ、5 つの研究ゾーンが設けられている。

常時は上流端から約30 m下流にある流出口から、 $0 \sim 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ を流している。また、最上流の配水池転倒ゲートを倒すことにより $0 \text{ m}^3/\text{s} \sim 3 \text{ m}^3/\text{s}$ の流量変動（出水実験）を起こすことができる。給砂区間からは土砂を混入させることができる。実験河川B及びCに設けている5つの研究ゾーンの概要を述べる。

このゾーンは実験河川B及びCの最上部にある。ここでは、自然河川に近い状態になるように、河道を川幅の10倍程度の波長で蛇行させている。これに伴い瀬や淵も多く、これらは魚類等にとって良好なハビタットとなっている。この「瀬、淵等の形状や規模」と「生物の生息状況」との相互関係を評価して、河川改修等で消滅や減少する恐れのあるハビタットを保全・復元する手法の研究を行う。

このゾーンの延長は180 m、河床勾配は1/200～1/400である。

このゾーンは、予め、河川改修によって単純に拡幅された区間に見立てて、上下流に較べて2倍以上の川幅にして河床も平坦にした。これを1年間存置したのち、現在は簡易な水制等の構造物を設置して、堆積・侵食などの自然作用を積極的に誘導できる状態にしている。これらの構造物設置前後の河道の変化や生物量を比較しながら、生物の生息しやすい河道に復元させる手法について研究を行っている。このゾーンの延長は100m、河床勾配は1/800である。

このゾーンでは、実験河川 B 及び C 沿いに各 4 ヶ所ずつあわせて 8 ヶ所の「ワンド」を設けている。ワンドは小型の入江のような場所で、淀川、木曽川等で見られ、魚類の産卵

や稚魚や仔魚の生育場所のほか、洪水時の避難場所となっている。ここでは、水位変動など様々な条件を与えて、ワンドの形状や水の動き（循環流等）と生物の生息状況の関係を調査して、ワンドの望ましい構造や維持方法についての研究を行っている。

4) 冠水頻度研究ゾーン

このゾーンでは、両側の河原との河床の比高が下流に向かって徐々に高くしてあり、冠水頻度が上流から下流に向かって低くなっている。これより冠水頻度と水辺の植物の繁茂との関係等を調査して、河川の植物を適切に保全・管理する手法の研究を行っている。河原は幅 6 m、河床との高低差は 10 cm～1 m、ゾーンの延長は 110 m、河床勾配は 1/800 である。

5) 河岸開発研究ゾーン

このゾーンでは、現在、土木研究所が民間企業と共同開発している植物の繁茂可能な侵食防止シートを区間に区切って 8 タイプ設置し、その施工性や施工後の植物の繁茂状況などを継続調査している。このゾーンの延長は 180 m、河川勾配は 1/280 である。

(2) 実験池

実験池は、以下の条件を満たすように作られている。

- ①実際の湖沼の現象をある程度再現できる規模であること。
- ②流入・流出量がコントロールできること。
- ③池岸形状の変更が可能であること。

実験池は、長径 50 m、短径 30 m（池面積 1200 m²）の 6 つの池から構成されている。6 池は、2 つの池をペアにして研究を行うことができる。そのうち、1 組（2 池）は池岸をコンクリートで覆われた池岸になっており、残り 2 組（4 池）は土でできた自然池岸でヨシなどの植生を繁茂させることができる。実験池を使った研究はまだ開始していないが、今後、池岸の植生等が水質に与える影響、あるいは栄養塩類の比が水質に与える影響、具体的な水質浄化手法の研究などを行う予定である。

(3) 河原植物保全研究ゾーン

全国的に河原の減少や外来植物の侵入により、在来の河原植物が減少している。ここでは特定の区画を設けて、河原植物の保全手法について研究している。

(4) 研究棟

研究棟には、研究室、図書室、実験河川の状況や電波テレメトリー（発信機を動物等に取り付けて、その移動位置を調べる装置）を制御や監視する実験制御室、水質分析室等がある。また、見学者が施設や研究の概要を知ることができるビジタールームがある。平日はビジタールーム及び図書室は一般にも開放している。

3-3 これまでの研究成果⁵⁾

これまでは主に実験河川を用いた研究を進めている。このような研究は初めての試みでもあり、平成10年11月～平成12年3月までは実験河川の基本特性や今後の実験条件を定めるための予備実験期間とした。この期間は実験河川A、B、Cとも、水量の確保が可能な限り、常時 $0.1\text{ m}^3/\text{s}$ の通水を行うとともに、14回の出水実験を行った。出水実験は上流端の転倒ゲートから台形型の出水波形で、 $0.5\text{ m}^3/\text{s}$ から $3\text{ m}^3/\text{s}$ のピーク流量を20分～30分間、流量上昇・下降期も含めて1～2時間の放流を行った。

予備実験期間中の流量グラフを図-3に示す。平成11年冬期は、取水河川である新境川の水量が少なく、目標の $0.1\text{ m}^3/\text{s}$ を下回る期間が生じた。また、平成12年1月～平成12年3月までは本格実験に備えて、実験河川の形状の調整を行うため、通水をストップした。

実験河川の水質は取水元である新境川の水質に等しい。図-4は平成11年度の新境川のBOD月別変化値、比較のため木曽川本川のBOD値を示す。新境川のBODは夏期は 1.5 ppm ～ 2 ppm であるが、冬期は 4 ppm ～ 5 ppm と大きい。また、木曽川本川と比較して全期間で大きいことがわかる。これは新境川が各務原市街から家庭雑排水の流入を受けるとともに、灌漑期には農業用水の落水流入による水質の希釈があることに起因するものである。

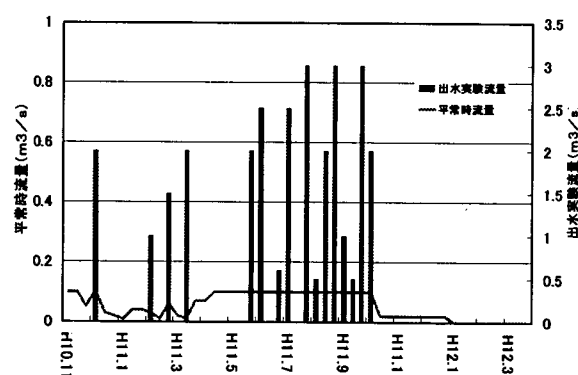


図-3 実験河川の流量グラフ(H10.11～H12.3)

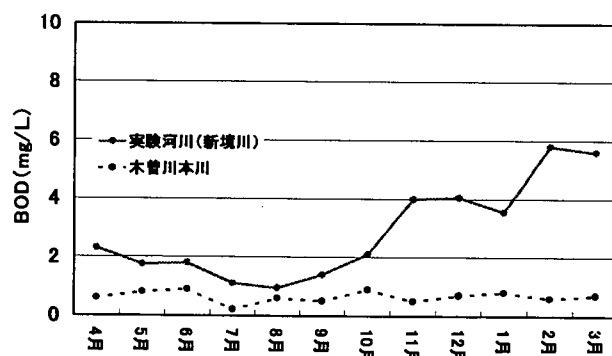


図-4 実験河川の水質(BOD)(平成11年度)

(1) 実験河川及び実験池の基礎調査

1) 周辺環境及び生物の定着状況

センター周辺の気象及び生物生息状況を表-1に示す。

図-5は平成11年度までの実験河川A、B、Cの確認魚種数、また、比較のため新境川及び木曽川本川での確認魚種数(平成6年度河川水辺の国勢調査)を示す。実験河川で多く生息する魚種としては、オイカワ、タモロコ、フナ類、シマドジョウ類、ナマズ等が見られる。図から実験河川の魚類の種類数は、通水後約1年で新境川に近くなっており、新境川の支流として同化が進んでいるようである。

底生動物についても同様の比較を図－6に示す。底生動物は魚類より移動が緩やかな種類も多いが魚類と同様な傾向が見られる。

このように実験河川については、実験開始から1年程度にもかかわらず、早い速度で周辺環境に同化しつつあると考えられる。

表－1 自然共生研究センターの周辺環境

	周辺環境（出現種類数）	実験河川
魚類生息数	2 2 （新境川）	2 1 （オイカワ、トモロコ、フナ類、シマトシヨウ類、ナマス等）
	4 2 （木曽川）	
付着藻類	9 7 （新境川）	2 0 0
底生生物	6 2 （新境川）	5 1
鳥類	3 9	
陸上昆虫	5 5 6	
哺乳類	5	
両生類	6	
爬虫類	8	
植生	4 1 9 （うち外来種 8 2）	

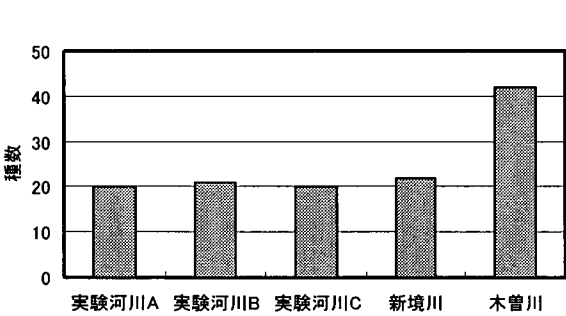


図-5 実験河川の魚類定着状況（平成 11 年度）

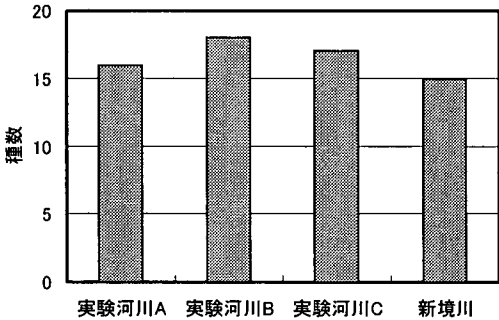


図-6 実験河川の底生生物定着状況（平成 11 年度）

2）実験河川の水利特性

河川の蛇行や河岸の植生、さらには瀬や淵は河川の生物によって良好なハビタットである。これらは河川の水利・物理特性に様々な影響を与える。これらを定量的に把握するための研究を進めている。

各実験河川とも、通常時は0.1 m³/sの流量があるが、実験河川Aでは水深、流速は比較的単調で、それぞれ、20～30 cm、0.3～0.4 m/sである。これと比較して実験河川B及びCでは、蛇行など変化に富んでいるため水深や流速にバラツキが大きい。これらの関係の一例を図－7（1）（2）に示す。

また、出水実験において冬期と夏期の流出状況の違いを図－8に示す。夏期は冬期に比

較して、上流部では水位が高く、下流部ではピーク到達時間が遅れるとともにその流量も小さい。これは夏期は冬期に比較して植生が繁茂しており、これが河道の粗度を高めて結果的に河道貯留を増加させたことによるものと考えられる。しかし、出水が継続する場合、植物は流れによって倒されたりして一定状態を保たないと考えられる。また、以上の結果は規模が異なる河川においては河川構造と植物の大きさ等との関係が異なるためその傾向は異なってくる。

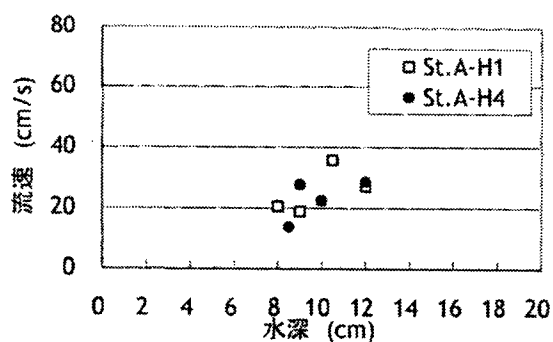


図-7 (1) 水深と流速 (実験河川 A) ¹⁾

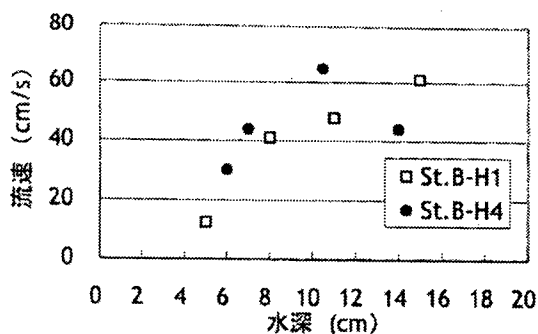


図-7 (2) 水深と流速 (実験河川 B) ¹⁾

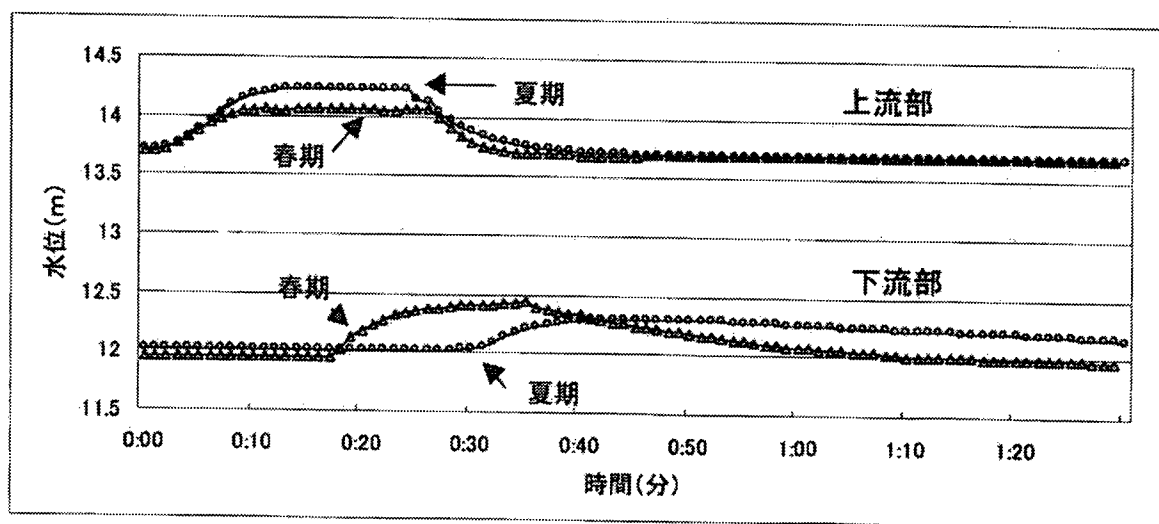


図-8 春、夏期による実験河川 C の水位縦断面図 ¹⁾

今後、このような結果を一般化するためには植生や河道形状を簡易な方法でいかに水理モデル化するか、またどのように河川生態系との関連づけを行うかが課題である。

(2) 自然を活かした川づくりに関する研究

河川には魚類をはじめ、様々な生物が複雑に関係しながら生息して、1つの生態系を構成している。ここでは魚類を中心にして、河川構造等のハビタットや季節変化と魚類の生息・生育の関係を明らかにし、自然と共生した河川づくりの手法開発を目指すものである。

図-9は実験河川A、B、C別の魚類の生息状況を個体数で比較したものである。実験河川Aは実験河川B及びCに比べ、生息個体数が少なく、瀬や淵を多く有する実験河川B及びCが直線形状の実験河川Aに比べ、魚の生息環境が良いことが定量的に明らかにされた。

また、図-10は実験河川B、Cのハビタット研究ゾーン（瀬や淵のある多様な区間）と自然河岸形成研究ゾーン（平坦で単調な区間）で、魚類の種類数と河床単位面積当たりの魚体湿重量を比較したものである。「瀬や淵のある多様な区間」が「平坦で単調な区間」に比べ魚の生息環境が良いことがわかる。さらに河岸植生と魚類の生息も深い関係があり水際植生率が高いと魚類の生息量も多いことが明らかにされた。これらは従来から言われていたことではあるが、定量的に確認したことの意義は大きい。

今後、上記の結果を踏まえて、魚類が生息しやすいのはどのような河川構造であるのかについて、他の生物との関係なども絡めてさらに明らかにしていく必要がある。

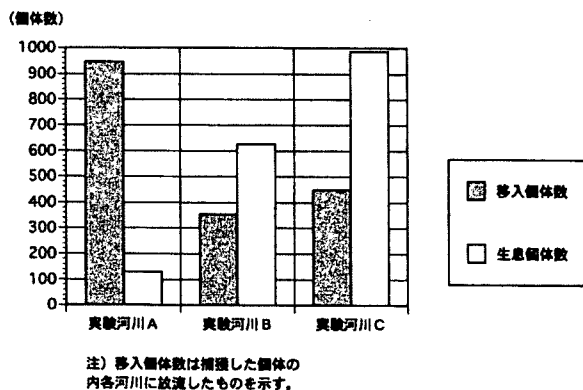


図-9 移入魚類個体数と生息魚類個体数 (H11.3)¹⁾

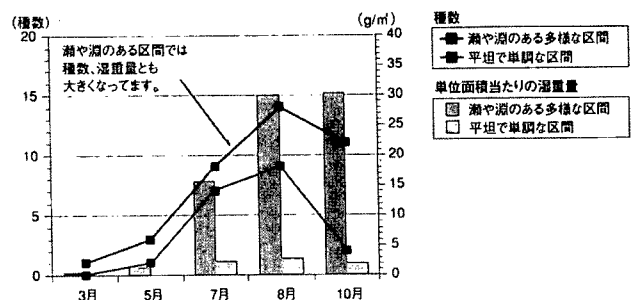


図-10 河道状況と魚類生息量

(3) 流量変動を加味した流水管理に関する研究

河川の自浄作用は河道内での沈降・濾過、植生等への栄養分として吸収、微生物による有機物分解によって生じると言われている。また、自濁作用は河床からの溶出、河床等に付着する藻類の過増殖による剥離が原因とされている。河川が効果的な自浄作用を発揮するためには、これらのメカニズムを把握して出水や流量変動による「河床のフラッシュ効果」がどのように起こり、どの程度の出水や流量変動が河川環境にとって適切なのかについて研究を進めている。

このため、各実験河川において出水前後の各水質項目（BOD、SS、総窒素、総リン、クロロフィルa、pH、DO）の上下流変化を求めるため、上下流で水質を測定した。ま

た、河床に付着する藻類が出水によって剥離、再び増殖する再生プロセスを明らかにするため出水前後で付着藻類の現存量や種類を測定した。水質浄化の例としてBOD変化（浄化率）の出水前後時間変化を図-11に示す。2～3週間目までは浄化能力を保つが、その後、浄化能力が低下し、さらに自濁傾向となることがわかる。また、河床に付着した藻類がどの程度の流量規模で剥離するかについては、増殖した藻類は $0.5\text{ m}^3/\text{s} \sim 3\text{ m}^3/\text{s}$ の出水によって、出水後クロロフィル換算で $40 \sim 60\text{ mm g}/\text{m}^2$ まで剥離して減少した。今後、藻類の剥離と流量規模等との関係など、そのプロセスのさらなる解明が課題である。

（４）河川と外来植物

河原では上流域での外来植物を使った法面緑化等の流域開発の影響もあり、外来植物が増加しており、生物多様性を脅かす大きな要因の1つとなっている。このため、外来植物の河原への侵入機構、在来種へ及ぼす具体的影響や対応策を研究する必要がある。平成12年度から以下の2つの研究を開始している。

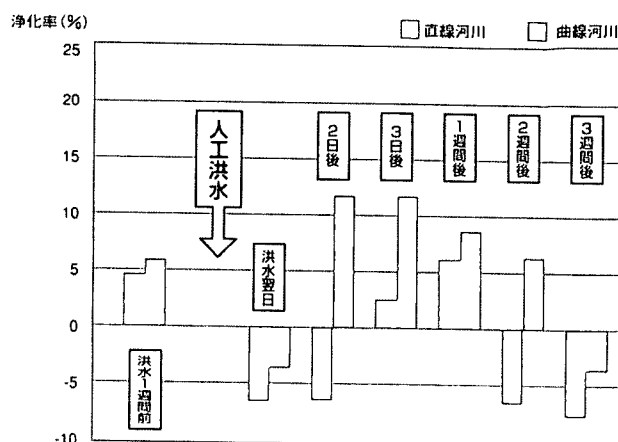


図-11 BOD 浄化率の時間変化（平成 11 年 2 月～3 月）¹⁾

1）河川の種子散布機能の研究

水辺への植物（外来植物を含む）の侵入プロセスとして河川の流水による種子散布がある。実験河川を用いてこのメカニズムや周辺への影響を明らかにしていく。

2）外来植物が河原植物に与える影響の研究

外来植物の繁茂が在来の河原植物の生存・成長に及ぼす影響を明らかにするために、河原植物保全ゾーンに設けた20の方形区画に、河原植物の種子を播種し、このうち、10を除草区として外来植物を毎月抜き取る処理を行い、残りの対照区と比較して河原植物の生存・成長状況を調査している。

（５）環境展示に関する研究

センターは、上述の様々な研究を進めると同時に開かれた施設を目指している。このため、研究成果をわかりやすく広く社会に普及させることもセンターの重要な使命の1つである。特に、近年、国民の環境に対する関心は高く、それぞれの分野の環境情報を平易な形で効果的に多くの人々に対して伝達する手段が求められている。しかし、このような研究はあまり取り組まれておらず、位置づけも不明確であった。このため、センターの施設や研究活動を1つのモデルとして、情報発信の効果をアンケート調査等で評価しつつ、効

果的な情報発信ための展示や表現手法について実践的な研究を行っている。

(6) 自然を活かした湖沼の水質浄化技術の開発

上述の通り、平成13年度以降に研究を着手する予定である。

(7) 活用研究について

活用研究は国土交通省以外の研究者が自然共生研究センターを利用して河川の自然環境の保全・復元に資する研究ができる制度で、平成11年度から開始したものである。活用研究者は公募を行い、「研究アドバイザー委員会」の意見を参考に土木研究所が選定を行っている。現在、以下の5件の活用研究が実施されている。

- ① 自浄作用能力の定量的評価及びメカニズムの解明
- ② 実験河川の流れ及びSSに関するシミュレーションモデルの評価
- ③ 水位変動が河床内間隙と流路周辺部の生息環境と生物群集に及ぼす影響
- ④ 非定常流量下におけるワンドの水交換と土砂堆積に関する研究
- ⑤ 流水の一次生産の測定に関する研究

4. 生態系を取り込んだ河川環境保全の研究

4-1 研究課題

これまで述べてきたように自然共生研究センターの研究は緒についたばかりであり、研究成果もこれからの段階にある。また、研究方針についても実験結果を見ながら、フレキシブルに判断しているのが現状である。

しかし、基本的には河川環境の事業や評価に必要な河川生態系の定量化や評価手法が今後どこまで可能となるかが大きな課題であると考えられる。

このため、これまでの生態学関係の知見や課題について整理を行い、今後の河川環境保全の研究にとってどのようなことが利用でき、新たにどのような研究が重要であることを認識しておくことも必要である。

4-2 河川生態系モデルの試み

(1) 河川生態系の構成要素と対象範囲

一般に生態系は地球に生命が発生した30億年前からの変遷を経て構築されたものであり、外的環境の要素と生息する生物からなる複雑なシステムである。

このため、現在の生態学の知識では生態系の定量化や条件変化に伴う予測は湖沼の富栄養化モデルなど、ごく限られた目的で試みられているのみである。

河川生態系の概念図を図-12に示す⁶⁾。河川生態系の特徴は①時間的・空間的に不安定であること、②開放的であり、流れの連続性が重要な因子であること、③多様な空間や構造を有していること、④河岸や河床等の水域との境界の重要性が高いこと等があげられ

る。

以下、河川生態系を考察するに当たって、対象範囲や構成要素を定めておく必要がある。対象範囲は集水域全体やワンドなど河道内の一部をとることもできるが、ここでは流水部分と周辺水際の河川区域部を対象とする。また、その構成要素は人間（流域住民や河川管理者）を含め、以下の6つが考えられる⁷⁾。

- ①人間
- ②太陽光エネルギー・物質
- ③生物生息空間としての河川構造
- ④生物
- ⑤生物と上記①～③（「外的環境」と呼ぶことにする）の関係
- ⑥生物間の相互関係

①～④は個別に存在しているものである。また、⑤は①～④が相互に関係し合いながら存在すること、⑥は生物同士も個体群、群集のような集団としての機能を持ちながら生活していることから構成要素に加えることにした。

以上で取り上げた河川生態系における構成要素や相互関係の模式図を図-13に示す。また、このうち、主要な事項について、以下に整理する。



図-12 河川生態系の概念図⁶⁾

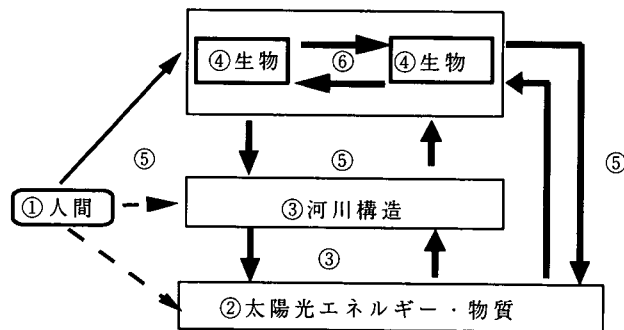


図-13 河川生態系の構成要素

(2) 太陽光エネルギー・物質

河川は太陽光からエネルギーを受ける。これによって植物や藻類は光合成を行い有機物を生産する。逆に水中や河床のバクテリアは死滅したり排出された有機物を分解して無機物に戻す。

また、降雨に伴う水の流れ、その水が運ぶ土砂、有機物、栄養塩類、化学物質等の物質も河川生態系の一部を構成する。これらの人為または自然の変化は河川構造や生物に影響を及ぼす。それぞれの物質は物理現象としては運動式や連続式を従うが、生物の作用によって形を変えたり移動することも多い。

(3) 生物生息空間としての河川構造

河川は流水の動きとその影響を受けて河道等の変動を起こす。これらの変動を前提に生物が生息している。従来、河川事業では治水・利水上の安全度や管理のしやすさから、河道断面をできるだけ単純な形で固定する計画・管理が一般的であった。しかし、このような計画・管理方法は河川生態系から見ると不適当であり、河川の多様性が失われることにもつながる。これらを考慮すれば治水・利水対策を行う場合には河道の変動を許容した計画・管理が必要である。また、その変動は一方的な河床上昇や低下ではなく、上昇や下降が繰り返されるような動的平衡状況になっていることが望ましい。

河床変動モデルをはじめ、水質や水量の変動モデルは従来から多く検討されているが、瀬や淵の形状まで含めた検討には2次元または3次元モデルが必要になる。これらは膨大な容量や計算時間を要するが、コンピュータの発達によりかなり複雑な形状や変化まで解析が可能になってきている。しかし、解析には各種パラメータや境界条件の正確な設定等が必要であり、このための課題は多い。

(4) 生物と外的環境の関係

河川に生息する生物は水深、流速をはじめ水温、水質、底質等に影響される。例えば、魚類は瀬や早瀬に多く生息することが知られている。これらの特性を定量化して外的環境の変化による予測・評価を可能にできるようにすることが望まれる。

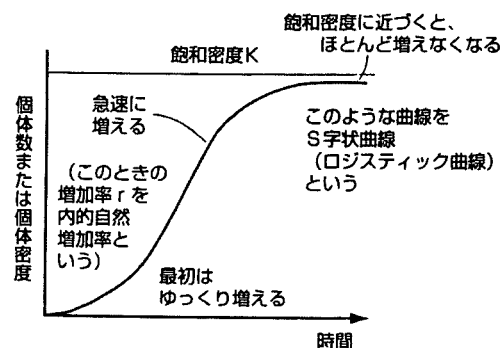
生物と外的環境の関係の定量化や人為を含めた外的環境の変化が生物に与える影響を求めようとする研究は積極的に取り組まれている分野の1つである。

生物個体群と外的環境の関係をもっとも簡単に表すモデルとして図-14に示すようなロジスティック曲線がある。これは生物の個体数の時間的変化が環境収容力(K)と増殖率(r)で評価され、外的環境の変化や種内・種間競争により、 K や r の数値は変動する。これらの変動は、たとえば「 K -戦略」、「 r -戦略」のように分類されている⁸⁾。

一方、魚類については魚類の棲みやすさと水深や流速の関係を定量的に評価する手法として、米国で開発された「PHABSIM」がある。これは①流量別に対象河道区間内の水深、流速、底質、カバー(魚の隠れ場所等の提供物)などの物理量の分布状態を表す「河道構造-水理モデル」、②河道の物理量に対応する対象魚の適性あるいは選好特性を示す「適性基準」、③①と②を用いて「河道区間平均評価値(WUA)」-「流量」関係を示す「利用可能マイクロ生息場量算出モデル」から構成されている。我が国でも豊川、千代川等で研究としての実施例がある。また、魚類以外に底生動物やその他生物にも適用の可能性が期待されている。ただし、この手法の問題点として、①他の魚種や生物種からの影響が考慮されていない、②河道の物理量間の関連性が無視されている、③対象生物の移動を計算できない等があげられている^{9) 10)}。

また、森下は「魚のすみやすさ」としての場の指標として①川が上下につらなっているか、②細流、水路等のつながりが有効か、③冠水率の高い水辺(湿地)や伏流水はあるか、

④河床に大小の石があるか、⑤水深に大小があるか、⑥流速に大小があるか、⑦水生植物があるか、⑧水辺林が連続しているか、⑨水面への光の当たり方、⑩攪乱の度合い。をあげている。この10項目に基づいて、「HIM（生息環境の評価の指標）」を用いて、魚類の生息環境を点数評価する手法を提案している¹¹⁾。



(5) 生物間の相互関係

生態系に含まれる生物種は、生物相互作用で結ばれたネットワークを構成している。また、生物相互関係には様々なものがあり、大きく分類すれば同種間の関係と異種間（個体群間）の関係に分けられる。

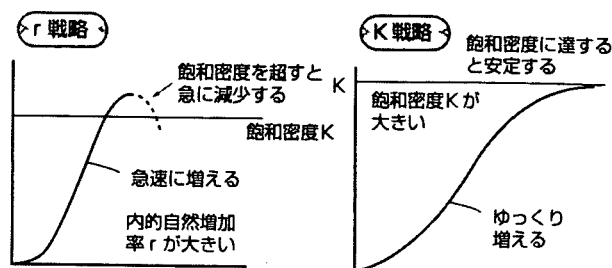


図-14 生物個体数の時間的変化（ロジスティック曲線）⁸⁾

同種間の関係では①個体間競争、②なわばり制・順位制・リーダー制等がある。また、異種間の関係では①捕食－被食関係、②競争関係、③共生・寄生関係等がある。

生物間の相互関係については、数理生態学で様々なモデル化が試みられているが、ほとんどが個別なものや限られた関係を扱ったものである。実際の生物関係は、以下に述べるように外的要因も含めて複雑に絡み合っているため、モデルの総合化や実用化はこれからの課題と考えられる。

異種間の関係のうち、捕食－被食関係は食物連鎖の基本プロセスであり、1つの生物から他の生物へのエネルギーの流れをともなった相互作用である。この関係は双方の個体群の個体数に影響を与える。通常、捕食者は優占的な餌種の個体群を選択的に捕食し、生物多様性を維持する効果も合わせ持つことが知られている¹²⁾。

また、棲み分け－競争関係は資源（餌、生息場所、時間等）に制限がある場合、ある種が増加することにより資源が消費され、他の種との直接・間接的な競争を生じる。具体的な観察事例として、河川生態系ではアユ、オイカワ、カワムツ等の関係があげられる¹³⁾。

一方、生物間の相互関係が破壊される例として、外来種の侵入の問題があげられる。長い時間をかけて出来上がっていたバランスのとれた生物間の関係が侵入生物によって崩されて、時として在来生物を絶滅に陥れ、生物多様性が減少する。魚類ではブラックバスやブルーギルの侵入、植物では外来種の河原への侵入によってカワラヨモギ等の河原固有種の減少の事例があげられる。

以下、特に食物連鎖に基づいた捕食－被食関係のモデル化の可能性について述べる。

(6) 捕食－被食関係（食物連鎖）のモデル化

食物連鎖を明らかにすることは河川生態系の内部機能を知る上で非常に重要である。このためには生物と外的環境の関係や生物間の相互関係を把握して、物質循環やエネルギーの流れを定量把握することが必要である。これにより人為などの外的環境による影響についても定式化されることが期待されている。

物質収支・循環においては窒素（N）、リン（P）、炭素（C）等を対象にして追跡する方法、エネルギーの流れにおいては植物の光合成による1次生産を出発点として食物連鎖を追跡する方法等がある。

ここでは食物連鎖の関係を大胆に単純化して、「栄養段階」ごとにエネルギー消費も含めて出入りする物質量の収支を考える。これによって食物連鎖から見た生物間の関係や変化について、多少でも内部機能からの評価に踏み込むことが可能ではないかと考える。本来、食物連鎖の関係は単純なエネルギーのフローでは表現できず複雑な網目状になるが、主要なものだけを取り上げると図-15のようになる¹⁴⁾。また、これを栄養段階で分けてエネルギーの流れを下位から上位に追うと図-16のようになる。

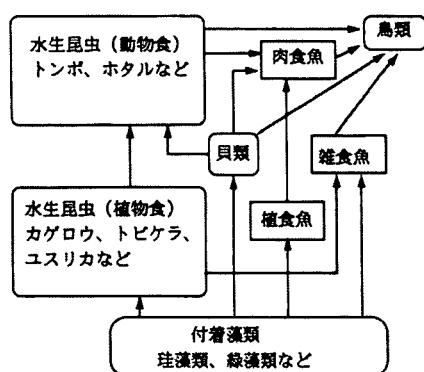


図-15 河川生態系における食物連鎖の単純化¹⁴⁾

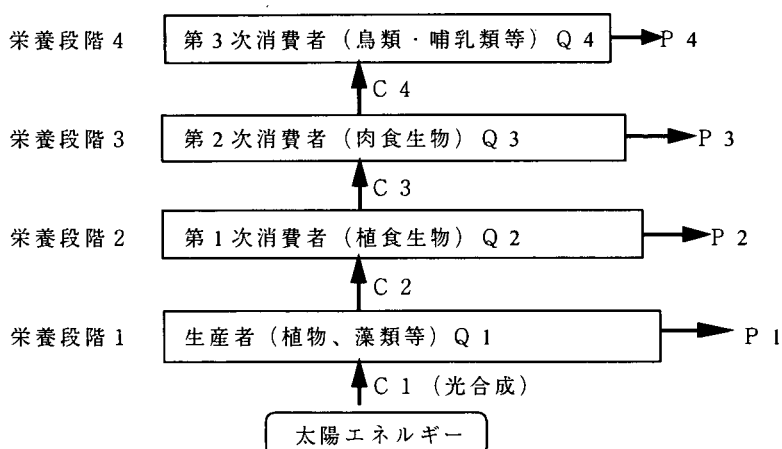


図-16 栄養段階別のエネルギー流れの模式図

さらに図-16から栄養段階*i*ごとに収支を考えると、次の項目があげられる。

（入） $C_{i,t}$ = 摂食量（植物の場合は光合成による1次生産量）

（出） $P_{i,t}$ = 吐き出し量 + 排出量 + 呼吸量 + 死滅分解量

$C_{i+1,t}$ = 栄養段階*i*での被食量

この（入）と（出）の差を $\Delta Q_{i,t+1}$ とすると、これは栄養段階*i*で、一定期間*t*から*t+1*間での生物の生長・繁殖量であり現存量の変化量となる。

$$\Delta Q_{i,t+1} = C_{i,t} - P_{i,t} - C_{i+1,t}$$

栄養段階*i*での被食量（ $C_{i+1,t}$ ）は上位の栄養段階（*i+1*）の摂食量に等しい。この $C_{i+1,t} / C_{i,t}$ （ < 1 ）は生態効率と呼ばれており、食物連鎖におけるエネルギー効率を表している。この数値は食物連鎖の効率性の1つの指標とされており、植食段階では1.0

%程度で上位の栄養段階ほど大きいといわれている。また、安定した生態系の場合には、 $\Delta Q_{i,t+1} = 0$ であり、 $C_{i+1,t} = C_{i,t} - P_{i,t}$ で生態効率は $1 - (P_{i,t} / C_{i,t})$ となる。

工学的発想が許されるならば、各栄養段階における $P_{i,t}$ 、 $C_{i,t}$ を外的環境諸量や $Q_{i,t}$ 等の何らかの関数で表現できれば、これから ΔQ_{i+1} を推定できるようになる。また、 $\Delta Q_{i,t}$ と指標となる生物種の個体量変化の関係を求めておくことにより、栄養段階 i のエネルギー流れ変化から生物種の個体量変化を推定できる。

理想的には外的環境の変化を知って $C_{i,t}$ 、 $H_{i,t}$ 、 $U_{i,t}$ 、 $R_{i,t}$ 、 $D_{i,t}$ 等の変化を求めて、これに伴うエネルギー流の変化を予測して個体量への影響を把握することが可能となるはずである。しかし、現段階では上記の関数化に必要となる生物と外的環境の関係や生物間の相互関係が十分解明できていないことから、食物連鎖のモデル化は経験的知見以上に有用なものとなり得るかはほとんど不明である。

4-3 河川生態系のブラックボックス的評価法

食物連鎖モデルなど河川生態系の内部機能を表現した生態系のモデルは前述のように課題も多く、実用化の目途はたっていない。このため、生物多様性から河川生態系の内部はブラックボックスとして評価してみることにする。

(1) 「生物多様性」とは

生態系が健全に機能するためには、これまで述べたようにエネルギーの流れと物質の循環及び関連する諸機能が、外的環境の変化に対して安定的に保持されることが必要である。このための必要条件として生物多様性の確保が重要であるとされている。生物多様性は「生物が分化・分岐して様々に異なること」をいう。生物が多様であればあるほど、生態系の安定度は高いといわれている。

この生物多様性は次のような経験的な傾向があることが知られている^{1,2)}。

①資源量が豊富で生息場所が多様なほど、多様性は高まる。

②個々の種の資源利用の幅が狭いほど、多様性は高まる（資源利用の特殊化）。

③ニッチ（生態的地位）の重複が高いほど、多様性は高まる。

④中規模の攪乱（中程度の大きさ、中程度の頻度、中程度の面積）は多様性を高める（Connell）（図-17）

⑤対象面積が大きいほど、多様性は高まる（Arrheniusの法則：種数 = $b \times \text{面積}^k$ で、 b 及び k は定数）（図-18）

⑥他地域から生物が移入する場合、移入元

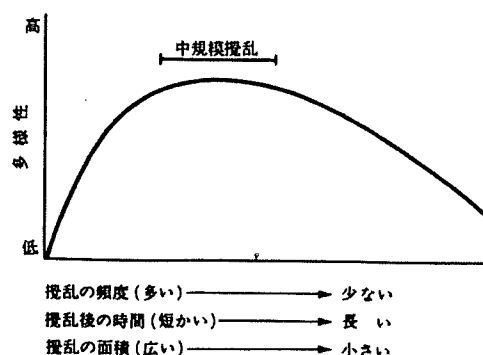


図-17 中規模攪乱仮説による多様性の説明^{1,2)}

が近いほど、また時間の経過とともに多様性は高まる。

現在、各地の環境破壊によって生物多様性が失われつつある。このため、環境基本法では環境の保全に関する基本的施策の1つとして「生態系の多様性の確保、野生生物の種の保存その他の生物の多様性の確保が図られるとともに、森林、農地、水辺地帯における多様な自然環境が地域の自然的社会的条件に応じて体系的に保全されること」をあげている。また、環境影響評価法においても、「生物の多様性の確保や自然環境の体系的保全」の観点から評価していくことになっている。

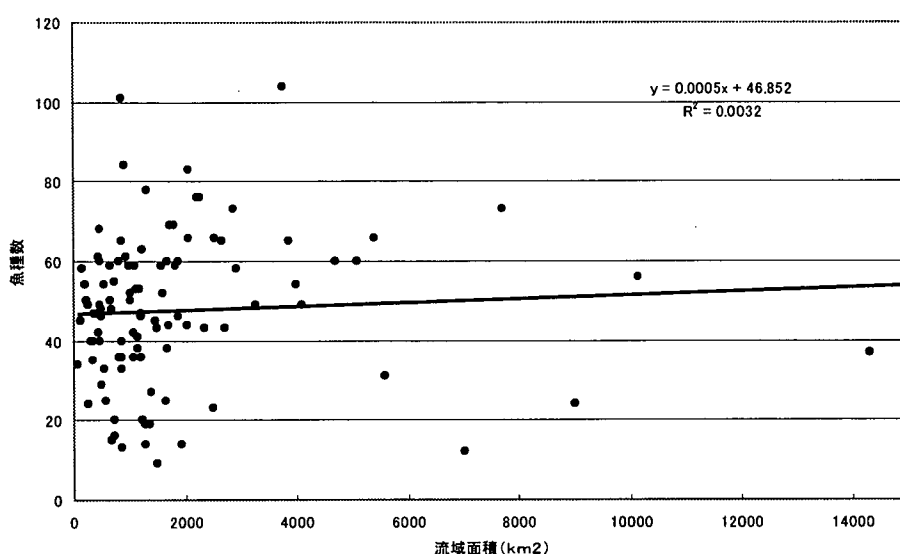


図-18 流域面積と魚種類の関係（河川水辺の国勢調査結果から全国河川を整理したもの）

（２）生物多様性から見た評価手法

ここでは複数の生物多様性の指標を用いて、生態系のマクロな定量評価を行うことを提案する。これは河川生態系の概況を把握するのに有用であると考えられる。

生物多様性では、「生態系の多様性」、「生物種の多様性」、「遺伝子の多様性」など各段階の多様性の確保が必要と言われているが、ここでは「生物種の多様性」レベルを対象にして、次の３つの指標値を取り上げる。

①生物全体の個体数（ N ）

②生物種数（ S ）

③均衡性指数（ $J' = \sum_i (n_i/N) \times \ln(n_i/N) / \ln(S)$ ）^{10) 12)}

J' は生物種の独占性を示す指標の一種で、情報量方程式に基づく「Shannon 関数」を基準化した「Pielou の均衡性指数」と呼ぶ指数であり、非独占性（均衡性）が高いほど 1 に近づく。また、 n_i は種 i の個体数である。

上記の指標値を算定するためには、対象範囲から全ての採集が理想であるが、通常困難

なことが予想されるので、代表地点をいくつか選定してそこでの一定面積当たりでの数値を対象とする。

これらの指標値はそれぞれの視点から生物種多様性を示す指標であるが、これらの数値の変化を比較評価することにより、より深い

「生物多様性」の評価が可能となる。

センターの実験河川において底生生物の定着状況を本指標を用いて評価した例を図-19に示す。

例えば、生物多様性に関するモニタリングは各指標値に対して基準値（または目標値）を予め定めて、外的環境等の変化に伴い指標値の変動を基準値と比較することによって可能となる。

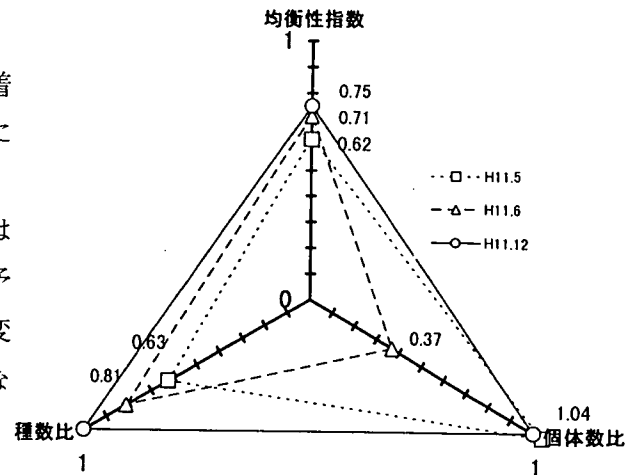


図-19 多様性の評価例（実験河川 A の底生生物）

（注）個体数比と種数比は H11.12 の値を「基準値」として、この値で各月値を除いたものである。

4-4 研究の可能性

環境問題が注目されている現在、河川生態系についても新しい発想で客観的に評価可能な手法が期待されている。しかし、これまで述べたように、河川生態系を取り込んだ実用的な河川環境保全のための定式化手法の提案はまだ先の状況にある。

河川生態系の定式化には複雑系科学を応用するような方法も考えられるが、当面は「複雑さを基本的に保ったままで、しかも単純化して行く解析法をみ出す」¹⁵⁾のように生態系の内部機能を把握しつつ骨格となる部分を残して単純化することが可能かがポイントであると考えられる。

このような点から言えば、自然共生研究センターは生態系としての現実性を備えた上で、操作可能な実大スケールで現象を単純化できるため、今後、さらに有用な活用が期待できる。例えば、ある生物種を人為的に取り除いて、様々なインパクトとレスポンスの関係を導くアプローチも可能である。

一方、仮に河川生態系を取り込んだ計画・管理が立案できたとしても、生物の絡む現象が物理現象とは異なり不確定性の高いことが予想される。このような不確定性に対処する手法として「アダプティブマネジメント（順応的管理）」がある。これは、地域の開発や生態系管理を一種の実験とみなす。計画は仮説、事業は実験であり、モニタリングの結果によって仮説の検証が試みられる。この手法では、科学的な立場からの意見を含め、広く利害関係を持つ人々の間での合意を図るような合意形成システムをつくることも重要視されている¹⁶⁾。これは、河川生態系を取り込んだ河川環境保全にとって有力な手段と考え

られるが、モニタリング項目や評価基準など具体的手法の研究が必要であろう。

5. まとめ

本稿は河川生態系に関連した調査研究状況について、土木研究所が関係しているものを中心に紹介した上で、それらの1つである自然共生研究センターの施設と研究状況を述べた。また、これから研究を進めるに当たって、方向性を探る意味も兼ねて既往の生態学の知見から河川生態系を取り込んだ河川環境の予測・評価手法の定式化やその可能性について整理した。

本稿をまとめるに当たって生態学の関係書を参考にしたが、調査方法や解析方法が十分に統一されているとは言えず個別論で止まっている情報も多いように思われた。

河川環境の保全・復元手法の確立のためには、今後これらの知見の集約化を図るとともにさらなる定式化や一般化を図る必要がある、「仮説」－「実験」－「評価」といった体系だった研究を積み重ねることも重要である。自然共生研究センターはこれに対しても活用できるのではないかと考えている。

以上の考察も踏まえつつ、明確な研究目標を定めることにより効果的な研究を進めていかなければならないと考えている。

本稿には自然共生研究センターのスタッフの研究成果を多数引用させて頂いた。また、近藤前環境技術総括研究官には多くの助言を頂いたことに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所：平成11年度重点プロジェクト成果報告書、土木研究所資料第3753号、2000.3
- 2) 河川生態学術研究会：河川学術研究の概要「川の自然環境の解明に向けて」、1997.9
- 3) 島谷幸宏：河川環境の保全と復元、鹿島出版会、2000.4
- 4) 建設省河川局：平成11年度河川水辺の国勢調査結果の概要、2000.11
- 5) 建設省土木研究所：平成11年度自然共生研究センター研究報告書、土木研究所資料第3747号、2000.8
- 6) 土木学会：水理公式集（平成11年度版）、丸善、1999.11
- 7) 須藤隆一：環境修復のための生態工学、講談社、1999.3
- 8) 大石正道：生態系と地球環境のしくみ、日本実業出版社、1999.4
- 9) 辻本哲郎：水工学に関する夏期研修会講義集「河川の生態系保全機能の評価にかかわる水工学」、土木学会、2000.8
- 10) 玉井信行、奥田重俊、中村俊六：河川生態環境評価法、東京大学出版会、2000.3
- 11) 森下郁子、森下雅子、森下依理子：川のHの条件、山海堂、2000.10

- 12) 木元新作、武田博清：群集生態学、共立出版、1989.6
- 13) 水野信彦、御勢久右衛門：河川の生態学、築地書館、1993.4
- 14) 岡田光正、大沢雅彦、鈴木基之：環境保全・創出のための生態工学、丸善、1999.9
- 15) 川那部浩哉：川と湖の魚たち、中公新書、1969.3
- 16) 鷺谷いづみ：生物保全の生態学、共立出版、1999.5

走行支援道路システム（AHS）実証実験について

道 路 部 長 中 村 俊 行

走行支援道路システム(AHS)実証実験について

道路部長 中村俊行

1. はじめに

日本では年間に1万人前後の交通事故死者が発生している。また交通事故による社会的損失額は3兆8,000億円に達する。稠密な我が国において、欧米トップクラス並の自動車交通の安全性を実現するためには、道路交通安全に対して一層の積極的な対応が必要と考えられる。現在、土木研究所で研究開発を行っている走行支援システムは、道路と車の協調によりリアルタイムにドライバーを支援することにより、事故を回避することを目的としたITSアプリケーションの一つである。交通事故を引き起こす可能性がある危険な事象の発生に際して、ドライバーがとる基本的な3つの行動、すなわち危険な事象の認知、回避に関する判断、および操作に対し、走行支援システムは走行時の安全性を飛躍的に向上させるため、情報提供機能、警報機能、操作支援機能という3つの機能でドライバーにサービスを提供する。

本稿では、今年度の10月より土木研究所のテストコースにて実施されている走行支援システム実証実験の目的および実験内容について述べる。さらに次年度以降の走行支援システムの進化のシナリオに関する紹介も行うこととする。走行支援システムの研究開発は平成8年度から本格的に開始し、道路交通安全の向上を目的として、コンセプトの明確化、リクワイアメント(システムに要求される機能・性能)の策定、要素技術開発、システム開発等を推進してきた。今年度の実証実験では、先進安全自動車(ASV)の研究開発に取り組んでいる国内自動車メーカー13社、海外の自動車メーカー2社、および国内外の大学3校との協力により、システムの有効性検証、リクワイアメント仮定値の妥当性検証、およびドライバーによるサービスの受容性評価等を実施し、平成15年の実用化に向けたサービスの実用性の基礎的検証を行うものである。

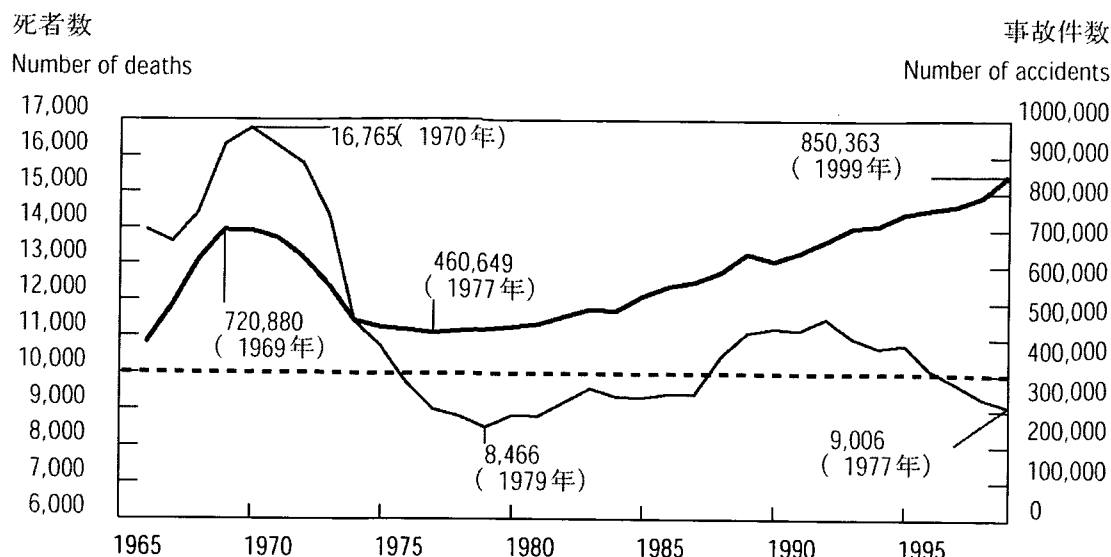
2. 走行支援システム研究開発の背景

2. 1. 交通事故問題の所在と大きさ

交通事故の発生は世界的に大きな社会問題であり、I R T A D (International Road Traffic and Accident Database) の推定(1996年)によると、全世界で年間50万人が交通事故により死亡し、米国では年間約4万人、欧州では約5万人が死亡している。日本においては、図1に示すとおり、ここ20年間の事故死者数は年間1万人前後で推移しているが、事故件数は増加傾向にある。総務省データに基づく社会的損失額として試算すると、交通事故による社会的損失額は3兆8,000億円に達する。

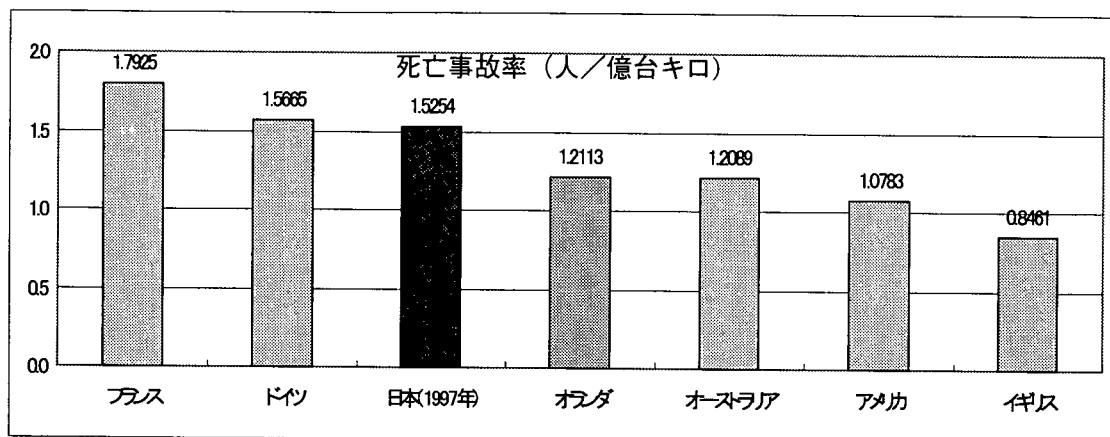
図2は日本と欧米諸国等との死亡事故率(億台キロ当たり死亡事故件数)の比較を示している。稠密な我が国において、欧米トップクラス並の自動車交通の安全性を実現するためには、道路交通安全に対して一層の積極的な対応が必要と考えられる。

また、高齢者の人口は平成10年(1998年)2月に2,000万人を超え、総人口の16.2%



(出典) 「交通統計 (平成 11 年版)」 (財) 交通事故総合分析センター

図 1 事故件数と死者数の推移



(出典) 国際道路交通事故データベース (IRTAD) (1995 年)

図 2 死亡事故率に関する欧米との比較

を占めている。国立社会保障・人口問題研究所の推計によると、高齢者人口は今後も増加を続け、平成 27 年 (2015 年) には 3,188 万人 (同 25.2%) と総人口の 4 人に 1 人は高齢者になると見込まれている。それに伴い、高齢者の運転免許保有数も増加してきている。さらに、自動車運転中に引き起こす死亡事故の頻度について、運転免許保有者数当たり及び走行距離 (走行台キロ) 当たりで年齢層別に比較すると、高齢者ドライバは 25~64 歳のドライバの 1.28 倍である。また、走行台キロに対する死亡事故率で見ると、25~64 歳までのドライバの事故率が 1.15 人/億台キロであるのに対し、高齢ドライバの事故率は 2.83 人/億台キロであり、25~64 歳までのドライバの約 2.5 倍と高齢者が引き起こす死亡事故は高い水準にあることが理解される。一般的に言えば、高齢者は、暗い所での視力低下、視野の狭小化、動体視力の低下など視覚機能が低下する傾向にあり、またブレーキ反応時間も長くなる傾向にある。このような身体機能の低下が高齢ドライバによる事故の要因と推察

される。

以上の統計やデータを見ると、今後のわが国は急速な高齢社会の進展とともに、高齢者ドライバーの割合が急増し、これにともなって交通事故の死亡者数と事故発生件数が増加していくことが予想される。したがって、高齢ドライバーが安全で安心して運転できるような走行支援が必要である。

2. 2. 走行支援システムのコンセプトと路車協調の必要性

次に事故を要因別に分類してみると、図3から分かるように、発見の遅れ、判断の誤り、操作の誤りを原因とした事故が全体の4分の3を占めていることが分かる。従って、これらの要因を取り除くことができれば、大幅な事故削減が期待できる。走行支援システムは、これら発見の遅れ、判断の誤り、操作の誤りを未然に防ぐことによって、事故を回避することを基本コンセプトとしている。すなわち、発見の遅れに関しては情報提供、判断の誤りに関しては警報、操作の誤りに関しては操作支援を行うことにより、事故回避の支援を行うものである。

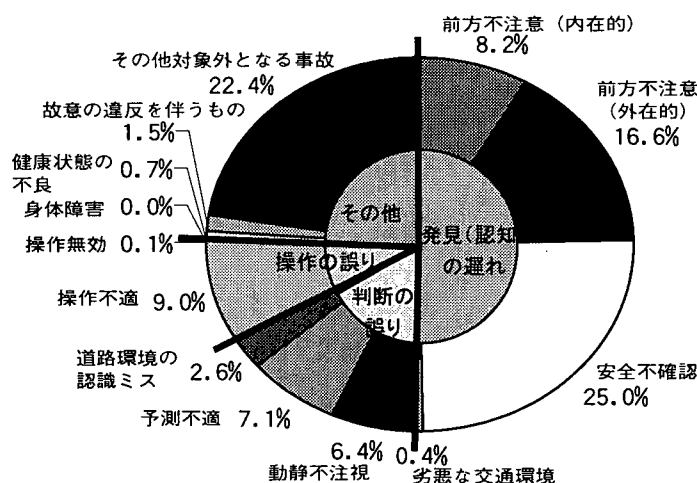


図3 要因別に見た事故の比率

こうした事故回避のための走行支援システムには3つの方法が考えられる。一つはインフラ単独のシステム、二つ目は車両自律型のシステム、そして三つ目は路車協調型のシステムである。その中で、我々が路車協調のシステムを推進するのは、車両自律型システムとインフラ単独システムの両方の特長を生かすよう検討した結果によるものである。車両自律型システムとインフラ型システムの特長を表1に示す。表に示されているように、遠方・死角の情報の入手は、車両自律型のシステムでは不可能である。このことは、見通し不良のカーブでの衝突や交差点での出会い頭衝突を防止するサービスを実現する場合には、インフラシステムの支援が不可欠であることを表している。また、インフラシステムは天候の影響を受けにくい。したがって濃霧や積雪時における走行支援にはインフラシステムの導入が有効である。一方、車両自律型システムは、自車両のデ

ータを含めた判断・処理を行う上ではインフラシステムよりも有利である。我々が推進している路車協調システムは、このような路車の特長を生かしたものである。

表1 インフラシステムと車両自律型システムとの特長比較

分 類	項 目	車両自律型	インフラ
情報収集	車両近傍の情報収集	得意	不得意
	遠方、死角の情報入手	不可能	可能
	天候の影響	受けやすい	受けにくい
	収集可能な場所	全て	設置場所のみ
	他情報とのリンク	困難	制約少ない
情報処理	情報処理できるデータの大きさ	少ない	多い
	自車両挙動を含めた判断・処理	得意	不得意
情報提供	効率性およびサービスレベル	個別サービスに優れる	同報サービスに優れる

前述のような路車の特長を生かした路車協調の基本的な役割分担を図4に示す。まず、路側のセンサから、道路上の障害物や停止車両に関する情報、カーブなど道路線形に関する情報および路面状態に関する情報等、車載センサからは入手しにくい情報をインフラによって収集し、路側情報処理装置および通信装置を経て、車側にデータが提供される。データを提供された車は、自車両の速度、減速能力等の情報に基づき、ドライバーへのサービス提供タイミングを計算し、その結果に基づいて情報提供、警報、操作支援という一連のサービスを実施するのである。

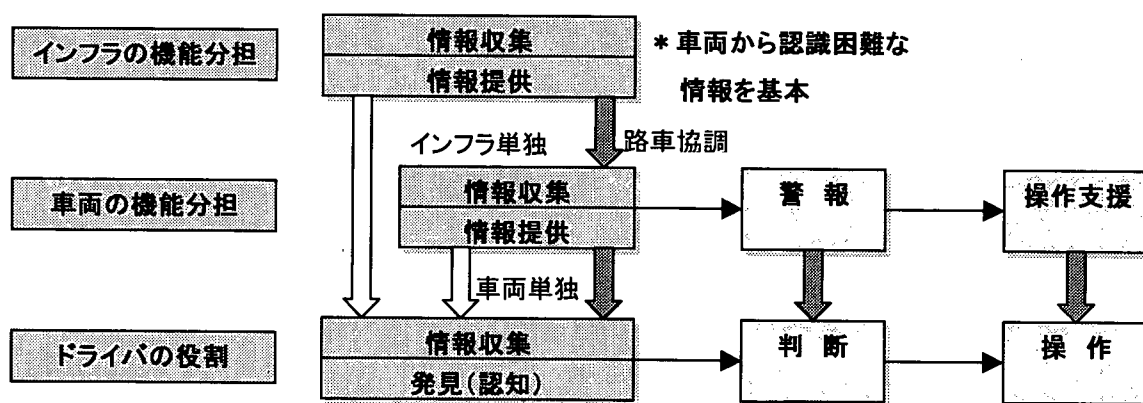


図4 路車の役割分担

我が国では、こうした路車協調システムを、AHS（走行支援道路システム）とASV（先進安全自動車）の連携により実現する。AHSとは建設省が研究開発を行ってきた走行支援を実現するインフラシステムであり、路車協調型のシステムと情報板等を用いたインフラ単独システムの2通りがある。ASVは運輸省および国内自動車メーカー13社によって研究開発が行われてきた車両システムであり、路車協調型のシステムと車両単独で走行支援を実施するシステムの2通りがある。今年度の実証実験では、ASV

とAHSの連携によって実現する路車協調の走行支援システムの実現性、有効性等の検証を行った。

2. 3. 走行支援システムのシステム構成

図5に走行支援システムのシステム構成を示す。まず、道路状況把握センサによって道路上の障害物や停止車両の存在を検出、路面状況把握センサによって路面状況を検出し、これらの情報を路側処理装置に収集する。路側処理装置はこれらの情報を車側に与える情報に加工し、通信機器（ビーコン）を通じて、情報は車に送信される。車はビーコンから受信した路側からの情報と、レーンマーカーから得た位置情報および自車両の速度等のデータを元に、ドライバーへサービス提供タイミングを自ら判断し、適切なタイミングでドライバーにサービスを提供する。

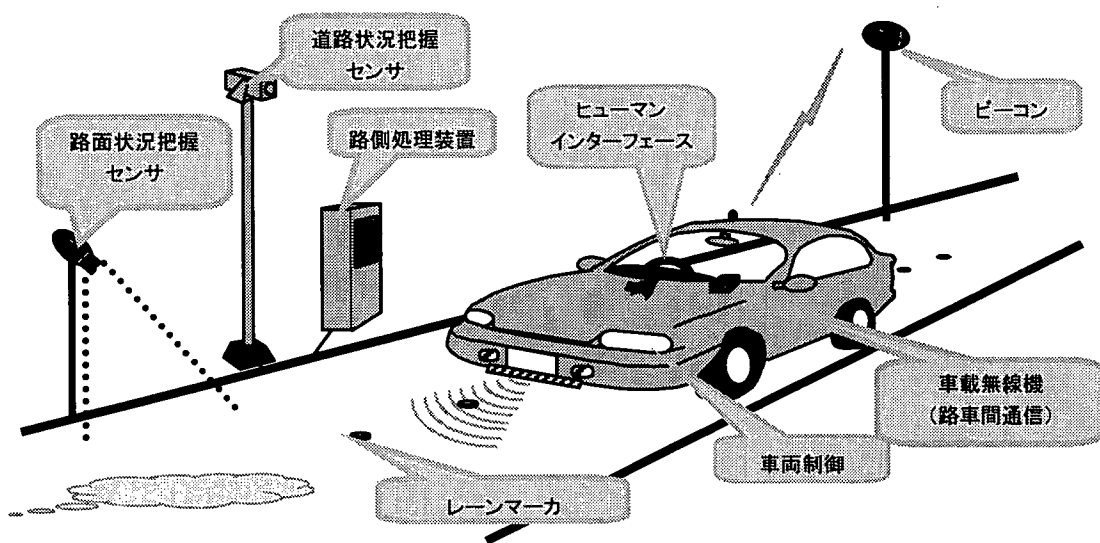


図5 走行支援システムのシステム構成

2. 4. 基本ユーザサービス

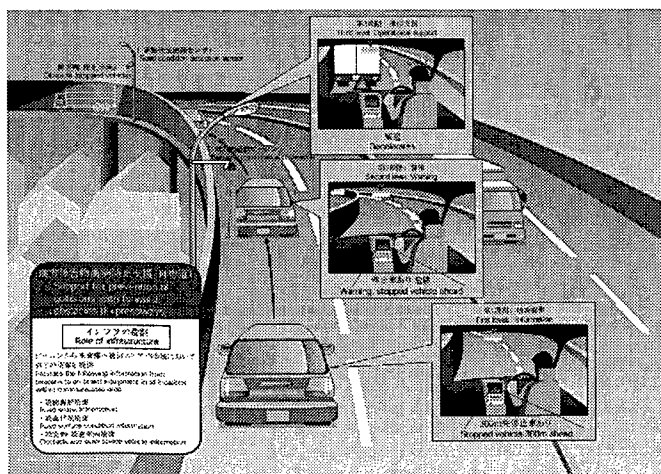


图 6.1 前方障害物衝突防止支援

我々は、最小限のシステムパターンによって最大限の効果を上げるために、基本ユーザサービスを選定した。まず、第1ステップとして、交通事故の要因別の分類を行った。これによって前述の通り、事故の4分の3は発見の遅れ、判断の誤り、操作の誤りのいずれかを要因として発生していることが明らかとなった。次に事故を形態別に分類した。これによって、前方障害物衝突防止や車線逸脱防止、出合い頭衝突防止支援が重要であることが

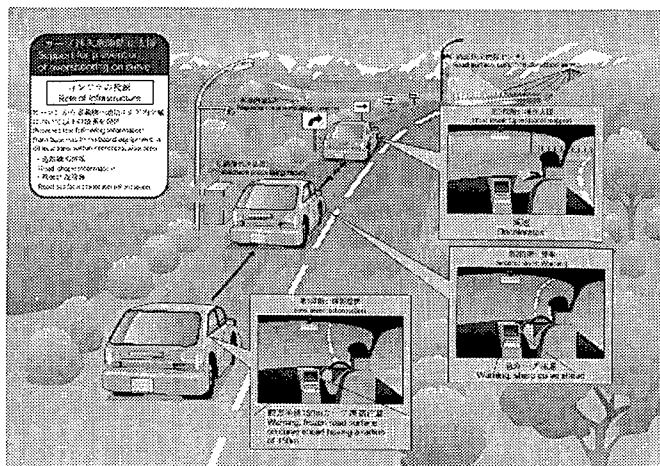


図 6. 2 カーブ進入危険防止支援

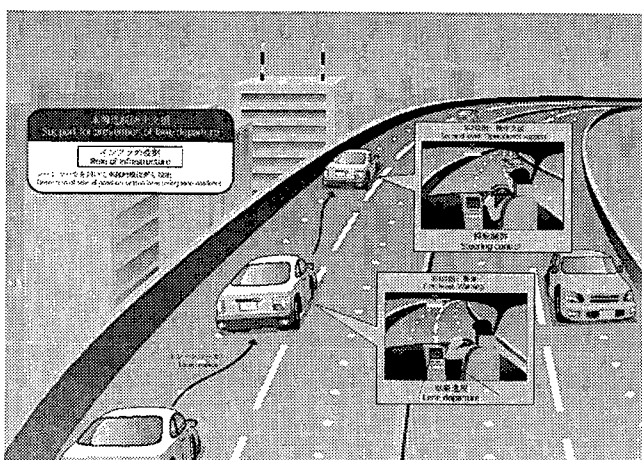


図 6. 3 車線逸脱防止支援

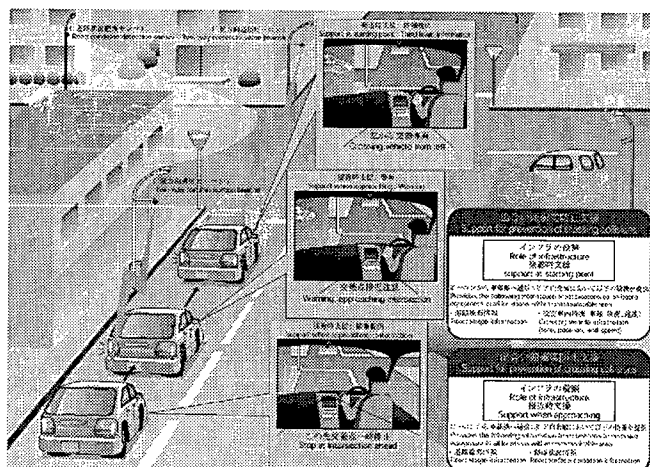


図 6. 4 出合い頭衝突防止支援

明らかとなった。そして最後に交通事故による事故死者数や損失額の大きさによって7つの基本ユーザーサービスの選定を行った。図6. 1～図6. 7に7つの基本ユーザーサービスのサービスイメージ図を示す。

(前方障害物衝突防止支援)

自専道では障害物衝突や追突事故が全体の7割に達しており、事故対策が急務となっている。見通しが悪いカーブ等において、道路インフラ（センサ）が停止車両や落下物等の障害物を検知し、その情報を路側アンテナ（ビーコン）から車両に伝える。車両はドライバーに対して情報提供や警報、操作支援を行う。このサービスにより、自専道や一般道における駐停車中の車両への追突事故などの削減が期待される。

(カーブ進入危険防止支援)

自専道や一般道においては、カーブで多くの事故が発生しており、事故対策が急務となっている。カーブの手前において、路側アンテナ（ビーコン）がカーブまでの距離やカーブ形状を車両に伝える。車両はドライバーに対し、情報提供や警報、操作支援を行ない、安全にカーブを曲がれるようドライバーをサポートする。このサービスにより、自専道や一般道におけるカーブの正面衝突事故やすれ違い衝突事故、車線逸脱事故の削減が期待される。

(車線逸脱防止支援)

車線逸脱事故の致死率は全体に比べて非常に高く事故対策が急務となっている。道路の路面に設置されたレーンマーカーにより、車両が車線内の位置情報を検知する。車両が

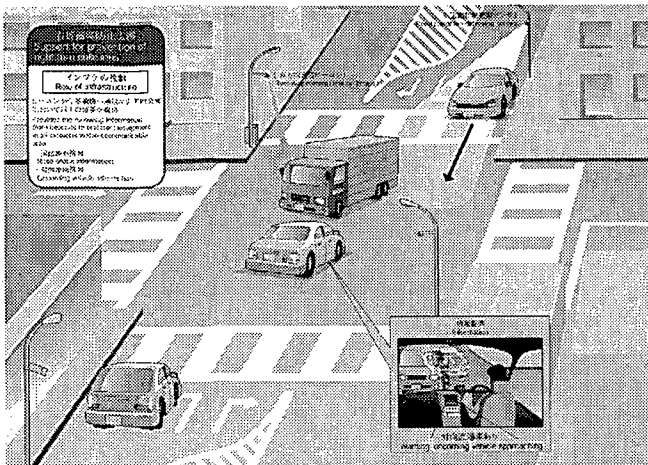


図 6. 5 右折衝突防止支援

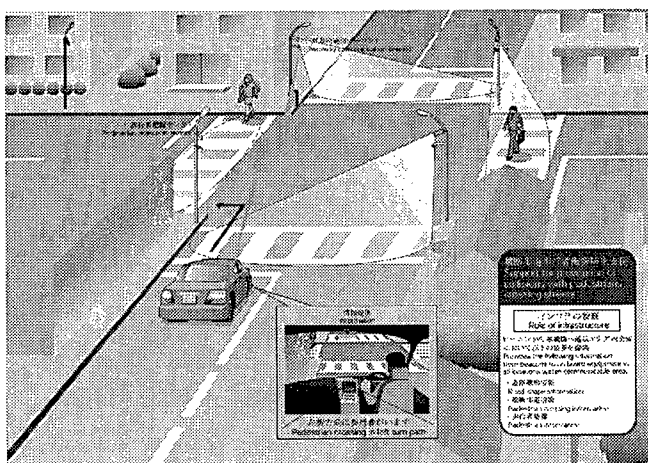


図 6. 6 横断歩道歩行者衝突防止支援

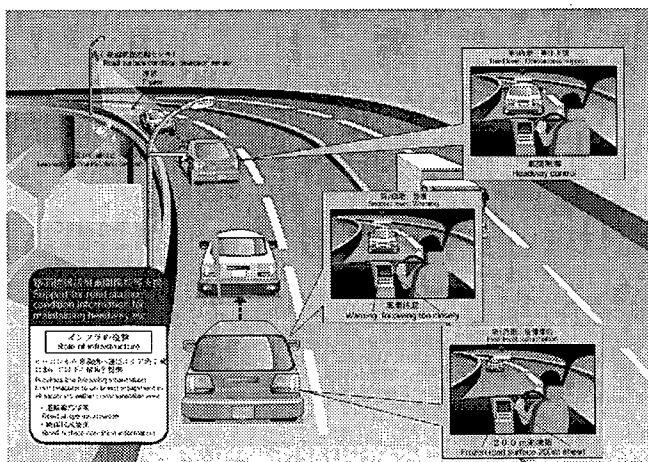


図 6. 7 路面情報活用車間保持等支援

車両に路側アンテナ（ビーコン）から伝える。車両はドライバーに対し情報提供を行う。このサービスにより、交差点横断中の歩行者に対する事故の削減が期待される。

（路面情報活用車間保持等支援）

道路インフラ（センサ）が道路の路面状況（凍結、水膜、積雪など）等を把握し、路

走行車線を逸脱しそうになった時はドライバーに対し警報、操作支援を行う。このサービスにより、自専道や一般道における直線の正面衝突事故やすれ違い衝突事故、車線逸脱事故の削減が期待される。

（出会い頭衝突防止支援）

従道路において交差点に接近する車両に、交差点の存在を伝える。また、発進しようとする車両に対して、道路インフラ（センサ）が接近する車両を検知し、その位置やスピード等の情報を路側アンテナ（ビーコン）により車両に伝える。車両はドライバーに対し情報提供を行う。このサービスにより、交差点における出会い頭衝突事故の削減が期待される。

（右折衝突防止支援）

交差点において、道路インフラ（センサ）が対向車線を接近してくる車両の位置やスピードを検知し、路側アンテナ（ビーコン）からその情報を右折しようとする車両に伝える。車両はドライバーに対し情報提供を行う。このサービスにより、交差点における右折時衝突事故の削減が期待される。

（横断歩道歩行者衝突防止支援）

交差点において、道路インフラ（センサ）が横断歩道上の歩行者を検知し、その情報を右左折しようとしている車

側アンテナ（ビーコン）により車両に伝える。車両はその情報をドライバーへの伝達や、車間保持サービスに活用する。このサービスにより、追突事故の削減が期待される。

図7に事故要因別・類型別の死者数を示す。事故類型は大きく分けて単路における事故と交差点における事故の二つに分類される。事故要因は発見の遅れ、判断の誤り、操作の誤りのおよびその他に分類される。この図から、車線逸脱事故、障害物衝突事故、および歩行者事故が死亡事故の多い事故類型であることが分かる。そして、追突事故、障害物衝突事故、車線逸脱事故、出会い頭衝突事故、右折衝突事故および横断歩行者衝突事故を合わせると全体の90%以上を占めることが分かる。

そしてこれら7つのユーザーサービスを導入することによって、交通事故全体の50%を削減することを長期的な目標としている。

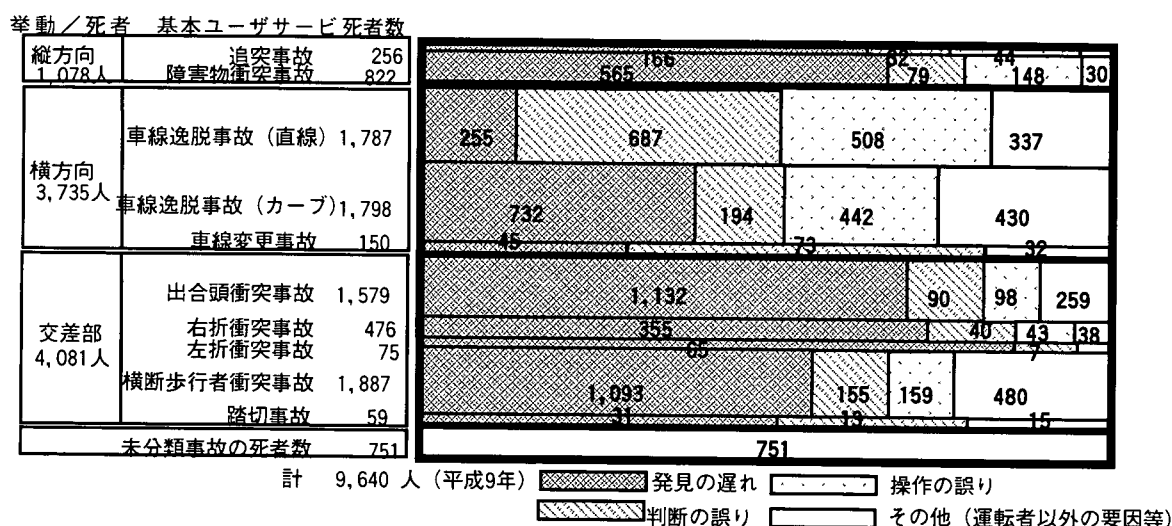


図7 事故要因別類型別死者数

3. 走行支援システムの実証実験

3. 1. 実証実験の目的

前章において、走行支援システム研究開発の背景とシステムおよびサービスの概要について論じた。本章では、本年度に実施された走行支援システムの実証実験について紹介する。

今回の実証実験は大きく3つの事項を検証するために実施されている。一つは、システムの検証である。すなわち、我々のシステム設計が実際のドライバーの運転挙動等に照らし合わせて妥当であったかどうかを検証するものである。二つ目はドライバーの受容性からの評価である。提供されるサービスの内容（情報内容および提供頻度など）がドライバーにとって受け入れられるものであるかどうかを検証するものである。三つ目は効果計測のためのデータ収集である。サービス提供による事故回避の効果をサービス提供の有無によるドライバーの走行挙動（反応遅れ時間、減速度、操舵角など）の比較を通じて検証するものである。この実験は設定条件によっては危険を伴うため、一部はド

ライビングシミュレータを使った模擬実験で検証を行った。

3. 2. 実証実験施設および実験参加者

実証実験システムは、国土交通省土木研究所のテストコースに設置された。図8に実証実験システムの配置を示す。実証実験のサイトは大きく3つに分けられる。一つは南ループである。ここでは、単路において実施されるサービスとしては前方障害物衝突防止支援およびカーブ進入危険防止支援が実施される。また、交差点系の3サービス、すなわち出会い頭衝突防止支援、右折衝突防止支援、横断歩道歩行者衝突防止支援がループ内に整備された二つの交差点を利用して実験される。

二つ目は直線路および北ループである。ここでは単路系のサービスとしてはカーブ進入危険防止支援、車線逸脱防止支援、および路面情報活用車間保持等支援が実施される。三つ目は雨霧実験施設内である。ここでは雨霧による見通し不良時の前方障害物衝突防止支援および車線逸脱防止支援が実施されている。

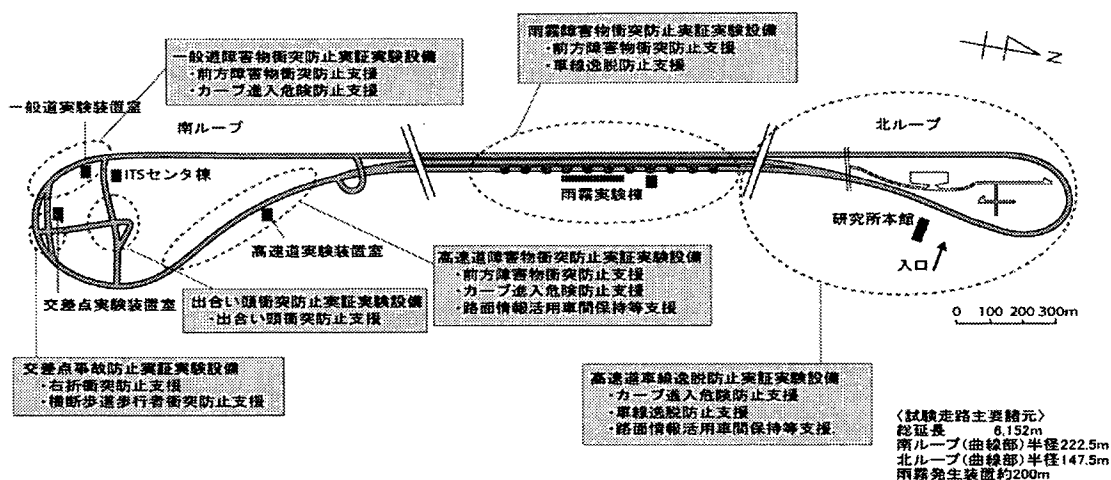


図8 実証実験施設配置図

実証実験に参加した企業・団体等を表2に示す。実験参加者は大きく3つに分類される。一つはAHS研究組合である。AHS研究組合はインフラシステムの設計者であり、システム設計値の妥当性検証等に関して評価を行う。二つ目はASVの研究開発者である国内自動車メーカ13社である。本システムがASVとの路車協調によってサービス提供可能であることを実証することが参加の目的である。最後は本実験において国内外より公募を行い、それに応じた機関である。本システムが国外でも研究開発が行われている路車協調型の走行支援システムと協調して有効に機能するかどうかを検証することを実験参加の目的としている。

3. 3. 実証実験における検証内容

今回の実証実験では大きく分けて4つの項目に関する検証を行う。本章では実証実験における検証項目に関する概要を記す。

表 2 実証実験参加者

実験種類	参加者	実験車両
AHS 実験 (AHS 研究組合)	国内エレクトロニクス、自動車、 重工業、通信メーカ 21 社	乗用車 4 台、大型車 1 台、計 5 台
A S V 合同実験	国内自動車メーカ 13 社	乗用車 11 台 (軽 2 台含む)、大型 車 4 台、二輪車 4 台、計 19 台
応募者実験	東京大学	3 台
	慶應義塾大学	1 台 (AHS と兼用)
	ダイムラー・クライスラー	2 台
	P A T H	1 台
	H Y U N D A I	1 台
	T D K	1 台
	I M T S (トヨタ)	3 台 (バス)
合計	34 団体	32 台

3. 3. 1. リクワイアメント仮説値の妥当性

一つ目の検証項目はリクワイアメント仮説値の妥当性である。走行支援システムのサービスを提供するタイミングはドライバーの反応時間および減速度等によって決定される。テストコースに設置された実験施設の提供タイミングは、既存文献から収集したデータ、あるいは前年度までに行ったドライビングシミュレータを用いた模擬実験の結果等を利用して仮設定されたものである。今回の実証実験では、ドライバーの運転挙動に関するデータを収集し、仮設定された値の妥当性を検証する。図 9 に情報提供の有無と走行速度との関係を示す。図は縦軸に車速、横軸に時間を取り、サービスを受けたドラ

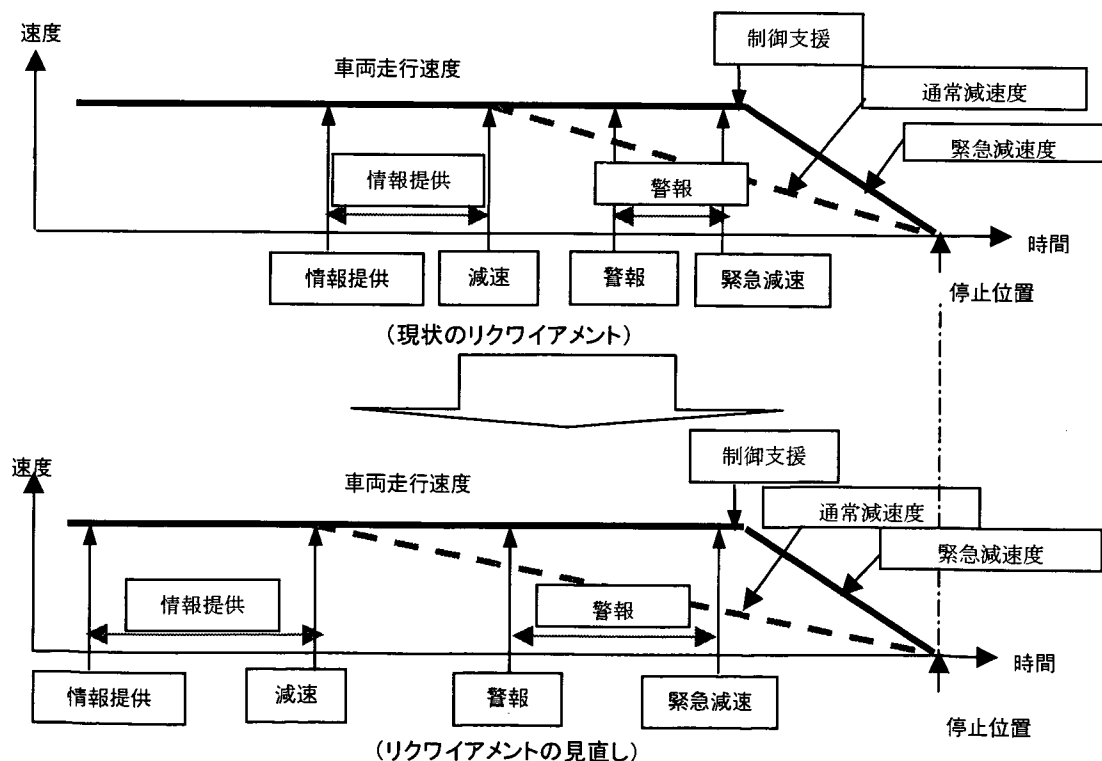


図 9 リクワイアメント仮説値の検証

イバーの運転挙動を示している。グラフの傾きは車の減速度を表す。上に実験システムを設計した際の設定値を示す。仮に実験結果が下図のように、設定値よりも大きな反応遅れ時間と緩やかな減速度を示した場合。より早いタイミングで情報提供を行うようにシステム設計を見直す必要があることが分かる。

3. 3. 2. システム設計の妥当性

2 番目の検証項目はシステム設計の妥当性である。走行支援システムは、障害物等を検出するセンサ、路面状態を検出する把握センサ、車位置を車両に知らせるレーンマーカ、車両との情報交換を行う路車間通信システムなどによって構成されている。実証実験では、これらシステム構成機器の機能・性能、配置に関する妥当性を評価する。レーンマーカを例にとって説明すると、図10に示すように車線逸脱防止支援においてはレーンマーカの設置間隔がサービスの精度、信頼性に関係する。設置間隔が狭ければ狭いほど精度および信頼性が向上することは言うまでもないが、システム導入コストとサービス提供に必要な精度・信頼性の両方を考えた適切な設置間隔を決める必要がある。そこで、レーンマーカの設置間隔および車両の走行速度を変化させ、車線逸脱警報の信頼性に関するデータを収集する。収集されたデータに基づいて、車線逸脱防止支援サービスの実現に必要な位置マーカの配置方法を決定する。

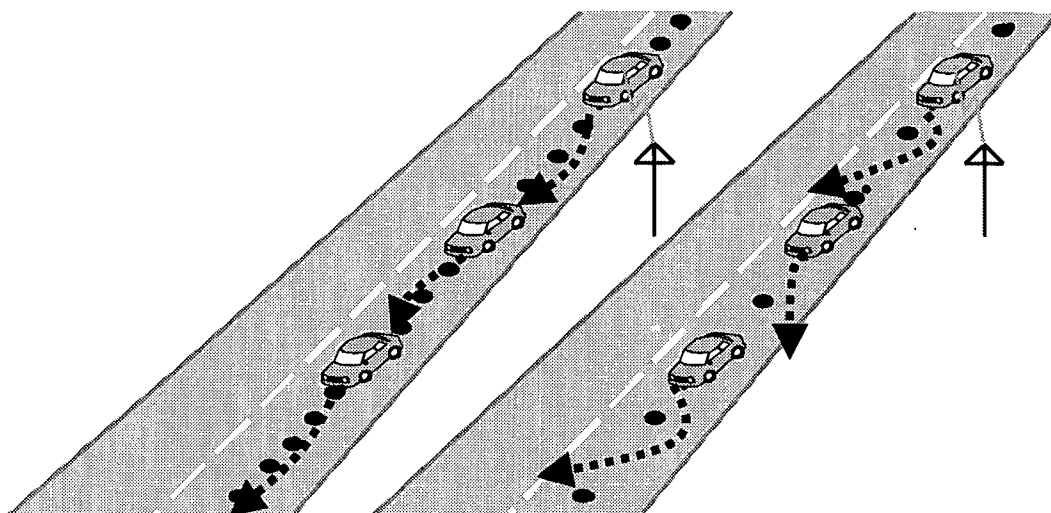


図 10 システム設計の妥当性検証（車線逸脱衝突防止支援における検証事例）

3. 3. 3. サービスの有効性

3 番目の検証項目はサービスの有効性である。我々は事故要因や事故類型のマクロな分析を通して、認知・判断・操作に関する支援といったコンセプト、および7つの基本ユーザサービスの選定を行ってきた。今回の実証実験では、多くの被験者が実際にサービス提供を受けた場合の運転挙動（反応遅れ時間の改善、減速・制動挙動の改善等）とサービス提供がない場合の運転挙動を比較することにより、我々の想定したサービスが事故回避において有効であるかの検証を行う。

3. 3. 4. サービス受容性の検証

4 番目の検証項目はサービス受容性である。今回の実証実験では、サービスの提供タイミングや頻度を変化させた場合にドライバーのサービスへの受容性に対するアンケートを行っている。車線逸脱防止支援サービスに関する検証を図11に例示する。車線の中央からの横ズレが少しでも生じたらドライバーに警告するような設定を行えば、より安全なシステムにすることが可能である。しかし、過度な頻度の警報はドライバーに受けがたいサービスであることが推察できる。実証実験におけるドライバーの挙動データおよびアンケート結果に基づいて、安全性と受容性を兼ね備えた設定値を検証する。

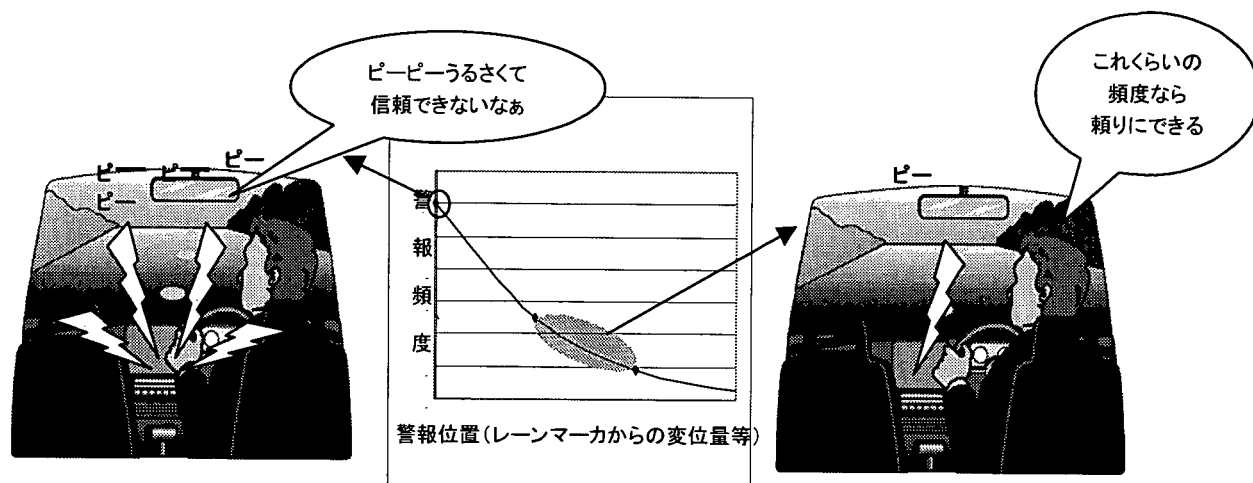


図11 サービス受容性の検証

3. 4. ドライビングシミュレータを用いた検証

システムの有効性を評価するためには、高速走行時やぎりぎりのタイミングによる情報提供など、危険な状態での検証が必要である。しかし、そのような危険な状態を実際の車両を用いて検証を行うのは極めて困難である。そこで、危険を伴う走行時の検証に関しては、ドライビングシミュレータを使って実験を行う。実験風景を図12に示す。ドライビングシミュレータは日本自動車研究所にあるドライビングシミュレータを走行支援システムのサービスが提供されるようソフトウェアの改良と車載表示器の追加を行ったものを使用する。前方のCG画面には土木研究所のテストコースが再現され、当所のテストコースで行われた実験との比較が可能となっている。

3. 5. 公開デモ

平成12年11月28日(火)～12月1日(金)の4日間、土木研究所、(財)日本自動車研究所、ならびに、つくば国際会議場において走行支援システムの公開実験「スマートクルーズ21 Demo2000」が開催された。これは実証実験で得られた成果を、実際に参加者に体験乗車してもらうことにより、サービスの受容性などを評価することを目的として実施されたものである。期間中に延べ2200人が体験乗車を行った。

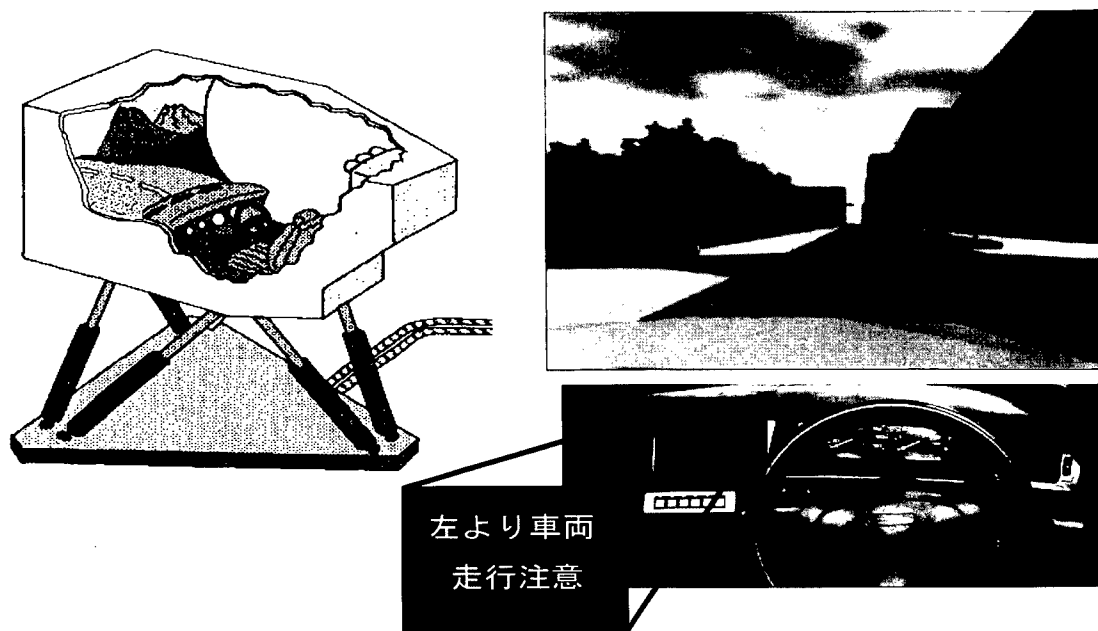


図12 ドライビングシミュレータ

(左上：ドライビングシミュレータの外観 右上：前方スクリーン画像 右下：コクピット風景)

4. 実証実験の次の展開

前章までに走行支援システムの概要、および今年度行われた実証実験の内容に関して紹介した。本章では実証実験の次の展開として、走行支援システムの導入にあたって今後行うべきこと、および導入の基本的考え方に関して述べる。

4. 1. 実用リクワイアメントの策定

走行支援システムは機能要件・性能要件をとりまとめたリクワイアメントを基にシステム設計を行っている。そして今年度、走行支援システムの開発・導入シナリオ（進化のシナリオ）を記載した文書として、実用のためのリクワイアメントのとりまとめを行っている。実用リクワイアメントの骨子は以下の通りである。

（走行支援システムが必要とされる背景）

まず、走行支援システムが必要とされる背景を説明する。交通事故削減に対する走行支援システムの有効性、および走行支援システムにより実現可能となる道路管理等のサービスに対するニーズ等の内容が含まれる。

（実用リクワイアメント策定の基本方針）

次に実用リクワイアメント策定の基本方針が説明される。実用リクワイアメントの定義、基本的な考え方、また、実用化にあたって考慮すべき視点等に関する内容が本章に含まれる。

（走行支援サービスの具体化）

ここでは進化のシナリオに関する説明が記述される。自動車技術や要素技術開発の進

展を考慮しながら、システム導入期間すなわち2003～2007年の展開シナリオ、および2008年以降の本格サービス開始期間に関する展開シナリオがこの章に含まれる。

(走行支援サービスの具体化)

次に、走行支援サービスの具体化に関する説明が記述される。走行支援サービスの定義、内容および要件、AHS施設を活用した応用サービスの要件に関する内容が含まれる。

(システム構築のための要件)

最後にシステム構築のための要件に関する記述が行われる。システム構築の考え方、路車分担の考え方、安全性・信頼性の考え方が、本章で述べられる。

4. 2. 進化のシナリオ

この項では、実用リクワイアメントに記述される項目の中から、特に実用化のシナリオに焦点を当てて説明する。

走行支援システムは3つのステージに分けて段階的に実用化がなされるものとする。まず最初は普及促進の段階、すなわち利用可能エリアの拡大の段階である。この段階においてはまず、走行支援サービスが社会的に認知されることが重要な目標となる。次に、フルサービスの開始の段階に入る。この段階においてはサービスレベル向上が行われていくものとする。そして最後に充実したサービスの享受の段階に入る。走行支援サービスは熟度を増しており、さらに次世代サービスの検討が始まる段階であると考えられる。

図13に実用化までのシナリオを示す。まず、第1ステージが2003年から2007年に相当する。そのうち前半の2005年までがインフラ整備期にあたる。このころの走行支援システムはインフラ単独型、即ち情報板を用いたサービスと車両自律型のシステムが並行して導入されることとなる。続いて第1ステージの後半、すなわち2005年から2007年にかけて、路車協調システム構築され、サービスが開始される。このころの走行支援システムではスポット通信を利用した情報サービスがなされ、インフラ単独のシステムと車両自律型のシステムとが融合し、路車協調システムへと段階的に進化して行く。次の2015年までが第2ステージ、すなわちフルサービスの走行支援システムの運用およびシステムの改善がなされる段階である。双方向連続通信を用いた個別車両ごとのサービス提供を目指す。そして2015年以降は第3ステージ、すなわち充実したサービスの享受及び次世代サービスの検討が行われる時期へと進んで行く。

4. 2. 1. 進化のシナリオ (第1ステージ)

次に各ステージにおいて、サービス提供内容およびシステム整備がどの程度進むのかを詳細に記す。第1ステージにおいては、まず、情報板を使ったサービスが実施される。サービスは情報提供のみである。また、スポット通信を用いた初期サービスが実施される。これもサービスは情報提供、いわゆるAHS-Iのみのサービスである。通信方式に関してはVICS/ETCおよび走行支援システムの統合型を用いる。インフラ整備としては、自専

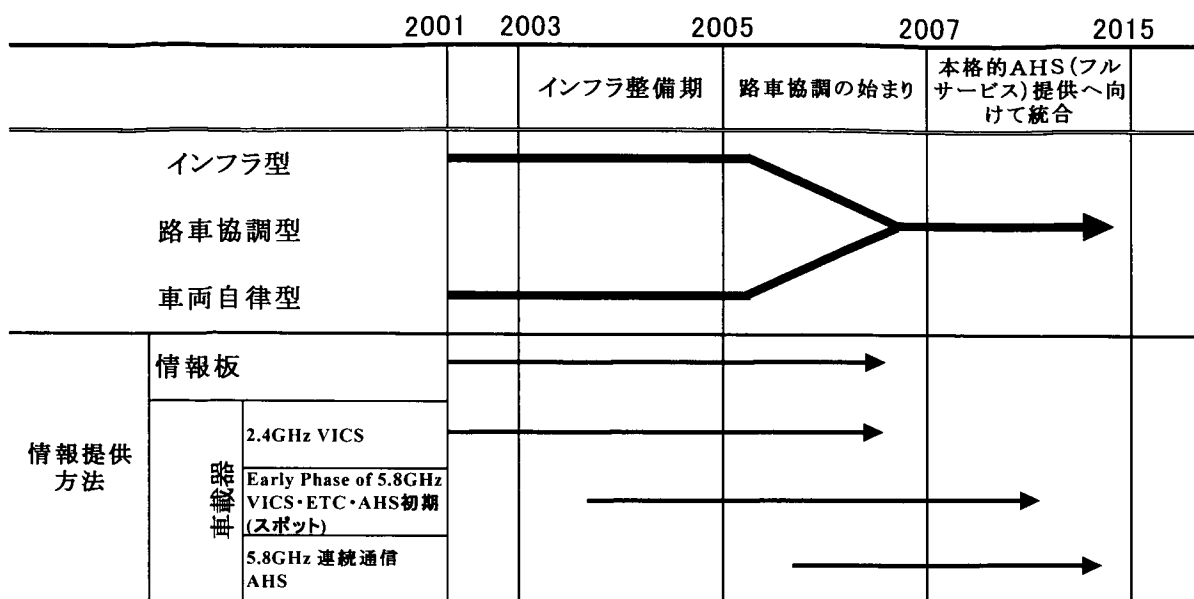


図 13 進化のシナリオ

道へのレーンマーカ整備が行われる。また、新交通システムや物流サービスといった特殊路線へのレーンマーカ配備も検討されている。利用者すなわちドライバーの視点で考えた場合、第1ステージにおいては、まず走行支援サービスを認知してもらい、サービス提供に対して慣れることが必要となってくる。サービスは既存車両でも享受できるように、インフラ型（情報板）および汎用車載器すなわちカーナビで提供が可能となるシステムから導入されることになると思う。

4. 2. 2. 進化のシナリオ（第2ステージ）

第2ステージではフルサービスの走行支援システムの運用およびシステムの改善がなされる段階である。提供されるサービスは情報提供および警報である。また、一部の用途においては操作支援まで含めたサービスの実施が検討されている。すなわちAHS-cのレベルに達するものである。そしてこの頃には、主要高速道路へのレーンマーカの敷設を完了させる計画である。これらサービスの充実によって、ドライバーからの快適性・利便性向上のサービス（レーンキープ等）への期待が高まるものと思う。

4. 2. 3. 進化のシナリオ（第3ステージ）

第3ステージでは情報提供、警報に操作支援を加えたフルサービスが開始されており、充実したサービスの享受および次世代サービスの検討がなされる。また、次世代サービスが部分的に開始される。例えば、駐車場や空港など特定地区での自動運転の実用化が検討されている。

5. 結びに

走行支援システムのインフラシステムは、国土交通省が推進しているスマートウェイインフラの中核をなすものである。すなわち、走行支援システムのために整備されるインフラは、単に走行支援を実現するだけでなく、様々なアプリケーションを実現するための共通的なインフラ、すなわちITS実現に不可欠なプラットフォームとして整備されるのである。したがって、走行支援システムの道路インフラは他のサービスとの互換性や拡張性に配慮して整備していくことが必要である。そのため、技術研究開発と並行して導入効果の明確化、実用化に必要な制度・基準類の検討、インフラの整備やシステム機能の拡張等に関する展開計画の策定、国際標準化や国際交流の推進に積極的に取り組んでいくことが重要であると考えらる。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所：走行支援システムインフラリクワイアメント（第1次）
- 2) （財）交通事故分析センター：交通統計（平成11年版）
- 3) 国際道路交通事故データベース（IRTAD）（1995年）
- 4) Masafumi Mori：Advanced Cruise-Assist Highway Systems, The 7th ITS World Congress,2000.
- 5) Yasushi Tanaka：Summary of the Proving Tests for the Advanced Cruise-Assist Highway System (Smart Cruise 21) and Evaluation Plan, The 7th ITS World Congress,2000.