

ISSN 1346-7328

国総研資料 第267号

平成17年12月

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.267

December 2005

平成17年度 国土技術政策総合研究所講演会講演集

Report of the Lecture Meeting of NILIM(2005)

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Japan

平成17年度 国土技術政策総合研究所講演会講演集

Report of the Lecture Meeting of NILIM(2005)

概要

本資料は、「平成17年度国土技術政策総合研究所講演会」の講演内容をまとめたものである。

キーワード : 講演会、国土技術政策総合研究所、公共投資、環境再生、持続可能な社会、ライフサイクルコスト、空港整備、ITS

Synopsis

This report summarizes the Lecture Meeting of NILIM held in 2005.

Key Words : Lecture Meeting, NILIM, Public Investment, Environmental Restoration, Sustainable Society, Life Cycle Cost, Airport Development, ITS

目 次

◇プログラム	1
--------------	---

◇講 演 集

公共投資を考える視点	7
研究総務官 兼 総合技術政策研究センター長 西川 和廣	

水物質循環の健全化を軸にした環境再生	25
環境研究部長 福田 晴耕	

建築物のライフサイクルを通じたCO ₂ 及び廃棄物排出の低減に向けた取り組み ..	45
住宅研究部長 西山 功	

ライフサイクルコストを考慮した港湾構造物の信頼性設計	65
港湾施設研究室長 長尾 毅	

我が国の空港整備とその経済効果	81
空港研究部長 大根田秀明	

セカンドステージITSのめざすもの	99
高度情報化研究センター長 山田 晴利	



平成17年度 国土技術政策 総合研究所 講演会

平成17年12月8日(木) 10:00開演(9:30開場)

イイノホール(東京都千代田区内幸町2-1-1)

<主 催> 国土交通省 国土技術政策総合研究所(国総研)

<協 賛> 国土技術研究協議会

プログラム

10:00 ～ 10:10	開会挨拶	所長	望月 常好
10:10 ～ 11:10	特別講演Ⅰ 脳科学の最前線ー創造性とコミュニケーション	ソニーコンピュータサイエンス研究所シニアリサーチャー	茂木健一郎
11:10 ～ 11:20	休 憩		
11:20 ～ 11:50	公共投資を考える視点	研究総務官 兼 総合技術政策研究センター長	西川 和廣
11:50 ～ 13:00	休 憩		
13:00 ～ 13:30	水物質循環の健全化を軸にした環境再生	環境研究部長	福田 晴耕
13:30 ～ 14:00	建築物のライフサイクルを通じた C O ₂ 及び廃棄物排出の低減に向けた取り組み	住宅研究部長	西山 功
14:00 ～ 14:30	ライフサイクルコストを考慮した港湾構造物の信頼性設計	港湾施設研究室長	長尾 毅
14:30 ～ 14:40	休 憩		
14:40 ～ 15:10	我が国の空港整備とその経済効果	空港研究部長	大根田秀明
15:10 ～ 15:40	セカンドステージ I T S のめざすもの	高度情報化研究センター長	山田 晴利
15:40 ～ 15:50	休 憩		
15:50 ～ 16:50	特別講演Ⅱ 地球温暖化＝大災害時代の仕事	ノンフィクション作家	山根 一真
16:50 ～ 16:55	閉会挨拶	副所長	広瀬 宗一



脳科学の最前線 ー創造性とコミュニケーション ソニーコンピュータサイエンス研究所

シニアリサーチャー 茂木 健一郎 もぎ けんいちろう

プロフィール 1962年10月20日東京生まれ。脳科学者。東京工業大学大学院客員助教授（脳科学、認知科学）、東京芸術大学非常勤講師（美術解剖学）。その他、東京大学、大阪大学、早稲田大学、聖心女子大学などの非常勤講師もつとめる。東京大学理学部、法学部卒業後、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻課程修了。理学博士。理化学研究所、ケンブリッジ大学を経て現職。
専門は脳科学、認知科学。「クオリア」（感覚の持つ質感）をキーワードとして脳と心の関係を研究するとともに、文芸評論、美術評論にも取り組んでいる。出井伸之氏の提唱するソニーのQUALIAプロジェクト・コンセプトとしての活動も行っている。『脳と仮想』で、第四回小林秀雄賞を受賞。

主 な 著 書 『脳とクオリア』（日経サイエンス社）、『生きて死ぬ私』（徳間書店）『心を生みだす脳のシステム』（NHK 出版）、『意識とはなにか--＜私＞を生成する脳』（ちくま新書）、『脳内現象』（NHK 出版）、『脳と仮想』（新潮社）、『脳と創造性』（PHP 研究所）、『スルメを見てイカがわかるか！』（角川書店、養老孟司氏との共著）、『脳の中の小さな神々』（柏書房、歌田明宏氏との共著）、『「脳」整理法』（ちくま新書）、The Future of Learning（共著）、Understanding Representation（共著）他多数。



地球温暖化＝大災害時代の仕事

ノンフィクション作家 やまね かずま 山根 一眞

プロフィール 1947年東京生まれ。獨協大学外国語学部卒業。日本のモノづくりの底力を解き明かす「メタルカラーの時代」は連載1000回を目指し継続中。環境問題でも精力的な仕事を続け、その原点がアマゾン。ニホンオオカミやイリオモテヤマネコなど野生動物から文明を見直す取材活動では、その新しい視点が注目されている。1990年からNHK テレビ外部キャスターとして「ミッドナイトジャーナル」を3年間担当。1996年からは4年間「未来派宣言」もこなした。

独立行政法人宇宙航空研究開発機構嘱託、宇宙開発委員会特別委員（文部科学省）、NEDO 省エネルギー技術審議委員会委員、2005年日本国際博覧会「愛知県パビリオン」プロデューサー。日本文芸家協会会員。

主 な 著 書 『メタルカラーの時代』、『モバイル書斎の遊技術』、『山根一眞の素朴な疑問』他多数。近著に『環業革命』（講談社）。



公共投資を考える視点

研究総務官
兼 総合技術政策研究センター長

西川 和廣

公共投資プロジェクトチームでは、首都東京圏の社会資本整備に関するデータを取りまとめた「東京圏における社会資本の効用」を作成し、ホームページ上に公表した。様々な社会資本の整備水準の推移と、それによる国民生活や経済活動の変化を概観することで、公共投資を考える上での新たな視点を見出すことを意図したものである。講演では、資料の概略を紹介するが、戦後東京圏を中心に集中的に行われてきた公共投資が、いわゆる一局集中による負の部分を伴っていたとはいえ、ドル圏、ユーロ圏と並ぶ世界経済における3極の一角を占める都市圏の成立という奇跡的な結果をもたらしたことなど、これまであまり議論されてこなかった視点を提示したい。



水物質循環の健全化を軸にした環境再生

環境研究部長

福田 晴耕

様々な人間活動が引き起こす流域水物質循環システムの変質は、水環境の悪化、生物多様性の低下等となって現れる。これに対応するため様々な政策や事業が実施され、効果を上げてきているが、閉鎖性水域については未だ根本的な解決に至っていないケースが少なくない。流域から閉鎖性水域や沿岸海域にわたる水と物質の流れの健全化を図ることは、様々なスケールを持つシステムが階層的に存在する地域の環境再生を統合的に図っていくという難題に対する突破口になると期待される。本講演では、広域的な水物質循環の健全化を支えるための研究開発の現状とその成果の実践へのつながりを霞ヶ浦流域と東京湾流域を対象とした検討事例を紹介しつつ、地域の水環境再生の今後の展開を俯瞰する。



建築物のライフサイクルを通じたCO₂及び廃棄物排出の低減に向けた取り組み

住宅研究部長

西山 功

総合技術開発プロジェクト「持続可能な社会構築を目指した建築性能評価・対策技術の開発（SB総プロ）」においては、建築物の建設、運用、改修、そして除却までのライフサイクルを通じた二酸化炭素（CO₂）及び廃棄物排出負荷の低減に向けた検討に取り組んでいる。

講演では、まず、環境問題としての建築由来のCO₂排出及び廃棄物排出を取り上げ、現状分析を行った後、その削減に向けた政策や既往の技術開発等について解説を行う。その上で、SB総プロとこれら先行する各種の活動との関係を整理し、総プロの位置づけを明らかとするとともに、その技術開発の内容について解説を行う。



ライフサイクルコストを考慮した港湾構造物の信頼性設計

港湾施設研究室長

長尾 毅

構造物の設計法への信頼性設計法の導入が期待されている。信頼性設計法の適用においては、目標安全性水準をどのように定めるかが重要である。その際の最も有力な方法のひとつは、過去の設計法における平均的な安全性水準に一致させる方法であるが、この他の方法として、ライフサイクルコストが最小となる安全性水準を目標水準とする考え方がある。

ここで、標準的な設計法と考えられる部分係数法（レベル1信頼性設計法）においては、破壊確率の算出を行わないために、ライフサイクルコストの検討を行うことが出来ない。しかしながら、あらかじめ構造形式や設計条件ごとに目標とする安全性水準を定めることが出来れば、レベル1信頼性設計法によってもライフサイクルコストを考慮した合理的かつ経済的な設計を行うことが可能となると考えられる。このための基礎的な研究を行った結果を報告する。



我が国の空港整備とその経済効果

空港研究部長

大根田 秀明

空港の新規整備などにおいては、航空機騒音の迷惑施設であるが故に、その航空需要と必要性はもとより、プロジェクトの事業効果として、地域経済への波及効果の評価が重要な課題のひとつとなる。しかし、現在のところ、具体的な計測方法はまだ確立されていない。講演では、まず、我が国の空港整備の経緯と現状について概括するとともに、単純な仮定の下に、空港整備が地域に及ぼす経済波及効果を産業連関分析により計測するモデルシステムと計測結果をまとめる。さらに、より精緻な分析が可能になる応用一般均衡モデルを使って、空港整備が各事業分野へ及ぼす経済波及効果を分析する。これらの結果より、空港整備の経済効果が地域的にも、産業分野的にも広い範囲に及ぶことを報告する。



セカンドステージITSのめざすもの

高度情報化研究センター長

山田 晴利

近年の ITS の進展にはまことにめざましいものがある。カーナビゲーションシステム、VICS、ETC の普及台数は大きく伸び、これによって料金所における渋滞はほぼ解消するに到った。こうしたことから ITS の効果が実感されるようになり、わが国では ITS がセカンドステージに入ったと認識されている。セカンドステージにおける ITS では、2007 年までに「あらゆるゲートのスムーズな通過」「場所やニーズに応じた地域ガイド」「タイムリーな走行支援情報の提供」の三つのサービスを利用できるようにするという目標が掲げられている。本講演では、これらの目標とそれを実現するための活動について述べる。

公共投資を考える視点

公共投資プロジェクトチーム

研 究 総 務 官
兼 総合技術政策研究センター長
西 川 和 廣

建設経済研究室主任研究官
鈴 木 学

公共投資を考える視点

国土技術総合政策研究所

公共投資プロジェクトチーム

研究総務官 兼 総合技術政策研究センター長

西川 和廣

建設経済研究室 主任研究官

鈴木 学

1. はじめに

公共投資プロジェクトチームでは、これまで「公共投資の規模」について海外との比較から考察をしてきたが、今年度は視点を変え、首都東京圏の社会資本整備に関するデータ集を取りまとめて、「東京圏における社会資本の効用」を作成し、ホームページ上に公表したところである。本データ集をとりまとめた意図は、社会資本の集積が進んだ東京圏を対象を絞り、様々な視点から考察することで見えてくる、社会資本整備の推移とそれによる経済活動や市民生活等の移り変わりを探ることにあり、あえて特別な色づけはしていない。今後の研究材料として供するとともに、自らも活用して行きたいと考えている。

講演では、まず「東京圏における社会資本の効用」をもとに、これまで重点的・集中的に投資が行われてきた東京圏において、社会資本が果たしてきた効用を様々な観点から振り返る。同時に、東京圏への急速な集中投資・重点整備がもたらしてきた弊害などの影響についても取り上げ、そこから得たものについても言及する。さらに、大きく視点を変えることで「東京圏における社会資本の効用」を通して見えてくる、過去・現在・未来の社会資本整備の効用、あるべき姿などについて想像を廻らせてみたい。

2. 社会資本整備が果たしてきた効用

社会資本の整備が果たしてきた役割には様々な面で捉えることが出来る。ここでは、「生活の多様化」、「安全」、「生活環境」、「経済活力」の側面から、社会資本の効用を捉えることとする。

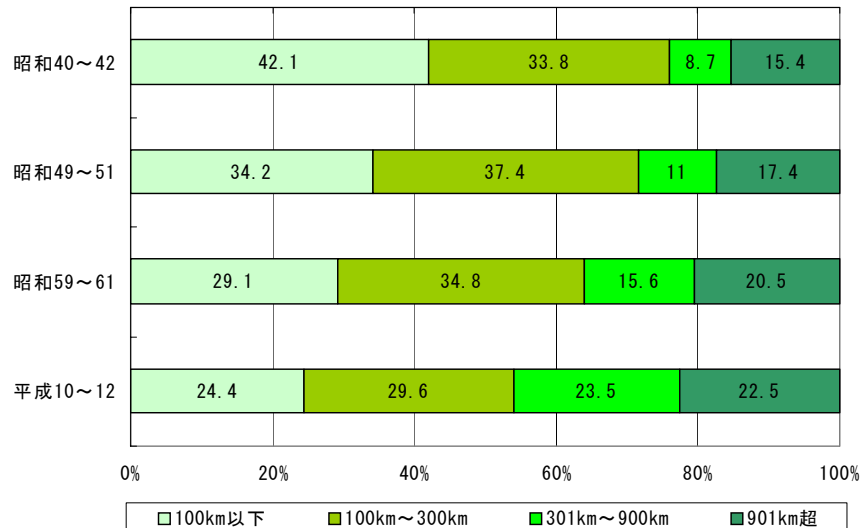
2. 1 生活の多様化

2. 1. 1 豊かな食生活

全国の道路網の整備に伴い、より遠隔地から、鮮度や質、価格の面で優れた物品等が東京に安定的に供給され、より豊かな食生活を楽しむことが可能となってきた。東京都中央卸売市場の野菜入荷高（金額）における東京からの距離帯別シェアは、年々遠隔地からの入荷の比率が高まってきている。

また、同じ産品の出荷を比較しても、道路網の整備に伴い、産地が広域化してきており安定的な供給が可能となっている。

このように、消費者から見れば南北に延びた日本列島の季節のずれを食生活の豊かさにつなげることが出来、生産者から見れば、東京圏という大きな市場を広い地域に提供したことになる。



注1：100km以下（千葉、埼玉、東京、神奈川）101km～300km（福島、茨城、栃木、群馬、山梨、静岡、長野）901km超（北海道、山口、愛媛、高知、九州7県）301km～900km（その他の府県）
 注2：沖縄県及び外国からの入荷高を除く

図 2-1 東京中央卸売市場の野菜出荷額（金額）における東京からの距離帯別シェアの推移

資料：高速道路便覧より作成

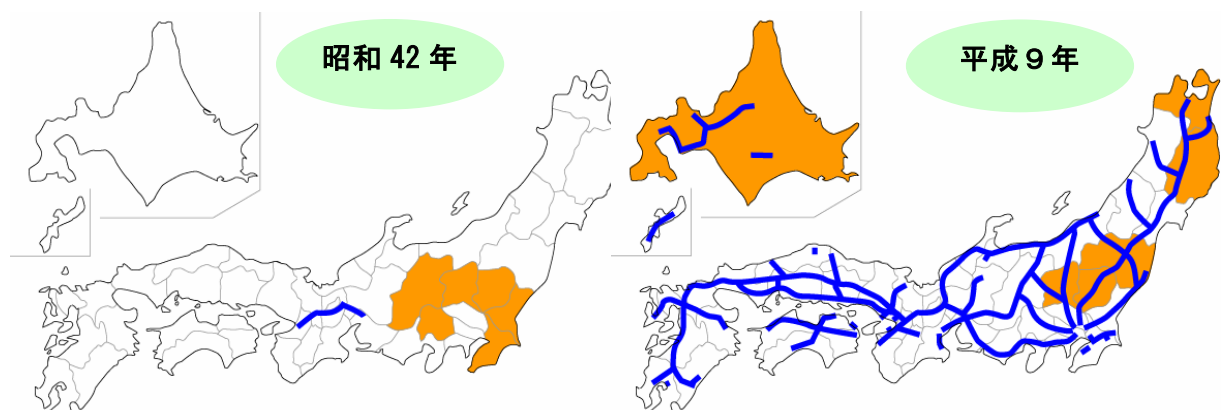


図 2-2 東京における大根の上位出荷県

資料：東京中央卸売市場年報、国土交通省道路局HPより国総研作成

2. 1. 2 活動範囲の広域化

東京圏と各地の旅客移動については、社会資本整備の進展に従ってその手段が変化してきたが、現在、近距離であれば自動車、中距離では鉄道、長距離では主に航空が利用され、図のような分担比率となっている。新幹線の整備のされていない地域（山陰、四国、北海道、九州）への移動については航空がより利用される傾向にある。空港の整備により、人の活動範囲はより広域化・活発化されてきており、増加する航空サービスの需要に応えるためには、それに見合う空港施設容量の整備が必要であり、過去数次にわたる滑走路やターミナル施設、そしてアクセス道路、鉄道の整備により対応してきた。

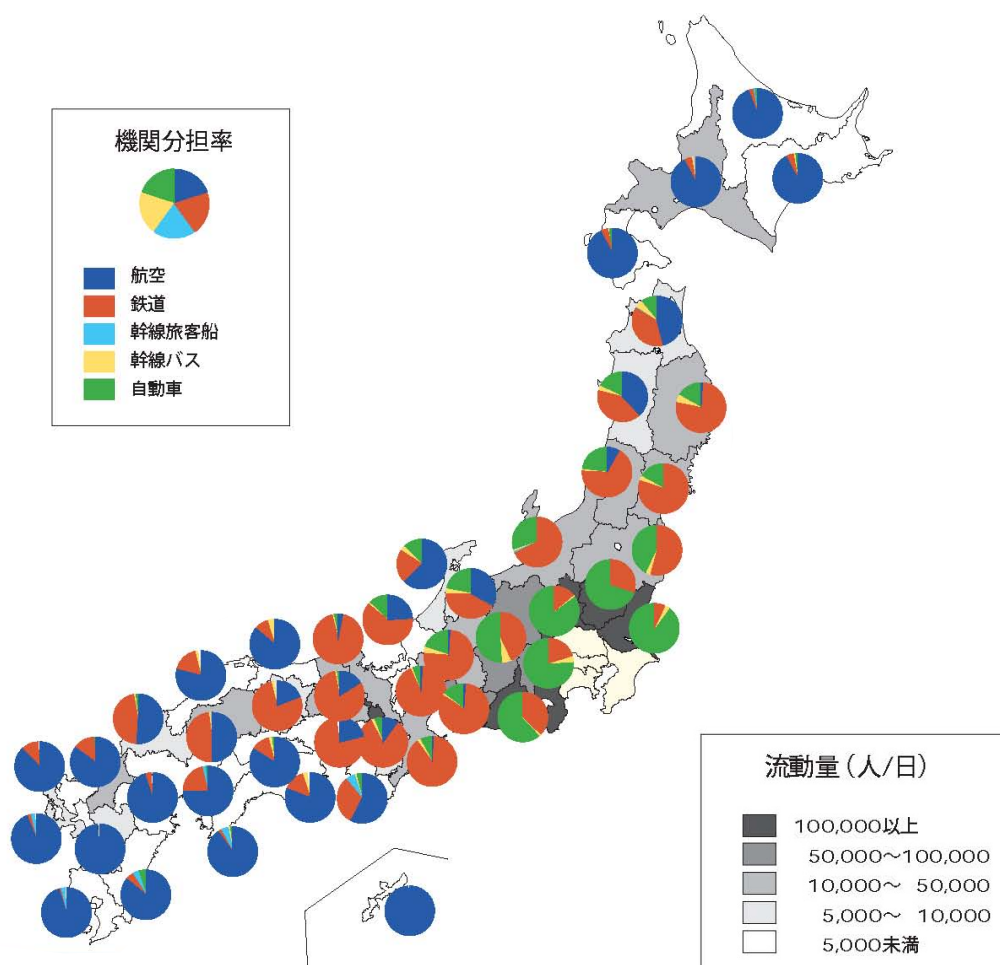


図 2-3 首都圏と各道府県間の流動における交通機関分担率（平成 12 年(2000 年)秋期 1 日（平日））
出典：国土交通省「第 3 回 平成 12 年(2000 年)調査 幹線旅客流動の実態」H15.(2003).3」 p17

2. 2 安全

2. 2. 1 洪水対策

局地的な集中豪雨の頻繁傾向や地下街、地下鉄等の浸水被害に対する脆弱性等の課題は依然残っているものの、河川や下水道による排水や一時的に溢れた雨水を貯留する施設等の整備により、東京都区部での浸水による被害は減少している。

最近の事例では、100mm/h を超える記録的な時間降雨量となった今年の 9 月 4 日の豪雨の際には、中野区、杉並区で浸水被害が発生したが、工事中で供用開始直前であった第Ⅱ期への貯留についても柔軟に対応したことにより、浸水被害が大幅に軽減されている。もし、これらの施設がなければより広域的に浸水しかつ水深も深くなるなどより大規模な被害が発生したのではないかと考えられる。

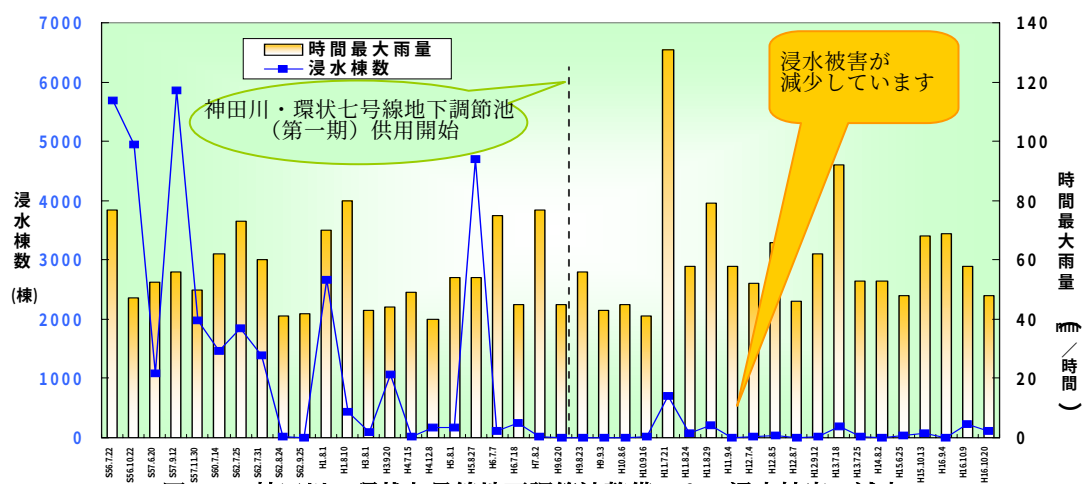


図 2-4 神田川・環状七号線地下調節池整備による浸水被害の減少
資料：東京都建設局資料より国総研作成

2. 2. 2 高潮対策

東京の都市臨海部や低平地は、満潮面以下のエリアが多く、124km²（23 区の面積の約 20%に相当）もあり、常に高潮による被害の受けやすい地域となっている。この地域には、多くの人口、産業、都市機能が集積しており、過去にはたびたび高潮による浸水被害を受けてきた。キティ台風による高潮被害は、死者 122 名、浸水戸数 14 万戸という甚大な被害を受けている。その後、河川や海岸の防潮堤、水紋、排水機場の整備を進めて来たため、キティ台風とほぼ同規模の平成 13 年台風 15 号の時には、高潮による被害は未然に防ぐことが出来るなど、確実に安全性は増してきている。

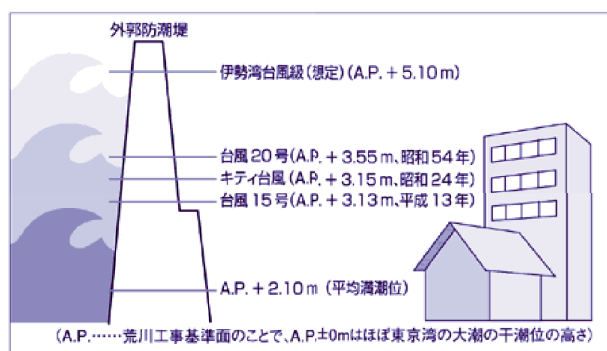


図 2-5 東京湾における過去の高潮

出典：「Web 広報東京都 平成 16 年 2 月号」東京都

表 2-1 被害状況の比較

	キティ台風 (昭和 24 年)	台風 15 号 (平成 13 年)	
	被害記録	被害想定	実際の被害
浸水面積	約 92km ²	約 174km ²	0
被災人口	—	約 260 万人	0
被害家屋	約 14 万戸	約 110 万戸	0
影響を受ける 地下鉄路線	—	9 路線	0
被害額	—	約 40 兆円	0

資料：キティ台風被害 東京都建設局 過去の水害記録
被害想定 東京都建設局試算結果

2. 2. 3 安定的な水供給

東京都の水道は、昭和 30 年代までは、主に多摩川から取水していたが、東京への人口集中と社会経済活動の活発化に伴い、水需要が急激に増加し、昭和 30 年代後半には深刻な渇水が度々発生するようになった。群馬県、栃木県、埼玉県において利根川・荒川水系のダムや貯

この図は、利根川と荒川の水源地域の水供給計画を示しています。主要なダムと取水点、そして完成済みの導水路と計画中の導水路が示されています。

ダム: 矢木沢ダム (S42年度), 奈良俣ダム (H3年度), 草木ダム (S51年度), 下久保ダム (S44年度), 浦山ダム (H10年度), 小河内ダム (S32年度)

取水点: 利根大堰 (S43年), 武蔵水路 (S43年), 小作取水 (S55年), 羽村取水 (M33年), 東村山 (T12・S元年度), 調布取水 (S10年)

導水路: 利根川河口堰 (S46年), 北千葉導水路 (H11年), 常陸川水, 霞ヶ浦導水, 中川, 江戸川

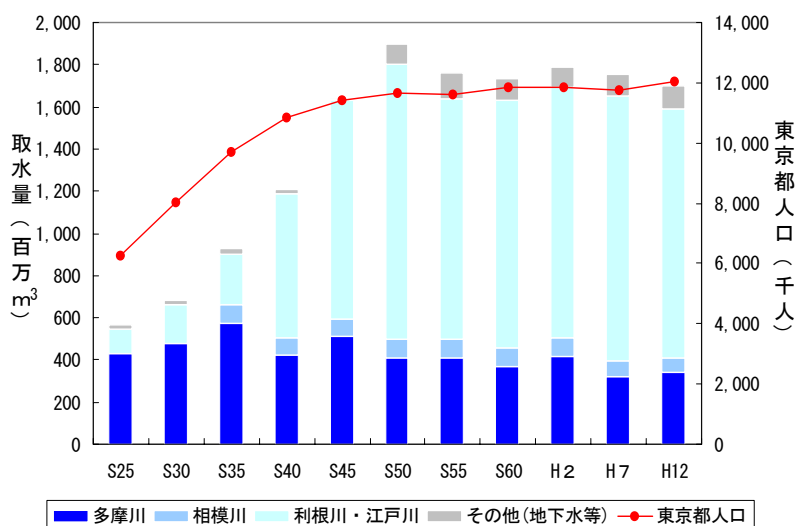
水源地域: おもに多摩川から給水をうけている区域 (黄色), 利根川・多摩川の両方から給水をうけている区域 (薄紫), おもに利根川から給水をうけている区域 (緑)

図例:

- 取水堰 (赤い縦線)
- 浄水場 (オレンジの丸)
- 導水路 (完成) (緑の線)
- 導水路 (工事中又は計画中) (紫の線)
- おもに多摩川から給水をうけている区域 (黄色)
- 利根川・多摩川の両方から給水をうけている区域 (薄紫)
- おもに利根川から給水をうけている区域 (緑)
- ダム (緑の山)

注記: ○○年度(赤字):昭和39年以降完成 ○○○年度(青字):昭和38年度以前完成

資料:東京都水道局 HP より国総研作成



資料：東京統計年鑑より国総研作成

2. 3 生活環境

2. 3. 1 水環境

東京の河川は、都市排水のため汚濁が進んだが、下水道整備の進展や、利根川水系からの浄化用水の導入などにより、水質は改善されてきた。さらに、下水道処理水の有効利用により河川、用水路の流量の回復や水の循環利用が図られている。

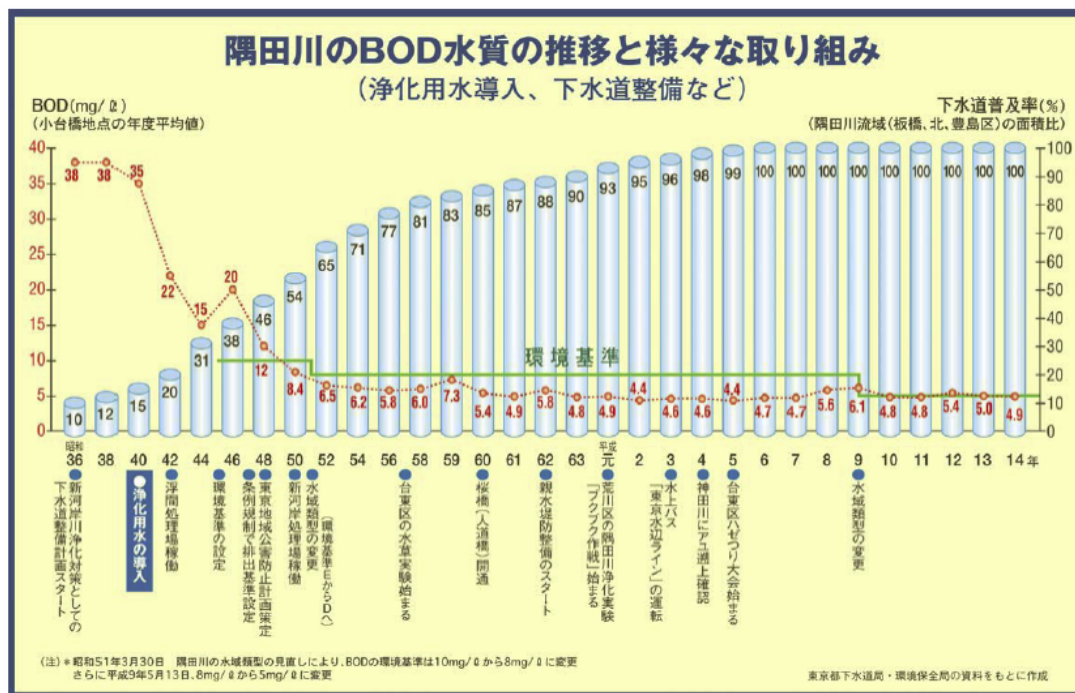


図 2-8 隅田川の BOD 水質の推移と様々な取り組み

出典：国土交通省資料（水資源政策の政策評価に関する検討委員会 資料）

2. 3. 2 空間

水辺空間は都市に潤いをもたらしている。隅田川や荒川、多摩川で様々な環境改善の取り組みがなされている。また、海浜部には、自然と親しめる干潟やそれと一体となった公園等の整備がされている。また、公共建築物や公園、道路等の公共空間とそこに整備された緑は、我が国の首都に相応しい格調ある都市景観を形成するとともに、人々の暮らしに憩いや潤いをもたらしている。

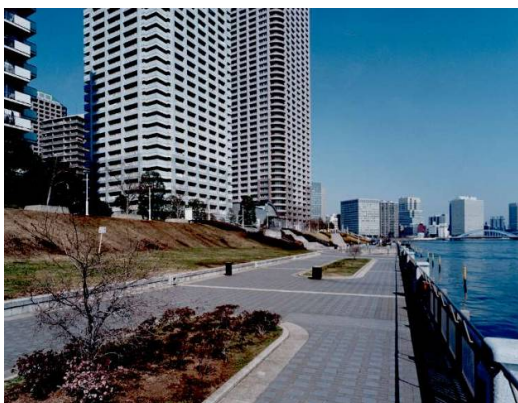


写真 2-1 中央区大川端地区の東側テラス



写真 2-2 神宮外苑

出典：RIVERFRONT Vol.51 (財)リバーフロント整備センター

2. 4 経済活力

2. 4. 1 交通ネットワーク

東京は、その都内総生産が我が国のGDPの17%を占めることからわかるように、我が国の政治、経済、文化の中心地である。多くの人と企業等の各種業務機能が集積し、濃密な社会活動が営まれるための基盤となる各種社会資本の整備には非常に多くの力が注がれ、他地域に比較して、恵まれた初期条件の下で東京の発展はスタートしてきている。

昭和 48 年(1973 年)9 月 (1,000km 供用時)



昭和 42 年(1967 年)



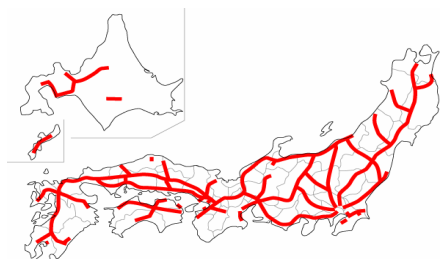
昭和 62(1987 年)年 10 月 (4,000km 供用時)



昭和 60 年(1985 年)



平成 14 年(2002 年)9 月 (7,000km 供用時)



平成 16 年(2004 年)



図 2-9 高速道路ネットワークの展開(時系列)

図 2-10 新幹線ネットワークの展開(時系列)

資料：国土交通省資料より作成

道路は、自動車や、徒歩、自転車など多様な交通需要に対応する交通空間となっている。また、細街路から広域幹線道路に至る各種道路が有機的に連携して構成されるネットワークは、人体に張り巡らされた血管網のように、人やモノの移動、交流を支えている。

近年、東京圏での道路整備は、放射道路の整備から環状道路の整備へと比重を移しつつある。



国内における物流は主として、自動車輸送と海運に担われており、その連携は極めて重要である。

貨物を積載した自動車
をそのままで輸送するフ
ェリー、RORO 船¹、ま
た積み替えが容易なコン
テナを輸送するコンテナ
専用船²の航路が東京湾
諸港から全国に広がって
いる。これらの船舶のた
めの内貿ターミナルの整
備は、スピーディ、シー
ムレスでかつ低廉な国内
物流輸送の実現に大きく
寄与している。

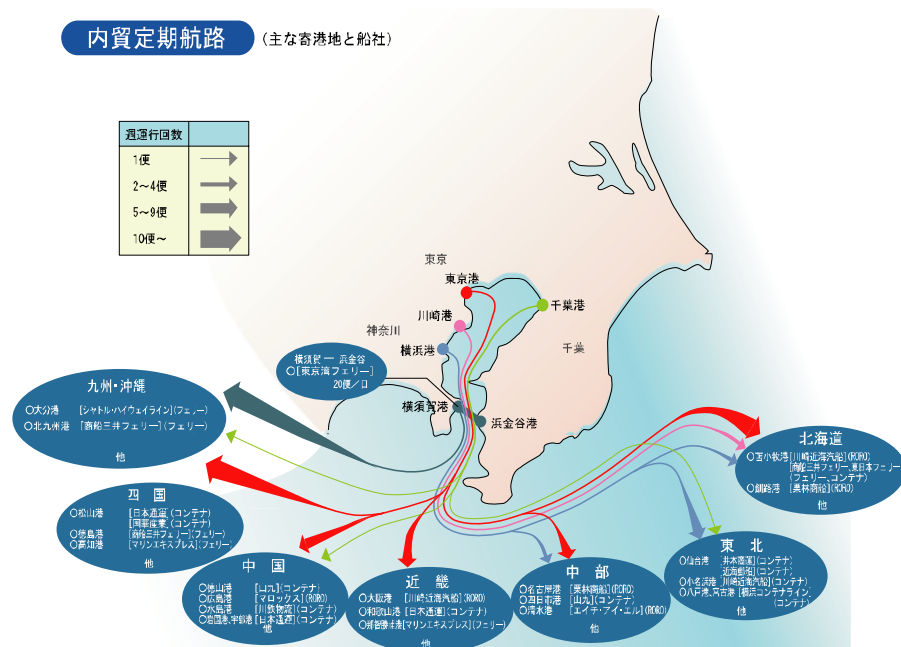


図 2-12 東京湾を中心とした内貿定期航路
資料：首都圏港湾の基本構想・関東地方整備局港湾空港部

¹ 船の前後にある入り口からトラックやトレーラー、フォークリフトによって直接荷物を積みおろしする船で、国内の雑貨輸送に活躍する。背後にトラックやトレーラが駐車できる広い荷捌きスペースが必要となる。

² 国際標準化された鋼製の箱（コンテナ）に積まれた荷物を専門に運ぶ船。港にはガントリークレーン等の輸送・荷役の専用の機械設備が必要となるが、積み替えの機械化、自動化が可能のため、積み替えコストの節減に有利であり、海外との輸出入においては、コンテナ輸送の比重が非常に高くなっている。

3. 急速な集中投資・重点整備がもたらした影の部分

東京圏への集中投資、重点投資により、さまざまな功罪をもたらしている。ここでは、これらによりもたらされた、影の部分についても触れ、それらの克服に向けた技術開発の面にも触れてみたい。

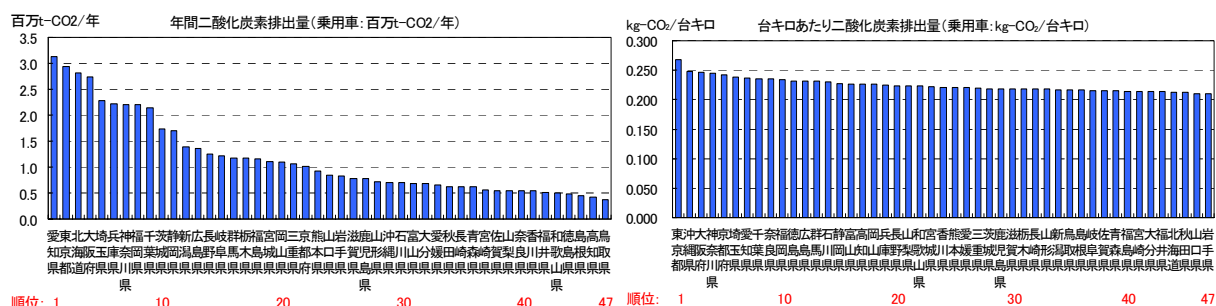
3. 1 環境悪化

3. 1. 1 排出ガス

急速な経済活動の発展と車社会の拡大は、まず大気汚染という形で都民を苦しめることになったが、このことは、1970年代の石油ショックとあいまって省エネ技術、排ガス対策技術の開発を促し、我が国を最もエネルギー効率の良い国の一つに引き上げることになり、光化学スモッグなどの言葉は最近ではあまり聞かれなくなった。但し、大型トラックが集中する都市高速道路と一般道の錯綜する地域などでは、道路構造や道路交通運用の変更を余儀なくされるような状況もまだ残されている。

現在では、地球温暖化は、自然の生態系や人類の生存基盤に深刻な影響を及ぼす重要な世界規模の環境問題であり、我が国においても、異常気象や動植物の生息域の変化等の一因として地球温暖化が指摘されている。このような中、2005年2月16日に京都議定書が発効され、これを受けて現在京都議定書目標達成計画がとりまとめられているところである。同計画には、京都議定書における二酸化炭素排出量の削減目標である1990年比6%削減を確実に達成するために必要な措置が定められている。

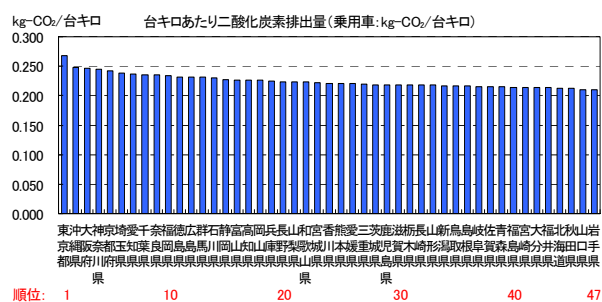
二酸化炭素排出量のうち、運輸部門の占める割合は21%で、その約9割が自動車、さらに自動車のうち、乗用車が約6割を占めている³。自動車の排出ガスは地域的に環境へ大きな負荷を掛けているが、二酸化炭素の排出量削減は地域的を越えて、我が国そして地球規模の課題となっている。特に東京圏を始めとする大都市圏における排出が交通渋滞などの影響もあり多くなっている。



(乗用車: 道路交通センサ調査延長 19 万 km)

図 3-1 都道府県別年間二酸化炭素排出量

出典: 地球温暖化防止のための道路政策会議資料



(乗用車: 道路交通センサ調査延長 19 万 km)

図 3-2 都道府県別走行台 km あたり年間二酸化炭素排出量

出典: 地球温暖化防止のための道路政策会議資料

これらに対し、車両の燃費改善等による対策も進んでいるが、社会資本整備の分野としても、道路網の整備等による交通円滑化対策による、排出ガス削減に取り組んできている。都心部に集中する交通を分散させるのに効果があると言われている首都圏の三環状道路（いずれも自動車専用道路）が平成 11 年時点で完成していたとした場合、渋滞の激しい一

³ 2002 年度推計。国土交通省「地球温暖化防止のための道路政策会議」資料より

般道路から自動車交通が転換し、渋滞が緩和された一般道路を走行する車両の走行台 kmあたりの二酸化炭素排出量も低下し、二酸化炭素の排出量は、年間約2～3百万 t-CO₂削減されると推計されている。



首都圏の台キロあたり CO₂ 排出量（乗用車）
（平成 11 年）

首都圏の台キロあたり CO₂ 排出量（乗用車）
（平成 11 年道路 + 三環状）

注 1) 色は乗用車の台キロ当たりの CO₂ 排出量を示す。
赤線：多い道路 (0.240kg-CO₂/台キロ以上)
青線：少ない道路 (0.240 kg-CO₂/台キロ未満)

注 2) 平成 11 年センサスデータと乗用車の旅行速度別 CO₂ 排出係数を用いて推計した。
注 3) シミュレーションによる推計のため細部には誤差がある。

図 3-3 環状道路による二酸化炭素排出削減効果

出典：国土交通省資料（地球温暖化防止のための道路政策会議資料）

3. 1. 2 ヒートアイランド

東京の年平均気温は、過去 100 年で 2.9℃の上昇がみられ、他の大都市の平均上昇気温 2.4℃、中小規模の都市の平均上昇気温 1℃に比べて大きな上昇となっている。

地球温暖化の影響もあるが、ヒートアイランド現象を含む都市温暖化の傾向が、顕著に現れていると言われている。都市の温暖化は、不快だけでなく、熱帯夜や集中豪雨の増加につながり、健康への悪影響や災害の誘引となることが懸念されている。

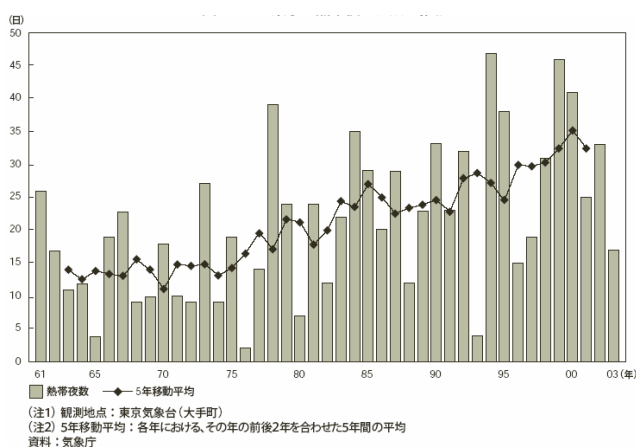
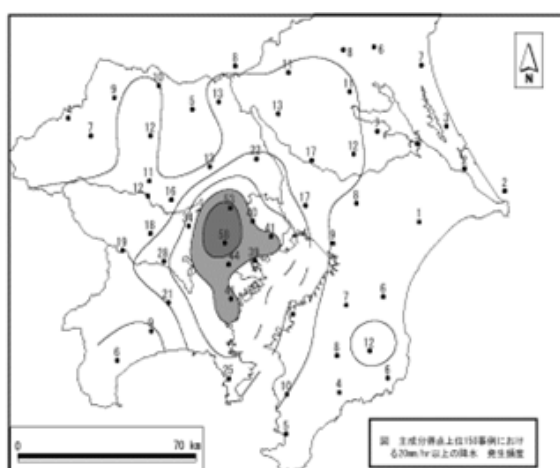


図 3-4 熱帯夜の推移

出典：東京都「平成 15 年度 東京都住宅白書」



資料 永保・三上「首都圏を中心をもつ暖気候期の短時間強雨の特性」

図 3-5 区部西部に偏在する集中豪雨

出典：東京都環境局HP「東京都のヒートアイランド対策」

ヒートアイランド抑制のために、次のような取り組みや技術開発が進められてきている。

- ・人工排熱の抑制対策

一層の省エネルギー対策や自然エネルギー活用の強化、公共交通機関の活用と道路交通の分散

- ・街区、建築物での被覆対策

建物敷地や壁面、屋上の緑化、下水再生水の活用による道路散水、保水(透水)性舗装化、道路緑化

- ・都市レベルでの対策

都市を冷やす機能を持つ場所(大規模な緑地、堀、農地)の拡大街路の緑化、緑地や風の通り道の確保などによってネットワーク化(水路、道路、公園の連続化、風の通り道と建築物の配列の工夫)

3. 1. 3 地下水汲み上げによる地盤沈下

高度経済成長期に人口産業の集積に水供給が追いつかなかったことから、地下水の過度に汲み上げられ、その結果、地点によっては年間 25cm を超える地盤沈下が進行するなど、大きな社会問題となっていた。

その後、昭和 40 年代に利根川の水源開発が進み、水源が地下水から表流水への転換がされたこともあり、現在は地盤沈下の進行は止まっている。

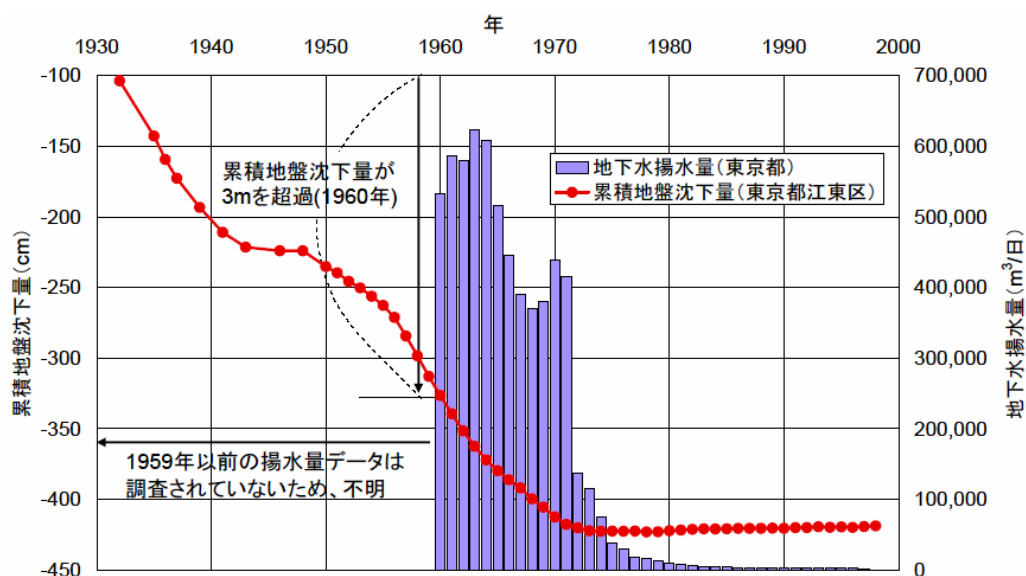


図 3-6 東京都江東区における累積地盤沈下量と東京都における地下水揚水量

出典：国土交通省資料（水資源政策の政策評価に関する検討委員会 資料）

3. 2 過密な交通

都心部(都心 10 区⁴)における昼夜間人口比(昼間人口/夜間人口)は 3.05 にもおよび⁵、職と住の分布がアンバランスとなっている。さらに、「大都市圏交通センサス」(国土交通省)により、都心 3 区⁶への通勤・通学時間の推移は、調査開始以来、平成 7 年(1995 年)の調査時点までは徐々に拡大し、例えば、80 分以上の人の割合は、1980 年の 20.2%から 1995 年には 24.9%にも増加している。都心への通勤者にとって、職住の遠隔化による通勤時間の増大と通勤混雑の激化は大きな負担となっている。

⁴ 千代田区、中央区、港区、新宿区、文京区、台東区、墨田区、江東区、渋谷区、豊島区

⁵ 平成 7 年国勢調査より

⁶ 千代田区、中央区、港区

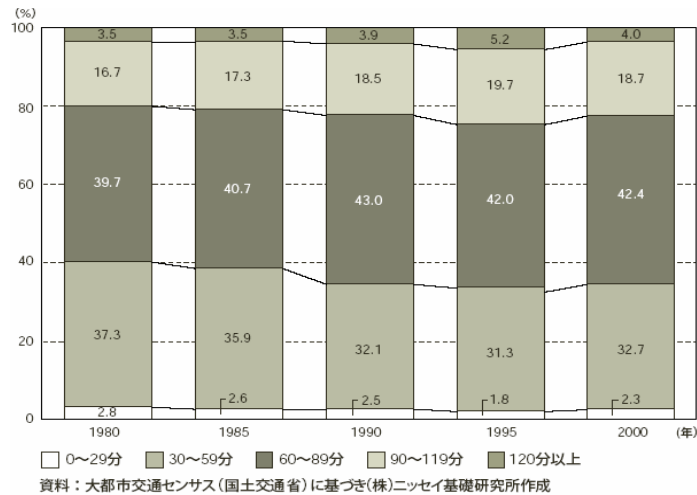


図 3-7 都心 3 区への通勤・通学に要する時間区分別構成比の推移
出典：東京都「平成 15 年度 東京都住宅白書」

●現況（平成 17 年 4 月現在）

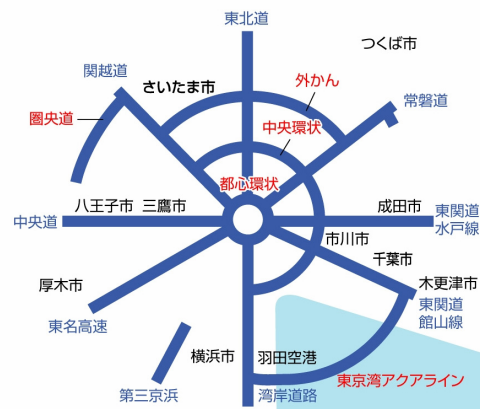
整備状況：放射 9 割、環状 2 割

交通状況：

- ・ 東京都区部境界をまたぐ交通の
約 1 4 %は通過交通
- ・ 首都高速都心環状線の交通の
約 6 割は通過交通
- ・ 圏央道内側の主要渋滞ポイントは
約 6 0 0 箇所

渋滞による損失額

全 国：年間約 12 兆円
首都圏：年間約 2.8 兆円
東京都：年間約 1.2 兆円



●完 成 形

整備予定：放射 10 割、環状 10 割

効果：

- ・ 圏央道内側の主要渋滞ポイントは、概ね解消
- ・ 走行時間の短縮、燃料費の減少等による効果
年間約 4 兆円
- ・ 用地補償費が不動産購入、建築物の新築等に
に使われることによる効果
約 6 兆円

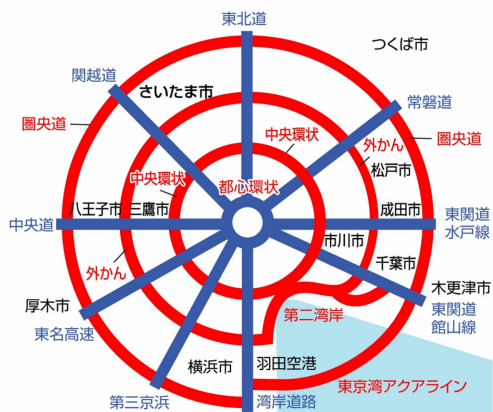


図 3-8 首都圏の環状道路の整備方針と整備効果 出典：国土交通省関東地方整備局資料

また、東京圏は、高密な人口や活発な経済活動を反映した東京の自動車交通の発生密度が著しく高く、また東京圏は、世界の他の大都市圏と比べて環状道路の整備が立ち遅れているため、都市の機能分担が進んでいないことと、都心部に通過交通が入り込みやすいことから、慢性的な交通渋滞が発生し、大きな経済損失が生じている。

これらの解消のため、現在「三環状九放射道路ネットワーク」と呼ばれる道路網の整備が進められているところである。

3. 3 住宅環境

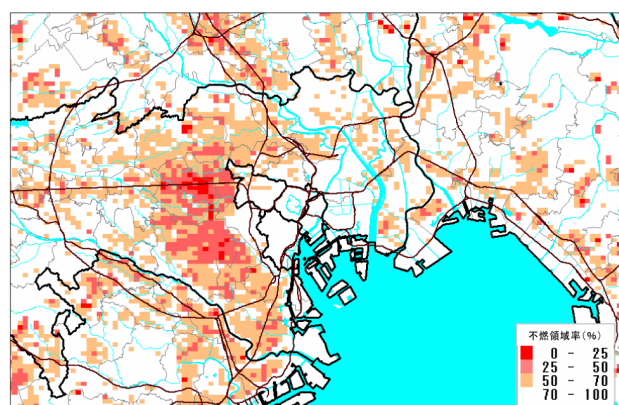
平成 10 年(1998 年)の住宅統計調査によれば、東京都の住宅 1 戸あたりの広さは、全国平均 92.4 m² よりも約 30 m² も狭小な 61.9 m² で、誘導居住水準を満たす世帯の割合はわずか 33.2% と、質的には良好といいがたい住宅ストックの状況である。

都心部の住宅は早くから開発されてきたこともあり、狭小だけでなく、老朽化した住宅が多く存在している。このため、東京圏の暮らしを取り巻く環境は、むしろ地方圏より劣る面が多々存在している。

また、これらに加え、徐々に東京の安全性は高まってきているものの、災害に対する脆弱性が高い地域が残されている。脆弱な市街地とでもいえるべき地区の防災性の向上は大きな課題である。



図 3-9 幅員 4m 以上の道路に接している住宅の割合
出典：東京都「平成 15 年度 東京都住宅白書」



の面積比率を「不燃領域率」とする

空地（道路、公園等）	木造・低層非木造建物の敷地面積
中高層非木造建物の敷地面積	

図 3-10 不燃領域率の分布（都心）

出典:内閣府「首都直下地震対策に関する参考資料」2005.6

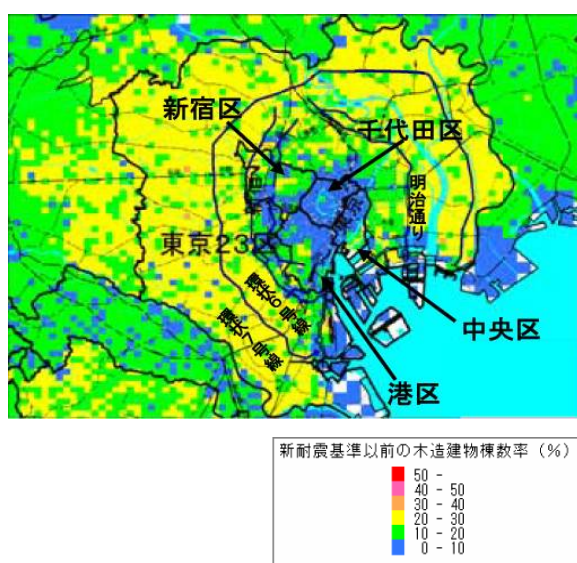


図 3-11 新耐震基準施行以前の木造建物分布率
出典:内閣府「首都直下地震対策に関する参考資料」2005.6

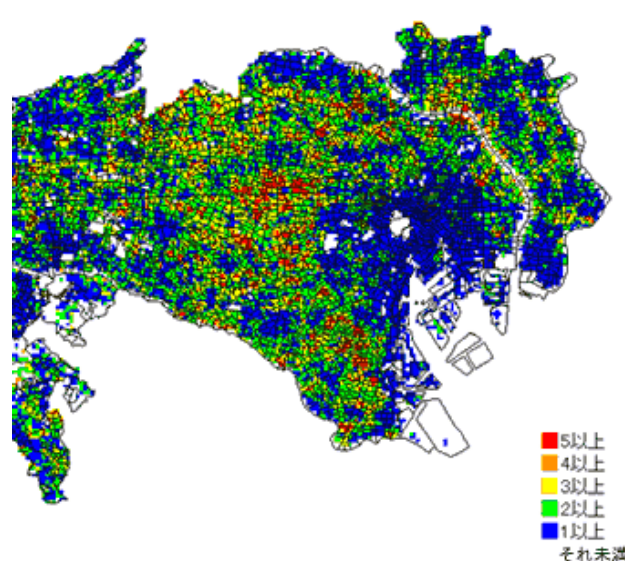


図 3-12 震災時の消火活動困難度

出典：東京消防庁「第 6 回地域別延焼危険度測定」

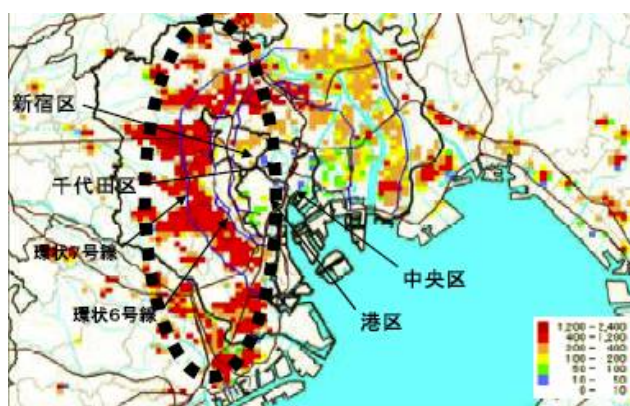


図 3-13 焼失棟数の予測（都心部）

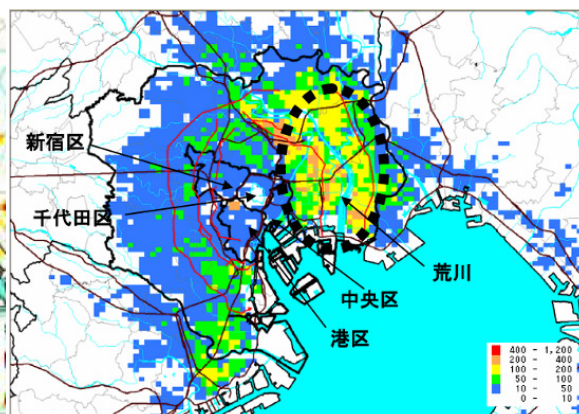


図 3-14 全壊棟数の予測（都心部）

【被災シミュレーションの前提条件】

震源：東京湾北部 マグニチュード 7.3 発生時期・時刻：冬の夕方 18 時

気象条件：風速 15m/s

【被害予測】

建物全壊棟数・火災焼失棟数 約 85 万戸 死者数 約 11,000 人

避難者数 最大約 700 万人 帰宅困難者数 約 650 万人

経済被害 約 112 兆円

資料：中央防災会議

3. 4 進展する老朽化

東京の社会資本は整備が早く、また、昭和 30～40 年代に集中的に整備してきた施設が更新時期を迎え始めており、老朽化（構造的、社会的）が進み、早急な対応が必要となってきた。

下水道を例とすると、東京府は、明治 17～18 年という非常に早い時期より、神田の一部にレンガ積み暗渠の下水道を布設してきた。

これが近代的下水道の始まりである「神田下水」で、110 年余を経た現在も下水道施設として機能しており、東京都文化財にも指定されている。

現在では、23 区内の下水道整備率は 100%、東京都全域でも 98%に達している。しかし、区部における下水道管渠 15,415km のうち、全管理延長の約 13%にあたる約 2,000km が法定耐用年数の 50 年を超え、特に、先行して整備された都心部の管渠では 8 割以上が法定耐用年数を超えている。（平成 14 年度末時点）

このような施設の老朽化は総じて様々な問題の原因となっている。



図 3-15 今も使われている神田下水

出典：東京都下水道局「ニュース東京の下水道」
2005 年 5・6 月号

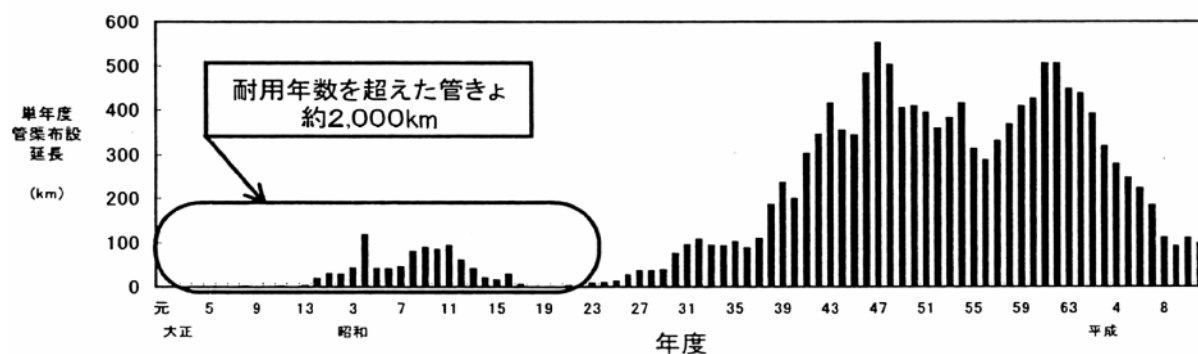


図 3-16 東京都の下水道管渠建設実績の推移
東京都下水道局「平成 15 年度事業概要」

一例としては、老朽化に伴う管の破損による道路陥没の発生がある。下図のとおり、老朽した管渠ほど道路陥没の発生頻度は高くなっている。

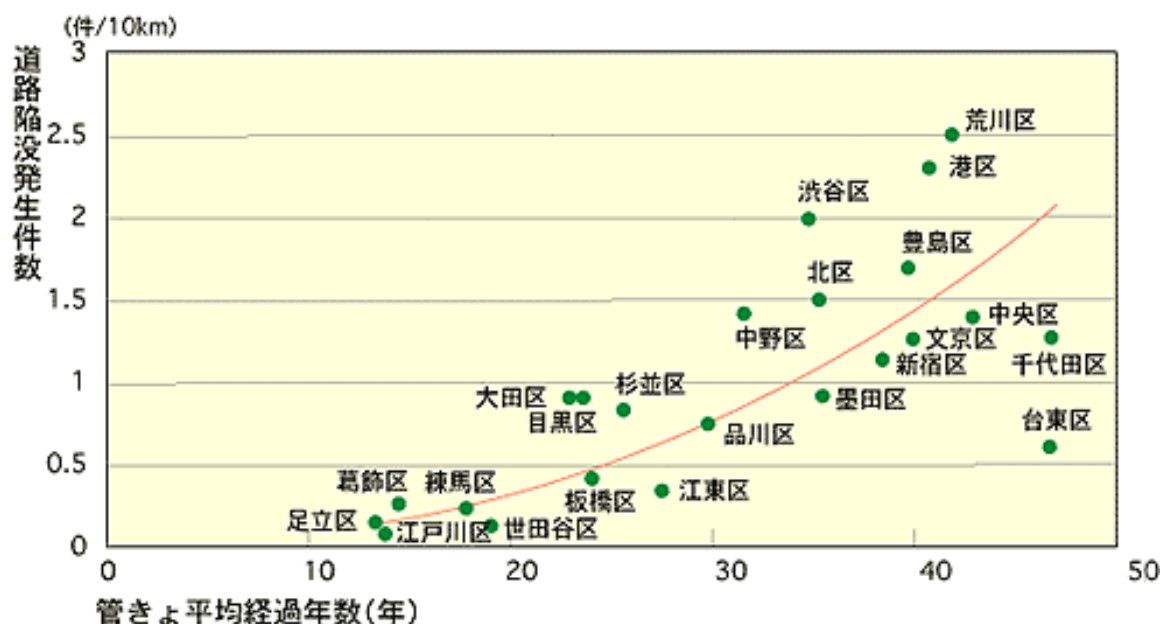


図 3-17 管渠平均経過年数と陥没件数の関係
出典：東京都「下水道構想 2001」

3. 5 手戻りが困難な施設

たとえば、下水道整備のように先行的に整備を行ってきたために、東京における下水道は特に都心部を中心として合流式が採用されており、最近の基本となっている分流式による整備となっていない地域が多く存在している。合流式は、大雨のときなどは、大量の雨水が汚水に流れ込むため、雨で薄められた汚水が流出し水質汚濁の一因となっている。このため、後から分流式で整備を行っている地域と同様の処理水準を求めるためには、例えば、水再生センター（汚水処理場）の処理能力を拡張したり、そこへ送る管渠を太くしたり、処理しきれない下水を一時的に貯める貯水池を作るといった追加的な対応が必要となる。



図 3-18 23 区の下水道形式

出典：国土交通省資料

下水道以外にも、首都高速などで早期に整備された区間においては、現在の道路構造令を充たさない狭小な幅員等となっていたり、当時の予測交通量を大きく上回る利用となり、現在の交通量を満たした交通容量が確保されていない等、現在、社会的に要求されているスペックを充たさない社会資本が多く存在している。

また、集中投資により重点整備された社会資本については、施設の更新時期もほぼ同時期にやってくることが予想される。また、これらの維持更新・再構築には膨大な費用がかかることが予想されている。しかし、社会資本整備を担う行政の財政状況が今後より厳しくなる状況下で、社会資本のサービスレベルを安全・便利・快適に確保することが重要となってくる。

4. 世界経済 3 極の 1 極という視点

ここで少し視点を変えてみたい。東京圏に短期間に集中的かつ重点的な投資がなされたことによる弊害がとかく批判の対象にされるが、それらを代償として得たものは何だったのだろうか。視点を世界に広げると、とても大きな事実が見えてくる。

先の戦争で壊滅的な打撃を受けた我が国の経済が、奇跡といわれた急速な復興を遂げ、60 年後の現在、ドル、ユーロ圏と並ぶ世界の 3 極の中心としての地位を不動のものとしていることには異論は少ないことと思う。国民一人あたりの GDP と平均寿命がともに世界のトップを維持していることは、国民全体の豊かさが、60 年前には想像もできなかった程向上したことの証である。様々な批判の対象とされる集中投資の弊害が、この事実の代償であったと考えるなら、それらは少し違ったものに見えてくるのではないだろうか。

繁栄の代償として出てきた弊害に対しても、そのために生じた経済損失の緩和や生活環境の改善のために努力を続けてきたことで、世界の最先端を担う省エネ、リサイクル、環

境汚染対策技術の開発等につながり、日本の技術力牽引することとなったのである。

データ集を眺めていて強く感じたことの一つに、我が国のような小さな国土に、東京圏 1,260 万人、さらには首都圏 3,500 万人が快適に生活するとともに、活発な経済活動が続けることが可能なインフラが存在するというもう一つの奇跡があげられる。

大きな人口と経済活動を支えるインフラとして、円滑な移動を支える世界的にも秀でる鉄道・地下鉄のネットワークや、国際競争力を支える東京湾沿岸の港湾、そして整備は完了していないが、大きな役割を果たしてきている都市高速道路網等が有機的に機能し、更なる成長へとつながっている。何よりも世界各国の大都市部で苦勞している水とエネルギーの確保ができていることが特筆されよう。

惜しむらくは、世界の中で築き上げた経済力によって、集中投資の際後回しとなった日本列島隅々への展開を図ろうという時期に、経済の減速、かつ急速な高齢化を伴う人口の減少段階に入ってしまったことである。今後とも、アジア全体の発展を支えながらも、世界の 3 極の一角としての地位を維持して行くための努力が必要である。

かなり考察が飛躍してしまったが、飛躍ついでに時代を遡るならば、かつて東京湾に流れ込んでいた利根川の流れを東に移し、居住と耕作の可能な広大な土地を生み出し、人口 100 万人を擁して 260 年続いた江戸の町の存在を可能にした、徳川家康が現在の姿を見ることができたならば、どんな感慨を抱くであろうか、ということを考える。自分が東方に除けておいた利根川の水を、よくぞ活用するところまで来たと感心するだろうか。

『家康が行った利根川の治水事業は、関東平野を洪水から守ることではなかった。関東の湿地の水を抜く。水抜きをして湿地を乾かす。湿地を乾田化して広大で肥沃な土地を生み出す、この一点であった。それが利根川の治水事業の原点であった。』

沖積平野の治水は「洪水から守る」防御ではなかった。「国土を生む」という攻撃であった。』（竹村公太郎：土地の文明、PHP 研究所、2005.6.27 P114）

5. おわりに

話題がかなり飛躍してしまったが、視点を変えてデータを眺めてみると様々な面が見えてくるのは確かである。たとえば多様なインフラの整備水準が一定レベルを超えると、それまでにはなかった産業が次々と生み出されること（たとえば、高速道路ネットワークによる配送時間の短縮と信頼性の高度化→宅配業という業態の確立→ネット通販ビジネスへの展開等）があげられる。そして世界の最先端技術を取り入れることが出来るのは、教育水準等をも含む広い分野のインフラが高い水準で維持されていることが必須条件であることなどにも気づかされる。

我々が子孫に残さなければならないものは、物量的な資産だけでなく、これらが相乗的に形作る状態、たとえば世界をリードしうる経済力、先端科学技術を受け入れ発展する下地としてのインフラの状態ではないかと考える。そのためにも、効率的に必要な投資を続けていくことが必要と考えるがいかがであろうか。

「東京圏における社会資本の効用」が、多くの方々の思考を広げる材料となることを期待

してやまない。

<参考資料>

- ・「国土交通省資料」
- ・「東京の新しい都市づくりビジョン2001」 東京都
- ・「各年高速道路便覧」 国土交通省
- ・「国土交通省道路局HP」
- ・「首都圏港湾の基本構想」 国土交通省関東地方整備局港湾空港部
- ・「第3回平成12年調査 幹線旅客流動実態」 国土交通省
- ・「東京都統計年鑑」
- ・「東京都水道局HP」 水道水源と浄水場別給水区域 <http://www.waterworks.metro.tokyo.jp/>
- ・「水資源計画について」 国土交通省土地・水資源局水資源部
第三回 水資源政策の政策評価に関する検討委員会 資料
- ・「東京都建設局資料」
- ・「Web 広報東京都 平成16年2月号」 東京都 <http://www.koho.metro.tokyo.jp/koho/2004/02/index.htm>
- ・「過去の水害記録」 東京都建設局 http://www.kensetsu.metro.tokyo.jp/suigai_kiroku/kako.htm
- ・「RIVERFRONT Vol.51」 財団法人リバーフロント整備センター
- ・「平成15年度 東京都住宅白書」 東京都
- ・「首都直下地震対策に関する参考資料」 内閣府 中央防災会議首都直下地震対策専門調査会
- ・「第6回 地域別延焼危険度測定」 東京消防庁
- ・「首都直下地震 想定される被害とその対策」 中央防災会議資料
- ・「地球温暖化防止のための道路政策会議資料」 国土交通省
- ・「東京都のヒートアイランド対策」 東京都環境局HP <http://www2.kankyo.metro.tokyo.jp/heat/>
- ・関東地方整備局資料
- ・「ニュース東京の下水道 2005年5・6月号」 東京都下水道局
- ・「下水道構想2001」 東京都下水道局
- ・「平成15年度事業概要」 東京都下水道局
- ・「合流式下水道の改善」 国土交通省都市・地域整備局下水道部 HP
http://www.mlit.go.jp/crd/city/sewerage/yakuwari/cso_kaizen.html

水物質循環の健全化を軸とした環境再生

環 境 研 究 部 長

福 田 晴 耕

水物質循環の健全化を軸にした環境再生

環境研究部長 福田 晴耕

1. はじめに

様々な人間活動が引き起こす流域水物質循環システムの変質は、水環境の悪化、生物多様性の低下等となって現れる。これに対応するため様々な政策や事業が実施され、効果を上げてきているが、閉鎖性水域を抱える流域については未だ根本的な解決に至っていないケースが少なくない。一方、住民等による自然環境の保全・再生等のための地域活動が活発になっている他、水環境の一層の改善を図るため、地域住民を含む関係者が参画し、流域水物質循環の再生を目指す試みも始められている^{1), 2)}。

人間活動が高度に進んだ今日においては、流域における水物質循環系と人間とは相互に深く影響し合う関係にある。それゆえに、水物質循環の健全化のためには、人間の側からの幅広い貢献を前提にした総合的取組みが不可欠であるとの認識は、一般論のレベルでは広く共有されつつあるところであろう。しかし、その具体的実行の段になると、解決すべき課題が少なくない。中でも、関係者全員が複雑な水物質循環現象の構造と問題の構図を理解した上で、行政による施策や事業、各主体による活動等の効果・影響を評価し、互いの利害関係を調整し、対策の全体的方向性を探り、総合的な取り組みにつなげていくための手法を見出すことは容易ではない。また、複雑な現象を構成する各パーツについての現象解明や研究開発がそれなりに進む中で、それらの成果を有機的に連携させ、課題解決に役立つよう再統合していく手法をいかに確立・定着させていくかも重要な課題である。

流域における、ひいては流域から閉鎖性水域や沿岸海域にわたる水と物質の流れの健全化をはかっていくことは、様々なスケールを持つシステムが階層的に存在する地域の環境再生を統合的にはかっていくという難題に対する突破口になると期待される。本講演では、広域的な水物質循環の健全化を支えるための研究開発の現状とその成果の実践へのつながりを、霞ヶ浦流域と東京湾流域を対象とした検討事例を紹介しつつ^{3), 4)}、地域の水環境再生の今後の展開を俯瞰する。

2. 水物質循環の健全化に向けた検討プロセス

今日、都市における水環境等環境の悪化は、特定の活動や汚濁源によるものというよりも、個々人の生活や産業活動等社会総体による水、エネルギー、資源等の大量消費・排出や、市街化に伴う植生分布や地表面構造の変化等、都市や社会の存在自体に係わるものであり、根本的な問題解決のためには、行政や市民団体等による国土・都市構造の変革とともに、人々のライフスタイルや社会システムについても

改善していく必要がある⁵⁾。

そこで、水物質循環の健全化を軸にした環境再生を進めるためのビジョンやプロセスの提示によって、各地域にあったビジョンが地域の主体により実行されることが必要である。これにより多大な環境負荷となっている人の生活や社会システムが、物質的な豊かさ、利便性・快適性等を享受しつつ環境負荷を軽減し、自然システムが健全化されることで、自然が人や社会にもたらす様々な機能・恩恵を増進させることができる。またそのような自然との触れ合いに、安らぎ、喜び、生き甲斐等の新たな価値を見出すことにより、さらに満足度の高い生活の実現を図るとともに、そのための社会的な好循環が形成されていくことを目指している。

上記を踏まえ、ここでは水物質循環の健全化の一般的なプロセスを図-1のように提案する。このプロセスは人の生活という視点から、できる限り実感しやすい将来ビジョン案を複数作成し、これらをもとに地域の関係主体が現在の生活とも比較しながら、望ましい国土・社会のあり方を思考し、実現させていくというものである。

プロセスの第1段階は、「問題の把握・掘り起こし」であり、その地域の人々が本質的な問題点を認識することである。人々が共感し、真にその改善を願う問題の掘

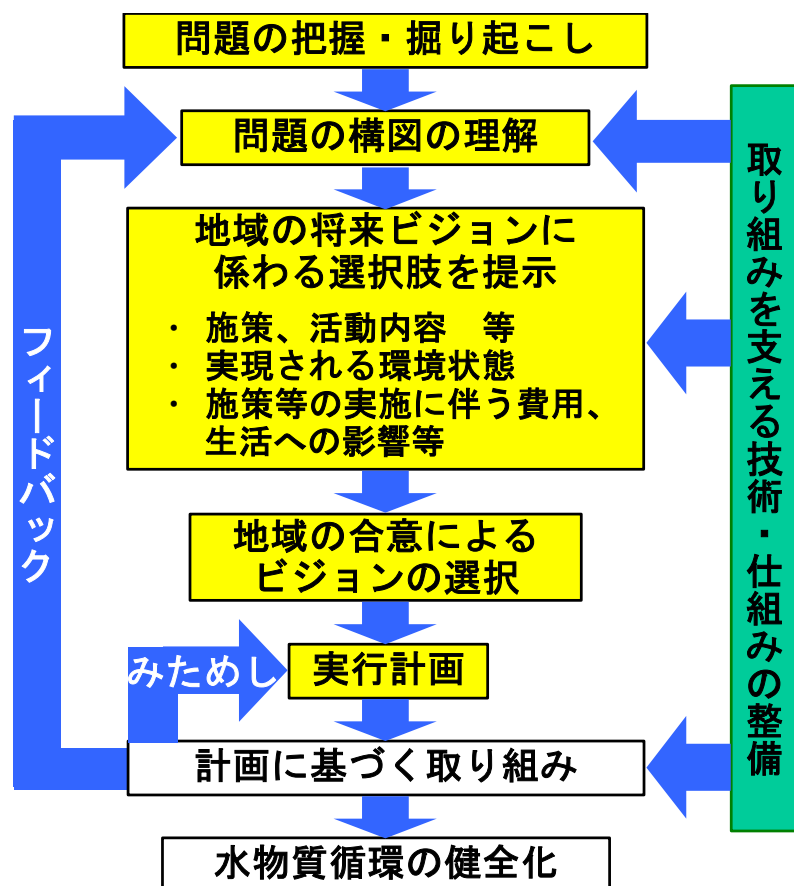


図-1 水物質循環の健全化に向けた検討プロセス

り起こしが、「再生」へのエネルギーとなる。

次の段階は「問題の構造の理解」であり、その問題を生じている構造や因果関係を明らかにすることである。この段階においては、種々の環境状況を水循環、物質循環等のシステムとして捉え、このシステムを物理・化学的な法則から解釈・再現するシミュレーションモデルの活用が有効となる。

これにより、「問題の構造」が明らかになれば、続いて問題解決のための施策等の立案を行うとともに、それらを総合的に組み合わせて実施した場合に、どのような環境、社会、生活が実現されるかの検討を行う。ただし、現在の国土・社会の有り様がおおよそ戦後の 50 年程度の時間スケールで形成されたことを振り返れば、水物質循環における環境再生も数十年の時間スケールで取り組むべきものであり、検討のベースも段階を踏みながら数十年先の将来条件も考慮に入れる必要がある。このような将来条件には、地球温暖化に伴う気象変化、人口減少と年齢構造の変化、経済規模・産業構造等現在直面しつつある問題が関わってくるであろうし、またこれらを将来シナリオに織り込むことにより、これらの問題に対して、国土マネジメントの面からどう対応していくかを具体的に検討することができる。

ここでは、水環境改善施策について、様々な施策やそれらの組み合わせにより、「現システム維持型」を含めたいくつかのビジョンを、自然との触れ合いに係わる新たな価値観、新たなライフスタイルの提案とともに、できるだけ分かりやすく、実感できるような形で提示し、関係主体間の議論に提供していくこととしている。各ビジョンの検討においては、具体的な施策・活動等の内容だけでなく、それらにより実現される環境条件、それに伴う費用や生活上の制約等を考慮して評価することが必要である。これらの情報をもとに関係主体間の利害調整や、将来像の選択が行われるが、必要な情報に対しては、常に議論から検討へのフィードバックが必要である。

関係主体の総意として水物質循環の健全化に向けたビジョンが選択されれば、それに基づき、目標の明確化、目標達成に向けた具体的な実行方策の検討等が行われ、「実行計画」が策定される。あわせて、それまでの協働活動により、関係主体において、地域社会やライフスタイルの変化に対するモチベーションが形成されていく。

「実行計画」が策定されれば、様々な施策や地域住民の自発的活動をいわゆる「みためし」・「アダプティブマネジメント」を行いながら実施する段階となるが、水循環の健全化に向けたモチベーションや活力を失わず、持続的な取り組みができるための仕組みづくりが重要になる。

3. 霞ヶ浦と東京湾における現状と統合型水物質循環モデル

水物質循環の健全化プロセスの合意形成にはその構造を的確に表現するモデルが必要である。霞ヶ浦と東京湾の水環境の課題を踏まえて開発した陸域・水域統合型モデルの概要を紹介する。

3. 1 霞ヶ浦とその流域圏

3. 1. 1 霞ヶ浦における課題の概要

霞ヶ浦では、昭和 30 年代始めまでは概ね良好な水環境が保たれていたが⁶⁾、昭和 40 年代に水質悪化が明確になり、昭和 50 年代半ばに湖心の COD（化学的酸素要求量）が 10mg/L を超えた。昭和 60 年 12 月には、湖沼水質保全特別措置法に基づく指定湖沼に指定され、3 期 15 年間にわたって湖沼水質保全計画が策定されてきた。現在も、第 4 期湖沼水質保全計画(平成 13～17 年度)⁷⁾に基づき、流域対策(下水道整備、面源負荷対策等)、湖沼内対策(浚渫による底泥溶出負荷削減、浄化用水の導入等)といった水質保全対策が行われているが、昭和 60 年代以降、目立った水質の改善は全体的には見られておらず、COD、T-N（全窒素）は横這いで、T-P（全リン）は増加傾向にある(図-2 の「実測値」)。

このように霞ヶ浦は、陸域（流域）～閉鎖性水域にわたる水物質循環の変質がもたらす問題の難しさをよく表しており、陸域モデルと湖沼モデルを一体化した本モデルの適用性を検討するのに適したフィールドと言える。

また過去から現在に至る流域の実態と課題の理解を容易にする生物を指標とした流域診断も重要なアプローチである。流域環境の変遷をより具体的に理解することを通じて、流域が目指すべき再生ビジョンを明確にすることに役立つ。その一例として昭和 35 年当時と平成元年の霞ヶ浦の水生植物の分布図－3,4 に示す。

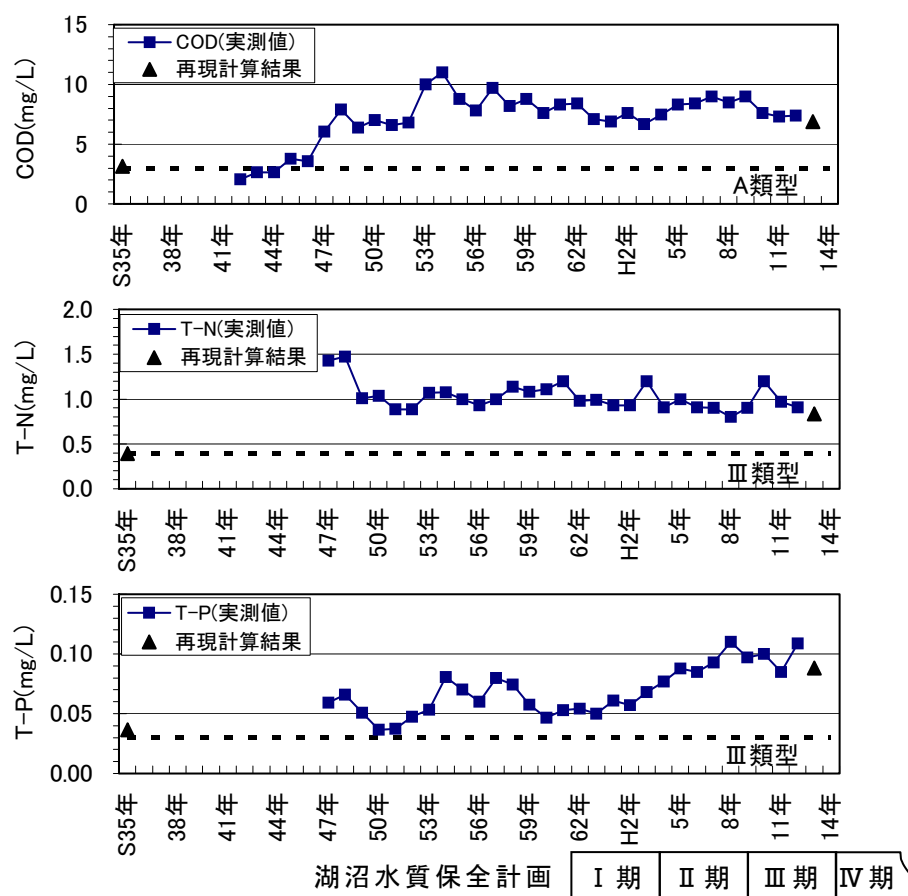


図-2 霞ヶ浦における水質の変遷(湖心)

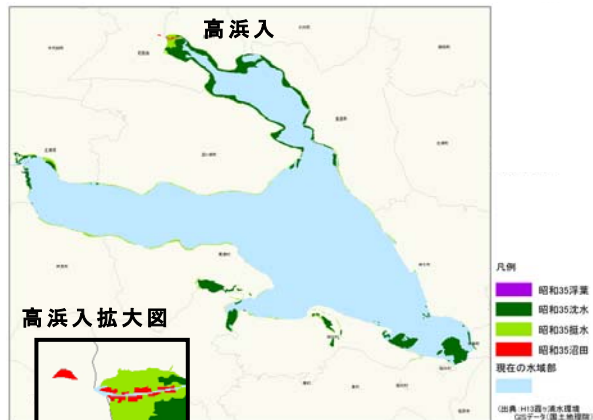


図-3 昭和 35 年当時の霞ヶ浦の植生分布

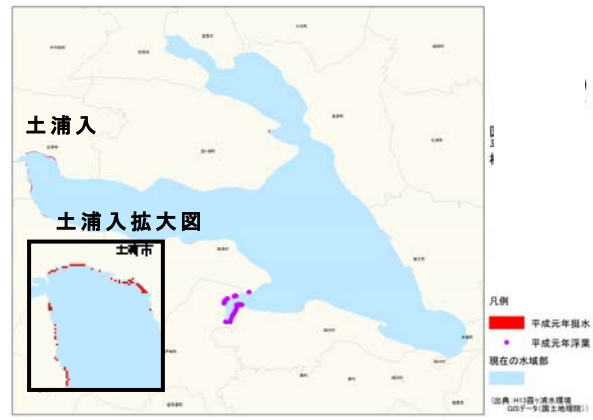


図-4 平成元年の霞ヶ浦の植生分布

3. 1. 2 水・物質循環モデル

利用した霞ヶ浦水物質循環モデルは陸域モデルと湖沼モデルから構成されている。モデルの構成を表-1 に示す。このモデルの特長は、陸域モデルと湖沼モデルが結合され、陸域と水域に関する施策を組み合わせた検討ができることにある。本モデルで追跡対象とする主な物質は、陸域モデルでは COD, T-N, T-P, 湖沼モデルでは COD, T-N, T-P, Chl-a (クロロフィル a) である。

このモデルは GIS と連動しており、計算に必要な流域の面的情報は GIS データから受け渡される。すなわち、検討対象の流域が 500m のメッシュに分割され、必要な流域情報(地形、土地利用、人口、家畜飼養頭数等)が GIS データとして格納されており、流域水物質循環モデルの入力データとして接続することにより、シミュレーションが実行される。したがって、流域が異なっても、同様の GIS データが整理されれば、流域情報のモデルへのインプットを行うことができる。また GIS をプラットフォームとしたユーザーインターフェースの整備により、シミュレーションの実行に必要な水環境改善に係る施策の選択と条件入力、モデルの実行、結果の可視化などの一連の操作を 1 つのインターフェースの中で行うことができる。

	水循環モデル	物質循環モデル
蒸発散モデル	降雨は土地利用に応じて蒸発散・地下浸透・表面流出に分配させる。 蒸発散は Thornthwaite 式	雨水に含まれる負荷は、地下浸透量、表面流出量に応じて、地下水モデル及び地表流モデルに与える。
地下水モデル	水の挙動(水位、流速)の基礎式: 平面 2 次元多層浸透流。 地表への湧出(湧水量): 地下水水位と地表面標高との水位差に透水係数を乗じる。	物質の挙動(移動、拡散)の基礎式: 平面 2 次元移流拡散方程式(土壌への吸着を考慮)。
地表面流モデル	水の挙動(水位、流速)の基礎式: 平面 2 次元不定流(Dynamic-wave)式。 メッシュ内で発生する表面流出量、地下水湧出量、人工系発生汚水量が連続式の増分として与えられる。 水田の表面流出は降雨時には一時田面に貯留された後、水田の欠口部から流出(基礎式は水田に対する連続式)。	物質の挙動(移動、拡散)の基礎式: 人工系排出負荷と自然系排出負荷、湧水負荷を入力条件としたメッシュ単位での収支式。 流域の浄化機能の基礎式: Streeter-Phelps 式 自然系排出負荷は負荷量堆積を考慮した雨天時流出負荷量算定モデルを用いる(降雨時のみ流出)。 ただし、農地については地下浸透も考慮(灌漑期の水田は非降雨時も浸透)。
河道モデル	水の挙動(水位、流速)の基礎式: 1 次元 Kinematic-wave モデル	物質の挙動(移動、拡散)の基礎式: 1 次元移流方程式(河川の浄化機能は Streeter-Phelps 式)
人工系モデル	上水、工業用水、農業用水は、当該メッシュの地下水、河道、湖沼から取水。 排水(生活系、工業系)は、当該メッシュの地表流モデルに与える。 ただし、下水処理、し尿処理の排水は処理場から川湖に地表流または湖沼モデルに与える。	生活系・畜産系・産業系の排出負荷量はメッシュごとに GIS を用いて原単位法により計算し地表流モデルの入力条件とする。 ただし、下水処理、し尿処理については処理場から地表流又は湖沼モデルに与える。
湖沼モデル	水域分割: 7 つの Box に分割した 1 層モデル。 水収支: Box 毎に流入流量、取排水量から容積変化を計算し、過不足分を下流 Box から調整する。	流入流出過程と移流拡散過程と当該物質の反応過程を表現する物質収支式

表-1 霞ヶ浦水物質循環モデルの概要

3. 1. 3 水・物質循環モデルによる現況再現

水環境改善の取り組みの将来への方向性を描く場合、過去の良好な水質が保たれていた時代から水質が悪化して固定化した現在までの変遷を、大局的に理解することが重要である。本論では水質が良好であった頃と現況の二時点の再現から、水物質循環モデルを通じて環境変遷の構図を理解することを試みる。

はじめに、現況の霞ヶ浦における水質レベルの再現性を調べた。現況の再現にあたっては、第4期湖沼水質保全計画⁷⁾に係る資料等をもとに流域条件、汚濁負荷原単位等を設定し(表-2の「現況」)、平成11～15年の5年間の気象条件(降雨量、気温等)を入力することでシミュレーションを実施した。地下水位、地下水質の初期値は、年間雨量程度の降雨を定常で与えて長期間計算を行い、地下水位がほぼ収束した時点の値を設定した。昭和35年当時の霞ヶ浦流域の土地利用については、(財)茨城県科学技術振興財団が行っている霞ヶ浦水質浄化プロジェクト⁸⁾が推計した過去の土地利用面積から、さらに遡って推計した。また、底質条件(溶出速度)については、表層底質の観測値、溶出速度試験結果^{9), 10)}等を考慮して設定した。さらに、植生やシジミによる効果については、田畑¹¹⁾や田中等¹²⁾の実験結果により設定した。河川流出量・流出負荷量、湖沼水質の再現結果を、降雨量が平均的であった平成13年(以後、「現況」)を中心に図-5、図-6に示す。これより、現況の霞ヶ浦における水質の年平均レベルでの再現性は得られたと考えられる。

表-2 霞ヶ浦流域に係わる設定条件

条件項目	過去(昭和35年)	現況(平成13年)
①流域人口(人)	60万	96万
②生活排水処理形態(%)		
下水道	0	40
農業集落排水	0	4
合併処理浄化槽	0	18
単独処理浄化槽	0	19
し尿処理場	30	19
自家処理	70	0.02
③生活用水(L/人・日)	104	270
④家畜頭数		
牛・馬(頭)	71,294	40,700
豚(頭)	96,183	332,700
⑤土地利用	トレンドから推定	国土数値情報(H9)
⑥湖岸植生帯(ha)	1493.2	12.8
⑦コイ養殖(t)	0	5,001
⑧シジミ漁獲量(t)	3,000	0
⑨底質条件(溶出速度)	(湖心値)	(湖心値)
COD(mg/m ² /day)	35	71
N(mg/m ² /day)	23.2	46.3
P(mg/m ² /day)	0.23	0.47

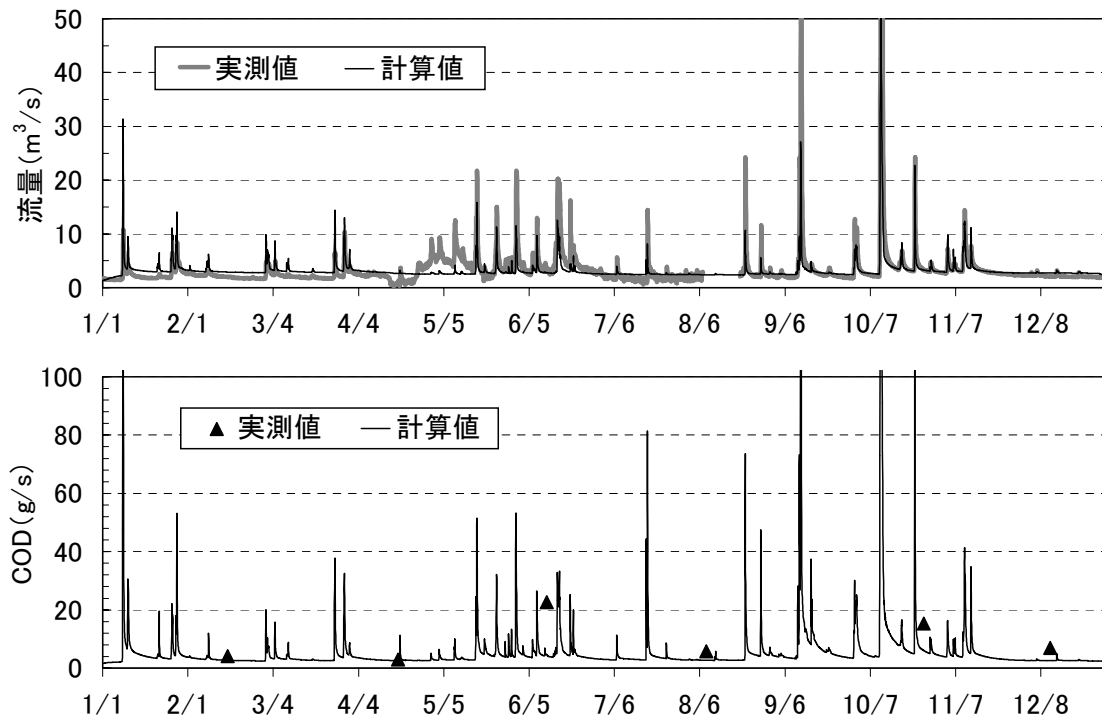


図-5 流量・負荷量の再現結果（恋瀬川：平成 13 年）

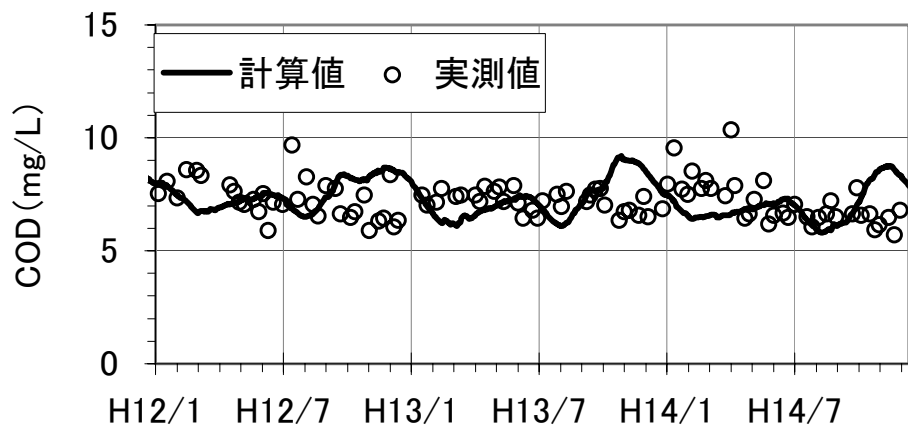


図-6 霞ヶ浦の水質再現結果（湖心：平成 12～14 年）

次に、過去の霞ヶ浦における水質の再現を検討した。汚濁が進んでいなかった昭和 35 年(以後、「過去」)を対象とし、表-2 の「過去」に示す流域条件及び水域条件のもとで¹³⁾、第 4 期湖沼水質保全計画の汚濁負荷原単位を用いて計算を行った。計算は、陸域モデルは平成 13 年の 1 年間の気象条件で、それをうけた湖沼モデルは平成 11～15 年の 5 年間の気象条件で行い、5 年分の計算値を平均することで評価した。なお、当時の知見がない条件については、水物質循環へ与える影響が大きいと考えられる項目については現況と同じ値を与える等の方法で設定したが、底質条件(水温 20℃における溶出速度)については、当時の水質の状況から、現況の溶出速度の 5 割に設定した。

3. 2 東京湾とその流域圏

3. 2. 1 東京湾における課題の概要

東京湾流域圏においては、高度経済成長期以降、首都郊外の土地開発が活発に進められることにより、生物の生息生育環境が大きく変質してきた。水環境については、図-7 に示すとおり東京湾の水質悪化が河川と同様に 1950 年代後半から顕著になり、1970 年頃にピークに達した。東京湾に対しては、流域からのインパクトに加えて、干潟の埋め立てを中心とする直接改変のインパクトも作用しているが、東京湾の水質改善には流域から発生する負荷量の削減の取り組みが不可欠である。

そこで流域からの汚濁負荷量の削減を目指して、1978 年には COD の総量規制制度が導入された。現在は、2009 年度を目標とする第 6 次総量規制のための汚濁負荷量の総量の削減に関する基本的な事項を定める総量削減基本方針の策定が環境省により進められている¹⁵⁾。また公共用水域の水質環境基準を達成維持するための下水道整備を効果的に実施することを目的として、東京湾流域下水道整備総合計画が平成 24 年を目標年次として平成 9 年に策定されている¹⁶⁾。このような法的な規制や計画は水質改善に大きな役割を果たしてきたが、栄養塩である窒素、リンの流入による植物プランクトンの増殖による有機物の増加による赤潮や青潮の発生が定常化する状況が続いている。

このように、東京湾流域圏には、流域の自然システムに負担をかけながら都市的活動様式を拡大させていくという流域圏に関わる問題の構図が端的に現れており、施策群検討に最も適した対象の 1 つである。

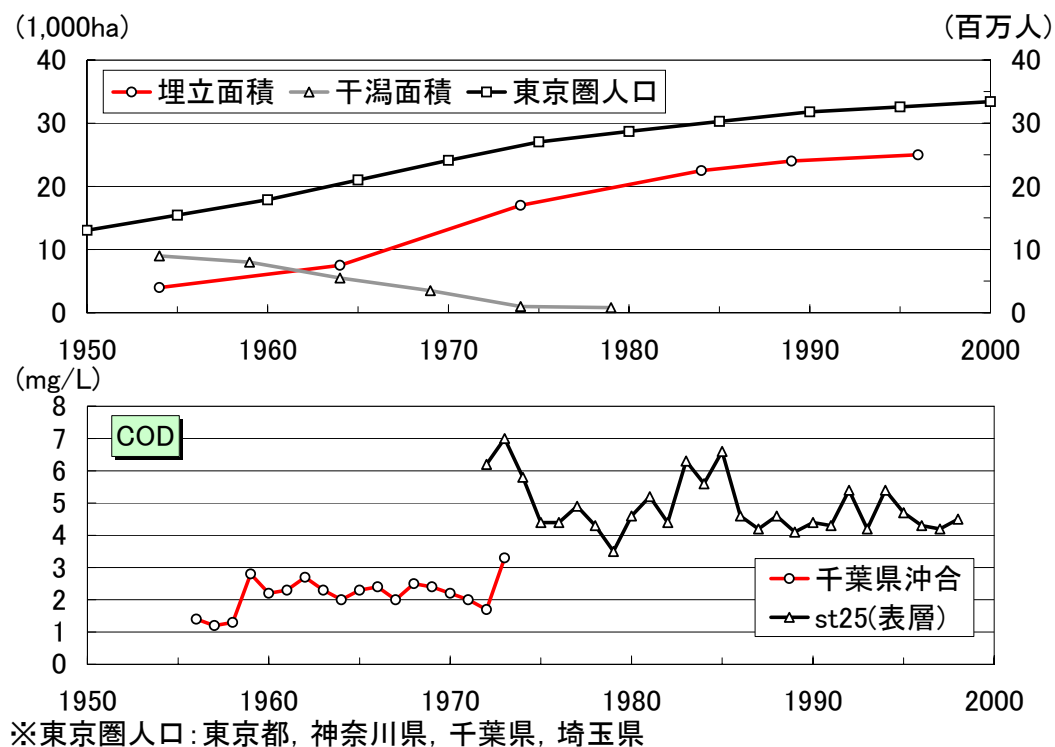


図-7 東京湾流域の人口,干潟面積,埋立及び水質の経年変化¹⁴⁾

3. 2. 2 水・物質循環モデル

水・物質循環モデルは、表-3にモデルの内容を示す。自然系水循環の流出過程を表現する分布型流出モデル¹⁷⁾をもとに、農業・工業・生活等の用水・排水といった人工系水循環を組み込み¹⁸⁾、さらにその水を介して流動する栄養塩等の物質循環を表現するモデルを組み込んだもの¹⁹⁾である。モデルの構造は、東京湾流域を約1km×1km（国土数値情報の3次メッシュ）の15,558メッシュに分割し、図-8に示す6分類の土地利用条件をメッシュ毎に与え、鉛直方向に表層・不飽和層・地下水層の3層に重ねたタンクモデルを用いるというものである。計算対象物質は、窒素、リン、COD、BOD（生物化学的酸素要求量）である。

表-3 東京湾流域水物質循環モデルの概要

	水循環モデル	物質循環モデル
表層モデル	降雨を表面流、早い中間流、地下浸透流に分離。 表面流はManning則が成り立つものとして基礎式を決定。 早い中間流出量、地下浸透量は浸透能(タンク水位と流出孔との差に比例)に比例。 水平方向へは落水線に沿って流下(不飽和帯、地下水モデルも同様)。 蒸発散はPenman式。	降雨負荷、面源負荷の地表面への堆積による汚濁負荷は表層流(表面流+早い中間流)の掃流力によって流出。 堆積物の流出負荷量は流量のべき乗に比例。 不飽和タンクへは表層流と同じ水質で浸透。
不飽和帯モデル	遅い中間流は不飽和透水係数(水分量に比例)に比例し、動水勾配が近似的に地形勾配に等しいとして流出量を計算。 地中浸透量は不飽和透水係数に比例し、動水勾配を1として計算。	地中浸透した汚濁負荷は土壤内に蓄積し、蓄積物に吸脱着する過程を考慮。 蓄積物から溶脱した汚濁負荷は中間流により流出。 地下水タンクへは中間流と同じ水質で浸透。
地下水モデル	被圧地下水はタンク水位に比例し、不圧地下水はタンク水位と不圧地下水発生高の差の2乗に比例。	地中浸透した汚濁負荷は土壤内に蓄積し、蓄積物に吸脱着する過程を考慮。 蓄積物から溶脱した汚濁負荷は基底流により流出。
人工系モデル	上水、工業用水、農業用水は、当該メッシュの地下水もしくは河道から取水。 排水(生活系、農業系、工業系)は、当該メッシュの表層モデルに与える。ただし、下水処理の排水については処理場から表層または湾モデルに与える。	生活系・畜産系・産業系の排出負荷量はメッシュごとにGISを用いて原単位法により計算し、表層モデルの入力条件とする。 ただし、下水処理の負荷については処理場から表層又は湾モデルに与える。
河道モデル	水の挙動(水位、流速)の基礎式：1次元Kinematic-waveモデル。 (対象河川：利根川(江戸川分派点まで)、江戸川、荒川、中川、隅田川、多摩川、鶴見川等26河川)	各タンクから河道に流出した汚濁負荷について河床への沈降・吸着を考慮。

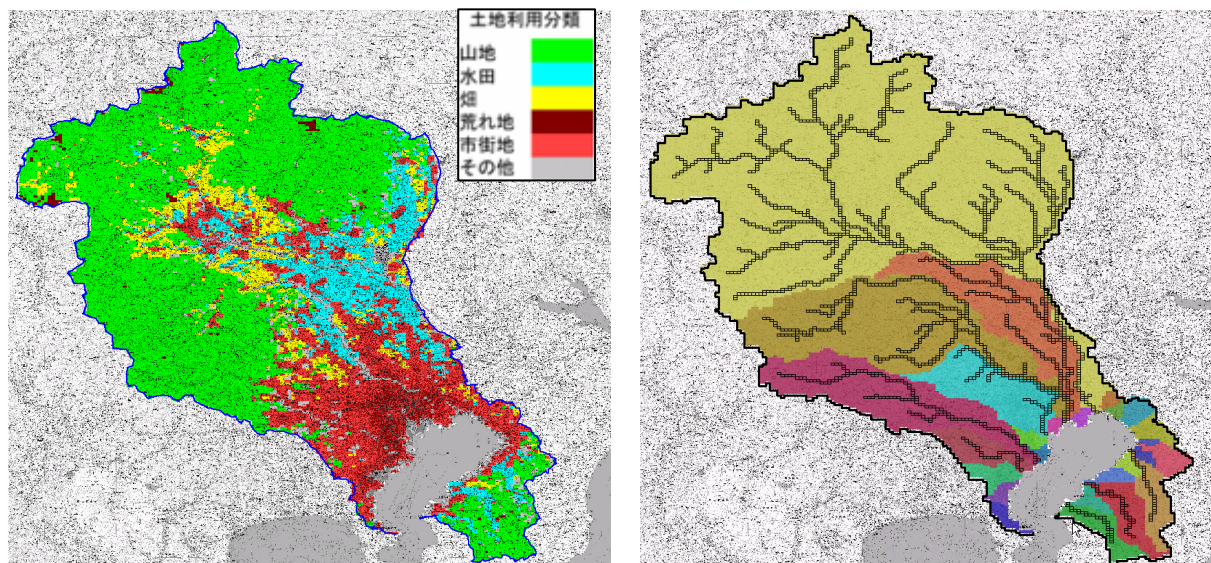


図-8 対象となる東京湾流域(左：土地利用，右：流域分割と河道網)

3. 2. 3 水・物質循環モデルによる現況再現

現況の水量と水質のモデルによる再現性を調べるため、土地利用，水利用，排出負荷に関するデータを収集し，2001年の年間計算を行い，河川流量10地点，河川水質8地点，東京湾水質5地点について計算値と実測値を比較した．その結果を，代表地点の河川流量・水質について図-9に示す．これらに表されるように，モデルによる計算は，河川流量・水質の時間変化特性を大局的に再現しており，施策群の効果の把握が可能と判断した．

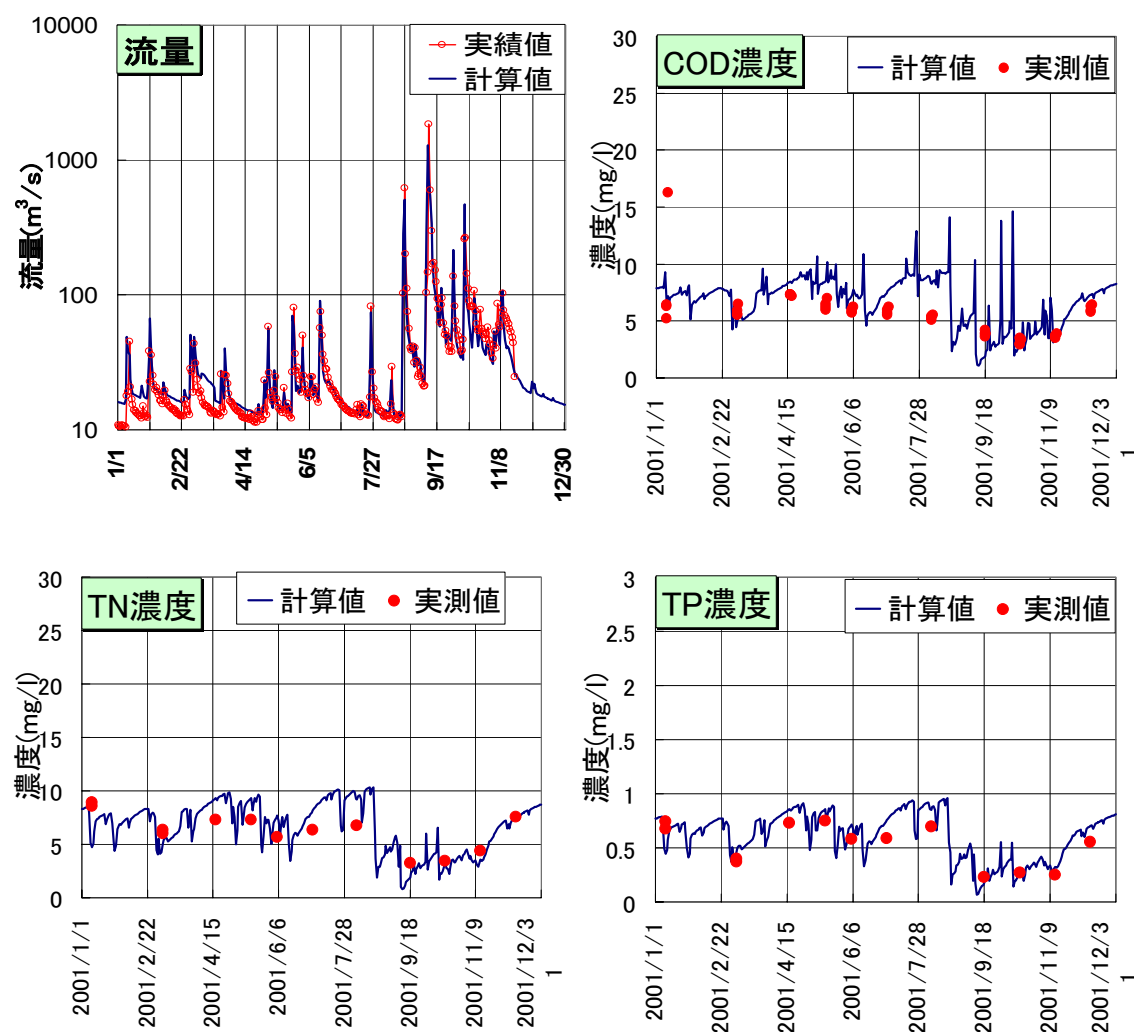


図-9 河川流量・水質の実測値と計算値（多摩川・石原地点）

4. 水環境改善の総合取り組みに向けた施策の感度分析

4. 1 計算の前提条件

霞ヶ浦や東京湾のような閉鎖性水域における水質改善効果の施策評価において、数多くある施策の効果を体系的に把握するために、同じ指向をもった施策同士でグループ핑し、各グループの中にある個々の施策の効果把握、次いで、同一グループに属する全ての施策（以後、施策群と呼ぶ）を実行した場合の効果把握、さらに、異なる施策群を組み合わせた場合の効果把握を順次行うというような階層的検討が有用と考えた。このグループ핑の指向軸として、本論では、図-10 に示すとおり、実施手法にかかわる質の違いに着目して、施策群1；社会資本整備による環境負荷の削減、施策群2；流域の住民等による自発的または誘導的な環境行動の実践、施策群3；面的な土地利用の改変や自然環境の保全・再生、の3つを設定し、各施策群について個別にその効果を評価するとともに、各施策群を組み合わせた場合の効果の検討を行った。

各施策をモデル上で表現するための条件やパラメータ設定に際しては、既往の文献を極力参考にした。ただし、明確な根拠を持って与えることが現時点では難しく、割り切って設定しているものもある。また、前述のように、モデルの実現象再現能力に関しても向上させるべき点を残している。これらの意味で、以下に述べる結果は、種々の環境改善施策に概ね対応するようにパラメータや条件を変えて、モデルの感度分析を行ったものであり、したがって個々の施策の評価に直接資する熟度はまだ有していない。

なお、本計算では、気象（気温、降水など）、人口については、現在(2001 年)と同一の条件を与えた。土地利用、産業などの社会経済活動にかかわる条件については、施策と連動させて与えることとし、対象とする施策がその条件の制御を直接含んでいない場合は、現況（2001 年時点）を与えて計算した。また、施策が機能するまでの経過時間(事業期間)は考慮していない。

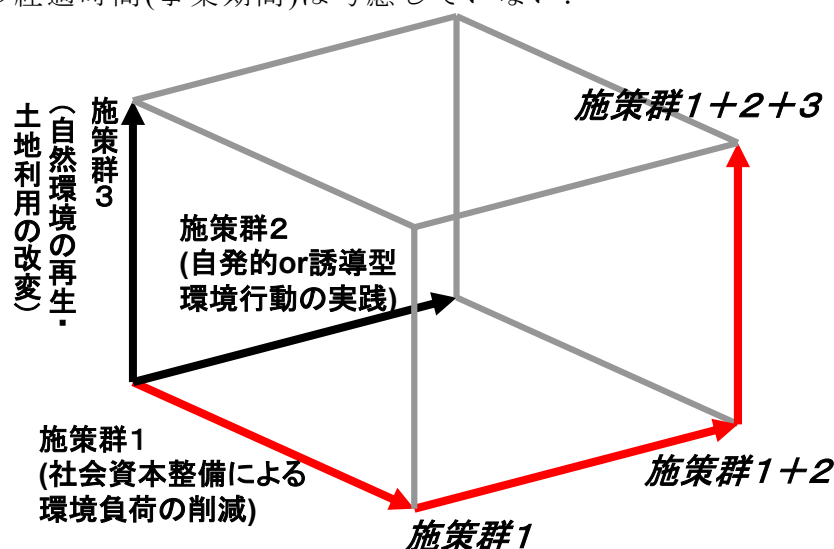


図-10 施策群設定の概念図

4. 2 霞ヶ浦とその流域圏における施策群の実施効果

霞ヶ浦において、水物質循環モデルを適用して、各種施策検討について水環境の改善効果を検討した。表-4 が対象にした湖内対策と流域対策である。これらの施策のうち、那珂川からの浄化用水の導入は水資源確保の目的と併せて既に事業が進んでいる。また、植生浄化は初期投資が必要であるが、湖岸植生帯の再生による生態系の保全・再生の効果も期待できる。一方、シジミ浄化は、塩分濃度低下の問題はあるが、種苗生産による養殖試験も行われており²⁰⁾、漁業振興との相乗効果も期待できる。

重点再生エリアは、囲い込み水域内に導水することで、その内側のみではあるがCOD2.1mg/L の良好な水域が速やかに形成される。この水域を水道取水、希少動植物の再生等に利用することで、水質改善の効果が実感でき、住民の水質問題への関心につながる。

各施策を個々に実施した場合の湖心水質(COD)の変化を図-11に示す。ここで、図中の Δ CODは、陸域モデルについては平成13年の1年間の気象条件で、それをうけた湖沼モデルについては平成11～15年の5年間の気象条件で計算を行い、5年分の平均値に関する無対策値との差分を表したものである。図から、流域対策（黒棒）、湖内対策（白棒）のそれぞれが、一定の水質改善の効果を示しており、前述のように流域対策、湖内対策を総合的に行っていくことの重要性がうかがえる。

表-4 霞ヶ浦水物質循環モデルでの設定内容

	水環境施策	対策
施策群 1	下水道の整備：流域内の下水道処理人口比率を46%から100%まで向上	流域
	高度処理型合併処理浄化槽の整備：下水道未整備の全人口に対して100%整備	流域
	透水性舗装：流域内の全道路に透水系数 1.0×10^{-2} cm/sの透水性舗装を整備することで表面流出を抑える設定とした	流域
	下水処理水の再利用：全下水処理水を生活用水として再利用することで生活用水取水量と下水処理場からの排水量を削減する設定とした	流域
	浄化用水の導入：那珂川(COD 2.0mg/L, T-N 1.44mg/L, T-P 0.038mg/L)からの浄化用水を土浦に15m ³ /s導水	湖内
	溶出量削減：湖内全域にわたって、底質からの溶出速度を現況設定値からさらにCOD75%, T-N50%, T-P60%削減	湖内
施策群 2	各戸雨水貯留浸透の整備：全家庭の屋根全体に貯留高さ10mmの貯留浸透施設を設置することで表面流出を抑える設定とした	流域
	環境保全型ライフスタイルへの転換：全住民が環境保全型ライフスタイルを実行することで排水量が36%削減されると設定した。また、生活雑排水未処理人口の生活雑排水からCOD 28%, T-N 30%, T-P 20%が削減されると設定した	流域
	環境保全型農業：環境保全型農業推進により田畑への施肥量を削減し、作物の生長に必要な分以外を100%削減する設定とした	流域
	家畜し尿の農地還元：全家庭し尿を農地に還元することで家畜由来の負荷量を100%削減する設定とした	流域
施策群 3	植生浄化：昭和35年時の植生面積14.932km ² を再生することで植生による浄化(COD 0.08g/m ² /日, T-N 0.07g/m ² /日, T-P 0.006g/m ² /日)の回復を図る	湖内
	シジミ浄化：昭和35年時の漁獲量3,000tを再生することで、シジミによる浄化(シジミ湿重量に対する物質重量比率で、COD 10.158%, T-N 0.575%, T-P 0.0359%)の回復を図る	湖内
	湿地浄化：主要10河川の河口部に1km ² の湿地を確保することで植生・土壌・生態系等の機能を活用した浄化を図る	流域
	水産負荷対策：コイ養殖からの水産負荷を0にする	湖内
	重点再生エリア：透過堤によって0.09km ² の範囲を囲い込み、那珂川から0.1m ³ /sを導水する	湖内

さらに図-11 には、施策の組み合わせ効果についても示している（組み合わせられる施策を包含する灰色の棒により表示し、さらにそれらを組み合わせたものを点線により表示）。まず、組合せ 1 はインフラ整備が主体となるもので、下水道の整備や浄化用水の導水など、公共事業を中心とした汚濁負荷削減のためのハード的な施策を集中的に組み合わせたものである。組合せ 2 は、流域住民参加型とも呼べるもので、各戸雨水貯留浸透施設の整備、環境保全型ライフスタイルの推進等、住民の生活スタイルの転換をはかるソフト的な施策を組み合わせたものである。組合せ 3 は、自然機能の回復を中心とするもので、湖岸植生帯の再生、湿地浄化等、自然の浄化機能を回復することで汚濁負荷を削減する施策を組み合わせている。

図より、ハード的な施策の集中実施、自然機能の回復、ソフト的施策を含めた循環型社会の構築のいずれについても、各施策単独よりも相当程度効果が増大すること、しかしそれでも、1つの組み合わせだけで劇的な水質改善が図られるわけではなく、さらに施策群を組み合わせることで効果が増大することがわかる。このことは、複数の施策群を組み合わせることの重要性を示している。その際には、各組み合わせの効果やコスト（初期と維持管理段階）の比較とともに、水質の改善度だけでは表現できない流域住民が持つ感覚的な評価にも留意すべきであろう。これには、施策実行面での確実性・信頼性・迅速性、地域住民への波及・浸透効果と活動持続効果、自然とのふれ合い増進や教育の効果、地域づくりにかかわる効果など様々なものが考えられ、これらを含めた多面的な評価も施策やその組み合わせの選択において欠かすことができない。

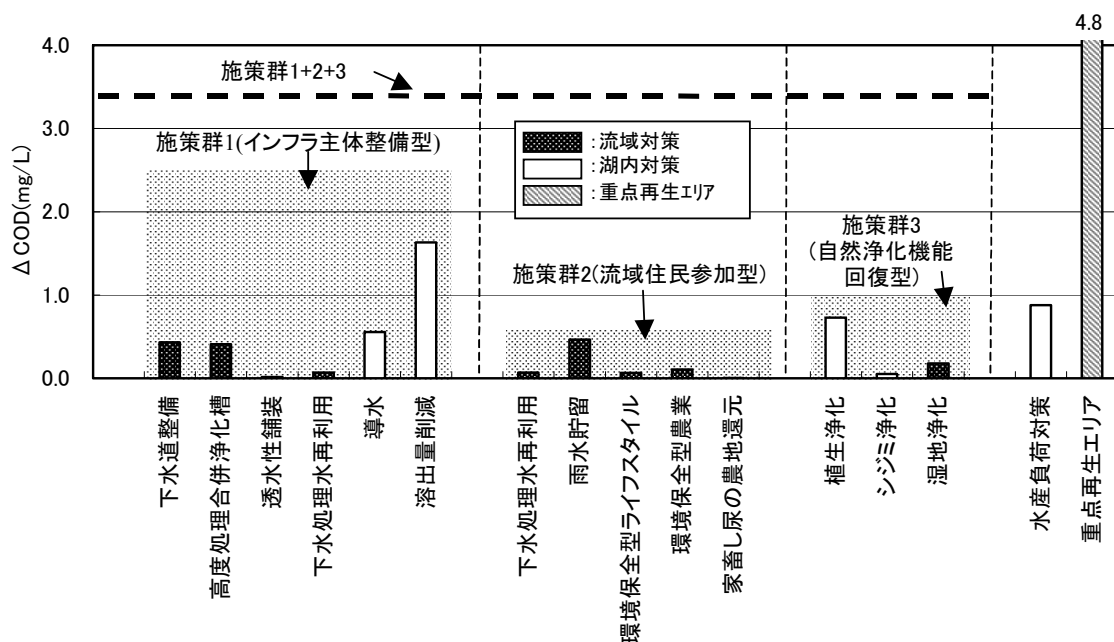


図-11 湖心の平均水質における種々の施策条件による感度分析結果
(現況(計算値: COD 6.9 mg/l)との差分)

4. 3 東京湾流域における施策群の実施効果

表-5に基づき東京湾流域水物質循環モデルを用いて計算を行った。計算結果から、東京湾に流入する全河川を対象に流量で重み付け平均した水質を求め（以後、「平均水質」と呼ぶ）、各施策（群）の実施による現況からの改善効果として図-12にまとめた。

排出負荷量の6割を生活排水で占める東京湾流域では、合流改善や下水の高度処理化、高度処理合併浄化槽の整備など生活排水対策の効果が相対的に大きい傾向にあることが把握できる。生活排水対策につながる非ハード的対策（下水処理場への負担を減らすことを含む）、すなわち排水量や排出負荷量の削減を流域住民自らが実践することの重要性も計算結果に現れている。

施策(群)の組合せ効果（各施策を包含する施策群単位の棒グラフにより表示）を見ると、複数の施策の実施により、効果が着実に増大することが確認できる。このことは、異なる施策群を重ねることについても言える（図-12では、施策群1と2を合わせて実施した場合、施策群1、2、3を合わせて実施した場合も効果の計算値が示されている）。以上のことは、単独の施策(群)では目的に達しない場合に、施策(群)の組み合わせ実施を進めることの重要性を改めて示すものである。

表-5 東京湾水物質循環モデルでの設定内容

	水環境政策
施策群 1	下水道の整備: 下水処理計画区域の全域に下水道整備を行う
	合流改善: 日雨量25mm(現況5mm)以下までは処理排水を排出
	下水の高度処理化: 処理場からの排出負荷量をBOD,COD,TNは8.0(mg/l), TPは0.4(mg/l)と設定
	単独浄化槽の合併処理化: 下水道整備予定外の地域全体について、単独浄化人口を全て合併浄化人口に転換
施策群 2	高度処理合併浄化槽整備: 下水道整備予定外の地域全域に高度処理合併浄化槽を整備(排出負荷量はBOD,COD,TNは2.5g/人日, TPは0.25g/人日)
	透水性・保水性舗装整備: 市街地メッシュのうち幹線道路面積について表層タンクのパラメータを畑・荒地の値を設定する
	環境保全型ライフスタイルの実践: 全住民が環境保全型ライフスタイルを実行することにより排水量が36%削減されると設定。また生活雑排水未処理人口の生活雑排水からBOD,CODは28%, TNは30%, TPは20%の削減
	環境保全型農業: 環境保全型農業の推進により田畑への施肥量を削減し、作物の生長に必要な分以外を100%削減すると設定
	下水処理水の再利用: 全下水処理水の10%を生活用水として再利用することで生活用水取水量と排水量を削減
施策群 3	家畜し尿の農地還元: 全家畜し尿を農地に還元することで家畜由来の負荷量を100%削減すると設定
	各戸雨水貯留・浸透: 全家庭の屋根全体(建坪率)に貯留浸透施設を設置し表面流出を抑制(市街地メッシュのうち宅地用地面積について表層タンクのパラメータを畑・荒地の値を設定)
	市街地の緑地化: 市街地メッシュの3割と荒川、多摩川の河道メッシュを緑地化(土地利用を「森林」に設定)
	調整池の整備: 市街地メッシュのうち公共施設、中高層住宅地について雨水の流出を一時貯留させる調整池を設定(600m ³ /ha)

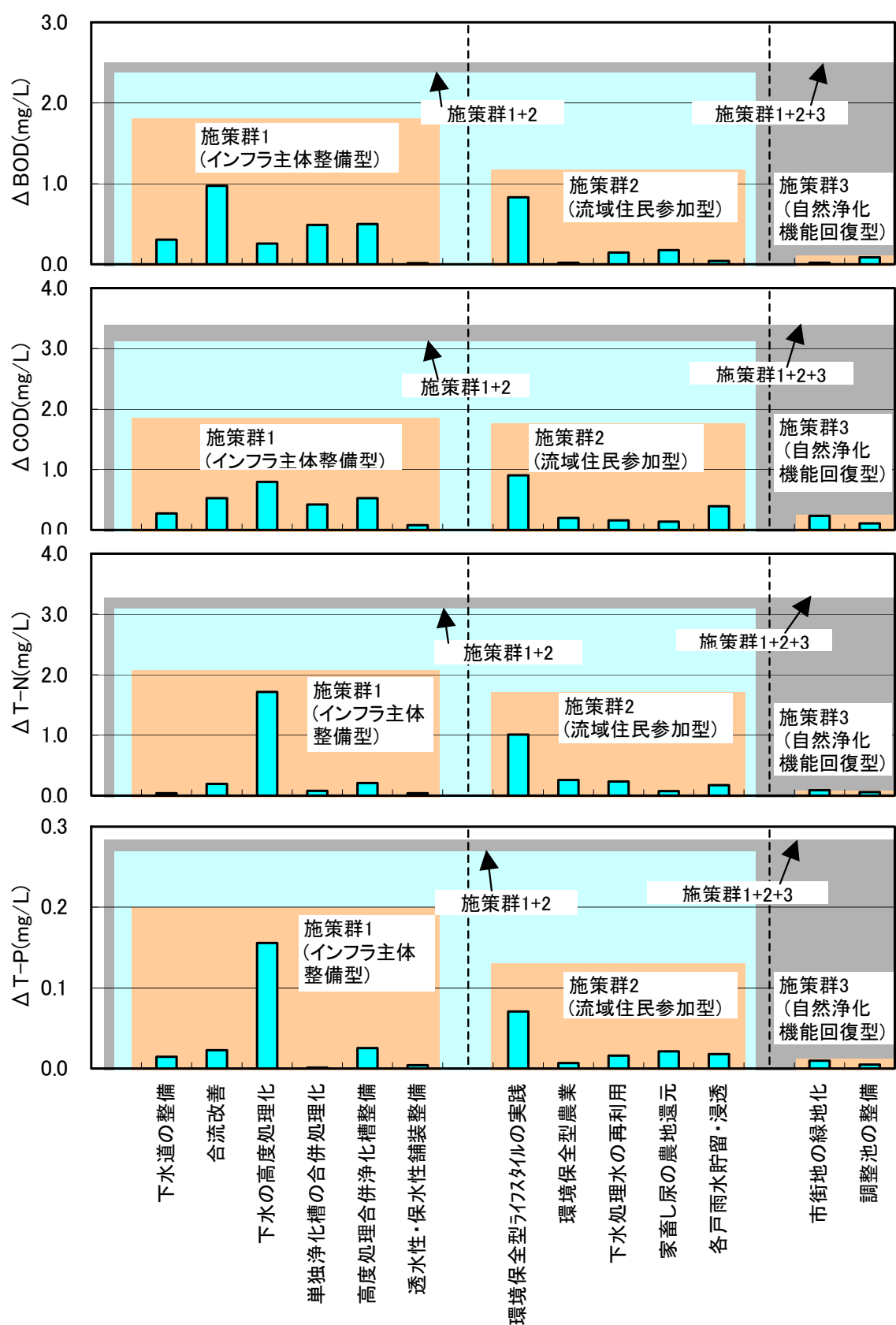


図-12 東京湾流入河川の平均水質に関する施策(群)の実施効果 (現況との差分)
 (現況(計算値): BOD 4.3 mg/l, COD 6.9 mg/l, T-N 5.8 mg/l, T-P 0.46 mg/l)

5. モデルを活用した次なる研究展開

5. 1 モデル適用の利点と課題

陸域（流域）と水域を統合した水物質循環モデルの効用は、全体状況の把握が容易になることである。その代表例は図-11・12 であり、それぞれの施策やそれらの組み合わせの効果を横並びで検討できることから、目標達成の観点からの各施策の重要性がわかりやすくなる。

また、流域条件の変更や種々の施策の設定が比較的容易であるという本モデルおよびソフトの特徴を活かすことで、様々な条件下での計算や表示、比較を機動的に行い、問題の構図や各施策の特長の理解増進に役立てるという使い方も可能である。このことは、冒頭に述べた多様な主体による総合的な取り組みに向けた合意形成や結集を促す際の支援になると期待される。

一方、モデルの精度や信頼性に関する限界をどう扱うかが大きな課題として依然残っている。閉鎖性水域の水質形成機構は複雑であり、例えば、霞ヶ浦では、湖水の白濁化と水質の関係や底泥溶出メカニズム等、新たな現象が注目されている²¹⁾。22)。現象解明に基づくモデル自体の精度向上を図ることの重要性は言うまでもないが、ここで扱っているような多くの過程と支配要因が入り組んだ環境問題特有の複雑な現象については、より適切な施策実行への支援という観点から、その時々で実用性のあるモデルを合理的に使いこなすというアプローチも同時に重視されるべきであろう。

たとえば、構造の異なるモデルを用いて施策効果を検証し、これにより施策効果の幅を織り込んだ（大きなはずれの無い）施策を選択するという現実的な戦略に役立てることも考えられる。また、施策効果の計算結果に大きな違いをもたらすパラメータや条件を見出すことで、目標達成戦略を立てる上で特に重要な現象解明、モデル化、モニタリングなどのターゲットを客観的に絞ることができる。

さらに、モデルから算出される結果の意味を表現する部分も今後重要になっていく。本論のモデルで言えば、COD 削減値などの水質改善度が評価に用いる代表的な出力であるが、水環境の改善や生物多様性の回復、水物質循環系の改善は、それだけで評価できるものではない。また、それは地域住民にとっても必ずしも理解しやすい指標とは言えない。どの程度水質が向上すればどういう環境が現出されるのかを身近に感じられるように表現することが重要である。

また、長期にわたる環境変遷をモデルでどのように表現していくかも重要な課題であろう。湖沼等の水環境変化は、その“蓄積性”から、改善プロセスも含め長期にわたることが一般的である。大局的に大きな誤りのないよう施策群を方向付けしていくという観点からは、水環境の悪化以前から現在に至る変化を再現するシミュレーションモデルが必要である。しかし、現状の水物質循環モデルは比較的短期の事象を対象にしており、物質のストックについて十分表現できるものになっていない。また、水質－低次生態系モデルについても数十年前の現象が扱えるのかという

課題がある．本論では便宜的なやり方で過去と現在を比較したが，その妥当性も含め，長期的な環境変化の分析・予測に対するモデル適用のあり方を検討することも重要と考えられる．

5. 2 今後の展開

水物質循環モデルの開発により閉鎖性水域とその流域圏の水環境を改善するための活動・施策と，その再生像（水量・水質として）を提示することが可能になった．しかし，水物質循環の健全化に向けた取り組みを進める過程において，施策実施のための合意形成を円滑に行い，様々な主体の環境施策・環境活動を行っていくことが，公的負担を少なくしつつ効果的な環境再生を行う手法といえる．しかし，多様な関係主体が，それぞれの価値観で行動を起こすには，なおいくつかのハードルがある．

例えば，①有機汚濁の減少などの水質指標の変化と，それぞれの主体が積極的に行動する契機となる事象（例えば水質の改善が水域生態系の回復にどのように貢献するかなど）とが直接どう結びつくのか明示されにくいとため，自発的な行動に繋がらない，②環境再生の目標を過去に求めても，世代間の意識の違いや，実現性の問題から，共感できる目標になりにくい，③その施策の意義は認めるが，なるべく自分は経済的や物理的な負担はしたくない，少なくとも不公平に自分が負担する手法では賛成できない，などの問題である．このような問題を解決するには，一つの施

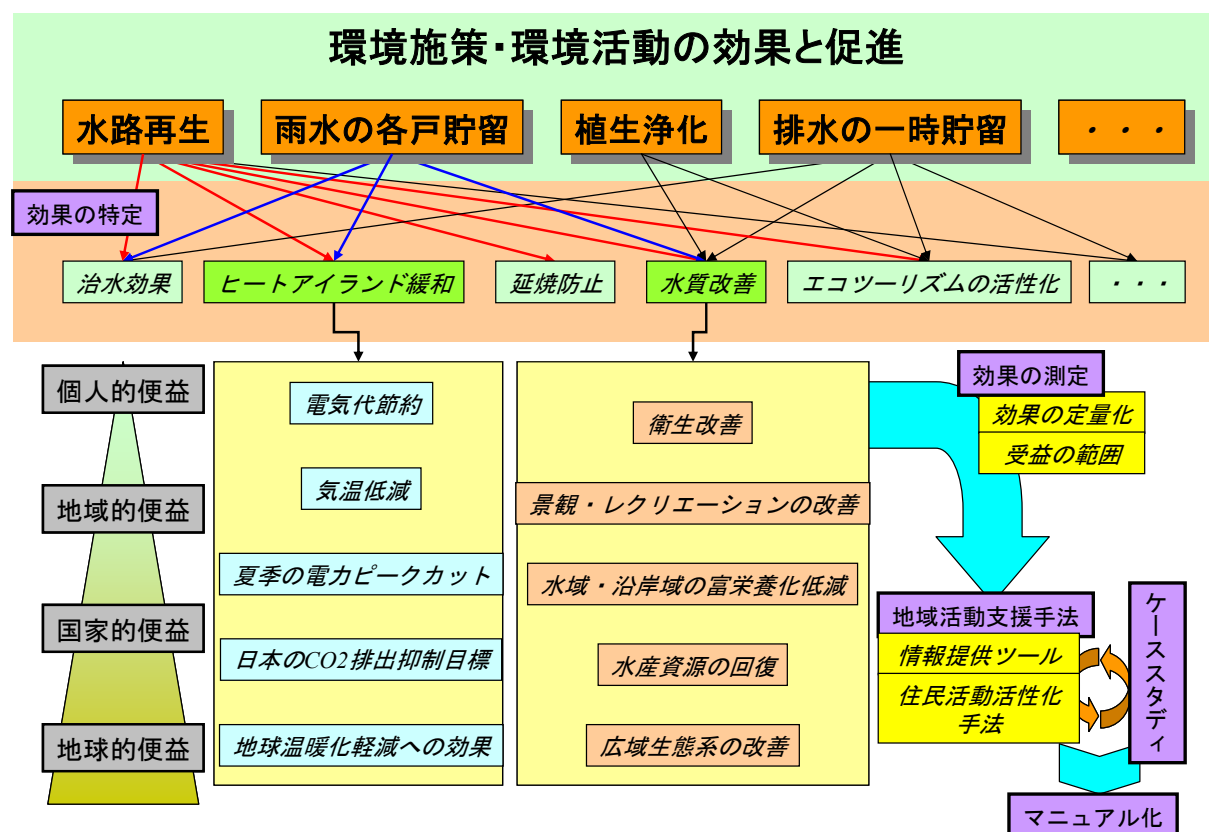
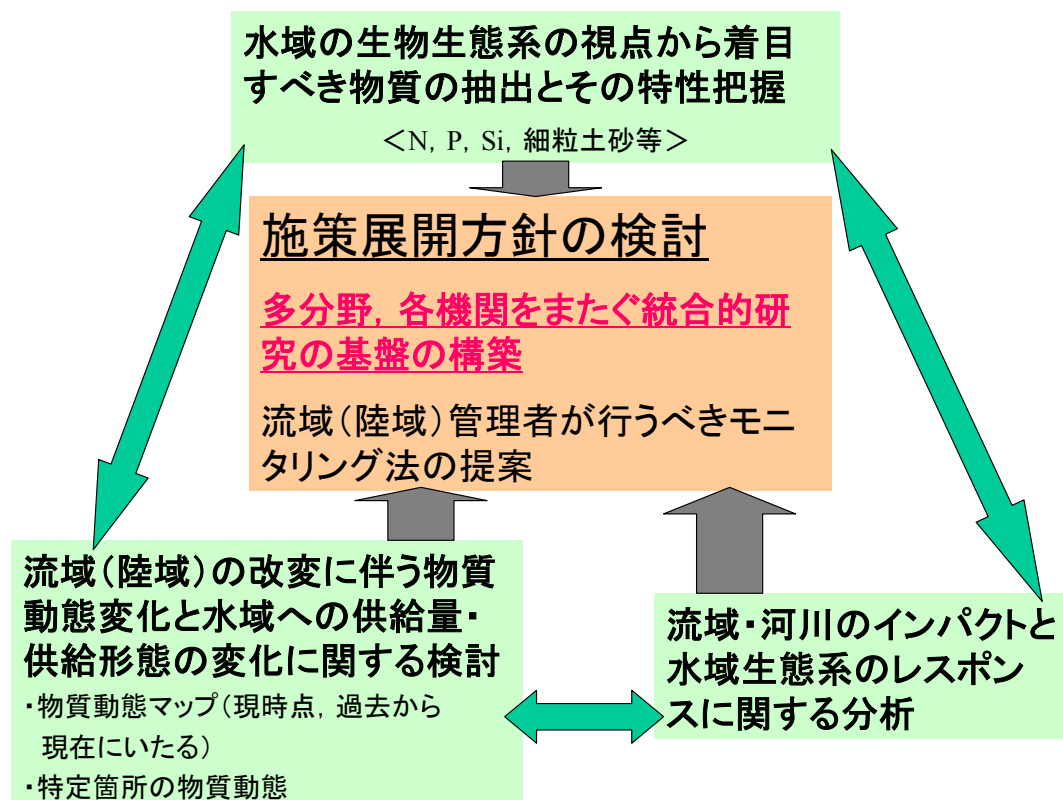


図-13 地域活動と協働した環境再生

策や地域の活動がいくつもの環境改善効果を有し、さらに個人規模から地球規模までの様々なレベルの効果があることを分かりやすく表現することが求められる。またそのための経済的、物理的負担も的確に提示し、それらを踏まえた合意形成をはかる必要がある。この具体の地域活動・施策を活性化し、行政施策と協働して効率的に持続していくための仕組みの研究を進めることが水環境の改善に向けた実践において必要である（図－13）。

一方、近年顕在化している流域からの水と物質の影響を強く受ける閉鎖性水域や沿岸海域に関して、水環境の悪化や生態系の異変（水産資源の減少、赤潮、磯焼けなど）が指摘されている。その主要な原因の1つが、国土利用形態の変化に伴う流域水循環を媒体とした物質動態の変化にあり、またそれは有機汚濁物質や栄養塩のうちN、Pの過剰供給という従来の枠組みだけではとらえられないとの仮説が注目されている²³⁾。このため、従来十分調査されて来なかったシリカ、微細土砂等に焦点を当て、流域から沿岸域にわたる全体的な物質動態を観測・分析し、林相の変化・都市化・農地整備などの土地利用変化やダム・下水道等の施設設置、水利用の高度化などが物質動態に与える影響とそのメカニズムを解明しようとする研究への取り組みを、広範な分野にわたる研究者とともに始めたところである（図－14）。海に囲まれ、多くの閉鎖性水域を持つ我が国にとって水域の生態系の保全は重要であり、これに大きく関わる物質動態についてさらに研究を推進し、国土管理施策に反映させていきたい。



図－14 流域変化が水域に与える影響

参考文献

- 1) 千葉県：印旛沼流域水循環健全化緊急行動計画書，印旛沼再生～恵みの沼をふたたび～，2004.
- 2) 鶴見川とその流域の再生－流域水マスタープラン策定に向けた提言－，2002.
- 3) 福田晴耕，藤田光一，伊藤弘之，長野幸司，小路剛志，安間智之：自然共生型流域圏再生のための東京湾とその流域における政策シナリオの検討，第33回環境システム研究発表会講演集，2005 (印刷中).
- 4) 藤田光一，伊藤弘之，小路剛志，安間智之：水環境問題解決への水物質循環モデル適用の試みとその課題，土木学会水工学委員会河川部会，河川技術論文集，vol.11，pp59-64，2005.
- 5) 藤田光一：自然共生型の流域圏再生－その実行に向けて，雑誌「河川」，No.697，pp11-14，2004.
- 6) 水資源開発公団霞ヶ浦開発事業建設部：霞ヶ浦開発事業誌，pp.73-74，98-102，105，596-597，1996.
- 7) 茨城県生活環境部霞ヶ浦対策課：第4期の霞ヶ浦に係る湖沼水質保全計画策定関係資料集，2004.
- 8) (財) 茨城県科学技術振興財団：霞ヶ浦水質浄化プロジェクト，<http://www.i-step.org/kasumi/>.
- 9) 国土交通省 霞ヶ浦河川事務所：霞ヶ浦底質調査業務報告書，2003.
- 10) 国土交通省 霞ヶ浦河川事務所：北浦，常陸利根川底質調査業務報告書，2003.
- 11) 田畑真佐子，加藤聡子，川村晶，鈴木潤三，鈴木静夫：ヨシ植栽水路における河川水中の窒素・リンの除去効果，水環境学会誌19(4)，pp.331-338，1996.
- 12) 田中弥太郎：内湾底泥をめぐる物質収支の動態解明に関する研究：5年間の研究成果，東海区水研，南西海区水研，養殖研，水産大学校，pp.299，1983.
- 13) 藤田光一，伊藤弘之，小路剛志，安間智之：GIS，流域水物質循環モデルを活用した水政策検討，土木技術資料，46-7，pp.20-25，2004.
- 14) 国土交通省港湾局，環境省自然環境局編：干潟ネットワークの再生に向けて～東京湾の干潟等の生態系再生研究会報告書～，pp22-23，2004.
- 15) 中央環境審議会：第6次水質総量規制の在り方について(答申)，2005.
<http://www.env.go.jp/council/toshin/t097-h1703.html>
- 16) 建設省関東地方整備局，東京湾流域別下水道整備総合計画検討委員会：東京湾流域別下水道整備総合計画に関する基本方針策定調査報告書，1997.
- 17) 吉野文雄，吉谷純一，堀内輝亮：分布型流出モデルの開発と実流域への適用，土木技術資料，Vol.32-10，pp54-59，1990.
- 18) 安陪和雄，大八木豊，辻倉裕喜，安田佳哉：分布型流出モデルの広域的適用，水工学論文集，第46巻，pp247-252，2002.

- 19) 辻倉裕喜，安陪和雄，大八木豊，田中伸治：湖沼流域管理のための総合的な水循環・物質流動モデルの構築，水工学論文集，第47巻，pp217-222，2003.
- 20) 高島葉二，坂本正義：霞ヶ浦湖水によるヤマトシジミの飼育，茨城県内水面水産試験場調査研究報告第38号，pp.42-55，2003.
- 21) 関智弥，福島武彦，今井章雄，松重一夫：霞ヶ浦における濁度上昇要因，第39回 日本水環境学会年会講演集，pp.466，2005.
- 22) 松重一夫，今井章雄，小松一弘：霞ヶ浦長期モニタリングにおける水質変動，第39回 日本水環境学会年会講演集，pp.469，2005.
- 23) (財) 河川環境管理財団：栄養塩類濃度が河川水質環境に及ぼす影響に関する研究， pp.7-10，2003.

**建築物のライフサイクルを通じた
CO₂及び廃棄物排出の低減に向けた取り組み**

住 宅 研 究 部 長

西 山 功

建築物のライフサイクルを通じた CO₂ 及び廃棄物排出の低減に向けた取り組み

住宅研究部長 西山功

1. はじめに

総合技術開発プロジェクト「持続可能な社会構築を目指した建築性能評価・対策技術の開発（SB 総プロ）」（平成 16～18 年度）においては、住宅研究部が中心となり、建築物の建設～運用～改修・除却までの概ねすべての活動（ライフサイクル）を通じて排出が予想される二酸化炭素（CO₂）及び廃棄物の定量評価とその削減に向けた技術開発の取り組みを行っている。本稿では、1）環境問題としての建築由来の CO₂ 及び廃棄物排出、2）国土交通省等で実施されている施策、3）排出削減のための既往の技術開発等、4）SB 総プロにおける技術開発、について記述している。

2. 環境問題としての建築由来の CO₂ 及び廃棄物排出

地球温暖化や資源エネルギーの枯渇など地球規模に拡大した環境問題を背景として、良好な環境の維持と持続的な経済成長を両立させる社会経済システムの確立が急務となっている。

特に大量生産・大量消費・大量廃棄型の経済発展とともに増大してきた CO₂ 及び廃棄物の排出量削減は、持続型社会・循環型社会を目指す上で大きな課題であり、このために、建築物のライフサイクルを通じた環境負荷（CO₂ と廃棄物）を適切に評価し、最適な低減技術の選択がなされるための社会基盤確立に向けた取り組みが重要となっている。

2. 1 CO₂ 排出量の削減

2. 1. 1 CO₂ 排出の現状

2005 年 2 月、京都議定書が発効し、4 月には「地球温暖化対策の推進に関する法律」に基づいて「京都議定書目標達成計画」「政府の実行計画」が閣議決定された。わが国の温室効果ガス排出量（CO₂ 換算）排出量は、京都議定書のベースとなる 1990 年において約 12 億トンであり、アメリカ、中国、ロシアに次ぐ世界第 4 位、国民 1 人当たりでは世界平均の約 2 倍の温室効果ガスを排出していることになる。京都議定書では、温室効果ガスの排出量を 2008～2012 年の間に 1990 年比で 6%削減することが求められているが、2002 年度におけるわが国の温室効果ガスの総排出量は 1990 年比 7.6%増であり、削減目標との差は 13.6%となっている。このうち家庭やオフィスなどの民生部門については、1990 年比で 33.0%増加しており、2010 年度に 1990 年比+10.7%に抑えることが目標として示されている。

2. 1. 2 建築由来の CO₂ 排出の現状

図 1 に示すように、住宅及び業務ビル用の資機材製造・建設・改修・運用までの建築関連 CO₂ 排出量は、わが国の全 CO₂ 排出量の約 3 分の 1 を占めると推計され、そのおよそ半分が業務ビルに関連して発生している。また、運用段階のエネルギー消費による排出量の比率が高いことが特徴となっている。

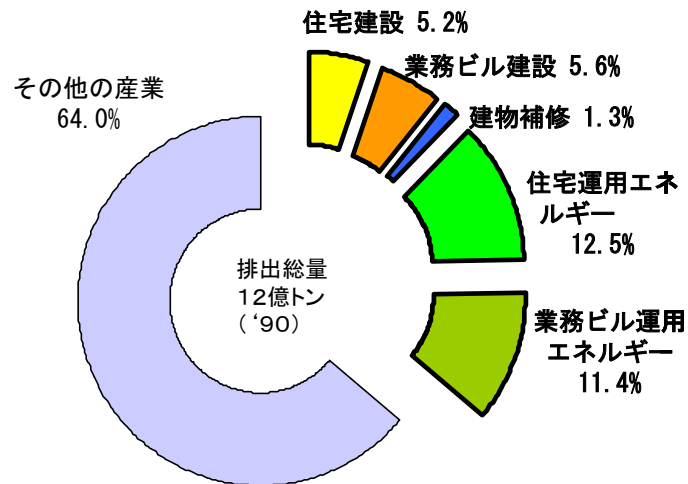


図1 わが国の建築関連 CO₂ 排出量の割合（秋山宏、伊香賀俊治、木俣信行：地球環境問題への建築学会の取り組みと展望、建築雑誌 Vol.114、No.1444、日本建築学会、1999.10）

2. 1. 3 建築由来の CO₂ 排出の低減に何が求められているか？

前述の「京都議定書目標達成計画」では、建築分野（オフィス店舗等）の CO₂ に対する対策として運用段階のエネルギー消費に着目し、「省エネ法によるエネルギー管理の徹底」「建築物の省エネ性能の向上」「BEMS（ビルエネルギー管理システム）の普及」、また住宅部門（家庭）は「住宅の省エネ性能の向上」、「HEMS（住宅エネルギー管理システム）の普及」等が対策方法としてあげられている。しかし、現在までのところ、各種の省エネ技術の開発にもかかわらず、建築由来の CO₂ 排出量は年々増加し、目標達成は難しい状況にある。

このためには、建築由来の CO₂ 排出量の総量のみならず、空調・照明・給湯などの CO₂ 排出量内訳を正確に把握し、それぞれに対して CO₂ 排出量削減のための技術の普及とその効果について検討を行う必要がある。そのため、建築におけるエネルギー消費データの解析や、省エネ法に基づく PAL/CEC（PAL は建物の外皮構造の性能に関する判断指標、CEC は建築設備の性能に関する判断指標）の算定構造などをベースとした LCCO₂（ライフサイクル CO₂）推定手法の確立が必要となる。この推定手法を用いることで CO₂ 排出量低減効果を一定精度で評価することが可能となり、各種の省エネ技術を客観的に評価できる。また、自然エネルギーの直接的あるいは間接的な利用など新技術の開発も必要となる。

2. 2 建設廃棄物量の削減

2. 2. 1 建設廃棄物の現状と処分場能力・不法投棄

わが国における廃棄物の総排出量のうち約 9 割（年間約 4 億トン）が産業廃棄物であり、その約 1 割が最終処分されている。このうち建設廃棄物が占める割合は、排出量で産業廃棄物全体の約 2 割、最終処分量で約 3 割である。また、環境省の調査によれば、産業廃棄物の最終処分場の残余年数は、平成 14 年 4 月の時点でわずか 4.3 年分に過ぎない。さらに、不法投棄量の多くは建設廃棄物が占めており、建設廃棄物の 3R（リデュース・リユース・リサイクル）を促し、建築活動そのものから発生する廃棄物量を抑制するための有効な対策が幅広く検討されなければならないという現状にある。

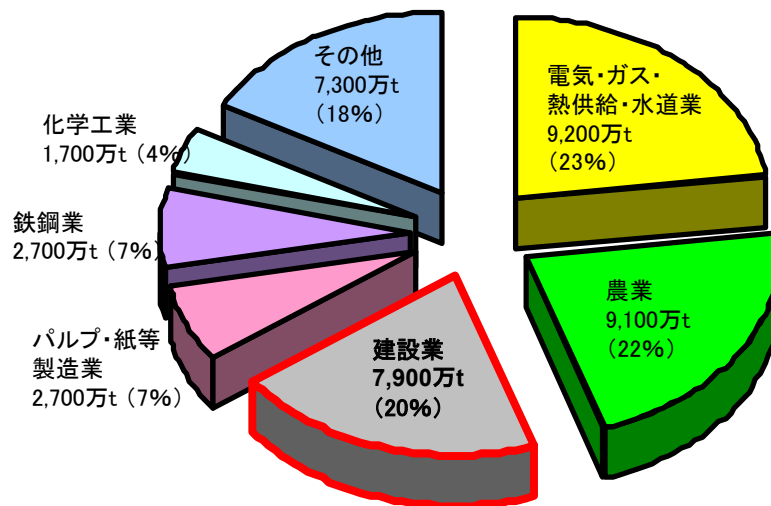


図2 わが国における産業廃棄物の内訳（平成12年度実績、環境省調査）

2.2.2 各種建設材料とリサイクル

平成14年5月には「建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律（建設リサイクル法）」が完全施行され、コンクリート、アスファルト、木材等の特定建設資材については分別・再資源化が義務づけられた。これら特定建設資材については目標再資源化率が定められており、再資源化を促すための関連技術を早急に整備する必要があるとされたが、平成14年の建設副産物実態調査結果によれば、各種建設資材の再資源化率はコンクリート塊が97.5%、アスファルト・コンクリート塊が98.7%と目標値を達成している一方、建設発生木材は89.2%（再資源化率61.0%＋縮減率（焼却・乾燥等）28.2%）、建設混合廃棄物に至っては36.0%（再資源化率17.2%＋縮減率18.8%）と材料毎にリサイクルの実態は大きくばらついている。

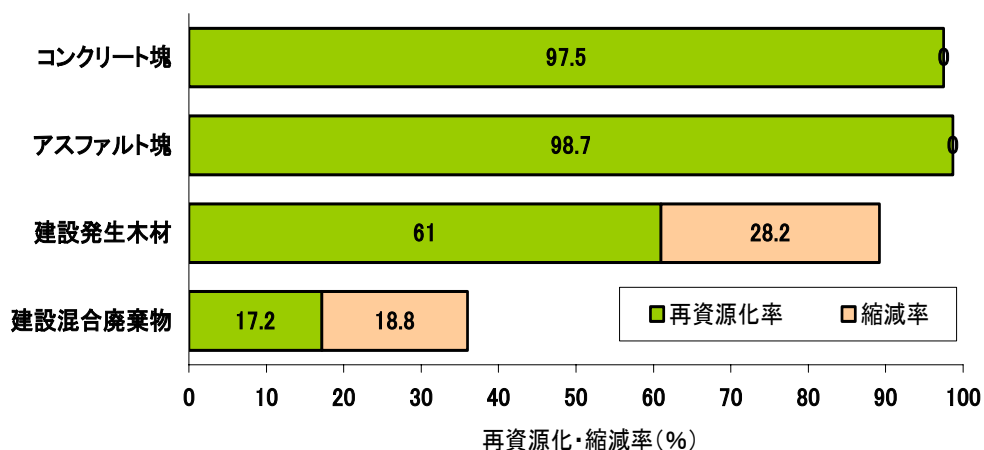


図3 各種建設材料のリサイクル率（平成14年度、国土交通省）

2. 2. 3 建築における廃棄物排出の削減に何が求められているか？

「建設リサイクル推進計画 2002」において、「建設リサイクルの量から質への転換」が基本理念として挙げられている。より質の高い適切なリサイクルを可能とするためには、個々の建築物に投入される多種多様な材料（資源）を建設段階から改修・解体までのライフサイクルにわたって定量的に記述・評価することによって、その実態を予め把握しておく必要がある。そのことによって、廃棄段階における各種除却材（再生資源）に対応した適切なリサイクル技術の選択が可能となり、また、新たなリサイクル技術の開発を促すのであり、その基礎となる簡便で精度の高い LCW（建築物のライフサイクルにおける廃棄物）算出手法（データベース含む）が求められている他、ストックの有効利用により除却を行わない技術が求められている。

3. 国土交通省等で実施されている施策

3. 1 エネルギーの使用の合理化に関する法律(省エネ法)

「エネルギーの使用の合理化に関する法律（昭和 54 年制定、以下「省エネ法」）」での建築物に係る措置としては、性能規定化後では、「建築物に係るエネルギーの使用の合理化に関する建築主の判断の基準（平成 11 年通商産業省・建設省告示第 1 号）」により、「建築物の外壁、窓等を通しての熱の損失の防止のための措置（年間熱負荷係数（PAL）の基準）」及び「建築物に設ける空気調和設備その他の建築設備に係るエネルギーの効率的利用のための措置（各種設備のエネルギー消費係数（CEC）の基準）」が 2000m²以上の建築物を主対象として示されている。当初、事務所のみが対象とされたが、物販店舗とホテル・旅館などが順次追加され、平成 5 年の省エネ法の改正では、病院・診療所、学校も新たに対象に追加された。また、空調設備機器以外についても、機械換気設備、給湯設備、照明設備、昇降機も対象に追加されている。これにより、2000m²以上の非住宅建築物の省エネの効果はしだいにあがってきている。一方、住宅の建築主や建築材料の製造業者に対しては、推奨基準として指針が公表され、住宅では住宅金融公庫の割増融資制度や住宅性能表示における等級表示と相まって普及が図られている。また、ストック対策の一環として大規模修繕等にも適用を広げる検討がなされている。

3. 2 建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律(建設リサイクル法)

建設廃棄物の再資源化に関しては、平成 5 年に「建設副産物適正処理推進要綱」が出され、「建設副産物対策行動計画（リサイクルプラン 21）」、「建設リサイクル推進計画' 97」、「建設リサイクルガイドライン」等の施策を経て、平成 12 年 5 月に「建設リサイクル法」が公布された。建設リサイクル法は、①分別解体等及び再資源化等の義務付け、②発注者・受注者間の契約の手続きの整備、③解体工事業者の登録制度の創設を柱としたもので、「建設リサイクル法基本方針」、「建設リサイクル推進計画 2002」など具体的な方針・目標の設定により一定の成果をあげている。しかしながら、現在の施行状況を検証した上で、より合理的な循環型社会経済システムを構築するために、特定建設資材の追加なども含め、法改正を視野に入れた検討が必要になってきている。

3. 3 住宅の品質確保の促進等に関する法律(住宅性能表示)

「住宅の品質確保の促進等に関する法律（平成 11 年制定）」は、住宅の品質確保の促進、住宅購入者等の利益の保護、住宅に係る紛争の迅速かつ適正な解決を目的として制定され、この法律に基づき「日本住宅性能表示基準及び評価方法基準（以後「住宅性能表示」）」が、当初、新築住宅を対象として構造安定、火災時安全、劣化軽減、維持管理配慮、温熱環境、空気環境、光・視環境、音環境、高齢者等配慮、などの各種住宅性能表示項目について示された。その後、既存住宅へ適用を拡大するとともに、性能評価項目として新たに防犯などが加えられている。住宅性能表示制度により、温熱環境、空気環境、光・視環境など CO₂ 排出に係わる性能や劣化軽減、維持管理配慮など廃棄物排出に係わる性能が評価され、その低減に貢献している。

4. 建築由来の CO₂ 及び廃棄物排出の削減に向けた既往の技術開発等

建築物を戸建とビルとに分類し、それぞれの CO₂ 排出及び廃棄物排出を低減するための技術開発や施策などを整理して示す。

主として戸建の住宅の CO₂ 排出に関しては、市場整備という観点から住宅性能表示があり、建設時や運用時についてはエネルギー自立循環型建築・都市システム技術の開発や既存住宅の省エネルギー性能向上支援技術に関する研究が行われている。また、廃棄物排出に関しては、木質系材料に限定して建設、運用途中の改修、解体における減量化やリサイクル性の向上技術に関する研究が行われている他、建設リサイクル法において解体材の分別などのリサイクルの網がかけられている。これに対して、ビルの CO₂ 排出に関しては、市場整備という観点から CASBEE（総合環境性能評価システム: Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency）があり、建設から改修における CO₂ 排出の低減のために省エネ法が規定されている他、運用時の省エネとの観点から個別のビルを対象として ESCO 事業が拡大しつつある。また、廃棄物排出に関しては、CASBEE が市場整備という点で存在し、建設リサイクル法が副資材及び解体材の分別などのリサイクルとして存在する。

後述する SB 総プロでは、ビルを主たる検討対象とし、CO₂ 排出に関して定量化をすすめるとともに、廃棄物排出に関しては資材の投入から解体に伴う排出までの全体のマネジメントを定量的に行うものである。

	負荷・排出	市場整備	建設時	運用時 (含、改修)	解体時
戸建	CO ₂	性能表示	省エネ法 自立循環総プロ	既存住宅省エネ*	
	廃棄物		木質系建築廃棄物発生抑制技術 建設リサイクル法		
ビル	CO ₂	CASBEE 建築物総合環境 性能評価システム	省エネ法 → 大規模修繕等に拡大 ESCO事業	SB総プロ (持続可能な社会構築を目指した建築性能評価・対策技術)	
	廃棄物		建設リサイクル法(特定建設資材)		

* 国総研で平成17年度から実施されている「既存住宅の省エネルギー性能向上支援技術に関する研究」

図4 既往の技術開発等におけるSB総プロの位置づけ

4.1 建築物総合環境性能評価システム(CASBEE)

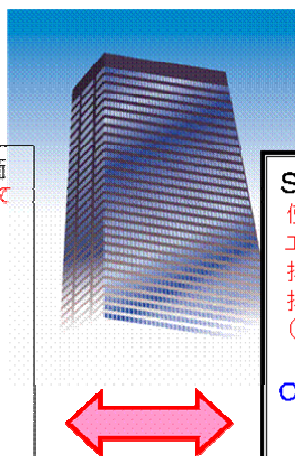
建築物の環境性能評価として、CASBEE や官庁営繕部の総合環境性能評価に関する研究開発や日本建築学会等における LCA に関する研究がある。CASBEE 等では、建築物の環境への影響を総合的に評価・表示することを目的として、環境性能評価ツール（ラベリングツール）の開発が進められている。CASBEE は、当初、新築及び既存建築物を適用対象とし、その後、改修建築物へ、現在はその適用範囲を街区へと拡大され、このツールによる評価・表示は、名古屋市や大阪市などの自治体の環境行政・建築行政の現場で採用されている他、個別の建築物の環境性能把握に利用が拡大している。

CASBEE総合評価

環境ラベリングによる
性能表示(トップダウン推奨)

CASBEEにおける総合性能評価
項目ごとにエキスパートジャッジに基づいて
点数化し、総合スコアを算出
(定性的評価、相対評価)
サービス性能
機能性、心理性、信頼性、ゆとり・・・
室内環境
音、温熱、光、空気質・・・
室外環境
生物環境保全、緑地み配慮、地域性・・・
エネルギー
熱負荷抑制、自然エネルギー利用、
設備システム効率・・・
資源・マテリアル
資源再利用、非最終処分量、水資源・・・
敷地外環境
大気汚染、騒音、風害、日照障害・・・

体系的総合評価手法



客観的評価手法の
提供

SB総プロ評価

排出総量の算出による
負荷量削減(ボトムアップ)

SB総プロにおける性能評価
使用材料・部品の投入量、
エネルギー消費量、廃棄物
排出量など、物理量に基づいて
排出負荷総量を算出
(定量評価、絶対評価)

CO₂排出負荷
熱負荷抑制、自然エネルギー利用、
設備システム効率・・・

廃棄物排出負荷
資源再利用、非最終処分量、

客観的定量評価手法

図5 CASBEE と SB 総プロの関係

4. 2 エネルギー自立循環型建築・都市システム技術の開発

わが国のエネルギー消費のうち家庭部門の占める割合（13.1%）は、産業（48%）や運輸部門（24%）と比較すると小さいが、伸び率が大きいために省エネルギー対策が最も強く求められている分野のひとつである。一方で、居住の質的向上も求められており、省エネルギー化と質的向上の相反する課題を同時に解決する合理的な建築技術の確立と普及が求められていた。このような住宅をここでは自立循環型住宅と呼び、与えられた敷地や家族形態などの条件のもとで極力自然エネルギーを活用し、居住性や利便性を向上させつつ居住時のエネルギー消費量（CO₂排出量）を、2000年頃の標準的な住宅と比較して半減することが可能な住宅と定義し、総プロ「循環型社会及び安全な環境形成のための建築・都市基盤整備技術の開発（エネルギー自立循環型建築・都市システム技術の開発）」（平成13～16年度）等において関連技術の開発を行った。

この技術開発においては、住宅に係る様々な分野の省エネルギー技術に関する実証実験住宅を用いてそれぞれの技術の検証を行い、それぞれの技術を導入した場合のエネルギー削減効果について取りまとめた。また、汎用性が高く実用化しうると考えられる技術を優先して取り上げ、そうした技術の具体的な設計・適用方法を分かりやすく説明し、各技術を用いた場合の省エネルギー効果について評価した「自立循環型住宅への設計ガイドライン」を作成し、現在、講習会等を通じて普及に努めている。

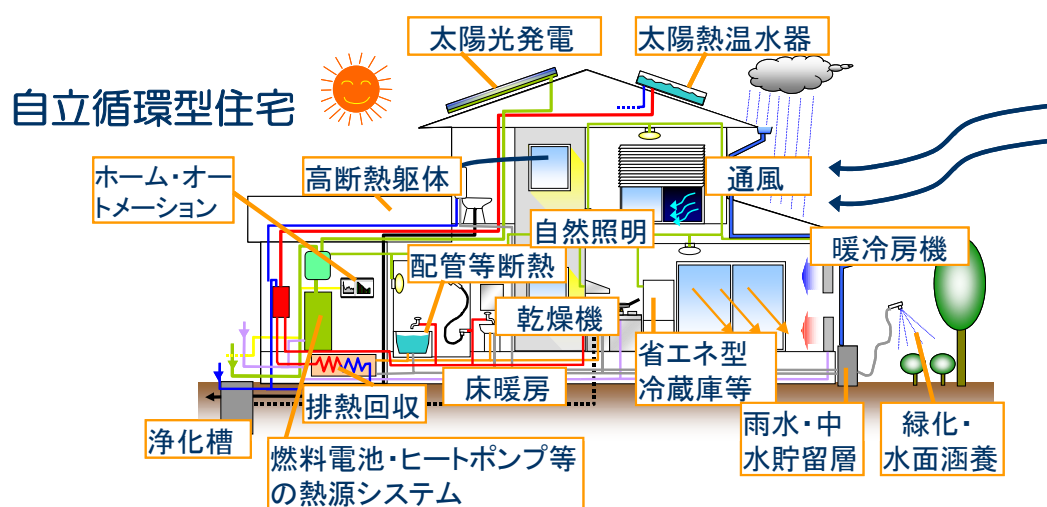


図6 自立循環住宅の概要

4. 3 既存住宅の省エネルギー性能向上支援技術に関する研究

住宅でのエネルギー消費により我が国の総CO₂排出量の13.3%が排出され、またその増加率は1990年比28.8%(2002年度)と、温暖化対策推進大綱における2010年までの削減目標マイナス2%との乖離が著しくなっている。その対策として、新築住宅(約110万戸/年)の断熱化が省エネ基準等の整備により促進されているが、一方で約5000万戸の既築住宅を対象とした躯体断熱化及び省エネルギー設備の導入も極めて重要不可欠な課題である。



図 7 既存住宅の省エネルギー性能向上支援技術に関する研究における改修のイメージ

そこで、事項立て研究「既存住宅の省エネルギー性能向上支援技術に関する研究」(H17年度～)において、既築住宅の省エネルギー性能向上目的の改修を支援するための技術体系(対象住宅及び設備の現状を的確に把握する診断手法、改修内容を施主の要望に合わせて最適化する計画手法、低コストかつ簡便な工事手法等)を整備するため、現状で不足している各種の技術開発に取り組んでいる。

4. 4 木質系建築廃棄物発生抑制技術の開発

木造建築物の解体除却時に発生する廃棄物量は年々増加する傾向にあるが、木造建築物由来の建設発生木材はリサイクル率が低迷し、その再資源化を促すための関連技術を早急に整備する必要があった。

総プロ「循環型社会及び安全な環境の形成のための建築・都市基盤整備技術の開発—木質系建築廃棄物発生抑制技術の開発」(平成12～14年度)では、解体時における廃棄物の発生抑制について設計・計画段階で配慮した木造構工法の設計・施工技術を確立すること、建築材料及び部材の合理的な再資源化技術を確立すること、技術普及のために必要な木造建築物の環境負荷評価ツールを提案すること、廃棄物の発生を抑制するための技術・政策を検証するためのモデルを開発すること、により木質系建築廃棄物の発生抑制を目的とした技術開発を行い、分別・解体・再資源化しやすい木造建築物の設計・施工事例マニュアル、解体材の再資源化技術に関する技術指針、木造建築物のマテリアルフローに係るデータと評価手法などを作成した。



図 8 木質系建築廃棄物発生抑制技術の開発

4. 5 民間による ESCO 事業などの取り組み

民間で行われている CO₂ 排出量削減に対する企業活動として ESCO 事業があげられる。ESCO 事業とは、Energy Service Company の略で、個々の建物において主に運用時のエネルギー消費量の削減のために、診断・コンサルティングを行い、施工後の運営管理により、一定の省エネルギー効果を保証するものである。また、経済産業省などでは、導入支援、金融上の助成措置および税制上の助成措置を通じて ESCO 事業の推進を図っており、事業者数も(財)省エネルギーセンターのリストでは 76 社を数えている。エネルギーの使用形態は個々のビルでその性格が異なることから、このようにミクロ視点の事業が重要となっており、更には、よりマクロ視点の総量としての CO₂ 排出量低減に効果がある対策も必要となるといえる。

5. 持続可能な社会構築を目指した建築性能評価・対策技術の開発(SB 総プロ)

5. 1 研究技術開発の内容

総プロ「持続可能な社会構築を目指した建築性能評価・対策技術の開発 (SB 総プロ)」では、建築物の環境性能項目のうち環境負荷の定量評価が可能な CO₂ 排出と廃棄物排出について、ライフサイクルにおける排出負荷総量の算出手法、評価データの整備、技術選択の設計支援技術の開発を行うことにより、建築設計における排出負荷の定量把握に基づく適切な対策技術選択を促し、建築ストック全体での負荷低減促進を目指すものであり、その概要を図 9 に示す。

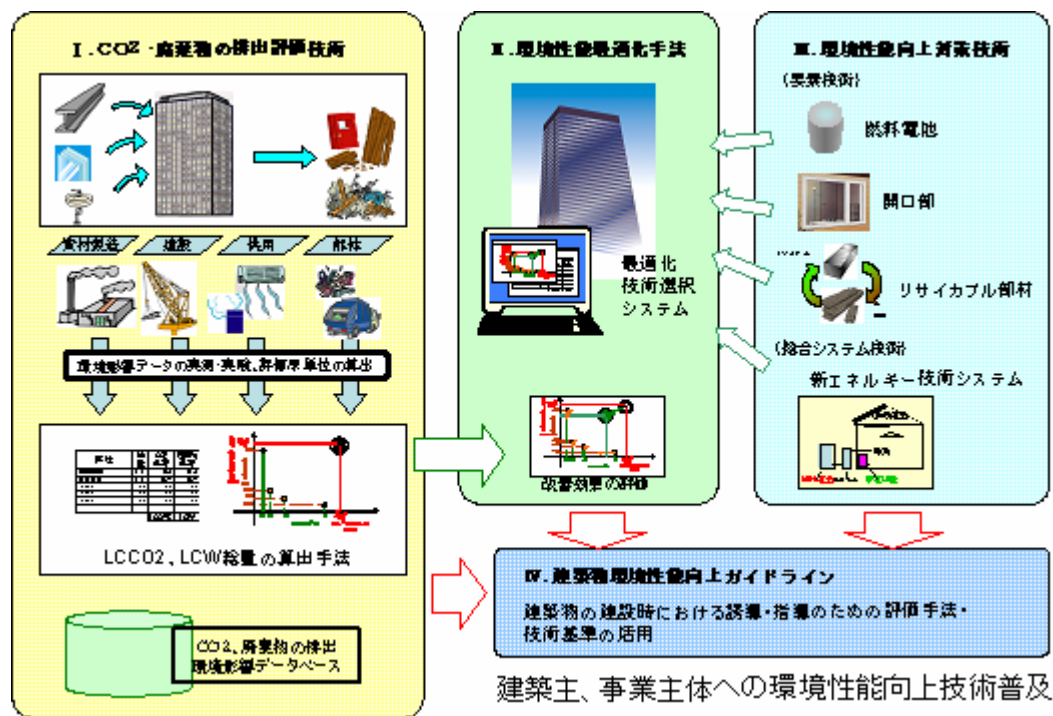


図9 SB総プロの技術開発内容の概要

具体的な技術開発内容は、下記の通りである。

(1) 排出負荷総量の算出・評価手法マニュアル及び負荷原単位データベース

設計・計画時における LCCO₂、LCW 負荷算出・評価手法のマニュアル、及び資材・建材・機器の排出負荷評価のための原単位データベースの開発

(2) 対策技術選択のための設計支援システム

LCCO₂ と LCW の負荷総量を表示し、それぞれについて達成目標値実現のための最適な技術選択を可能とする設計支援システム(3次元建築設計 CAD と連動して排出負荷量の算出ができる情報システム技術)の開発

(3) 負荷低減対策技術資料集

環境性能向上、排出負荷削減のための技術資料集(技術ライブラリ)の開発・整備

5.2 研究技術開発の体制

本総プロの技術開発にあたり、関連調査研究・技術開発の学識経験者、行政部局関係者、国総研で開発主体となる研究者をメンバーとする検討会を設置し、技術開発課題について相互の情報共有を図りながら、技術開発の方向性、留意点、プロセス、普及方策等の実施について検討を進めている。検討会における議論の他に、専門性が高く、関連分野の有識者と集中的に議論する必要がある特定の課題については、3つの部会を設置して検討を行っている。

(1) LCCO₂検討部会(主査：坂本雄三東大教授)

ライフサイクルにおける CO₂ 排出負荷の評価と対策技術の開発において、建築物を構成する設備機器の製造・施工や廃棄、使用段階のエネルギー消費に伴う CO₂ 排出の負荷算出のための評価データの収集・整備や、対策技術の開発・評価にあたって解決すべき技術的課題へ

の取り組みについて、関係分野の有識者を交えて検討する。具体的には、事務所ビルや学校、病院、店舗など、建築物の使用状況と対応したエネルギー消費の把握・分析方法や、新しい技術の CO₂ 排出負荷低減効果評価の実用性について検討する。

(2) LCW 検討部会（主査：野城智也東大生研教授）

ライフサイクルにおける廃棄物排出負荷の評価と対策技術の開発において、建築物を構成する材料・部材の資源消費量の絶対量算出や、製造・施工や廃棄に伴う廃棄物排出の負荷算出のための評価データの収集・整備、対策技術の開発・評価にあたって解決すべき技術的課題への取り組みについて、関係分野の有識者を交えて検討する。具体的には、資材組成が明らかにされていない部品・機器等を含めた資源消費量の絶対量の算出の手法や、新しい技術の廃棄物排出負荷低減効果評価の実用性について検討する。

(3) 設計支援システム検討部会（主査：小玉祐一郎神戸芸工大教授）

CO₂ と廃棄物排出の環境性能を両立する技術選択を可能とする最適化手法の開発において、建築物の新築、改修工事の設計・計画時に、建築設計 CAD と連動して環境負荷量が算出・評価できる設計支援システムの実用化や、環境性能向上のための対策技術の最適選択手法の開発にあたって解決すべき技術的課題への取り組みについて、関係分野の有識者を交えて検討する。

5. 2. 1 CO₂部会の研究

(1) 研究目的と研究概要

本部会では、LCCO₂ の検討のうち、主に非住宅について、CO₂ 排出の詳細なデータが不足しているランニング時を研究対象とし、一定の精度を有する LCCO₂ 算出法の作成を目的として、実績エネルギー消費データの解析や PAL/CEC の算定構造を基本とした推定手法の検討を行う。また各種高効率機器の導入および自然エネルギーや未利用エネルギーの積極的な活用についても評価できる形での取りまとめを行う予定である。本部会の下、以下の 3 つの SWG を組織し解析を行う。

- ・空調・換気 SWG（主査：川瀬貴晴教授…千葉大学）
- ・照明・EV・電気設備 SWG（主査：斉藤満氏…大林組）
- ・給湯・給水・SWG（主査：岩本静男教授…神奈川大学）

(2) これまでの成果の概要

設計値である PAL/CEC と実績エネルギー消費データとの比較を行うため、設備機器やエネルギー源ごとに整理された年間エネルギー消費量に関するデータの取得を開始し、IBEC の環境省エネルギー建築賞への応募物件のうち 12 件のデータが収集できた。データの取得項目の概要を以下に示す。

- ・建築の概要（用途、面積など）
- ・省エネルギー計画関連（PAL, CEC/AC, CEC/V, CEC/L, CEC/HW*）
- ・設備概要（空調方式、熱源方式、熱源容量など）
- ・エネルギー消費実績値（1）（標準的な使用状況、年間エネルギー消費量）

- ・エネルギー消費実績値（２）（電力・ガス・油別の１月ごとの消費量）
- ・エネルギー消費実績値（３）（用途別のエネルギー消費量 年積算値）
- ・エネルギー消費実績値（４）（用途別のエネルギー消費量 各月データ）

*既取得ではデータ無いが順次、データの拡充を行っている

表 1 実績値データの取得を行った建物

用 途	既取得	継続中
事務所	8（うち特に詳細 3）	3
物販店舗	2（うち特に詳細 1）	
ホテル		3
病院		1
学校		3
飲食店		
集会所		
その他	2	

（データの依頼範囲は更に拡張している）

以下に取得された実績データのうち事務所建築のエネルギー消費量の内訳の例を示す。これら例に示すように、ビルによってその使用実態が異なり、運用時のエネルギー消費量構造が複雑であることがわかる。また、ビル毎にデータの取得系統が異なるため今後の検討には、データ取得系統や建築側の情報が重要となる。

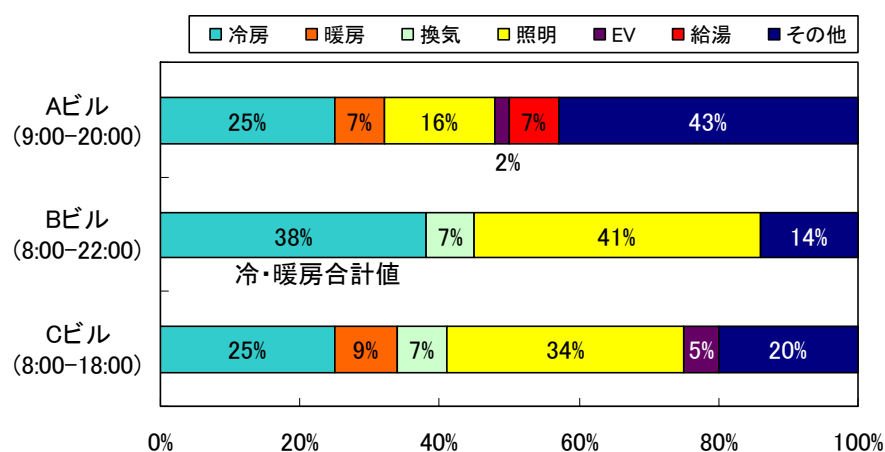


図 10 収集されたデータによる事務所ビルの電力使用量の内訳の例
ビル名後ろのかっこ内は事務所部分の標準的な使用時間

（３）今後の研究実施計画

- ・実績エネルギー消費データ取得の拡充

省エネルギー建築賞応募建物を中心に、実績エネルギー消費データを有していると思われる建築に順次データの提供をお願いする。

- ・実績エネルギー消費データの整理・解析

各 SWG における実績エネルギー消費データの解析項目に従った整理および解析を行う。整理および解析は取得データのうち CEC から設計上の年間消費エネルギーへの換算などの作業やシミュレーションを行うために必要となる入力データの整理を行う。また取得された実績エネルギー消費データのうち、BEMS の測定系統などデータ解析のために必要なヒアリングなどの追跡調査を行う。

- ・シミュレーションによる推定精度の検討および推定法確立のためのデータ拡充

BECS 等のシミュレーション手法により算出されたエネルギー消費量と実績エネルギー消費データを比較し、その推定精度の検証を行う。また検証結果の検討を行い、一定の精度が確認できれば、建物規模や設備機器の性能を変更した場合のエネルギー消費量データを作成し、推定法確立のための基礎データとする。

- ・現場における調査

各 SWG の目的に沿った現場における調査やデータの測定を行い、実績データの精度確認や、データの拡充を目的とした調査を行う。

- ・CO₂排出量推定法の検討

各 SWG において CO₂ 排出量を推定するための検討を行う。

- ・設備機器単体の性能評価方法に関する調査

環境負荷低減技術の開発目標設定の検討基礎資料とすることを目的として、建築設備等のエネルギーシステムの個々の要素技術に関する、エネルギー効率の評価方法・規格等について収集した情報を元に分析整理を行う。この調査は（５）やシミュレーションの入力項目に関する検討の材料とする。

また、各設備機器分野の具体的な検討を行うため民間をメンバーとした SWG が開始された。以下に各 SWG の検討予定項目を記す。

A. 空調・換気 SWG

（１）空調・換気エネルギーの実績エネルギー消費データの解析

1) 実績値の解析

①PAL 値および CEC/AC 値と実績値の比較

CEC については実績エネルギー消費データをご提供頂いた建物の担当者へのヒアリング調査などを行い、CEC 値から設計時の年間空調エネルギー消費量を算定し、実績エネルギー消費データとの比較を行う。

②建物の使用時間や建物使用時の気象データを考慮した検討

上記①の検討に建物の実使用時間や建物使用時の気象条件を加味した検討により PAL や CEC の値と実績エネルギー消費データとの相関を分析する。

③既存のシミュレーション手法との実績エネルギー消費データの比較

主に BECS を用いて、実績エネルギー消費データが取得できた建物をモデル化してエネルギー消費量を算定し、計算値と実績値の比較を行うことにより、シミュレー

シミュレーション手法の精度を検証する。

2) 実績エネルギー消費データの解析以外の検討

①シミュレーション手法によるデータの拡充

上記1) ③におけるシミュレーション手法の精度検証の上、データ拡充を目的としたシミュレーションを行う。

②文献調査

(2) LCCO₂の推定手法の検討

1) 運用時

①実績値データの解析結果から、空調設備・換気設備の実稼働時間を考慮した年間エネルギー消費量の検討を行う

②シミュレーションや調査の結果からデータの裏付けがとれた設備機器に関する省エネルギー性能を推定手法に盛り込む。

2) 製造時および廃棄時

①既存のデータの活用

②メーカーに協力を要請

B. 照明・EV・電気設備 SWG

(1) 照明用実績エネルギー消費データの解析

1) 新たに計測器を設置しての照明用の実績エネルギー消費データの取得測定

配電系統が他のコンセントと同一となっているところがほとんどで、測定は難しい。そのため、既取得データを提供頂き、検討を行う。

2) 実績エネルギー消費データの解析以外の検討

①簡単に入手できる正確なエネルギー消費データから推定

- ・建物全体の年間電力消費量を把握する
- ・これから建物の設備容量をもとに照明用エネルギーを推定する（手法は検討）
- ・照明用エネルギーを正確に計測している建物データで方法を検証する

②外部の組織（大学、協会など）や既存データベースを活用する

③文献調査

(2) LCCO₂の推定手法の検討

1) 運用時

①建物用途（CEC と同じく 8 分類程度）ごとに年間の全負荷点灯時間を推定

②この全負荷点灯時間を全照明設備容量に乗じて年間の消費電力量を推定

③年間の消費電力量に排出原単位を乗じる

2) 製造時および廃棄時

①照明器具工業会、電球工業会および、メーカーに協力を要請

②ランプの種類別に製造時の CO₂ を簡便に算定できる方法の検討

- ③廃棄物処理業者に協力を要請（廃棄時）
- ④公的な機関にデータが存在しないか調査（廃棄時）

C. 給湯・給水 SWG

（１）給水・給湯の実績エネルギー消費データの解析

1) 実績エネルギー消費データの解析

湯水の使用量の分離が難しく、正確な給水温度や給湯温度が計測されているか、熱源データの給湯分の分離、各系統の給水利用料の分離、および雨水利用・排水利用の利用量の分離に関する検討が必要であり、実績データを詳細に調査する。

2) 新規計測に関する検討

実績データの取得を行っている建築で新規計測が可能かどうか検討。

3) 実績エネルギー消費データの解析以外の検討

ホテルにおける給水・給湯に関するデータの拡充

（２）LCCO₂の推定手法の検討

1) 運用時

- ①給湯に関して日使用湯量や使用スケジュールの設定を CEC/HW と比較
- ②給湯に関して簡易なエネルギーシミュレーション手法の有無を調査
- ③給水に関しては既往の研究において推定法等が検討されており、実績値と比較
（雨水利用・排水利用に関しては原単位が文献*にある）

*参考文献 1：鎌田元康他、空気調和・衛生設備の環境負荷削減対策マニュアル

2) 製造時および廃棄時

- ①文献*に原単位データが存在するため利用が可能（製造時）
- ②空気調和・衛生工学会の地球環境委員会の成果報告書を参照する（製造・廃棄）

5. 2. 2 W 部会の研究

（１）研究目的と研究概要

企画・計画、設計・積算といった建築のワークフローの上流段階において CAD データや積算情報によって抽出される資材の種別や量に基づいた廃棄物発生量の算出・評価を行うために、投入資材に対応した LCW 算出におけるインデックス情報や、廃棄物発生時の対策水準による LCW 発生量の原単位情報を収集・整備し、LCW 推定技術の確立を行うことを目的としている。

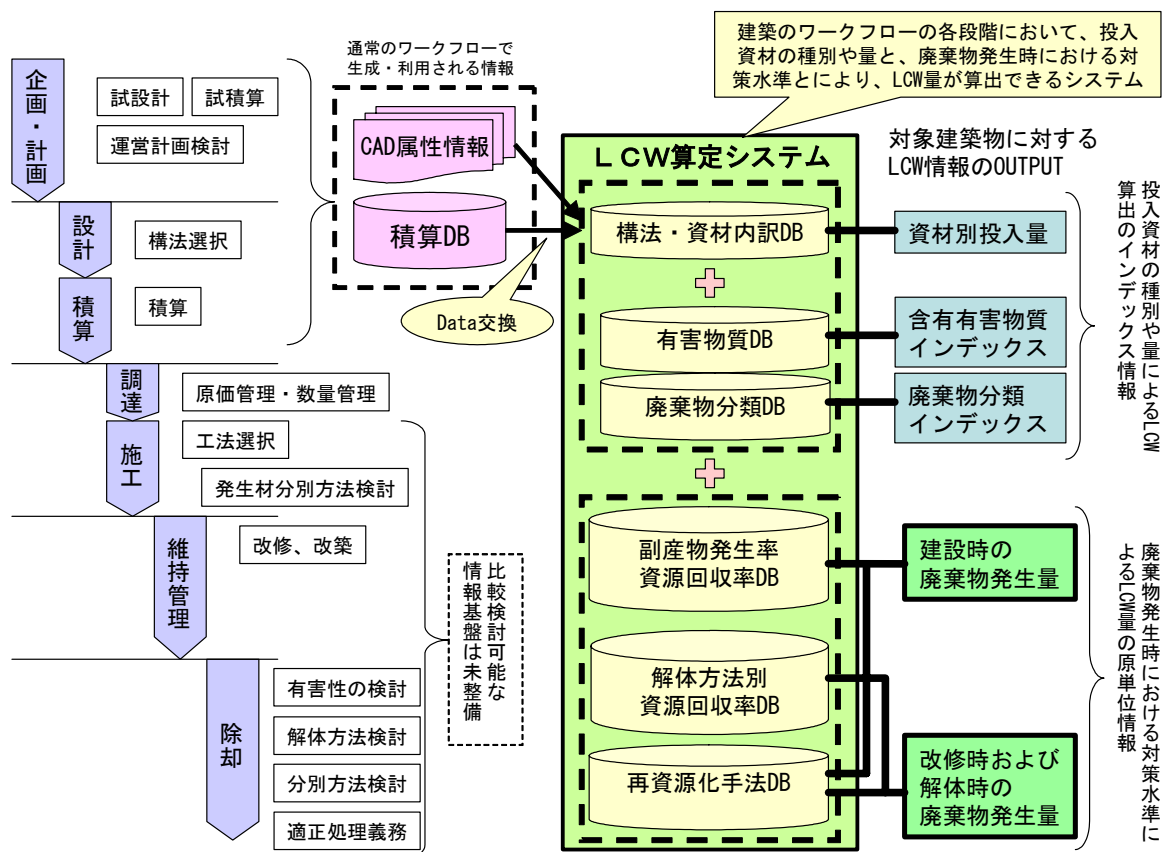


図 11 LCW 部会の研究概要

(2) これまでの成果の概要

建築物のライフサイクルにおける廃棄物排出負荷評価に関する研究のうち、以下を実施した。

- ・既往の研究による関連データの収集・整理
- ・LCW 算出手法の骨子の検討
- ・モデル建築物を用いた建築物の資源投入量の算出及び算出手法の検討

モデル建築物（SRC 造の事務所、RC 造の集合住宅）について、投入された資材とその内訳を算出。また、次年度以降データを収集すべき細目の抽出を行った。

- ・廃棄物発生量の試算に係るケーススタディ

モデル建築物について、構造、用途、規模から廃棄物発生量を算出。廃棄物の分類方法、廃棄物発生量原単位の設定に係る問題点を抽出した。また、次年度以降行う資材投入量からの廃棄物発生量の算定における課題を検討した。

- ・再資源化技術に係る実態調査

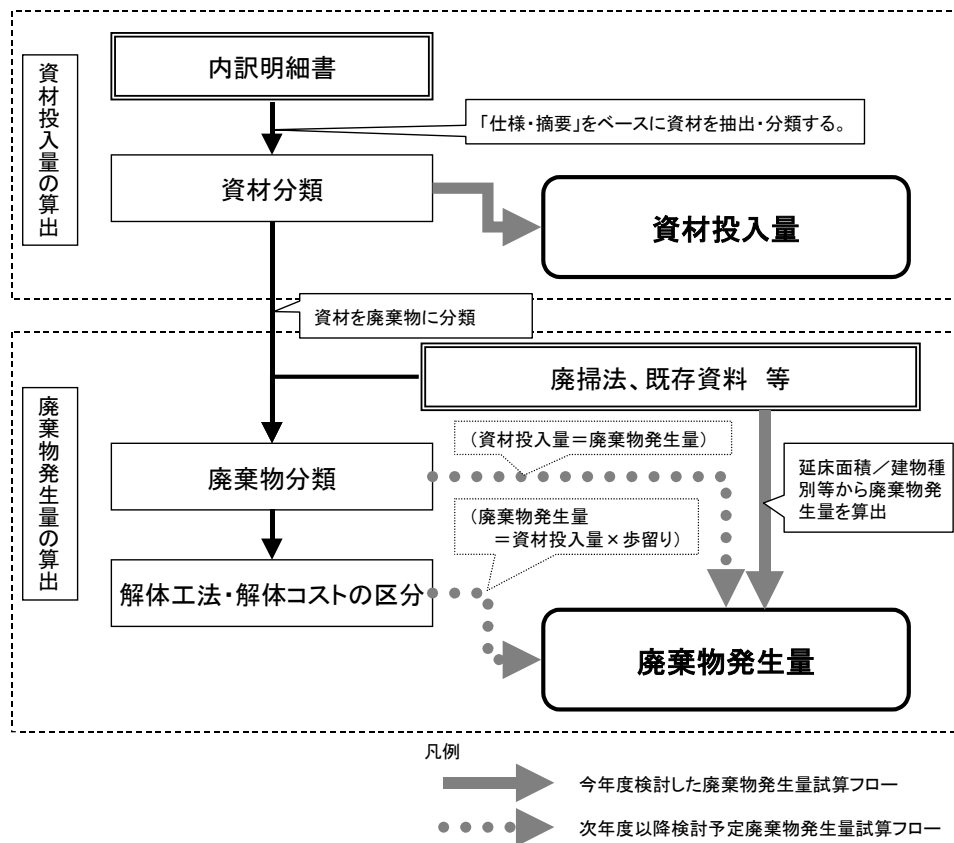


図 12 廃棄物発生量の試算フロー

(3) 今後の研究実施計画

(3. 1) LCW 算出ルールを検討

CAD データからの資材投入量算出手法、コスト積算結果からの資材投入量算出手法や各種データの呼び出しの手法等について標準化を検討する。

- ・算出ルール（ひもづけ）のルールを検討する。
- ・CAD データからの資材量算出方法の検討
- ・(3. 2) で収集するデータを用いて LCW の試算を実施

(3. 2) LCW 算出に係るデータの収集

コスト積算手法の資材算出への活用のため以下のデータの収集・充実等を行う。

- ・住設機器、建設資材の資材投入量に係るデータ
- ・有害物質に係るデータ
- ・廃棄物分類
- ・解体時の廃棄物発生量
- ・再資源化技術および適用条件

表 2 データ収集の内容と収集方針（案）

データ		内容	収集方針
①	構法一覧、資材内訳		コスト積算の歩係を活用する。歩係の整備状況について平成16年度に確認。整備されていないものについて優先順位をつけてデータ収集
②	有害物質含有可能性	建設資材に含まれる可能性のある有害物質、要管理物質等のリスト	既往の成果を活用
③	質量換算値	歩係の単位が質量以外の資材の質量換算値	平成16年度の結果（別紙）において、整備されていないものを対象とする
④	プレハブ、プレキャスト等の工場端材発生量	プレハブ、プレキャスト等については工場端材発生量を評価する	（18年度）
⑤	廃棄物分類	現状の実施状況、リサイクル技術の整備状況等を調査し、設定する。リサイクル技術（リサイクルの内容、適用条件等）とともに整理する。 ※リサイクルに伴う環境負荷、コストデータについてはペンディング	ヒアリングもしくはアンケート調査
⑥	副産物発生量	（規模、用途別原単位で代替か）	既往の成果を活用
⑦	資源回収率	解体方法を数段階設定し、各々資源回収率を設定 ※解体容易な構法、解体に係る新技術等の要素技術については、技術導入時にデータ差し替えで対応	解体方法のレベル設定の検討後ヒアリング調査

5.2.3 設計支援システム検討部会の研究

設計支援システム検討部会では、建築物の新築や改修の設計・計画時に、建築設計 CAD における材料・構工法の選択と連動して CO₂ 及び廃棄物排出負荷量の算出・評価ができる利便性と実用性の高い設計支援システムの開発を目的として、以下の検討、技術開発を進めている。

（1）設計支援システムの基本設計（～平成 17 年度）

建築企画、設計の段階における環境負荷評価（排出負荷量算出）の手法・業務の標準化の検討・提案と実務効率化・合理化のための設計支援情報システム（デザインツール）の基本構成、システム仕様の検討を行う。具体的には、建築 CAD ソフト、数量積算手法に関して、既存ツール（CAD、積算システム、評価システムなど）の現状、設計と評価（及び設計へのフィードバック）の実務上の課題について分析・整理し、3 次元 CAD データの活用など新たな技術利用の可能性について検討を行う。また、建築物の構成材にかかる排出負荷評価（CO₂ 及び廃棄物）の基礎数量である資材消費・ストック量算出の電子化・自動化のための情報構造の検討、部品・資材 DB の設定を行う。

（2）建築 CAD データリンクプログラムの開発（平成 17～18 年度）

建築 CAD と環境負荷評価データベースのデータ構造に関して、建築物の構成材（資材・部品）に対して排出負荷評価データを掛け合わせ排出負荷総量を算出する環境負荷積算の電子化・自動化のため、建築 CAD ソフトと連動するデータフォーマットを検討・提案する。また、建築 CAD を用いた設計における構工法選択と連動して、資材消費・ストック量の算出と対応する排出負荷データの参照、連動した排出負荷総量の算出のための情報システムプログラムの開発をソフトウェアベンダーとの共同研究を通じて行う。

(3) 排出負荷評価データベースの開発（平成 17～18 年度）

評価データベースの情報構造に関して、建築物の構成材（資材・部品）の内、民間開発による情報データベースの活用、共同化のための情報構造、データフォーマットの分析・整理を行う。

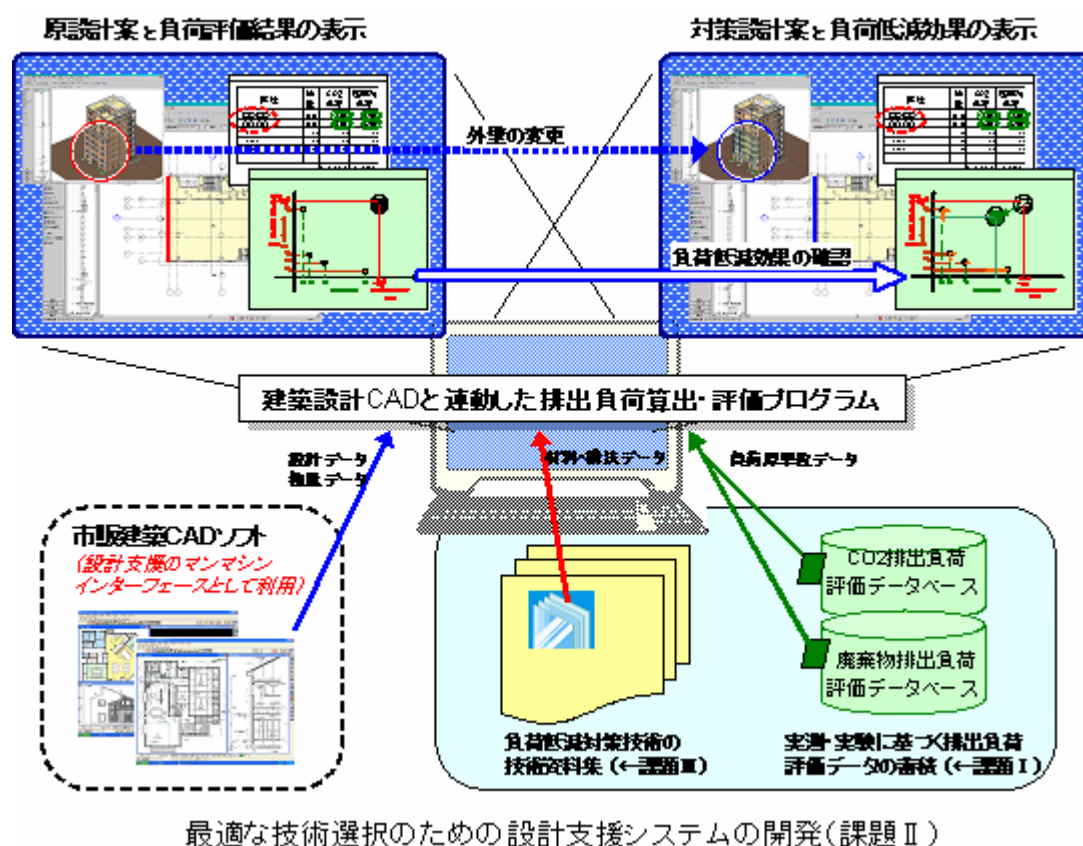


図 13 設計支援システム検討部会の活動

5.3 予想される研究開発成果と施策への反映

(1) 住宅・建築の住宅性能表示に関する環境性能の評価基準（案）の提示

- ① 日本住宅性能評価基準における住宅性能表示項目「温熱環境に関すること」の評価基準について、省エネ対策の客観的で精度の高い評価手法と評価基準を提示する。
- ② 住宅性能表示項目が設けられていない「省資源に関すること」について、資源消費・廃棄物排出の負荷評価手法と評価基準を提示する。

(2) 建築生産実務における環境負荷の定量評価手法の提案

建築コスト積算に相当する『環境負荷積算』の手法（定量評価手法）を確立し、建築生産実務プロセスの中に位置付ける。

- ① 建築コスト積算（経済的な負荷の算出）との共通化を考慮した排出負荷総量算出手法の確立を目指す。建築生産実務において積算技術者を排出負荷算出・評価の担い手として期待する
- ② 建築コスト積算の“単価表”に相当する負荷評価データベースを開発する。評価データの

拡充・改訂のシステム化を図り、民間データの取り込み、継続的なアップデートを図る。

- ③メーカー・生産主体における負荷低減技術に関する排出負荷評価データの取込み。“環境負荷見積り”のための標準書式の確立による能動的データ開示の動機付けを図る。

6. おわりに

国土技術政策総合研究所では、平成 16 年度から 3 か年計画として、総合技術開発プロジェクト「持続可能な社会構築を目指した建築性能評価・対策技術の開発」を実施している。

まず、環境問題として建築由来の CO₂ 排出及び廃棄物排出を取り上げ、現状の分析を行った後、その削減に向けた政策や既往の技術開発等について解説を行った。その上で、これら先行する各種の活動との関係を整理して、本総プロの位置づけを明らかとするとともに、技術開発の内容についての解説を行った。

ライフサイクルコストを考慮した港湾構造物の信頼性設計

港湾施設研究室長

長 尾 毅

ライフサイクルコストを考慮した港湾構造物の信頼性設計

港湾研究部港湾施設研究室長 長尾 毅

1. はじめに

ISO2394（構造物の信頼性に関する一般原則）の制定などを契機として、構造物の設計法への信頼性設計法の導入が期待されている¹⁾。港湾構造物についても、部分安全係数を用いるレベル1信頼性設計法を次期基準の標準的な設計法とすべきであると考えられる²⁾。

信頼性設計法の適用においては、目標安全性水準をどのように定めるかが重要である。その際の最も有力な方法のひとつは、過去の設計法における平均的な安全性水準に一致させる方法である³⁾。ところで、港湾構造物の代表的な施設であるケーソン式防波堤およびケーソン式岸壁の被災事例から推定される破壊確率は、それぞれ 7×10^{-3} および 5×10^{-2} であり^{4),5)}、1 オーダーの違いがある。この安全性水準の違いは明瞭な意図のもとに設定されたものではなく、実際のところはそれぞれ別個に工学的判断により定められてきた性格が強い。このように、港湾基準⁶⁾の平均安全性水準が妥当であるか否かについては、十分な検証がなされてきたとは必ずしもいえない。

目標安全性水準の設定方法のひとつとして、初期建設費に、破壊確率と破壊時の費用を乗じた値を加えた費用により定義されるライフサイクルコストが最小となる安全性水準を目標水準とすべきという考え方がある³⁾。本研究ではその考え方に立脚し、港湾構造物の主要な構造物である防波堤と岸壁について、最適な目標安全性水準の検討を行うことを目的とする。ここで、レベル2以上の信頼性設計法を適用すれば、ライフサイクルコストの検討は可能であるが、次世代の標準的な設計法として考えられているレベル1信頼性設計法では、破壊確率の算出を行わないために、ライフサイクルコストの検討を行うことが出来ない。しかしながら、あらかじめ構造形式や設計条件ごとに目標とする安全性水準を定めることが出来れば、レベル1信頼性設計法によってもライフサイクルコストを考慮した合理的かつ経済的な設計を行うことが可能となると考えられる。このため本研究では、各構造物の安全性に関係するパラメータの従う確率分布を推定し、FORM（First-Order Reliability Method）により破壊確率の算定を行うとともに、ライフサイクルコストの検討を行った⁷⁾。対象とした構造形式は、防波堤についてはケーソン式混成堤（ケーソン前面に消波工のないタイプ）および消波ブロック被覆堤（ケーソン前面に消波工を設置したタイプ）であり、岸壁はケーソン式岸壁と矢板式岸壁である。

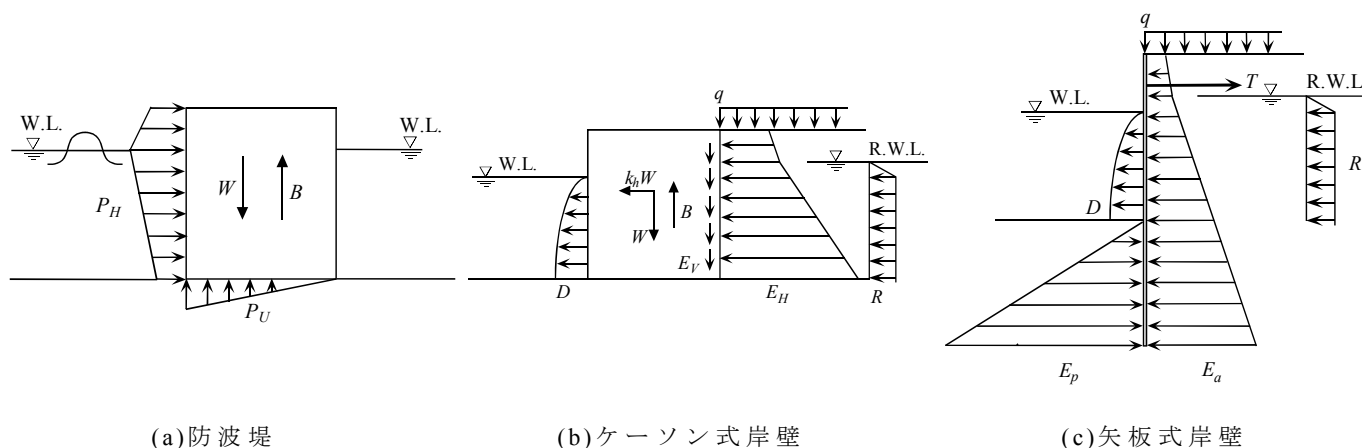
なお、本研究では、ライフサイクルコストの検討においては再現期間 25

年～数千年の荷重作用を考慮した．また，本研究ではコストを指標とした安全性水準の検討を行うため，通常の防波堤および岸壁を対象としている．このため，津波発生時に背後圏の安全を確保することが求められる津波防波堤や，L2地震動発生後に緊急支援物資輸送の拠点としての機能が求められる耐震強化岸壁は対象外とする．これら施設は，その目的から，通常の施設よりも高い安全性が要求されるといえる．

2. 検討方法

2.1 破壊確率の算出方法

図－1 に，本研究で対象とする構造物の形式毎の荷重作用条件を示す．防波堤については波浪作用条件，岸壁については地震動作用条件を対象とする．



図－1 荷重作用条件

ここに，

W ：壁体重量， B ：浮力， P_H ：水平波力， P_U ：揚圧力， E_H ：水平主働土圧， E_V ：鉛直主働土圧， R ：残留水圧， D ：動水圧， q ：上載荷重， k_h ：震度，W.L.：前面水位，R.W.L.：残留水位， T ：タイロッド張力， E_a ：主働土圧， E_p ：受働土圧

表－1 考慮する破壊モード

防波堤	滑動破壊，転倒破壊
ケーソン式岸壁	滑動破壊，転倒破壊
矢板式岸壁	矢板壁曲げ破壊，タイロッド破断

考慮する破壊モードは表－1 に示すとおりである．破壊確率算定に用いる性能関数および荷重算出方法は現行設計法によるものと基本的に同じとする．

矢板式岸壁のうち，控え工は本研究の対象外とする．

ライフサイクルコストを検討するためには，構造物をシステムとしてとらえ，各破壊モードの破壊確率およびその相関を考慮することより，システム破壊確率を算定する必要がある．各破壊モードそれぞれの破壊確率は，FORM（First-Order Reliability Method）を用いて，性能関数の破壊点における線形化近似による安全性指標⁸⁾をもとに算出する．また，各破壊モードの相関を考慮したシステム破壊確率は Madsen and Lind⁹⁾に従って算定する．

各構造形式の破壊モード別の性能関数は，式(1)～式(5)に示す通りである．括弧内の記号は確率変数として扱うパラメータであることを示す．また， $a_1 \sim a_6$ は確定値扱いする．

$$\text{(ケーソン式防波堤・滑動破壊)} \quad Z = f[W - B(wl) - P_U] Q P_H \quad (1)$$

$$\text{(ケーソン式防波堤・転倒破壊)} \quad Z = a_1 W - a_2 B(wl) - a_3 P_U - a_4 P_H \quad (2)$$

(ケーソン式岸壁・滑動破壊)

$$Z = f[W - B(R_{WL}) + E_V(k_h, ke, pd)] Q - k_h W - E_H(k_h, ke, pd) - R(R_{WL}, R_{RWL}) \quad (3)$$

(ケーソン式岸壁・転倒破壊)

$$Z = a_1 W - a_2 B(R_{WL}) + a_3 E_V(k_h, ke, pd) - a_4 k_h W - a_5 E_H(k_h, ke, pd) - a_6 R(R_{WL}, R_{RWL}) \quad (4)$$

(矢板式岸壁・矢板壁曲げ破壊，タイロッド破断)

$$Z = E_y(f_y) - \sigma_s(k_h, ke, R_{WL}, R_{RWL}, mS) \quad (5)$$

ここに，

f : 堤体底面と基礎との摩擦係数， wl : 潮位， R_{WL} : 岸壁前面潮位比， R_{RWL} : 岸壁残留水位比， ke : 土圧静的成分， pd : ケーソンの慣性力と土圧動的成分の位相差， E_y : 鋼材の強度， f_y : 鋼材降伏応力度精度， σ_s : 矢板壁及びタイロッド応力度， mS : 矢板壁断面力及びタイロッド張力算定式精度， $a_1 \sim a_6$: 各荷重のアーム長

上記確率変数の従う確率分布は表-2 の通りである．設計パラメータとその設計値の比は正規分布に従うと仮定しており，式(6)のように各変数の平均値とその設計値の比を α ，各変数の変動係数を V と定義し， α および V の従う分布を表示している．ただし，ケーソンの慣性力と土圧動的成分の位相差 pd ，岸壁前面潮位比 R_{WL} および岸壁残留水位比 R_{RWL} については，平均値を α ，変動係数を V として表示している．

表－２ パラメータの従う確率分布

	α	V
波力 (P_H, P_U)		
沖波波高推定精度	1.00	0.10
波浪変形計算精度		
水深変化緩	0.97	0.04
水深変化急	1.06	0.08
砕波変形推定精度	0.87	0.10
波力算定式推定精度		
ケーソン式混成堤	0.91	0.19
消波ブロック被覆堤	0.84	0.12
潮位・水位		
防波堤前面潮位 wl	1.00	0.20～0.40
岸壁前面潮位比 R_{WL}	0.60	0.30
岸壁残留水位比 R_{RWL}		
ケーソン式岸壁	1.10	0.20
矢板式岸壁	1.00	0.38
摩擦係数 f	1.06	0.15
自重 W		
鉄筋コンクリート	0.98	0.02
無筋コンクリート	1.02	0.02
中詰砂	1.02	0.04
設計震度 k_h (A地区2種地盤)	1.17	0.25
土圧静的成分 ke	1.00	0.10
慣性力位相差 pd	-0.50	0.30
鋼材降伏応力度精度 f_v	1.20	0.065
矢板断面力算定精度 mS	1.00	0.10

注) α : 平均値の偏り (平均値/設計用値)
 ただし, pd, R_{WL}, R_{RWL} については平均値
 V : 変動係数

$$\alpha = \frac{\mu_X}{X_d} \quad (6)$$

ここに,

μ_X : 確率変数 X の平均値, X_d : 確率変数 X の設計値

これらの確率分布の設定方法は次の通りである．まず，ケーソン式防波堤関係⁴⁾のうち，波力関係パラメータは，沖波波高推定精度を除いては実験結果をもとに設定されたものである．また，水深変化の緩/急の区分は，海底勾配 1/30 未満/以上とする．

次に，岸壁関係のうち⁵⁾，設計震度は，震度算出に關係する不確定要素（距離減衰関係推定精度，極値統計解析精度，地震動増幅特性推定精度，震度算定式精度）の精査をもとに設定したものである．なお，ここでは港湾基準³⁾の分類で関東地区などの含まれるA地区（工学基盤の設計震度 0.15）を対象にしておき，地盤種別は平均的な第2種地盤である．岸壁の潮位及び残留水位については，通常設計で考慮するのは堤体の安全性が最も低くなる時（前

面潮位が朔望平均干潮面 L.W.L.) であるが、地震の発生は潮位変動とは相関が無いと考えられることから、日本全国の潮位の確率分布や残留水位の実測結果¹⁰⁾などをもとに定めている。岸壁前面潮位比 R_{WL} は潮位と朔望平均満潮面 H.W.L.との比により定義されるパラメータである。残留水位比 R_{RWL} はケーソン式岸壁については残留水位 R.W.L.と潮位との比により定義されるパラメータである。

鋼材については、SM490 の降伏強度の保証降伏点に対する比の値¹¹⁾を用いた。矢板断面力算定精度 mS については、有効な情報が不足しているため、0.1 の変動係数を有するものと想定した。

2.2 ライフサイクルコストの算出方法

ライフサイクルコストの算出においては、建設費、維持管理費、廃棄に要する費用などの施設の設計供用期間中に発生するすべての費用を見積もる必要がある。しかしながら、港湾構造物における維持管理費は初期建設費と比較して非常に僅かである。また、設計供用期間を過ぎれば撤去されるものでもないため、建設費と被災時の費用が総費用を構成する主要な因子であると考えてよい。港湾構造物は通常設計供用期間内に被災が生じた場合は直ちに原型復旧される。このため、本研究では設計供用期間（50 年）中に発生する費用をライフサイクルコストと定義し、複数の被災可能性を考慮する。ライフサイクルコストの期待値は式(7)により表現される。

$$ELC = C_i + \sum_{j=1}^m \frac{E_{fj}}{T} C_f R \quad (7)$$

$$R = \sum_{k=1}^T \frac{1}{(1+i)^{k-1}} \quad (8)$$

ここに、

ELC : ライフサイクルコストの期待値, C_i : 初期建設費, m : 対象とする荷重ランク数, T : 設計供用期間 (50 年), E_{fj} : 対象とする荷重による期待被災回数, C_f : 破壊時損失費, i : 社会的割引率

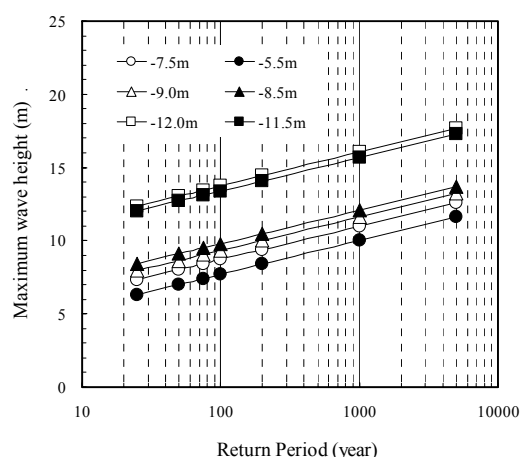
被災時の費用は、直接被害費用（物理的な復旧に要する費用）に加えて、社会経済面における間接被害費用が存在する。間接被害費用は背後圏の状況などの影響により複雑に変化する。このため、直接被害費用について、標準的な額の最大 3 倍まで考慮することで、間接的費用が無視し得ない場合についても検討した。なお、港湾構造物に関する間接被害費用についての研究例として、1993 年釧路沖地震時の釧路港における検討によると¹²⁾、1 バースあたり 0.6 億円程度である。この額は、地震被害発生直後より復旧工事完了までの費用であり、直接被害費用の 20%程度である。また、将来発生する復旧費用は社会的割引率を用いて現在の費用に換算する。本研究では土木事

業における一般値として 4%を用いる．なお，インフレは経済評価においては考慮しないのが原則であるため，対象外とする．

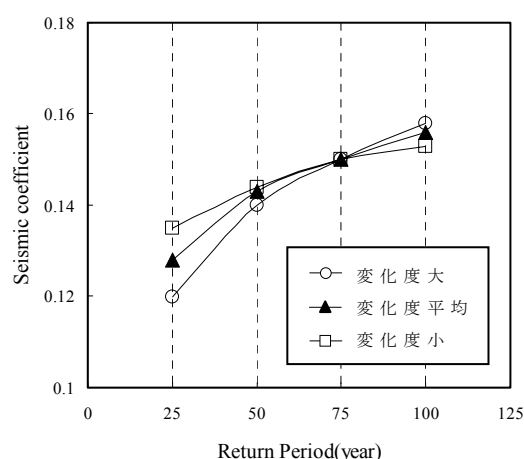
期待被災回数は長尾¹³⁾による．荷重作用はポアソン過程に従うと仮定すると同じ強度を持つ荷重が複数回作用する場合，構造物が破壊する事象は各荷重作用時で独立であると仮定する方法と，完全相関であると仮定する方法の 2 通りの方法があるが，両者は一致する．

ライフサイクルコストの検討条件を以下に示す．対象とする荷重の再現期間は防波堤については 25, 50, 75, 100, 200, 1000, 5000 年とした．岸壁については，L1 地震動と L2 地震動のそれぞれを考慮する観点から，L1 地震動は 25, 50, 75, 100 年とし，L2 地震動はプレート境界型（200 年）とプレート内型（1000 年または 2000 年）とした．

ケーソン式防波堤に作用する再現期間毎の波高を図－2 に示す．これは，日本全国をカバーする 18 地点の波浪統計データをもとに，再現期間毎の確率波高を調査した結果を用いている．



図－2 再現期間別の波高



図－3 再現期間別の作用

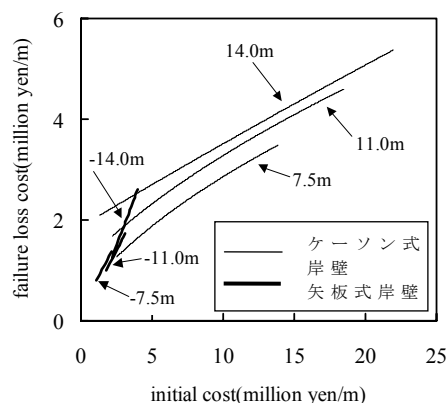
岸壁に作用する再現期間毎の作用震度を図－3 に示す．再現期間 75 年の設計震度は港湾基準の A 地区の地域別震度である 0.15 とし，日本全国をカバーする 280 地点の基盤加速度のデータをもとに再現期間に対する設計震度の変化のレベルを考慮して再現期間毎の設計震度を設定した．なお，図には示していないが，レベル 2 地震動相当の作用震度としては，0.25 および 0.28 とした．

検討ケースとしては，ケーソン式防波堤は，ケーソン式混成堤と消波ブロック被覆堤について，水深が異なる 3 ケースずつ設定した．ケーソン式岸壁と矢板式岸壁については水深の異なる 3 ケース(-7.5, -11.0, -14.0m)を設定した．上載荷重などの条件は標準的な値を用いた．

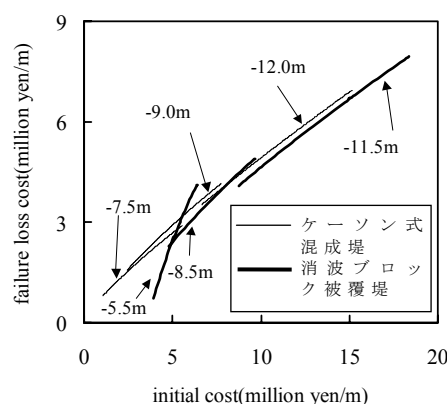
初期建設費および破壊時損失費は，日本の標準的な人件費，材料費，工事

の稼働率などを基に算出した。破壊時損失費の算出にあたっては、中規模被害と大規模被害を想定し、それらの平均損失費を破壊時損失費としている。

図－４～図－５に初期建設費に対する標準的な被災時費用を示す。なお、以降に示す費用はすべて断面奥行き1m当たりの価格で、直接工事費用である。図－４に示した防波堤のうち、実線はケーソン式混成堤、点線は消波ブロック被覆堤である。消波ブロック被覆堤の1例を除いて初期費用と被災時費用の関係はほぼ一定である。傾向が異なる1例は水深が-5.5mのケースである。初期建設費用には、ケーソン費用のみならずマウンド構築費用も含まれているため、水深の浅い場合は初期建設費用に占めるケーソン費用の割合が相対的に小さくなる。しかしながら、被災時費用はほぼケーソンの規模に比例するため、水深の浅い-5.5mのケースはケーソン幅が増加しても初期建設費の増加程度は低く、被災時費用の増加程度は他のケースと同様であるためこのような結果となる。図－５に示した岸壁では、初期建設費用に対する被災時費用の割合が防波堤と比較して低い（図中の線の傾きが小さい）ことが特徴である。これは、岸壁の初期建設費用には上部工や裏込め工など、様々な費用が含まれているためである。



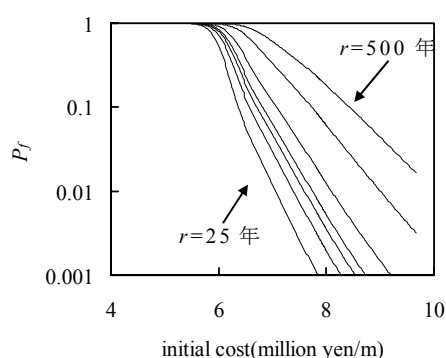
図－４ 初期建設費と被災時費用の関係（防波堤）



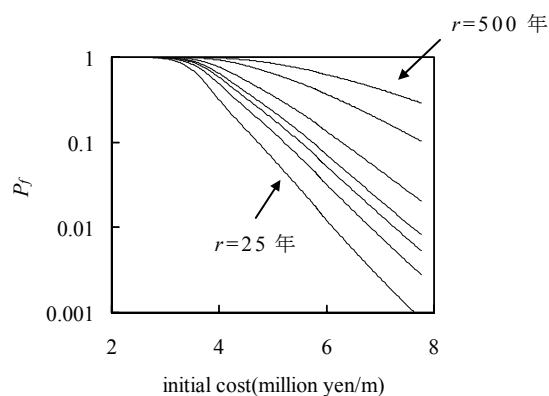
図－５ 初期建設費と被災時費用の関係（岸壁）

3. 検討結果

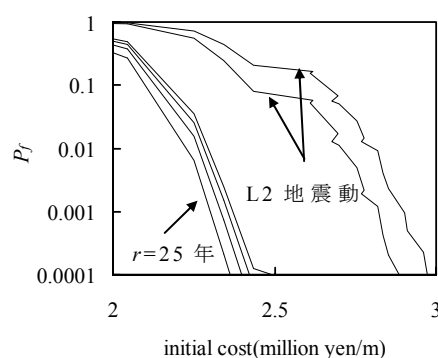
図－6～図－9 に，構造形式別に初期建設費に対する各再現期間の荷重作用に対する破壊確率を示す．各構造形式の3種類のうち水深が中間の場合を示している．ここで，矢板式岸壁の場合のみ滑らかな曲線とならないが，これは矢板壁およびタイロッドに用いる JIS 規格の鋼材の断面係数が不連続であること，および鋼材の規格（例えば鋼管矢板の径と肉厚）の変化に対する破壊確率と建設費用の変化の程度が一様ではないためである．また，初期建設費用に対する破壊確率の関係はケーソン式岸壁を除いては上に凸の曲線となるが，ケーソン式岸壁は下に凸の曲線形状を示す．



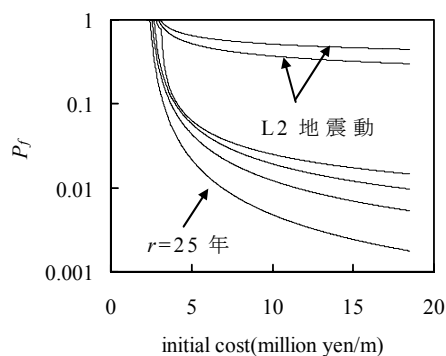
図－6 初期建設費と破壊確率の関係（ケーソン式混成堤）



図－7 初期建設費と破壊確率の関係（消波ブロック被覆堤）

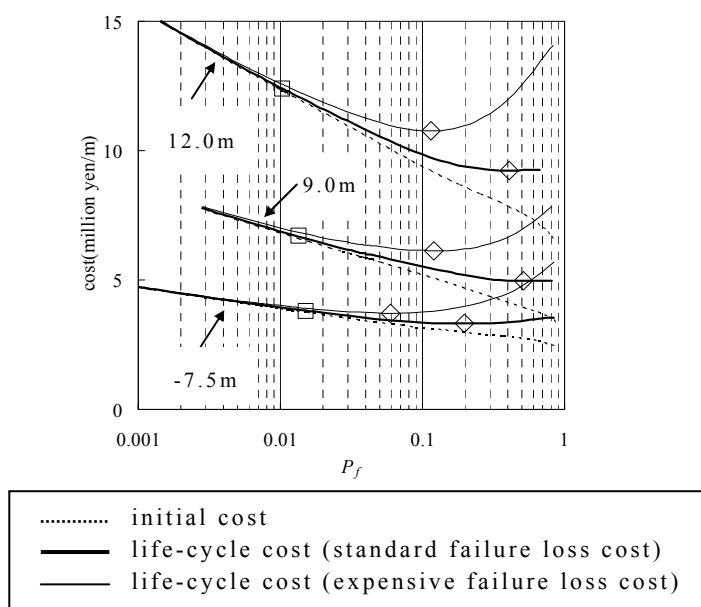


図－8 初期建設費と破壊確率の関係（ケーソン式岸壁）



図－9 初期建設費と破壊確率の関係（矢板式岸壁）

図－10～13 にライフサイクルコストの算出結果を示す．水平軸はケーソン幅や鋼矢板等の断面係数を変化させた場合のそれぞれ 2 つの破壊モードを考慮したシステム破壊確率である．システム破壊確率は 50 年再現期間の荷重作用に対する値としている．ここで岸壁については，L1 地震動では再現期間ごとに複数の作用震度を有し，かつ L2 地震動については複数の再現期間及び作用震度を有するが，ここではそれらの平均を示している．矢板式岸壁については，例えば水深-14m の破壊確率が 0.05% 程度を境界にしての破壊確率の変化に伴う初期建設費の変化の度合いが異なるが，これはその境界において矢板壁の規格が鋼管矢板から鋼矢板へと変化するすることによる．



図－10 ライフサイクルコスト（ケーソン式混成堤）

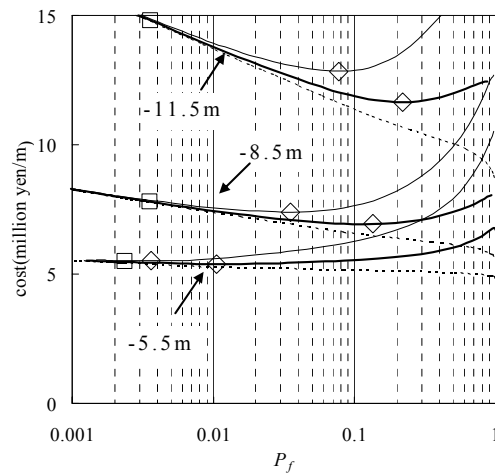


図-11 ライフサイクルコスト（消波ブロック被覆堤）

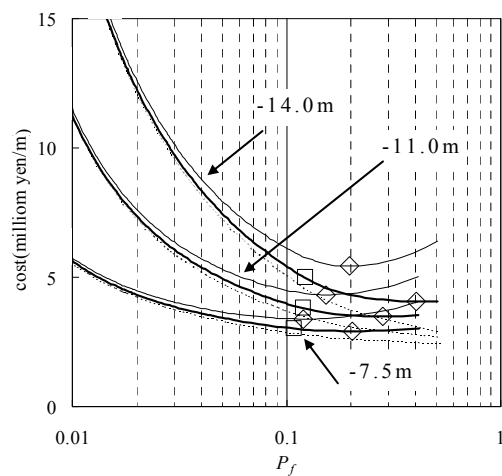


図-12 ライフサイクルコスト（ケーソン式岸壁）

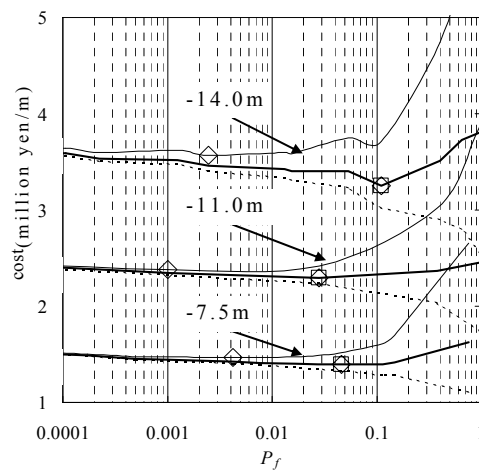


図-13 ライフサイクルコスト（矢板式岸壁）

図中に◇を付してある破壊確率がライフサイクルコスト最小となる破壊確率である。ライフサイクルコスト最小となる破壊確率は、ケーソン式混成防波堤の場合 19.7-51.4%（標準的な被害費用の場合）、5.9-12%（被害費用が標準の3倍の場合）、消波ブロック被覆堤の場合 1-21.9%（標準的な被害費用の場合）、0.4-7.7%（被害費用が標準の3倍の場合）、ケーソン式岸壁の

場合 20.2-40.4%（標準的な被害費用の場合），12-19.6%（被害費用が標準の3倍の場合），矢板式岸壁の場合 2.8-11%（標準的な被害費用の場合），0.1-0.4%（被害費用が標準の3倍の場合）である．このように，たとえ同じ荷重作用条件においても，構造形式ごとにライフサイクルコスト最小となる破壊確率は異なる．さらに，同じ構造形式の構造物であっても，条件（水深）毎にライフサイクルコスト最小となる破壊確率は異なる．

図中に□を付した破壊確率は現行設計法による安全性水準を示している．構造形式別に差はあるものの，矢板式岸壁を除いては概ね現行設計法による破壊確率はライフサイクルコスト最小となる破壊確率よりも小さく，ライフサイクルコスト最小化の考え方に基づく建設費用が縮減できる可能性が高いことが分かる．ただし矢板式岸壁については，現行設計法の破壊確率と標準的な被災時費用の場合のライフサイクルコスト最小の破壊確率は一致する結果となった．また，現行設計法による破壊確率は，ライフサイクルコスト最小化に対応する破壊確率と比較すると，構造形式別に水深の変化にかかわらず大きな変化を示さないことも特徴である．

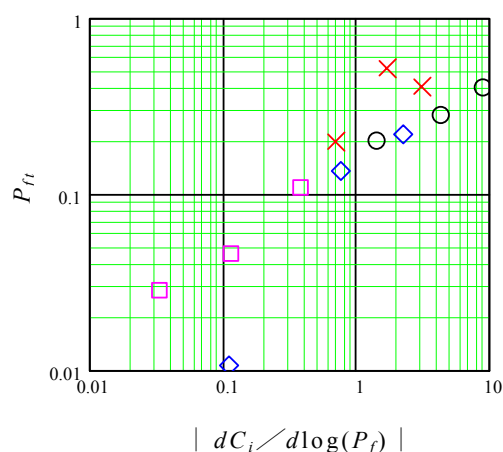
以上検討したように，同じ構造形式であっても条件ごとにライフサイクルコスト最小に対応する破壊確率は異なるため，ライフサイクルコスト最小化を目標とした設計法を設計実務に適用するためには，レベル2以上の信頼性設計法が必要である．

さらにその場合においても，再現期間の異なる複数の荷重を設定するなどの煩雑な手順が必要となる．また，安全性指標を算出しないレベル1信頼性設計法においては，基本的にこの方法の適用は困難である．しかしながら，設計手順の簡便さ，およびISO2394などの国際標準への採用などの環境を考慮すると，レベル1信頼性設計法においてもライフサイクルコスト最小化に対応した設計法が用意されていることが望ましいことはいうまでもない．そこで，ライフサイクルコスト最小化に対応する目標破壊確率 P_{fi} を他の何らかの指標と関連付けることが出来れば，ライフサイクルコスト最小化に対応したレベル1信頼性設計法の構築が図れる可能性がある．このため以下では，ライフサイクルコスト最小化に対応する破壊確率を他の指標で推定することを試みる．

4. 最適安全性水準の検討

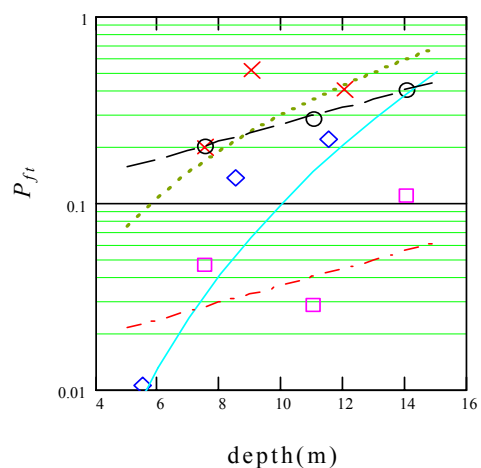
まず，断面諸元の変化に伴う初期建設費用と破壊確率の常用対数の変化度の比 $dC_i/d\log(P_{fi})$ を指標として， P_{fi} との関係を整理した．この比は負の値を取るが，比の値がゼロに近いほど初期建設費用は破壊確率に対して変化しないため，図-10～13に示したライフサイクルコストの関係において初期建設費用はフラットとなり，破壊確率を小さくした方が有利となる．

結果を図－14 に示す．水平軸は費用と破壊確率の比であるが，対数軸で示すために絶対値で整理している．なお，矢板式岸壁については図－13 に示したように， $dC_i/d\log(P_f)$ の値が一定ではないため，以下ではライフサイクルコスト最小となる破壊確率近傍での値を整理している．構造形式を示す記号は凡例に示したとおりであり，以降の記号も各構造形式に対して同じものを用いている．図より，ケーソン式混成堤の一部を除いて， $dC_i/d\log(P_f)$ の絶対値の増加に伴って P_{fi} が増加する傾向にあり，この指標をもとにしてライフサイクルコスト最小化に対応した破壊確率目標値が推定できる可能性が高いことが分かる．ところで， $dC_i/d\log(P_f)$ の値を得るためには，信頼性理論を用いて破壊確率を算出しなければならない．これを他の指標で推定できないか検討した．その結果，水深と $dC_i/d\log(P_f)$ の間の相関性が高いことが分かった．このため，水深（depth）と P_{fi} の関係を示すと図－15 のようになり，矢板式岸壁(□)ではややばらつきが大きいですが，図中に示した関係を用いて，水深別に破壊確率の目標値を設定できる可能性がある．ただしこの関係式は，水深が 14m までの範囲に適用が限られることに注意が必要である．なお，矢板式岸壁についてばらつきの大きい理由は，使用する鋼材の JIS 規格値の不連続性のためであると考えられる．また，ケーソン式混成堤と消波ブロック被覆堤で同じ防波堤であるにもかかわらず結果が異なるのは，消波ブロック被覆堤では初期建設費に消波工が含まれるため，堤体幅の変化が初期建設費の変化に及ぼす影響度合いがケーソン式混成堤と比較して異なるためであると考えられる．図中に示した関係式は次のとおりである．



×：ケーソン式混成堤 ◇：消波ブロック被覆堤
○：ケーソン式岸壁 □：矢板式岸壁

図－14 $|dC_i/d\log(P_f)|$ と P_{fi} の関係



図－15 水深と P_{fi} の関係

$$\text{ケーソン式混成堤 (×) \cdots \cdots \cdots } P_{ft} = 3 \cdot 10^{-3} \cdot \text{depth}^2 \quad (9)$$

$$\text{消波ブロック被覆堤 (◇) \text{———} } P_{ft} = 1 \cdot 10^{-5} \cdot \text{depth}^4 \quad (10)$$

$$\text{ケーソン式岸壁 (○) \text{----} } P_{ft} = 10^{0.046\text{depth}-1.04} \quad (11)$$

$$\text{矢板式岸壁 (□) \text{---} \cdots \cdots } P_{ft} = 10^{0.046\text{depth}-1.9} \quad (12)$$

これまでの、被災時の費用が標準的な場合についての検討であった。以下に、被災時の間接被害費用を無視しえない場合について検討する。ライフサイクルコスト最小化に対応する破壊確率は、被災時費用と初期建設費用の比の値に依存することが考えられる。すなわち、被災時費用が相対的に高いほど、被災を生じさせないことが有利となるため破壊確率は小さい方が有利となると考えられる。このため、被災時費用と初期建設費用の比 C_f/C_i を指標として P_{ft} との関係を整理した。ここで、 C_f/C_i はライフサイクルコスト最小となる破壊確率の範囲を考慮して、破壊確率が $2 \times 10^{-2} \sim 2 \times 10^{-1}$ の範囲の平均値とした。 C_f/C_i は、通常の設計実務においても算出することは容易であると考えられる。破壊時の費用として通常のケースから3倍まで考慮したケースについて、 C_f/C_i と P_{ft} の関係を整理した。結果を図-16～17に示す。基本的な傾向として、 C_f/C_i の増加に伴って P_{ft} が減少する。矢板式岸壁においてはばらつきが大きい。構造形式ごとに C_f/C_i に対する P_{ft} の変化度はほぼ一定であることが分かる。よって、図中に示した直線に従って、 C_f/C_i の値に応じて P_{ft} を補正することにより更に精度のよい目標破壊確率の推定が可能であると考えられる。図中に示した関係式は次のとおりである。ここに、 $const.$ は構造形式ごとの定数である。

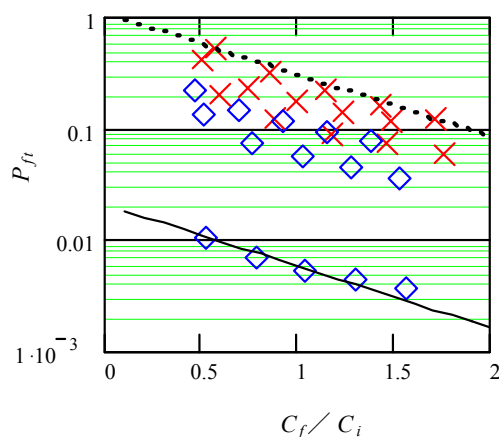


図-16 C_f/C_i と P_{ft} の関係 (防波堤)

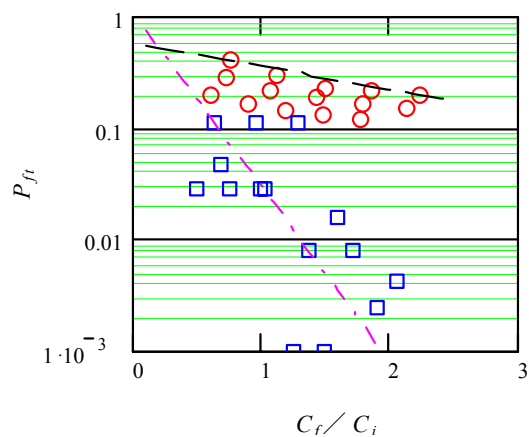


図-17 C_f/C_i と P_{ft} の関係 (岸壁)

$$\text{防波堤 (×) および (◇) ——— } P_{ft} = 10^{\text{const.} - 0.55 \frac{C_f}{C_i}} \quad (13)$$

$$\text{ケーソン式岸壁 (○) ---- } P_{ft} = 10^{\text{const.} - 0.21 \frac{C_f}{C_i}} \quad (14)$$

$$\text{矢板式岸壁 (□) -.-.- } P_{ft} = 10^{\text{const.} - 1.56 \frac{C_f}{C_i}} \quad (15)$$

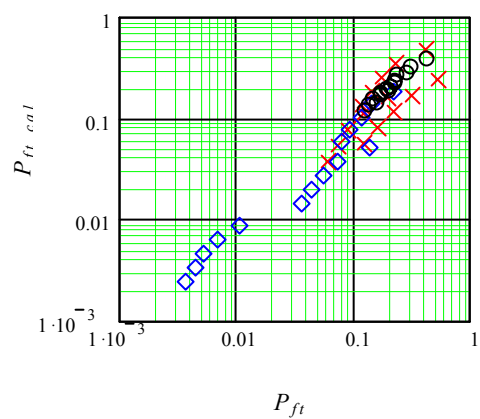
以上により， C_f/C_i と $dC_i/d\log(P_{ft})$ の両方を指標とすることにより， P_{ft} を推定できる可能性があることが示唆される．具体的には，まず図－15に示す水深と P_{ft} の関係から P_{ft} を推定し，次に C_f/C_i の値に応じて P_{ft} を補正すればよい．式(16)～(19)に推定式を示す．また，このようにして推定した破壊確率目標値(P_{ft_cal})と実際のライフサイクルコスト最小となる P_{ft} の関係を図－18～図－19に示す．ケーソン式混成堤，消波ブロック被覆堤，ケーソン式岸壁については目標破壊確率の推定精度は概ね良好である．しかしながら，矢板式岸壁についてはややばらつきが大きい．さらに，このようにして設定した目標破壊確率を用いた場合のライフサイクルコストと現行設計法の安全性水準によるライフサイクルコストの比を水深別に整理すると図－20のようになる．特に水深の深い場合に，本研究による目標破壊確率に基づくライフサイクルコストが縮減できる可能性が高いことが分かる．ただし，矢板式岸壁については，目標破壊確率の推定精度が良好ではないために，ライフサイクルコストの観点からも現行設計法と比較して優位を主張できないことが分かる．以上の結果より，矢板式岸壁を除いては，ライフサイクルコスト最小に対応したレベル1信頼性設計法の構築の可能性があると判断される．ただし今回は限られた検討ケース数であるため，今後ケース数を増やすことにより，さらに精度のよい P_{ft} の算定方法について検討することが必要と考えられる．

$$\text{ケーソン式混成堤} \quad P_{ft} = 10^{2\log(\text{depth}) - 0.55 \frac{C_f}{C_i} - 2.22} \quad (16)$$

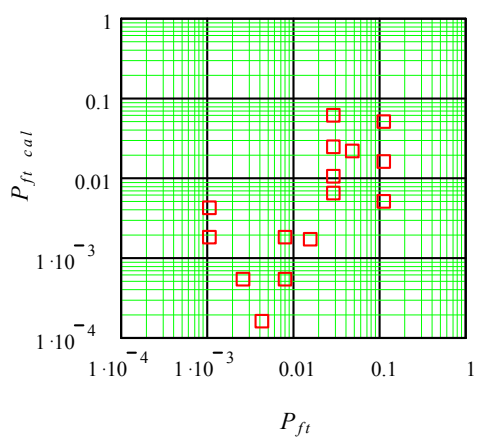
$$\text{消波ブロック被覆堤} \quad P_{ft} = 10^{4\log(\text{depth}) - 0.55 \frac{C_f}{C_i} - 4.73} \quad (17)$$

$$\text{ケーソン式岸壁} \quad P_{ft} = 10^{0.046\text{depth} - 0.21 \frac{C_f}{C_i} - 0.90} \quad (18)$$

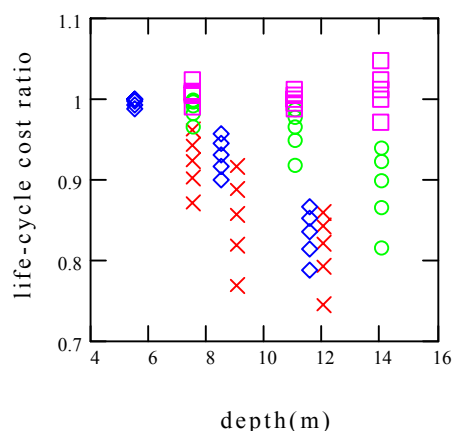
$$\text{矢板式岸壁} \quad P_{ft} = 10^{0.046\text{depth} - 1.56 \frac{C_f}{C_i} - 0.96} \quad (19)$$



図－18 P_{ft} の推定精度（矢板式岸壁以外）



図－19 P_{ft} の推定精度（矢板式岸壁）



図－20 ライフサイクルコスト比（提案法/現行設計法）

5. まとめ

本研究では、港湾構造物の設計法に信頼性設計法を導入するにあたり適切に設定する必要のある目標安全性水準について、ライフサイクルコスト最小化の観点から検討した。

ライフサイクルコスト最小化に対応した目標安全性水準を簡易に推定することが出来れば、建設コストの縮減に寄与することができる。今回は限られた検討ケースであったため、今後は検討ケースをさらに増やすとともに、特に岸壁についてはレベル1地震動に対する設計震度の値を変化させた場合などについて更に検討を行う必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本，2002.
- 2) 長尾 毅：港湾構造物の技術基準の改訂動向，鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，pp.9-20，2002.
- 3) 星谷 勝，石井 清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，1986
- 4) 長尾 毅，吉浪康行：信頼性解析によるケーソン式防波堤の外的安定性評価，構造工学論文集 Vol.47A，pp.305-312，2001.
- 5) 長尾 毅，吉浪康行，佐貫哲朗，嘉門雅史：ケーソン式岸壁の外的安定に関する信頼性設計法の適用，構造工学論文集 Vol.47A，pp.293-304，2001.
- 6) 運輸省港湾局監修，日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1999.
- 7) 長尾 毅，森屋陽一：港湾構造物の目標安全性水準に関する研究，構造工学論文集 Vol.50A，pp.187-197，2004
- 8) Hasofer, A. M. and Lind, N. C. : Exact and Invariant Second moment Code Format, *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol.100, No.EM1, pp.111-121, 1974.
- 9) Madsen, H. O., Krenk, S., and Lind, N. C. : *Methods of Structural Safety*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1986.
- 10) 古土井光昭，片山猛雄：残留水位測定調査，港湾技研資料，No.115，1971
- 11) 土木学会：鋼構造シリーズ 6，鋼構造物の終局強度と設計，1994
- 12) 上部達生，佐野 透，野津 厚：経済被害を考慮した港湾の液状化対策工の費用便益分析，第23回地震工学研究発表会講演論文集，pp.687-690，1995.
- 13) 長尾 毅：破壊確率を考慮した防波堤の期待総費用最小化に関する研究，第4回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム(JCOSSAR2000)論文集，pp.441-448，2000

我が国の空港整備とその経済効果

空 港 研 究 部 長

大根田 秀 明

我が国の空港整備とその経済効果

空港研究部長 大根田 秀明

1. はじめに

我が国の航空需要は、経済発展に即応して順調な伸びを示し、平成 16 年度の年間利用者は国内が約 9,400 万人、国際が約 5,200 万人に達している。この間、この旺盛な需要増加に対応すべく、数多くの空港が新設され、拡張整備されて、高速交通体系の基幹的役割を担っている。しかし、国土が狭く、いたるところが市街化している日本においては、民家への騒音の影響に鑑み、多くの空港整備プロジェクトは、空港アクセス面における不便さや事業費の増大を甘受し、市街地から離れた山間部や海上が建設候補地として選ばれることが多い。

空港整備計画の環境アセスメントにおいて、騒音の影響や飛行経路の問題は重要な検討評価項目であるが、空港がいわゆる迷惑施設であるが故に、空港の新規整備や拡張整備の必要性はもとより、そのプロジェクトの事業効果に関する十分な検討と地域への説明が必要である。

プロジェクトの事業効果については、いわゆる『費用対効果分析』が実施される。これは、当該事業の実施による『便益』を計測し評価するものである。具体的には、空港整備による旅客移動時間の短縮効果など、貨幣価値に換算可能な効果と事業に必要な費用とを比較するものである。一方、新空港整備による地域経済の発展、波及効果があることは自明であり、地域住民などに空港整備の効果を説明する時には、最も興味深い重要な課題のひとつであるが、現在の航空局の費用対効果分析マニュアルには具体的な計測方法についてまだ明確な提案はされていない。

空港研究部においては、空港の整備効果の研究の一環として、空港整備の需要予測や経済波及効果などについて研究している。本文では、我が国の空港整備の現状について概括するとともに、単純な仮定の下に、空港整備が地域に及ぼす経済波及効果を産業連関分析により計測するモデルシステムとその計測結果を報告する。さらに、より精緻な分析が可能になる応用一般均衡モデルを基に、空港整備が各事業分野へ及ぼす経済波及効果を分析した研究結果について報告する。

2. 我が国の空港整備の概況

2.1 我が国の空港整備の概況

我が国の航空需要は、表-1 や図-1 に示すように、非常に順調に伸びてきた。1984 年度の国内航空旅客は 4,472 万人、2004 年度は速報値で 9,374 万人であり、この約 20 年間で 2.1 倍に達しており、年平均 4 % の伸びを示した。また、国際航空旅客については、アメリカの 9.11 テロや SARS の影響などで一時減少することはあったが、ほぼ順

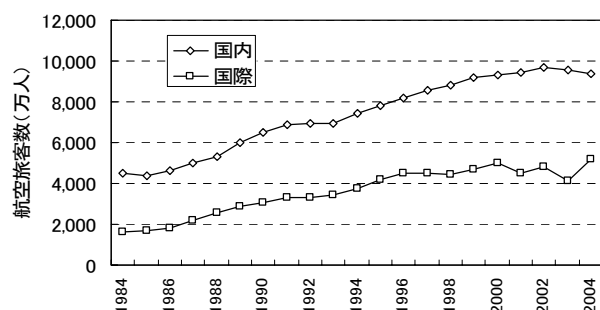


図-1 航空旅客数の推移

調に回復し、2004年度で5,187万人（対1984年度比3.2倍）となっている。なお、国内旅客に関しては2002年度から2年連続でわずかな量ではあるが減少した。この原因については、台風などによる欠航の影響やエアラインの不採算路線の便数見直しなどいくつかの要因が考えられるが、今後の需要予測をする上で重要な事項であり、詳細な分析が必要である。

このような旺盛な需要の伸びに対応すべく、空港整備が行われてきた。

図-2と表-1は1984年度以降の空港整備の推移をまとめたもので、2004年度末で、空港数は96、滑走路延長は210kmに及んでいる。第三種空港については52空港となり、一般空港の整備は配置的側面から「概成」したとされる状況になった。

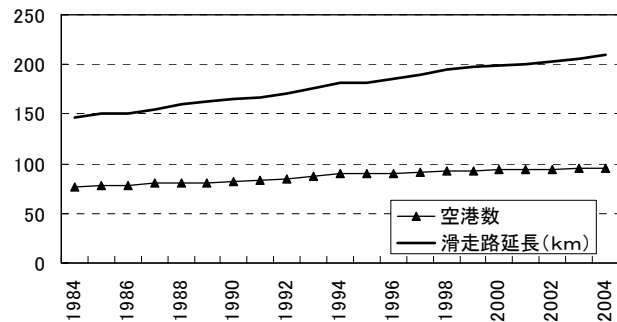


図-2 空港数および滑走路延長の推移

表-1 空港整備の推移

年度	空港数						滑走路延長(km)	空港整備事業費(億円)		旅客数(千人)	
	第一種	第二種	第三種	その他	合計	ジェット化空港		羽田空港	全国計	国内	国際
1984	3	24	42	8	77	37	147	90	1,503	44,717	16,279
1985	3	24	43	8	78	39	150	170	1,543	43,776	17,061
1986	3	24	43	8	78	39	150	325	1,612	46,365	18,106
1987	3	24	44	9	80	42	155	688	1,950	50,045	21,743
1988	3	25	44	9	80	45	160	824	2,134	52,945	25,761
1989	3	25	44	9	81	46	163	739	2,326	60,120	29,036
1990	3	25	44	9	82	48	165	718	2,515	65,252	30,396
1991	3	25	45	10	83	49	167	1,321	3,374	68,687	33,222
1992	3	25	47	10	85	50	171	1,430	3,535	69,687	33,210
1993	3	25	48	11	87	51	176	2,131	4,425	69,584	34,635
1994	3	25	49	12	90	53	182	1,307	3,237	74,547	37,494
1995	4	25	49	12	90	54	182	1,766	3,786	78,101	42,125
1996	4	25	49	12	90	54	186	1,490	3,317	82,131	45,025
1997	4	25	49	13	91	55	190	398	2,231	85,555	44,718
1998	4	25	51	13	93	57	195	313	2,043	87,910	44,340
1999	4	25	51	13	93	60	197	229	1,888	91,589	46,591
2000	4	25	51	14	94	60	199	199	2,130	92,873	50,245
2001	4	25	51	14	94	60	200	204	1,952	94,579	44,903
2002	4	25	51	14	94	61	203	230	1,673	96,662	48,160
2003	4	25	52	14	95	62	206	252	1,715	95,487	41,233
2004	5	25	52	14	96	64	210	289	1,821	93,738	51,868

出典：数字で見る航空

注1 空港数及び滑走路延長は、年度末(3月31日)現在の数値

注2 空港数には、その他飛行場(自衛隊及び米軍との共用飛行場、地方公共団体が管理するその他公共用飛行場)を含む

注3 空港整備事業費は国の歳出分を計上したもので、補助事業の地元負担分は計上されていない

注4 成田(新東京)国際空港・関西国際空港・中部国際空港は、政府出資金、政府無利子貸付金(関西国際空港及び中部国際空港)、関西国際空港株式会社補給金及び国直轄分を計上

注5 金額は当初実施計画額(東京国際空港沖合展開事業等の受託工事費を含む)

一般空港の整備の財源は、主に、空港整備特別会計からの歳出と地元の負担金で実施される。表-1 における空港整備事業費は、国の歳出分をまとめたものであるが、図-3 に示すように1993年度頃に鋭いピークを示している。これは、羽田空港の沖合展開事業の費用がこの時期にピークとなっているためであるが、羽田空港を除く一般空港についても、1993年度がピークとなっ

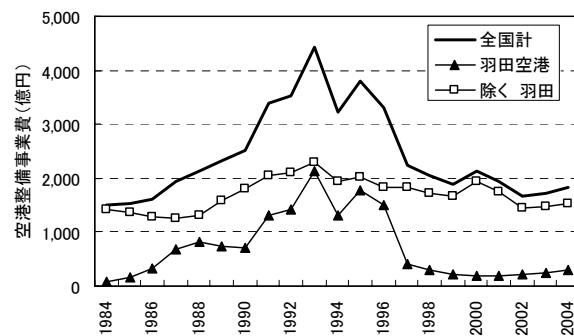


図-3 空港整備事業費の推移

おり、その後、事業費は1,600億円程度まで徐々に減少してきている。「空港は配置的には概成した」というとおり、新規空港整備は少なくなりつつある。

今後は、1990年代に施工した滑走路や誘導路・エプロンなどの舗装の適切な維持管理・改良、つまり「ストックマネジメント」が重要な技術になる。

2. 2 東京国際空港（羽田）の拡張整備概要

東京国際空港（羽田）は、わが国の国内航空ネットワークの拠点として、旺盛な伸びを示す航空需要に対応して、段階的に整備され発展してきた。羽田空港の沖合展開事業は航空機騒音問題の抜本的解決と将来の航空需要増加に適切に対応し、首都圏の拠点空港としての機能を発揮するため、東京都が羽田空港の沖に整備していた埋立地に拡張移転することとしたもので、1984年1月に工事に着手した。原地盤は埋立地特有の超軟弱地盤で、沈下対策など工事は困難なものであったが、順調に進められた。1984年以降の羽田関係のイベントと利用状況等をまとめて表-2に示す。

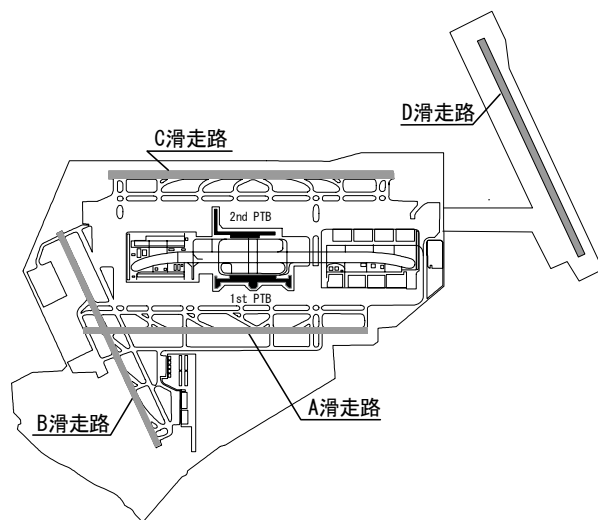


図-4 東京国際空港（羽田）の平面図

沖合展開事業はまずA滑走路（3,000m）の整備からスタートし、1988年に完成供用開始した。1993年には、空港の顔である新旅客ターミナルとして通称「ビックバード」（現在の第1旅客ターミナル）が完成し、供用開始している。新旅客ターミナル完成までの数年は、空港処理能力的に限界であり、利用者数は約4,000万人で頭打ちになっており、座席利用率も1990年度には74%の高率になっている。

その後、C滑走路（3,000m）が1997年3月に沖合埋立て地上に完成して供用を開始し、騒音問題は大幅な改善がされるとともに、同年7月からは24時間運航が可能となった。

続いて、2000年3月には3本目のB滑走路が完成した。B滑走路は、横風強風時の着陸

用に整備されたもので、羽田の処理能力のキーになる滑走路であり、この後、羽田の総スロット数は段階的にではあるが大幅な改善（660→812 へ）が図られていくこととなる。

また、利用者の増加に対応して、東側の第2旅客ターミナルの整備に着手し、2004年12月に供用を開始している。

表-2 東京国際空港(羽田)の整備等に関する年表

年	主なイベント	国内線利用者数(千人)			整備事業費 (億円)	総スロット 数	座席利用 率(%)
		羽田	全国	羽田シェア			
1984	沖合展開事業工事開始	24,681	44,717	55.2		420	64.0
1985		24,271	43,776	55.4	170	420	60.9
1986		25,876	46,365	55.8	325	450	61.8
1987		28,189	50,045	56.3	688	450	64.3
1988	A滑走路供用開始(7月)	30,278	52,945	57.2	824	475	65.6
1989		34,955	60,120	58.1	739	500	71.4
1990		38,091	65,252	58.4	718	537	74.1
1991		40,057	68,687	58.3	1,321	560	72.5
1992		39,976	68,687	58.2	1,430	560	67.3
1993	西ターミナル供用開始(9月)	39,119	69,584	56.2	2,131	560	62.4
1994		41,421	74,547	55.6	1,307	580	63.0
1995		43,012	78,101	55.1	1,766	580	63.8
1996		45,083	82,131	54.9	1,490	580	65.5
1997	C滑走路供用開始(3月)	47,431	85,555	55.4	398	620	65.9
1998		49,906	87,910	56.8	313	660	63.2
1999		52,257	91,589	57.1	229	660	65.4
2000	B滑走路供用開始(3月)	54,767	92,873	59.0	199	732	64.5
2001		57,006	94,579	60.3	204	732	65.5
2002		59,491	96,662	61.5	230	784	64.7
2003		59,409	95,487	62.2	252	812	62.2
2004	東ターミナル供用開始(12月)				289		

注) 総スロット数 ; 6:00~8:30の到着、20:30~23:00の出発及び23:00~6:00の発着を除く回数で、公用機等用の発着枠を含むものである。

羽田空港の処理容量である総スロット数は、表-2 に示すように、沖合展開事業の進捗とともに増加してきた。この間の利用者数の増加と総スロット数の増加を図-5に示す。B滑走路完成後、管制などの修練を経て、2003年には時間当たりの着陸の能力が28回/時(早朝は26回/時)となり、総スロット数は、812回/日となった。図からわかるように、利用者数と総スロット数は、それぞれ対応をして段階的に増加しており、空港処理能力を段階的に増強してきていることがわかる。

羽田空港の総スロット数は、時

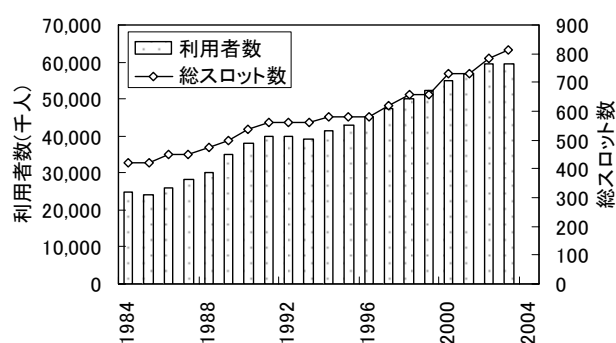
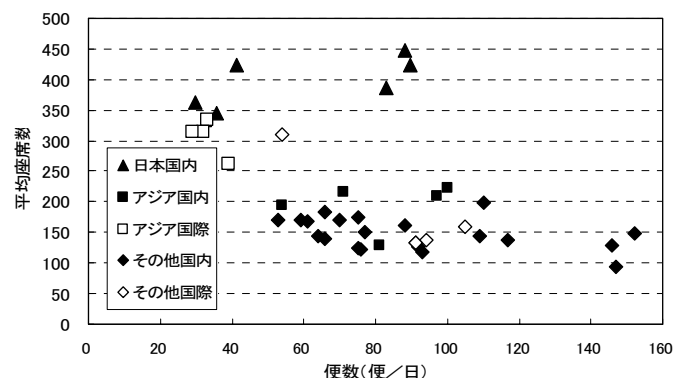


図-5 羽田空港の総スロット数と利用者数の推移

間当たりの着陸能力に依存しており、離陸能力には余裕がある。時間あたりの着陸回数は、一般に、滑走路の本数、高速脱出誘導路の配置、就航している機材構成など、様々な要素が相互に関係しており、空域での制限や管制にも影響される。羽田空港では施設整備を進めるとともに、ソフト面の対応も進め、この着陸回数の改善に努めている。2004年には滑走路占有時間の短縮化を図り、時間あたりの着陸回数を29回／時に増やしており、さらに、2005年10月からは航空ダイヤの平滑化や航空管制の改善などによって30回／時に増やす予定である。

このような羽田空港の容量制約の下、エアライン各社はボーイング747型機などの大型の航空機を導入して航空需要に対応してきた。図-6は、世界の航空路線のうち一日の座席提供数上位40路線について、便数と平均座席数の関係をプロットしたもので、路線を日本国内、アジアの国内国際、その他国内国際にグループ分けしている。日本国内は6路線入っているが、羽田～札幌、福岡、大阪、沖縄、広島と大阪～札幌である。日本国内線とアジア国際線が300から450席で、この他の主要路線が250から100席程度の二つに大きくグルーピングできることが分かる。

このように日本は諸外国に比べて機材の大型化が進んでおり、大型化によってエアライン各社が伸びる航空需要と空港の処理能力の限界の問題に対応してきたことが伺える。逆に、海外の主要路線では、需要が多いにもかかわらず、200席以下の中小型の航空機で頻度の高いサービスを提供していることが分かる。



資料：民間航空機関連データ集(財)日本航空機開発協会

日本の路線については航空輸送統計年報（H15）

図-6 世界の主要路線の座席数と便数

航空サービスの高質化が求められる今日、各路線の多頻度運航はひとつの大きな課題であり、エアライン各社は、新たに開発された超大型機A380の導入より機材の中型化の方向にあり、羽田の発着枠の確保が重要な課題である。一方、新規参入のエアラインにとっても、羽田の発着枠が採れるか否かは経営に直接関係する重要事項である。また、地方自治体は、首都圏と地方都市を結ぶ路線の利便性、多頻度運航（増便）を希望しているが、現状では実現困難な状況である。

このような首都圏空港の処理容量不足は、航空市場の自由競争を阻害しており、国民にとって大きな不利益をもたらしていると考えられ、羽田空港の処理能力の抜本的改善として、4本目のD滑走路の整備が進められることとなった。現在、環境アセスメント等の手続き中であるが、2010年までには完成し、総スロット1,144回／日の大幅な処理容量の改善が図られる予定である。

3. 空港整備による経済波及効果計測システム

地方に空港を整備し、首都圏や関西圏と利便性の高い航空ネットワークを組むことは、地域の発展に重要な意味を持つ。ここでは、産業連関分析をもとに計測するモデルシステムによって、空港整備に伴う経済波及効果について検討する。

3.1 経済波及効果計測モデル

今回の計測モデルでは、空港の供用に伴い生じるストック効果のうち、直接効果、一次波及効果、二次波及効果を計測対象とする（以後、一次波及効果及び二次波及効果を総称して「波及効果」と呼ぶ）。

直接効果を計測する地域単位は、全国8地域ブロック単位とし、全ての地域ブロックを効果計測対象とする。すなわち、効果の帰着先地域として空港が所在する地域だけではなく、想定される新規路線の相手側空港及びその背後圏地域、あるいは経路転換需要の影響でマイナスの効果が発生する地域等の存在が想定されるため、それら全ての地域を効果計測対象とする。

1) モデルにおける航空需要等の仮定

空港整備に伴う直接効果の計測においては、増加する航空需要として誘発需要と転換需要の設定が必要である。今回のモデルにおいては地域ブロックごとの原単位法を用いるため、転換前の交通機関が他空港の場合、地域の航空需要が変わらず他空港使用時の生産額・消費額と差が生じない。

また、転換前の交通機関が鉄道等の他機関の場合、転換需要により空港・航空関係産業での生産額・消費額は増加するが、一方で転換前の交通機関関連の産業では生産額・消費額が減少する。転換される需要は主に鉄道旅客と考えられ、転換需要により増加する空港・航空関係産業での生産額・消費額は、減少する転換前の交通機関関連産業での生産額・消費額とは相殺するものと仮定する。

次に、誘発需要と転換需要の分類について検討する。現在のところ、空港整備に伴って発生した航空需要を誘発と転換に分けた調査事例などの資料は皆無であり、調査方法さえ不明な状況である。今回の検討に当たって、国土交通省航空局のウェブサイトに掲載されているモデル（以下、「航空局モデル」という）から両需要の比率を算出することとする。航空局モデルは、ネスティッド型ロジットモデルが採用されており、機関選択モデルの効用関数では、便数に変数のひとつとなっている。ここでは、2000年現在の国内線各路線の便数が1日当たり1便増便した場合の誘発需要と転換需要を算出し、その平均的な比率をもって、誘発需要・転換需要比率を便宜的に設定した。結果は、誘発需要：転換需要＝7：3で、今回のケーススタディではすべてこの比率を用いることとする。

表-3 空港種別毎の平均旅客数および貨物量

空港種別	平均旅客数 (人/便)	平均貨物量 (kg/人)
第一種	383	10.7
第二種	193	10.5
第三種	97	4.0
その他	218	10.0

また、各路線別の誘発需要の増加に伴う各路線における増便数、貨物量の増加については表-3 の原単位を使用して算出する。

2) 直接効果

本研究で計測対象とする直接効果項目は、①空港内関連産業の売上、②交通アクセス消費、③航空運送事業の売上、④国内旅行に伴う消費の4項目とする。各効果項目については、原単位法を用いる。すなわち、航空需要1単位あたりの生産額・消費額といった原単位を設定し、それに航空需要または便数の増分を乗じることにより効果を算出する。

以下、各項目の計測手法の概要を述べる。

①空港内関連産業の売上

空港内に立地する事業者の売上を計測対象とする。

- ・ターミナルビルで土産物等を販売する商業
- ・ターミナルビルを運営する不動産業
- ・飲食物を販売するレストラン等のサービス業
- ・航空貨物等を取り扱う運輸付帯サービス業
- ・ターミナルビルの清掃・警備等を行うその他のサービス業

具体的には、誘発される航空需要に対して、表-4 に示す原単位を使って従業員の増加を算出し、表-5 の従業員一人当たりの生産額原単位により、各産業別の生産額とする。

なお、航空会社は「航空券の売上」と、鉄道、バス、レンタカー事業者等旅客関連の運輸業は「交通アクセス消費」は別枠扱いして計測する。

表-4 単位航空需要当たりの従業員数

卸売り・小売業	金融・保険・不動産	サービス業	運輸業（航空以外）	その他（清掃・警備）
人/万人	人/万回	人/万人	人/千トン	人/万回
0.319	7.463	0.746	0.585	70.455

表-5 従業員一人当たりの生産額原単位

地域	卸売り・小売業	金融・保険・不動産	サービス業	運輸業（航空以外）	その他（清掃・警備）
北海道	5.22	57.61	9.98	13.24	9.98
東北	4.93	85.45	10.09	11.89	10.09
関東	6.48	68.81	13.14	12.40	13.14
中部	6.16	83.68	12.40	13.84	12.40
近畿	6.00	64.04	13.10	13.04	13.10
中国	4.95	74.28	11.42	16.27	11.42
四国	4.34	79.60	10.38	15.92	10.38
九州	4.53	71.33	10.83	14.53	10.83
沖縄	2.64	37.62	8.66	14.43	8.66
全国	5.81	69.58	12.30	13.21	12.30

表-6 アクセス費用原単位

地域	原単位(円/人)
北海道	1,510
東北	1,530
関東	1,610
中部	1,800
近畿	1,800
中国	1,670
四国	1,760
九州	1,660
沖縄	1,200
全国	1,620

②交通アクセス消費

空港利用者の空港へのアクセス費用及び空港からのイグレス費用発生による交通事業者（JR、リムジンバス等）の生産額を計測対象とする。表-6 は、各地域の空港アクセス機関分担率と各アクセス機関別費用を元にアクセス費用原単位を算出したものである。

③航空運送事業の売上

航空会社の航空券の売上を計測対象とする。原単位は、全国産業連関表の国内航空旅客輸送分を事業収入として、それを地域産業連関表の航空輸送産業の生産額を用いて地域ごとにシェア割りした後、空港所在地別需要実績で除することにより算出する。

算出結果は表-7の通りであり、各地域により大きな差が生じている。全国平均より高い地域は関東、中部、近畿であり、他の地域は平均より小さくなっている。

なお、旅客数については、地域毎の入込客割合をもとに路線毎の発地別利用者数を算出し、表-7の原単位を適用してその地域の生産額とする。

表-7 往復航空券売上の原単位

地域	原単位 (円/人)
北海道	17,830
東北	15,500
関東	38,550
中部	30,520
近畿	31,530
中国	17,500
四国	13,130
九州	17,770
沖縄	18,400
全国平均	26,400

④国内旅行に伴う消費

ここでは、宿泊を伴う国内航空旅客が訪問先で消費する宿泊費及びその他費用(食事代、施設利用料等)を訪問先のサービス業の売上として計測対象とする。各地域の入込客を表-8の入込客比率と周遊客の50%とし、さらに、各地域の宿泊客比率を考慮して、宿泊者数とする。これに、表-8に示す国内旅行宿泊観光費用原単位(円/人)を乗じて国内量に伴う消費額とする。

表-8 観光入込み客と観光費用原単位

地域	利用者の割合 (%)			宿泊比率 (%)		観光費用 原単位 (円/人)
	入込客	居住者	周遊者	宿泊	日帰り	
北海道	53.0	41.8	5.2	94.2	5.8	54,500
東北	59.4	35.1	5.5	93.6	6.4	57,400
関東	39.5	53.8	6.7	82.8	17.2	54,800
中部	38.9	55.9	5.2	87.7	12.3	59,800
近畿	34.6	60.0	5.4	89.1	10.9	57,600
中国	53.4	40.1	6.5	89.4	10.6	43,100
四国	48.2	45.9	5.9	82.5	17.5	49,000
九州	52.4	42.1	5.5	90.4	9.6	52,900
沖縄	76.6	19.2	4.2	98.8	1.2	60,100

資料:平成7年 航空旅客動態調査

3) 波及効果

波及効果については、図-7に示す効果計測フローに従い産業連関分析により算出する。用いる産業連関表としては、地域ブロック単位での効果計測を行うため、地域内産業連関表を用いることとする。

アウトプットとなる指標は、生産額、粗付加価値額、税収額、雇用者数の4つとする。なお、各効果項目の計測方法については杉村他(2004)に詳しく、ここでは省略する。

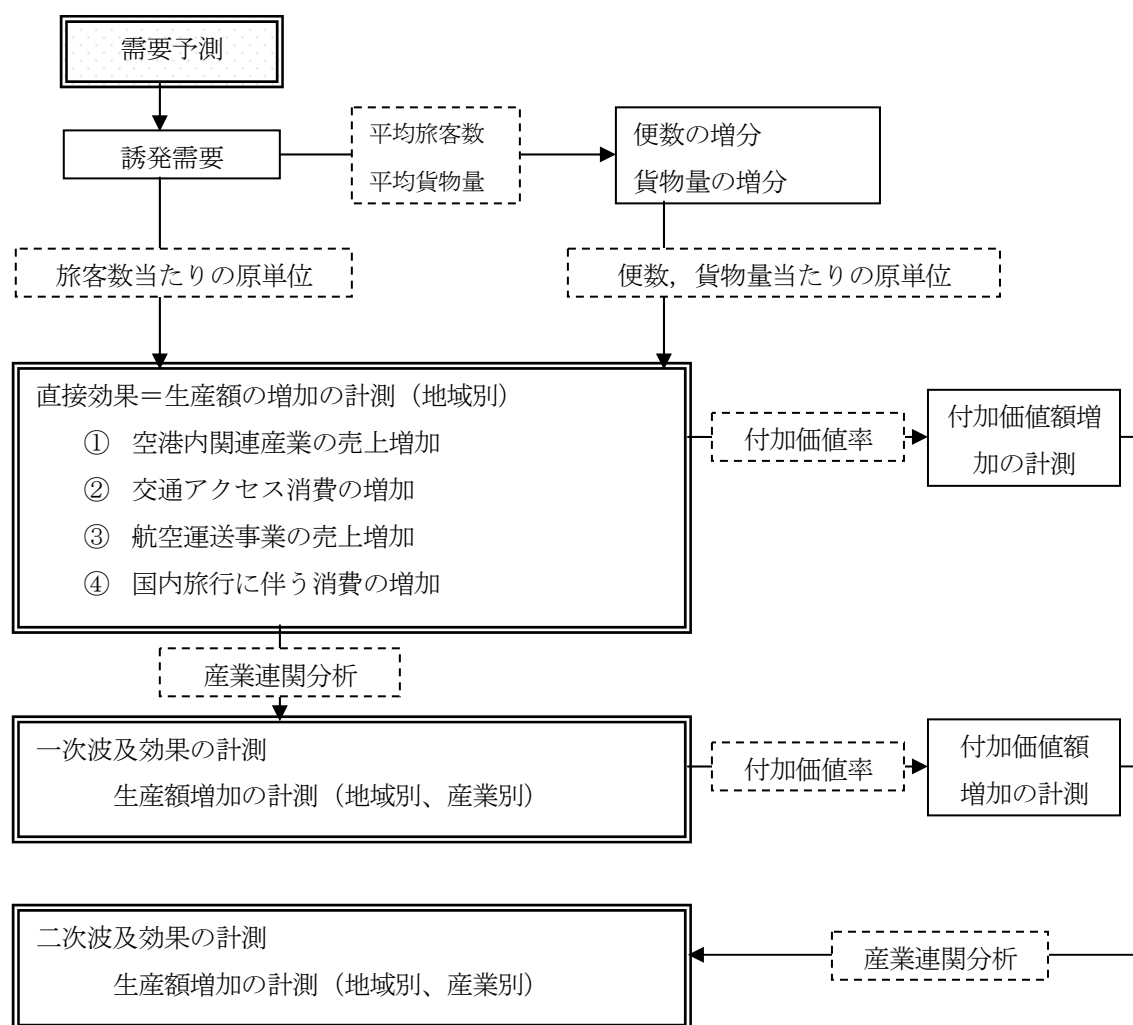


図-7 経済波及効果の計測フロー

3.2 空港整備の地域経済波及効果の試算

上記モデルを使って、空港整備が及ぼす地域経済への波及効果について検討する。例として、ある地域に新空港を整備し、東京との路線を就航させた場合を想定し、航空需要が20万人（発着数）になった場合の地域経済への波及効果について試算する。

表-9は、東北地域の計算結果である。生産額の増加、税収増加、雇用者数の増加が東北地域と関東地域に生じる。なお、付加価値額の増加は生産額増加の内数である。また、各項目について、直接効果と一次と二次の波及効果が計算される。このような計算を各地域について実施し、結果をまとめたものが表-10である。

表-9 経済波及効果の計算例

(単位: 億円)

	生産額増加				付加価値額増加			
	直接 効果	波及効果		合計	直接 効果	波及効果		合計
		(一次)	(二次)			(一次)	(二次)	
北海道	0	0	0	0	0	0	0	0
東北	30.5	12.0	12.2	54.7	18.6	7.0	7.8	33.4
関東	33.6	17.2	17.7	68.5	19.7	9.9	10.9	40.5
中部	0	0	0	0	0	0	0	0
近畿	0	0	0	0	0	0	0	0
中国	0	0	0	0	0	0	0	0
四国	0	0	0	0	0	0	0	0
九州	0	0	0	0	0	0	0	0
沖縄	0	0	0	0	0	0	0	0
全国	64.1	29.2	29.9	123.2	38.3	17.0	18.6	73.9

(単位: 億円、人)

	税収増加				雇用者数増加			
	直接 効果	波及効果		合計	直接 効果	波及効果		合計
		(一次)	(二次)			(一次)	(二次)	
北海道	0	0	0	0	0	0	0	0
東北	4	2	2	7	292	80	91	463
関東	4	2	2	9	265	95	111	471
中部	0	0	0	0	0	0	0	0
近畿	0	0	0	0	0	0	0	0
中国	0	0	0	0	0	0	0	0
四国	0	0	0	0	0	0	0	0
九州	0	0	0	0	0	0	0	0
沖縄	0	0	0	0	0	0	0	0
全国	8	4	4	16	557	175	202	934

注) 航空需要 20 万人(誘発需要 14 万人)を設定した試算値

表-10 地域別経済波及効果の試算結果

整備地域		生産額の増分 (億円)				雇用の創出 (人)			
		直接効果	波及効果	小計	合計	直接効果	波及効果	小計	合計
北海道	整備地域	30	27	56	124	278	192	470	937
	関東	33	35	68		264	203	467	
東北	整備地域	31	24	55	123	292	171	463	934
	関東	34	35	69		265	206	471	
中部	整備地域	34	28	62	131	259	168	427	897
	関東	34	35	69		266	204	470	
近畿	整備地域	33	30	63	132	253	183	436	913
	関東	34	35	70		269	208	477	
中国	整備地域	25	20	45	113	199	125	324	791
	関東	34	35	68		264	203	467	
四国	整備地域	24	18	42	110	208	124	332	799
	関東	34	35	68		264	203	467	
九州	整備地域	28	25	53	121	245	179	424	889
	関東	33	35	68		263	202	465	
沖縄	整備地域	33	28	62	134	364	285	649	1,143
	関東	35	37	72		280	214	494	

注) 各地域～関東に航空需要20万人(誘発需要14万人)を設定した試算値

生産額の増加として、直接効果と波及効果が算出される。表-10で分かるように、関東では、全てのケースで波及効果の方が直接効果より若干大きくなっているが、逆に、空港整備地域では全てのケースで直接効果のほうが波及効果より大きな値となっている。直接効果と波及効果の合計について、空港整備地域

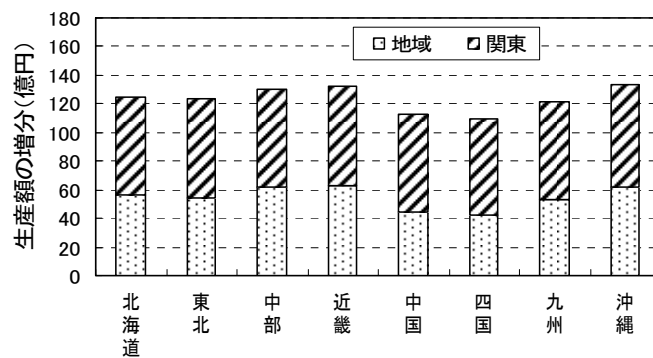


図-8 生産額の変化

による差に注目すると、関東では全てのケースで概ね同じであるが、空港整備地域の増加合計は四国から近畿で1.5倍の違いが認められる。また、各地域に空港整備する訳であるが、生産額の増加は関東の方が整備地域より大きいという結果になっている点も重要である。

図-8は、生産額の増加を図化したものであるが、沖縄に整備した場合の生産額増加の合計が最も大きくなっている。この傾向は図-9の雇用の創出ではさらに顕著であり、沖縄においては他の地域に比べて非常に大きな雇用創出効果が期待できることが伺える。

これらの図を見る限り、沖縄における効果が比較的大きく、航空需要が発生するならば、空港整備の効果が他の地域に比べて非常に大きなものになることが期待できる。ポートセールスや観光誘致などによる空港利用者の増加が沖縄経済にとって有効であると考えられる。

なお、今回は20万人の航空需要(誘発需要14万人)に対する効果として算出しているが、本手法では原単位法をとっており、基本的には、これらの効果は需要に対して比例することになる。

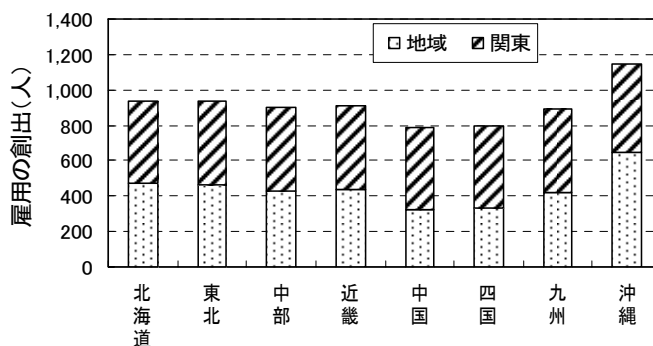


図-9 雇用者数の増加

よって、想定される航空需要が異なる場合、今回の結果を使って換算でき、概略の検討が可能である。

実際には、新空港を整備する都市もしくは拡張工事や増便などを実施する空港によって、誘発・転換される航空需要は大きく異なると予想される。航空需要がどれだけ生じるかが基本的には最も重要であり、図-7に示したフロー図の最初の需要予測精度の高度化が必要であり、今後の研究に期待したい。

4. 応用一般均衡モデルによる空港整備効果分析

空港を整備して機能を向上させることによって航空サービスの効率化が図られ、航空企業は収益を上げるとともに、他の産業にも良い効果が波及するはずである。この過程を応

用一般均衡モデルによる経済波及効果として分析をする。ここでは、航空企業への影響が大きく、航空の効率化への影響が最も大きく、かつ、段階的に整備が行われその変化・効果がフォロー出来る羽田空港の沖合展開整備について事例研究する。

4.1 航空企業の生産関数の推定

生産関数アプローチを用いて、羽田空港の発着容量を取り込んだ航空輸送サービス産業の生産関数をモデル化し、羽田空港の容量拡大が航空輸送サービス産業の生産性に与えてきた効果を推計する。このため、羽田空港の総スロット数を生産技術のシフト要因変数として採用する。

航空輸送サービス産業の生産関数を、以下のように Cobb-Douglas 型の関数形とする。

$$Y_{mt} = A_{mt} \cdot I_{mt}^{\beta_2} K_{mt}^{\beta_3} L_{mt}^{\beta_4} \quad (1)$$

ここで

Y_{mt} : 航空輸送サービス産業 m、時点 t における生産量（営業収益）

I_{mt} : 航空輸送サービス産業 m、時点 t における中間投入

K_{mt} : 航空輸送サービス産業 m、時点 t における資本投入

L_{mt} : 航空輸送サービス産業 m、時点 t における労働投入

A_{mt} : 航空輸送サービス産業 m、時点 t における生産技術

$\beta_2, \beta_3, \beta_4$: パラメータ

生産技術を表す関数 A_{mt} において、関数形やその他シフト要因について、種々のパターンを検討した結果、次の関数を用いることとした。

$$A_{mt} = \exp(\beta_0) \exp(\beta_{11} \cdot Trend_t) \exp(\beta_{12} \cdot E_t) \quad (2)$$

$Trend_t$: トレンド要因変数

E_t : 時点 t における羽田空港の総スロット数

$\beta_0, \beta_{11}, \beta_{12}$: パラメータ

(1)式は、航空輸送サービス産業は、本源的生産要素である資本と労働および中間財を投入し、航空輸送サービスの生産を行うことを表す。各時点の各航空輸送サービス産業の生産技術（全要素生産性：TFP）は、これをシフトさせる外的要因によって変化する。

なお、パラメータ推定の際には、時系列データを用いて回帰分析を行った。推定に使用したデータとパラメータ推定の結果をそれぞれ表-11 と表-12 にまとめて示す。

表-11 推定に使用したデータ

データ項目	出典	整備方法
航空輸送企業別生産量 (平成7年暦年価格)	①航空統計要覧(2003年版)	JAL, JAS, ANAの営業収益を国内総支出デフレーターでデフレートし実質化
羽田空港 スロット	航空局資料	
航空輸送企業別中間投入 (平成7年暦年価格)	①航空統計要覧(2003年版) ②各企業の有価証券報告書	中間投入＝航空燃油費＋整備費＋運航施設利用費＋一般管理販売費＋代理店手数料＋航空保険費＋その他 (販管費中の減価償却費は除く)
航空輸送企業別資本投入 (平成7年暦年価格)	①航空統計要覧(2003年版) ②各企業の有価証券報告書	資本投入＝営業利益＋航空機材減価償却費＋販管費中の減価償却費
航空輸送企業別労働投入 (平成7年暦年価格)	①航空統計要覧(2003年版) ②各企業の有価証券報告書	労働投入＝人件費

表-12 生産関数パラメータ推定結果

変数	パラメータ	係数	t値
定数項	: β_0	0.667364	8.94
トレンド	: β_{11}	-0.004205	-1.81
羽田スロット	: β_{12}	0.000143	1.29
ln(実質I)	: β_2	0.716675	33.76
ln(実質K)	: β_3	0.069812	15.32
ln(実質L)	: β_4	0.218696	12.01

自由度修正済み決定係数＝0.999

4. 2 推定結果

上記のパラメータ推定結果を用いて、過去の各年度において、羽田空港の容量拡大によってもたらされた航空輸送サービス規模の発展をシミュレーションする。ここでは、航空輸送サービスの生産規模の指標として、我が国の航空輸送サービス産業部門における生産額を用いる。

シミュレーション分析においては、仮にスロット数が1985年のままだった場合（ただし、各企業の投資等は同じ）をwithoutケース、現況の水準で推移した場合をwithケースと想定する。両ケースの差を羽田空港のスロット増大によりもたらされた航空輸送サービス産業への効果と見なす。分析結果を図-10に示す。

この結果より、羽田空港の新B滑走路が供用された2000年度に効果が大きく表れていることが確認できる。すなわち、2000年度では、1985年度の空港容量水準からの容量拡大のみによってもたらされた、航空輸送サービス産業への生産額増加効果が、年あたり1,000億円を超える規模となっている。同様に、羽田空港の新C滑走路が供用された1997年度においては、年あたり約700億円の生産額増加効果が見られる。

なお、生産関数アプローチにより 1985 年度から 2001 年度までの羽田の発着容量拡大による航空輸送サービス産業の全要素生産性の変化を算出すると、約 4.5%となる。

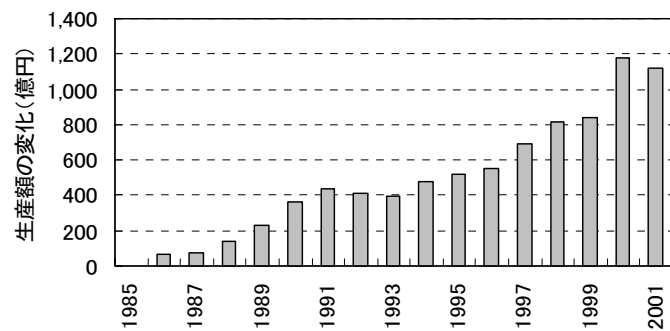


図-10 羽田空港スロット増大が生産額に与える効果

4. 3 応用一般均衡モデルによる経済波及効果分析

1) モデルの概要と前提条件

本節は、前節で推定結果した航空輸送サービス産業の生産関数を取り込んだ応用一般均衡モデル（以下 CGE モデルと表記）を構築し、空港施設整備による直接的な効果（航空輸送サービス産業の生産性向上等）のみならず波及的な効果まで含めた計測を行う。

モデルの前提条件を以下のとおりとする。

- 日本国経済を 1 地域経済と見なす。
- 経済主体は家計と企業の 2 主体より構成されている。
- 企業は各産業（アクティビティベース）毎に 1 つ存在する。
- 社会は長期的均衡状態にある。
- 家計は生産要素（労働・資本）を保有し、企業にこれらを提供し対価として所得を受け取り、財・サービスの消費により効用を最大化する。
- 企業は、中間投入財と、家計から提供される労働・資本を生産要素として投入することにより、財・サービスを生産し、利潤を最大化する。

CGE モデルの基準均衡データとして、2000 年の産業連関表（平成 16 年 3 月 1 日公表）を用いる。その 32 部門表および航空輸送サービス産業部門（産業連関表では航空輸送部門と表記）が明示的に分離されている 104 部門表を基本とし、産業部門分類は 30 部門に設定する。なお、32 部門表においては「鉱業」部門と「石油・石炭製品」部門は区分されているが、「鉱業」部門の国内最終需要がマイナスである。このため「鉱業」部門を区分した状態では、適切な効用関数パラメータの推計が行うことができない。このため、本研究は、産業部門分類の設定にあたり、「鉱業」部門と「石油・石炭製品」部門を統合した。「鉄鋼」部門についても同様に国内最終需要がマイナスであるため、「非鉄製品」部門と「金属製品」部門を統合した。また、32 部門表では運輸業が細分化されていないため、104 部門表のデータを用いて「航空輸送」部門と「その他運輸業」部門を分離した。

なお、モデルの定式化については、石倉（2005）に詳しく、本文では省略する。

2) 羽田空港整備の経済波及効果分析

前節で推計した生産関数によると、1985 年度から 2001 年度までの羽田の発着容量拡大による航空輸送サービス産業の全要素生産性の変化は約 4.5%である。したがってこれを CGE モデルにおける航空輸送サービス産業の生産関数に入力することによって、当該期間における羽田空港の発着容量拡大による国民経済的な効果を計測することが可能である。具体的には、航空輸送サービス産業の生産関数の生産技術パラメータ η_j を 1.045 倍したケースを with、 η_j を変化させないケースを without として計測を行う。

①財・サービス価格に及ぼされる効果

航空輸送サービス産業の生産性向上による財・サービスの価格低下率と、各産業における航空輸送の投入係数を比較した結果を図-11 に示す（ただし航空輸送は除く）。この図から分かるように、航空輸送の投入係数が比較的高い産業（商業、通信・放送、その他の公共サービスなど）における財・サービスの価格低下率が大きいことがわかる。一方、航空輸送の投入係数が低い農林水産業や食料品などにおいても、投入係数が高い産業の 1/2 程度の価格低下率を示しており、航空輸送サービス産業の生産性向上が産業間の取引を通じて幅広い産業に影響を与えることが示唆される。なお、航空輸送は約 4.35%価格が低下するという結果が得られた。

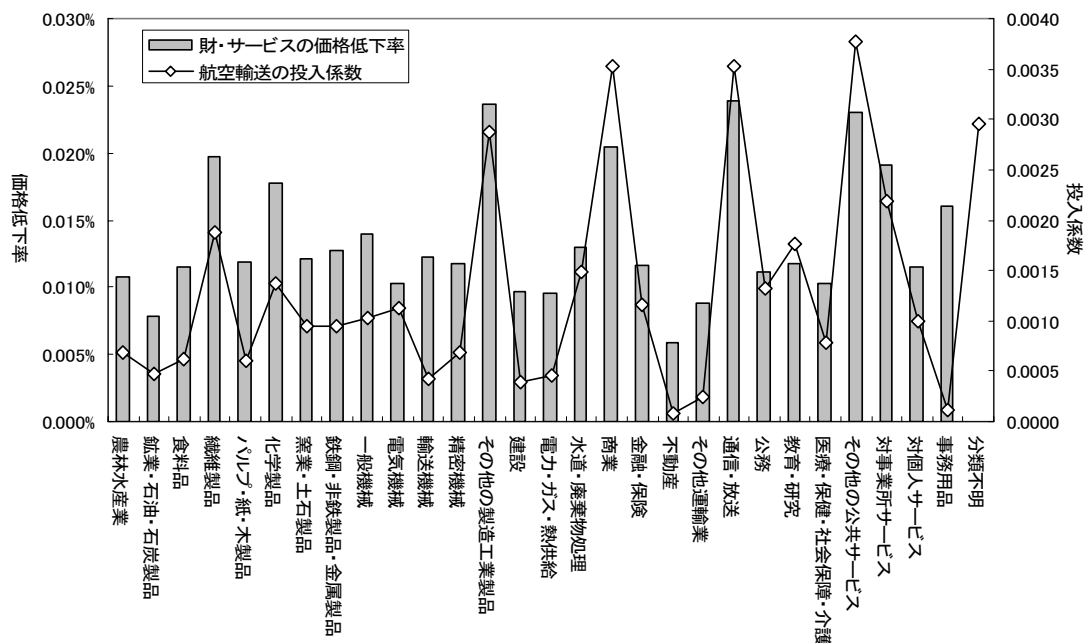


図-11 財・サービスの価格変化および投入係数

②生産額に及ぼされる効果と便益

次に、生産額の変化を図-12に、変化率を図-13に示す（ただし航空輸送は除く）。これも商業、対事業所サービスのような航空輸送からの投入が比較的大きい産業における伸びが大きい。なお、航空輸送の生産額の増分は約1,464億円／年となり、産業全体での生産額増分は約2,418億円／年となる。

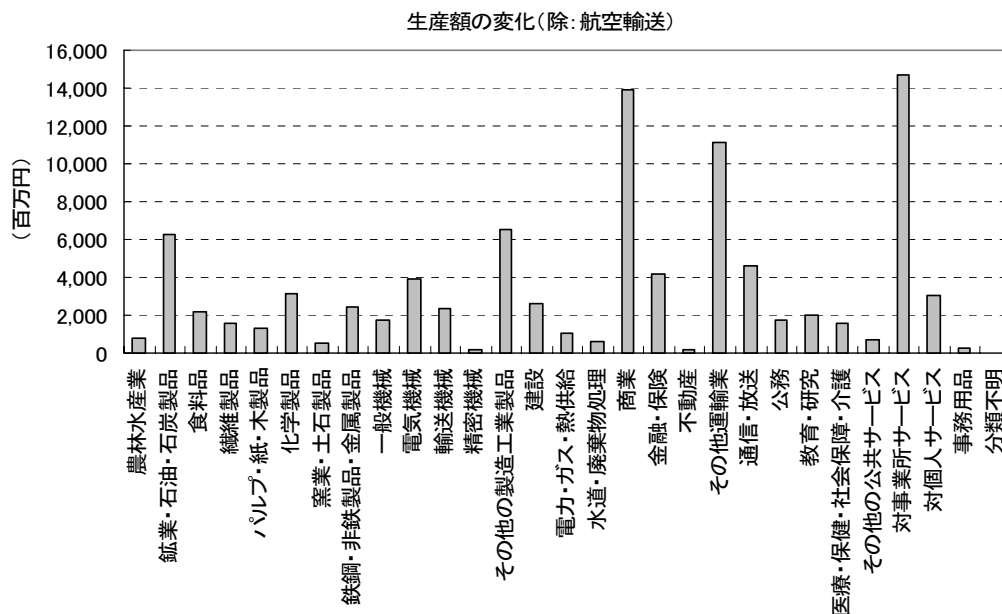


図-12 各産業部門別の生産額の変化

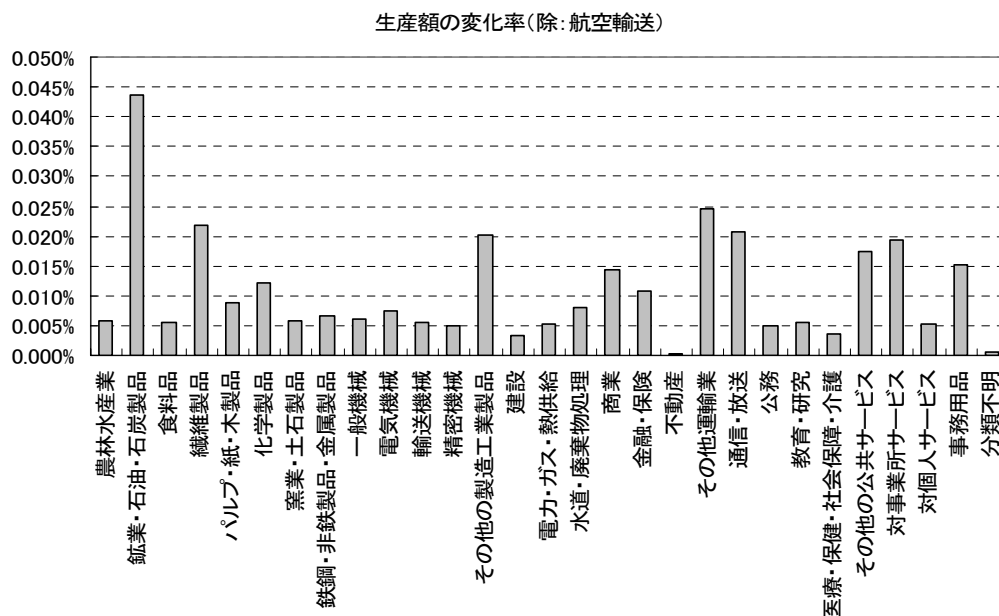


図-13 各産業部門別の生産額変化率

5. おわりに

我が国の空港整備の現状についてまとめるとともに、空港整備による経済効果について最近のモデルを使って試算し考察した。本文の検討は、単純ないくつかの仮定の下に行ったものではあるが、経済波及効果が空港整備地域より関東地域の方が若干大きく、沖縄地域に整備する場合は航空需要に対する経済効果割合が最も大きくなるという結果を得た。

また、応用一般均衡モデルによる経済波及効果分析では、羽田空港の整備(容量増加)効果が、航空サービスと直接関係する運輸サービス業や鉱業・石油分野以外にも、商業や対事業所サービスなど、広い分野に影響することが示された。

このように、空港整備の経済効果は地域的にも、産業分野的にも広い範囲に大きな効果があることが示された。これら二つの計測モデルによって、空港整備の経済波及効果に関して、ある程度定量的な説明が可能になったと考えている。しかし、今回の計測手法による結果がどの程度正しいかを統計的に計測する具体的な方法はなく、これらの計測モデルの信頼性を高いものにするには、これと併行して、より精度の高い航空需要予測が不可欠であると考えている。

最後に、本文における経済波及効果モデルの研究は、主に、空港計画研究室の石井室長、杉村主任研究官、石倉主任研究官によるものであり、本文の考察にあたり、様々な意見をいただいた。また、図表等の整理には空港計画研究室の千田研究員、空港ターミナル研究室の宇城研究員に多大な協力をしていただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- ・石倉智樹;航空輸送サービス産業の生産性向上を考慮した応用一般均衡モデルによる空港整備効果分析:羽田空港を例として, 国総研報告, 2005
- ・杉村佳寿・石倉智樹・石井正樹;空港整備による経済効果計測システムの開発, 国総研資料 2004
- ・国土交通省航空局;東京国際空港再拡張に伴う経済波及効果調査報告書, 2003
- ・国土交通省航空局;航空需要予測手法に関する調査報告書, 国土交通省ウェブサイト, 2001
- ・国土交通省航空局;平成 11 年航空旅客動態調査, 1999
- ・国土交通省航空局;平成 11 年国際航空旅客動態調査, 1999
- ・航空振興財団;数字で見る航空 2002 など
- ・総務庁;平成 7 年産業連関表一総合解説編一, 1999
- ・日本航空機開発協会(財);民間航空機関連データ集(H16.3), 2004

<参考資料>

1. 空港整備事業の費用対効果分析における効果項目と計測対象

空港整備事業の費用対効果分析マニュアル 1999 （運輸省航空局）より抜粋

費用対効果分析における効果項目と計測対象(例)

区分	主たる効果項目(例)	費用便益分析		定量的・定性的評価の対象
		ステップ1の対象	ステップ2の対象	
利用者効果	旅行・輸送時間の短縮	◎		
	定時性の向上		○	
	運航頻度の増加		○	
	旅行・輸送費用の低減	◎		
	安全性の向上			△
供給者効果	空港管理者の収益増加	◎		
	エアラインの収益増加			△
	アクセス交通機関事業者の収益等増加			△
地域企業・住民効果 (非利用者効果)	観光入り込み客の増加			△
	雇用機会の拡大			△
	地域所得の増大			△
	企業生産の増大			△
	法人税・所得税・土地関連税等の税収上昇			△
	空港周辺の土地利用の促進			△
	空港跡地の有効活用			△
	資産価値の増大			△
	騒音等の変化			△
	均衡のとれた国土形成への寄与(離島等の振興)			△
	地域シンボルの形成			△
	地域安全上の向上(災害時移動手段の確保)			△

- (注) ◎ (ステップ1) : 費用便益分析の中で取り扱う基本的な便益視点・項目(重複は許されない)
 ○ (ステップ2) : 費用便益分析の中で、上記に加え拡張して取り扱う便益視点・項目(多少計測精度等の課題があるものも可、但し、上記便益を含めて重複は許されない)
 △ : 費用便益分析の外で、定量的及び定性的評価に対応する視点・効果項目(上記との重複を許す)

2. 応用一般均衡分析において使用したエアラインの営業収益

エアライン 年	JAL (億円)				ANA (億円)				JAS (億円)			
	実質Y	実質I	実質K	実質L	実質Y	実質I	実質K	実質L	実質Y	実質I	実質K	実質L
1985	9,248	6,245	807	2,196	5,217	3,539	657	1,021	1,676	1,123	206	347
1986	8,618	5,371	986	2,261	5,303	3,419	786	1,098	1,694	1,097	229	368
1987	9,371	5,579	1,366	2,426	5,823	3,707	933	1,183	1,862	1,210	239	413
1988	10,249	5,876	1,740	2,633	6,326	3,900	1,144	1,281	1,993	1,335	203	455
1989	11,292	6,704	1,826	2,762	7,157	4,437	1,326	1,394	2,299	1,497	312	490
1990	11,631	7,531	1,213	2,887	7,624	5,091	1,156	1,377	2,531	1,674	311	545
1991	11,282	7,615	701	2,966	8,089	5,231	1,306	1,552	2,700	1,770	335	595
1992	10,329	7,479	219	2,631	8,075	5,430	1,031	1,614	2,718	1,874	247	598
1993	9,774	7,083	168	2,523	7,709	5,478	646	1,584	2,702	1,940	156	605
1994	10,312	7,264	453	2,596	7,994	5,714	702	1,578	2,797	2,032	161	604
1995	11,182	7,806	702	2,673	8,477	6,102	759	1,616	2,982	2,192	162	627
1996	12,062	8,749	623	2,689	8,955	6,707	628	1,620	3,216	2,410	166	640
1997	12,234	8,874	753	2,607	9,130	7,033	452	1,645	3,264	2,550	73	642
1998	11,670	8,599	708	2,363	9,103	7,140	342	1,620	3,355	2,592	160	603
1999	11,976	8,692	807	2,478	9,352	7,243	539	1,571	3,537	2,665	270	602
2000	13,151	9,498	1,114	2,540	10,111	7,459	1,054	1,598	3,769	2,768	361	640
2001	12,389	9,563	375	2,451	9,693	7,490	591	1,612	3,820	2,880	302	638

セカンドステージITSのめざすもの

高度情報化研究センター長

山 田 晴 利

高度道路交通システム研究室長

平 井 節 生

セカンドステージITSのめざすもの

高度情報化研究センター長 山田晴利

高度情報化研究センター高度道路交通システム研究室長 平井節生

1. はじめに

21 世紀に入り、インターネットや携帯電話など、IT（情報通信技術）を利用したサービスや商品は、既に国民生活に欠くことができない身近な存在として定着している。ITS（高度道路交通システム）についても、カーナビゲーションシステムの累積出荷台数は 1,800 万台、VICS（道路交通情報通信システム）ユニットの累積出荷台数は 1,180 万台にのぼり（2005 年 3 月現在）、自動車の一般的な装備として普及している。さらに、ETC（自動料金収受システム）車載器のセットアップ台数も 800 万台を超え、決済件数の比率も 50 % に迫り（2005 年 8 月 20 日現在）、首都高速本線料金所の料金所渋滞がほぼ解消するなど（図-1）、既に日常的なツールとして定着しつつある。

このように、ITS の進展に伴い、安全性や利便性が向上するとともに、安全で円滑な道路交通や生活環境の改善などが実現し始めている。

このことは、ITS が、生活の一部となり、社会的課題の解決、社会の変革に貢献することができる「セカンドステージITS」ともいえるべき状況に進展していることを示している。

今後の ITS では、これらの個々のサービスを連携・融合することにより、移動・交通の質を向上させ、事故・環境負荷・渋滞など負の遺産の清算、高齢者、身障者のモビリティ確保、豊かな生活・地域社会の実現、ビジネス環境の改善といった社会的課題の解決に貢献し、いっそうスマートなモビリティ社会を実現していくことが期待されている（図-2）。

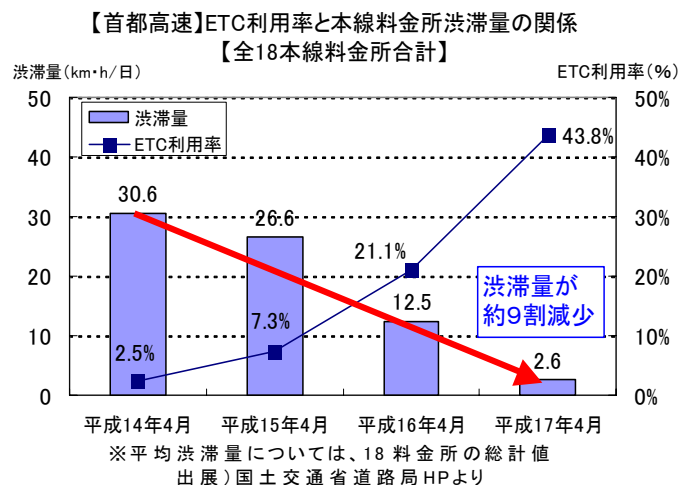


図-1 ETC普及にともなう渋滞削減効果（首都高 18 本線料金所）

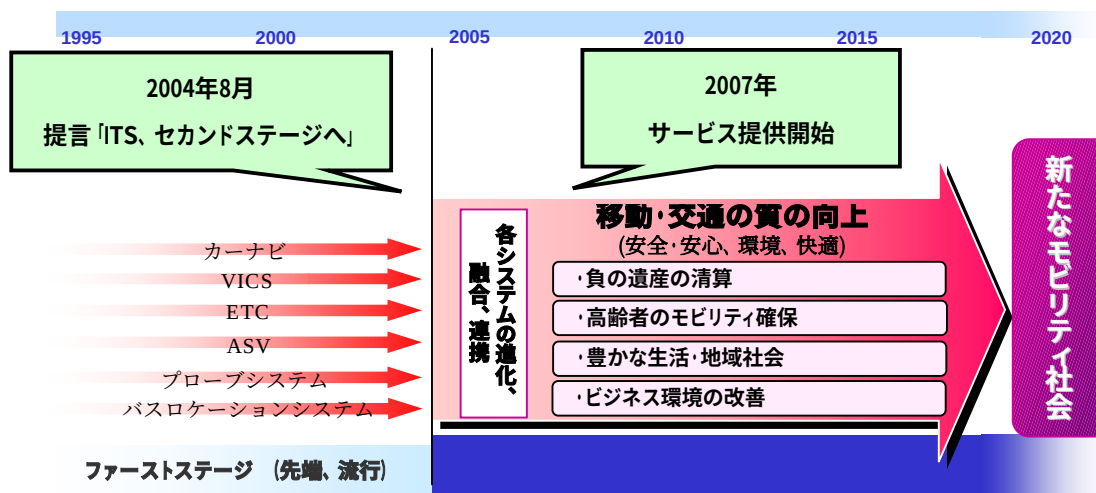


図-2 新たなモビリティ社会

2. ITS、セカンドステージへ

ITSにより、新たなモビリティ社会を実現するための具体的な方策として、2004年8月にスマートウェイ推進会議（委員長：豊田章一郎（社）日本経済団体連合会名誉会長）より、提言「ITS、セカンドステージへ」（以下、提言）がだされた。

提言によれば、「車両情報送信」、「決済」、「情報提供」、「案内・警告」といった基礎的なITSサービスの活用と組み合わせにより、「安全・安心」、「豊かさ・環境」、「快適・利便」といったITSサービスシーンを実現することがめざされている。また、これらの様々なサービスシーンを着実に実現していくために、2007年に以下に示す3つのITSサービスを利用できるようにすることが望ましいとされている（図-3）。



図-3 2007年に実現を目指す次世代道路サービス

① あらゆるゲートのスムーズな通過

駐車場をはじめ、様々なシーンでのキャッシュレス決済によるスムーズなゲートの通過を実現。例：公共駐車場決済サービス

② 場所やニーズに応じた地域ガイド

周辺の道路情報や地域・観光情報を集約・配信し、利便性向上・地域活性化を図る。例：道の駅等情報提供サービス

③ タイムリーな走行支援情報の提供

走行中に事故多発地点、詳細な工事情報、渋滞末尾等の情報を即時的に提供し、安全・安心を向上させる。例：道路上における情報提供サービス

3. セカンドステージ ITS へ向けた取り組み

高度情報化研究センターでは、提言に示された3つのサービスを実現するため、3つのサービスに属する各種サービスについて社会実験等を実施してきている。

3.1 あらゆるゲートのスムーズな通過

3.1.1 駐車場における自動決済

次世代の ITS においては、有料道路の自動決済（ETC）だけでなく、駐車場等においても出入時に自動的な決済が可能な車載器を利用できるようにすることをめざしている（図-4）。国土政策技術総合研究所では、公共駐車場の

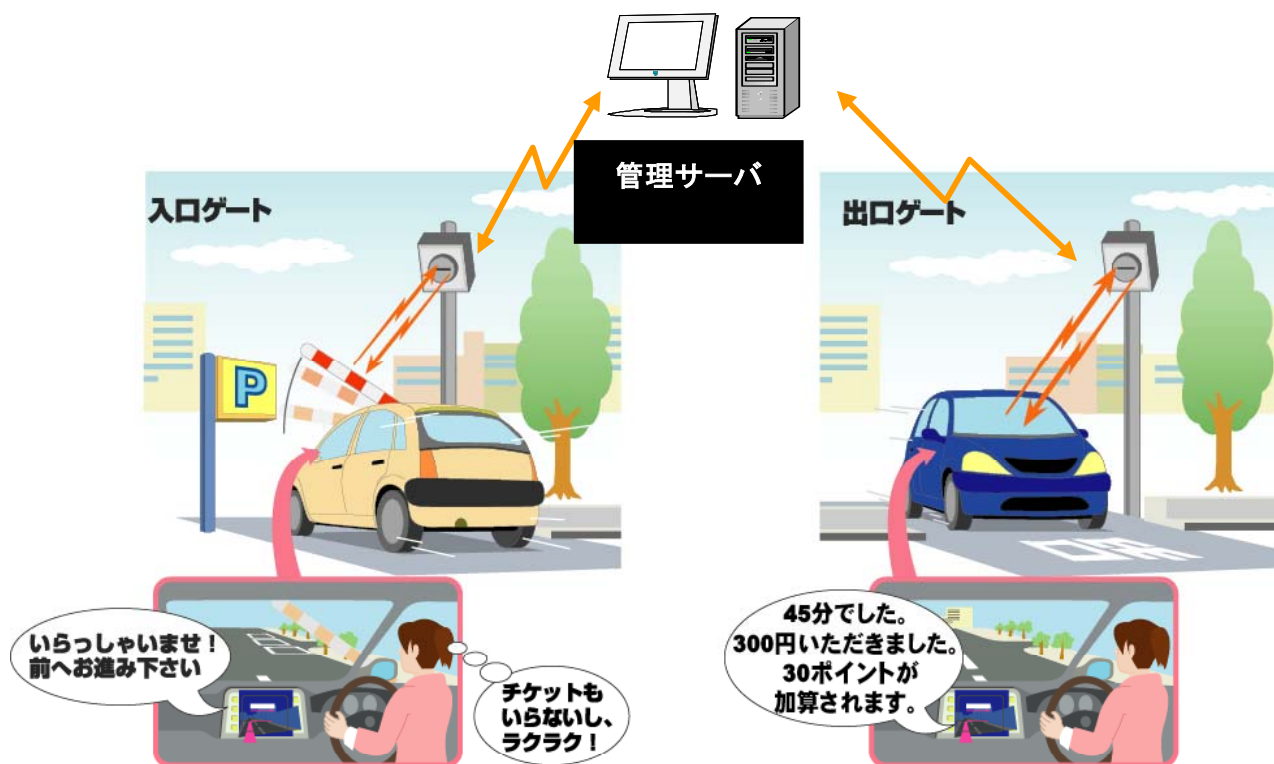


図-4 駐車場における自動決済概念図

自動料金決済を実現するべく、2004 年 10 月に名城公園で社会実験を行った。この結果、車の幅寄せや身を乗り出しての操作等が不要で快適な駐車場利用が可能となることが確認できた（図-5）。



図-5 平成 16 年 10 月名城公園における社会実験風景

3.1.2 スマート IC

スマート IC は ETC 専用の IC であり、従来型の IC に比べて少ない建設費で整備が可能であることから、追加 IC の整備を促進し、高速自動車国道等有料道路の有効活用に大きく貢献すると期待されている。



図-6 スマート IC 路上施設



図-7 SA/PA に適用したスマート IC 概念図

平成 16 年度は上郷 SA（東名高速道路）及び新井 PA（上信越自動車道）にて社会実験を通じたシステム評価を実施した。平成 17 年度は、平成 16 年度社会実験結果を踏まえ、より一層のコスト削減を目指して、本格導入に向けた検討を行っているところである。

利用者アンケート調査では、スマート IC の利用しやすさの視点において、一旦停止への不満が全体の約 25% 見られた。

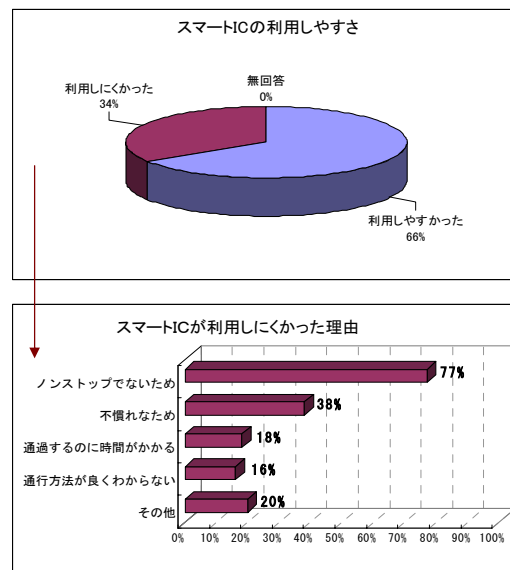


図-8、スマート IC の利用しやすさ

3.2 場所やニーズに応じた地域ガイド

3.2.1 道の駅等における情報提供

本サービスは、道の駅や SA・PA 等において停車中の車両に対し、道路交通情報や観光情報等をわかりやすく提供するサービスである。

平成 16 年度は名城公園正門前駐車場及び上郷 SA、平成 17 年度は道の駅庄和（国道 4 号沿い）及び道の駅やちよ（国道 16 号沿い）にて実証実験を実施し、基本的な機能の検証を行った（図-9）。

アンケート調査結果で ITS 車載器から入手したい情報を聞いたところ、道路交通（約 74%）、観光・イベント（約 59%）、災害・緊急（約 39%）の回答数が多かった。（図-10）



図-9 情報提供社会実験（道の駅庄和）

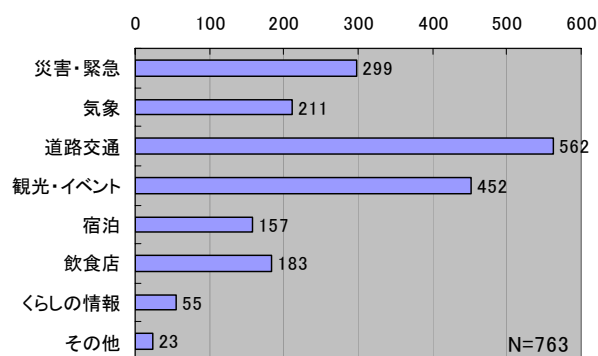
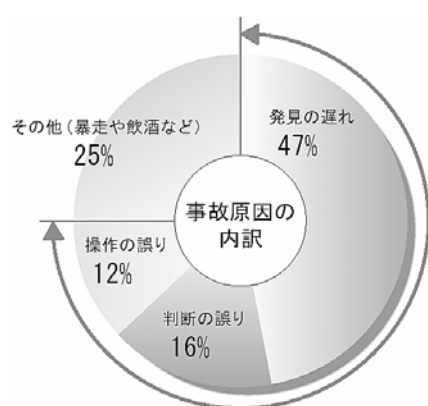


図-10 ITS 車載器から入手したいと思った情報別回答数

3.3 タイムリーな走行支援情報の提供

3.3.1 危険事象直前情報の重要性

事故の多くは、発見の遅れや判断の誤りといった事故直前のドライバーの行動に起因している（図-1 1）。このことから、事故削減にはドライバーに前方の道路状況を事前に知らせることが重要である。これに対し、車両にセンサー等を搭載し前方の障害物を発見するシステムの開発が進められている。このようなシステムにより前方障害物に対する走行安全性は高まりつつあるが、前方の状況がドライバーから見えにくく、車両のセンサーでは検知することが困難な急カーブでの事故対策を早期に行う必要があり、この対策には道路側から車両側に前方障害物の情報を提供することが必要不可欠である（図-1 2）。



ドライバーの事故直前の行動が原因の75%を占める

出典：「平成12年交通事故統計データ」
（財）交通事故総合分析センター

図-1 1 事故原因の内訳

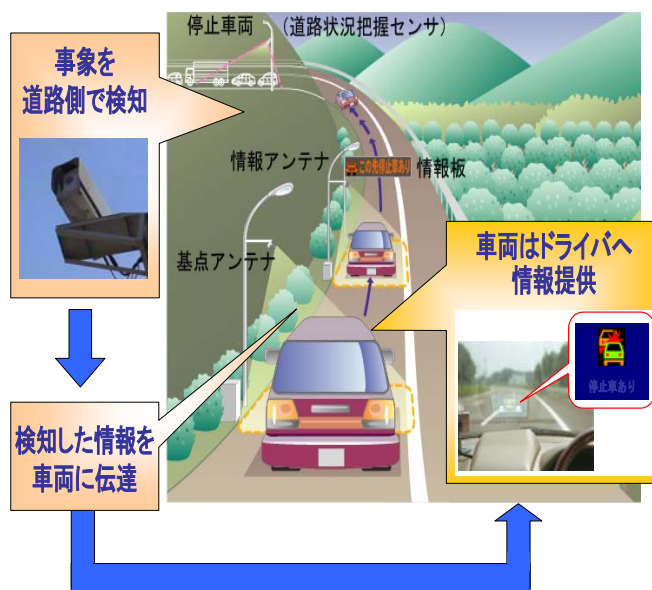


図-1 2 前方障害物情報提供サービス

3.3.2 首都高速参宮橋における実験

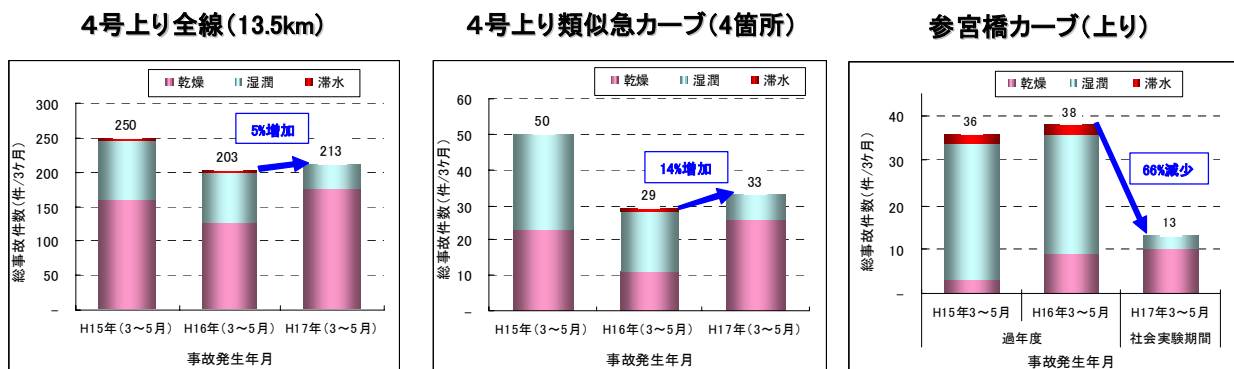
首都高速道路4号新宿線参宮橋区間は、半径88mの急カーブであり、2003年度には181件の事故が発生した。平成17年3月～5月、首都高速道路4号新宿線参宮橋区間において、カーブ先の停止・低速車（渋滞末尾を含む）を道路側のセンサーで検出し、カーブに進入する車両の車載器を通してドライバーに情報提供を行う社会実験を実施した（図-1 3）。

その結果、首都高速道路4号全線および類似する急カーブとも、2004年に比べて2005年は事故件数が微増傾向であったが、参宮橋カーブはH17年にきわだって減少している。このことから、参宮橋カーブでは社会実験で行ったサービスを含む交通安全対策の効果が現れていると考えられる（図-1 4）。また、サービスに対するドライバーの評価も高いことがわかった。

現在、システムの改良及び長期の事故削減効果の検証を目的として、引き続き社会実験を実施しているところである。



図-1 3 首都高速における社会実験



注1) H15年、16年はMEXデータ(本線)による件数。

注2) 類似急カーブは曲線半径200m以下の区間で発生した事故を対象

図-1 4 参宮橋カーブを含む4号新宿線の事故発生状況

3.3.3 サグ部での渋滞削減

高速道路での渋滞については、ETCの普及に伴い、料金所渋滞は解決の方向に向かっており、今後はサグ・トンネル部における渋滞対策が重要な課題となっている(図-1 5)。そのため、サグ部における渋滞発生要因の分析や渋滞削減に向けたITSサービスの実現性等の検討を進めている。

高速道路サグ部は、容量ボトルネックとして知られている。そこでの渋滞発生原因をi)進行方向の車両挙動に関連する要因、ii)車線利用に関連する要因、iii)特定の車両の挙動に関連する要因の3つに分けて整理した(図-1 6、表-1)。i)~iii)に対応したサグ部渋滞対策の着眼点を整理すると、i)ボトルネ

ック部で速度低下を起こさせない（あるいは速度低下しても早期に回復させる）、ii) 車線利用率を予め均等化しておく、iii) 車群を形成させない、の3つにまとめられる。

研究開発中の AHS 円滑化サービスは、渋滞発生前を対象とし、交通状況に応じた適切なタイミング・内容の情報提供をコンセプトとした新しい対策である。

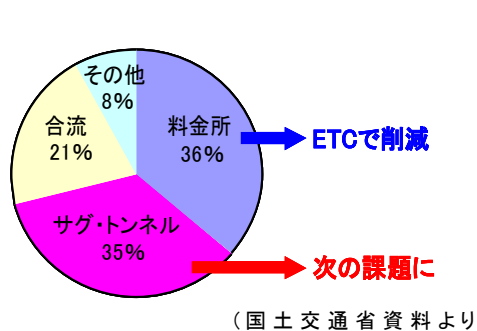


図-15 高速道路の道路構造別
渋滞発生回数内訳 (2002年)

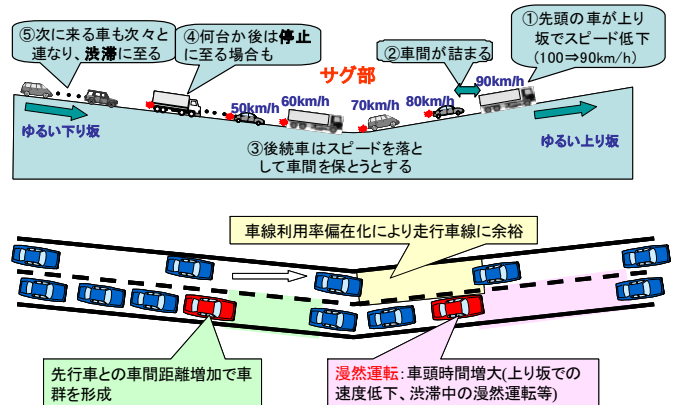


図-16 サグ部における渋滞発生の基本メカニズム

表-1 渋滞発生要因の整理

渋滞発生要因	概要
i) 進行方向の車両挙動に関連する要因 (漫然運転等による容量低下)	・漫然運転によるサグ部での無意識な速度低下のため前方車両との車間を過度に空けてしまうため、車線容量の効率的利用を妨げる。
ii) 車線利用に関連する要因 (車線利用の偏り)	・渋滞直前には、早く行きたい車両が追越車線に過度に集中するため、追越車線から渋滞が始まる。 ・渋滞開始後は、追越車線上の車両が速度低下を嫌って一斉に余裕のある走行車線へ復帰するため、走行車線もまた一挙に渋滞状態になり、断面全体での容量が効率的に使われない。
iii) 特定の車両の挙動に関連する要因 (車群の形成)	・上流で形成された車群がサグ部へ到着すると、先頭車の速度低下が引き起こす減速ショックウェーブが増幅されながら車群中を上流へ伝播する。 ・このとき、密度の高い大きな車群が到着すると、さらに上流側に伝播し、渋滞となる。 ・車群形成およびその規模には、「希望速度が遅い」「加速性能が悪い」といった「原因車両」が含まれるかどうかが大きく寄与していると考えられる¹⁾。

1) 大口敬、片倉正彦、鹿田成則：「高速道路単路部をボトルネックとする渋滞発生特性に関する実証的研究」, 高速道路と自動車, Vol44., No.12, 2001年

また、車線利用率適正化サービスの実現可能性を検討するために、既存の車両感知器データや路側に設置したビデオカメラ、AHS 可視画像処理センサー（K1 センサー）等で得られる区間走行軌跡データを利用し、車線利用状況の分析を行った。分析は東名高速下り大和地区（片側3車線）を対象とし、セン

サーでサグ部の交通状況および渋滞発生状況を観測した。

サグ部上流約 500m にある 21.54KP トラカンでの車線別交通量と速度の推移を図-17に示す。渋滞直前の 6:30 頃には、追越車線や第2走行車線（走行2）に比べ、第1走行車線（走行1）は 75~100pcu/5分交通量が少なく、余裕があることが分かる。その後、追越車線や走行2の渋滞発生に伴い一挙に渋滞状態に遷移している。渋滞直前での走行1と走行2の交通量の差は、断面交通量の約10%に相当する。したがって、渋滞発生前の時点で、前述のような「早く行きたい」ドライバー心理に働きかける有効な情報内容を提供できれば、車線利用の偏りをなくすことで車線の空きを有効に活用し、ボトルネック部の捌け交通量を増加させることができる可能性がある。

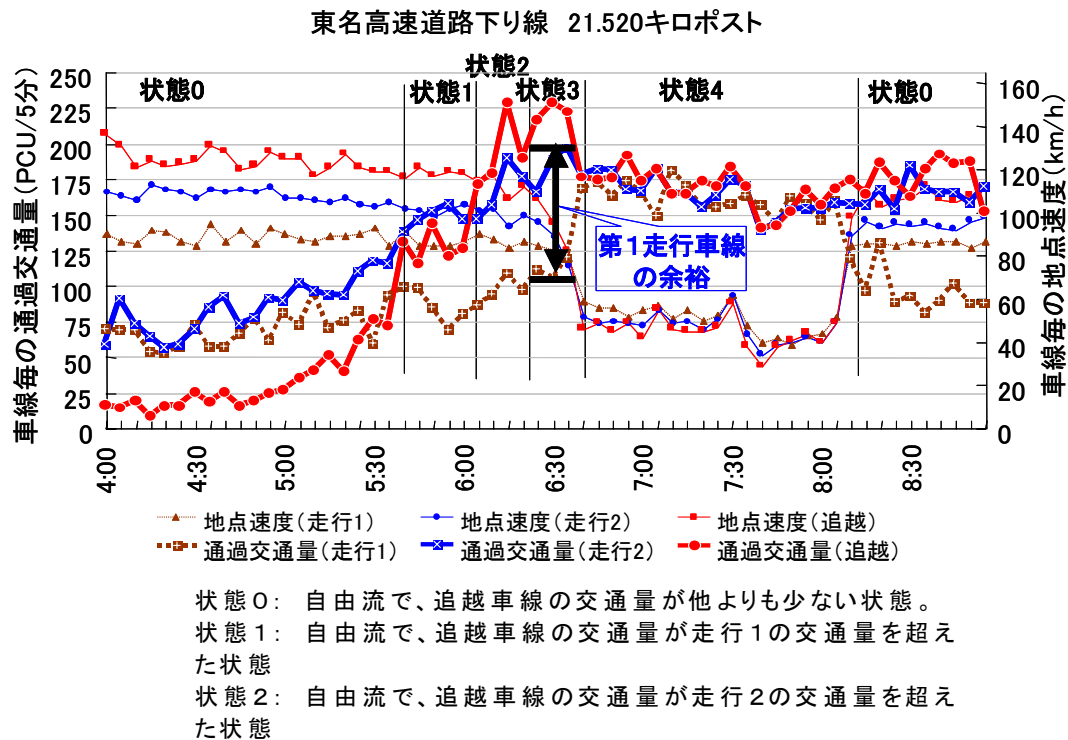


図-17 典型的な渋滞発生時における東名下り大和地区の交通量と速度の関係

3.3.4 道路交通情報の高度化

平成8年以来サービスを提供し続けている VICS（道路交通情報通信システム）に大容量の路車間通信及びプローブシステム（3.3.5 参照）を導入することにより、これまでより広範囲かつ高密度な情報提供を行えるようにするとともに、音声や静止画像を用いた情報提供サービスを目指している。

- ・ 大容量通信が可能な 5.8GHzDSRC を用いた VICS により、これまでよりも広範囲な情報を提供
- ・ タイムリーな音声情報により、高齢者等にもわかりやすい案内、注意喚起
- ・ 路側カメラが撮影した路面等の静止画像を活用し、従来よりも格段にわかりやすい情報を提供（画像の提供方法については、安全性の観点からも別途検討）
- ・ 車両からアップリンクするプローブデータ※を活用することにより、従来より多くの路線の情報を提供（具体的な方法については今後検討）

※車載器に蓄積された位置・時刻等のデータ。渋滞情報等に加工することが可能。

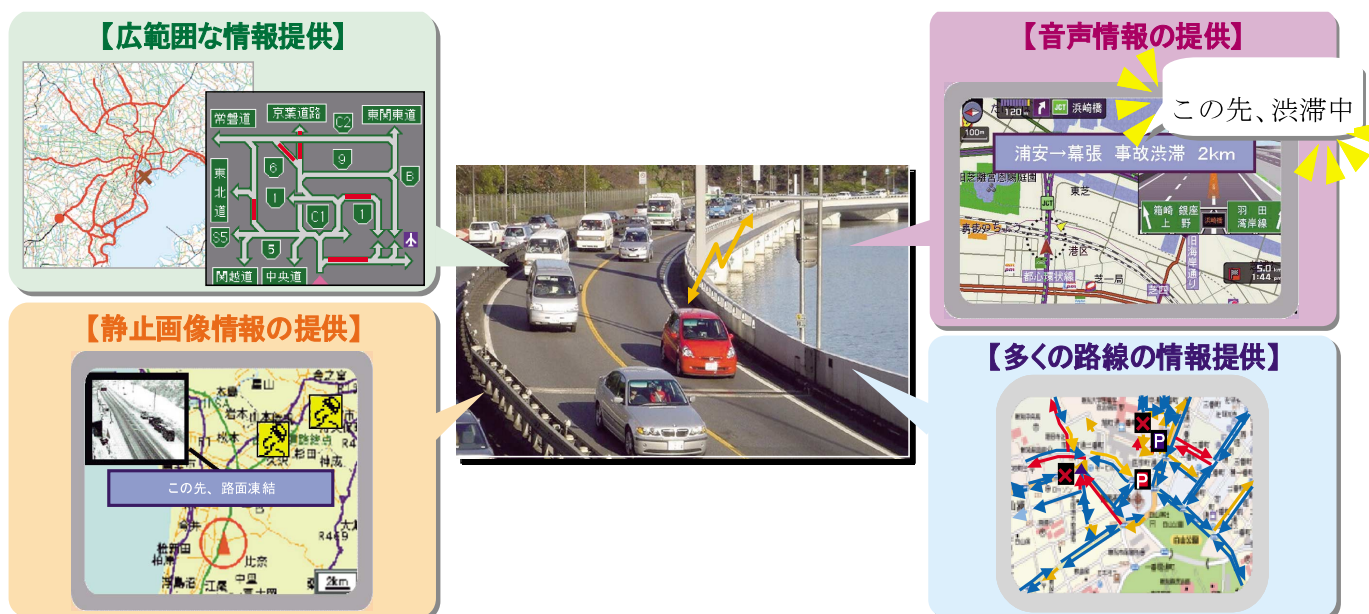


図-18 道路交通情報の高度化

3.3.5 プローブによる道路交通情報の収集と提供

プローブは、車両の走行履歴データや車両センサー情報（加速度、ワイパーのオンオフ等）を DSRC（狭域専用通信）等により収集し、そのデータを交通情報の提供、走行支援、道路管理等様々なサービスに応用するシステムである。

国土技術政策総合研究所では、道路利用者、民間事業者及び道路管理者のニーズを踏まえ、プローブを活用したサービス等の検討を進めている。

また、国土交通省では、プローブを用いた VICS の高度化について方向性を得るべく、平成17年6月より VICS プローブ懇談会（座長：東京大学桑原雅夫教授）を組織し、検討を行っている。

- ・ GPSからの位置情報等（プローブデータ）を車載器に蓄積、ビーコン通過時にアップリンク。また、路側センサや管理用カメラが道路上の障害物や路面状態を検知
- ・ サーバにおいてプローブデータを集計し、センターを通じて道路交通情報を提供
- ・ 音声や静止画像も用いたタイムリーでわかりやすい道路交通情報を提供
- ・ プローブデータの扱い等においては、個人情報保護に十分留意

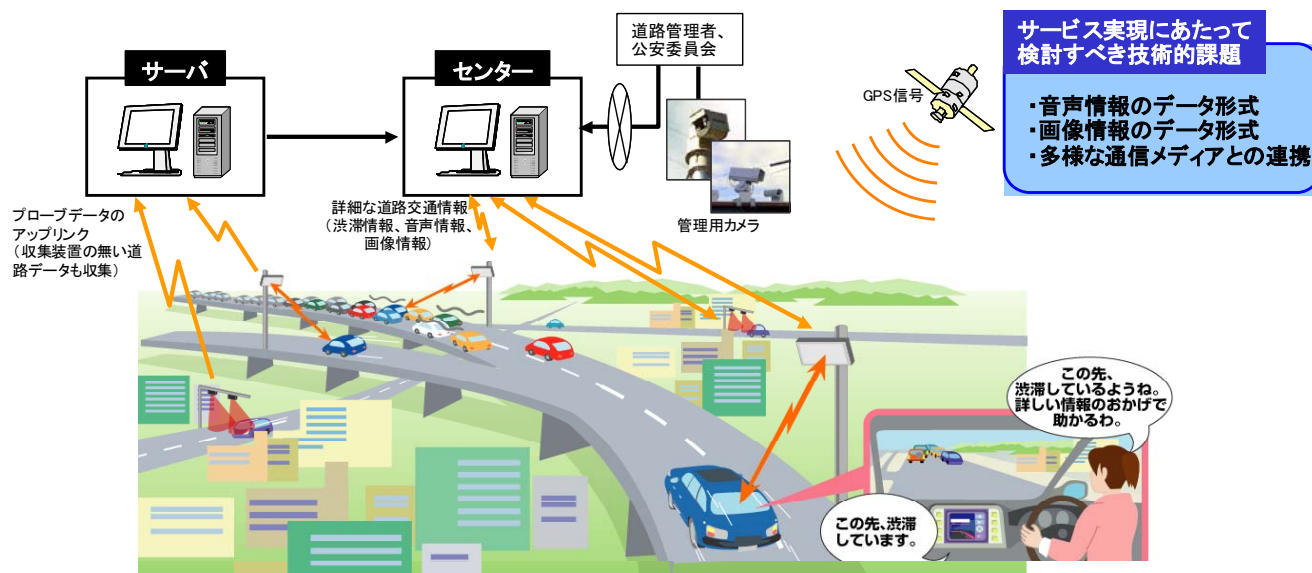


図-19 プローブシステムを用いた道路交通情報提供の高度化概念図

4. 官民共同研究

4.1 官民共同研究の概要

上記の各種検討及び実証実験結果を踏まえ、高度道路交通システム研究室では、提言に示された「道路上における報提供サービス」、「道の駅等情報接続サービス」、「公共駐車場決済サービス」といった次世代道路サービスを2007年に実現するというスマートウェイ推進会議の提言に示された目標を実現するため、民間企業と協力し、「次世代道路サービス提供システムに関する共同研究」（以下、共同研究）を実施している。

共同研究参加企業の選定にあたっては、2004年12月から2005年1月にかけて官報告示による一般公募を行い、応募企業各社の研究開発実績や次世代道路サービスに関する提案内容を考慮し、民間企業23社が選定された。

共同研究では、図-3に示す次世代道路サービスを1台の車載器で利用できる車内環境の実現に向け、サービスを実現する上で必要となる路側機の機能や、ETCを含む各種サービスに対応する車載器の機能、及び各種通信の仕組みを検討し、2007年のサービス実用化にあたり必要となる技術資料の作成を行っている。本技術資料を基に2006年度には路側機の配備や車載器の製作が行われ、2007年度には新しいサービスを開始することを見込んでいる（図-20）。

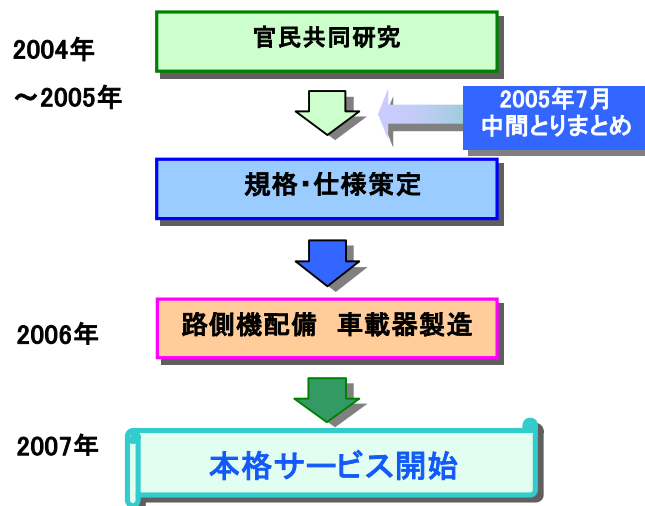


図-20 サービス開始に向けたスケジュール

4.2 共通機能

次世代道路サービスの実用化にあたっては、サービス提供者やサービス内容に応じてそれぞれ異なるアプリケーションを予め車載器に搭載しておくことは困難であるため、車載器にはデータの取扱いや送受信等の基本的な共通機能（基本 API, Application Program Interface）を搭載することにより、各種のサービスを共通機能を組み合わせて実現していく構成を目指している。基本 API は以下の 6 つである。

- ・ 路側機から車載器に対して指示情報を通知し、車載器が応答する「指示応答機能」
- ・ 路側機から車載器のメモリに書き込み、また読み出しする「メモリアクセス機能」
- ・ 路側機が車載器を同定し、車載器が応答する「ID 通信機能」
- ・ IC カードへの決済情報を送受信する「カードアクセス機能」
- ・ 多様な情報をパッケージして路側機から車載器へ提供する「プッシュ型情報配信機能」
- ・ アプリケーションの信頼性・安全性を確保するため、相互認証・データ認証・暗号化の 3 つを実現する「セキュリティ機能」

路側機にはサービス内容により必要な基本 API を選択して搭載し、外部システムと連携しつつ、車載器にサービスを提供する。

- ITS車載器は、外部インタフェース、基本API、路車間通信機能等により、ドライバーにサービスを提供

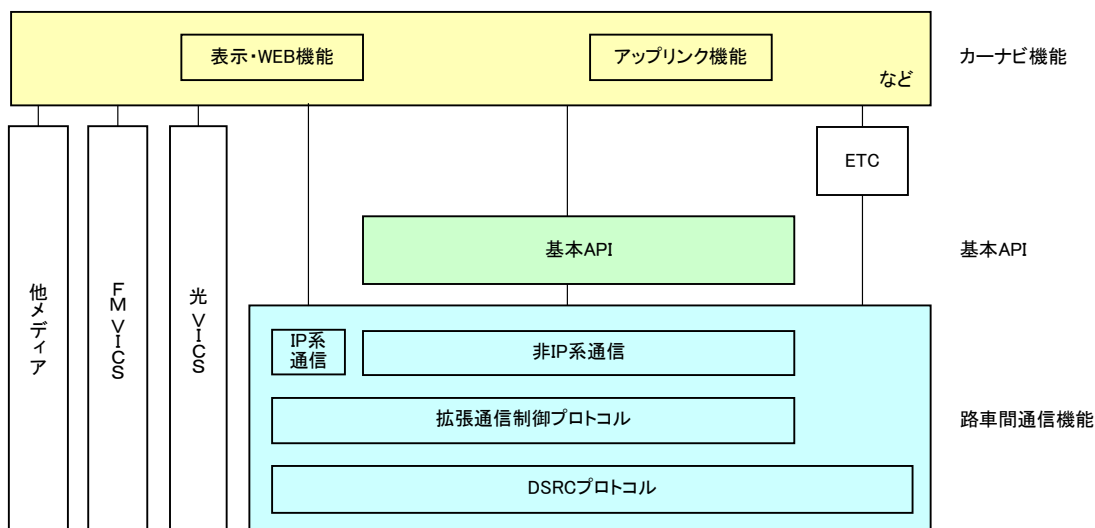


図-21 ITS車載器の構成

5. おわりに

セカンドステージを迎えた ITS は、今後様々な社会的課題の解決に貢献することが期待されている。

2007 年度における次世代道路サービス実現に向け、2005 年 7 月には共同研究の中間とりまとめを行ったところであり、2005 年度は最終とりまとめに向けた検討を進めるとともに規格化・仕様化に着手し、2006 年度に路側機の整備及び車載器の製造を推進していく予定である。

著者のひとり（山田）は、4 年前に同じ講演会において「21 世紀の道路交通—高度道路交通システム (ITS) がもたらすもの—」と題した発表を行った。その当時とくらべると、ITS の進展にはまことにめざましいものがある。本文でも述べたように、カーナビゲーションシステム、VICS、そして ETC の普及台数は大きく伸び、料金所における渋滞はほぼ解消するに到った。こうしたことから ITS の効果が実感されるようになり、ITS はセカンドステージに入ったと認識されている。

本文では、セカンドステージに入った ITS で何がめざされているか、そしてその目標を達成するためにどのような活動が行われているかを述べたが、最後にセカンドステージのさらに先の目標として何を考えるべきかについて少し考察を加えておく。

まず考慮すべきは、情報の質と精度の向上である。より多くの道路を対象に、現在および将来の旅行時間（渋滞の予測も含む）を呈示できるようにすることが目標とされねばならない。そのためには、プローブによる情報収集システムの開発が急がれる。ただし、情報の提供を受けたドライバーは、混んでいる（あるいは、混むと予想される）道路を避けるために経路の変更を行うことも考えられ、そのことが将来の旅行時間に影響を与える可能性がある。こういった影響までも考慮して将来の旅行時間を精度良く予測する技術はまだ発展途上である。

さらに、交通情報だけではなく、工事規制の情報や災害時には被災情報・避難情報を与える必要がある。とくに災害時にはプッシュ型の情報提供も必要になるかもしれない。こうした情報を的確に収集・処理し、伝達するためのシステムの開発が必要である。

情報提供においては、それぞれのドライバーの特性に応じてカスタマイズされた情報の提供を考える必要がある。たとえば、日頃走る機会が多くよく知っている道路と初めて走る道路では、提供する情報の内容を変えることも考えなくてはならない。それは、あまり重要とも思えない情報がしつこく提供されるという事態を避けるためにも必要である。もとより、提供する内容を自動的に変えることはむずかしいので、ドライバーが必要な情報のレベルを指定することによってこうした提供内容の変更を可能にするシステムが必要になろう。

また、情報の呈示方法についてもドライバーに応じたカスタマイズが必要だと思われる。あまりに多くの情報を一度に提供することは、高齢者が認知に要する時間を増加させるという危険がともなう。テキスト、ピクトグラム（絵文字）、画像などをうまく組み合わせて、わかりやすい情報を提供することを考えなくてはならない。

いずれにしても、ITSに求められているものは、過去の交通の「負の遺産」の解消にとどまらず、すべての人にとって利便性が高く、シームレスな移動（モビリティ）を提供することにある、という原点に立ち返って、今後のITSを考える必要がある。

山田晴利



国土交通省国土技術政策総合研究所高度情報化研究センター長
Harutoshi YAMADA

平井節生



国土交通省国土技術政策総合研究所高度情報化研究センター高度道路交通システム研究室長
Setsuo HIRAI

.....

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 267

December 2005

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

.....

本資料の転載・複写の問い合わせは

〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地

企画部研究評価・推進課 TEL 029-864-2675