

ISSN 1346-7328  
国総研資料 第482号  
平成20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. 482

December 2008

平成20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(2008)

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, Transport and Tourism, Japan

平成20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(2008)

概要

本資料は、「平成20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

Synopsis

This report summarizes the Lecture Meeting of NILIM held in 2008.

Key Words : Lecture Meeting, NILIM, Public Investment

# 目 次

◇プログラム .....	1
◇講演集	
社会資本ストックの戦略的維持管理とは何か .....	7
研究総務官 西川 和廣	
下水管きよのストックマネジメント －劣化曲線とリスク管理－ .....	23
下水道研究部 下水道研究室長 榊原 隆	
道路構造物の長寿命化とLCC縮減に向けた取り組み .....	47
道路研究部 道路構造物管理研究室長 玉越 隆史	
エコエアポートの実現に向けて －空港からのCO <sub>2</sub> 排出量と削減方策－ .....	69
空港研究部長 辻 安治	
閉鎖性水域における環境再生の実現に向けて －三河湾流域をモデルとして－ .....	83
環境研究部長 岸田 弘之	
住宅分野における持続可能社会実現に向けた取り組み －人口減少社会対応、LCCO <sub>2</sub> 削減、住宅長寿命化の観点から－ ..	99
住宅研究部長 松本 浩	

岩手・宮城内陸地震における河道閉塞（天然ダム）対応について .. 115  
危機管理技術研究センター長 西本 晴男

## 世界経済の動脈物流の実態

－世界を駆けめぐる国際コンテナ貨物の最新事情－ ..... 131  
港湾研究部長 高橋 宏直

平成20年度 国土交通省

# 国総研 講演会

## 平成20年12月2日(火)

10:00~16:50(9:30開場) 入場無料：定員900名(申込先着順)

**お申込み先：**国土技術政策総合研究所【国総研】

<http://www.nilim.go.jp/> よりお申し込みください

**お問合せ先：**国土技術政策総合研究所 企画部 企画課

Tel. 029-864-2674

E-mail:kouenkai2008@nilim.go.jp

### プログラム

- |             |  |                            |
|-------------|--|----------------------------|
| 10:00~10:10 | 開会の挨拶 ー社会的技術の動向ー   | 所長 布村 明彦                   |
| 10:10~11:00 | 社会資本ストックの戦略的維持管理とは何か                                     | 研究総務官 西川 和廣                |
| 11:00~11:30 | 下水管きよのストックマネジメント<br>ー劣化曲線とリスク管理ー                         | 下水道研究部<br>下水道研究室長 榊原 隆     |
| 11:30~12:00 | 道路構造物の長寿命化とLCC削減に向けた取り組み                                 | 道路研究部<br>道路構造物管理研究室長 玉越 隆史 |
| 12:00~13:00 | 休憩(60分)  |                            |
| 13:00~13:30 | エコエアポートの実現に向けて<br>ー空港からのCO <sub>2</sub> 排出量と削減方策ー        | 空港研究部長 辻 安治                |
| 13:30~14:00 | 閉鎖性水域における環境再生の実現に向けて<br>ー三河湾流域をモデルとしてー                   | 環境研究部長 岸田 弘之               |
| 14:00~14:30 | 住宅分野における持続可能社会実現に向けた取り組み<br>ー人口減少社会対応、LCC削減、住宅長寿命化の観点からー | 住宅研究部長 松本 浩                |
| 14:30~15:00 | 岩手・宮城内陸地震における河道閉塞(天然ダム)対応について                            | 危機管理技術研究センター長 西本 晴男        |
| 15:00~15:30 | 世界経済の動脈物流の実態<br>ー世界を駆けめぐる国際コンテナ貨物の最新事情ー                  | 港湾研究部長 高橋 宏直               |
| 15:30~15:45 | 休憩(15分)  |                            |

会場：九段会館

東京都千代田区九段南1-6-5  
Tel. 03-326-5521

【最寄りの交通機関】  
東西線・新宿線・半蔵門線 九段下駅  
(4番出口) から徒歩1分



### 特別講演

15:45~16:45 土地と人間の生活 作家 曾野 綾子

16:45~16:50 閉会の挨拶

副所長 松本 清次

# プ ロ グ ラ ム

10:00～10:10	開会の挨拶	—社会的技術の動向— 所長	布村 明彦
10:10～11:00	社会資本ストックの戦略的維持管理とは何か	研究総務官	西川 和廣
11:00～11:30	下水管きよのストックマネジメント—劣化曲線とリスク管理—	下水道研究部 下水道研究室長	榊原 隆
11:30～12:00	道路構造物の長寿命化と LCC 縮減に向けた取り組み	道路研究部 道路構造物管理研究室長	玉越 隆史
12:00～13:00	休憩		
13:00～13:30	エコエアポートの実現に向けて	—空港からの CO <sub>2</sub> 排出量と削減方策— 空港研究部長	辻 安治
13:30～14:00	閉鎖性水域における環境再生の実現に向けて	—三河湾流域をモデルとして— 環境研究部長	岸田 弘之
14:00～14:30	住宅分野における持続可能社会実現に向けた取り組み	—人口減少社会対応、LCCO <sub>2</sub> 削減、住宅長寿命化の観点から— 住宅研究部長	松本 浩
14:30～15:00	岩手・宮城内陸地震における河道閉塞（天然ダム）対応について	危機管理技術研究センター長	西本 晴男
15:00～15:30	世界経済の動脈物流の実態	—世界を駆けめぐる国際コンテナ貨物の最新事情— 港湾研究部長	高橋 宏直
15:30～15:45	休憩（15分）		
15:45～16:45	特別講演	土地と人間の生活 作家	曾野 綾子
16:45～16:50	閉会の挨拶	副所長	松本 清次



## 土地と人間の生活

作家 曾野 綾子

### <プロフィール>

- 1931年 東京生まれ。
- 1954年 聖心女子大学英文科卒。
- 1979年 ローマ法王庁よりヴァチカン有功十字勲章を受賞。
- 1987年 『湖水誕生』により土木学会著作賞を受賞。
- 1993年 恩賜賞・日本芸術院賞受賞。
- 1995年 日本放送協会放送文化賞受賞。
- 1997年 海外邦人宣教者活動援助後援会代表として吉川英治文化賞ならびに読売国際協力賞を受賞。
- 2003年 文化功労者に選ばれる。

著作活動と並行し1995年から2005年まで日本財団の会長を務め、福祉活動などに尽力。

- 著書に『無名碑』（講談社・1969年）  
『神の汚れた手』（朝日新聞社・1980年）  
『天上の青』（毎日新聞社・1990年）  
『神様、それをお望みですか』（文芸春秋社・1996年）  
『哀歌』（毎日新聞社・2005年）  
『日本財団9年半の日々』（徳間書店・2005年）  
『二月三十日』（新潮社・2008年）  
など多数。



## 社会資本ストックの 戦略的維持管理とは何か

研究総務官

西川 和廣

老朽化の進む膨大な社会資本ストックの維持管理に対する関心が高まる中、道路橋については「長寿命化とそれを実現する予防保全」という維持管理戦略が選択された。しかしながら全ての社会資本施設に同様の戦略が適当であるとは限らない。それぞれの施設が建設された目的、期待される機能と機能停止による損失、物理的寿命と延命の可能性、陳腐化圧力の程度などの要素を十分に把握し、戦略目標としての望ましい将来の姿を描いた上で戦略を策定することが必要である。

講演では国総研内に設けたストックマネジメント研究会の活動を通じて得た知見を踏まえ、基本的な考え方をお示ししたい。



## 下水管きよの ストックマネジメント

—劣化曲線とリスク管理—

下水道研究部

下水道研究室長

榊原 隆

明治 17 年の東京・神田下水の建設にはじまる近代下水道は、100 年以上が経過した現在、管きよの総延長は約 40 万 km に達している。しかしながら下水管きよの特性上点検・調査は十分実施されておらず、修繕、更新の計画策定方法も確立されていない。一方で下水管きよの老朽化等に起因する道路陥没は年間約 4,700 件発生している。早急な対応策が必要である。

本講演では、こうした下水管きよの維持管理、改築更新の実態を紹介する。次に合理的な修繕、更新の計画策定に資するストックマネジメント手法のうち、将来事業量の予測等を目的としたマクロマネジメントに必要な劣化曲線の作成手法を説明する。さらに事業の優先順位の決定を目的としたミクロマネジメントに必要なリスク管理手法に関する研究の一端を紹介する。



## 道路構造物の長寿命化と LCC 縮減に向けた取り組み

道路研究部  
道路構造物管理研究室長 玉越 隆史

昨年、国内では道路橋の主要部材が破断するなどの深刻な損傷が発生し通行止めなど緊急措置を余儀なくされる事態が相次ぎ、米国ではトラス橋が突然崩壊し多数の犠牲者が生じる重大事故が発生した。これらを受け道路局に設置された有識者会議から本年5月には「道路橋の予防保全に向けた提言」が打ち出された。着実に高齢化する膨大な道路橋の健全性を維持し、道路ネットワークの良好なサービス水準を確保し続けるためには、個々の橋について万全の保全とライフサイクルコスト抑制の両立が不可欠であるとともに、道路網全体を鳥瞰した評価・マネジメントが求められる。

本講演では、道路橋を例に、国内外の管理体系、我が国の現状と課題、各方面で進む点検や検査等の管理手法の研究を紹介する。



## エコエアポートの実現に向けて — 空港からの CO<sub>2</sub> 排出量と削減方策 —

空港研究部長 辻 安治

国土交通省では、地球環境や地域環境への影響を低減させることを目的として、空港及び空港周辺において環境の保全と良好な環境創造を目指す、「エコエアポート」施策を展開している。エネルギー消費抑制による CO<sub>2</sub> 排出量削減はその施策の柱の一つとして掲げられている。2006 年度における国内線航空機からの排出量は、約 1 千万トンで、我が国全体の 1% 弱、運輸部門の 4% 強と絶対量としては少ない。しかし、京都議定書基準年(1990 年度)比で 1.5 倍と、運輸部門全体の伸び(約 17% 増)を大きく上回っており、CO<sub>2</sub> 排出量の削減は航空・空港分野でも重要な課題となっている。

本講演では、空港を一つの単位とした CO<sub>2</sub> の排出量算定方法、5 つの空港を対象に算定した CO<sub>2</sub> 排出量とその比較分析の結果、さらに CO<sub>2</sub> 排出量の削減方策について述べる。



## 閉鎖性水域における 環境再生の実現に向けて

環境研究部長

岸田 弘之

国土利用形態の変貌に伴い、流域における物質循環の動態が大きく変化してきている。一方でその影響を強く受ける閉鎖性水域等における水環境の変化や生態系の異変が指摘されている。本講演では、その主要な要因の一つがこうした物質循環の動態の変化にあるという仮説に着目し、三河湾流域をモデル地域として、物質循環や水供給変化に関する調査を実施し、一定期間ごとのインパクトと生態系のレスポンスの分析を行い、河川・海域環境再生の基本的方向、今後の推進すべき方策について取りまとめ報告する。



## 住宅分野における持続可能社会 実現に向けた取り組み

—人口減少社会対応、LCCO<sub>2</sub>削減、  
住宅長寿命化の観点から—

住宅研究部長

松本 浩

人口の減少が進行する中で持続可能な社会の構築が我が国の大きな課題となっている。

これらの課題については、様々な分野における多面的な対応が不可欠であるが、ここでは、住宅分野における取り組みについて、まず、人口減少社会に対応した郊外住宅地等の再生・再編手法や、LCCO<sub>2</sub>等の削減に向けた建築物の環境性能向上のための計画技術についての近年の研究成果を紹介する。

さらに、「つくっては壊す」フロー消費型社会から「いいものをつくって、きちんと手入れして、長く大切に使う」ストック型社会への転換に向けた、住宅の長寿命化についての研究開発の動向について紹介する。



## 岩手・宮城内陸地震における河道閉塞（天然ダム）対応について

危機管理技術研究センター長 西本 晴男

平成 20 年 6 月 14 日岩手・宮城内陸地震では 2,000 箇所を超える山腹崩壊が発生し、死者・行方不明者 18 人という被害が生じた。この災害では、大規模な地すべり・土石流が発生したばかりでなく、多数の河道閉塞（天然ダム）が形成され、それらの対応は困難を極めている。危機管理技術研究センターは、発災当日から現地調査を開始し、以降約 1 カ月半に亘り現地における様々な技術支援を行ってきた。本講演では、土砂災害の概要を報告し、大規模な土砂災害、特に天然ダムのような稀な現象が発生した際の危機管理的支援のあり方について、現地対応の実態を踏まえた上で考察してみる。



## 世界経済の動脈物流の実態

—世界を駆けめぐる

国際コンテナ貨物の最新事情—

港湾研究部長

高橋 宏直

今、世界の製造業では、国際分業化が著しく進展しています。そして、これを支えているのは国際コンテナ貨物です。2000 年から 2006 年にかけて、国際コンテナ貨物流動量は 1.8 倍、外航コンテナ船の就航隻数は 1.7 倍と増加しています。

この世界を駆けめぐる国際コンテナ貨物の最新動向について講演します。

# 社会資本ストックの戦略的維持管理とは何か

研究総務官

西川 和廣

# 社会資本ストックの戦略的維持管理とは何か

研究総務官 兼総合技術政策研究センター長 西川和廣

## 1. はじめに

社会資本の維持管理もいよいよ本番を迎え、様々な社会資本施設において維持管理計画の策定作業が進められている。その中で戦略的という言葉がしばしば用いられているが、そもそも社会資本の維持管理における戦略とはどんなもので、どのような観点から定められるべきものであろうか。

以下は筆者の持論であるが、最も基本的な社会資本は領土である。これが安定していなければ何も始まらない。次に基盤となるものは安全で安定的に利用することのできる土地であろうと考えられる。その次に道路、鉄道などの移動、流通の手段、水やエネルギー等ライフラインなどの基本的なサービスを提供する施設があり、このあたりまでを一般には社会資本というのではないかと考えている。これらの上で人は生活し経済活動を行うが、さらに様々な必要となる施設を構築し利用することになる。社会資本はそれらを支える重層構造の基部を支えており、いつでもあつて当たり前という暗黙の永久性を期待されている。

永久性への暗黙の期待に応えるという大目標を達成するためには、どのような戦略を立てればよいのかについて、ここではお話しすることにしたい。また、維持管理計画を策定するに当たって混乱を引き起こしている可能性のあるいくつかの言葉について、私見ながら解説を試みることにした。

なお、ここに記した内容の多くは、最近執筆した雑誌等への投稿記事を引用したものである。詳細については参考文献として列挙しておくので参照していただければ幸いである。

## 2. 国総研ストックマネジメント研究会

### 2. 1 スtockマネジメント研究会の目的と構成

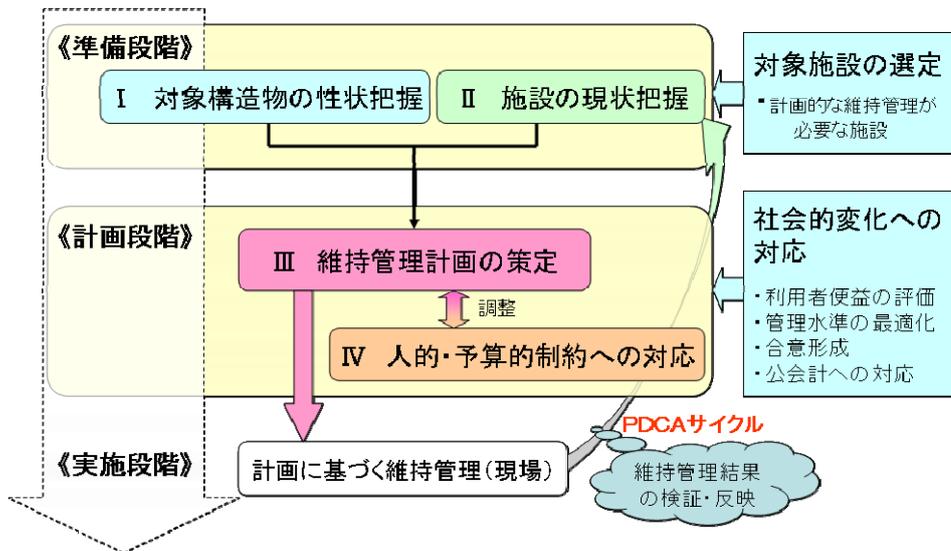
国土交通省所管の社会基盤施設が持続的に機能することを確実なものとするため、維持管理体制が速やかに確立されることが喫緊の課題である。このため、土木系インフラに関して、現場を含めた各施設におけるストックマネジメントの現状や研究開発状況等を横断的に確認するとともに、今後のストックマネジメントのあり方、情報交換、議論を行う場として、ストックマネジメント研究会を平成18年9月に設置した。同研究会の構成は表-1のとおりで、関連分野を対象に組織した。以下、ストックマネジメント研究会の活動を通じてこれまでに整理された成果の一端を紹介する。

表－１ スtockマネジメント研究会の構成

研究総務官 (座長)	総合技術政策研究センター 国土マネジメント研究官
企画部 研究評価官	高度情報化研究センター 情報研究官
同 コーディネート研究官	危機管理技術研究センター 砂防研究室
下水道研究部 下水道研究室	沿岸海洋研究部 沿岸防災研究室
河川研究部 河川研究室	港湾研究部 港湾計画研究室
同 水資源研究室	空港研究部 空港施工システム室
道路研究部 道路構造物管理研究室	総合技術政策研究センター 建設システム課(事務局)

## 2. 2 スtockマネジメントの整備段階

構造物毎のStockマネジメントの状況把握にあたり、Stockマネジメントを推進するために整備すべき項目を整理した。進捗段階に従って、準備段階である「I 対象構造物の性状把握」、「II 施設の現状把握」、計画策定段階である「III 維持管理計画の策定」、「IV 人的・予算的制約への対応」、実施段階である「計画に基づく維持管理(現場)」に分類した。



図－１ スtockマネジメントの整備段階

表一-2 各施設におけるストックマネジメントの進捗状況

施設名 (調査対象とした施設管理区分)	対象構造物の性状類型				建設の現状類型		計画の策定		人的・予算制新への対応 更新の集中 回遊
	編纂・北メカ ニズムの解明	点検・診断手 法の確立	補強工法の開 発・評価	旧機劣化の 予測	既存施設の データ蓄積	データベ ース構築・運用	管理水準の 設定	維持管理計 画の策定	
下水道 (河川内川 市町村)	管渠	●	●	●	●	●	●	●	
	処理場	●	●	●		●			
道路 (国・県道等)	灌漑	●	●	●	●	●	●	●	
	橋梁	●	●	●	●	●	●	●	
	トンネル	●	●	●		●	●	●	
	防雪・防 凍設備 施設 航路・泊 地	●	●	●	●	●	●	●	●
港湾 (国・県道等 市町村 一級管理区分)	滑走路	●	●	●	●	●	●	●	
	堤防	●	●	●		●	●	●	
河川 (国・県道等)	護岸	●	●	●					
	ダム	●	●	●	●	●	●	●	
砂防 (国・県道等)	船渠・山 脈工(砂 防)	●	●	●		●			
	堤防・護 岸(砂防 工事)	●	●	●		●			
	防雪・防 凍設備 施設	●	●	●		●			
	堤防・護 岸等	●	●	●	●	●	●	●	

● 進捗度(中) (研究・データ蓄積・実施に向けた対応がある程度進捗) ● 進捗度(低) (モニタリングが速上、データ劣化が顕著、実施に向けた対応が速上)

《空白》 未着手、詳細不明

【注】 本欄は、各研究部への調査をもとに作成したものである。

### 2. 3 スtockマネジメントの進捗状況

Stockマネジメントの分類に従って、構造物毎の進捗状況を整理した結果、「Ⅰ対象構造物の性状把握」のうち初期段階である「損傷劣化メカニズムの解明」、「点検・診断手法の確立」、「補強工法の開発・評価」では各構造物とも概ね進展している。一方、さらに進んだ段階となる「損傷劣化の予測」、「Ⅱ施設の性状把握」、「Ⅲ維持管理計画の策定」では、下水道施設、道路施設等のサービス提供型の施設で先行していることが判明した。(表-2)

### 2. 4 維持管理の基本方針

各構造物の維持管理の基本的考え方を、「サービス提供型」と「防災型」に大別してとりまとめた。(表-3、4)

「サービス提供型」は道路等の継続的サービスが求められる施設で、「防災型」は堤防など災害防止を目的とする施設で継続的サービスが求められない場合もあるが機能が低下しないよう継続的な維持管理が求められる。構造物の寿命は、「要求性能向上」による機能の陳腐化による寿命、経年変化に伴う劣化等による物理的寿命があり、これらを区分した。

### 2. 5 研究活動の方向と目標

国総研では、技術政策上の課題を包括的に提示し、優先的に取り組むべき課題の抽出や政策目標の実現につなげていく工程、行政や他の研究機関との連携などを示した「課題の体系図」を設定している。「体系図」では12のテーマを設定し、その一つとしてStockマネジメントが含まれている。

「Stockマネジメントにおける課題の体系図」はテーマ毎に、実施すべき状態、実施すべき行動、実施すべき研究を記載することになっており、「体系図」の作成により、今後Stockマネジメントを推進するための行動・手順を示すロードマップともなっている。また、「体系図」はStockマネジメント全体および下水道、道路、港湾、空港、河川、ダム、沿岸の構造物単位で作成した。代表事例としてStockマネジメント(全体)の「体系図」を図-2に示す。

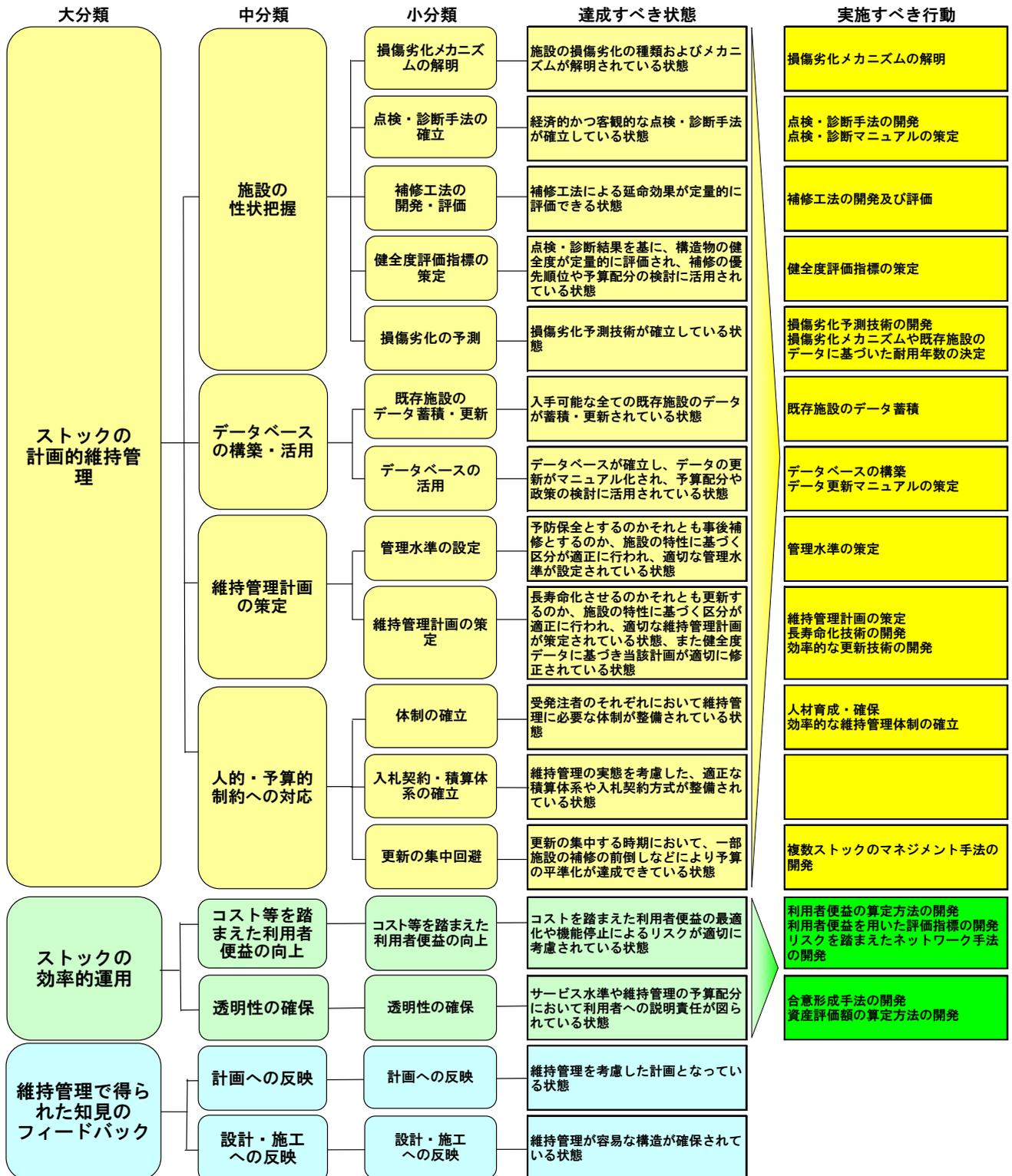
表－3 各構造物の維持管理の基本的考え方（サービス提供型の施設）

構造物①	構造物②	要求性能向上の可能性	物理的寿命(現状)	機能停止による影響	管理の考え方	劣化予測の可否	定期点検頻度	補修工法
下水道	管渠	大都市の合流管渠は流出係数の増が予想	89年	軌道下、幹線道路下では影響大	施設に起因する突発事故や故障を未然に防ぐこと及び施設の延命化を図るために計画的維持管理を行う。 計画的維持管理とは、計画的に施設の状況を的確に調査点検し、その結果に基づいて必要な清掃や修繕等について、その手法と優先順位を定めて効率的に行い、突発事故等を未然に予防し、かつ施設の延命化を目指す維持管理方法で、維持管理費用を予防的に支出し総額の維持管理費を低減することも含んでいる。 《下水道維持管理指針》	不可能 ※資産数膨大、大多数の管は目視不可能のため診断精度に問題あり、他工事による損傷あり)	3年毎(30年以上は毎年)(下水道維持管理指針)	止水工法 ライニング工法 内面補強工法 部分敷設替工法  (下水道維持管理指針 2003年版(社)日本下水道協会)
	処理場	機械・電気設備は陳腐化が予想される	不明	大	適性な日常管理・定期管理によって、施設の長寿命やLCCの低減を図る。 《日本下水道事業団・下水道構造物に対するコンクリート腐食抑制技術及び防食技術の評価に関する報告書》	部分的に可能	毎年(下水道施設改築・修繕マニュアル(案))	処理施設・人孔: ライニング工法、吹き付け被覆工法、成形品被覆工法 (東京都下水道局施設管理部:コンクリート改修技術マニュアル(汚泥処理施設編))
道路	橋梁(床版・桁・橋脚)	設計条件(交通量・車両荷重)等の陳腐化は予想されない	不明	大	定期点検は、安全で円滑な交通の確保、沿道や第三者への被害の防止を図るための橋梁に係る維持管理を効率的に行うために必要な情報を得ることを目的に実施する。 《橋梁定期点検要領(案)》  適性な日常管理・点検データにもとづく劣化予測を行い、維持管理費用の削減及びリスクの軽減のために予防的保全を継続する。 《道路構造物管理研究室》	可能	初回は供用後2年以内、その後は5年毎(橋梁定期点検要領(案))	①床版:鋼板接着、シート貼付、上面増厚  ②主桁: (鋼橋)鋼板当て板高力ボルト固定(コンクリート橋)表面処理、断面修復、電気化学的補修工法(電気防食、脱塩)、ひび割れ注入、補強剤の追加(FRP接着、鋼板接着)、プレストレスの導入  ③その他の部材 (鋼床版)鋼板当て板高力ボルト固定、鋼繊維補強コンクリート(SFRC)舗装(コンクリート)表面処理、断面修復、電気化学的補修工法(電気防食、脱塩)、ひび割れ注入、補強剤の追加(FRP接着、鋼板接着)、巻立て(コンクリート、鋼板等)、塗膜の傷(外的要因による)、局部補修
	舗装	当面なし	10年程度	中	舗装のさらなる延命および舗装補修費のコスト削減を図る観点から、アスファルト舗装の修繕候補区間のうち、予防的修繕工法を適用できる箇所にあつては、これを実施する。 《修繕候補区間の選定と同区間における工法選定の手引き(案)》	可能	3年毎	・切削オーバーレイ ・打換え ・シール注入工法 ・切削工法 ・局部打ち換え
	トンネル	当面なし	無限	大	定期点検は、トンネル本体工の変状を把握して、利用者被害の可能性のある覆工や坑口のうき、はく離箇所を撤去するなどの応急措置を講じ、必要に応じて応急対策および、標準調査の必要性を判定して点検記録を作成し、安全で効果的な維持管理を行うことを目的とする。 《道路トンネル定期点検要領(案)》	困難	初回は建設後1～2年以内 その後は2年毎または5年毎(判定結果で異なる)	・裏込注入工 ・ロックボルト工 ・金網・ネット工、当て板工 ・繊維シート補強工、鋼板接着工 ・場所打ち工、覆工改築工 ・導水樋工、止水充填工 ・防水シート工
港湾	係留施設・外郭施設	当面なし	30～100年	大	施設の目的、供用期間、要求性能、自然環境、利用条件、構造特性、性能の経時変化を予測して、施設を構成する部材毎に維持管理レベル(事前対策・予防保全・事後保全)を設定する。 《港湾の施設の維持管理計画書作成の手引き》	劣化データの蓄積により、部分的に可	数年毎	・大規模断面修復 ・小規模断面修復 ・電気防食 ・表面処理
空港	滑走路	可能性は小	10年(アスファルト) 10年以上(コンクリート)	施設の規模・機能により異なる	空港土木施設維持修繕工事マニュアルに基づき空港機能を損なわないよう適切に維持補修を行う。 羽田空港については、破損する前に補修を行う予防保全の方法について検討中。 《空港施工システム室》	困難	3年毎	①アスファルト舗装 ・オーバーレイ ・切削打換え  ②コンクリート舗装 ・目地補修 ・ジャッキアップ(羽田等)

表－4 各構造物の維持管理の基本的考え方（防災型の施設）

構造物①	構造物②	要求性能向上の可能性	物理的寿命(現状)	機能停止による影響	管理の考え方	劣化予測の可否	定期点検頻度	補修工法
河川	堤防・護岸	－	不明	大(人命・財産の損失)	劣化を予測するのではなく、構造物の状態を見(診)て、状態の変化を分析するきめ細やかな維持管理を実施する。 流下能力(治水安全度)を維持するため、堤防の断面をモニタリングし、必要に応じて維持補修。 堤防の浸透・浸食に対する強度維持のため、モニタリングを継続し、堤防の機能に影響する場合は対策。 《河川研究室》	劣化しない	5年毎(測量)	・堤防形状:盛り土、腹付け ・耐侵食:法芝の張替え 護岸打ち変え ・耐浸透:遮水壁(矢板)の設置 排水ドレーンの設置 ・護岸基礎の補修:根固め投入 矢板設置
	水門等のゲート類	可能性あり	56年	目的や規模により異なる	画一的な維持管理手法を改め、個々の施設にあったマネジメントを実施する。 《河川研究室》	統計処理によ	毎年	原動機:定期整備、部品交換、 保全予防等 鋼構造物塗装:全面塗装あるいは部分塗装
	ダム本体	－	不明	大(人命・財産の損失)	安全確保として予防保全を第一として、目視による変状把握、漏水量、揚圧力、変位計の変化により異常を確認し、異常があった場合は、さらに詳細な調査により補修方法を検討する。 《水資源研究室》	－	3年毎または5年毎(検査)	掘削 パイパストネル設置 土砂吐き設置 貯砂設置
海岸	堤防・護岸(コンクリート)	地球温暖化に伴う水位上昇の可能性あり	不明	－	点検に基づく健全度評価により、変状が著しい箇所はLCCの観点から最適な工法(予防保全or事後保全の判断を含む)を採用する。 《ライフサイクルマネジメントのための海岸保全施設維持管理マニュアル(案)》	現状の技術レベルは十分でない	1～3年毎	波返工:かさ上げ、傾斜修正 波返工:かさ上げ、傾斜修正 消波工:追加等
砂防	砂防ダム	－	100年程度	大	施設そのものの破損などの状況把握を定期的におこない、機能を損なう前に必要に応じて補修を行う。また、施設の機能状況を把握するため堆砂状況についても定期的に把握し、必要に応じて機能回復を図る。 《砂防研究室》	－	毎年	ひび割れ:腹付けコンクリート 漏水:薬液注入 異常堆砂:除石工

図-2 スtockマネジメントにおける課題の体系図



注1) 各分野におけるStockマネジメントの現状を各研究部を通じて把握し、横断的に整理した上で大枠の体系化を図った。  
 注2) 「維持管理で得られた知見のフィードバック」は、維持管理に直接関わるものではないため原則として「実施すべき行動」「実施すべき調査・研究」は記述していない。

コ  
ア  
関  
連

- ・劣化データの収集
- ・データ蓄積状況の把握
- ・維持管理体制の把握

## 2. 維持管理戦略を定めるための道筋

### 2. 1 戦略目標、戦略、戦術

戦略といえば孫子の兵法が有名であるが、「彼（敵）ヲ知り、己ヲ知レバ、百戦殆フカラズ」という言葉がよく知られている。戦略的維持管理の要諦は、まず管理しようとする施設を様々な視点から理解し、状況を把握した上で、自らの戦力すなわち人員、技術力、予算等と照らし合わせて目標を設定し、実行に移すことにある。

道路橋では、昨年（2007年）あたりから、長寿命化、予防保全ということばが多く用いられるようになったが、長寿命化とは道路ネットワーク機能の暗黙の永久性を達成するためのひとつの戦略であり、予防保全は長寿命化を実現するための戦術であると考えれば分かり易やすいであろう。

戦略と戦術は対になる用語として用いられることが多いが、何をどのようなレベルで達成できれば成功と言えるのかという、戦略目標を設定することがきわめて重要である。

以下、様々な社会資本施設の戦略目標を含めた維持管理戦略を策定するに当たり、「彼（敵）ヲ知ル」ことと、「己ヲ知ル」ことの意味するところについて説明することにしたい。

### 2. 2 彼（敵）ヲ知ル

#### 2. 2. 1 施設の性質・性格を知ること

対象とする施設がどのような目的で造られ、どのような形で機能することを期待されているか、機能を停止するとどのような損失を誰が被るのか。また、施設の物理的な寿命はどの程度か、維持管理によりどの程度延ばせるのか、機能の陳腐化による寿命はどの程度と想定されるのか。これらの要素を知ることが戦略策定の第一歩である。

老朽化により補修・補強あるいは更新が必要になったときに、一時的に機能を停止することが容易な施設とそうではない施設がある。鉄道や道路、下水道といったネットワークとして機能する施設は、部分の機能停止が全体の機能停止につながり、港湾施設のような代替性に乏しく、機能停止による外部コストが大きいという特徴がある。

社会資本施設には、大きく分けてサービス提供型施設と防災型施設があると考えられる。自然災害による機能停止を考えると、橋梁や港湾施設のようにサービス機能の継続が期待される施設では、機能停止の期間等、影響をどの程度に押さえることができるかが重要となる。一方、防災型施設では、人命や財産を守ることができる災害のレベルが重要であり、戦略の立て方も自ずから異なる。

一般に維持管理による長寿命化が期待されるが、施設によってはどんなに手厚く行っても限界がある場合もある。道路の舗装がひとつの例である。もう一つの寿命を決める要素は機能の陳腐化である。施設の機能すなわちサービスレベルの向上圧力がどの程度あるかによって、むやみに長持ちさせるより適当な時期に更新する方が適当な場合があるので注意しなければならない。道路橋の長寿命化政策は、将来のサービスレベルの向上圧力はそれほど大きくないと判断した結果であるとも言える。

#### 2. 2. 2 寿命を縮める損傷・劣化要因とメカニズムを知ること

施設の長寿命化を図るためには、その施設がどのような原因・要因により劣化・損傷を生じ、どのような段階を経て耐久性を失うのか、いわば死に至る病とその進行過程を知る

ことが不可欠である。これを知らずに管理しても対症療法にしかならず、損傷を繰り返しながら基礎体力を失い、いずれ寿命に至ることになる。予防保全により寿命を延ばそうとするならば、損傷・劣化の原因とメカニズムを解明し、どの時点でどのような対策を施せば死に至る病を完治することが可能なのか、どの時点では完治はせずとも延命が可能なのか、さらには手遅れなのかを知ることが重要である。

対象とする施設により、どの程度解明が進んでいるかは様々であり、しっかりと確認する必要がある。道路橋の場合、耐久性を失わせる損傷・劣化としては、鋼橋では鋼部材の腐食、鉄筋コンクリート床版の疲労（抜け落ち）、鋼部材の疲労亀裂、コンクリート橋では鉄筋やP C鋼材の腐食（塩害を含む）がほとんどで、これに基礎の洗掘とコンクリートのアルカリ骨材反応を加えればほぼカバーされる。これらの発生メカニズムは一部を除いてかなり明らかになっているが、損傷・劣化の進行を防ぎ、健全な状態に回復する工法やどの時点でどの工法を適用することが有効かつ効果的なのか、手遅れなのかなど、まだまだ解明すべきことは残っている。

### 2. 2. 3 何処に、どんな状況で使われているか把握すること

すなわちデータベースの構築と更新である。施設が何処に、どのような状態で設置され供用されているかを把握することは、マネジメントにおいて最低限必要な情報である。

データベースを構築する目的のひとつとして、個々の施設の詳しい情報を保存する「カルテ」としての活用があるが、施設の健全度等の変化に気がつくための助けになることとともに、人事異動による後任への申し送りの手段として重要である。したがって、点検が行われる度にしっかりした更新が行われることが不可欠である。

以上はむしろ戦術としてのデータの活用であるが、施設のデータから基本的な指標を抽出することにより、「施設群」としての状況について、空間的な傾向と経時的な変化を把握することができる。これにより予算配分など必要な対策の策定と、その効果の計測が可能となる。これを用いてP D C Aサイクルを回すことがマネジメントの眼目であり、どのような指標を用いるかが成否を握ると言って良い。

マネジメントといえばデータベースを作ることだと思っている人が多いが、ここで間違っているのはデータベースは道具であって目的では無いということである。近年、I T機器の開発がめざましく、データベースの内容が埋まらないうちに装置の記憶容量が飛躍的に拡大され、それに伴って新しいシステムが開発されるということが繰り返されている。技術の進歩への対応に忙しく、いつまで経ってもデータベースが使えるようにならないという笑い話をお聞きになった方は少なくないのではないか。ハイテク化には、あらかじめローテクレベルなりのデータベース（カルテ）とその活用の仕組みが存在することが前提条件となる。もしデータベースシステムを導入したのにその効果が見られないと感じる場合には、何を目的として整備したのかに立ち戻って考え直す必要がある。

### 2. 2. 4 点検手法、補修工法、予防方法を開発すること

戦略的な観点から言えば、技術（＝兵器）開発への投資を意味する。日本人の平均寿命が伸び続けているが、これは病気に対する検査法、治療法、予防法の進歩によるところが大きい。早期に劣化・損傷の発生が検知できれば対処法の選択肢も多く、コストの面でも有利である場合が多い。また新たな補修工法の開発により更新を免れたり、大幅なコス

トダウンが可能になることは想像に難くない。一方、データベース（カルテ）が機能すれば、どのような条件でどのような損傷・劣化が発生しやすいか傾向が見えてくるはずである。ここまで来れば予防方法を見つけ出すことはそれほど難しくはない。これらの投資は、施設の長寿命化に大きく寄与するはずである。前項の指標を用いれば、投資に見合う長寿命化が実現したかどうか、将来確認することができよう。

ここで、人の平均寿命が延びたことについては技術面だけでなく、定期健康診断の普及、伝染病の予防対策など制度面での充実が寄与していることも付け加えておきたい。

## 2. 3 己ヲ知ル

### 2. 3. 1 自らの戦力を知る

高い戦略目標を立てても、数と実力において自らの戦力が太刀打ちできなければ意味をなさない。正確な情報を把握することが必要である。

必要な能力を有する技術者をどのように確保するか。インハウスの技術者で対応するのが理想であるが、道路橋の場合現実的ではない。外注するとしても請負可能な技術者はいるか、質を伴っているかなど、それぞれの地域で確認する必要がある。さらに予算の都合で外注もままならない地方自治体のような場合、一般職員、地元住民や道路利用者などの力を借りることも検討する必要があるだろう。

もし技術者が足りないか、技術レベルに問題があれば、場合によっては育成することも考えなければならない。どこかに技術者がいることを前提とした言説が多いが、慎重に見きわめる必要がある。また、外部勢力に頼るときには、道路管理者と請負者との役割と責任の分担を明確にすることが重要である。

技術力を評価する場合、資格制度が確立していれば問題は少ないが、コンクリートや鋼構造に関する診断士の資格制度はあっても、橋に特化した資格は整備されていないのが現状である。前記の有識者会議の提言にも強調されているように、橋の維持管理に特化した技術者の育成と資格制度の確立が急務である。

### 2. 3. 2 維持管理に必要な“脳”力を知る

蛇足になるが、維持管理技術の専門性について述べておきたい。

橋を設計したことがあれば維持管理くらいできるのではないと言われることが少なくないが、それは大きな誤りである。図-3は、設計と維持管理において脳の使い方が異なることを示している。いわば設計脳と維持管理脳の間には横たわる壁を表現している。

脳と壁といえば養老孟司氏であるが、思い通りになる**脳**と思うに任せない**身体**、脳が設計した**都市**と予測ができない**自然**、という対比を著書や講演でよくされる。脳科学者の茂木健一郎氏は、脳は必然性で満たされた状態では退屈し、半ば必然半ば偶然である偶有性の状態で活性化するとされるが、いずれも設計と維持管理との違いとよく符合している。

設計では**理論**の成り立つ**理想**の状態を想定するが、維持管理では**実際**、**現実**としての状態を前提にせざるを得ない。何よりも仮説の積み重ねである設計は、何処まで行っても**Fiction**であり、維持管理は建前がどうであれ目の**Realism**と対面せざるを得ない。設計が**予定**ならば維持管理は**結果**なのである。設計に**創造力**が必要ならば、維持管理には**推理力**が必要である。そしてこの壁を乗り越えるには、豊かな**実体験**とそれによって育まれた

想像力によるしかない。

設計の経験しか持たない技術者が補修・補強の設計をすると、直しているのか壊しているのか判らないこともある。このような観点からも、目の前の技術者が、維持管理技術の専門性を認識し、維持管理脳を持っているかどうかを確認することが重要である。



図－3 設計と維持管理の壁

### 2. 3. 3 自らの弱点を知る

「マニュアルがなければものは作れない。しかし、マニュアルが思考停止を招く」とは、「失敗学」の創始者畑村洋太郎教授の言葉である。機器やマニュアルに頼りすぎれば、前もってインプットされていない現象は見逃されるか、誤った判断をされるおそれがある。また、人は弱いもので、陥りやすい錯覚と振り払い難い誘惑を抱えている。

維持管理における点検、診断、判断と実行という各段階において、技術者が行う判断はきわめて重要である。したがって、陥りがちな錯覚や誘惑について、自らの弱点として知っておくことは非常に大切なことだと思われる。

#### (1) 点検

施設の変状の有無を確認し、診断に必要なデータを計測し記録する点検者に熟練が必要なことはいままでもないが、診断については診断者の責任においてなされなければならない。予断を持って点検を行うと、重要な兆候を見逃す危険がある。一方、道路管理者は、点検と診断を一体のものとして区別していないことが多く、これも危険である。委託を受ければ点検者でもそれらしきことを言うことはできるので、裏付けのない誤った診断を受

け取ってしまうおそれがある。

また道路管理者にとって、変状が発見されることは懸案事項が増えることになる。それを慮って大事な事実を報告しないことがありがちである。いずれもいやなものは見たくない、喜ばれないことは報告したくないという誘惑によるものであるが、それにより重大な損傷を見逃すことになれば、責任を問われることを認識すべきである。

## (2) 診断

点検データに基づいて損傷・劣化の種類と程度、原因を特定し、処方を示すのが診断者の仕事である。診断ミスは重大な事故の原因になりうるので、技術力や経験に裏付けられた診断能力が必要である。

医師が自ら触診や問診を行うように、診断において必要があれば自ら点検データを取得し、あるいは確認することが、責任のある診断を下すためには必要である。また、道路管理者を説得し、適切な措置を行わしめるに足る説明ができなければならない。

点検と同様、道路管理者は悲観的な診断はできれば聞きたくないし、診断者もつい希望的観測の元に楽観的な診断を下してしまいがちである。これが意図的に行われたのであれば、粉飾決算を助ける会計事務所と同様で、制裁を受け信用を失う可能性があることを認識すべきである。

## (3) 判断と実行

診断を受け止め、必要な措置をどのような形で実行に移すかの判断は、道路管理者の責任である。橋は病人と違って自ら病院に出かけることはない。治療を受けるかどうかの判断は、道路管理者にしかできないのである。

一般に地震や洪水など自然災害時における管理者の行動は、研修や訓練を通じてかなり高いレベルが保たれているように思われる。一方、施設の劣化・損傷のように、緩やかに近づいてくる危険に対して、管理者としてどのような体制でどのように判断し行動するかについて、体系的な教育や研修はあまり行われていないのではないだろうか。

判断と実行において「予算がない」という制約は、一種の「麻薬」である。予算がないという制約が責任を軽くしてくれそうな錯覚を与えてくれるからである。これは「先送り」と引き続いて発生する惨事を招く最大の要因であることはいうまでもない。

## 3. さまざまなマネジメントとそれぞれの立場

### 3. 1アセット、ファシリティ、ストック

計画的な維持管理の必要性が叫ばれ始めた頃、橋梁マネジメント、舗装マネジメント等、対象とする施設の名称を冠して呼ばれることがふつうであった。その後、社会資本施設への企業会計の導入が話題になるなど、経済学的分野などの概念が導入され、様々な故障が用いられるようになったが、一方で混乱の要因となっているので、ここで整理を試みたい。

まず、アセット・マネジメントとファシリティ・マネジメントおよびストック・マネジメントを Wikipedia で検索してみたところ、下記のような記述があった。なお、ストックについては国土交通省でもっぱら用いられる用語らしく、Wikipedia に項目がなかったため、筆者の考えを記した。

## アセット・マネジメント

投資用資産の管理を実際の所有者・投資家に代行して行う業務のこと

## ファシリティ・マネジメント

業務用不動産（土地、建物、構築物、設備等）すべてを経営にとって最適な状態（コスト最小、効果最大）で保有し、運営し、維持するための総合的な管理手法

## ストック・マネジメント・・・Wikipediaには項目なし

社会資本施設の特徴である、「必要不可欠だがあって当たり前」という永久への暗黙の期待がかかる、蓄積としての社会資本の機能を維持する業務

これらを見ると、いずれも施設の管理を対象としているが、キーワードとなる言葉が、アセットでは**投資**、ファシリティでは**経営**、ストックでは**蓄積**あるいは**維持**となり、それぞれの性格を表していて、ここで扱うべきはストック・マネジメントであることがわかる。

### 3. 2 アセット、マクロ、ミクロ

社会資本ストックのマネジメントには、ミクロ（個別）とマクロ（群）のふたつの立場が存在するが、これらを近年よく用いられるアセット・マネジメントとともに比較したものが表－5である。それぞれマネジメントの目的、説明責任を果たすべき相手と内容、責任者の関心事項、必要とされる指標等について整理した。それぞれの立場によって、マネジメントに対する考え方が異なることが理解できるものと思う。

表－5 マネジメントにおける3つの立場（道路橋の場合）

3つの立場	アセット・マネジメント (財政)	マクロ・マネジメント (国土交通本省)	ミクロ・マネジメント (現場事務所)
マネジメントの目的	投資効果を最大化したい	施設の機能を確保しながら総予算を抑制したい	限られた予算で施設の安全性、供用の信頼性を確保したい
説明責任の相手と内容	出資者、料金負担者 資金運用の適切性	国民全般 道路ネットワークの信頼性、健全性	管内の道路利用者 所管の橋の安全性、供用性確保
関心事項	資金運用は適切か、透明性は確保されているか	予算の額と配分、施設健全度の動向と地域間格差、必要な施策、施策効果	損傷の部位、種類と原因、深刻度、補修・補強の可能性、交通規制の要否及び可否、LCCetc.
必要とされる指標等	施設劣化の予測式 他分野、他機関等と比較可能な指標	施設の全般的な健全度 指標とその経年的推移	部材、損傷の種類ごとの損傷レベルとその動態を表す指標

#### 4. 劣化曲線、効用と弊害

維持管理コストについて議論する際、図－4のような劣化曲線を用いることが多い。縦軸に何らかの性能を設定し、右下がりの曲線で劣化の進行を表すのが普通である。曲線が上に凸であることは、損傷の進行が次第に加速することを表し、早期治療が補修・補強コストを低減することが表現される。維持管理行為が行われるとそれにより性能は回復するが、図では曲線のギャップで表される。大きなギャップはコストが大きく技術的に困難であることを示し、性能が限界値を下回ると架替えが必要になり、更新コストが生じることを表す。このように維持管理戦略を考える上で劣化曲線を描くことは非常に有用である。

しかし、問題も少なくない。精度のいい劣化曲線を描こうとしても十分なデータはないのが普通である。また、橋のように劣化・損傷から更新を余儀なくされるまでのプロセスが単純でない構造物の性能を、一本の曲線で表現することはもともと無理がある。劣化曲線は、何処まで行っても定性的な模式図でしかあり得ないことを認識すべきである。

そもそも縦軸の性能を何で代表するのか。構造の専門家は、縦軸に耐荷力を設定したがる傾向があるが、耐荷力に有意な変化が生じるのは、多くの場合劣化・損傷としては末期的な段階である。維持管理の立場から見ると、すでに手遅れになった構造物の分類をすることになるが落ちである。

一方、劣化曲線が何となく減価償却を思い起こさせるためか、縦軸を資産価値とみて企業会計の方法を踏襲したいいわゆるインフラ会計に援用されることがある。減価償却に対応する耐用年数という概念は、資産価値が長期間継続する多くの社会資本には馴染まないはずである。将来予測を重視する財務分野では、あらゆる現象の定式化を求める傾向があり、求めに応じて劣化曲線の精度向上の検討も行われているが、上記のように本質的に困難であることを認識して用いるべきである。

また、資金の現在価値を求めるために割引率を用いることは、曲線を下に凸の形に変化させることに相当する。すなわち維持管理行為を先送りすることが正しいという、管理技術者の感覚とは誤った結論を導きやすい。維持管理行為の先送りは橋の崩落等リスクを増大することになるので、安易にこの考え方を現場で用いると危険な判断につながることに注意すべきである。

図－5は、コンクリート構造物をイメージした劣化曲線である。鋼橋と比較すれば、現場施工となるコンクリート材料の品質は、工場製品である鋼材に比べてばらつきが大きい。さらに、時間の経過に従ってその差はより大きくなる。材料品質に関するデータは豊富に集まるかもしれないが、維持管理コストの算出に用いるためには確率論的な扱いが必要になり、ハードルは高そうである。

維持管理への応用としては、施工完了段階の検査及び一定期間経過後のコア採取により評価すれば、個別橋梁の劣化の程度が確率分布のどの辺りに相当しているのかを確認することができるので、それに応じた維持管理計画の修正が可能である。

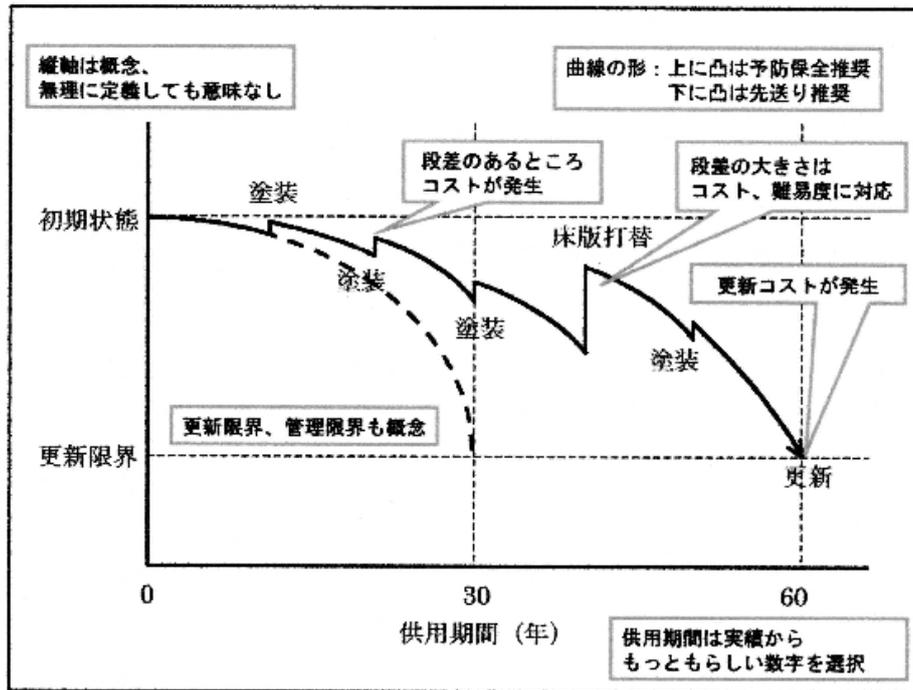


図-4 劣化曲線の意味すること

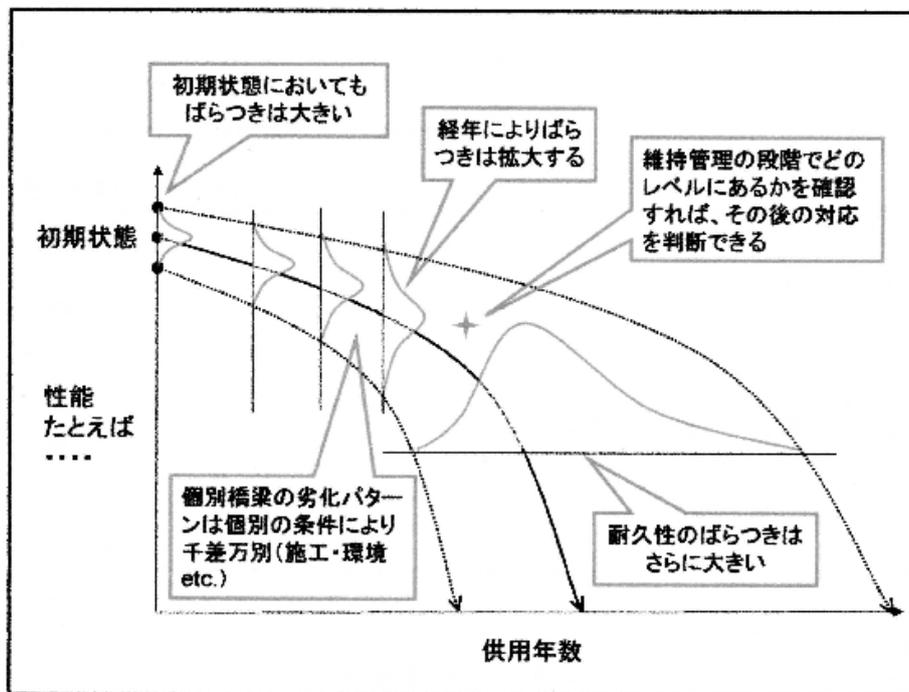


図-5 コンクリート構造物の劣化曲線 (イメージ)

## 5. ライフサイクルコストについて

近年LCCと表記されることが多くなっただけのいわゆるライフサイクルコストであるが、14年前に土木学会論文集に発表して以来、これまで何度も論じてきた<sup>1)</sup>。橋の維持管理の世界にLCCという言葉が定着したことは良いことであるが、劣化曲線と同様、将来予測のツールとして過大な期待を抱かれているように見受けられる。いずれも概念整理と規範を示すためのツールとしては有用であるが、目的によっては個別の案件を処理するために必要な精度を持ち得ない点に注意する必要があるだろう。

鋼橋の場合、塗装の塗り替えという義務的な維持管理が存在するため、LCCの算出は比較的容易でかつ理解を得やすい。当初は維持管理の項目として、塗装の塗り替え、支承・伸縮装置の補修、RC床版の補修といった主要なものを考慮して試算結果を示し、設計時に維持管理コストを考慮することが将来的に維持管理負担を抑制する効果があることを示すことで、初期コスト優先の鋼橋設計の軌道修正を試みた。現在鋼橋の世界ではLCCを考慮した設計が浸透し、一定の成果を上げることができたと自負している。なお、LCCを考えることの効用として、維持管理費用を軽減するための技術開発進んだことも付け加えておきたい。

一方、コンクリート橋の場合、もともとメンテナンスフリーを前提としていたこともあり、図-4と5を比較しても、鋼橋と同様の方法でLCCを算出することはできないことは明らかであろう。現時点では、鋼橋とコンクリート橋のLCCを無理に算出し、金額ベースで比較することは意味がないと考えている。むしろ施工時の品質管理の重要性を認識させるためのツールとして活用すべきである。

### 参考文献：

- 1) 西川和廣：道路橋の寿命と維持管理、土木学会論文集、No.501/I-29、1994.10
- 2) 西川和廣：ライフサイクルコストを最小にするミニマムメンテナンス橋の提案 橋梁と基礎 1997.8
- 3) 西川和廣：施工と維持管理を設計せよ—100年橋梁を保証するために—、橋梁と基礎 2006.8
- 4) 西川和廣：社会資本の維持管理戦略、月刊建設 2008.2
- 5) 西川和廣：「彼(敵)ヲ知り、己ヲ知レバ、百戦殆フカラズ」、橋梁と基礎 2008.8
- 6) 西川和廣：高齢橋は老朽橋ではなく長寿橋である、コンクリート工学 Vol.46、No.9、2008.9

# 下水管きよのストックマネジメント

## －劣化曲線とリスク管理－

下水道研究部 下水道研究室長

榊原 隆

## 1. はじめに

明治時代の富国強兵政策等による急速な産業発展や人口集中は、大雨時の浸水被害をもたらせ、滞留汚水によるコレラなどの伝染病を流行させた。我が国の近代下水道は、それらの社会的問題の防止策として整備が開始されたのが初めである。中でも東京、横浜、名古屋、大阪などといった大都市では先進的に下水道整備が進められ、明治14年(1881年)には横浜で、明治17年(1884年)には図-1に示す東京神田で下水管きよの築造が始められている。しかしながら当時の衛生環境整備面では、下水道よりも上水道の方が優先され、全国的に下水道の整備が本格化してきたのは昭和30年代から40年代に入ってからとなっている。それ以降、我が国の下水道事業は急速な整備向上によって、今や平成19年度末の普及率が71.7%、管きよ延長が約40万km以上に達するようになり、生活環境の改善、浸水防除、公共用水域保全等に大きな寄与を果たす社会資本となっている。<sup>1)</sup>

このような状況の中、近年、社会資本の老朽化問題が顕在化している。下水道分野についても図-2に示すような下水管に起因した道路陥没事故が年間4,700件も発生しており、大きな問題としてクローズアップされている。下水管起因の道路陥没事故は、管きよ破損といった大規模なものに至ると、下水の収集や排水といったシステムに支障をきたすだけでなく、場合によっては人命や道路交通等により重大な影響を及ぼすおそれが懸念される。しかしながら、その防止策の一つである管きよ内調査に関しては、構造の特性上、十分な点検や調査が実施されていないのが現状である。したがって道路陥没等の不具合被害を未然に防止するためには、地中に埋設されている下水管の状況をいかにして的確に把握し、改築や修繕計画等を策定すべきかが、将来の下水道事業にとって重要課題となっている。

本研究室では、このような問題の解決策として、管きよに関する実態を全国調査により把握し、その調査データを活用するこ

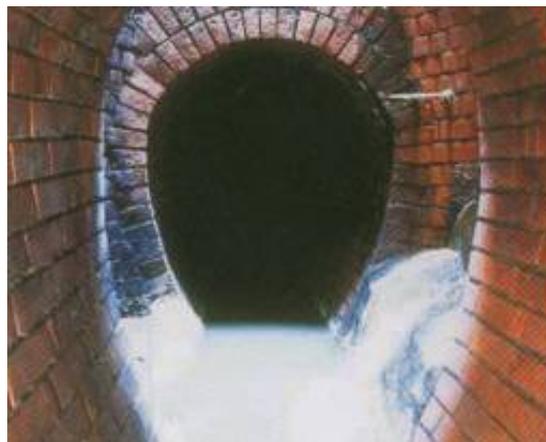


図-1 レンガ積み暗きよの神田下水<sup>2)</sup>



図-2 道路陥没発生状況<sup>3)</sup>

とでストックマネジメント導入に関する調査研究を平成 18 年度から実施している。

本講演では、まず我が国の下水管きょを取り巻く状況、ストックマネジメントの導入に際しての課題と下水道分野の動向を示す。次に本研究室における調査研究の取り組み事例を紹介する。取り組み事例としては、改築・修繕等の計画策定に資するマクロ的なストックマネジメント手法のうち、将来事業量の予測等に必要となる劣化曲線の作成手法を紹介する。さらにミクロ的な手法としては、リスク最小化を考慮した事業優先順位の決定に関する調査研究の一端を紹介する。

## 2. 我が国の下水管きょを取り巻く状況

ストックマネジメント導入に向けた観点から、近年の我が国における下水管きょを取り巻く現状を整理すると、以下の項目が挙げられる。

### 2. 1 管きょストック量の増大と布設年度別延長の片寄り

図-3 は、平成 18 年度末時点における全国の布設年度別管きょ延長である。これは、平成 18 年度末時点で埋設されている管きょ延長を残存延長として表し、本研究室が布設年度別に整理したものである。

グラフをみると、平成 18 年度末時点で埋設されている管きょは、昭和 35 年度（1960 年度）あたりから増加傾向となり、近年では、平成 10 年度（1998 年度）をピークに減少している。また布設年度が不明な管きょを除いて、経過年数 30 年以上（1977 年度以前）と 30 年未満（1978 年度以後）の残存延長を分類すると、30 年以上が 51,332 km、30 年未満が 323,734 km となっており、30 年未満の管きょが全残存延長の 86.3% を占める状況となっている。

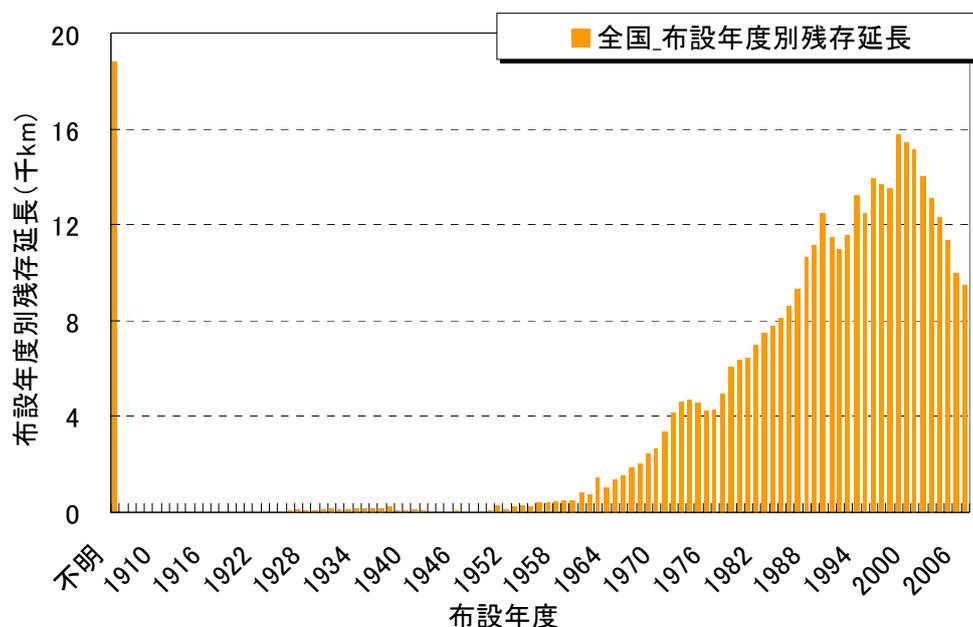


図-3 平成 18 年度末時の管きょ延長

一方、図-3のグラフを大都市と大都市以外の都市に分類すると、図-4のグラフになる。なお大都市とは、政令指定都市と東京23区を合わせた都市である。

グラフに着目すると、先進的に下水道整備を実施している大都市は、大都市以外の都市よりも年度別延長のピークが早いことがわかる。さらにそれらを平均経過年数で比較すると大都市が24.2年、大都市以外が14.8年となっており、約10年の差が生じることが明らかになる。

この結果、管きよのストック量が増大する中で布設年度別の延長に着目すると、年度によって大きく異なり、管きよ整備事業に対する片寄りが把握できる。また布設経過30年未満の管きよが30年以上よりも多く占めていることから、今後、管きよの老朽化が進むにつれて、将来の改築事業等における予算確保に大きな課題を与えることが推察される。特に大都市においては、平均経過年数が24.2年になっていることから、既に都市全体において老朽化が進みつつあり、課題解決に向けた取り組みが急務になっている。

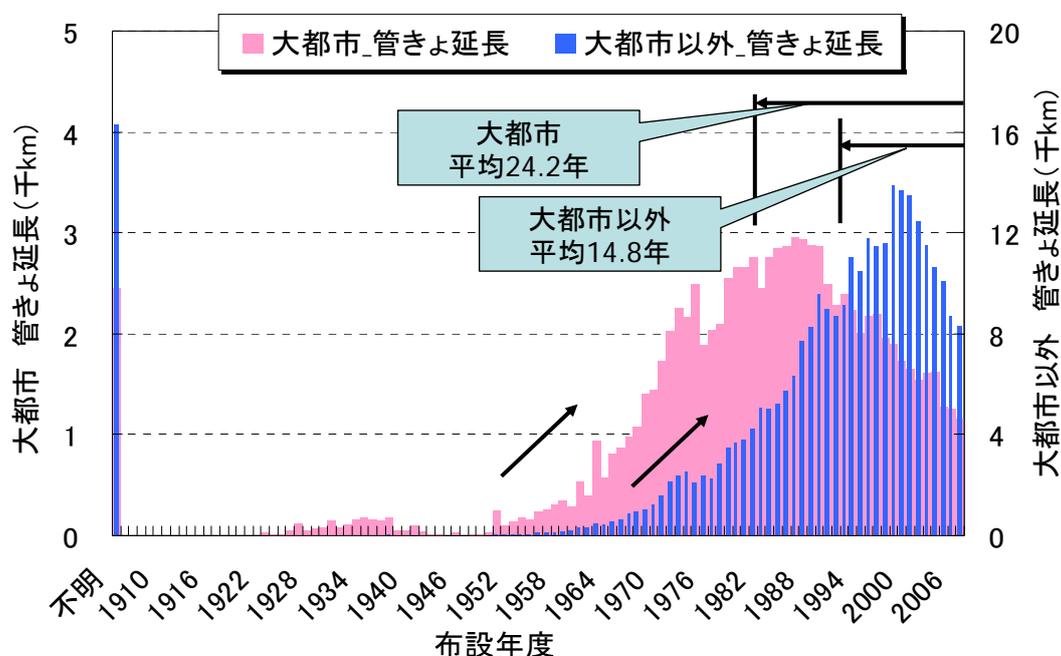


図-4 平成18年度末時の都市規模別管きよ延長

## 2. 2 増加する下水管起因の道路陥没

図-5に管きよ整備延長累計と各陥没発生年度別の道路陥没件数の関係を示す。

グラフをみると、管きよ整備延長の増加に伴い道路陥没も増加する傾向を示しており、平成18年度(2006年度)での発生件数は約4,400件になっている。さらに平成19年度(2007年度)では約4,700件という集計結果を得ている。

この結果は、地震の被害状況によって多少の件数が異なるが、長期経過による老朽化が影響していることが考えられる。殊に大都市と大都市以外の件数を図-6で比較すると、大都市の陥没件数は全体の56%を占めており、前述の図-4の平均経過年数を考慮すると、老朽化が大きく影響していることが推察される。

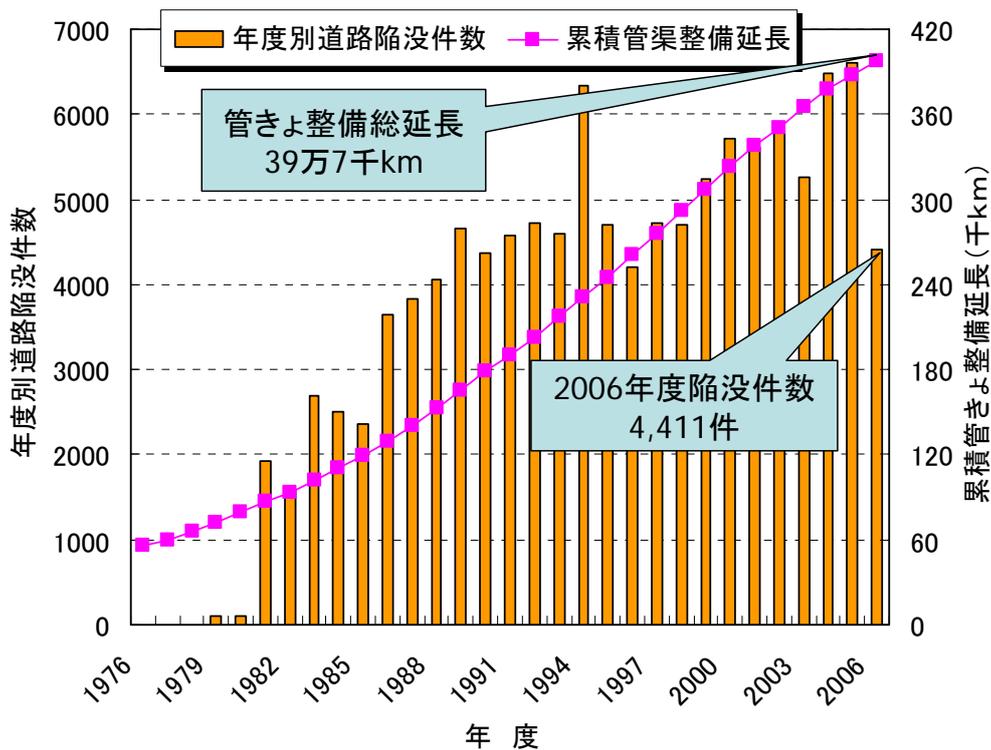


図-5 管きよ整備延長累計と各陥没発生年度別の道路陥没件数

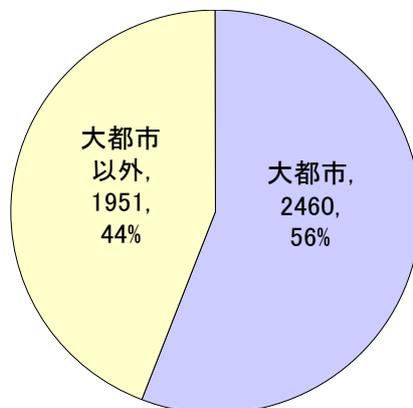


図-6 平成18年度に発生した都市規模別の道路陥没件数

### 2. 3 布設された時期によって異なる管種

図-7に平成17年度末時点で埋設されている管きよの管種の割合を示す。

管種の割合は塩ビ管が43.7%で最も多く、続いて鉄筋コンクリート管を含むコンクリート管の39.0%、陶管の7.3%となっている。これらの状況を詳しく把握するために、図-3の残存延長を管種別に整理した結果を図-8に示す。

管種ごとのグラフに着目すると、平成元年度（1989年度）まではコンクリート管における単年度ごとの残存延長が多く占め、その時の延長は5,884kmになっている。それ以降になるとコンクリート管が急速に減少し、その代わりに塩ビ管の残存延長が伸びる傾向となっている。平成2年度（1990年度）では、コンクリート管と塩ビ管の延長が逆転し、その時の塩ビ管の最大延長は平成11年度（1999年度）で11,762kmになっている。

この結果、16年以上経過の場合はコンクリート管が最も多く占め、16年未満は塩ビ管が最も多く占めていることが把握できる。そのため下水管きよは、布設された時期により管種が異なり、それらを踏まえた対策や将来の事業計画が必要と考えられる。

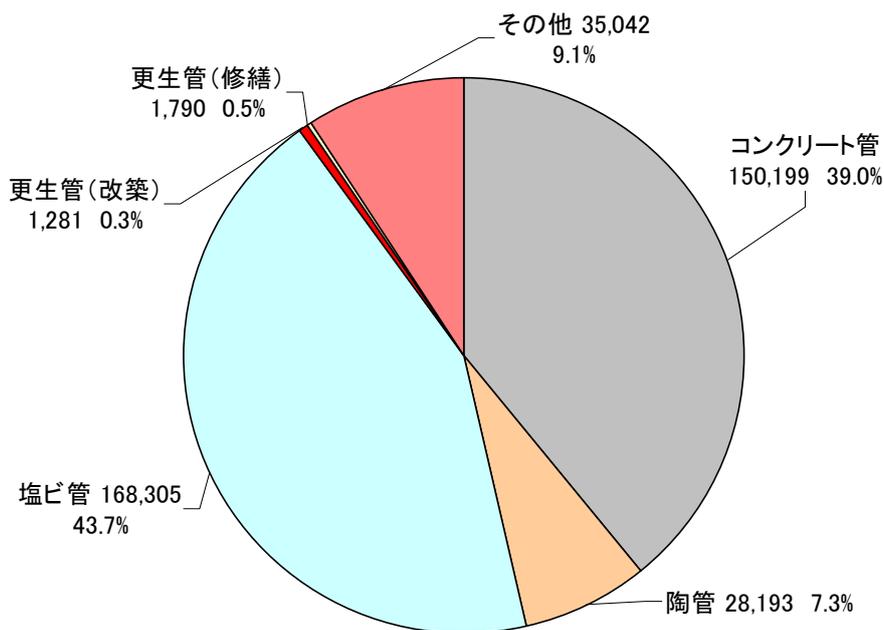
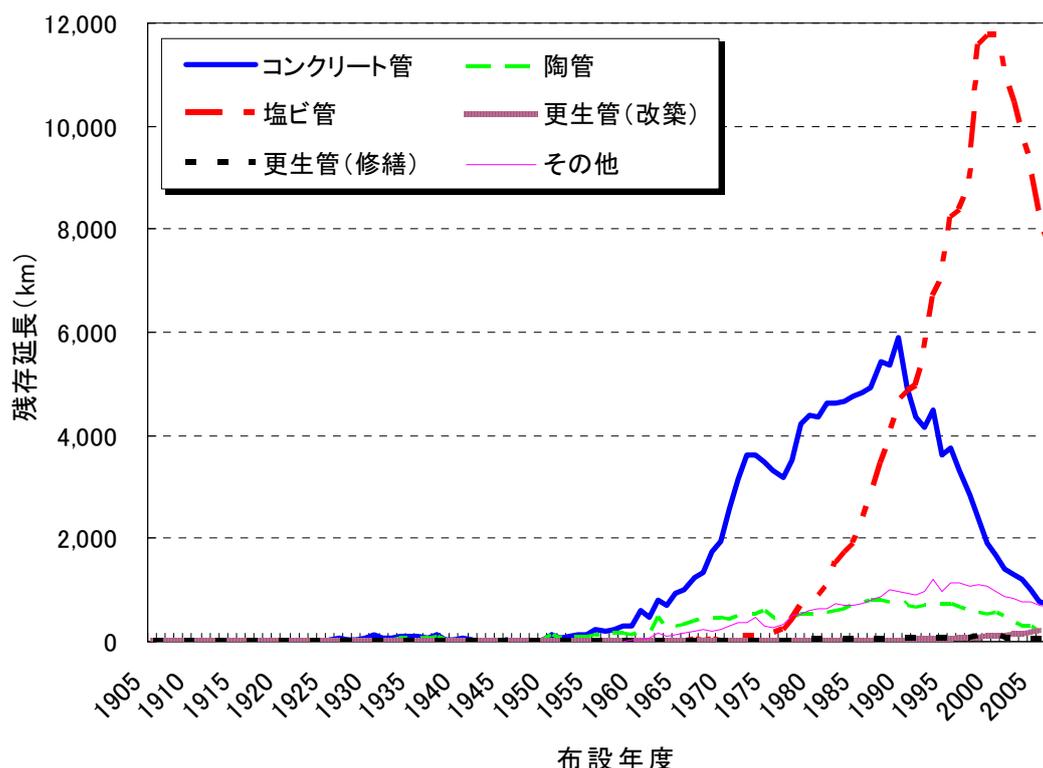


図-7 平成17年度末時点の埋設管きよの管種割合



図－8 平成 18 年度末時の管種別管きよ延長

#### 2. 4 点検調査が進まない管きよの維持管理<sup>4) 5)</sup>

本省下水道部では、平成 18 年度より重要路線下に埋設されている管きよを中心に点検調査結果を公表している。ここでいう重要路線とは、軌道、災害対策基本法及び同法に基づく地域防災計画に位置付けられた緊急輸送路（車道部）及び避難路（車道部）である。平成 20 年度の公表結果を図－9 に示す。

緊急輸送路などに布設されている管路の約 22,170km のうち、緊急的に点検の必要がある管路は、約 10,690km となっている。そのうち、既に点検を実施している管路は 9,507km である。また、これらの実施済み結果を緊急度で評価すると、直ちに対策が必要なレベル I は 130km、対策が必要なレベル II の管路は 527km、当面对策の必要なレベル III の管路は 8,850km となっている。このため、対策の必要のある管路の 660km に対して 260km が未対策となっており、結果として 39% が未対策になっている。したがって、重要路線に限定しても十分な調査が実施されていない状況になっている。

次に下水道統計からまとめたデータとして、近年の維持管理費用を図－10 に示す。管きよの整備延長が増加しているにも関わらず、維持管理費、調査費、修繕費は横ばい状況であり、一方、清掃費は、むしろ減少傾向になっていることがわかる。その理由として、維持管理費の財政逼迫が下水道管理者側に影響を与えていることが考えられ、結果として道路陥没の増加という悪循環が生じていることが推察される。また、このような財政逼迫は将来も続くことが懸念されるため、厳しい財政状況の中でも効率かつ効果的な維持管理により道路陥没を減少させて

いくことが必要になってきている。

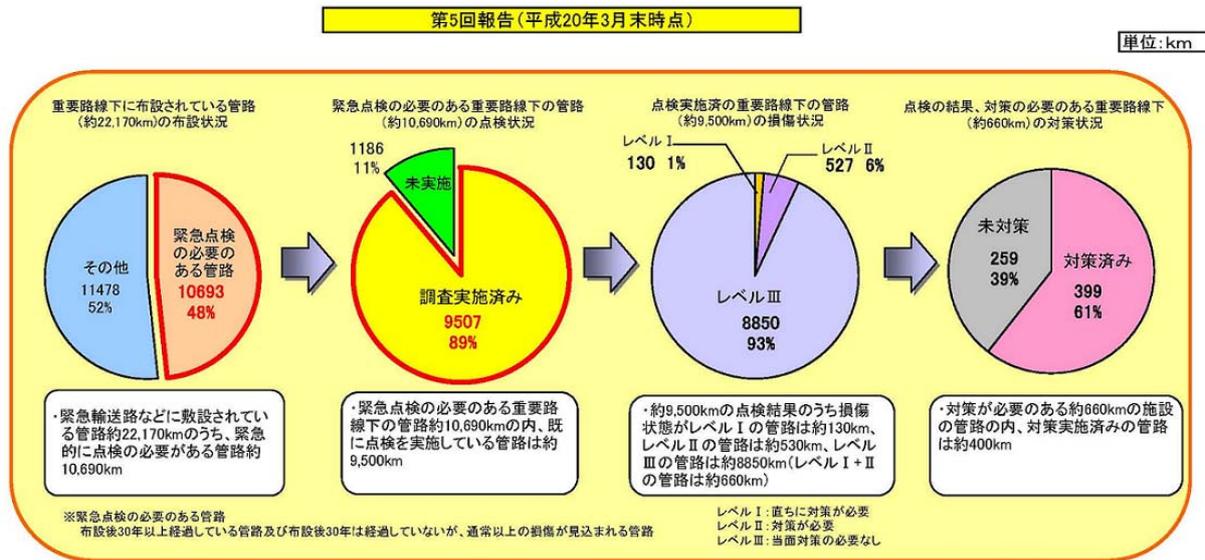


図-9 重要路線下の管路点検状況(平成20年度3月) 4)

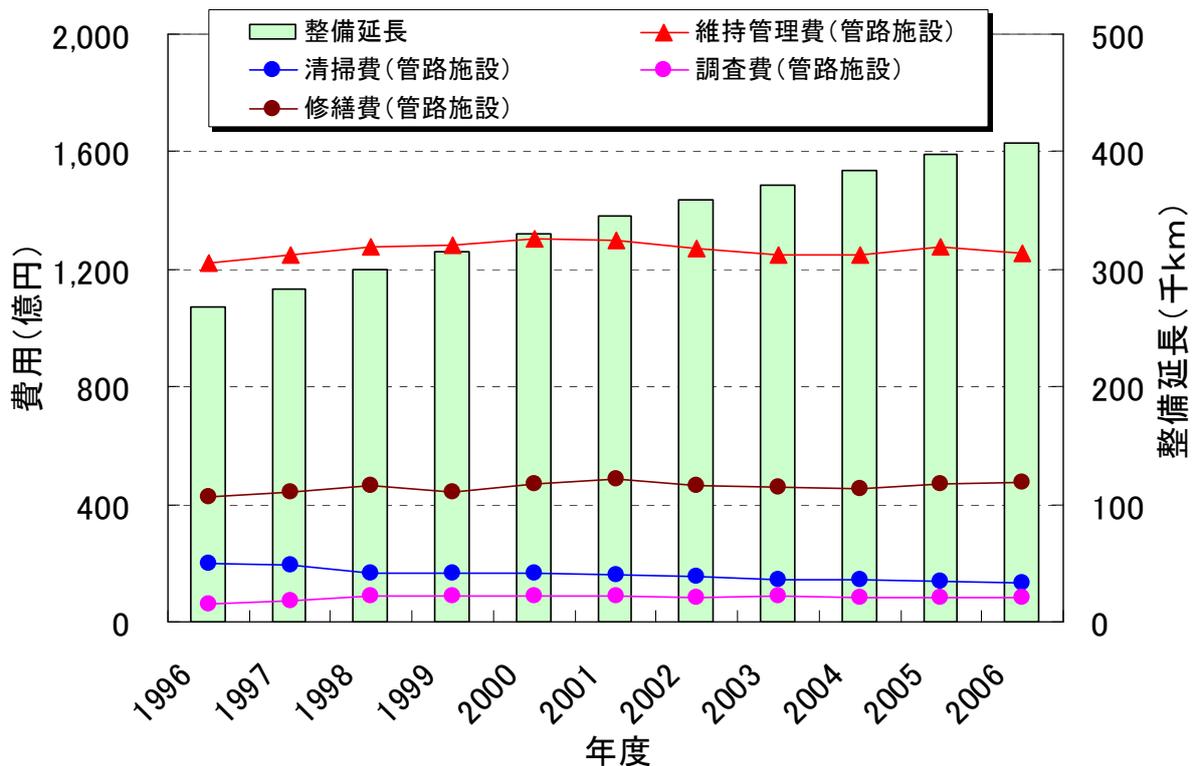


図-10 管路施設の維持管理費の状況 5)

### 3. スtockマネジメント導入に際しての課題と下水道分野の動向

#### 3. 1 スtockマネジメント導入に際しての課題

以上述べてきた下水管きよを取り巻く状況を踏まえて、Stockマネジメントの導入に際しての課題を考えると、以下の項目が挙げられる。

- ① 管きよStock量は増大傾向にあり、急速な整備により布設年度別延長には片寄りがある。また布設経過年数 30 年未満の管きよは、全残存延長の 8 割以上を占めるものの老朽化が進むにつれ、将来の改築事業等の予算確保に大きな課題を与えることから、効果的な解決策が望まれる。
- ② 下水管起因の道路陥没は、長期使用の老朽化により増加傾向にある。とりわけ大都市の道路陥没件数は全体の 56%を占めており、平均経過年数からも老朽化が影響していることが推察される。下水管きよにおける施設の安全性や良好な状態を維持するには、点検調査等により、あらかじめ予測を行って改築、修繕に結び付ける未然対策が必要である。
- ③ 埋設されている管きよの管種は、布設された時期によって異なる。そのため、老朽化に対する傾向も異なることが懸念される。それぞれの管種に応じた対策や事業計画を検討することが必要である。
- ④ 近年の管きよの維持管理費は、Stock量の増大や道路陥没件数の増大にも関わらず横ばい傾向にある。この傾向は、維持管理費に対する財政逼迫が要因として考えられ、将来も続くことが懸念される。効率かつ効果的な維持管理の実施には、リスク最小化を考慮した優先度を見極めた事業計画が必要である。

#### 3. 2 Stockマネジメント導入に対する下水道分野の動向

下水道分野の動向としては、本省下水道部が平成 19 年度末に「下水道事業におけるStockマネジメントの基本的な考え方(案)」を下水道事業におけるStockマネジメント検討委員会の成果として取りまとめた。さらに、「下水道長寿命化支援制度に関する手引き(案)」についても取りまとめ、平成 20 年度からは「長寿命化支援制度」を創設している。その概要を以下に紹介する。

##### 3. 2. 1 下水道事業におけるStockマネジメントの基本的な考え方(案)<sup>3)</sup>

図-11 に下水道事業におけるStockマネジメントで取り扱う範囲を示す。

現時点における検討委員会の取りまとめでは、アセットマネジメントに発展させるための重要な土台部分の検討を重視している。具体的には、「膨大な施設の状況の把握」、「中長期的な施設状態の予測」、「下水道施設の計画的かつ効率的な管理」を目的とし、新規整備、維持管理、改築を一体的に捉えて、事業の平準化とライフサイクルコストの最小化を実現していくことを考えている。

図-12 に実際の作業フローを示す。実際の作業は、主に「下水道事業の目標設定」、「施設管理計画の策定と実行」、「施設管理計画の評価と見直し」等を実施することである。施設管理計画の目標期間は最長 20~30 年間程度(長期)とし、計画は原則として 5 年程度ごとに見直すことになっている。特に当初の 5 年間程度(短期)は詳細な計画を策定することになっている。

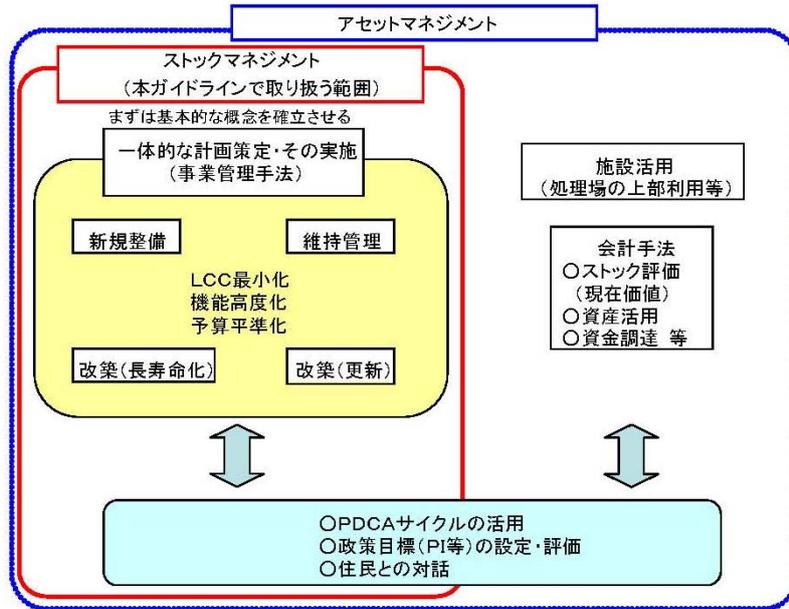


図-11 下水道事業におけるストックマネジメントで取り扱う範囲<sup>3)</sup>

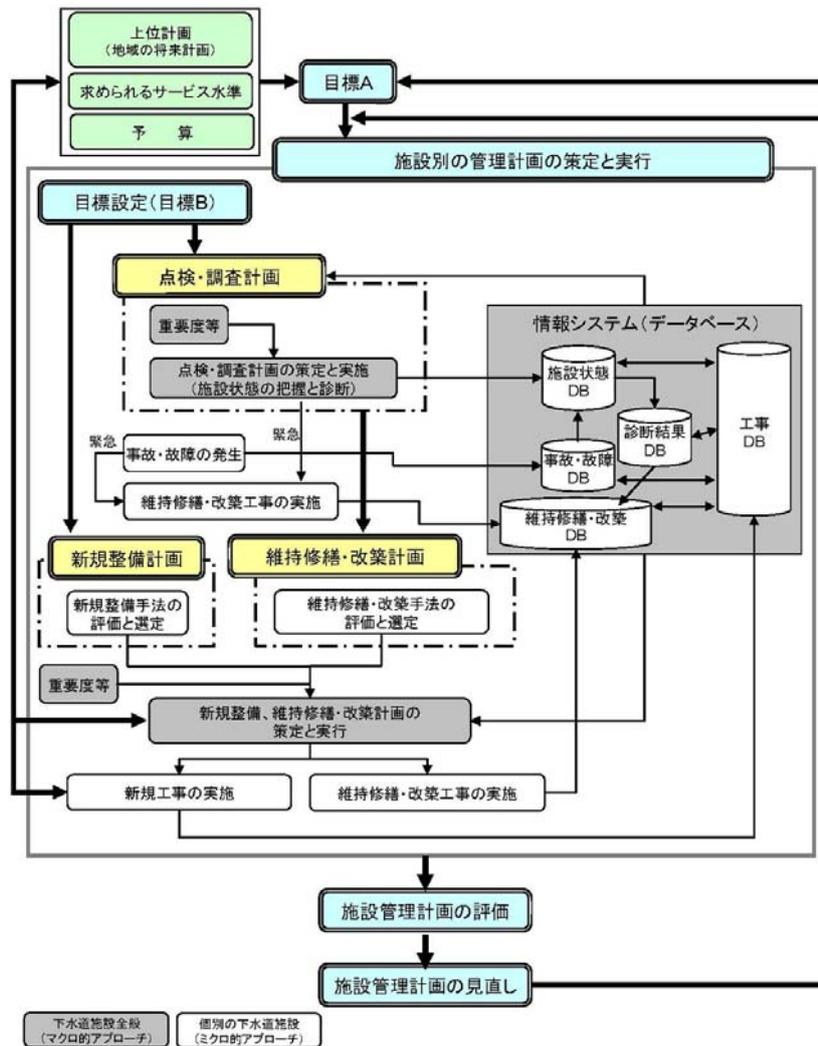


図-12 下水道事業におけるストックマネジメントの作業フロー<sup>3)</sup>

### 3. 2. 2 長寿命化支援制度の創設<sup>6)</sup>

「下水道長寿命化支援制度」は、下水道施設の健全度に関する点検・調査結果に基づき「長寿命化対策」に係る計画を策定するとともに、当該計画に基づき長寿命化を含めた計画的な改築を行う。そして、事故の未然防止及びライフサイクルコストの最小化を図ることを目的としたものである。「長寿命化対策」とは、更生工法あるいは部品（「改築通知」に定める小分類未満の規模）取り替え等により既存ストックを活用し、耐用年数の延伸に寄与する行為である。長寿命化支援制度の申請に必要な計画策定概要とライフサイクルコスト縮減額の考え方は以下に示す。

#### (1) 長寿命化計画策定の概要

- ① 補助対象；計画的な改築を行うための点検・調査に対する補助
  - 「下水道長寿命化計画の策定に対する補助
  - 「下水道長寿命計画」に基づく計画的改築に要する費用に対する補助
- ② 計画期間；概ね 5 年以内
- ③ 策定単位；下水道機能を確保するための一体的な範囲を対象
- ④ 定めるべき事項；
  - 対象施設及びその選定理由
  - 点検調査結果の概要及び維持管理の実施状況
  - 計画期間
  - 長寿命化対策を含めた計画的な改築、維持管理の概要
  - 長寿命化対策の実施効果（ライフサイクルコスト縮減額）

#### (2) ライフサイクルコスト縮減額の考え方

図-13 にライフサイクルコスト縮減額の算出方法を示し、以下に手順を述べる。

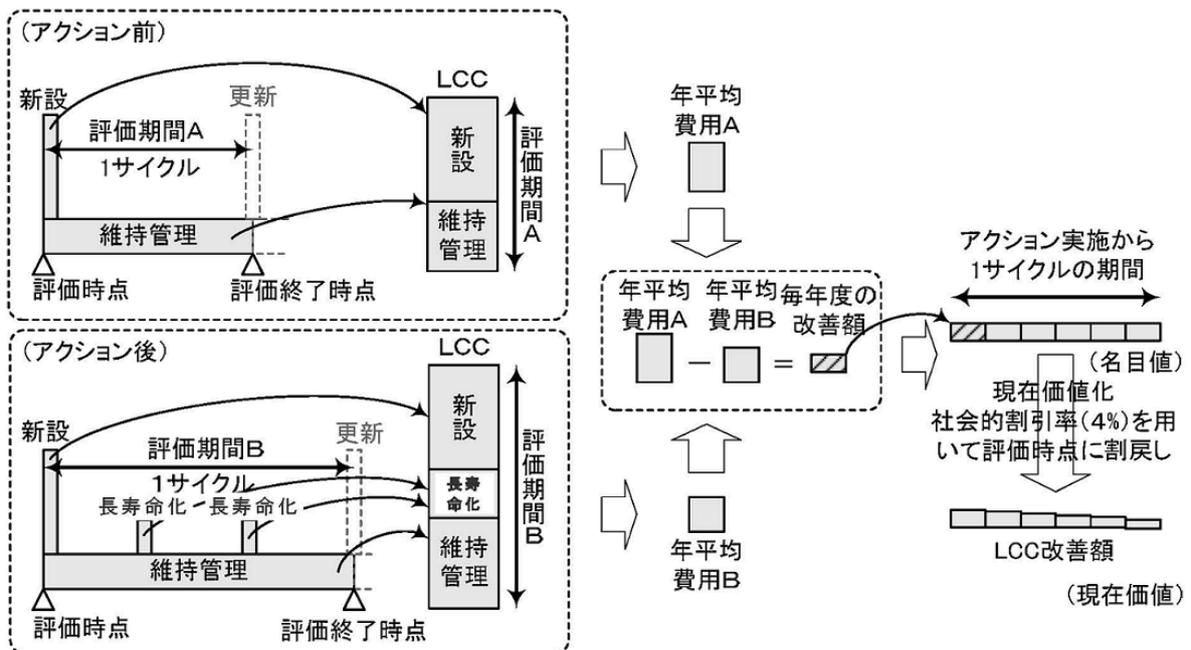


図-13 ライフサイクルコスト縮減額算出方法<sup>6)</sup>

- ① アクション前の評価期間及びアクション後の評価期間を設定する。
- ② 評価期間内に発生するライフサイクルコストを計算し、アクション前後の年平均費用を算出する。
- ③ アクション後の年平均費用からアクション前の年平均費用を差し引くことにより、毎年度の改善額を算定する。
- ④ 毎年度の改善額を評価時点に社会的割引率を用いて割り戻した上で累計し、ライフサイクルコストの改善額を算定する。

#### 4. 下水道研究室におけるストックマネジメント研究の取組み

以上のように、下水道分野におけるストックマネジメント導入検討は、新事業制度の創設等を契機に進みつつある。しかしながら、前章で示した課題に向けての検討は、具体的に進められていないのが実情である。本研究室では、管きょ延長に関する全国調査や道路陥没に関する全国調査、管きょ劣化状況による診断調査を展開し、課題解決に視点をおいた調査研究を進めている。ここでは、本研究室におけるストックマネジメントの考え方を示し、具体的な調査研究項目等を説明する。

##### 4. 1 目指すべきストックマネジメントとは何か？

ストックマネジメント導入に際しての課題解決を図るために、本研究室では次の4つの項目を調査研究の目標として考えている。

- ① 施設状態を「健全度」として定量的に把握し、施設の安全性の確保や良好な施設状態の維持を可能にさせる。
- ② 良好な施設状態を維持しながら、施設全体に対するライフサイクルコストの最小化を図り、合理的な改築・修繕等の計画策定を可能にさせる。
- ③ 予算の平準化や優先度を考慮した事業計画を策定することで、財政制約下での下水道事業経営の健全化を実現させる。
- ④ 新規整備・維持管理・改築更新を一体的に捉えたストックマネジメント手法により、地域住民に対して明確な説明責任を果たすことを実現させる。

##### 4. 2 導入に向けて必要な検討項目は何か？

これらの目標達成のためには、次の3つの検討項目が必要である。

- ① 管きょ施設状況を把握するために必要な管きょデータ、道路陥没データ、TVカメラ調査データといったデータベースの構築と蓄積を図ること。
- ② 将来事業費の確保を念頭に置いた財政視点の中長期計画を策定すること。
- ③ リスク最小化による事業優先度を念頭に置いた施設維持視点の中長期計画を策定すること。

特に②においては、将来に向けた新規整備予測、管きょ健全度（劣化）予測、改築・修繕投資予測を検討することで、将来の事業費を予測する必要があると考えている。さらにライフサイクルコストの最小化、事業費の平準化を考慮した計画が策定できるような検討を進めることも重要と考えている。③に関しては、限

られた予算制約の下で重大事故や不具合を未然に防ぎ、優先度を的確に見極めた改築・修繕計画を策定できるような検討が重要と考えている。

#### 4. 3 導入検討に向けての問題点と解決策

このように本研究室では、3つの検討項目に向けた調査研究を進めているが、実施に当たっては以下の問題点も考えられる。

一つ目は、「膨大な延長の管きよをどのように調査するのか？」ということである。現在、全国に埋設されている下水管きよ延長は約40万kmある。これをマンホール間延長のスパンで換算すると、約1,300万スパンになる。また現在の下水道管理団体は、約1,500団体が事業を実施している。したがって1団体あたりに換算すると、約8,900スパンを管理しているということになる。そのため、地中にある膨大な延長の管きよを定期的に調査するには困難な状況と考えられる。

二つ目は、「スパンごとの健全度状況をどのように把握するのか？」ということである。下水管きよが埋設されている地中では、上水道・電気・ガス・電話等の地下埋設物も競合して設置されている。そのため、他工事等の予期しない外力によって突然破壊される場合がある。一方、下水管きよの劣化進行は埋設環境によっても異なる。このような場合、仮に劣化状況を事前に把握できても、スパンごとの残寿命や健全度の予測、ライフサイクルコストの予測は困難と考えられる。

三つ目は、「管きよ内調査における診断誤差をどのように解決するのか？」ということである。現在、管きよ内調査のほとんどは、TVカメラ調査によって実施されている。この調査に使われているTVカメラは、年々、技術の向上が図られている。そのため開発時期により画質の差異が生じ、これらの映像比較は劣化判断の誤解を招きやすくなっている。また画質による劣化判断は、オペレーターによっても誤差が生じやすい状況になっている。

このような状況の中、本研究室は、ストックマネジメントの導入検討に際しては、個々の管きよスパン単位での残寿命や健全度の評価や予測、ライフサイクルコストの予測は困難であると判断した。その代わりに健全度評価や予測、ライフサイクルコストの予測はマクロレベルで考え、財政視点によるストックマネジメントの検討に役立てることと考えた。さらに個々の管きよスパンは、リスクの最小化を考慮した事業優先度視点のストックマネジメント検討に役立て、ミクロレベルの考えに活用した。

#### 4. 4 下水道研究室における調査研究項目

以上の考えのもと、本研究室では財政視点によるストックマネジメントに役立てる調査研究項目として、将来事業費予測に活用する平均劣化曲線の検討を進めた。具体的には、

- ① 管きよ延長に対して改築を必要とする不具合延長は、現在、どの程度あるのか？
- ② 今後、どのような割合で増えていくのか？
- ③ 改築・修繕が必要な距離は、毎年、どのくらいなのか？

といった将来事業計画を立てるために必要な平均劣化曲線である。

また、リスク最小化を考慮した事業優先度視点のストックマネジメントに役立

てる調査研究項目としては、不具合リスク評価ツールの検討を進めた。

具体的には、

- ④ どこから管きょ調査や改築、修繕を進めていくのか？
- ⑤ どこの管きょが不具合を生じやすいのか？
- ⑥ 道路陥没といった不具合事故の被害規模は、どのぐらいの大きさなのか？どのぐらいの被害金額なのか？

といった限られた予算枠での事業優先度計画を立てるために必要な評価ツールである。

## 5. 下水道研究室における調査研究成果の紹介

財政視点のストックマネジメントに役立てる平均劣化曲線に関しては、管きょ内調査データを用いた劣化曲線、管きょ延長データを用いた生存曲線を作成することによって調査研究を進めた。また、リスク最小化を考慮した事業優先度視点のストックマネジメントに役立てる不具合リスク評価ツールは、不具合リスク点数計算表、道路陥没によるリスク評価の検討により調査研究を進めた。その調査研究成果の一端を以下に紹介する。

### 5. 1 将来事業費予測のための平均劣化曲線の検討<sup>7)</sup>

#### 5. 1. 1 管きょ内調査データを用いた劣化曲線の作成

##### (1) 管きょ内調査データを用いた健全度の計算

管きょ内調査は、図-14 に示すTVカメラ本体を用いて行う。調査より得られたデータは管きょ対策に関する緊急度判定に用いられ、健全度の評価を実施した。本研究室では、面的にTVカメラ調査を実施している代表的都市からデータを手して健全度評価を実施した。



図-14 TVカメラ本体と劣化判定状況

ここで面的なTVカメラ調査とは、一定の経過年数を過ぎた管きよのTVカメラ調査や一定地域内のTVカメラ調査のことである。

具体的な事例としては、

- ① 合流式下水道が存在している大都市では、古い管きよを再構築し排水能力を向上させているため、生存されている全ての管きよを調査する場合。
- ② 良い維持管理をしている都市で、一定経過年数が過ぎた管きよを調査する場合。といった調査等が挙げられる。これらの調査データを用いることで検討を進めた。

## (2) 管きよ対策に関する緊急度判定

TVカメラ調査から得られたデータによる緊急度判定は、管きよスパンごとに対して緊急度Ⅰ、Ⅱ、Ⅲの3段階の分類がある。緊急度Ⅰは、速やかに措置することが必要の判定であり、緊急度Ⅱは、簡易な対応により必要な措置を5年未満まで延長できる判定、緊急度Ⅲは、簡易な対応により必要な措置を5年以上まで延長できる判定である。緊急度ⅠまたはⅡが判定された場合、実際には改築や修繕が実施されており、緊急度Ⅲの場合には対策が行われず簡易対応になる模様である。ここでは、緊急度ⅠまたはⅡを「劣化」と判定して健全度を計算した。

緊急度判定に至る調査項目としては、表-1に示すような管きよ腐食、たるみ、破損等などが挙げられる。標準的な項目は、日本下水道協会の維持管理指針の中で決められている。しかしながら、緊急度判定に必要なそれらの調査項目のランク付け基準に関しては、各都市によって異なる場合がある。本調査研究では、これらの異なったランク付けを表-1のように統一的なランク付け基準に置き換えて緊急度を判定した。

表-1 管きよ内調査判定基準

自治体 項目	ランク	維持管理指針	A市	B市 5段階だが、 基本的に3段階	C市
腐食	A	鉄筋露出状態	鉄筋露出状態	鉄筋露出状態	
	B	骨材露出状態	骨材露出状態	骨材露出状態	(その他に カウント)
	C	表面が荒れた状態	a, b以外の露出	表面が荒れた状態	
たるみ	A	(φ700mm未満) 内径以上	管径の3/4以上	管径の3/4以上	管径の2/3以上
	B	(同上) 内径の1/2以上	管径の1/2~3/4	管径の3/4~2/4	管径の1/2以上
	C	(同上) 内径の1/2未満	管径の1/2未満	管径の2/4~1/4	管径の1/2未満
	D			管径の1/4未満	
破損	A	(HP)欠落、軸方向で幅5mm以上	欠落している	欠陥(大) ・陥没	欠落 全体のヒビ割れ
	B	(同上)軸方向で幅2mm以上	全体の亀裂(ヒビ)	管の形状を保っていない全体の亀裂及び欠陥	管1/2以上亀裂
	C	(同上)軸方向で幅2mm未満	a, b以外の破損	他工事によるBランク程度のもの	管1/2以下亀裂
	D			他工事によるABCランク以外のもの	

### (3) 管きよ内調査データを用いた劣化曲線の作成と結果

具体的な作成方法を図-15に示す。図-15の中の表は、管きよ内調査結果の例を表したもので、管きよの経過年数、調査対象スパン、緊急度Ⅰ+Ⅱのスパン数、緊急度Ⅲまたは劣化なしのスパン数、健全率を示したものである。ここで健全率とは、調査スパン数に対する緊急度Ⅲのスパン数の割合のことである。次表に示すように、例えば経過年数30年の管きよの健全率を計算すると、調査対象スパン数が30スパンで緊急度Ⅲのスパン数が24スパンの場合、健全率が80%となる。このように、経過年数ごとの健全率を計算してプロットしたものが、管きよ内調査データを用いた劣化曲線になる。図-16に最終的な計算結果を示す。

計算結果より、経過年数が多くなるにつれて健全率も減少していくことがわかる。なお、経過年数が60年以降のプロット点に着目すると、健全率のばらつきが多く発生している傾向が把握できる。これは経過年数が長いほど、すでに改築や修繕が行われていることから、調査スパン数も減少しており、その結果、健全率のばらつきが発生していることが推察される。

経過年数 (年)	調査スパン数 (箇所)	緊急度Ⅰ+Ⅱ (箇所)	緊急度Ⅲ (箇所)	健全率 (%)
30	30	6	24	80%
50	50	15	35	70%
70	40	24	16	40%

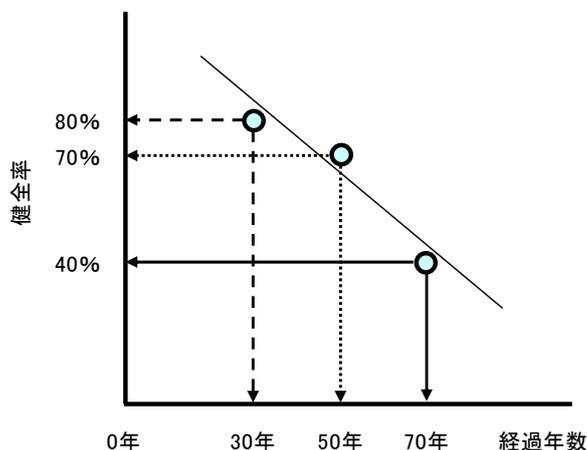


図-15 管きよ内調査データを用いた劣化曲線作成例

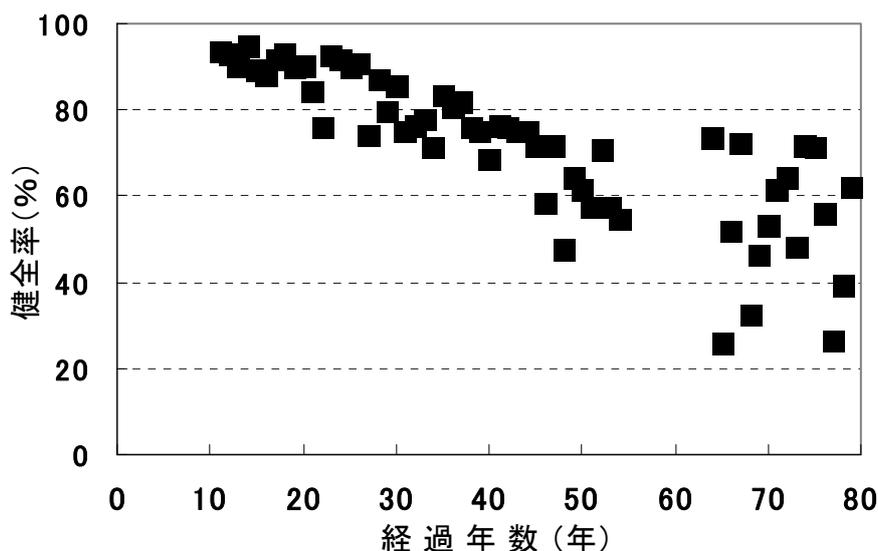


図-16 管きよ内調査データを用いた劣化曲線

## 5. 1. 2 管きよ延長データを用いた生存曲線の作成

### (1) 管きよ延長データを用いた生存曲線とは？

前述の管きよ内調査データを用いた劣化曲線は、調査時点で埋設されている管きよに対して健全度を判定して描いた曲線である。そのため、この劣化曲線には既に改築や修繕をされてしまった管きよが含まれていないのが現状である。そこで管きよ延長データを用いた生存曲線では、改築や修繕によって除外されてしまった管きよ延長も考慮して管きよの生存率を描いた。

生存曲線の作成に用いる管きよ延長データには、残存している管きよ延長や改築延長、修繕に関するデータが必要である。作成に際しては、それらのデータを本省下水道部と連携した全国実態調査と日本下水道協会発行の下水道統計を用いることによって作成した。

### (2) 全国実態調査の概要

全国実態調査は平成 18 年度から実施している。ここでは、平成 19 年度調査に関する概要を説明する。調査は、下水道事業を実施中または実施済みの全国すべての都道府県、政令指定都市および市町村を対象とし、1,598 団体から回答を得た。調査内容は平成 18 年度末を基点として下記の項目を管種別にアンケート実施した。なお、ここでいう平成 18 年度末の基点とは、平成 18 年度末に全国で埋設されている管きよ延長のことである。管種は、ヒューム管、鉄筋コンクリート管を含むコンクリート管、陶管、塩ビ管、更生管、その他に分類した。主な調査内容は以下のとおりである。

- ① 布設年度別の管理残存延長
- ② 布設年度別の改築（または廃止）された延長
- ③ 平成 18 年度に新設した延長
- ④ 平成 18 年度に改築した延長

### (3) 管きょ延長データを用いた生存曲線の作成と結果

上記の全国実態調査と下水道統計から得られたデータは、まず経過年数ごとに以下の手順で計算して生存曲線を作成した。

- ① 改築率 ( $R_1 R_{1n}$ ) を計算する。  
改築率 = 経過年数ごとの改築延長 / 経過年数ごとの残存延長
- ② 修繕率 ( $R_2 R_{2n}$ ) を計算する。  
修繕率 = 経過年数ごとの改築率 × 改築と修繕の延長比率
- ③ 改築・修繕率 ( $R R_n$ ) を計算する。  
改築・修繕率 = ①改築率 × ②修繕率
- ④ 生存率 ( $Q_n$ ) を計算する。  
生存率 = 1 - ③改築・修繕率
- ⑤ n年での累積生存率を計算し、曲線を描く。  
累積生存率 =  $Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \cdots \times Q_n$

これらの具体的な例を示したものが図-17である。図-17の中の表は、管きょ延長調査結果の例を表したもので、管きょの経過年数、残存延長、改築延長、改築・修繕率を示したものである。表より、例えば経過年数 2年の改築・修繕率を計算すると 4.5%となり、累積生存率は 93%となることがわかる。このように、経過年数ごとに累積生存率を計算してプロットしたものが、管きょ延長データを用いた生存曲線になる。図-18に最終的な計算結果を示す。

経過年数 (年)	残存延長 (m)	改築延長 (m)	改築率 (%)	改築・修繕率 (%)	残存率 (%)	累積生存率 (%)
1	1,500	30	2	3	97	97
2	3,000	90	3	4.5	95.5	93 =0.97×0.955
3	4,000	160	4	6	94	87 =0.97×0.955×0.94

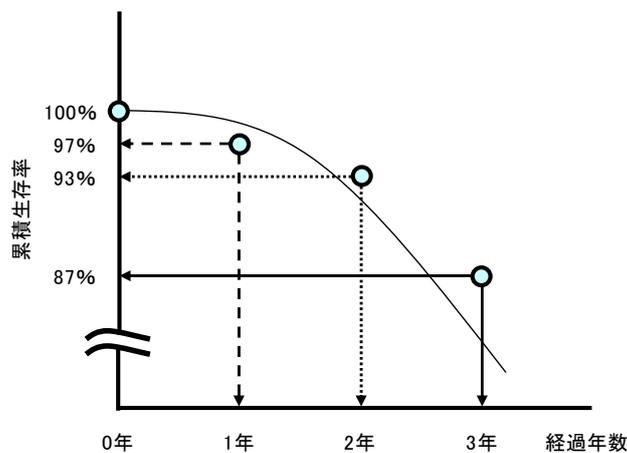


図-17 管きょ延長データを用いた生存曲線作成例

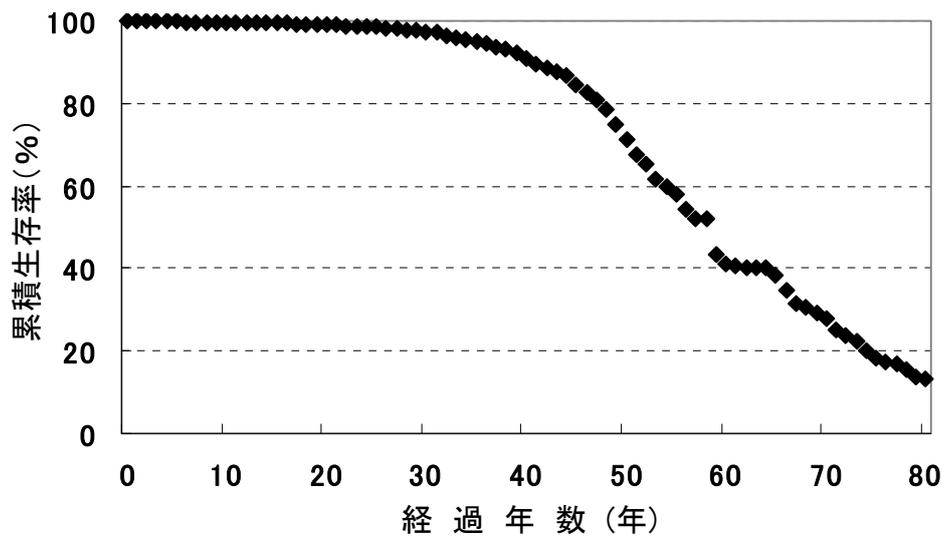


図-18 管きよ延長データを用いた生存曲線

### 5. 1. 3 平均劣化曲線の作成

平均劣化曲線は、前述した管きよ内調査データを用いた劣化曲線と管きよ延長データを用いた生存曲線を合わせたものである。つまり、管きよ内調査データだけを用いて健全度を評価すると、既に改築・修繕されてしまった管きよは考慮されないことになる。したがって、この平均劣化曲線は改築や修繕された管きよは既に劣化があったという仮定の下で補正計算したものになる。なお、これは個々のスパンでの劣化曲線ではなく、マクロな視点での全体平均の劣化曲線という扱いとする。図-19に平均劣化曲線を示す。

図-19の近似式に着目すると、補正後の健全率が50%になる経過年数は48年になることが把握できる。これは経過年数48年経過すると、管きよ全体の半分が劣化する判定となり、改築や修繕が必要になってくることを意味している。次に近似式傾きの-1.44に着目する。これは、毎年、管きよが1.44%の割合で劣化しており、逆に考えれば、毎年、1.44%の改築や修繕が必要であるということの意味している。したがってライフサイクルコストの算出に際しては、今後、このような考えを考慮して計算をしていく必要がある。

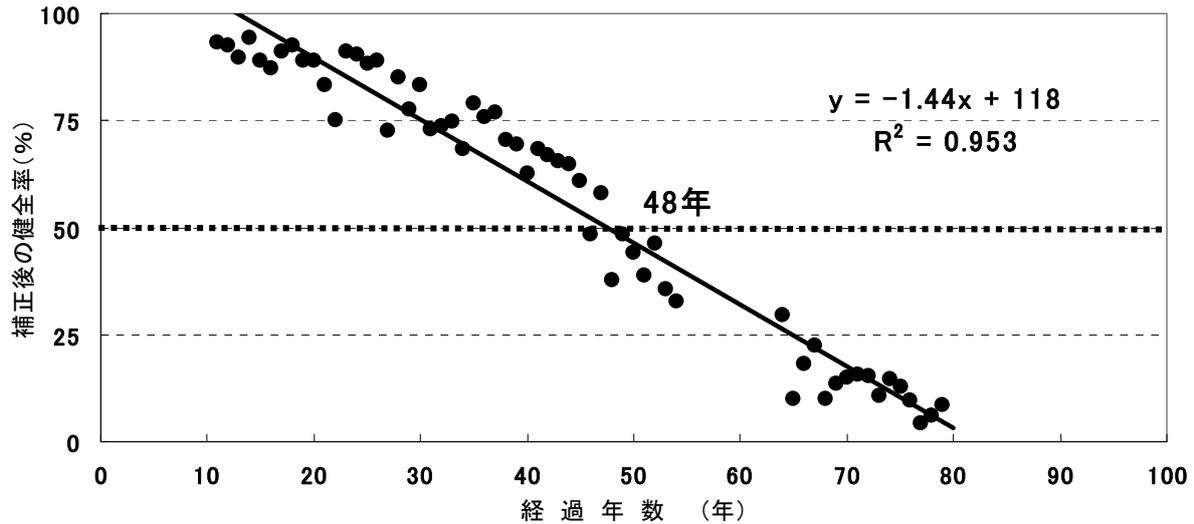


図-19 平均劣化曲線

## 5. 2 事業優先度付けのための不具合リスク評価ツール検討

### 5. 2. 1 不具合リスクの点数計算表の作成<sup>8)</sup>

限られた予算の中で事業を進めていくためには、優先度を見極めて実施することが重要である。不具合リスク点数計算表は、管きよに関するリスクを点数で評価することによって優先度を決定する手法である。この点数計算に関しては、既にオーストラリアで検討が進められている。本研究室では、オーストラリアでの点数計算表を参考にして日本版の点数計算表を作成した。

不具合リスクの評価は、通常、以下の式で定義している。

$$(\text{リスク}) = (\text{不具合の発生確率}) \times (\text{不具合による事故等の影響の大きさ})$$

ここでは、「不具合の発生確率」を「不具合が生じる可能性」、「不具合による事故等の影響の大きさ」を「不具合が生じた時の問題の大きさ」として捉え、それぞれの項目内容を考えた。そして、これらを掛け合わせることによって不具合リスクの評価として考えた。作成方法はワークショップ形式を採用し、各点数計算に関する影響因子をワークショップメンバーが抽出した。その後、カードによるブレーストーミングを実施した。ブレーストーミングした各影響因子は、後日、アンケート調査によって点数を決定した。なお、ワークショップに際しては、平成18年度には大阪市、平成19年度には仙台市の協力を得て実施した。図-20に大阪市でのワークショップ状況、表-2、3に大阪市での作成結果を示す。点数の検証や具体的な活用方法については、平成20年度の研究で検討中である。

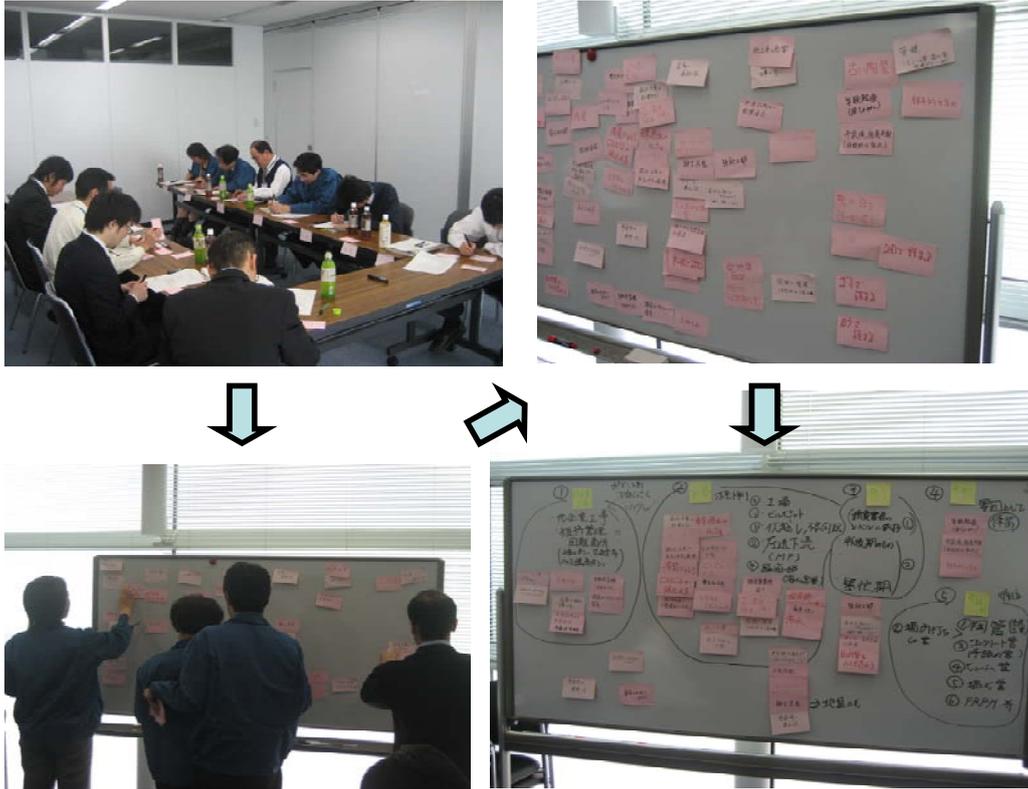


図-20 大阪市ワークショップ状況

表-2 不具合が生じる可能性

要因	影響点数	要因細目	影響点数
水質 (コンクリート管)	4.7	ビルビット排水を受ける	4.1
		圧送管下流	4.6
		伏越、不良勾配、工場排水	3.9
		素焼き陶管	4.1
		コンクリート管 (場所打ち)	3.7
管材料	3.9	コンクリート管 (手詰め管)	4.1
		陶管 (新規格)	3.4
		ヒューム管	2.7
		塩ビ管	1.1
		FRPM等	0.7
地盤	3.6	海面埋立て	3.7
		ため池、水路の埋め立て地	3.9
		盛土	3.1
		地下水が高い	3.1
施工時期	2.4	終戦直後or繁忙期	2.6
維持管理困難箇所	2.1		2.3
他企業工事	2.9	下部掘削	3.6
		離隔がない (下部掘削ではない)	2.4
		繁華街 (油)	3.3
地表の状況	2.3	公園、学校、グラウンド (砂)	2.0
		植樹帯	2.6
		交通量 (幹線道路下)	3.7
荷重	3.0	浅埋 (0.6-1.0m)	4.0
		盛土追加部	3.1
		0-10年	0.6
経過年数	3.0	10-30年	1.4
		30-50年	2.4
		50年-	3.7

表－3 不具合が生じた時の問題の大きさ

要因	影響点数	要因細目	影響点数
交通影響	4.7	軌道下	4.6
		幹線道路下	4.3
		歩行者の多いところ	3.0
復旧時間	3.6	開削での復旧工事の可否	3.6
		河川横断	4.0
		バイパスルートの有無	3.0
下水道サービスの継続性	3.4	人口密集地区（住宅）	4.1
		商店密集地区	3.7
		観光地	2.7
		公的機関への影響が出るところ	2.9
		浸水常襲地域	3.0
		お年寄りが多い地区	2.4
		ターミナル駅	3.6
		幹線	3.7
		送水管（圧送管）	3.7
		排水きよ（放流きよ）	4.3
二次災害	3.4	ガス管近接	3.9
		NTT管近接	2.9
		電線、水道、地下鉄	3.0
		鉄道高架近接	3.0
		高架道路近接、河川構造物近接	3.1
災害時の危機管理	3.1	緊急輸送路	3.9
		避難路	3.3
		防災拠点と避難所を結ぶ管きよ	3.3

## 5. 2. 2 下水管起因の道路陥没によるリスク評価の検討<sup>9)</sup>

### (1) 道路陥没によるリスク評価の考え

近年、下水道の管きよでの大きな問題は、下水管に起因した道路陥没である。本研究室では、本省下水道部と連携して平成19年度から本格的な全国アンケート調査を実施し、詳細実態の把握に努めている。本研究室ではリスク評価のツールという視点から道路陥没に着目し、全国調査結果を用いて検討を進めている。

ここでは、上記で示したリスク式の中から「不具合の発生確率」を「道路陥没の発生頻度」、「不具合による事故等の影響の大きさ」を「道路陥没による社会的影響の大きさ」として捉え、前段の「道路陥没の発生頻度」のみを紹介する。

### (2) 道路陥没に関する全国実態調査の概要

調査は、下水道事業に係わる全国すべての都道府県、政令指定都市及び市町村の中で、平成18年度内に発生した下水管起因の道路陥没を対象とした。表－4に主な実態調査項目、表－5に道路陥没レベルでの規模の定義を示す。

平成18年度内に発生した道路陥没は、全部で4,411件であった。結果の整理に際しては、接続部での不具合の判断が難しいと考えられるため、表－4に示す8つの原因施設を本管関連、取付管関連、人孔（マンホール）関連、柵関連に分類してデータを取りまとめた。図－21に8つの原因施設の位置を示し、以下に8つの原因施設から陥没件数を分類した式を示す。なお、この整理の仕方は原因施設によっては陥没件数を重複計上するということになる。

(本管関連) = (本管) + (本管と人孔の接続部) + (本管と取付管の接続部)  
 (取付管関連) = (取付管) + (本管と取付管の接続部)  
                   + (取付管と人孔の接続部) + (取付管と樹の接続部)  
 (人孔関連) = (人孔) + (本管と人孔の接続部) + (取付管と人孔の接続部)  
 (樹関連) = (樹) + (取付管と樹の接続部)

表-4 道路陥没実態調査の主な項目

調査項目	記入内容または選択肢
発見日時	(記入内容) 当該道路陥没の発見日時(月・日・時)
布設年度	(記入内容) 当該管渠の布設年度(西暦)。
原因施設	道路陥没の原因となった施設。 (選択肢) ①本管、②取付管、③人孔、④樹、⑤本管と人孔の接続部、⑥本管と取付管の接続部、⑦取付管と人孔の接続部、⑧取付管と樹の接続部
陥没レベル	(選択肢) ①Level I ②Level II ③Level III
仮埋め所要時間	(記入内容) 原因施設の調査・修理をする前に、土砂・アスファルトを入れて、通行できるようにする作業(「仮埋め」)に要した概算時間
本復旧工事所要時間	(記入内容) 埋戻し土を掘り返して、原因施設の特定とともに、原因施設を交換する作業(「復旧工事」)に要した概算時間
工事費用	(記入内容) 「仮埋め」及び「復旧工事」の概算合計工事費用(舗装工を含む) 直営工事であるときは直営と記入
通行止め状況	通行止めが発生した場合の対応状況 (選択肢) ①全面、②片側

表-5 道路陥没レベルの定義

Level I	Level II	Level III
管破損なしの場合 陥没幅10cm未満 または 陥没深10cm未満	管破損なしの場合 陥没幅10cm以上かつ 陥没深10cm以上	管が破損している場合 (陥没規模は不問)

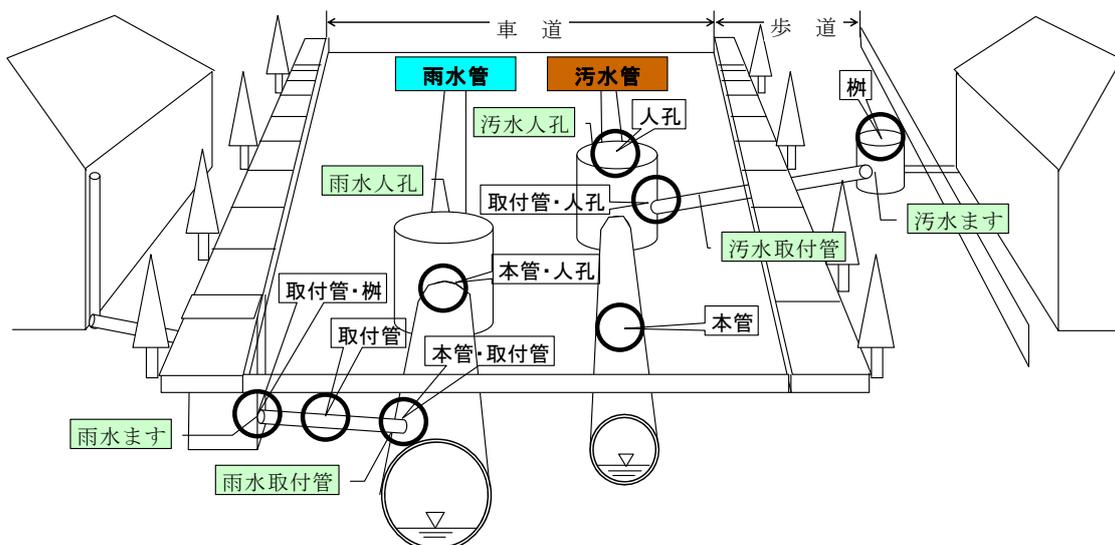


図-21 道路陥没における原因施設の位置

### (3) 道路陥没発生頻度の算出

陥没発生頻度は、本管の経過年数と布設年度に対する管きょ延長データを用い、原因施設ごとの管きょ 100 kmあたりの陥没件数を計算することで求めた。本管布設経過年数は 75 年までに限定した。原因施設ごとの陥没発生頻度を図-22 示す。

それぞれのグラフに着目すると、原因施設ごとの陥没発生頻度は本管の布設経過年数に対し、指数関数の関係にあることが把握できた。また 30 年経過後の近似曲線をみると、原因施設ごとの大きな差異が示されており、特に取付管は、他の原因施設より大きな発生頻度が高い傾向を示した。

この結果、布設経過年数により原因施設ごとの道路陥没発生頻度の予測が可能になることが示唆された。さらに、今後の課題となる「道路陥没による社会的影響の大きさ」と併せることで総合的なリスク評価が可能となり、リスク最小化を考慮した事業優先度視点のストックマネジメント手法が確立できると考えている。

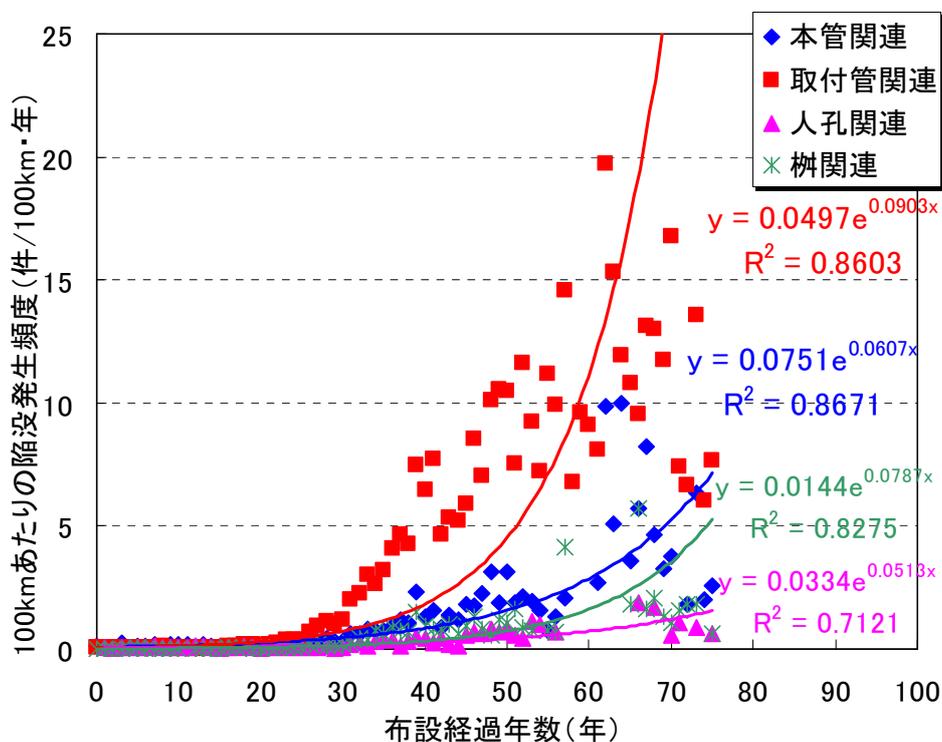


図-22 原因施設ごとの管きょ 100km あたりの陥没発生頻度

## 6. おわりに

本研究室では、財政視点によるストックマネジメントとリスク最小化を考慮した事業優先度視点によるストックマネジメントの検討から調査研究を進めてきた。

その結果、財政視点での取り組みでは、マクロ的な平均劣化曲線が作成できた。事業優先度視点での取り組みでは、不具合リスク点数計算表を作成し、道路陥没の発生頻度式を明らかにした。今後は、管種別の平均劣化曲線の作成により将来事業費予測手法の確立を目指す予定である。また、道路陥没によるリスク評価に関しては、道路陥没による社会的影響の大きさを明らかにし、事業優先度手法の確立も目指す予定である。

下水道事業は、事業費の大部分を住民から徴収される使用料金と税で賄っており、事業推進に際しては一層の説明責任が求められている。また平成19年6月には、「地方財政健全化法」が制定され、各自治体は公営企業会計という面からも事業に関する一層の透明性や効率性が求められている。そのような観点からも、現在、ストックマネジメントの導入が期待されている。

本研究室では、このような実情も考慮に入れて今後の研究課題に取り組む。さらに下水道を管理する自治体とのコミュニケーションを図りながら、現場のニーズに沿った研究を継続し、将来の下水道事業に対して大きな役割を果たしていく所存である。

### 【参考文献】

- 1) 社団法人日本下水道協会：平成20年度下水道白書 日本下水道一循環のみちを拓く展望－，平成20年9月
- 2) 水道産業新聞社：下水道から「循環のみち」へ100年の計 未来を拓く「下水道ビジョン2100」，平成18年8月
- 3) 下水道事業におけるストックマネジメント検討委員会：下水道事業におけるストックマネジメントの基本的な考え方（案），平成20年3月
- 4) 国土交通省都市・地域整備局下水道部ホームページ：下水管路の損傷状況に関する点検等調査（第5回），平成20年7月，<http://www.mlit.go.jp/common/000019599.pdf>
- 5) 社団法人日本下水道協会：平成18年度版下水道統計，平成20年8月
- 6) 国土交通省都市・地域整備局下水道部：下水道長寿命化支援制度に関する手引き（案），平成20年4月
- 7) 松宮洋介・福田康雄他：管渠の劣化曲線に関する調査，第45回下水道研究発表会講演集，日本下水道協会，平成20年6月
- 8) 松宮洋介・岩本誠他：管きよのストックマネジメント方法に関する提案，第44回下水道研究発表会講演集，日本下水道協会，平成19年6月
- 9) 松宮洋介・福田康雄他：下水道管きよ施設に起因する道路陥没特性に関する調査，第45回下水道研究発表会講演集，日本下水道協会，平成20年6月

# 道路構造物の長寿命化と LCC 縮減に向けた取り組み

道路研究部 道路構造物管理研究室長

玉越 隆史

## 道路構造物の長寿命化と LCC 縮減に向けた取り組み

道路構造物管理研究室長 玉越 隆史

### 1. まえがき

近年、橋梁関係者のみならず、道路施設の安全性について意識することなく日常的に利用している多くの人にとって、衝撃的ともいえる深刻な道路橋の事故や不具合の報告が目立つようになってきている。鋼橋に限っても、都心部の橋脚における深刻なき裂損傷、重交通路線の鋼床版におけるデッキを貫通したき裂損傷、都市間の大動脈である幹線道路にある橋の主げたがほぼ断裂するような大きなき裂損傷、トラス橋の斜材の腐食による破断などが挙げられる。国土交通省では、このような安全性に係わる重大な損傷や不具合が明らかになった場合、自ら管理する以外の橋梁に対しても同種の損傷や不具合による事故を未然に防止するために、地方公共団体など他の道路管理者にも必要に応じて様々な形で情報提供と注意喚起を行うとともに全国の実態把握のための情報収集を行っている。その結果、多くの場合、同種の事象が各地で発見され、中には通行止めなどの緊急措置が執られるに至ったものもある。そのような状況のなか、昨年には米国で通勤時間帯で渋滞していた大規模なトラス橋が突然崩落して多数の犠牲者が生じる事故が発生した。事故の原因は本稿執筆時点で未だ明らかにされておらず調査中である。しかし、これまでに本橋に対しては事故に至るまで毎年のように点検が行われ、様々な調査や補修・補強の検討も行われていたこと、また、事故当時も補修工事が行われており、橋の状態についてはかなり詳細に情報が把握されていたものと推測される。

道路は、日々の安全で快適な国民生活や経済活動を支えるとともに、災害時には避難路や物資輸送路などの防災機能をも果たす基幹的交通施設である。現在我が国は、道路橋を長さが 15m 以上のものだけでも約 15 万橋抱えている。これらは毎年着実に高齢化し、例えば現在約 6% の 50 歳以上の比率が 20 年後には約 50% に急増するとも試算される。一旦供用を開始すると道路の一部としての機能は何らかの形で半永久的に維持されることが求められることがほとんどであることを考えると、橋の高齢化は避けられないとしても、その状態を把握して適切に判断し、適切な対策を行って重大な損傷の発生による事故を未然に防止するとともに、老朽化させない対策の確立が急務となっている。

これらの状況を踏まえて国土交通省道路局では、昨年、我が国の道路橋の保全のあり方を議論する有識者会議を発足させ、本年 5 月には、その提言がとりまとめられた。提言書の目次を表-1 に示す。

本稿では、直轄道路橋（国管理の道路橋をいう。以下同じ。）の現状と課題を述べた後、社会資本の管理のあり方に言及した上で、直轄道路橋を中心に現状と課題及び有識者会議提言を踏まえた予防保全への取組状況と今後の方向を概観する。

表-1 有識者会議提言<sup>1)</sup>

道路橋の予防保全に向けた提言	
平成20年5月16日 有識者会議	
1. 点検の制度化	～すべての道路橋で点検を実施～
2. 点検及び診断の信頼性確保	～技術基準、資格制度、人材育成を充実～
3. 技術開発の推進	～信頼性を高め、負担（労力、コスト）を軽減する 技術開発を推進～
4. 技術拠点の整備	～損傷事例の集積と発信、高度な専門技術者の育成～
5. データベースの構築と活用	～効率的な維持管理とマネジメントサイクルの確立～

## 2. 直轄道路橋等の現状と課題

直轄道路橋は約2万橋、橋長15m以上に限っても約1.1万橋があり、これら橋梁に対しては定期的に比較的詳細な点検が実施されている。定期点検結果による橋梁に発生している損傷の状況を、建設年（年齢）毎に比較したものを図-1に示す。橋の劣化特性は構造や架橋環境にも左右されることからそのばらつきが非常に大きく、個々の橋の劣化や損傷の程度と経年の関係は

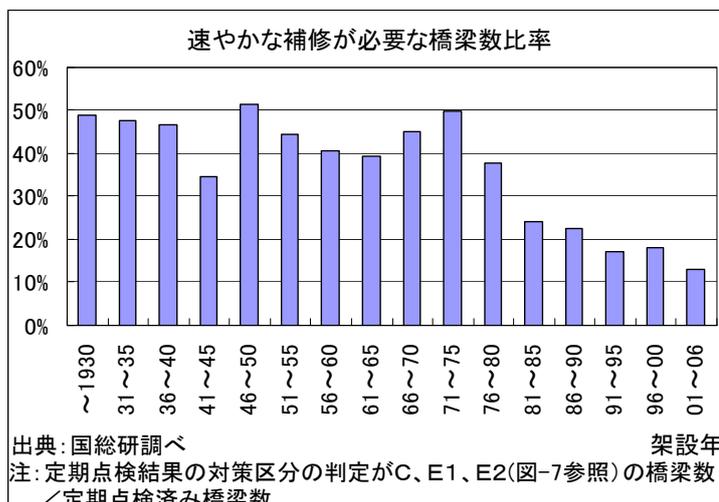


図-1 架設年（年齢）別の補修が必要な橋梁数比率

それぞれ大きく異なると考えられるにも拘わらず、全体としては経年に従って異常の現れる率が增大する傾向が顕著である。

国では、耐久性に関する信頼性の向上やライフサイクルコストの低減など新設される道路橋の設計基準等への反映や、地域や構造特性に応じた合理的な点検、補修・補強等の維持管理手法の実現を目的とした既設橋に関する調査の一環として、昭和52年以降、概ね10年毎に橋長15m以上都道府県道以上を対象として既設橋の架替実態に関する調査を実施してきている<sup>3)~6)</sup>。図-2に過去4回の調査毎の架替理由構成比を、図-3に平成18年度調査における上部工の損傷による架替理由を示す。架替理由の約8割は陳腐化（機能上の問題及び改良工事）であるものの、主たる原因が損傷であるとされた架替が全体の約2割にも達することは着目すべき実態である。上部工の損傷としては、鋼橋では鋼材の腐食と床版の破損で約8割を占め、コンクリート系橋では桁の亀裂・剥離が大半を占め、PC橋においてはなかでも塩害を原因とするものが顕著である。

このように、これまで構築してきた膨大な数の道路橋では、経年に伴って徐々に損傷や劣化や変状を生じるに至るものの数が増える傾向にあること、その結果、陳腐化などの社会的ニーズの変化に伴うもの以外に、損傷に対して更新することで性能回復を図ることが合理的と判断されるものも増える傾向にあることが推測される。定期的な目視点検が比較的きちんと行われている直轄道路橋ですら更新を余儀なくされる状態までに劣化や損傷が進行してしまう事例が相当数になることから、

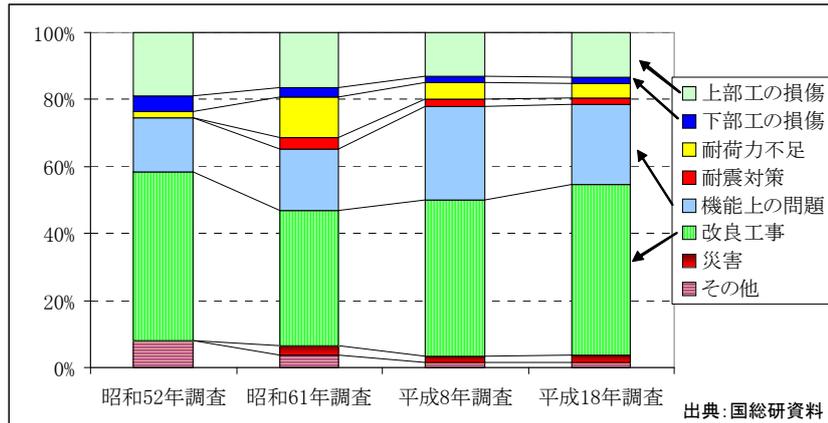


図-2 道路橋の架替理由構成比 (3), 4), 5), 6)

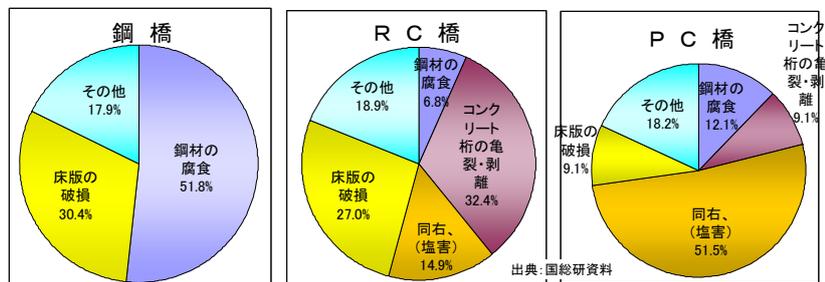


図-3 上部工の損傷による架替理由 (H18調査) (6)

更新を余儀なくされる状態までに劣化や損傷が進行してしまう事例が相当数になることから、コンクリート内部への塩分の浸透による塩害など外観目視点検だけでは適切に劣化程度を把握できない事例への対策が課題であること、あるいは変状を認識して膨大な資産を鳥瞰して対策の必要性の評価やその優先度付けを行ったり、必要となる対策を必ずしも適当なタイミングで確実に実施できていないことも伺わせる。

このようなことから、現在既に膨大な量となっている道路構造物を限られた予算と人員で適切に維持していくためには、従来行われてきた対症的な維持管理を脱し、データに基づく計画的な予防保全を行うなどによってライフサイクルコストを低減する合理的なメンテナスマネジメントの確立が急務となつてことを示唆していると考えられる。従来の対症的なものは、損傷が発見される都度、当該損傷の重大性等を判断根拠として行う対策であり、このような手法では顕在化した時には既に有効な補修・補強策による性能の回復が困難な状態になっている事態もある程度避けられないなど、長寿命化のための対策機会の減少などライフサイクルコストを合理的に低減することが困難である。一方、データに基づく計画的な予防保全とは、損傷を発見した後、当該損傷の劣化予測等を行い、さらに対策時期と対策方法を想定して、最もライフサイクルコストが小さくできるように対策を行おうとするものである。例えば塩害等の着実に進行する劣化型の損傷のなかには、損傷が顕著になった時点では既にその進行を防止したり部材の耐荷力などの性能を回復するには手遅れの状態となる場合もある。これら損傷に対しては損傷が発生する前に損傷の要因や進行度に関連する情報（塩害の場合にはコンクリート中の塩分量など）を適時把握

して、ライフサイクルコスト最小化の観点から最も適切と考えられる時期に、例えばその時点ではまだ所要の性能が確保されていたり外観的な変状は軽易であったとしても、必要な対策を実施することが可能であれば、長寿命化とライフサイクルコストの減少に有効である。さらに、このような既設橋梁から得られる様々な知見を活用して、今後新たに建設する構造物の耐久性向上を図ることは、将来の維持管理コスト全体の抑制に大きく貢献するものと考えられる。そのためにも、長寿命化や予防保全として行った対策の効果や既設橋の劣化特性に関する調査や分析を行うこともアセットマネジメントの一環として重要である。

この維持管理体系をいわゆるP D C Aサイクルに当てはめて表現すると、図-4のように整理することが可能であると思われる。すなわち、Plan は計画（意思決定）、Do は措置（補修・補強等）、Check は点検・診断、Action は状態評価である。なお、維持管理サイクルの場合、Action としては単に維持管理計画の策定などの意思決定だけではなく、維持管理で得られた知見を今後構築していく新設橋をより耐久性が高く長寿命化しライフサイクルコストの低減が図れるものへと改善していくものに活かすというフィードバックも生じる。

しかし、昨年9月に道路局が実施した地方公共団体へのアンケート調査で約8割の市区町村で橋梁定期点検を実施していない実態が明らかとなっている<sup>2)</sup>ことや、劣化や損傷を理由として更新を余儀なくされる橋梁が少なからず存在すること、さらには定期点検や緊急調査を行う度に安全性に係わる重大な損傷を既に有している橋が確実に見つかってい

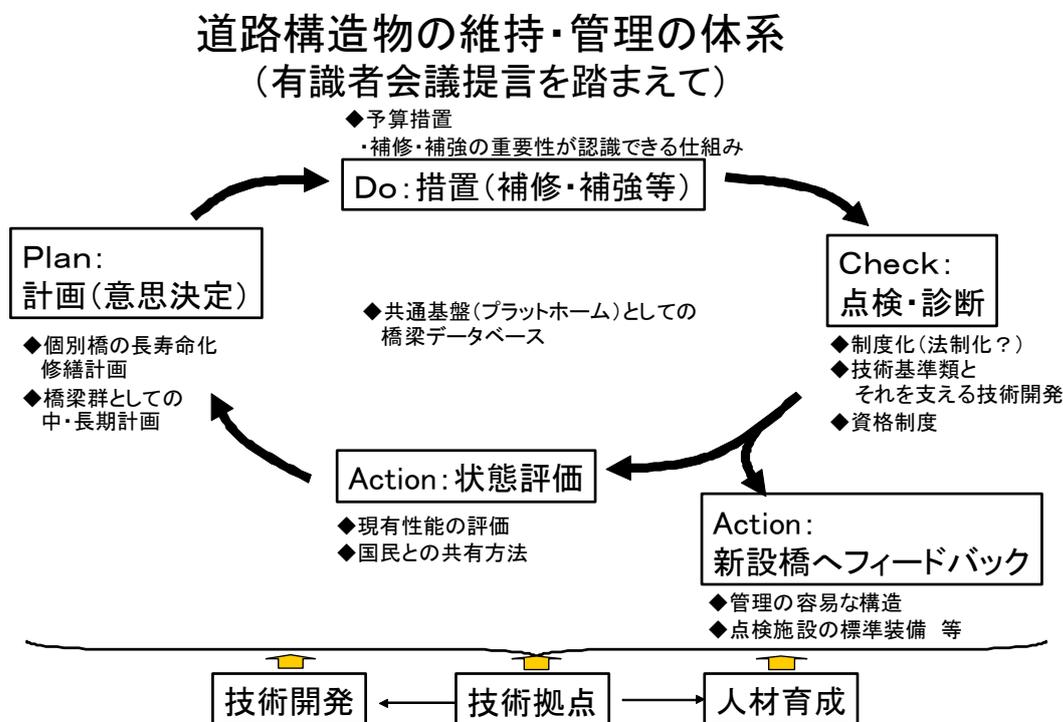


図-4 道路構造物の維持・管理の体系

る実態などを考慮すると、この維持管理サイクルが適正に機能するために解決すべき以下のような極めて基本的な問題点が浮かび上がってくる。

- ①見るべきものが見られていない
- ②見ても分からない
- ③先のことが十分に考えられない
- ④適切な治療が受けられない
- ⑤やるべきことの全てが十分にはできていない

①と②は点検等による橋の状態に関する情報の取得とその評価、③はその結果を踏まえての将来予測、④は診断とそれに基づく補修・補強などの適切な処方決定、⑤は緊急性や予防保全などの観点からライフサイクルコストの最小化に資する適切な予算措置や必要な補修・補強等の維持管理行為の実行である。

本稿では、これらのうち適正な維持管理サイクルが機能するための全ての基本となる点検、その点検結果を用いた状態評価及び維持管理の高度化に向けた技術開発について、現在国総研で行っている取り組みと今後の方向を中心に紹介する。

### 3. 社会資本の管理のあり方

社会資本は、道路・港湾・上下水道・公園・公営住宅・病院・学校等、産業や生活の基盤となる公益施設であり、国民福祉の向上と国民経済の発展に必要な不可欠な施設である。例えば、道路法第1条では「もって交通の発展に寄与し、公共の福祉を増進することを目的とする」となっている。

これら社会資本のほとんどは、一般の用に供されるとほとんどの場合にはそれらが正常に機能することを前提として社会経済活動が営まれることとなる。公園などのように必ずしも常時その機能が維持される必要性がないものも例外的には存在する。しかし、少なくとも道路や上下水道などのいわゆるライフライン施設ともいえる社会資本では、地震直後や台風時等の異常時に点検等のため一時的に通行止めなどの使用停止状態にすることはあっても、平常時にその機能が停止したり制限される事態は極力避けられなければならない。また、地震等の災害に対してもできるだけ機能障害の程度は軽減されるべきであり、早期に復旧が行われることが求められる。

なお、ここでいう機能が維持されている状態とは、一定水準以上の信頼性をもってその機能（性能）が確実に発揮され得る状態であることを意味している。道路橋の場合であれば、日常的に繰り返される温度や自動車の通行による影響、様々な要因による材料的な劣化などによってその性能状態は絶えず変化（基本的には低下）することが避けられない。そのなかで、例えば突発的な地震等の外力に対しては、国民と合意したレベルとして設計基準等で実現しようとした確実な性能の発揮が求められる。いくら高齢化していてもその橋の位置する道路の利用者が個々の橋の安全性に疑問を持ちながら利用することはあってはならず、国民の共通認識として許容される信頼性をもって確実に地震等の外力に対する抵抗を示すことができることが必要なのである。

一方、道路橋をはじめとする社会資本では、求められる性能とそれが発揮される確実性

の程度について、それを明確に定義することは一般に困難である。また、要求性能が仮に明確に示されたとしても、既設の構造物がどの程度の性能を有しているのかについては、劣化や損傷の有無とその程度、設計と実構造物の挙動の乖離、材料特性など非常に多くの要因が関連するためこれを証明することは極めて困難であるという実態がある。そのため、社会資本に求められる性能や供用状態でそれが満足されていることについて、例えばどのような方法で整備され維持管理されているのかなどの方法を定めて、これが行われることでもって必要な水準で保証されているとする方法などもとられている。

#### 4. 直轄道路橋における予防保全への取組状況と今後の方向

##### 4. 1 概要

本章では、直轄道路橋を例として、社会資本に対してそれらに求められる性能を定義し、維持管理段階でそれを国民に保証するための方策としての法制度や社会システムなどの現状と課題を展望した後、国総研における研究の重要かつ代表事例として、維持管理の根幹となる点検体系、現有性能の評価及び技術開発に関する取組状況と今後の方向を概説する。

##### 4. 2 道路に係る法体系

道路に関する法律である道路法（昭和 27 年法律第 180 号）には、路線の指定及び認定、管理、構造、保全、費用負担区分等に関する事項が定められている。

道路管理者は、国、地方公共団体、高速道路会社その他と区分される。なお、連邦制をとる米国では最上位の行政組織（連邦）が自ら管理する道路をほとんど持たないのに比べて、我が国では国自らが非常に多くの道路を管理する管理者であることが特徴として挙げられる。また、現在民営化されている旧道路 4 公団の民営化前はほぼ全ての道路管理者が公務員を主体とする公的機関であったが、現在は有料の高速道路のほとんどが民間株式会社によって管理されている。

法律である道路法には、「道路を常時良好な状態に保つように維持し、修繕し、もって一般交通に支障を及ぼさないように努めなければならない」とされている。しかし、具体的に何をもって良好な状態であるのかは明示されていない。このため、道路の管理状態については、それぞれの道路管理者がどのような管理を行うのかによって自ずと差が生じてくること、ある程度避けられない。しかし、利用者にとっては国内の道路網として路線毎の管理者を意識することなく様々な目的で利用していることから、安全性などの性能の水準が異なっているとは考えてはならず、またそれが大きく異なることは許容もされていないのではないかと考えられる。

道路に橋を新設する場合の構造等の技術的事項については、道路法第 30 条に「道路の構造の技術的基準は、（略）政令で定める」と規定され、それに基づく政令（道路構造令）及び省令（道路構造令施行規則）が定められており、ある程度要求される性能についての考え方は示されている。しかし、具体的な安全率や性能の水準の詳細までは定められておらず、個々の道路管理者がその趣旨を解釈して実構造物に反映することとなる。国に

においては「橋、高架の道路等の技術基準」（いわゆる道路橋示方書）により具体的な設計外力や許容値、設計手法などを定め、これを道路局長、都市・地域整備局長からの通達として組織内で統一した運用を行っている（図-5 参照）。この通達は、その位置付けが国土交通省の組織内の規定にとどまるため、本来的に国以外の管理者には強制力は持たない。しかし、道路構造令等の法令の解釈基準として国が採用しているものであり、地方公共団体などの他の管理者が他に独自で代替の技術基準を整備することは困難でもあり、国内のほぼ全ての道路橋には同じ基準が適用されている。

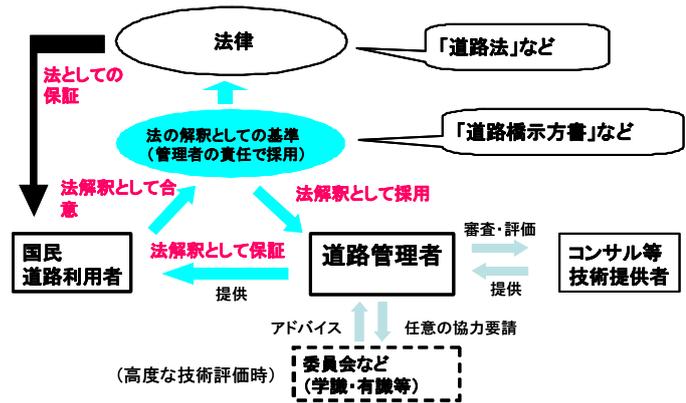


図-5 道路橋（直轄）技術基準の体系

また、設計基準以外に、実際の建設工事に対しては施工者の資格等が建設業法に規定されているなど、ある程度その品質水準が法制度として明確にされている。

一方、保全に関しては、道路法第 42 条に「道路を常時良好な状態に保つように維持し、修繕し、もって一般交通に支障を及ぼさないように努めなければならない」とされているほか、「維持又は修繕に関する技術的基準その他必要な事項は、政令で定める」とされている。しかし、政令は現在まで未制定であり、各管理者がその責任において道路法の趣旨を満たすべく対応しているものと理解できる。

新設に対しては、先に述べたように具備すべき性能を外力条件や材料の許容値等で具体的に定めることで、ある水準以上の性能を有する構造物を実現することは比較的容易である。すなわち、完成した構造物に対してそれが実際に求める性能を具備していることを厳密に証明することは困難であるものの、一定の設計法や許容値等を定め、これらの手法によった場合には必要な性能が満足される構造物が実現しているものとみなすと解釈することで、少なくともある基準に従って同じ程度の性能を有する構造物を確実に実現することは可能である。

一方、一旦供用を開始すると、橋の状態は温度や自動車の通行による影響、材料的な劣化などによって絶えず変化させられることとなる。また、実際の橋では、例えば設計で考慮しない部材にも応力が負担されるなど設計の仮定と実構造物の挙動には少なからず乖離がある。このため、様々な作用等の影響の履歴もある複雑な橋が実際にどの程度の性能を有しているのかを特定することは、その手法も確立されておらず極めて困難である。さらに、橋の性能に係わる部材の劣化や損傷の状態や程度は極めて多岐にわたり、その影響も橋の構造や特性によって千差万別であることから、維持管理段階の橋の性能を特定するために必要な構造物の情報の内容、程度、それらを取得する方法、さらにはそれらの結果の解釈の方法についても、これを一概に定めることは困難である。

このことが、現在までに道路橋に関して法令や技術基準等で維持管理の水準として、

具体的な性能照査の手法や点検手法やその結果の評価方法などを定めることができていない一つの要因であると考えられる。

表-2 に、我が国の道路以外の主な社会資本管理の法等の制度を示す。港湾や鉄道では「点検を実施しなければならない」ことを、空港では管理の適正実施の確認のため国土交通大臣が年2回以内で定期検査すべきことを定めている。建築では、不特定多数が利用する等の特殊建築では有資格者による概ね3年以内の定期調査が法定化されている。

すなわち、定期的な状態の把握やそれらに従事する技術者の資格要件や結果報告義務等を定めることで、維持管理の品質を一定水準以上に確保させようとしているものと理解できる。しかし、点検で得られた結果をどう解釈するのかなど、維持管理段階の構造物そのものの具体的な性能評価の方法までは定められていない。

道路橋の場合には、先に述べたように維持管理段階における橋の性能の評価基準のみならず、点検頻度や従事技術者の資格などについても現在のところ法令等で定められたものではなく、表-3 に示すように、通常は道路管理者（国、都道府県、市町村、高速道路会社等）毎に組織として要領等を定めて点検や評価が行われる。そのため、その実施内容や達成水準、結果に対する対処の考え方などは同じではない。また、前述のとおり市区町村の約8割では定期的な点検が行われていないという調査結果もあり、維持管理レベルには極めて大きな差異が生じているのが実態である。

道路橋でも、米国など海外には点検頻度や従事者の資格、結果評価の方法等の法定化事例はあり、国民が将来まで安心して全国の道路を利用できるためには、管理者の別なく最

表-2 社会資本施設の維持管理に関する法体系

	港湾	鉄道	空港	建築
法	・ 省令で定める技術基準に適合するよう維持すること	・ 建設は、省令で定める技術基準によること	・ 管理は、省令で定める技術基準によること ・ 臣が政令による検査を行うこと	・ 省令で定める技術基準により、資格者による定期調査を行うこと
政令	・ 技術基準対象施設を規定		・ 大臣が行う検査は、毎年2回以内	・ 定期調査対象施設を規定
省令	・ 維持管理計画を定めること ・ 点検、診断を行うこと ・ その他告示で定める	・ 実施基準を定めること ・ 定期検査を行うこと ・ 告示に従うこと	・ 保安上の基準を規定	・ 定期報告は概ね6月から3年の間隔 ・ 有資格者を規定
告示	・ 維持管理計画に定める標準的事項を規定	・ 定期検査の周期を規定（橋梁は2年以内）		

表-3 定期点検の比較<sup>2)</sup>

	直轄国道	高速道路3社	東京都	米国	英国	仏国
点検頻度	5年毎	5年毎	5年毎	2年毎	6年毎	3年毎／6年毎
点検方法	近接目視	近接目視・打音	近接目視	近接目視	近接目視	近接目視
点検範囲	全部材	全部材	全部材	全部材	全部材	全部材
点検者の資格要件	実務経験等	実務経験等	実務経験等	法で規定	交通省基準で規定	3年毎：なし 6年毎：面接合格者
損傷程度の評価	部材の最小要素毎、損傷毎に、5段階	部材の最小要素毎、損傷毎に、5区分と第三者被害の恐れ	部材の最小要素毎、損傷毎に、5段階	部材毎、損傷毎に3段階＋定量値（延長等）	部材毎、損傷毎に、範囲（4段階）、重大度（4段階）、対策（7区分）、優先度（3区分）	部材毎、損傷毎に5区分
健全度の評価	構造上の部材毎、損傷毎に、7区分		径間毎に、5段階	床版、上部構造、下部構造、水路、カルバート毎に、10段階		

低限行われるべき橋の維持管理手法や内容について確立し、それらが確実に実施されるような施策の検討が必要と考えられる。

また、道路橋のように利用者をはじめ一般の国民にとって劣化による機能障害や性能の低下が体感しにくく日常生活の中でそれらを意識することがない社会資本の場合、その性能の維持のための管理行為やそれにかかる費用の必要性やその程度や内容の妥当性について、適正な評価をすることは容易ではない。仮に必要な情報を得ようとしても、先に述べたように、少なくとも道路橋の場合には損傷や劣化の状態に関する情報すら管理者によっては十分に把握されておらず、維持管理状態を理解するための情報も国民にわかりやすい形で示されているとはいえない。例えば、欧米諸国には道路橋はじめ様々な社会資本の状態を点数あるいは数段階にランク付けし、地図上に図示するなどによって結果を公開している例もある。しかし、我が国の道路橋では、緊急輸送道路における耐震補強プログラムの達成状況や達成見込みをホームページで公開するなどの例はあるものの、その取り組みは限定的である。社会資本や地域の安全性などに係わる情報について一般に広く公表することは、指標等の信頼性やそれらの情報がどのように解釈され、また社会経済活動等にどのように影響を及ぼすのかについて不確実な要因もあることなどから、これまで慎重な対応がなされてきたものと考えられる。しかし、近年、災害等に関する各種のハザードマップが作成され公表されてきているように、国民の意識や社会のニーズは時代とともに変化する。道路橋の維持管理に関しても、時代のニーズに合わせて、国民に十分な情報が共有されるような取り組みについて積極的に検討を行っていく必要がある。

#### 4. 3 道路橋の点検体系

橋に限らず構造物の維持管理では、その状態に関する最新の情報を把握することがまず第一に重要であり、点検によってこれが行われる。また、通常、点検には損傷の有無やその程度などの現状に関する客観的事実としてのデータの取得以外に、それらを基にした橋などの対象物の機能状態などの性能や健全性についての一次的な評価を行うことを含める場合が多い（図-6 参照）。

道路橋は、日常的な交通荷重や温度の履歴以外にも、風雨、地震などの自然外力や塩分、二酸化炭素等の作用による劣化、火災等の突発的作用など様々な要因でその状態は変化する。このため、橋の状態を定義するために必要な情報の取得は、着目する事象や構造物の特性に応じた頻度、時期、手段によって行われることが合理的である。

例えば路上の落下物や舗装のはがれ、路面段差の発生などは、絶えることのない交通の走行安全性に係わるためできるだけ高頻度に把握して速やかに取り除くなどの対処が行われるべきである。一方、環境作用の影響で徐々に進行する塗装の劣化などは、

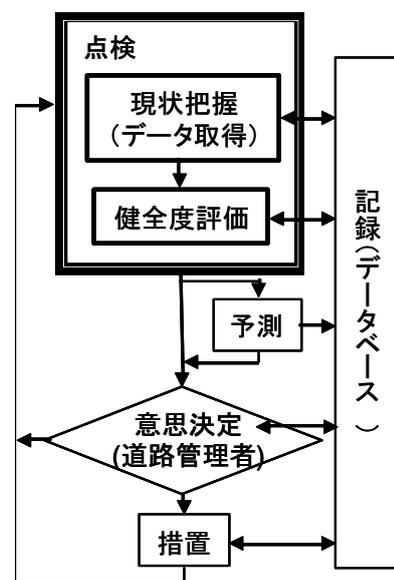


図-6 維持・管理のフロー

その変化速度は遅く数年に一度の把握でも十分である。また、地震等の事前に予測することが困難で突発的な作用に起因する変状に対しては、固定的な頻度での点検ではなく事由の発生後できるだけ速やかに点検を行い、供用性の判断や復旧方法の検討に必要な情報を得ることが求められる。さらに、コンクリート内部への塩分浸透の程度や、鋼部材の塗膜下などに発生する疲労き裂の発見、水中部で進行する洗掘など通常の外観目視だけでは検出が困難な事象に対しては、専門的知識のある技術者による非破壊検査技術などを駆使した点検を別途行うことも必要である。

表-4 に直轄道路橋に対する現在の点検体系を、表-5 に米国道路橋の点検体系を示す。両者とも損傷状況や機能状態を主として目視によって網羅的に調査する定期点検を核として、疲労等の特定事象に着目した点検、地震等発災時点検、洗掘など特定条件に対応した点検など、複数の点検体系を同じ橋に対して組み合わせて実施している。

日本と比較して米国の特徴の一つは、特定の部材の損傷が橋全体に深刻な悪影響を及ぼすような場合には、その橋梁を「Fracture Critical Bridge」として一般の橋と区別し、特別な詳細点検を実施することを義務付けていることが挙げられる。例えば、平成19年にミネソタ州で突如崩壊した鋼上路トラス橋は、橋全体が極めて短時間に全て崩落してしまうという破壊形態を呈した。この橋がまさに「Fracture Critical Bridge」であった。複雑に部材が組み合わされた道路橋にあつては、人為的、計画的に破壊されたのであれば多数の部材が同時に破壊することは考え難く、その構造的特徴によっては一部の部材の破壊によって橋全体が一瞬にして崩壊し得ることが証明された事故であった可能性がある。そして、そのような橋梁について特に重点的に詳細な点検を課すという考え方には一定の合理性もあるものと考えられ、構造の特徴や着目する事象などの条件に応じて点検手法や内容を差別化する考え方は、点検の合理化・高度化の面から参考となる。

表-4 直轄道路橋の点検体系<sup>7)</sup>

通常点検	通常点検とは、損傷の早期発見を図るために、道路の通常巡回として実施するもので、道路パトロールカー内からの目視を主体とした点検をいう。
定期点検	定期点検とは、橋梁の損傷状況を把握し損傷の判定を行うために、頻度を定めて定期的を実施するもので、近接目視を基本としながら目的に応じて必要な点検機械・器具を用いて実施する詳細な点検をいう。
中間点検	中間点検とは、定期点検を補うために、定期点検の中間年に実施するもので、既設の点検設備や路上・路下からの目視を基本とした点検をいう。
特定点検	特定点検とは、塩害等の特定の事象を対象に、予め頻度を定めて実施する点検をいう。
異常時点検	異常時点検とは、地震、台風、集中豪雨、豪雪等の災害や大きな事故が発生した場合、橋梁に予期していなかった異常が発見された場合などに行う点検をいう。
詳細調査	詳細調査とは、補修等の必要性の判定や補修等の方法を決定するに際して、損傷原因や損傷の程度をより詳細に把握するために実施する調査をいう。
追跡調査	追跡調査とは、詳細調査などにより把握した損傷に対してその進行状況を把握するために、損傷に応じて頻度を定めて継続的に実施する調査をいう。

なお、米国では点検従事者に対する法的資格制度があり、点検品質の確保が図られている。先に述べたように、橋に近接して詳細な状態を把握する点検の中で、単に損傷の有無などのデータ取得が行われるだけでなく一次的な性能評価などの診断行為まで行われることを考えると、我が国においても点検に従事する技術者で、特に診断に関与する者に対して資格要件を定めるなど、点検の品質確保策を講じることについても検討の余地があるものと考えられる。

点検で把握される損傷や劣化などの客観的事実としてのデータは、損傷の原因推定や現在の性能評価に不可欠である以外に、継続的に把握することで将来予測や傾向分析等にも活用される。統計処理や定量的予測に用いるには、点検者の主観などに左右されず、経年的にも相対比較が可能な統一的基準に基づく客観的データであることも重要となる。

一方、橋の機能状態などの一次診断は、必ずしも全ての橋の状態を実際に確認することも、損傷等の事実関係から橋の性能への影響を適切に判断するだけの専門的な技術力をもたない管理者にとっては、通行規制や補修・補強等の措置に関する適切な意思決定を行うための行動を起こすために極めて重要な意味を持つ。すなわち、個々の損傷の種類や進行程度などの事実以外に、損傷が橋の機能状態に及ぼしている影響やそれを踏まえて実施すべき対応の考え方に関わる所見を得てはじめて、管理者はさらなる詳細調査を行うなどの対応をとることが可能となるのであり、一次診断で問題がないとされた場合、必ずしも専門的知見を有さない管理者にとって、その結果に疑いを持つことは極めて困難である。

例えば、鋼部材の疲労き裂は発見時には小さくとも部位によっては急速に進展して橋が危険な状態になることもある。このように多岐にわたる道路橋の劣化損傷とその影響に対して適正な対策等の措置がなされるには、専門的知見を有する技術者が適切な一次診断を

表-5 米国道路橋の点検体系<sup>2)</sup>

点検の種類	点検内容
初期点検 Initial (Inventory) Inspection	橋梁に関する最初の点検であり、全ての構造台帳と評価 (Structure Inventory & Appraisal) データ及びその他の関係データを提供するとともに、基本の構造状態を確認するための橋梁ファイルの一部となる。
定期点検 Routine (Periodic) Inspection	定期的に予定された点検であり、橋梁の物理的及び機能的状態を判断するとともに、初期の状態又は以前に記録された状態からの変化を確認し、構造物が目下の供用要件を引き続き満たしていることを保証するのに必要な観察と測定から成る。 (通常、24月を超えない間隔での点検が必要)
水面下点検 Underwater Inspection	水面下にあり、目視での点検ができず、一般的に潜水やその他の方法が必要な橋梁構造物及び周辺水路の水面下部分の点検。 (通常、60月を超えない間隔での点検が必要とされており、定期点検の一種)
破壊危険部材点検 Fracture Critical Member Inspection	破損危険部材の近接点検であり、目視点検又は非破壊検査を含む。 (24月を超えない間隔での点検が必要とされており、定期点検の一種)
損傷点検 Damage Inspection	環境要因や人的行為による構造的損傷を評価する予定外の点検。
詳細点検 In-Depth Inspection	水面下又は水面上の部材のクローズアップ点検であり、定期点検の方法では検知が困難な欠陥を確認するためのもの。場所により、近接点検が必要な場合もある。
特別点検 Special (Interim) Inspection	橋梁管理者の裁量で予定される点検であり、ある種の判明した欠陥や疑われる欠陥をモニターするために行われる。

行い管理者にどのような対応をすべきかについて適切な提案を行うことが不可欠かつ極めて重要である。このような考え方から、国土交通省道路局が直轄道路橋に対する現在の定期点検要領を策定するに際して、国総研では既往の点検結果とその活用に関する課題などの分析を行い、損傷の大きさなどの客観的事実を「損傷程度の評価」として記録すると同時に、適当な技術者によって橋や構造の機能状態に関する一次的診断として「対策区分の判定」の評価を行うべきことを、さらにその評価体系は既往の点検データが無駄にならないよう新旧対応がとれることに配慮すべきことを提案した。図-7 に評価体系の改訂内容を示す。これにより、現在、直轄道路橋については、昭和 63 年の旧要領にもとづく点検データを新たに定めた新点検要領の評価体系に置き換えたデータと、平成 16 年度から新点検要領に基づいて取得されつつあるデータが、比較・分析可能な形でデータベースに蓄積されつつある。

点検データの取得単位については、今後点検の合理化の検討等に用いる基礎データともなるため、現在のところできるだけ細分化したものとなっている。すなわち、客観的事実としての損傷の程度についてのデータは、原則全部材を対象とし、一つの部材をその構造に応じて更に細分化した小さな要素単位で評価している。一方、健全性などの一次評価である対策区分の判定は、部材や橋の機能等の状態を評価する性質上、部材単位以上に細分化することは適切でない。一方、複数の部材を組み合わせた大きな構造単位や橋全体の機能状態を外観目視に頼る定期点検で得られている情報だけから総括することは、信頼性の点で問題があることが既往の点検結果の再評価によって明らかであった。そのための機能状態等の性能との関わりにおける対策等についての定性的評価による管理者への助言としての対策区分の判定では、主桁や橋脚といった部材単位での評価を行うことを基本とした。

点検に関する他機関の評価方法の例を表-3 に示した。直轄道路橋と同様に、損傷状況以外に橋の機能等の観点からの評価は東京都や米国など内外の機関で例がある。ただし、直轄道路橋のような技術者の知見に基づく総合的・定性的な評価ではなく、損傷等のデー

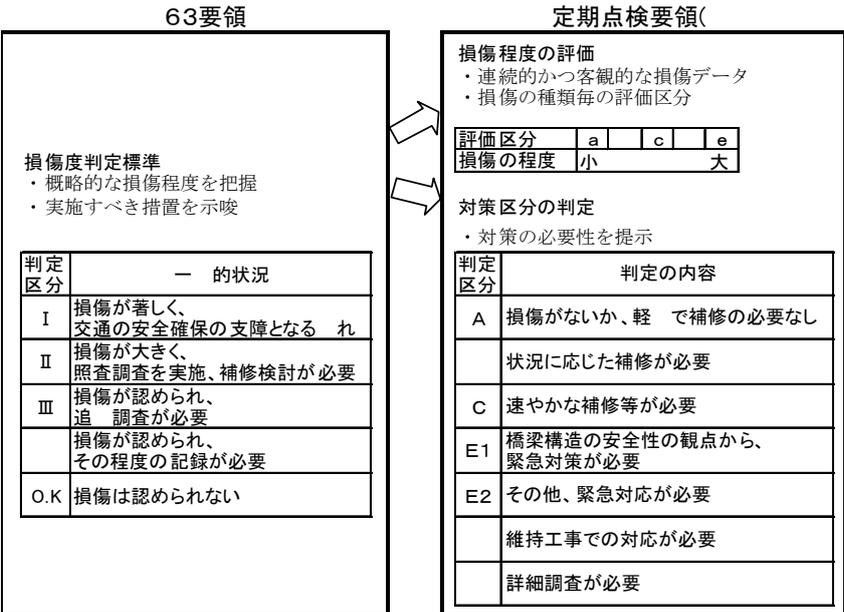


図-7 損傷の評価体系の改訂内容 <sup>8), 9)</sup>

タを数値化して一定のルールで算出する点数で健全度評価点を付ける例であるなど、橋の総合的な性能や機能状態を評価できる方法は確立していない。また、多くの地方公共団体等で、直轄道路橋の旧要領と同様に損傷程度の評価と機能や性能の観点からの評価が混在した定義で一本化された評価を行っている事例も多い。現時点ではデータも少なく各機関の評価方法の優劣は一概に言えないものの、構造的特徴や架橋環境、外力履歴など様々な条件で異なる個々の既設橋の機能状態や性能を定形のマニュアル等で機械的に診断することは、評価の信頼性の面では懸念がある。国総研では現在も点検結果の分析を継続的に行っており、今後も引き続き評価方法の改善を図っていく予定である。

以上のように、点検の中でも診断の性格を持つ部分は、その品質が従事技術者の質に大きく依存することとなる。海外では米国のように点検技術者の資格要件を法等で定める例もあるものの、診断に必要となる道路橋の設計・施工から各種材料、劣化現象、検査技術などの広範な知識と経験を的確に規定することは容易ではない。維持管理に関する諸制度の検討や基準化の際には、点検内容や方法のみならずその品質に支配的影響を及ぼす従事技術者に求めるべき要件や条件についても明確にして適切な形で反映しなければ、維持管理の品質が保証されないことにもなりかねないことを念頭におく必要がある。また、近接目視を主体とする点検結果のみからの判断には自ずと限界もある。これらを補完する方策、例えば非破壊検査の活用や事象によってはより高度な専門技術者による技術支援を組み合わせて行うなども検討する必要があるものと考えられる。

直轄道路橋では平成 16 年に定期点検要領を見直した際に、先述のように定期点検における評価体系を 2 分化した以外にもいくつかの変更が行われている。

第一は、初回点検の導入である。これは、既往点検結果などから、いわゆる施工品質に起因する塗膜のふくれやはがれなどの不具合、導排水経路や防水措置の不備による漏水や滞水、コンクリート部材の初期ひび割れなど、実際の架橋条件で数年供用した段階で現れる変状の多くは、早期に対策することで容易に是正でき、ライフサイクルコストの低減に効果が大きいことを考慮したものである。これは、より早期に対策を講じることで長寿命化とライフサイクルコストの低減を実現する維持管理方法である一種の予防保全でもある。なお、初回点検結果は、設計・施工の記録とともに供用期間中の補修や補強などの様々な維持管理行為の際に、当該橋の初期値としても重要な意味を持つことが多い。

第二は、点検頻度を 10 年毎から 5 年毎へと倍増した。これも、既往の点検結果や事故・不具合等の調査を参考に決定したものである。我が国における道路橋の劣化に関するデータが十分でなかった時には、10 年に一度の定期点検でも適切な維持管理が可能と考えていた。しかし、データは限られていたものの、補修後に再劣化を生じた実績、疲労や塩害など経年で変化する劣化や損傷の進行度に関する知見からは、より短い間隔での定期点検が不可欠であると考えられた。ただし、米国では 2 年に一度を定期点検の基本としているなど、最適な点検頻度については現在も定説はない。橋の安全性等の性能の確保とライフサイクルコストの低減のためのより早期の変状把握には頻度は多いほど良いものの、橋の各部に近接することが求められる詳細な定期点検に要する費用負担も大きくなる。表-3 に国内外橋の点検頻度を示した。現在、平成 16 年度から始まった新点検要領に基づ

く点検が概ね一巡しつつあるところであり、今後これらのデータを詳細に分析し、点検頻度を最適化するための検討を実施していく予定である。

定期点検の手法は、基本的に近接目視によって全部材を対象に一般的な損傷種別のすべてに着目して評価する方法が踏襲された。これは、過去の重大な損傷事例等から、橋の構造安全性確保、第三者被害の予防、損傷兆候の早期発見による予防保全の実現の観点において、局部的に生じる損傷の発見、部位等によって極端に速く進展する重大損傷の進行の的確な把握には、このような点検手法に依ることが現時点では経済性を考慮しても最も合理的かつ不可欠と判断した結果である。すなわち、人材的・財政的制約を考慮すると、遠望目視の併用や非破壊検査手法など高度点検技術の導入についても検討すべき余地はあるものの、鋼部材のき裂や腐食による断面欠損など橋の安全性に致命的な影響を及ぼす深刻な損傷の中には遠望では確認困難なものも多く、これらを見落とす危険をカバーする合理的な手法が現在のところ確立していないためである。現在国総研では、これまで得られている点検データや損傷の記録から、橋の形式や構造特性、適用基準、材料、架橋条件など様々な条件について損傷発生や進行との傾向の分析を進めており、点検品質確保と負担軽減が両立できる点検体系の確立に向けた検討を行っていく予定である。

#### 4. 4 道路橋の管理状態の評価

点検で得られる情報は、当該橋の現状を把握して対策の必要性などの意思決定に用いられるだけでなく、劣化傾向の分析等を行って将来の維持管理の合理化の検討に用いたり、劣化予測などによる将来の維持管理計画の策定にも用いられる。

しかし、このような様々な評価が行われた結果として補修や補強の対策や通行制限などの交通管理が行われる橋の状態について、それらの利用者や一般の国民に理解しやすい形で示されているとはいえず、点検、補修・補強などの維持管理行為の必要性や重要性が適切に理解されているかは明確でない。

そのため国総研では、定期点検のデータを用いて橋の管理状態を示すものとして、その現有性能を理解しやすい形で評価する手法について開発を進めてきた<sup>10)</sup>、<sup>11)</sup>。

指標化の対象となる道路橋の要求性能としては、全ての道路橋に該当し、かつ供用性や安全性の観点から不可欠と考えられる耐荷性（重量車両の通行に対する信頼性）、災害抵抗性（災害時に所要の機能・性能が発揮されることの信頼性）、走行安全性（日常的な安全・快適な車両走行に対する信頼性）の3つを設定した。また、多数の部材が複雑に構成された道路橋の状態を、部材単位毎のデータを基に機械的に定量化する指標ではその精度に限界がある。したがって、定量的な計算値を「補修等の必要性のない程度の健全状態」「早期に補修する必要性が高いと考えられる状態」「所要の性能を満足していない可能性が高い状態」の3つに区分し、どの区分に該当するのかの適合度を指標のアウトプットとしてできるだけ精度が確保されるよう優先することとした。

それぞれの指標値は、その性能に関連する部材の点検結果に基づく損傷度と、性能への影響度に応じた重み係数で計算される。同種同機能の部材が複数ある場合には、それらの重要性や橋梁全体の性能に与える影響に応じて最悪値や平均値が用いられる。

図-8 に、指標値の試算結果の例を示す。健全度の喪失程度が着目する機能毎（図では耐荷性と災害抵抗性）に異なる評価となることがわかる。また、指標値算出過程をたどることで具体的にどの部材のどのような損傷状態がその評価の原因となっているのか容易に知ることができ、機械的な定量化による判定の限界を個々に確認して適正に評価し直すことを可能としている。

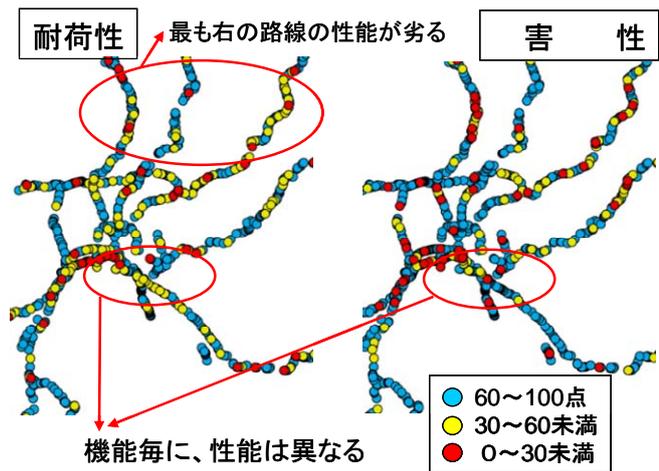


図-8 指標値の試算結果

引き続き、実際のデータによる算出事例を増やしながら、精度の検証と実用化に向けた検討を行っていく予定である。

道路橋が道路網の一部を担うものであることから、道路橋の機能状態はそれが位置する道路網の性能にも強く関わっている。また、道路網としての性能を合理的に管理する視点からは、橋梁だけを対象とするのではなく、将来的にはトンネル、舗装、土工などの道路網の性能に係わる様々な道路構造物について共通の観点で評価を行い、道路網の性能確保のためにどの構造物の対策を優先すべきかなどの検討が行われることが合理的である。

そのため、橋梁に加えて、ある範囲の道路構造物群全体を評価して構造物種を越えて対策の優先度を決定する等の道路網に着目した合理的な管理手法の構築に向けた検討を進めている（表-6、図-9 参照）。ここでは橋梁の総合指標を発展させ、

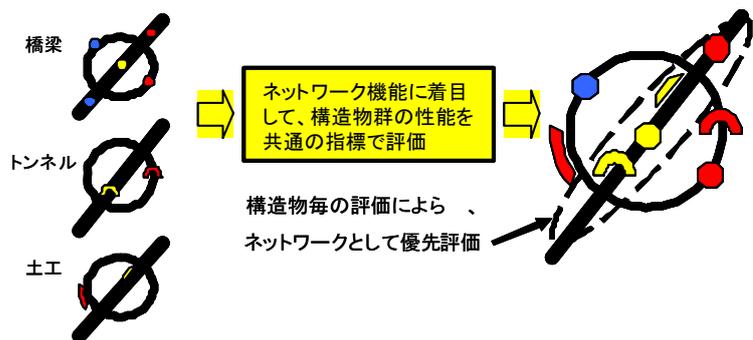


図-9 道路構造物群の指標化（イメージ）

表-6 道路構造物群の共通指標の設定

	耐荷性	走行安全性		害性		
	荷重制限	突発的事故	路面状態	地震	雨	
	早期に荷重制限や通行止めにする程度	突発的な事故等が生じる程度	安全かつ適度な走行がされる程度	地震時や雨時に所定のネットワーク機能が発せられる程度	雨時に所定のネットワーク機能が発せられない	突により自動車横転する危険性の程度
橋梁	・主桁 ・床版の損傷や材料劣化	・床版のけち	・差（縮装置）の状況	・下部工の傾斜 ・支の損傷 ・橋	—	—
トンネル	—	・覆工コンクリート片の下 ・覆工の	—	・覆工の損傷	—	—
舗装	—	・路面陥没	・わち ・水の状況	—	—	—
土工	—	・き石の下 ・路壊 ・対策工の損傷	—	・対策工の損傷 ・差の発生	・対策工の損傷 ・のり面の壊	—

構造物群を同一の視点で評価することで、例えば災害抵抗性に劣る路線が浮き彫りになり、その路線の中でも対策を優先すべき構造物が明確になるなど、個別最適から全体最適への管理につながる手法の構築を目指しているところである。

さらに、地方公共団体等管理の構造物群にも同じ視点の評価を行うことで、管理主体にとらわれることのない道路網としての全体最適管理に繋がるものと考えている。このためには、管理者を越えて様々なデータが様々な主体に活用されることを含め、全国的に統一された橋梁データベースの構築が必要であると考えられる。

#### 4. 5 維持・管理の高度化に向けた技術開発

##### 4. 5. 1 技術開発分野と技術開発ニーズの提示

維持管理の合理化に資する技術開発は急務であり、産学官が適切に役割分担しつつ戦略的・計画的に進めていくことが重要である。

図-10 は、維持管理の合理化のために必要と考えられる様々な技術開発分野を維持管理の改善の観点からの取り組むべき課題に関連づけて体系的に整理することを試みたものである。図の左側の領域は、例えば構造物内部の欠陥検知など、点検や診断の信頼性の向上のために必要な技術開発領域である。一方右側は、例えば点検手法の機械化や自動化による省力化やモニタリングによる速やかな異常検知など、点検の効率化・最適化に必要な技術開発領域である。また、左右の領域のそれぞれ上側の領域は、現在の維持管理体制の改善として導入が可能なもの、下側の領域は、維持管理の人員配置など体系そのものの改革を伴うものとなっている。このように整理することで、開発目標を見失うことなく、過不足なく効率的に新たな技術開発や既存技術の応用が図られやすくなるものと考えている。

さらに、これらの技術開発に産官学のそれぞれあるいは連携によっていかに合理的に取り組むことができるかが、早期に有効な成果が得られるためには重要な鍵である。例え

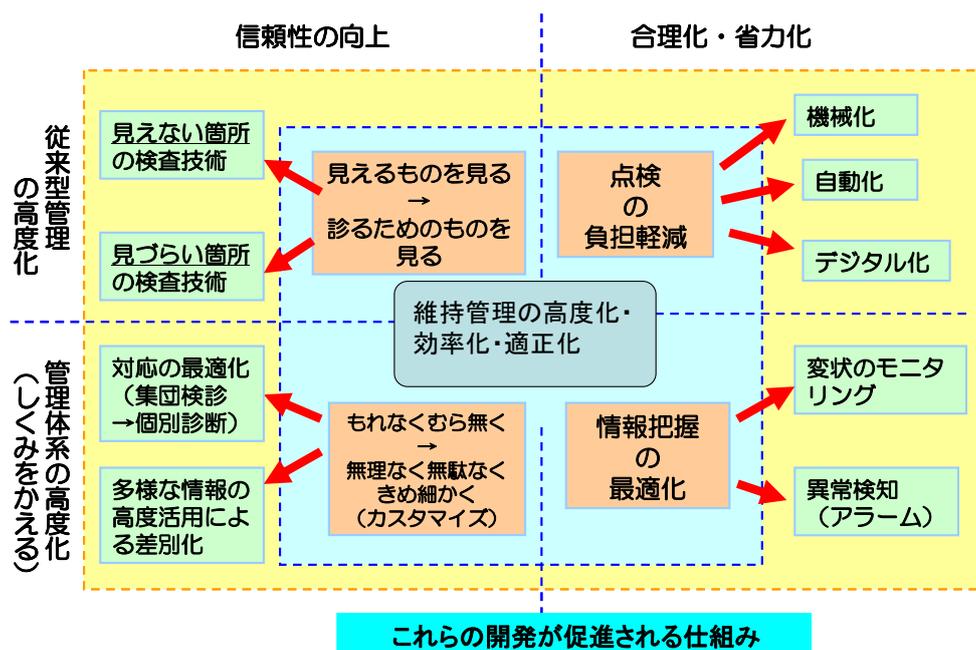


図-10 維持管理の高度化・効率化・適正化に向けて

ば、構造物の内部等目視での点検が不可能な部位の点検を行うために必要な非破壊検査手法の開発や活用において、多くの場合、非破壊検査による調査結果の評価方法、診断のため機器に求められる精度が不明のため、合理的な機器の開発や適用の促進・普及に結びついていない。維持管理では、緊急対応から監視、詳細検査、補修・補強の実施と、段階的に対策が行えることから、点検や検査の技術には次の段階へのスクリーニングや異常の有無のみの検出など、実際の対応との関連付けで過不足のない精度や特性があれば活用の余地がある。このため、点検の高度化に資する技術の開発目標となる要求レベルの設定について検討を進めている。

また、民間が技術開発を行うには、要求レベルに加えて市場規模等、開発リスクが判断できる材料を提供することが不可欠であると考えられる。要求性能を明確にし、開発主体を想定した上で、技術開発が効率的、効果的に進むよう実施体制の整備や民間等への支援制度の充実の検討が必要である（図-11 参照）。

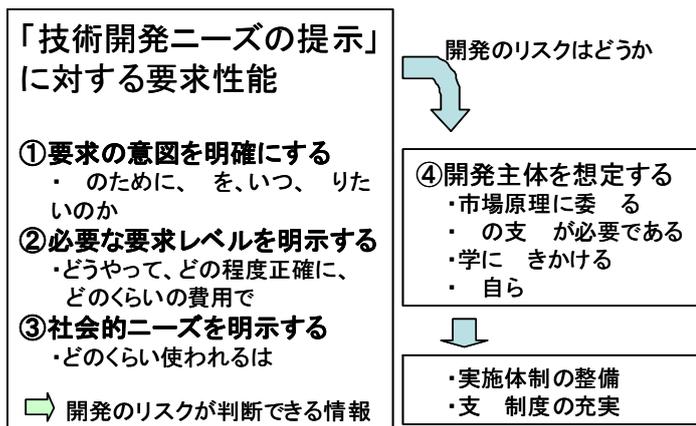


図-11 技術開発ニーズの提示に対する要求性能

#### 4. 5. 2 非破壊検査技術の開発

##### (1) PC緊張力の状態

PC 橋では、PC 鋼材の劣化や不適切な施工等の様々な原因で、導入されるプレストレスが設計と乖離する可能性が考えられる。しかも、目視によってひびわれを発見したとしても、それらから橋の健全性を判定することは困難が予想される。特に軽微な段階では健全性の適正な評価は困難であり、大規模補修の必要性や落橋の危険性が危惧されるような深刻な事態に至るまで健全性の程度が認識されないまま供用が続けられることも危惧される。この問題は特に目新しいことではなく過去より当然理解されてきたことではあるものの、これまでこの課題を解決できる有効な検査手法や評価技術は確立されていない。

支間長 20～45m のポストテンション形式のT桁橋の試算では、一般的な道路橋では 20～40%までプレストレスが低下すると自動車荷重によって有害なひびわれが発生するおそれが高まるものの、それより少ない低下では大きな性能の低下はないとみなせる（図-12 参照）。この場合、点検では 20%を越えるようなプレストレス低下の有無のみが判断できれば必ずしも精度よく低下量を計測できる技術は必要なく、異常が疑われたものに対して次のステップとして個別に詳細な調

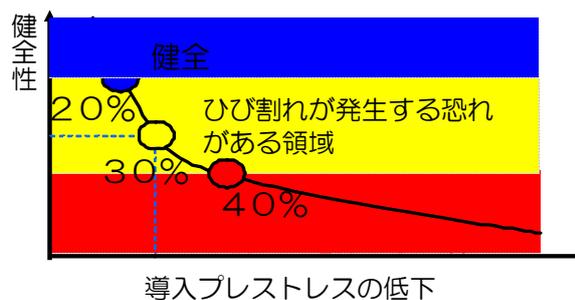


図-12 プレストレス低下による健全度への影響

査が行われればよく、これが要求レベルとなる。

国総研では、このための非破壊検査手法を、現状の技術水準で汎用性のある弾性波法（超音波，衝撃弾性波）に着目して実験的に検討している。<sup>12)</sup>

鋼球打撃による入力波を異なる2点で受信し、衝撃弾性波伝搬速度を測定した。計測結果を図-13に示す。桁高方向に採取したデータから、桁の下縁に近づくにつれて弾性波伝搬速度が大きくなる傾向があり、プレストレス状態の相違が反映しているものと考えられた。コンクリートウェブを貫通する方向に透過する超音波の伝搬速度を測定した例を、図-14に示す。桁高方向に超音波伝搬速度の相違が見られ、プレストレス状態の相違が超音波伝搬速度に有意な差を生じさせたものと考えられた。

これは、これまで道路橋の桁部材のプレストレス状態を計測することは精度や信頼性の点で困難と考えられていた非破壊検査技術に対して、応力度の絶対値を精度よく評価できる必要はなく、平面的な応力状態の相対関係さえわかればよいという維持管理ニーズを示すことで、既存の検査技術を応用した現有性能評価手法が確立できる可能性が高いことが見い出された例である。本手法については、現在も引き続き、実務への反映を目指して検討を継続している。

## (2) 床版の劣化状態

道路局に設置された新道路技術会議の「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」制度を活用し、大阪大学大学院 鎌田 敏郎教授を研究代表者とする研究グループに、「各種道路橋床版における疲労損傷の非破壊検査システムに関する研究開発」を委託研究している<sup>13)</sup>。

RC床版において最も点検が困難な水平ひび割れの検出のため、各種弾性波法（インパクトエコー法、EMH (Electro Magnetic Hammer) 法、超音波法）の適用性を比較評価した。弾性波の入力及び受振の条件が水平ひび割れの検出精度に与える影響を把握するとともに、弾性波指標と水平ひび割れ深さ・大きさの定量的関係を調査した。また、舗装部や増厚部が欠陥検出に与える影響についても確認した。その結果、弾性波法毎に表-7のよ

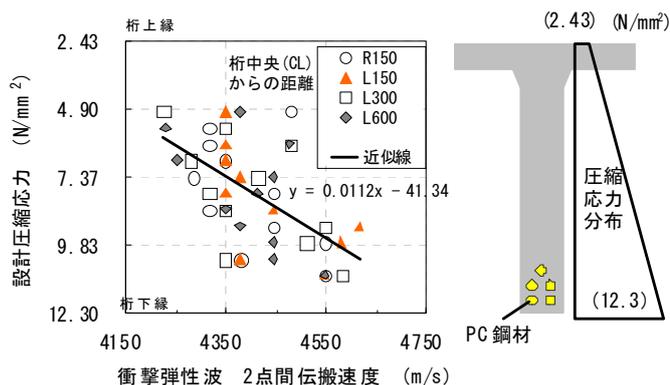


図-13 2点間伝搬速度(衝撃弾性波)

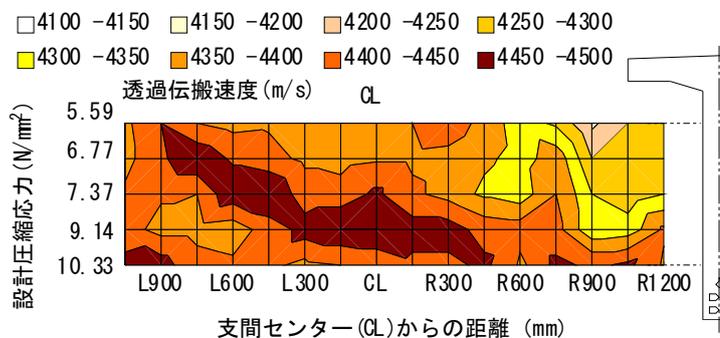


図-14 超音波伝搬速度分布

うな適用範囲があることが明らかとなった。

鋼床版におけるき裂を遠隔から非破壊で検出するため、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法の適用性を検討した。疲労き裂の先端で顕著な応力集中部を示すコントラスト変化とその時系列変動から、輪荷重負荷による応力変動波形を得ることができることがわかった（図-15）。また、橋梁に塗装が施されている状態であっても対象部分を直接視界に捉えることができれば、亀裂の検出、モニタリングは可能であると確認できた。

この例は、膨大な延長となる鋼床版の溶接部のき裂の検出について、これまでのき裂を直接視認したり超音波探傷手法によって形や位置の情報として把握するというのではなく、き裂に付随する応力集中の発生という異なる現象に着目することで、非接触で広範囲を効率的に検査できる可能性を示したものである。すなわち、維持管理ニーズとして、き裂の長さや形をいきなり正確に検知する必要はなく、き裂発生（に伴う現象）の有無だけをまずは効率的に検知できることが最優先の要請であることを示すことで、他分野で開発されてきた技術の応用が図られた例といえる。なお、本技術を含む各種床版の損傷の検知手法について、点検手法として実用化すべく研究を継続しているところである。

表-7 計測手法の適用範囲<sup>13)</sup>

欠陥深さ (mm)	インパクトエコー法	EMH 法	超音波法
50	△	○	○
80	△	○	○
100	△	○	○
130	○	○	△
200	○	△	×
250	○	△	×

○：既往の方法で検出可能、×：検出困難  
△：適用可能となる可能性あり

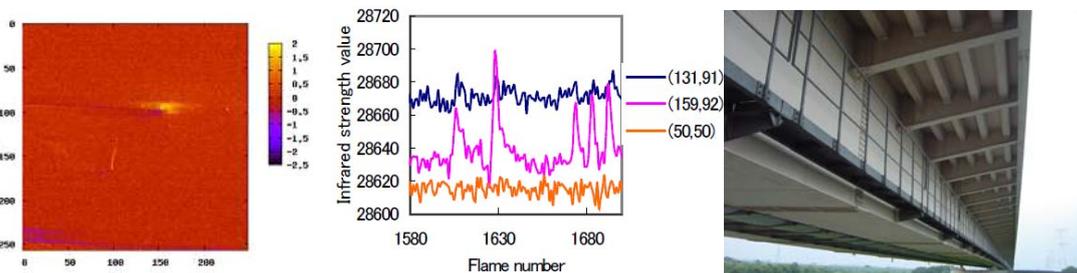


図-15<sup>13)</sup>

自己相関ロックイン処理 応力変動波形の計測結果  
(値は赤外線強度)

## 5. 地方公共団体への支援

### 5. 1 長寿命化修繕計画策定事業費補助制度

国土交通省では、地方公共団体の道路橋を対象として、ライフサイクルコストの低減に資する予防保全などの計画的維持管理が実施されるよう、橋の状態の把握とその結果に基づく合理的で中期的な維持管理計画である長寿命化修繕計画の策定に対する補助制度を過年度より実施している。

これは、多くの橋では深刻な劣化状態に至る前に予防保全的な措置が行われることで、長寿命化され、結果的にライフサイクルコストが縮減される効果が大きいことから、地方公共団体に対してもライフサイクルコストを考慮した中長期の補修・補強あるいは更新などの維持管理計画を立てることを奨励することで、結果的に国全体として道路網をより経

済的かつ確実に良好な状態に維持できるようになると判断したものといえる。

## 5. 2 基礎データ収集要領(案)<sup>14)</sup>

本制度の導入にあたって、これまで十分な定期点検が行われてこなかった地方公共団体では、長寿命化修繕計画を検討するために必要な橋のデータを短期間に収集することに困難が予想された。このため、本制度の導入にあわせて国総研では、これまで得られている直轄道路橋の定期点検のデータから橋の劣化傾向や損傷パターン等の分析を行い、その結果を根拠にできるだけ経済的に橋の状態の概略を把握する手法を検討し、基礎データ収集要領(案)を提案した。

ここでは、点検データの分析結果と基礎データ収集要領(案)の概略について紹介する。

分析結果の代表例を図-16～-18に示す。

図-16 から、鋼桁の腐食は桁端部で先行して進行する傾向が見られる。狭隘部である桁端部は湿気がこもるだけでなく、伸縮装置部など上部構造からの漏水の影響、支承部の滞水や塵埃の堆積などにより腐食環境に劣る場合が多いことが原因と考えられる。

RC床版では、床版の機能に影響を及ぼすひびわれが疲労によって進行する場合が多い。特に路面段差等により自動車荷重の動的影響が大きくなる桁端部付近では劣化が進行しやすいと考えられた。図-17に示すように、平面区分別の分析結果でも端部で損傷程度が相対的に悪くなる傾向が見られた。このことから、床版では、端部のみ増厚したり配筋量が多くなっていることも考慮し、桁端部の2パネル程度までを当該車線方向の代表値として評価することが合理的であるとされる。なお、張出床版部については橋軸方向に分割せず全てのデータを1つに集約している。

RC床版の漏水・遊離石灰についても、ひびわれ同様に端支点部で損傷が多い傾向が見られた(図-18)。床版からの漏水や遊離石灰の析出

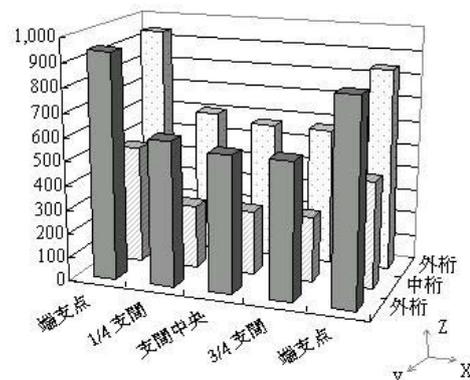


図-16 腐食の部位別損傷点数 (566 径間)

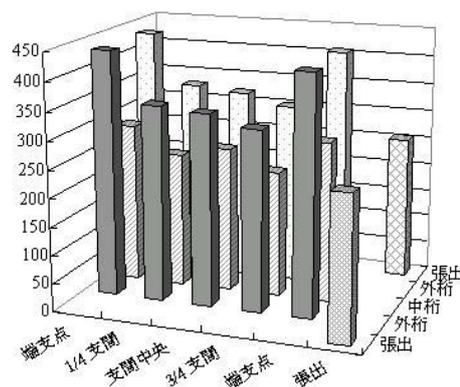


図-17 床版ひびわれの部位別損傷点数 (473 径間)

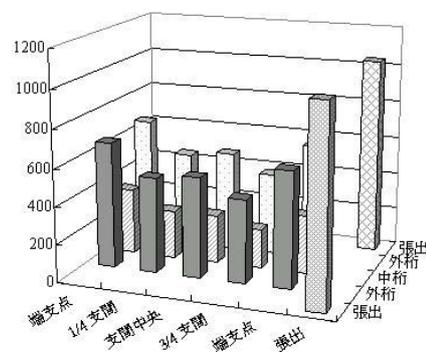


図-18 漏水・遊離石灰の部位別損傷点数 (480 径間)

は床版コンクリートの劣化が内部で進行している危険性があり、損傷の卓越するパターンがひびわれと類似していることから、ひびわれ同様に桁端部から2パネル程度について着目して評価するのが合理的であると考えられる。

表-8 端部が健全で、かつ端部以外に損傷が発生していた割合（リスク率）

	腐食	床版ひびわれ	漏水・遊離石灰
外桁	4.77%	3.81%	7.92%
中桁	2.30%	2.96%	4.79%
全体	7.07%	5.50%	11.88%

既往の点検結果を分析した結果、従来から経験的に損傷が出やすいと考えられていた位置で、損傷発生率が高いなど特徴的な損傷パターンが設定できるものがあることが実証できた。

表-8 は、端部のみ損傷の評価を実施した場合に、損傷を見逃してしまう確率（リスク率）を示したものである。このような分析結果を活用すると、橋の状態を評価する場合に、必ずしも全ての部材・部位で詳細なデータが無くても、桁端部の損傷データを当該桁の代表値として評価すれば、リスクの増加を抑えつつ少ないデータで効率的に評価が行えると考えられる。

以上の分析も踏まえ、著しい劣化の有無など道路橋の健全度に着目して調査時点の概略状況をできるだけ簡易に把握することのできる方法の検討を行った。まず、点検結果等から得られた道路橋の劣化傾向をもとに、一般的な構造形成の道路橋に対して主たる部材の損傷発生頻度が高い箇所や劣化が先行的に進行する箇所を抽出し、次にそれらを優先的に調査することでリスクは抑えつつ危険な状態の橋梁を効率的に見つけることを意図した着目部位・部材の選定を行った。その結果、橋梁の状態を概略的に把握するために最低限必要なデータの収集方法として、以下の提案を行った。

- ①目視によることを基本とする。
- ②桁端部や支承部及びその近傍の部材は、直近の橋台や橋脚からできるだけ近接して調査する。
- ③近接が困難な調査箇所等は、遠望目視と周辺の部材等の状況から推定する。

手法の概要を表-9 に示す。本手法（基礎データ収集要領(案)）は、近接しない部材があることからデータでも示したように、全ての部材に近接する直轄道路橋の定期点検などに比して変状を見落とす可能性も大きく、また、点検のもう一つの大きな役割である健全性等の評価（一次診断。図-7 で示した対策区分の判定に相当）についても触れていない。そのため、これ単独ではいわゆる点検要領の要件を満たしていない。

これまで内外で用いられている道路橋の点検要領について、その妥当性を示す根拠データやそれによる場合に変状等を見落とすリスクなどが明示された例はない。しかし、データ分析結果によると、橋の損傷傾向は極めて多岐にわたっており特異な劣化パターンを呈する橋も少なくない。このため、点検で着目する部位や項目が異なれば、損傷を見落とす確率や一次診断の信頼性も同じになるとはいえない。今後は、引き続き点検データの分析と橋の劣化特性に関する調査を進め、直轄道路橋の定期点検要領の合理化・

表-9 手法の概要

定期点検要領(案)	基礎データ 集要領(案)
26損傷×5 評価 =130区分	12損傷×2~5 評価 =33区分(25%)
橋梁全体	腐食・桁端部 等
近接目視	下部工： 目視 等
損傷程度の評価	5割以上の削減
対策区分の判定	対象外

最適化の方法を検討する一方で、このような明確な根拠に基づいて法制度等で管理者によらず普遍的に課することができる点検の内容やその表現の方法についても検討していきたいと考えている。

## 6. まとめ

我が国の道路橋の維持管理の現状と課題を、直轄道路橋の点検体系を紹介して考察した。社会資本の量の増大と高齢化が進む中、道路構造物群をそれが存する道路ネットワークの機能の観点から良好に保全される体系の構築は急務である。

すなわち、一つの路線にあっては、構造物の種類に拘わらず一定の性能が確保された状態で、かつ、路線としてのライフサイクルコストを最小とする管理である。公共投資の効率化が叫ばれ選択と集中が議論される中、構造物を意識することなく路線の性能の観点から、さらには道路ネットワークとしての全体最適の観点から維持管理計画を策定することが、今後ますます重要となってくる。これを説明性のある指標等で表し、合理的に優先度が付けられる手法の開発が重要課題である。

また、維持管理の根幹となる点検の合理化・最適化は、維持管理行為の費用対効果を高め、トータルコストの低減を図る上でも重要な基本課題である。

これらに対する国総研の取組状況を紹介した。今後も、これら課題の解決に向けた研究に積極的に取り組んでいきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) 道路橋の予防保全に向けた有識者会議：道路橋の予防保全に向けた提言、2008.5
- 2) 国土交通省道路局HP：道路橋の予防保全に向けた有識者会議（第1回）（第2回）資料、参考資料
- 3) 土木研究所資料第2723号：橋梁の架替に関する調査結果（Ⅰ）、1989.1
- 4) 土木研究所資料第2864号：橋梁の架替に関する調査結果（Ⅱ）、1990.3
- 5) 土木研究所資料第3512号：橋梁の架替に関する調査結果（Ⅲ）、1997.10
- 6) 国総研資料第444号：橋梁の架替に関する調査結果（Ⅳ）、2008.4
- 7) 国土交通省道路局国道・防災課：橋梁の維持管理の体系と橋梁管理カルテ作成要領（案）、2004.3
- 8) 土木研究所資料第2651号：橋梁点検要領（案）、1988.7
- 9) 国土交通省道路局国道・防災課：橋梁定期点検要領（案）、2004.3
- 10) 玉越隆史・小林寛・武田達也・平塚慶達：道路橋の維持管理に関する指標開発の取組み、土木技術資料、pp.66～71、2007.2
- 11) 道路橋の計画的管理に向けて一総合評価指標の開発と点検データ分析から見た損傷の特徴一、建設物価、2007.12
- 12) 春田健作、川間重一、高橋晃浩、玉越隆史、山影秀幸：実大PC道路橋のプレストレス状態に着目した弾性波の伝搬特性、土木学会第63回年次学術講演会、5-153、2008.9
- 13) 国土交通省道路局HP：道路政策の技術研究開発、平成18、19年度中間評価結果、研究状況報告書
- 14) 国総研資料第381号：道路橋の健全度に関する基礎的調査に関する研究一道路橋に関する基礎データ収集要領（案）一、2007.4

エコエアポートの実現に向けて  
—空港からのCO<sub>2</sub>排出量と削減方策—

空港研究部長

辻 安治

# エコエアポートの実現に向けて —空港からのCO<sub>2</sub>排出量と削減方策—

空港研究部長 辻 安治

空港研究部 空港計画研究室長 丹生清輝

## 1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第4次評価報告書によれば、1906年から2005年までの100年間で地球の平均気温は0.74℃上昇し、20世紀半ば以降の気温上昇原因のほとんどは人為的起源の温室効果ガスの増加である可能性がかなり高いことを指摘されている。また、21世紀末までに地球の平均気温は1.1～6.4℃の範囲で上昇すると予想している。

一方我が国は、京都議定書の約束期間(2008～2012年)に温室効果ガス排出量を基準年(CO<sub>2</sub>等は1990年度)比6%減とする削減目標を達成することとされている。そこで、地球温暖化対策は我が国の最重要課題の一つとして、国土交通省はじめ政府でも以下のように様々な計画を策定している。

### 地球温暖化対策に関するこれまでの主な経緯

1997年	COP3にて京都議定書採択
1998年	地球温暖化対策の推進に関する法律(温対法)制定
2004年6月	「国土交通省環境行動計画」策定
2005年	京都議定書発効
同年4月	「京都議定書目標達成計画」閣議決定
同年8月	エネルギーの使用の合理化に関する法律(省エネ法)抜本改正
2007年	IPCC 第4次評価報告書策定
2008年	京都議定書第一約束期間スタート
同年3月	改訂「京都議定書目標達成計画」閣議決定
同年7月	国土交通省「環境行動計画2008」策定

航空・空港分野においても、CO<sub>2</sub>を始めとする温室効果ガスの排出量削減は重要な課題となっていることから、空港を一つの単位としたCO<sub>2</sub>の排出量に着目してこれまで空港研究部が進めてきた研究の概要について紹介する。

## 2. 背景と現状

### 2.1 我が国のCO<sub>2</sub>排出状況

2006年度に我が国が排出したCO<sub>2</sub>量は12億7,400万トンで、国民一人当たりでは10トン排出している。

図-1はその排出量の部門別内訳を示しており、運輸部門は全排出量の2割を占めている。その運輸部

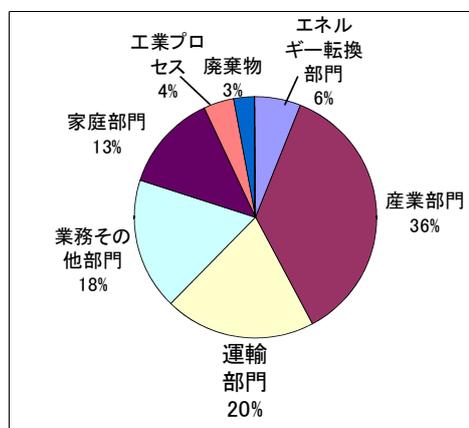
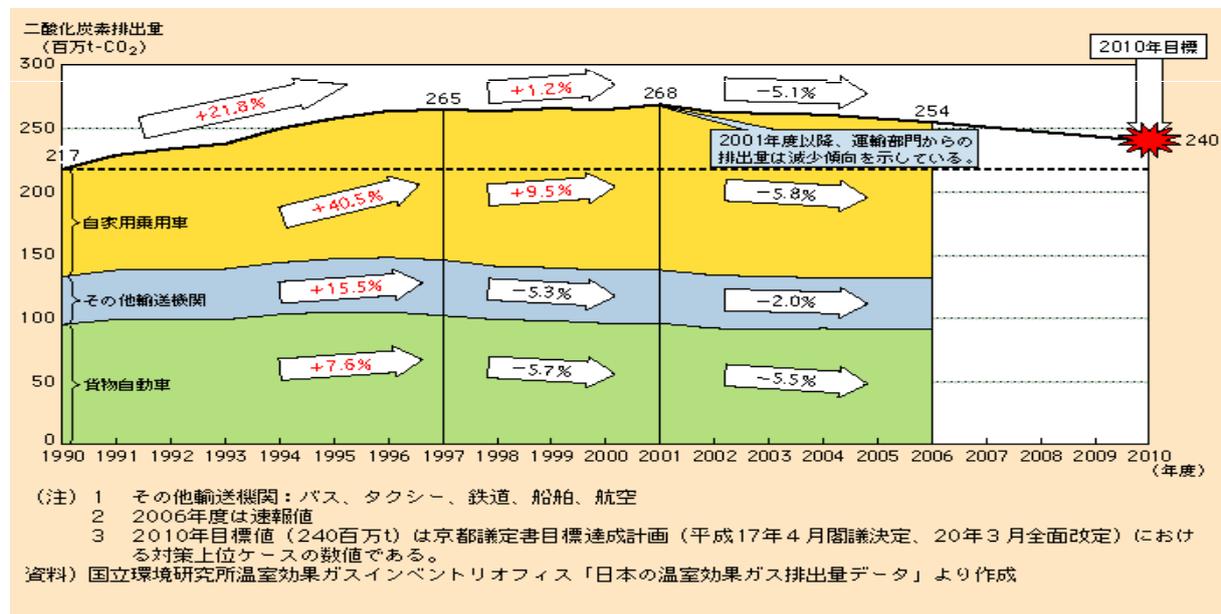


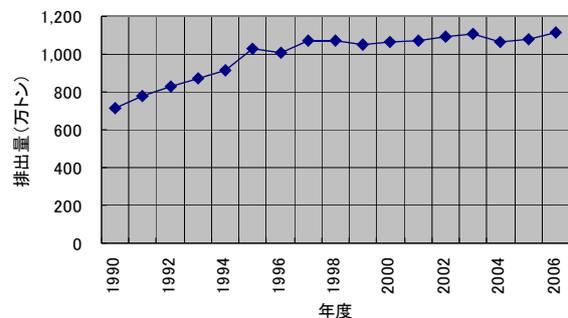
図-1 我が国の2006年度CO<sub>2</sub>排出量の部門別内訳  
(資料:国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィスのデータをもとに作成)

門における排出量の推移を見ると（図－2）、2001年度の排出量が京都議定書の基準年（1990年度）比で約23%増加して以降減少に転じ、2006年度は2億5,400万トンで基準年比約17%増となっている。



図－2 我が国の運輸部門におけるCO<sub>2</sub>の排出量の推移（資料：国土交通白書2008）

また、国内路線の航空機からのCO<sub>2</sub>の排出量は2006年度1,100万トンと運輸部門の4%強、我が国全体の約0.8%を占め絶対量としては少ないが、図－3に示すように京都議定書基準年比約56%増となっている。これは、運輸部門全体の伸び(約17%増)を大きく上回っている。



図－3 我が国の国内線航空機からのCO<sub>2</sub>排出量  
 (資料：国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィスのデータをもとに作成)

また、空港のターミナルビルを含む業務その他部門からのCO<sub>2</sub>排出量についても、基準年比約1.4倍と大きく増加している。

我が国の旅客事業者のCO<sub>2</sub>排出量を示したのが表－1である。乗用車で営業する旅客事業者（バス、タクシー会社）は零細企業が多いこともあり、航空会社と鉄道会社が上位を占め、中でも航空会社大手2社が他を大きく引き離し排出量の1,2位を占めている。

表－1 旅客事業者のCO<sub>2</sub>排出量(2006年度)

順位	事業所名	排出量 (万トン)
1	日本航空インターナショナル	452
2	全日本空輸	401
3	東日本旅客鉄道	202
4	西日本旅客鉄道	150
5	東海旅客鉄道	126
6	新日本海フェリー	73
7	東京地下鉄	52
8	近畿日本鉄道	47
9	北海道旅客鉄道	40
10	東武鉄道	37

資料：環境省・経済産業省「地球温暖化対策推進法に基づく温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度による平成18年度温室効果ガス排出量の集計結果」より作成

## 2.2 エコエアポート

「エコエアポート」とは、地球環境や地域環境の影響を低減させようとする目的から、空港及び空港周辺地域において、環境の保全及び良好な環境の創造を推進する施策のことである。国土交通大臣が設置管理する空港を対象としているが、それ以外の空港でも同様な取り組みを行うよう情報提供をしている。

推進方法としては、空港ごとに「エコエアポート協議会」を設置し、空港管理者だけでなく空港内事業者（ターミナルビル、航空会社、地方公共団体等）とともに取り組みを実施する。国土交通省航空局が2003年8月に策定した「エコエアポート・ガイドライン（空港環境編）」（2006年3月改定）及び2005年7月に策定した「エコエアポート・ガイドライン（周辺環境編）」を基に、実現可能な空港から順次、空港環境計画・周辺環境計画を策定し環境対策を推進している。エネルギーに関しては「空港の運営に伴い消費されるエネルギーの削減を図り、地球温暖化ガスの排出削減に寄与する」ことが基本理念の柱の一つになっている。エコエアポートの施策イメージを図-4に示す。

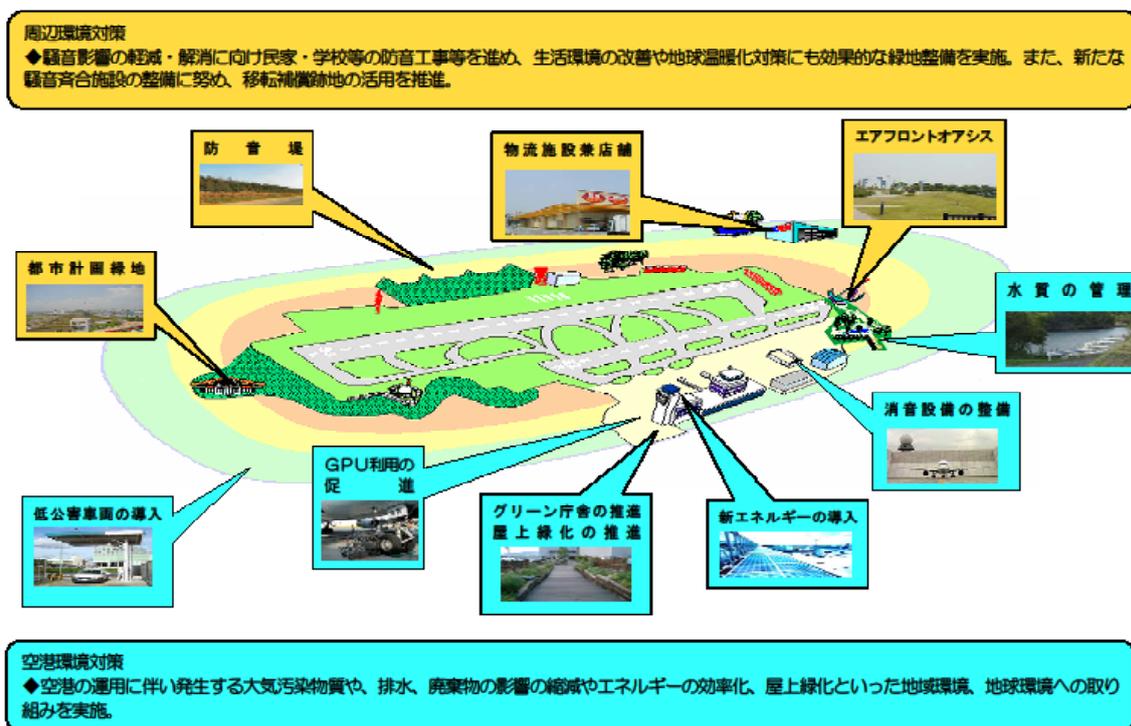


図-4 エコエアポートの施策イメージ

(出典：国土交通省航空局ウェブサイト [http://www.mlit.go.jp/koku/04\\_outline/01\\_kuko/05\\_kankyou/ecoairport/data/gaiyou.pdf](http://www.mlit.go.jp/koku/04_outline/01_kuko/05_kankyou/ecoairport/data/gaiyou.pdf))

## 2.3 SKYエコ促進協議会

航空分野は世界的に今後とも成長が見込まれ、温暖化対策の取り組みが急務となっていることから、国土交通省航空局は今年（2008年）7月、「SKY エコ促進協議会」を設置した。この協議会は、新規機材の導入、運航の効率化、空港インフラの整備、航空管制の高度化といった総合的な温暖化対策や国際的議論について、官民で協議し一体的な推進を図っていくことを目的としている。

協議会のメンバーは、学識経験者、各航空会社、成田・関空・中部の各国際空港会社、関係協会、国土交通省航空局から構成されている。

### 3. 空港からのCO<sub>2</sub>排出量算定方法

本研究では、空港から発生する CO<sub>2</sub>の排出源を、ターミナルビル等の空港施設、空港内を走行する車両、そして航空機の3つに大別し、それぞれ CO<sub>2</sub>排出量の算定方法をまとめた。それぞれの概要を次に説明する。なお、航空機については、国内線だけでなく国際線も対象としている。

#### 3. 1 空港施設からの CO<sub>2</sub>排出量算定方法

空港施設の対象とするのは、旅客・貨物ターミナルビル、航空局庁舎、電源局舎、給油施設等基本的に空港内の全ての施設（建物）である。

この CO<sub>2</sub>排出量算定フローは図-5に示すとおりであり、各施設でのエネルギー消費量を燃料種別に把握し、各燃料種別に CO<sub>2</sub>排出係数を乗じ総和を取ることにより CO<sub>2</sub>排出量を算定することができる。燃料種別は、電力（買電、自家発電）、都市ガス、プロパンガス（または LP ガス）、A 重油、軽油、灯油及びガソリンの7燃料（9区分）とした。電力については、受電先である電力会社により排出係数は異なり全国一律ではないことに留意する必要がある。

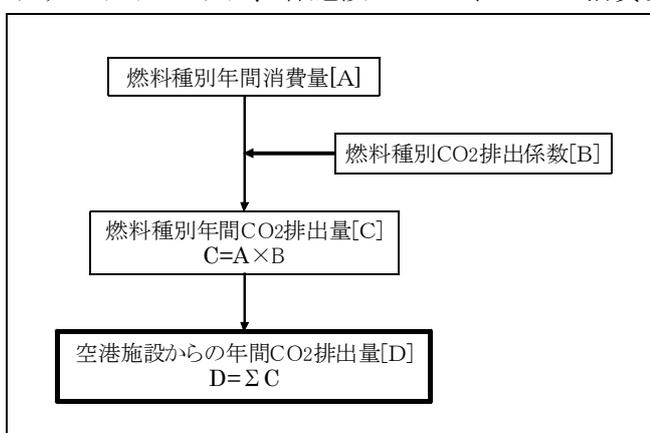


図-5 空港施設からのCO<sub>2</sub>排出量算定フロー

#### 3. 2 車両からのCO<sub>2</sub>排出量算定方法

この場合の CO<sub>2</sub>排出量算定フローは基本的に図-5と同じであるが、燃料種別は、ガソリン、軽油、天然ガス、LP ガス、電気の5燃料とした。

本来であれば空港アクセスの際に旅客が利用する自家用車やバス等も対象に算定すべきであるが、今回5空港を対象に行った算定では、空港会社の車両と GSE 車両に限定している。

#### 3. 3 航空機からのCO<sub>2</sub>排出量算定方法

航空機からの CO<sub>2</sub>排出量は、運航モード（駐機時、タキシング（誘導走行）時、離陸時、着陸時）別に算定する。

##### (1) 駐機時

駐機中であっても航空機が使用する空調や電源を供給することが必要であり、その CO<sub>2</sub>排出量算定フローを図-6に示す。この図の中で APU（Auxiliary Power Unit）は航空機に取り付けてある補助動力装置、GPU（Ground Power Unit）は地上から航空機に電源を供給する地上電源装置であり、それぞれの使用時間に CO<sub>2</sub>排出係数を乗じ和を取ることによって駐機

時の CO<sub>2</sub>排出量を算出する。

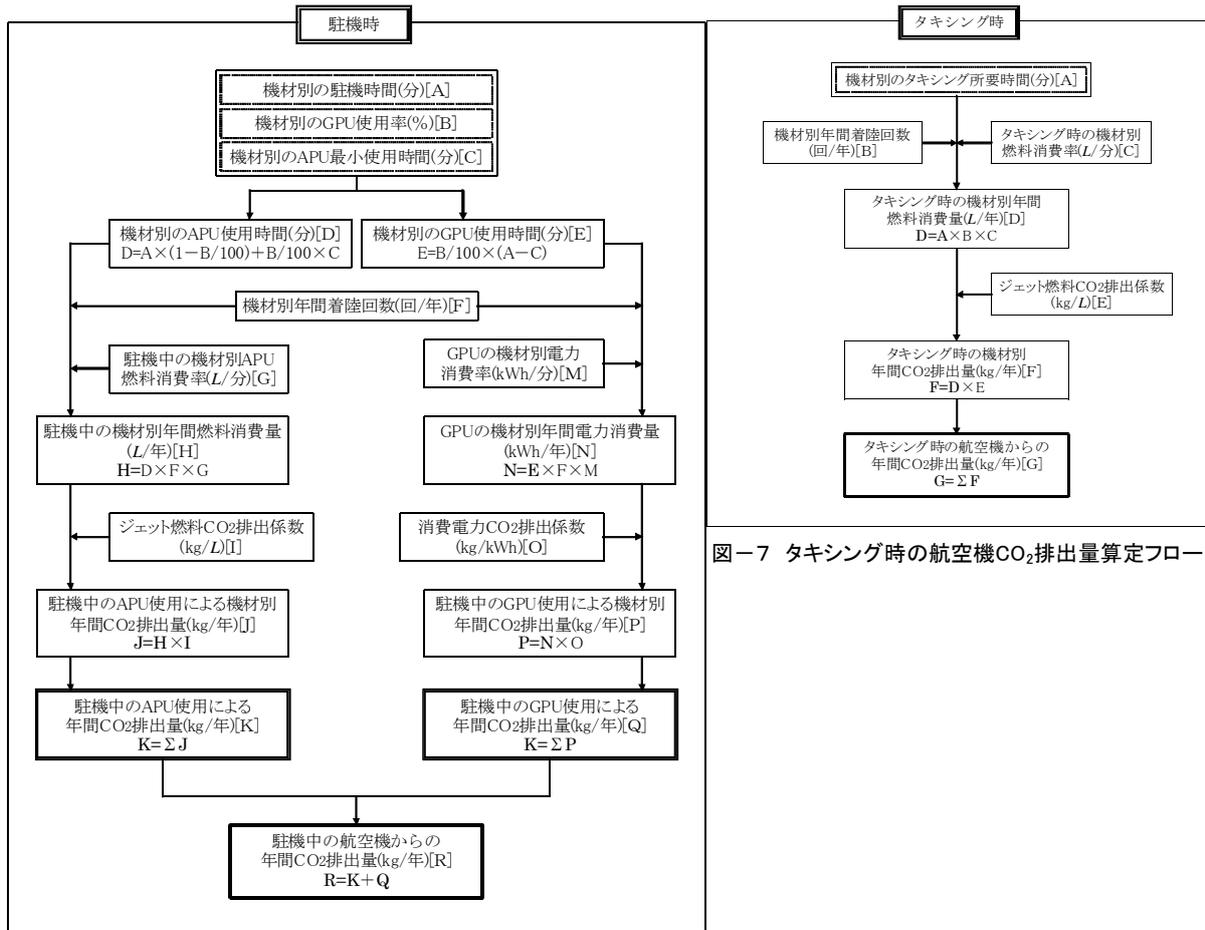


図-7 タキシング時の航空機CO<sub>2</sub>排出量算定フロー

図-6 駐機時の航空機CO<sub>2</sub>排出量算定フロー

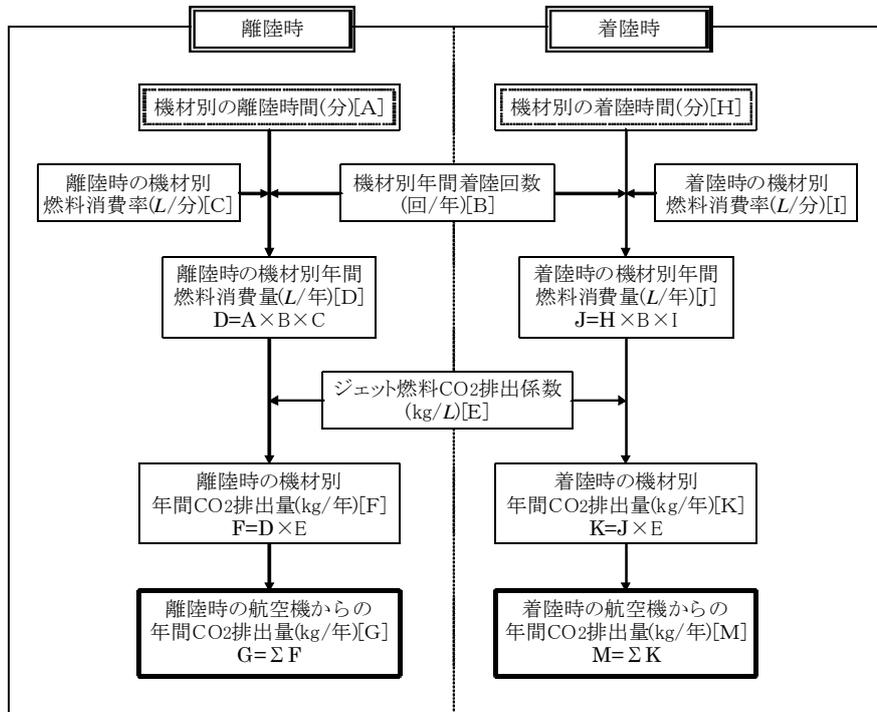


図-8 離陸時・着陸時の航空機CO<sub>2</sub>排出量算定フロー

(2) タキシング（誘導走行）時

タキシング時の CO<sub>2</sub>排出量算定フローを図-7に示す。航空機の機材別に、タキシング所要時間・燃料消費率・CO<sub>2</sub>排出係数を乗じ和を取ることタキシング時の CO<sub>2</sub>排出量を算出する。

(3) 離陸時・着陸時

離陸時及び着陸時の CO<sub>2</sub>排出量算定フローを図-8に示す。航空機の機材別に、離・着陸時間・燃料消費率・CO<sub>2</sub>排出係数を乗じ和を取ること離・着陸時の CO<sub>2</sub>排出量を算出する。1回あたりの離陸時間と着陸時間については、滑走路処理容量を計算する際の標準的な滑走路占有時間を準用しそれぞれ1.3分と1.0分とした。

(4) 航空機の区分と燃料消費率

今回 CO<sub>2</sub>排出量算定を行う航空機の機材区分とその区分別に設定した離着陸時の燃料消費率を表-2に示す。離陸時の燃料消費率は着陸時の約3～4倍である。

表-2 設定した機材区分と燃料消費率

機材区分		燃料消費率(L/時)		設定根拠(機材・燃料消費率(L/時))		
		離陸時	着陸時	機材	離陸時	着陸時
ワイドボディ機	B747	42,138	11,178	B747-400	42,138	11,178
	B777	35,082	8,613	B777	35,082	8,613
	その他ワイドボディ機	15,327	4,302	A300-600	22,329	6,138
				A300	21,411	5,787
				MD90	9,477	2,871
				MD81	11,880	3,450
MD87	11,538	3,267				
セミワイドボディ機	21,888	5,850	B767-300	21,888	5,850	
全ナローボディ機	9,459	2,619	A320/B737	9,459	2,619	
全コピューター機	3,279	953	SAAB340	3,279	953	

4. 空港毎のCO<sub>2</sub>排出量と比較分析

4.1 対象空港と入手データ

上の3. で設定した CO<sub>2</sub>排出量算定方法を用いて、新千歳空港、成田国際空港、関西国際空港、広島空港及び宮崎空港の5空港を対象に CO<sub>2</sub>排出量を算定した。各空港から協力を得て入手したデータ項目を表-3に示す。

表-3 CO<sub>2</sub>算定の対象とした空港と入手データ

		新千歳	成田	関空	広島	宮崎
気象データ		◎	◎	◎	◎	◎
空港活動量(着陸回数、旅客数など)		◎	◎	◎	◎	◎
航空機関連	機材区分別 発着回数	○	◎	○	○	◎
	機材区分別 APU使用時間	△	△	◎	-	○
	機材区分別 GPU使用時間	○	◎	△	◎	-
	機材区分別 GPU使用率	○	◎	◎	-	-
	APUの最低使用時間	○	◎	◎	-	-
	機材区分別 タキシング時間	○	◎	◎	◎	-
施設関連	空港全体 エネルギー使用量	◎	◎	◎	◎	◎
	代表施設1 エネルギー使用量	◎	-	◎	◎	◎
	代表施設2 エネルギー使用量	◎	-	-	◎	◎
車両関連	車両エネルギー使用量	◎	◎注	◎	◎	◎
	保有車両台数	◎	◎	◎	◎	◎
廃棄物関連	焼却ごみ(全体)	◎	◎	◎	◎	-
	(うち廃プラ分)	◎	-	◎	-	-
	不燃ごみ	◎	-	◎	◎	-
	リサイクル分	◎	◎	◎	◎	-

「◎」各空港からの提供データをそのまま評価算定に引用  
「○」各空港からの提供データを基に評価算定用の数値を算定  
「△」各空港からの提供データがなかったが別途推計  
「-」各空港からの提供データがなかったためデフォルト(標準)値を設定  
注：空港会社の所有車両のみ(それ以外のGSE車両は含まれない)

#### 4.2 CO<sub>2</sub>排出量の排出源別割合

各空港からのCO<sub>2</sub>排出量の排出源別割合を図-9に示す。全ての空港において航空機からのCO<sub>2</sub>排出量が最も多く、空港全体排出量の概ね5～7割を占めている。

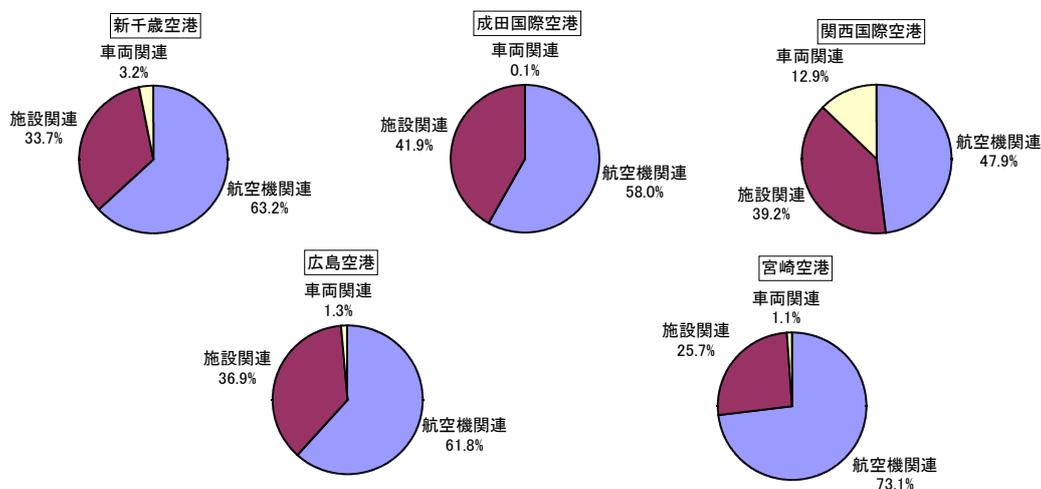


図-9 各空港からのCO<sub>2</sub>排出量の排出源別割合

注) 2002～2006年度平均データ (宮崎空港は2005～2006年度の平均)

#### 4.3 航空機の運航モード別CO<sub>2</sub>排出割合

航空機起源CO<sub>2</sub>排出量について、各空港の運航モード別割合を図-10に示す。各空港とも離陸時における排出量が最も多く概ね5～6割を占めている。

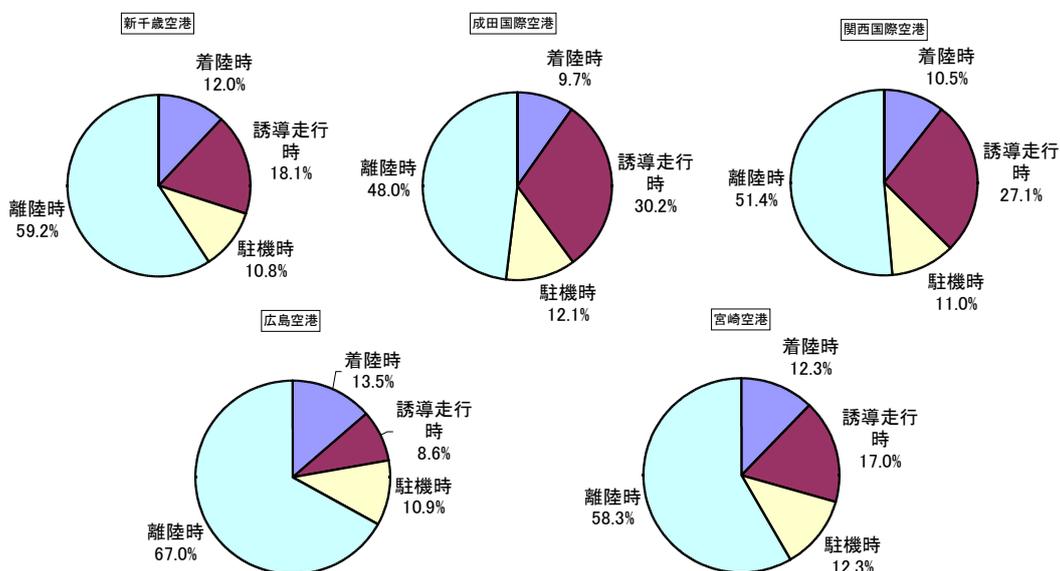


図-10 航空機起源CO<sub>2</sub>排出量の運航モード別割合

注) 2002～2006年度平均データ (宮崎空港は2005～2006年度の平均)

#### 4. 4 CO<sub>2</sub>排出量と着陸回数・旅客者数

各空港からの年間のCO<sub>2</sub>排出量（車両起因を除く）と着陸回数の関係は、図-11に示すとおりかなり高い相関がある。また、年間のCO<sub>2</sub>排出量（車両起因を除く）と旅客者数との間にも、図-12に示すとおりかなり高い相関がある。

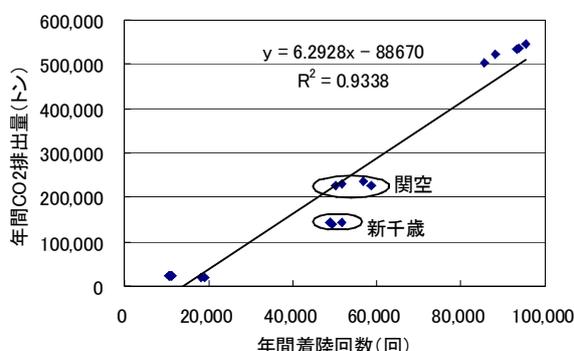


図-11 空港別のCO<sub>2</sub>排出量と着陸回数

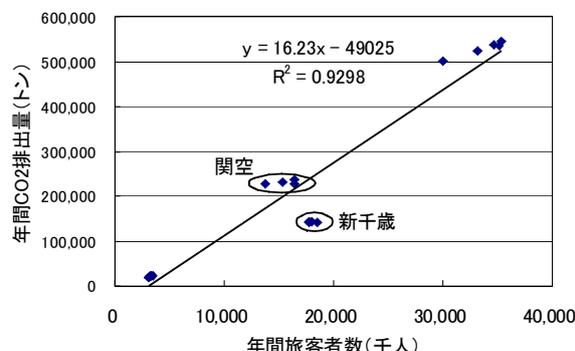


図-12 空港別のCO<sub>2</sub>排出量と旅客者数

図-11と図-12を見ると、新千歳空港と関西国際空港とは、横軸にとった年間着陸回数と年間旅客者数がほぼ同じであるにも関わらず、年間のCO<sub>2</sub>排出量には大きな差がある。これは一つには、離着陸する航空機の機種に起因している。平成18年度の離着陸航空機の機種別比率（図-13）を見ると、道内や東北各県との路線を持つ新千歳空港は小型機（ナローボディ機、コミューター機）が半分近くを占めており、関西国際空港とは大きく異なることが分かる。この他、関西国際空港は国際空港としての機能を有する分、ターミナル施設からのCO<sub>2</sub>排出量も多くなることも要因の一つと考えられる。

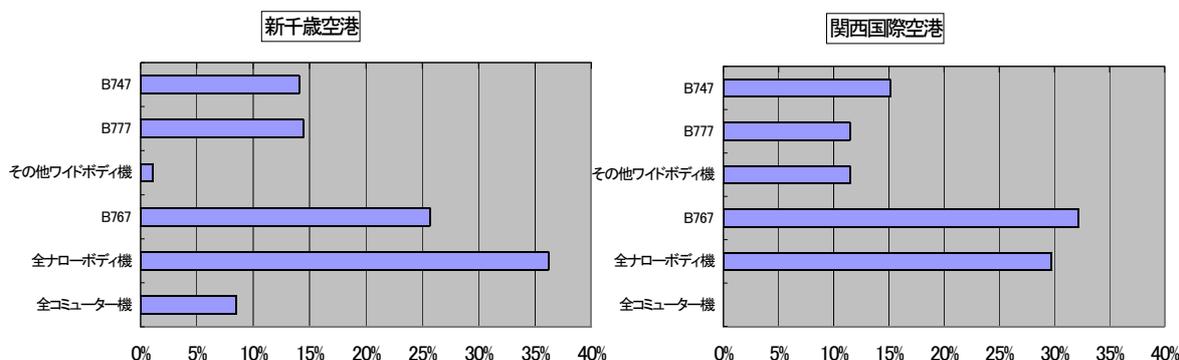


図-13 新千歳空港と関西国際空港の離着陸航空機の機材別比率（2006年度）

#### 4. 5 CO<sub>2</sub>排出量の季節変動

新千歳空港について、空港施設、車両それぞれのCO<sub>2</sub>排出量の季節別割合を図-14に示す。寒冷地空港であるため当然のことながら冬季（12月～2月）の割合が多く、特に車両については除雪車が稼働するため年間の半分近くを占めている。

宮崎空港について同様に図-15に示す。温暖地であるため空調が多く稼働する夏季（6月～8月）の施設起源CO<sub>2</sub>排出量がやや多いものの、車両については季節変動がほとんどない。

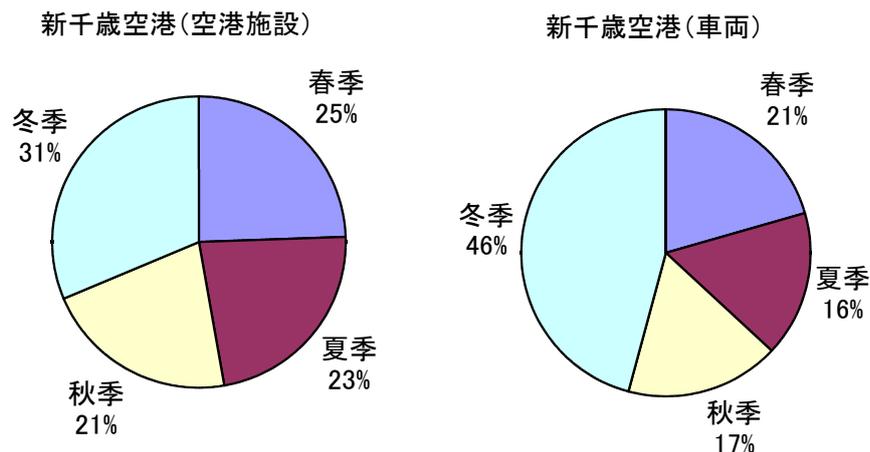


図-14 新千歳空港からのCO<sub>2</sub>排出量の季節別割合

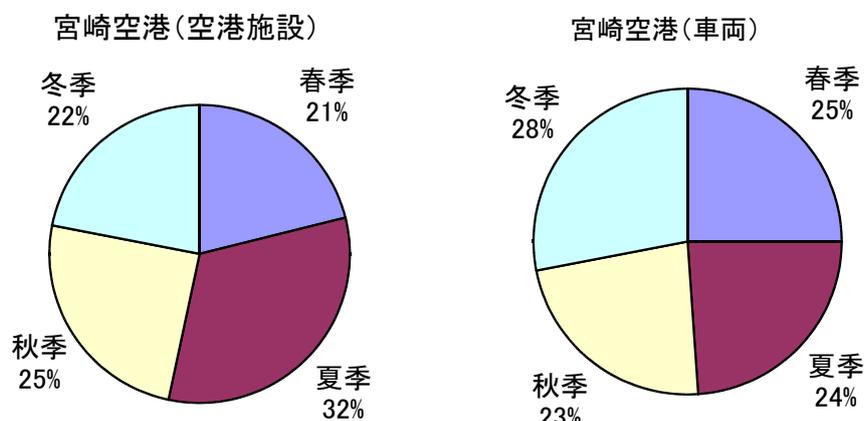


図-15 宮崎空港からのCO<sub>2</sub>排出量の季節別割合

## 5. CO<sub>2</sub>排出量の削減方策

### 5.1 空港が実施している省エネ事例に関する調査

空港からのCO<sub>2</sub>排出量を削減するための方策を検討するにあたり、まず、省エネ法（「エネルギー使用の合理化に関する法律」に基づくエネルギー管理指定工場に指定されている空港施設のうち、比較的大規模な空港の施設管理会社（空港会社、ビル会社）にアンケート調査を実施し、省エネの事例を把握することとした。対象は、仙台空港ビル(株)、成田国際空港(株)、日本空港ビルデング(株)（注：羽田空港のターミナルビル会社）、中部国際空港(株)、関西国際空港(株)、大阪国際空港ターミナル(株)、福岡空港ビルディング(株)の7空港の施設管理会社であり、調査した項目は以下の通りである。

- ・エネルギー管理指定工場の指定状況（経緯、対象範囲）
- ・過去のエネルギー消費量等の推移（エネルギー消費量、CO<sub>2</sub>排出量の推移、原単位当たりのエネルギー消費量、原単位の設定方法）

- ・効果的な省エネ・温室効果ガス排出削減対策
- ・関連事業者等との協力に関する工夫点、有効であった方策
- ・他空港への省エネに関するアドバイス
- ・行政や研究機関等への要望
- ・その他（自由記述）

## 5.2 エネルギー消費原単位の設定事例

省エネ法に基づくエネルギー管理指定工場は、エネルギー消費原単位について年平均1%以上低減を図ることが目標とされている。そのエネルギー消費原単位について、回答があった空港での設定方法を表-4に示す。施設の単位面積あたりで設定している空港が多いが、省エネ法の対象に含まれる施設範囲に応じて、設定方法を独自に工夫している空港もある。

表-4 エネルギー消費原単位の設定方法

仙台空港ビル(株)	施設の単位面積あたりで原単位を設定
成田国際空港(株)	「建物延床面積+航空機発着回数」あたりで原単位を設定
日本空港ビルデング(株)	ターミナル年間利用航空客1万人あたりで原単位を設定
中部国際空港(株)	空港内の4地区について各々エネルギーと密接な関係を持つ値を分母として算出。4つの原単位を合算して空港全体の原単位に設定している。 1. 旅客ターミナル地区：延床面積 (㎡) /100 2. 貨物地区：延床面積 (㎡) /100 3. 航空保安施設：航空機発着回数 (千回) 4. 給油施設：給油量 (万kl)
関西国際空港(株)	施設の単位面積あたりで原単位を設定
福岡空港ビルディング(株)	施設の延べ床面積あたりで原単位を設定

## 5.3 省エネ・CO<sub>2</sub>排出削減の対策事例

各空港で取り組んでいる対策では、空調・照明に関わる取り組みが多い。

関西国際空港で取り組んでいる「情報システムを利用した、旅客ターミナル空調の効率化」は、フライト情報を利用して航空機発着に応じ空調運転時間・場所を制御するシステムで、平成18年度の省エネルギー優秀事例全国大会「経済産業大臣賞」を受賞した。また、成田国際空港は第2旅客ターミナルビルで BEMS（ビル・エネルギー管理システム）を導入している。

空調については、各空港ともインバーター化、中間期（春・秋）の間引き運転、クールビズ・ウォームビズと組み合わせた温度設定などの取り組みが行われている。また、空港ターミナルビルはデザイン的に大きな窓ガラスが利用されていることが多いため、窓ガラスに断熱ガラスを利用したり断熱フィルムを貼付する取り組みも見られる。

照明に関する取り組みでは、人感センサー・昼光（照度）センサーの導入、省エネ型照明機器の導入が見られた。

#### 5.4 航空機起因CO<sub>2</sub>排出量の削減方策とその効果試算

空港からのCO<sub>2</sub>排出量のうち最も多い航空機起因の排出量について、削減方策を検討し5空港（新千歳、成田、中部、関西、広島、宮崎）を対象に削減効果を試算した。

##### (1) 航空機起因CO<sub>2</sub>排出量の削減方策

航空機からのCO<sub>2</sub>排出量を以下の式のとおり変形する。

$$\begin{aligned} \text{CO}_2\text{排出量} &= \frac{\text{CO}_2\text{排出量}}{\text{エネルギー量}} \times \frac{\text{エネルギー量}}{\text{移動距離}} \times \frac{\text{移動距離}}{\text{トリップ数}} \times \text{トリップ数} \\ &= A \times B \times C \times \text{トリップ数} \end{aligned}$$

この式から、A、B、Cの値を小さくすることにより、トリップ数を減らすことなく航空機からのCO<sub>2</sub>排出量を削減することができる。

Aの値を小さくすることは、消費エネルギー当たりのCO<sub>2</sub>排出量を減らすことであり、このためには(2)で述べるように、エプロン駐機中の電源供給源をAPUからGPUに切り替えGPUの利用率を向上させる必要がある。

Bの値を小さくすることは、移動距離当たりの消費エネルギー量を減らすことであり、このためには(3)で述べるように、低燃費航空機の導入を図ることが必要である。

Cの値を小さくすることは、トリップ当たりの移動距離を減らすことであり、今回の研究の対象としている空港内においては、(4)で述べるように誘導走行距離を縮減することが必要となる。

##### (2) GPU（地上電源装置）の利用促進

エプロン駐機中の機内整備等の際に必要な電源供給をAPU（補助動力装置）からGPU（地上電源装置）に切り替えることによりCO<sub>2</sub>排出量を大幅に削減することができ、例えばボーイング777型機の場合、単位時間のCO<sub>2</sub>排出量は約1/20になる。

対象5空港のうち、GPU利用率（駐機した全航空機のうちGPUを利用した航空機の割合）が最も高いのが成田国際空港であり平成18年度は87%である。このGPU利用率が一律90%となった場合のCO<sub>2</sub>排出量削減率を試算したところ、航空機起因CO<sub>2</sub>排出量が0.8%～4.2%削減できる結果となった（表-5）。

表-5 GPU使用率実績及びGPU利用促進による航空機起因CO<sub>2</sub>の削減率

	新千歳 空港	成田 空港	関西 空港	広島 空港	宮崎 空港
H18年度のGPU使用率 <sup>注1)</sup>	56%	87% <sup>注2)</sup>	69%	50% <sup>注3)</sup>	0%
GPU使用率90%時のCO <sub>2</sub> 削減率	-4.2%	-0.8%	-1.2%	-1.3%	-2.8%

注1)各空港からの回答データの全機材平均値

注2)GPU設置スポットのみ対象

注3)GPU使用率データが入手不可能であったため50%と仮定

なお、コミューター機については、本排出量算定の対象外とした

##### (3) 低燃費型航空機の導入

現在開発中の最新鋭中型航空機であるボーイング787は、環境パフォーマンスに優れ、ボーイング社の公表資料によると、現行の中型機（ボーイング767）と比較して20%の

CO<sub>2</sub>排出量削減効果がある。

そこで、セミワイドボディ機と（B747と B777以外の）ワイドボディ機が、ボーイング787に代替された場合のCO<sub>2</sub>排出量削減率を試算したところ、航空機起因CO<sub>2</sub>排出量が4.5%～8.0%削減できる結果となった（表－6）。

表－6 低燃費型航空機導入による航空機起因CO<sub>2</sub>排出量の削減率

	新千歳 空港	成田 空港	関西 空港	広島 空港	宮崎 空港
H18年度の航空機起因CO <sub>2</sub> 排出量	93,544	310,067	130,191	15,779	14,029
低燃費型航空機導入後の排出量	91,867	300,488	126,568	15,650	13,796
排出量削減率	-5.4%	-4.5%	-8.0%	-5.6%	-5.3%

(排出量単位:トン)

#### (4) 誘導走行距離の縮減

誘導走行距離は、既に供用している空港においては縮減の余地は小さいが、例えば今後ターミナルを新設・移転する空港においては、適切な位置にスポットを設置することで誘導走行距離を縮減できる。それ以外の空港でも、安全面に配慮しつつ、航空機のタキシングルートの新設定やスポットの新設、さらにはトーイングトラクターによる牽引距離の拡大等により誘導走行距離を縮減できればCO<sub>2</sub>排出量を削減できる。

誘導走行距離が現在より10%縮減できた場合のCO<sub>2</sub>排出量削減率を試算したところ、航空機起因CO<sub>2</sub>排出量が0.8%～3.1%削減できる結果となった（表－7）。

表－7 誘導走行距離縮減による航空機起因CO<sub>2</sub>排出量の削減率

	新千歳 空港	成田 空港	関西 空港	広島 空港	宮崎 空港
H18年度の航空機起因CO <sub>2</sub> 排出量	93,544	310,067	130,191	15,779	14,029
誘導走行距離縮減後の排出量	91,867	300,488	126,568	15,650	13,796
排出量削減率	-1.8%	-3.1%	-2.8%	-0.8%	-1.7%

(排出量単位:トン)

## 6. 今後の課題

### 6.1 CO<sub>2</sub>排出量算定精度向上のためのデータ整備

CO<sub>2</sub>排出量削減方策を導入しその効果を評価するためには、適切にCO<sub>2</sub>排出量を算定する必要があり、この視点から以下に示すデータについて正確な把握や設定方法の一層の工夫が今後必要である。

#### (1) 航空機の離着陸時間

航空機の離着陸にかかる時間について、今回の算定方法では一律に設定を行っており、CO<sub>2</sub>排出量削減効果を比較検討するにあたって大きな問題はないと考える。ただ、空港によっては周辺の地形条件等により、他空港と比べより長いまたは短い時間で離着陸を行う場合もあるため、より高い精度でCO<sub>2</sub>排出量を算定したい場合は、各空港で飛行のプロファイルなどを参考として設定することが必要である。

#### (2) タキシング（誘導走行）時間

タキシング時間について、今回は各空港がそれぞれ工夫（航空会社へのヒアリングな

ど)をしてデータを収集しており、今後とも引き続き収集方法や設定・算定方法の工夫が必要である。

### (3) APU 使用時間

APU 使用時間については、把握が困難な項目の一つであり、特にオープンスポットも含めた利用状況については、正確なデータの収集が難しい。この点については、空港からのアンケート回答に中でも排出量算定上の課題として挙げられており、今後、簡易でありながら概ね妥当なデータを把握するための標準的な方法について検討することも必要である。

### (4) 新型機の排出係数

ICAO (国際民間航空機関) の“ENGINE EXHAUST EMISSION DATA BANK”は、基本的に現在運航している航空機の排出係数を公表しており、ボーイング787のような運航前の新型機については対象外となっている。したがって、新型機導入による CO<sub>2</sub>排出量削減効果は航空機メーカーの発表データから算定するしかないが、より正確な効果算定ができるよう運航前航空機についても ICAO から排出係数を公表することが望まれる。

### (5) GSE 車両の活動量及び排出係数

空港での車両起源 CO<sub>2</sub>排出量の大部分を占める GSE 車両について、現状で排出係数は設定されておらず、せつかく低公害・低燃費型の車両を導入してもその効果を適切に把握することができない。以上の点については、空港からのアンケート回答においても指摘されており、GSE 車両の活動量及び排出係数を適切に把握するための手法やデータ整備を早めに進める必要がある。

## 6.2 CO<sub>2</sub>排出量削減方策の実施

### (1) 航空機起因 CO<sub>2</sub>排出量の削減

空港からの CO<sub>2</sub>排出量を削減するためには、排出源としても最も多い航空機からの排出量を削減することが必要不可欠である。一方、航空機の排出削減対策は主に航空会社に依存しているため、空港環境計画を策定する立場にある空港管理者は、十分に航空会社と連携しながら5.5で示した取り組み (GPU 導入と利用促進、低燃費型航空機の導入促進、誘導走行距離の縮減) を進める必要がある。

特に、GPU 導入については、平成19年度から「エネルギー使用合理化事業者支援事業」として、GPU が展開されていない空港において新たに GPU を導入する場合に、必要な経費の1/3を補助する制度を開始している。このような事業も活用しつつ、各空港で GPU 導入の促進するとともに、成田国際空港や海外の空港 (コペンハーゲン空港、ハンブルグ空港等) でも行っている APU 使用制限についても検討していく必要がある。

なお、海外の空港での対策例としては、ヒースロー空港において誘導走行距離短縮のため誘導路を再設計し、また、ガトウィック空港やコペンハーゲン空港ではトーイングトラクターを活用することにより航空機の地上走行時の CO<sub>2</sub>排出量を削減している。

### (2) 空港施設の省エネ

施設の省エネについては、今回のアンケートの結果、各空港ともハード・ソフト両面に

わたり積極的に取り組んでおり、今後とも継続していく必要がある。

また、断熱化や自然エネルギー利用といった建築物を対象にした最新の省エネ技術を積極的に取り入れるとともに、省エネ改修にかかる費用を光熱水費の削減分で賄う ESCO 事業 (Energy Service Company) の活用も検討していくべきであろう。

### (3) 車両起因 CO<sub>2</sub>排出量の削減

車両については、低公害・低燃費型の GSE 車両の導入が主な対策となるが、6.1(5)で述べたとおり、その導入効果を把握するためのデータ整備が必要である。

また GPU と同様、GSE 車両についても、「エネルギー使用合理化事業者支援事業」として、従来車両より燃費効率の良い GSE 車両を導入する場合に、必要な経費の1/3を補助する制度を平成19年度から開始している。このような施策を積極的に活用するとともに、エコカー用インフラ (エコステーション、急速充電設備など) を空港に整備することで、GSE 車両のみならず空港にアクセスする車からの CO<sub>2</sub>排出量削減を進めていくことが重要である。

## 7. おわりに

空港からの CO<sub>2</sub>排出量の算定方法と削減方策を中心に、国総研空港研究部でこれまで進めてきた研究成果の概要を紹介した。

紙面の都合上、本講演集で割愛した排出係数などの数値詳細については、後日国総研資料としてとりまとめ公表する予定としている。

## 謝辞

本研究の実施にあたり、CO<sub>2</sub>排出量算定のため、新千歳空港事務所、成田国際空港(株)、関西国際空港(株)、広島空港事務所及び宮崎空港事務所から多くのデータ提供をいただいた。また、省エネに関する取り組みに関して、仙台空港ビル(株)、成田国際空港(株)、日本空港ビルデング(株)、中部国際空港(株)、関西国際空港(株)、大阪国際空港ターミナル(株)及び福岡空港ビルディング(株)にはアンケート調査に協力いただいた。ここに記して謝意を表する。

閉鎖性水域における環境再生の実現に向けて

－三河湾流域をモデルとして－

環境研究部長

岸田 弘之

閉鎖性水域における環境再生の実現に向けて  
－三河湾流域をモデルとして－

環境研究部長 岸田弘之

## 1. はじめに

国土利用形態の変貌に伴い、流域における物質循環の動態が大きく変化してきている。一方、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が指摘されている。その主要な要因の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循環の動態変化にあり、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。海に囲まれ、多くの閉鎖性水域を持つ我が国にとって、河川水が流れ込む水域の環境保全は重要であり、国土利用形態の変化との関係の解明および健全な水域環境の回復が喫緊の課題である。

## 2. 研究の概要

研究フィールドの主対象として、流域・河川を含む陸域に関するデータが豊富であり、沿岸海域の環境劣化と課題が明確で、その過程に関するデータも充実している三河湾流域圏（三河湾とその流域）を取り上げた。（図-1 参照）

### ○流域圏情報（陸域）

主要な河川として豊川、矢作川がある

- |                   |                          |                      |
|-------------------|--------------------------|----------------------|
| ・ 豊川              | 幹川流路延長                   | 77km                 |
|                   | 流域面積                     | 724km <sup>2</sup>   |
|                   | 流域人口                     | 69 万人                |
| ・ 矢作川             | 幹川流路延長                   | 118km                |
|                   | 流域面積                     | 1,830km <sup>2</sup> |
|                   | 流域人口                     | 21 万人                |
| ・ 豊川・矢作川の三河湾への流入量 | 約 20 億 m <sup>3</sup> /年 |                      |

### ○流域圏情報（海域）

- |        |                    |        |                    |
|--------|--------------------|--------|--------------------|
| ・ 水域面積 | 604km <sup>2</sup> | ・ 平均水深 | 9.2m               |
| ・ 干潟面積 | 14km <sup>2</sup>  | ・ 浅場面積 | 289km <sup>2</sup> |

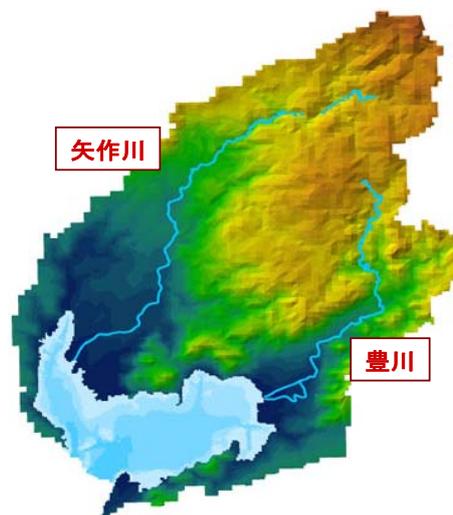


図-1 三河湾流域圏

本研究は以下のサブテーマで構成される。

- ・ 三河湾流域の概況把握
- ・ インパクトとレスポンスに関する分析
- ・ 環境再生の基本的方向等の検討
- ・ 今後推進していく方策の検討

### 3. 三河湾流域の概況把握

#### 3. 1 着目すべき物質の抽出

また、水域生態系と密接な関係を持つという点で着目すべき物質の抽出とその特性について把握した。

##### 3. 1. 1 直接的な影響を受ける生物種の選定

流域・河川の変化がもたらすインパクトによって引き起こされる海域環境のレスポンスの分析に役立てることを目指して、三河湾を対象に、種々のインパクトがもたらす海域変化を抽出し、その影響を受けると考えられる生物種として植物プランクトン、底生生物（アサリ等）、海草類・海藻類（アマモ・コアマモ等）を選定した。

##### 3. 1. 2 生物が必要としている栄養塩類とその形態の整理

抽出した生物種が必要とする栄養塩類として、N、P、Si、Fe、Zn、Mn、Co、Ni を選定し、各物質の形態・必要とする時期・複数の栄養塩類間の量的な最適バランスといった情報を把握した。それらを、枯渇・過剰による海域生態系への影響のレベル・情報の蓄積量といった観点より、N、P、Si の 3 物質に絞り込みを行った。

##### 3. 1. 3 物質の抽出

河川から供給される土砂には無機態リンが吸着しており、出水による大量の土砂の供給があると、吸着する無機態リンが沿岸域に流出し、これが沿岸域の底泥からの溶出に大きな影響を及ぼす。以上より、窒素・リン・シリカ及び微細土砂の 4 つを着目すべき物質として抽出した。

#### 3. 2 物質動態変化と水域への供給変化に関する検討

三河湾流域（陸域）の改変に伴う物質動態の変化と水域への供給量・供給形態の変化に関して検討を行った。

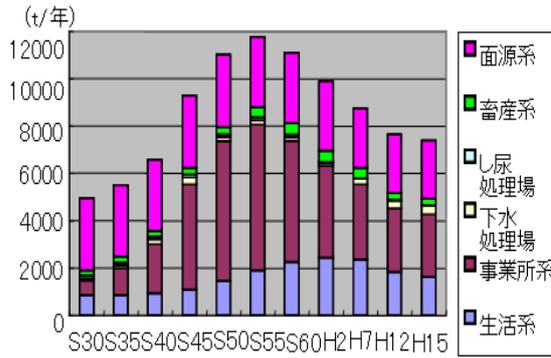
##### 3. 2. 1 栄養塩類供給量の経年変化

3.1 で選定した選定した栄養塩 3 物質について、陸域から三河湾域への昭和 30 年代から現在に至る供給量の経年変化を推計した。（シリカは 2 時点のみ、その他は 5 年毎）

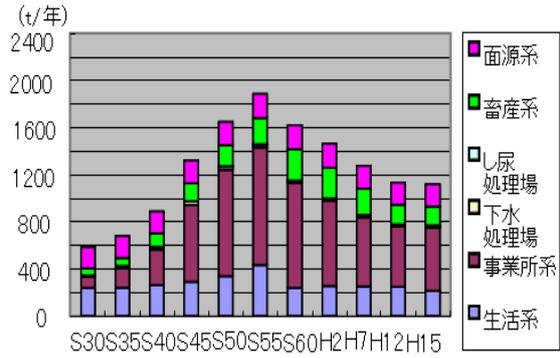
###### （1）陸域から海域への窒素・リンの供給量の経年変化

三河湾へ流入する豊川、矢作川を対象に、原単位法による積み上げによって算定する方法、順流末端地点の水質調査データ及び流量データから算定する方法、既存 L-Q 式を用いて流量データから算定する方法の 3 つの方法を用いて推計を行った。各方法で得られた全体的傾向は次の通りである。

原単位法を用いて、昭和 30 年代から 5 年毎に、豊川・矢作川からの窒素・リンの供給量を算定し、供給量の経年変化の傾向を把握した。その結果、T-N、T-P とともに昭和 55 年をピークとして増加し、その後は浄化対策、排出規制等により減少している。（図-2,3 参照）

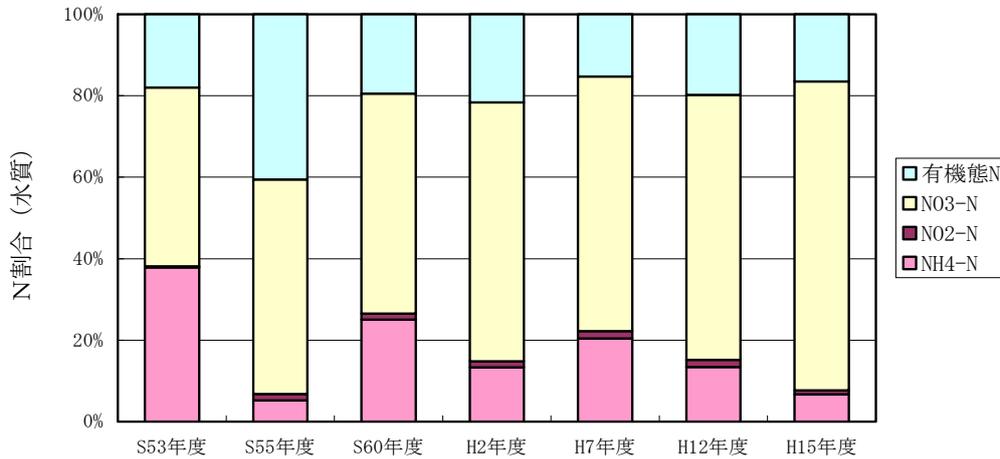


図－2 豊川＋矢作川（順流＋感潮）の負荷量の変化（T-N）



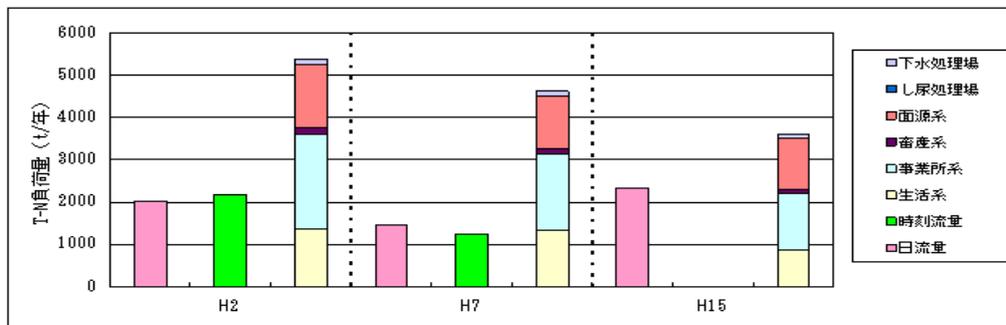
図－3 豊川＋矢作川（順流＋感潮）の負荷量の変化（T-P）

次に、水質調査データから形態別供給量を算定した結果を図－4に示す。これによれば、昭和50年代はNH<sub>4</sub>-N及び有機態窒素の供給量が多い一方、平成15年はNO<sub>3</sub>-Nが増加しており、生活系負荷の処理形態の変化による違いが現れている。



図－4 水質データからの算出した形態別供給量

さらに、既存L-Q式を用いた方法では、豊川・矢作川ともにT-N、T-Pいずれについても、豊水以上の流量の影響が大きいという結果が得られた。L-Q式を用いた方法と原単位法による排出負荷量を比較すると、同等の負荷量となっておらず、河川毎に変動が大きく、一定の傾向がみられなかった。算定方法の精度向上に向けた検討の必要が示唆された。



図－5 矢作川における負荷量の算定（T-N）

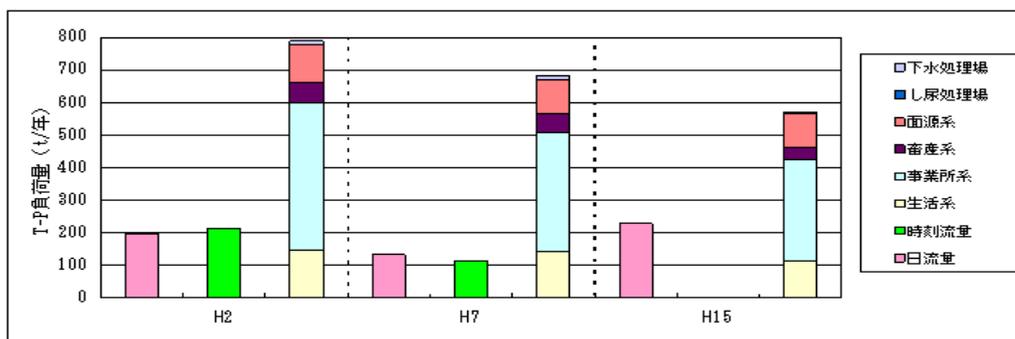


図-6 矢作川における負荷量の算定 (T-P)

(図-5, 6 共に、左 2 本は水質調査結果をもとにした L-Q 関係式で算定、右は原単位法により算定した順流域の負荷量)

### (2) 陸域から海域へのシリカ供給量の経年変化<sup>1)</sup>

H19 年(9 月)調査によると、豊川の溶存態ケイ酸濃度の縦断変化を見ると、ダム下流で上流に比べてケイ酸濃度は減少しているが、さらに下流ではケイ酸濃度は増加しており、河川から海域へのケイ酸供給量減少に有意な影響を与えているとは認められなかった。また、豊川、沿岸海域のケイ酸濃度は過去と比較しても経年的な濃度はほとんど生じておらず、窒素等他物質と比べて相対的な量は低下したものの、濃度は高く、枯渇の可能性は低いことがわかった。

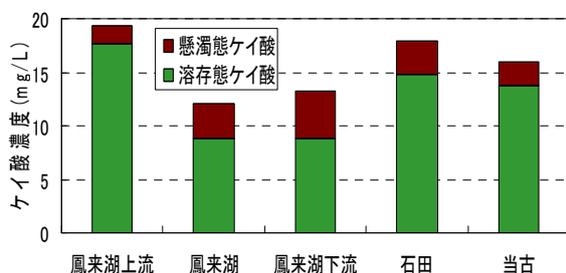


図-7 陸域から海域へのシリカ供給量の縦断変化 (豊川)

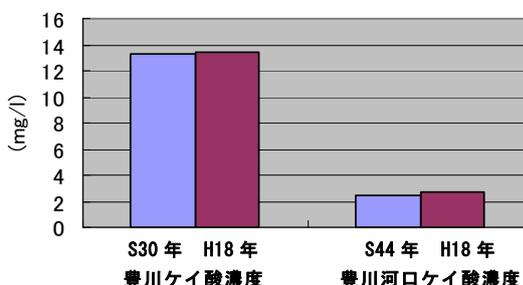


図-8 陸域から海域へのシリカ供給量の経年変化 (豊川)

### (3) 土砂供給量の経年変化

豊川、矢作川を対象に、河道特性の変化による河川から海域へ供給される土砂量の昭和30年代からの経年変化を把握するため、平均河床高、河床勾配及び河床材料の経年変化を把握するとともに、無次元掃流力による土砂移動の評価、河床変動計算による河川からの供給土砂量の評価を行った。(図-9, 10 参照)

その結果、矢作川においては昭和40年頃からの砂利採取に伴う河床低下により掃流力が低下し、海域への供給土砂量も減少した。また、豊川においては、それほど大きな変化は見られなかった。

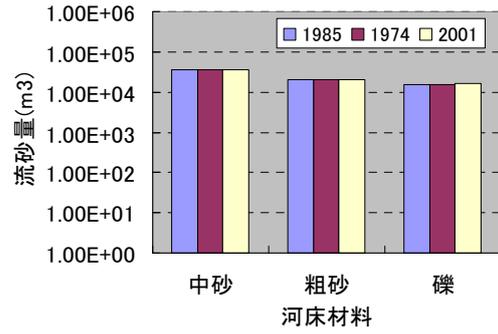
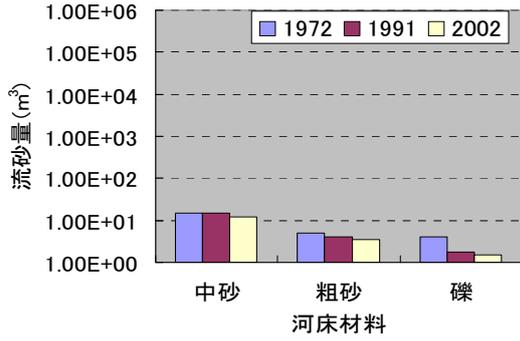


図-9 海域に放出される土砂量の経年変化 (矢作川)

図-10 海域に放出される土砂量の経年変化 (豊川)

#### 4. インパクトとレスポンスに関する分析

##### 4. 1 水域におけるレスポンスおよび流域・河川等からのインパクトの把握 <sup>2)3)4)</sup>

既往の文献・データの整理とヒアリング等を通じて、三河湾の水質、赤潮、ハビタット、生態系など、三河湾域の環境に関わるレスポンスの経年変化状況と、埋立等の直接的な人為的改変および 3.2 で把握した物質供給量の変化等を含む、諸インパクトの作用状況を網羅的に把握した。

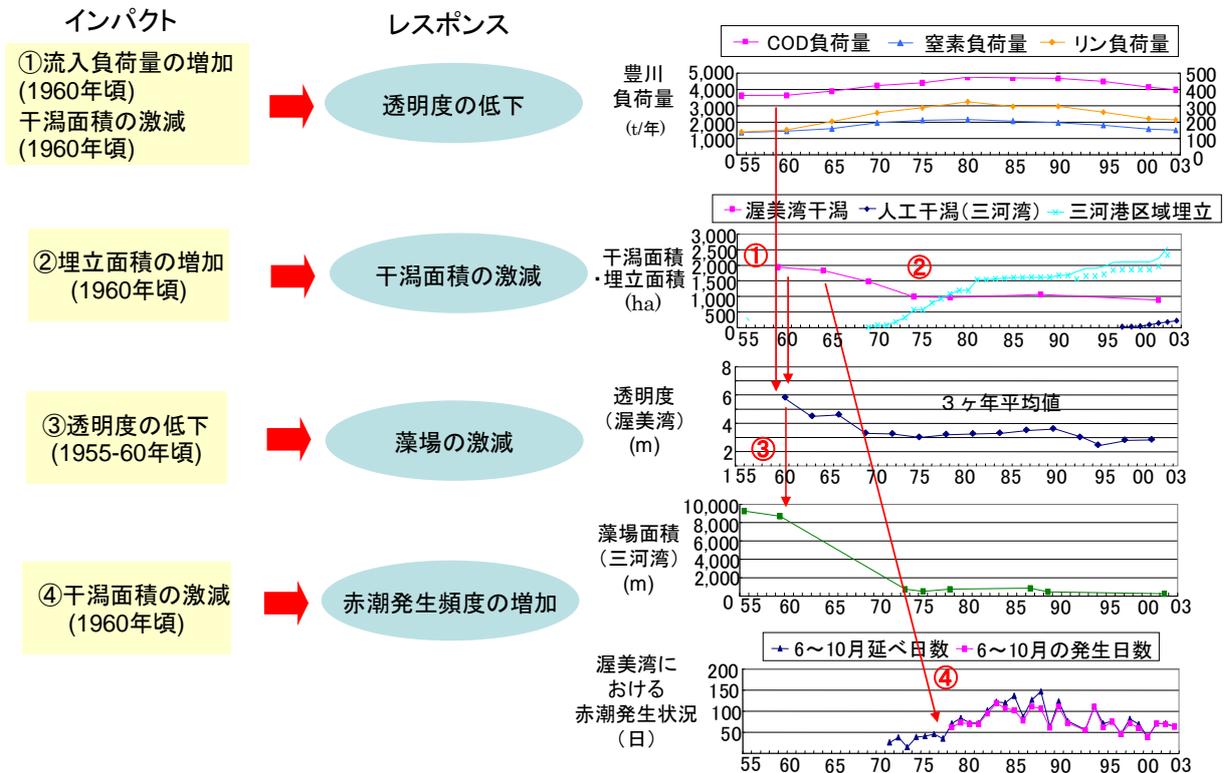


図-11 三河湾の環境変化 (水質・ハビタット・赤潮発生)

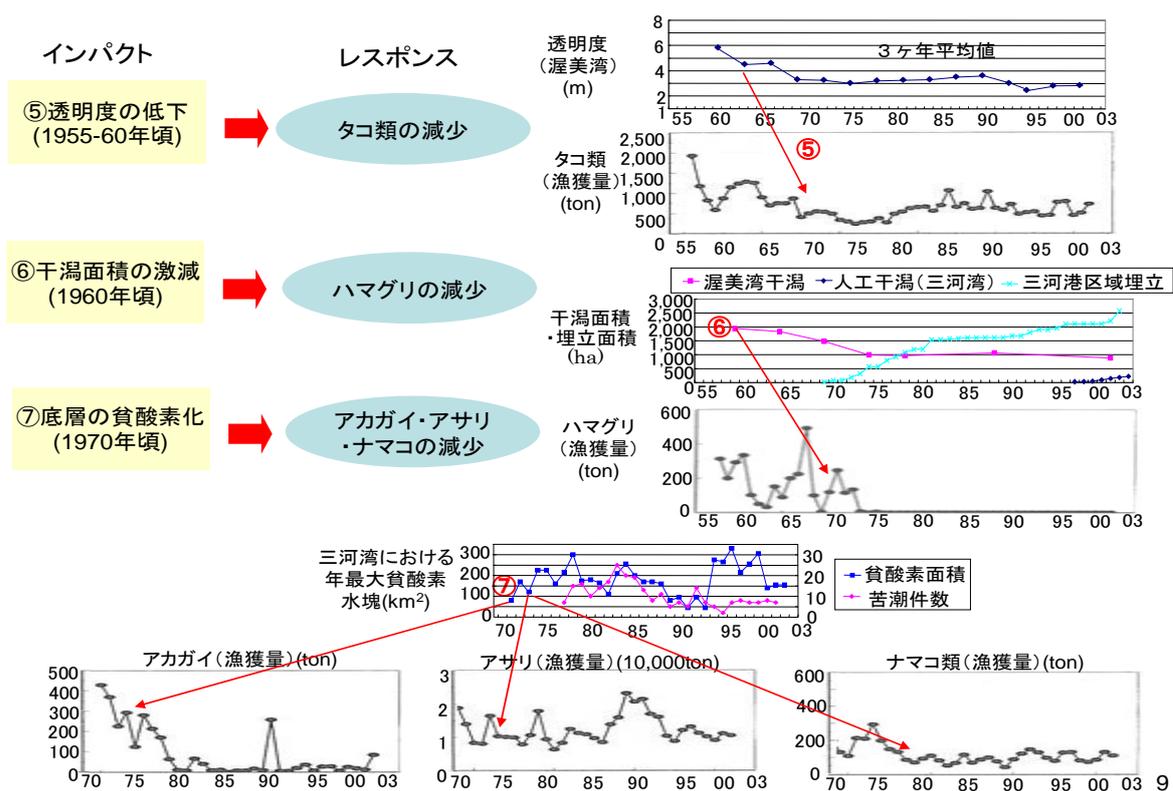


図-1 2 三河湾の環境変化（沿岸生態系へのレスポンス）

#### 4. 2 インパクト-レスポンス分析

上記で得られた知見から、インパクト-レスポンスの関係を時系列的に分析し、因果関係特定のための基本情報として整理した。さらに、各現象間の関連性を気負うデータや一般的な知見をもとに整理して、三河湾の現状を表す連関図を図-13に示すように作成した。

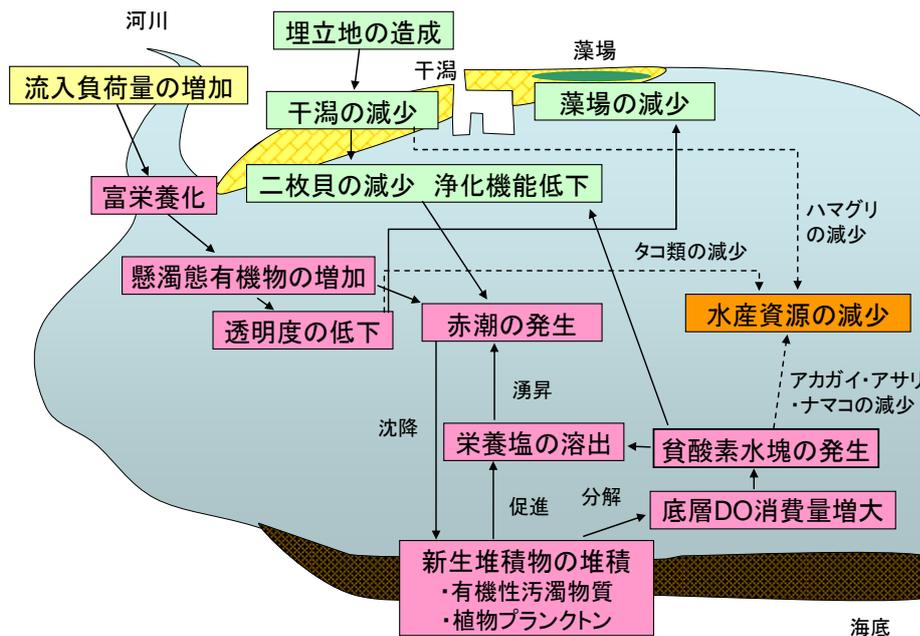


図-1 3 インパクト-レスポンス連関図

### 4. 3 環境劣化過程の分析

#### 4. 3. 1 環境劣化過程を説明する仮説の提示 <sup>5)6)7)</sup>

以上の検討結果より、三河湾における環境劣化過程を説明できる仮説を作成した。即ち、昭和 30 年代からの流入負荷の推移、干潟・浅場・藻場面積の変化、赤潮・貧酸素水塊の発生から、特徴的な段階として図-14 に示す 4 つのフェーズに区分した。

	流入負荷	干潟・浅場・藻場面積	赤潮・貧酸素水塊の発生
フェーズ1 ～1965年	少ない	広い	少ない
フェーズ2 1965年～ 1970年	増加	やや減少	少ない
フェーズ3 1970年～ 1975年	最大	埋立・浚渫等により大幅に減少	顕在化
フェーズ4 1975年～ 現況	減少	少ない状態を維持	顕在化を継続

図-14 三河湾環境劣化過程の仮説

三河湾は、流入負荷の増大、干潟・浅場・藻場の減少により、貧酸素水塊の発生が顕在化し、二枚貝類の減少、干潟・浅場の浄化機能の低下、赤潮の発生、そして貧酸素化の助長といった図-15 示すような負のスパイラルに陥っている。

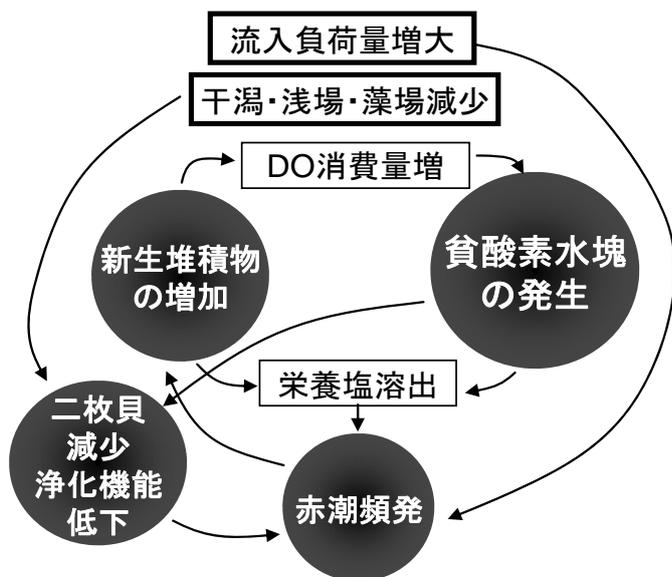


図-15 負のスパイラル

#### 4. 3. 2 水質シミュレーションによる仮説の妥当性の検討<sup>8)</sup>

仮説の定量評価及びその不確実性に関する検討のために、水質モデルによって各フェーズにおける物質循環量を評価した。

##### (1) 水質モデルの構造と概要

使用したモデルは、流動計算と水質計算から構成される。構築にあたっては、最低限の必要項目において物質循環像の変化が把握でき、施策の方向性を議論できるレベルになるように考慮した。シミュレーション計算の概要を表-1に、計算領域等について図-16に示す。

表-1 水質モデルの構造と概要

流動計算+水質計算	
計算範囲	三河湾全域
計算格子	300m
鉛直層分割	最大3層(上層0~5m, 中層5~10m, 下層10m~)
流動計算	
タイムステップ	5.0秒
対象季節	夏季・冬季(計算開始から150日目)
淡水流入量	各年代の夏季・冬季平均流量
外海との境界条件	M2分潮の振幅(53.0cm)
水温・塩分の初期値、境界条件	公共用水域水質測定結果を用いた。境界値は、境界に近い地点の調査地点より設定
諸係数	既往計算事例より渦動粘性係数、渦拡散係数、摩擦係数を設定

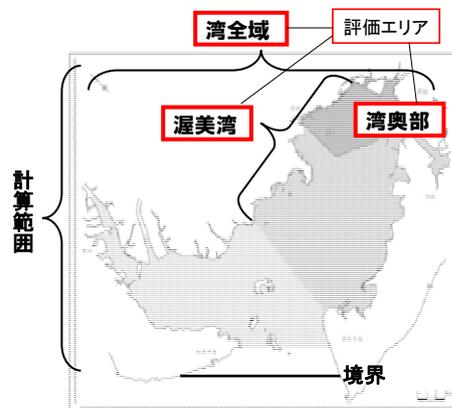


図-16 計算範囲、評価エリア、外界との境界設定位置

## (2) 水質モデルの基本構成

使用したモデルは、流動計算モデルと水質計算モデルから構成され、流域・河川から供給され流入有機物や栄養塩類等の移流・拡散、植物プランクトン及び動物プランクトンの生物生産等による反応、有機物の分解・沈降および底泥からの溶出・酸素消費を考慮している。本モデルの基本構成を図-17に示す。

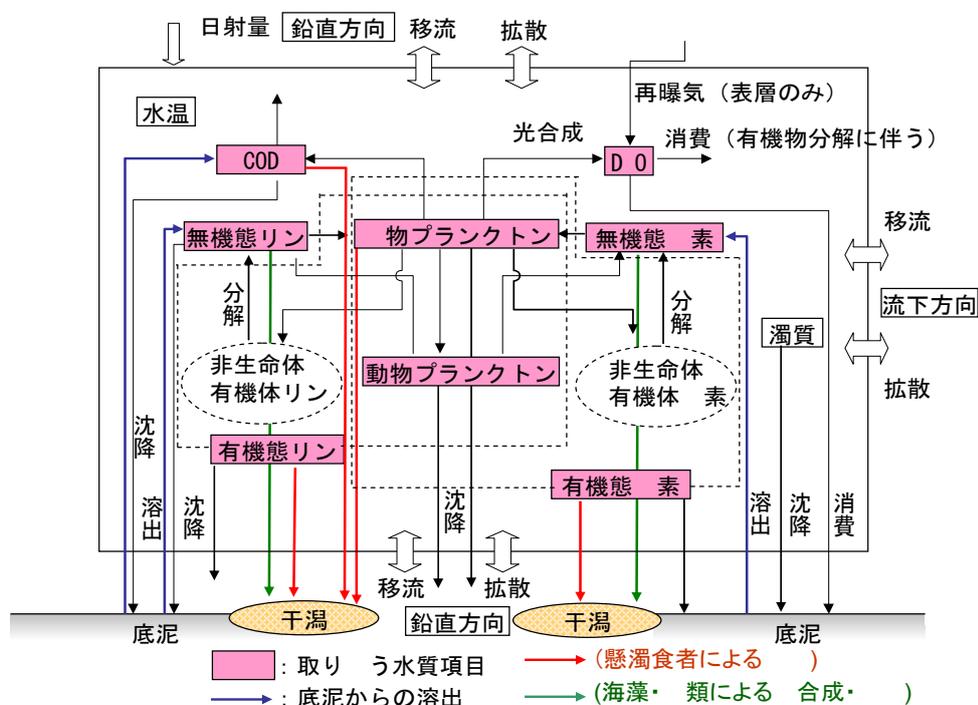
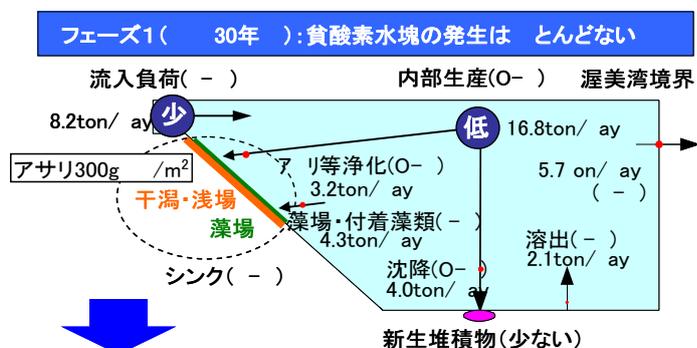


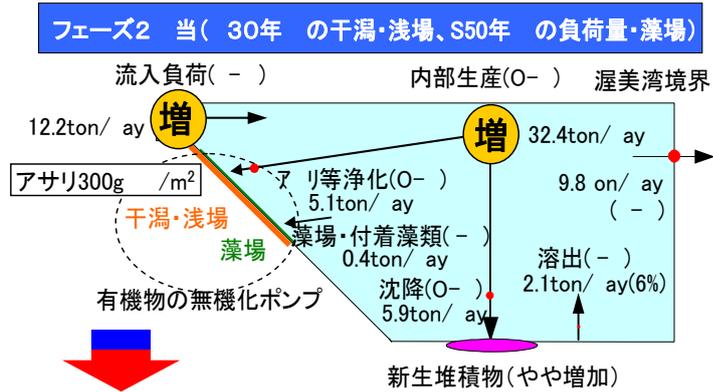
図-17 水質計算モデルの基本構成

## (3) 各フェーズにおける物質循環量

貧酸素水塊が大規模発生している渥美湾エリア（夏季）を検討対象とした計算結果を図-18に示す。D0消費増大の主な要因は、新生堆積物が分解される際の酸素消費であり、貧酸素水塊の増加は、新生堆積物の増加に直接的に関係している。評価軸には新生堆積物の主要因である0-N沈降量及び内部生産量を用いた。本研究では平均海面下5m以浅の領域を浅場と定義しており、0-N沈降量については、5m以深であり、生物生態系が豊かな干潟・浅場域以外の海域に沈降する「悪い沈降」を対象としている。

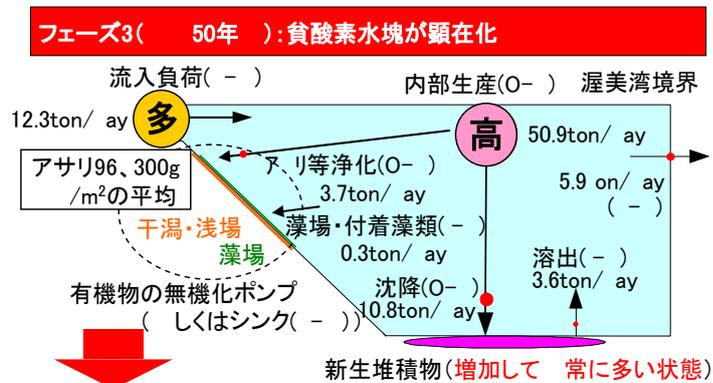


- 流入負荷は少なく、水質も良好
- 干潟・浅場面積が広く、浄化機能が高い



■ 流入負荷の増大による内部生産の増加

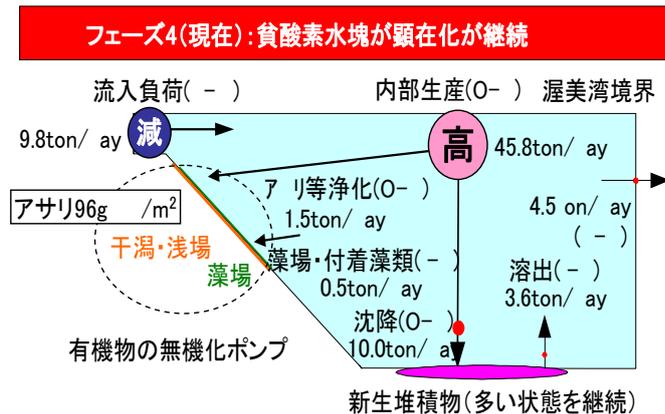
■ 内部生産が高くなって、干潟・浅場が広い、アサリ等二枚貝による有機物の除去量が多く、新生堆積物はそれほど多くない



■ 流入負荷の最大期

■ 赤潮発生の顕在化

■ 干潟・浅場・藻場面積が大幅に減少



■ 流入負荷は若干減少したものの、内部生産は高い

■ 干潟・浅場・浅場藻場面積は減少したまま

■ 浄化機能が低下し、負のスパイラルに陥っている。

図-18 水質計算による物質循環量と物質循環像(渥美湾:夏期)

上記の検討結果より、フェーズ2からフェーズ3に移ることで、新生堆積物は顕著に増加しており、先の仮説を裏付ける結果が得られている。また、流入負荷量が多くても干潟・浅場におけるアサリ等二枚貝の浄化機能が高ければ、貧酸素水塊が顕在化しない物質循環を形成できる可能性があることがわかった。

## 5. 環境再生の基本的方向の検討

### 5. 1 環境再生の基本的方向と目標像

これまでの検討から、三河湾の生態系に直接的に影響を及ぼしている様々な要因は、貧酸素水塊の発生に集約できると考えられる。そのため、発生している現象は多くの要因が関係した複雑な機構を持っているが、「貧酸素水塊の発生」を機構の中心に捉えることで、関連する現象・物質から現象の全体像を把握することができ、複雑な現象に対する包括的な目標設定・施策の方向性の検討を簡易に行うことが可能になる。

また、沿岸生態系にとって重要な貧酸素水塊の発生は、水産資源の現存量に直接影響することから、目標像や施策効果が見えやすいという特徴もある。

以上の観点から、三河湾の環境再生に向けた物質循環管理の目標像を図-19のように設定した。貧酸素水塊抑制を具体的に示す指標として、底層において高次の生物が生息するDO(最低2mg/L)を取り上げ、その確保を目標とする。

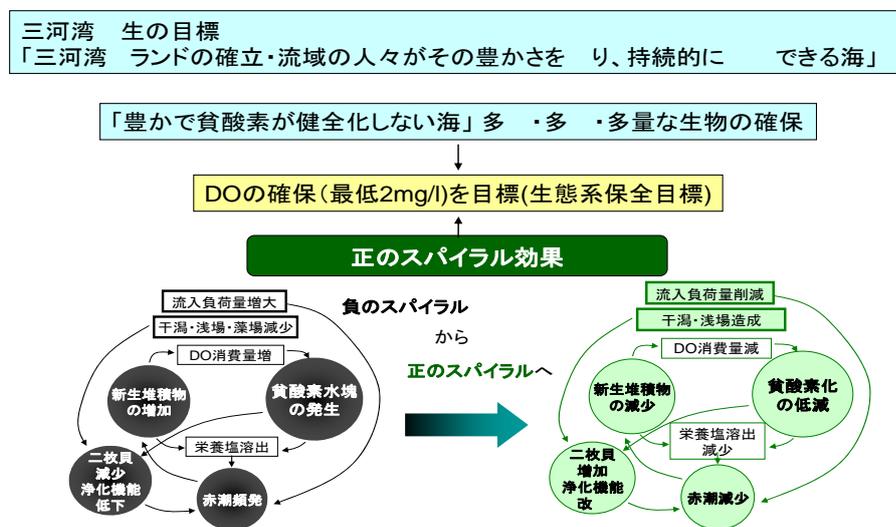


図-19 物質循環管理の目標

### 5. 2 物質循環管理の施策検討 組の検討<sup>9)</sup>

物質循環管理の施策検討枠組みの検討に役立てることを目的として、流域から湾域に連続する物質循環フローの根幹をなす「流入負荷削減」、二枚貝類やより高次の水生生物の回復による健全な物質循環形成を目指した「干潟・浅場の造成」のフィールドの異なる2つの施策について、シミュレーション計算によりその効果を試算した。

干潟・浅場の造成は、5mより深い箇所を浅くすることを想定して計算した。評価軸には0-N沈降量及び内部生産量を用いた。0-N沈降量については、5m以深の海域に沈降する「悪

い沈降」を対象としている。干潟・浅場造成については、干潟・浅場が大きく消失した「渥美湾の湾奥エリア」（図-20 参照）において設定し、水質計算を実施した。

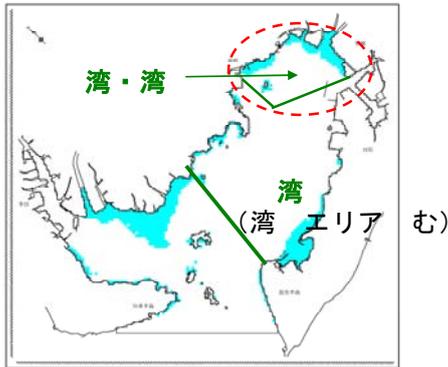


図-20 干潟・浅場造成位置図

評価軸には、新生堆積物の主要因である O-N 沈降量及び内部生産量を用いた。試算結果を図-21 に示す。本結果より、流入負荷削減は内部生産を制限し、O-N 沈降量を減少させる効果があること、干潟・浅場造成は内部生産を制限するとともに、生産された有機物をアサリ等二枚貝が除去することにより、有機物沈降量を減少させる効果があることが示唆された。

また図-22 に各施策の組み合わせによる O-N 沈降量を示しているが、これによれば有機物沈降量の削減効果について、干潟・浅場造成 1,000ha で対現況比-11%、流入負荷 40%削減で対現況比-12%の O-N 沈降量の削減効果が見込まれることが分かる

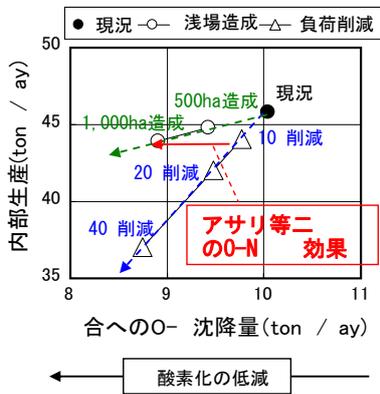


図-21 内部生産と O-N 沈降量の関係

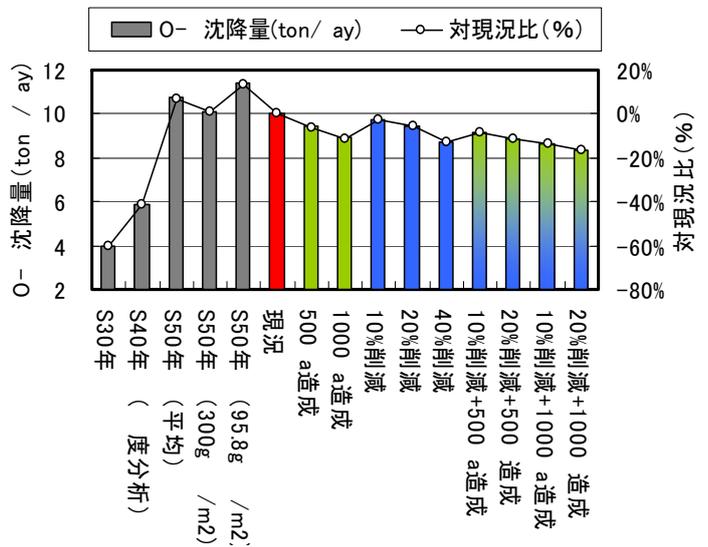


図-22 O-N 沈降量の経年変化と施策効果

本研究で用いた水質モデルは 3 層モデルであること、底泥での酸素消費速度は年代毎に一定値で与えていることから、施策による底層 D0 改善効果そのものの評価には至っていないが、貧酸素水塊の発生に直接的に影響する有機物沈降量及び内部生産量に着目することによって、各年代の物質循環量のバランスを把握し、施策の違いがもたらす物質循環形態

の違いを感度分析したことは、今後の環境再生方策に資するものと考えている。

マクロな物質循環という観点における、海域の貧酸素水塊抑制を通じた環境再生に向けては、栄養塩類の供給を減らす「流入負荷削減」、もしくは高次の生物量を増加させることによって消費を増やす「干潟・浅場の造成」が考えられる。水質モデルによる感度分析から、「流入負荷削減」は内部生産を制限することによって「悪い沈降」を減少させる効果、「干潟・浅場造成」は生産された有機物をアサリ等二枚貝が除去することによって「悪い沈降」を減少させる効果を持っており、各施策が性質の異なる効果を持っていることが確認できた。これまでは、一次生産の消費に見合う量を大きく上回る栄養塩類が供給されており、流入負荷削減を中心に行われていた。現状でも供給量は多い状態であり、今後も当然その必要性は高い。その上で、ただ供給量を減らせば減らす程いいかということそうではなく、さらに豊かな環境を目指すためには、一定の栄養塩の供給は必要であるという見方もある。したがって、これらの対策はどちらか一方のみを進めるのではなく、両者の効果による相乗効果を最大限に発揮できるように、バランス良く進めることが重要である。また、複数の施策の実施にあたっては、効果の発現時期・場所・内容を加味し、実施の時間的なタイミングについても検討を行っていく必要がある。

水環境に関わる現象はヒステリシスを持つため、どの程度の施策量で正のスパイラル効果が得られるかについては不明な点も多い。一方で、流域住民等においては施策効果を実感できることがまさに重要である。

今後は機構のもつ不確実性をより確かなものにし、具体的な施策の方向性を明確にしていくために、機構解明および施策効果把握のためのモニタリングの実施と評価を行い、多様な視点に立ち、関係機関との連携を図りつつ、さらに統合的な検討を進めていくことが重要である。

## 6. 今後推進すべき方策の検討

### 6. 1 モニタリング・調査手法の検討

これらの施策の効果や設定した目標の達成状況を把握することを目的とした「施策効果把握のためのモニタリング」と、仮説を検証し、新たに明らかになった事実に応じて管理手法を再検討し、必要に応じて修正することを目的とした「機構解明のためのモニタリング」に分けて、項目・手法等を具体的に提示した。

#### 6. 1. 1 施策効果把握のためのモニタリング<sup>10)</sup>

最終目標となる貧酸素水塊発生の抑制の主要因である底層 D0 濃度の向上やそれに伴う生物生息量の増大と、その手前の事象として新生堆積物の減少、赤潮発生を重要項目として取り上げ、既存調査の活用を念頭におきながら、モニタリング項目を図-23 に示すように再編・整理を行った。

区分	モニタリング指標	想定アプトット	方法・頻度等
施策効果の把握	河川水質	河川水質(平水時)	河川水質の向上
		順流 端の流入負荷量	流入負荷量の減少
	干潟・浅場生物	底生生物の現存量	生物の多 性の向上
		二枚貝の現存量	生物の多 性の向上 浄化機能の向上
	藻場の面積・ 度	生物多 性の向上 浄化機能の向上	
全体効果の把握	懸濁態有機物	海域栄養塩(平常時)	海域水質の向上 懸濁態有機物の現象
		透明度	水性の向上
	赤潮発生状況	赤潮発生海域、赤潮発生日数、赤潮構成	赤潮発生の低減
	新生堆積物沈降量	合の新生堆積物沈降量	新生堆積物量の減少
	貧酸素水塊発生状況	底層DO濃度	底層DO濃度の向上 貧酸素水塊面積の減少
高 生物	類等の生 、生 量 合の底生生物の生 、生 量	生物の多 性の向上	

図-23 施策効果把握のためのモニタリング

### 6. 1. 2 機構解明のためのモニタリング

未解明事象について、重要度と理解度の観点から機構解明のモニタリング項目を図-24に示すように整理した。

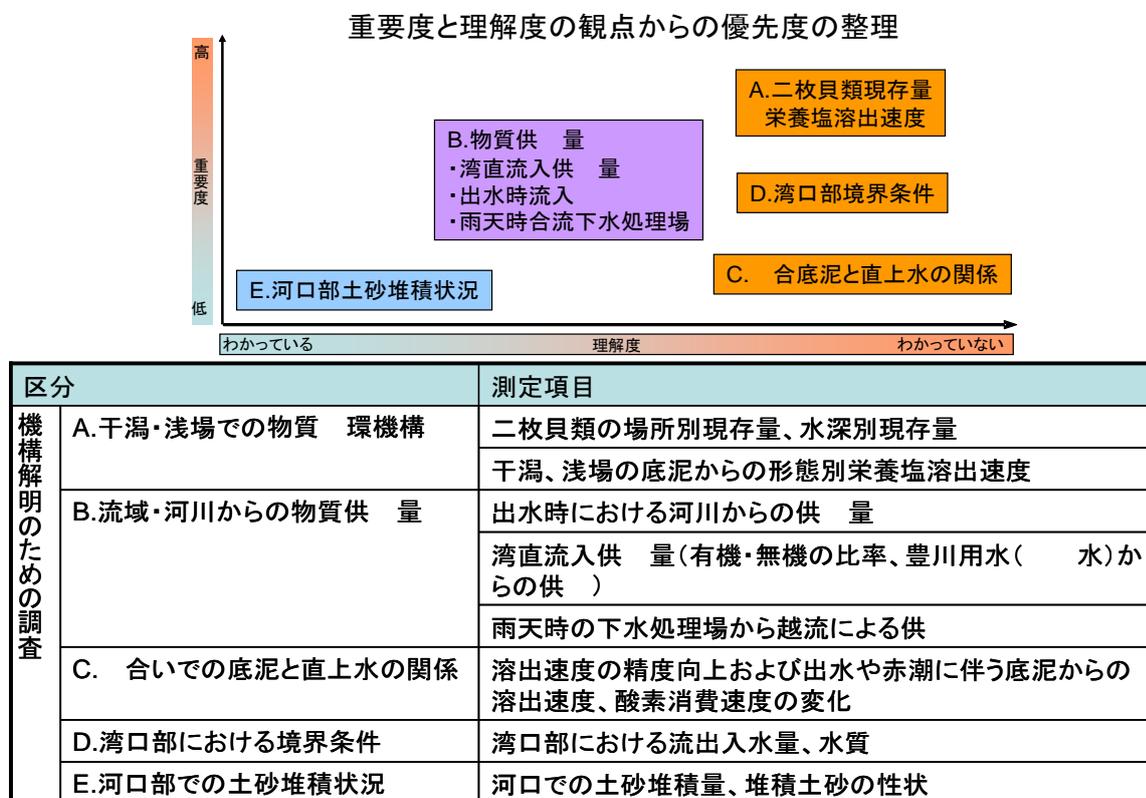


図-24 機構解明のためのモニタリング

## 6. 2 研究プラットフォームの検討

今後の物質循環管理施策への展開につなげる研究開発を行うために必要な、研究開発の課題・戦略、研究体制の要件、情報蓄積と共有方法等からなる研究プラットフォーム（案）を打ち出した。この構成図を図-25に示す。

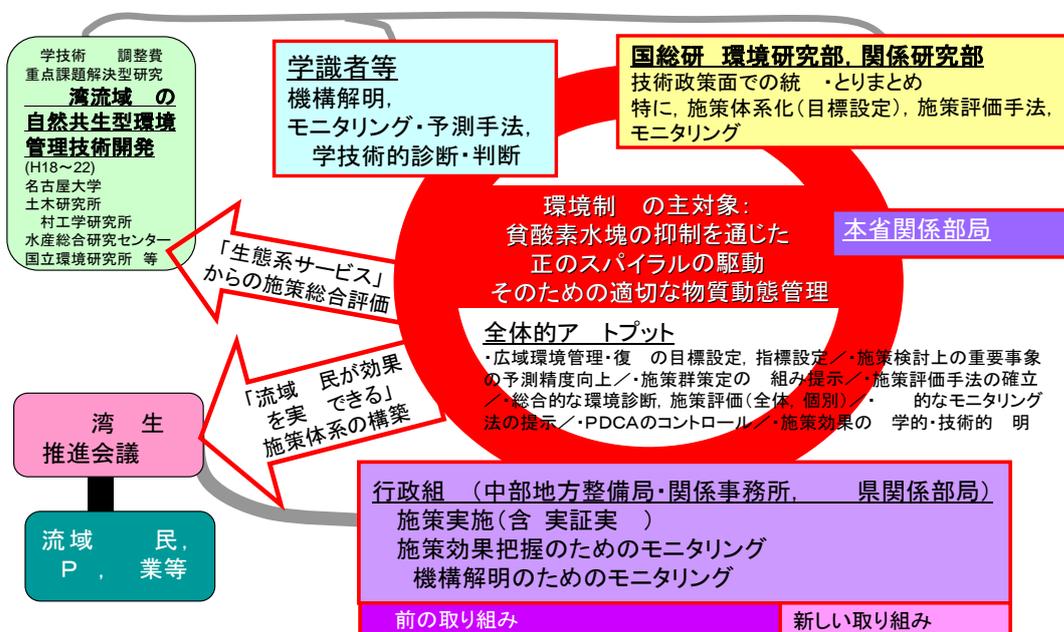


図-25 研究プラットフォーム（案）

## 7. おわりに

本研究においては、閉鎖性水域における環境再生の実現に向けて、三河湾流域をモデルにして、陸域と海域における様々なデータ分析と数値計算等を行い、目指すべき方向性と推進すべき方策について調査・検討した。

水環境や沿岸生態系は複雑系の問題であるために、不確実性が非常に高い。しかし本研究のように仮説を立てながら、実現象の分析を行い、少しでも確実なものとしていくアプローチが必要になってきている。

今後は、森・川・海のつながりをより強く意識して、流域住民・NPO・関係行政機関・研究機関等がより連携し、より効果的な方策について推進していきたいと考えている。

特に地球環境問題に直面している今日、それは喫緊の課題であるということを強く認識している。

最後に、本研究のWGに御参加頂き、陸域から沿岸海域にわたる広域かつ多要素が複雑に関係する本検討に対して、専門的な分野から様々な御助言を下された関係各位に感謝の意を表します。また、本研究の基礎となる情報の提供をして頂いた中部地方整備局および各関連事務所の方々に感謝を申し上げます。

## 参考文献

- 1) 天野邦彦・時岡和利(2007)：ダム貯水池における珪藻類によるケイ酸捕捉量の評価, 環境工学研究論文集, 第 44 巻
- 2) 中村元彦 (2005)：伊勢・三河湾における漁業の推移. 愛知大学総合郷土研究紀要, 第 50 輯, 239-252.
- 3) 鈴木輝明・青山裕晃・中尾和正(2000)：マクロベントスによる水産機能を指標として底質基準試案－三河湾浅海部における事例研究－, 水産海洋研究, 64(2), pp. 85-93.
- 4) 武田一也(2005)：三河湾の漁場環境の推移, 愛知大学総合郷土研究紀要, 第 50 輯, 231-238.
- 5) 黒田伸郎・藤田光一(2006)：伊勢湾と三河湾の貧酸素水塊の短期変動及び長期変動の比較, 愛知県水産試験場報告, 第 12 号, pp. 5-12
- 6) 石田基雄・原保(1996)：伊勢・三河湾における水質変動と富栄養化について, 愛知水試験報 3 号
- 7) 青山裕晃、石田基雄、木村仁美(2002)：海況自動観測ブイ 10 ヶ年観測結果(1991～2000 年)からみられる三河湾の赤潮と貧酸素. 愛知水試研報 9 号.
- 8) 畑恭子・青山裕晃・鈴木輝明(2007)：メソコスムによる干潟生態系モデルの検証と三河湾一式干潟域の物質循環解析, 水産工学, Vol. 44, No. 1, pp. 53-58.
- 9) 服部克也(2007)：伊勢・三河湾におけるノリ養殖の現状と課題, 第 3 甲斐
- 10) 阿部徹・裴義光・本橋建(2007)：涸沼への流入負荷及び底泥からの溶出負荷の把握精度向上に関する研究, 河川環境総合研究所報告第 13 号

住宅分野における持続可能社会実現に向けた取り組み

－人口減少社会対応、LCCO<sub>2</sub>削減、

住宅長寿命化の観点から－

住宅研究部長

松本 浩

# 住宅分野における持続可能社会実現に向けた取り組み －人口減少社会対応、LCCO<sub>2</sub>削減、住宅長寿命化の観点から－

住宅研究部長 松本 浩

## 概要

人口の減少が進行する中で持続可能な社会の構築が我が国の大きな課題となっている。

これらの課題については、様々な分野における多面的な対応が不可欠であるが、本稿では、住宅分野における取り組みについて、まず、人口減少社会に対応した郊外住宅地等の再生・再編手法の開発や、LCCO<sub>2</sub>（ライフサイクルCO<sub>2</sub>）<sup>\*1)</sup>等の削減に向けた建築物の環境性能向上のための計画技術の開発（「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」）についての近年の研究成果を報告する。

さらに、「つくっては壊す」フロー消費型社会から「いいものをつくって、きちんと手入れして、長く大切に使う」ストック型社会への転換に向けた、住宅の長寿命化についての研究開発（「多世代利用型超長期住宅及び宅地の形成・管理技術の開発」）の動向について報告する。

## 1. 人口減少社会に対応した郊外住宅地等の再生・再編手法の開発

### 1-1. はじめに

我が国の人口は2004年をピークに減少しており、世帯数についても2015年以降減少に転ずるものと見込まれている（図1）。

このような状況の中で、開発から時間の経過した郊外住宅地等の多くでは、今後、世帯規模の縮小や空き地・空き家の増加が深刻化することが必至である。郊外住宅地等における大量の空き地・空き家

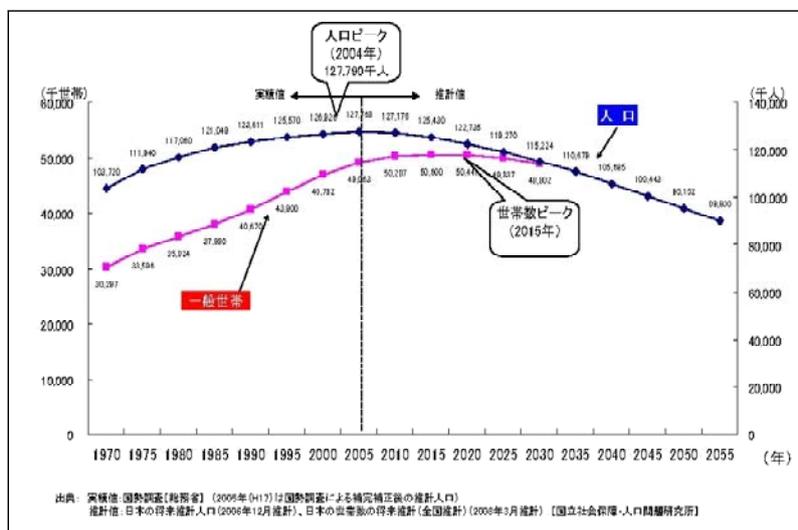


図1 人口・世帯数の推移及び将来推計

の発生は、防犯性の低下や雑草の繁茂等による生活衛生環境の悪化のみならず、居住者の減少による商業施設の撤退や公共バスサービスの縮小、コミュニティの低下などによる地

\*1) LCCO<sub>2</sub>: 建設してから解体するまでの建築物の一生（これをライフサイクルと呼ぶ）で、排出されるCO<sub>2</sub>の量を足し合わせたもの。同様に、LCA（ライフサイクルでの影響評価）、LCW（ライフサイクルでの廃棄物量）、LCE（ライフサイクルでのエネルギー消費量）という用語も用いられる。

域の衰退につながり、地域住民にとっては、生活の質（QOL）の低下、行政にとっては、対策コスト（行政コスト）の増大等による財政事情の悪化が懸念される。こうした状況において、衰退が懸念される郊外住宅地等の計画的かつ合理的な再生・再編を誘導していくことは、人口減少社会における住宅・都市政策上の大きな課題になると考えられる。

こうした認識に基づき、平成17年度から3箇年にわたって実施した本研究では、1) 人口・世帯の空間分布構造の変化に伴う将来行政コストの予測手法の開発、2) 郊外住宅地等の再生手法及び再生の費用便益の評価手法の開発、等を総合的に実施した。

## 1-2. 成果の概要

大都市の郊外都市や地方都市の多くでは、居住地等の郊外への拡大が今なお続いている。本研究においては、こうした都市構造において、今後本格的な人口・世帯減少社会を迎える中で、都市全域において必要となる将来行政コストの推計手法を開発した。これにより、人口分布（居住地）の低密度化の一方での郊外化の進展や人口の高齢化等の進展が将来行政コストに及ぼす影響について予測することが可能となった。

また、空き地・空き家の大量発生による衰退が懸念される郊外戸建住宅地について、地域住民が主体となった再生に対する支援制度を検討するとともに、再生した場合の費用便益の推計手法を開発した。これにより、再生計画を立案し、再生が実現した場合の行政及び地域住民にとっての効果を客観的に評価することが可能となった。

さらに、これらを踏まえ、郊外戸建て住宅地の再生に向けて、地域住民が主体的に作成した再生計画を行政に提案し、その再生の効果（費用便益）を行政が客観的に評価し、地域住民の取組みを支援する仕組みとして「郊外住宅地再生計画提案制度」を提案した（図2）。また、こうした制度を運用するための技術的ツールとして、地方公共団体向

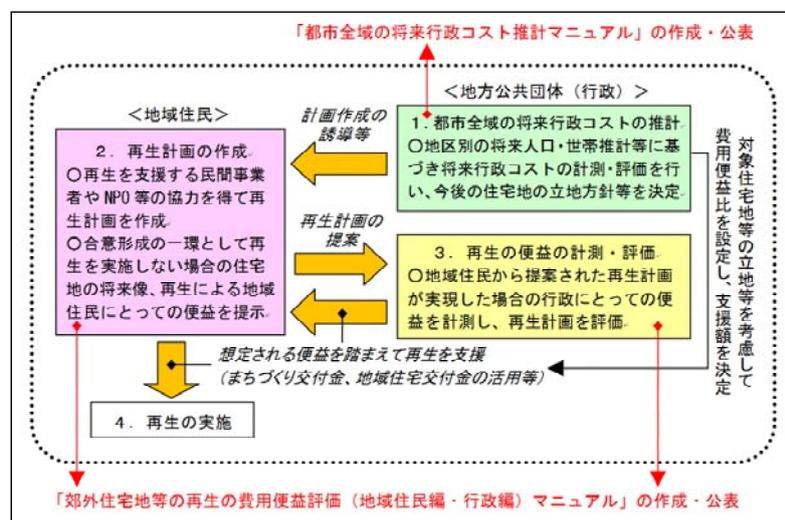


図2 郊外住宅地再生計画提案制度のイメージ

けの「都市全域の将来行政コスト推計マニュアル」、地域住民及び地方公共団体向けの「郊外住宅地等の再生の費用便益評価マニュアル」の案を作成した。

一方、郊外団地型マンションについては、建替えや減築を含む多様な改修をミックスさせて再生するための制度スキームについて検討し提案した。その成果を踏まえ、制度化を視野に入れつつ検討を発展的に継続している。

### 1-3. 研究の内容

#### 1-3-1. 人口・世帯の空間分布構造の変化に伴う将来行政コストの予測手法の開発

将来行政コストの予測手法の開発にあたっては、まず、市域の中の地区単位別の将来人口・世帯数の推計手法を開発し、これを基に、9項目の行政サービスを対象に、平成37年までの今後20年間の将来行政コストの推計手法を開発した(図3)。

推計手法開発にあたっては、理論的検討と実際の都市(福井市及び木更津市)で利用可能なデータを用いたモデルスタディとを一体的に実施した。

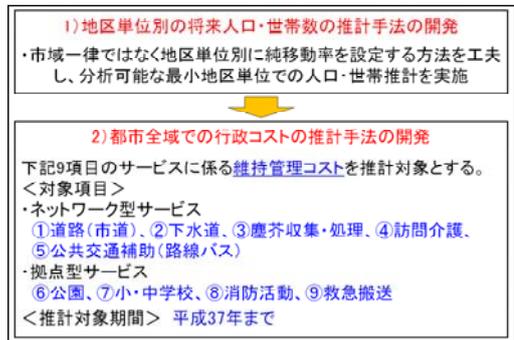


図3 将来行政コストの予測手法

モデルスタディ対象の2都市における試算結果は、9項目全てにおいて、生産年齢人口一人あたりコストが将来的に悪化していくとの結果となった(図4)。

また、モデルスタディ対象の2都市を、中心市街地、郊外部、その他の3地域に分割し、各地域における生産年齢人口一人あたりの将来行政コストを分析した結果、中心市街地ではほとんど増加しないのに対し、郊外部のコスト増加が顕著であることが示された(図5)。このような観点からも、郊外部の住宅地の適切な再生及び再編の必要性が指摘できよう。

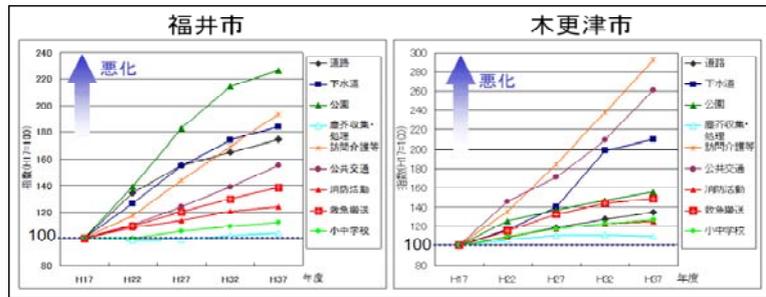


図4 生産年齢人口一人あたり行政コストの推計

また、モデルスタディ対象の2都市を、中心市街地、郊外部、その他の3地域に分割し、各地域における生産年齢人口一人あたりの将来行政コストを分析した結果、中心市街地ではほとんど増加しないのに対し、郊外部のコスト増加が顕著であることが示された(図5)。このような観点からも、郊外部の住宅地の適切な再生及び再編の必要性が指摘できよう。

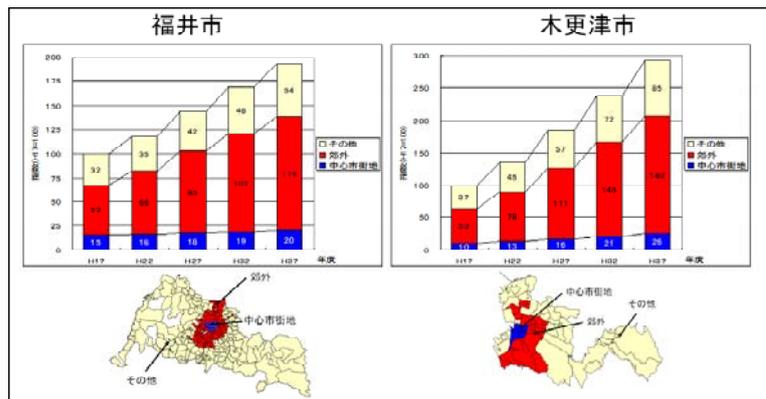


図5 地域別の生産年齢人口一人あたり訪問介護等コストの推計

#### 1-3-2. 郊外住宅地等の再生手法及び再生の費用便益の評価手法の開発

郊外住宅地等の再生の費用便益評価手法の開発にあたっては、理論的検討と実際の住宅団地(木更津市のS I団地:昭和40年代後期開発の戸建て住宅団地。面積約72.5ha)を対象としたモデルスタディを一体的に実施した(図6)。

研究のプロセスとして、まず、モデルスタディ団地の居住者及び空き地・空き家の所有者等に対する団地の再生に係る意向調査を実施し、次に、地域住民とのミニワークショップを行い、団地の再生シナリオを設定し、再生計画

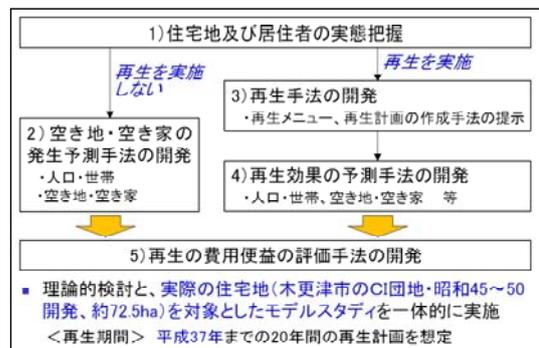


図6 住宅地再生の費用便益評価手法

を作成した。①現居住者の社会的転出を抑制するための再生、②地域住民等が空き地・空き家を有効活用する再生、を再生のシナリオに掲げ、具体の再生メニューとして、物的環境、生活環境の再生メニューを設定した（図7）。

次に、設定した個々の再生メニューの実施によるアウトカム効果（人口・世帯数の減少抑制効果、空き地・空き家の発生抑制効果等）を推計するとともに、再生により住宅地全体として期待されるアウトカム便益について推計した。

便益の推計にあたっては、まず、「チェーンモデル（ロジックモデル）」を作成し、再生の便益項目を抽出した。この際、便益の帰属先について「行政の帰着便益」と「地域住民の帰着便益」とに区分して整理した（図8）。

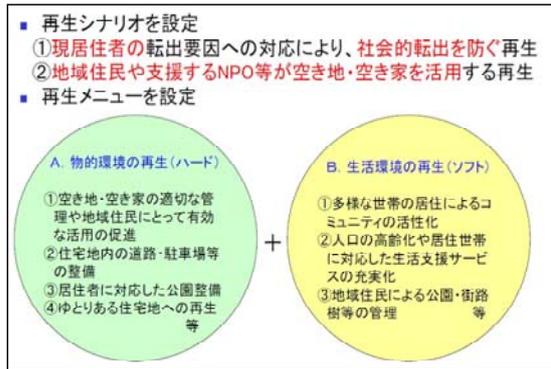


図7 住宅地再生のシナリオとメニューの設定

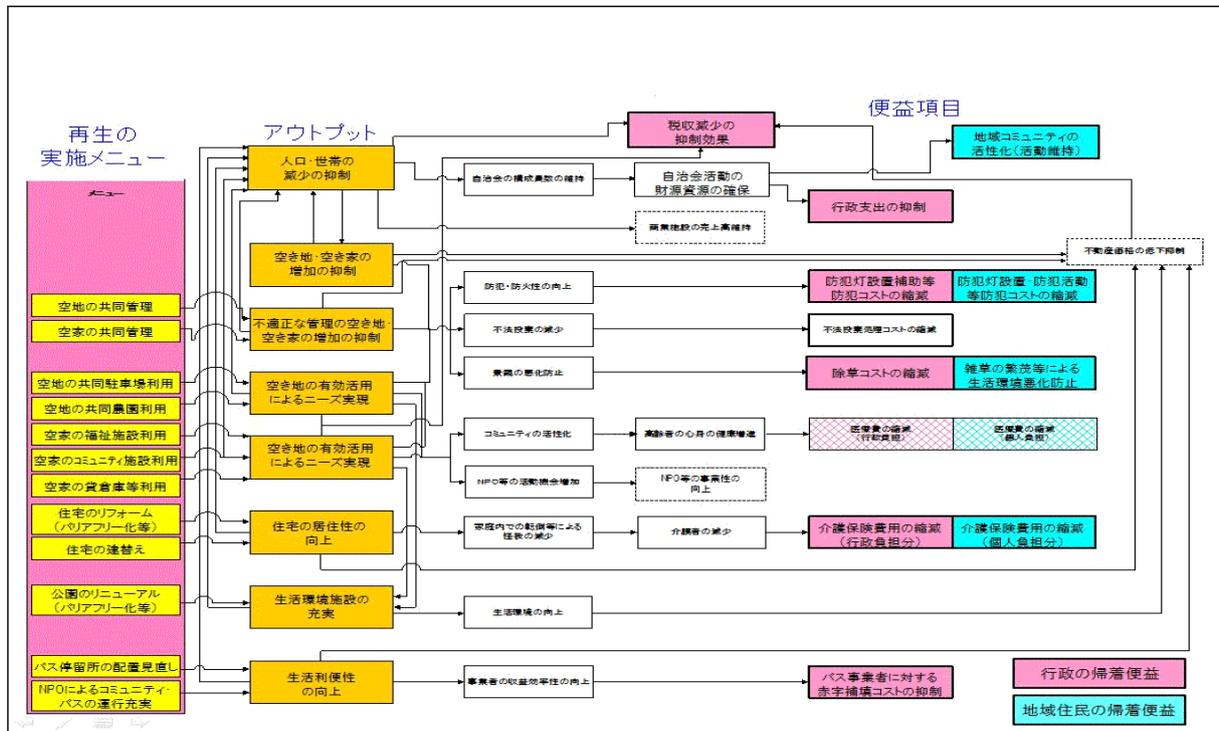


図8 チェーンモデル作成による住宅地再生の便益項目設定手法

次に、抽出した各便益項目について、推計モデルを構築し、原単位を収集し推計を行った。その結果、再生により得られる便益（20年間の総便益の現在価値）は、行政にとっての便益が約1.5億円、地域住民にとっての便益が約1.9億円となった（図9）。

同様にして再生に要する費用を推計した。地域住民による空き地・空き家の活用やNPO等の各種活動に対する行政支援がないと仮定

便益項目		便益(万円)※
行政にとっての便益	税収減少抑制	8,020
	市外転出に伴う市民税収の減少抑制	730
	地価下落に伴う固定資産税・都市計画税の減少抑制	801
	相続人不在に伴う固定資産税・都市計画税の減少抑制	103
	防犯灯設置補助等の防犯コストの縮減	380
	除草の依頼・勧告等の除草コストの縮減	3,140
	バリアフリー化による介護費用(行政負担)の縮減	1,694
	バス事業者に対する赤字補填コストの抑制	14,868
合計	14,868	
地域住民にとっての便益	地域コミュニティの活性化(活動維持)	567
	防犯灯設置・防犯活動等の防犯コストの縮減	8,723
	雑草の繁茂等による生活環境の悪化防止	8,405
	バリアフリー化による介護費用(個人負担)の縮減	1,396
	合計	19,091

※再生期間20年間の総便益で、名目価格を現在価値化した額(単位:万円)

図9 住宅地再生の便益の推計

した場合、行政が負担する費用は0.3億円、地域住民が負担する費用は1.7億円となった。

地域住民が主体となって実施する再生により、行政にとっては費用便益差1.2億円の利益が生ずるのに対し、地域住民にとっての費用便益差は0.2億円と小さいものにとどまり、費用便益比はそれぞれ4.95、1.12となる(図10)。

この場合、地域住民による再生の実現により行政は大きな利益を得ることから、想定される費用便益差の範囲内で行政が地域住民による再生の取組みの支援(空き地・空き家の利用に対する補助、自治会やNPO等の活動に対する補助等)を行うことにより、再生を促進し具体化するという施策選択が考えられることとなる。

■費用便益の推計結果1: 行政の負担費用が公園リニューアル工事のみ				
	費用(万円)	便益(万円)	費用便益比	費用便益差(万円)
行政	3,003	14,868	4.95	11,865
地域住民	17,034	19,091	1.12	2,057

※空き地・空き家の利用等に対する行政の支援は含んでいない。

○行政の支援内容に応じた支援額の推計手法を開発  
(例)・空き地・空き家の共同管理費の補助  
・空き家の共同利用への家賃補助  
・共同駐車場・共同農園の整備費補助  
・NPO団体の活動費補助  
・空き地等の賃貸者への固定資産税等の減免  
・住宅のバリアフリーリフォーム補助等

➡ <推計結果> 支援総額 4,247万円

■費用便益の推計結果2: 空き地・空き家の活用等に一定の行政支援				
	費用(万円)	便益(万円)	費用便益比	費用便益差(万円)
行政	7,250	14,868	2.05	7,618
地域住民	12,787	19,091	1.49	6,304

図10 行政の支援内容に応じた支援額の推計

### 1-3-3. 郊外団地型マンション再生スキームの提案

郊外団地型マンションの再生に当たっては、区分所有法第70条による団地内建物の一括建替えは郊外型の大規模団地では実務上適用が難しいことから、建替え・改修・存置等の組合せ(ミックス)による団地再生を考えていく必要がある。

しかしながら、現行の区分所有法では、個別の決議又は同意を積み重ねる必要があり安定性に欠ける、団地建物所有者の多様な意向を反映しづらい等の課題がある(図11)。

このため、団地型マンションの再生制度について幅広く検討し、区分所有法制度の新たなスキームとして、特別多数決による「改修再生決議」制度(図12)及び団地の「一括再生決議」制度(図13)のスキームを提案した。



図11 郊外団地型マンションのミックス再生の課題

- 区分所有者及び議決権の各5分の4以上の多数で、区分所有法第17条の「共用部分の変更」の範囲を超える改修再生の実施を決議(改修再生決議)することができる。
- 改修再生決議をする場合は、次の①~⑤の一つ以上の改修再生行為を含んでいることを必要とする。
  - ① 区分所有権の対象となりうる部分(構造上及び利用上の独立性を有する専有部分)の増築
  - ② 共用部分の大規模な増築
  - ③ 専有部分の区画割りの計画的な変更
  - ④ 専有部分及び共用部分の減築
  - ⑤ 専有部分の区画割りの変更や共用部分の変更により創出したスペースの経営(賃貸)行為

図12 特別多数決による「改修再生決議」制度のスキーム提案

- 対象団地:①敷地を共有、②全建物が区分所有建物、③全建物を団地の規約で管理の対象としている、の3要件を満たす場合
- 団地内の全区分所有者の議決権の5分の4以上の多数、かつ、各団地内建物ごとにそれぞれの区分所有者及び議決権の各3分の2以上の多数の賛成で、当該団地内建物につき一括して、建替え、改修再生を含んで、団地空間の再生することを決議(団地一括再生決議)することができる。
- 次のいずれかを必ず行う再生であることを必要とする。
  - ① 当該団地内建物の一部の建物の建替え(全部の建替えは、現行の区分所有法第70条「団地内の建物の一括建替え決議」となるので除外する。)又は除却
  - ② 団地内の全部又は一部の建物の改修再生(一棟型マンション物の改修再生決議の対象となる改修再生工事)

図13 団地の「一括再生決議」制度のスキーム提案

また、これに対応した新たな事業スキームとして、マンション建替え円滑化法の制度に準じて、法人格を有するマンション（団地）再生組合の設立、再生前のマンションに係る権利の再生後のマンション（団地型の場合、再生を実施しない存置棟を含む）への一括権利変換制度等からなる、「マンション再生円滑化制度」（図14）のスキームを提案した。

- 法人格を有する再生組合の設立
- 再生組合による売渡し請求
  - 組合から不参加者への売渡し請求、不参加者から組合への買取請求の両方を可能とする(自ら離脱の権利)
- 一括権利変換制度
  - ①一棟型:再生改修決議後に一括権利変換
    - 決議前の住戸交換・購入等による空き家の特定階への集約等が不要
  - ②団地型:一括再生決議(一括再生計画)に基づき一括権利変換
    - 決議前の棟間の住戸交換等による意向調整が不要
    - 一度の権利変換で、(棟を超えて)希望する再生棟への住み替えが可能
    - 各棟の多数の意志に縛られることなく、各個人の意向が実現
- 再生組合による規約の作成
- 団地再生期間中の従前管理組合の存続みなし規定

図14 マンション再生円滑化事業制度のスキーム提案

#### 1-4. 今後の取り組み

本研究成果を活用して、多様な再生計画に基づく費用便益の推計事例が蓄積され、郊外住宅地等の再生が実現されることを期待している。このため、国土交通本省及び地方公共団体等に対し、提案している「郊外住宅地再生計画提案制度」に係る情報提供を図るとともに、その技術的ツールである「都市全域の将来行政コスト推計マニュアル」及び「郊外住宅地等の再生の費用便益評価マニュアル」を精査し、できる限り速やかに公表する予定である。

また、郊外団地型マンションの再生について、本研究でのスキーム提案を踏まえ、制度化に向けた情報発信及び発展的検討を継続していく予定である。

一方、本研究では、郊外化等による将来の行政コスト予測手法、個々の郊外住宅地等を再生した場合の費用便益の評価手法を開発することができたが、個々の住宅地の再生等を通じて、都市全体の構造（居住地立地）を再編していく手法開発については残された課題である。このため、平成20年度から、新たに「人口減少期における都市・地域の将来像アセスメントの研究」を開始した。拡散型の都市構造を集約型都市構造へと再生・再編するための施策評価手法を開発することとし、評価手法の柱の一つとして本研究の成果を発展させ、活用する予定である。

## 2. 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

### 2-1. はじめに

京都議定書の発効を受け、業務部門・家庭部門のエネルギー消費量の増加とそれに伴うCO<sub>2</sub>排出が重大な課題として認識され、建築分野におけるCO<sub>2</sub>排出の絶対量抑制への取組みが強く求められている(図15及び図16)。他方、循環型社会の形成に向けて廃棄物・リサイクル対策が喫緊の課題とされるなか、建設廃棄物が約4割を占める最終処分場問題の深刻さが増し、廃棄物排出についての対応が緊急に求められている。

このような状況を踏まえ、地球環境への影響を評価する指標としてCO<sub>2</sub>排出量と固形廃棄物排出量(最終処分量)を扱い、環境性能の優れた建築物、とりわけライフサイクル全体を通じたCO<sub>2</sub>と廃棄物の排出量の少ない建築物の供給が促進される社会的枠組みの構築を目指して、科学的裏付けとなるエネルギー消費等の現状分析と排出量削減対策の定量的評価手法等の開発を行うため、国土交通省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」を平成16年度から18年度までの3年間にわたって実施した。研究実施にあたっては、技術開発検討会(村上周三座長(現独立行政法人建築研究所理事長))の指導、助言の下で行った。

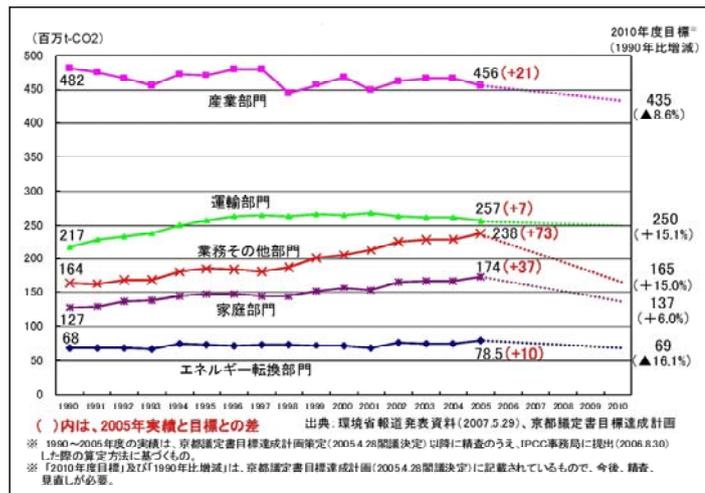


図15 エネルギー起源CO<sub>2</sub>の部門別排出状況と2010年目標

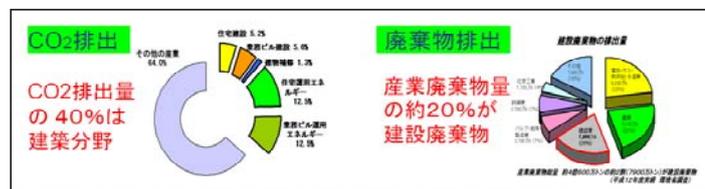


図16 建築関係のCO<sub>2</sub>及び廃棄物の排出量

### 2-2. 成果の概要

建築物の設計段階において、ライフサイクルにおけるCO<sub>2</sub>と廃棄物の排出量(LC-CO<sub>2</sub>とLCW)を算出する手法及び排出量削減に資する対策技術選択のための設計支援システムを開発した。

建築物の環境性能評価に関わる研究は、これまでも多方面で取り組まれてきているが、建築設計の初期段階で行う環境性能の評価は、主に多様な性能項目に関する評価を総合する定性的な評価体系に関する研究や、統計的な集計に基づく概算値による定量的な推計手法が中心であり、概略設計の設計内容を反映した環境負荷の定量算出を行うためのデータ整備が不十分で、設計段階においてCO<sub>2</sub>排出量を効率的に算出するのは不可能であった。

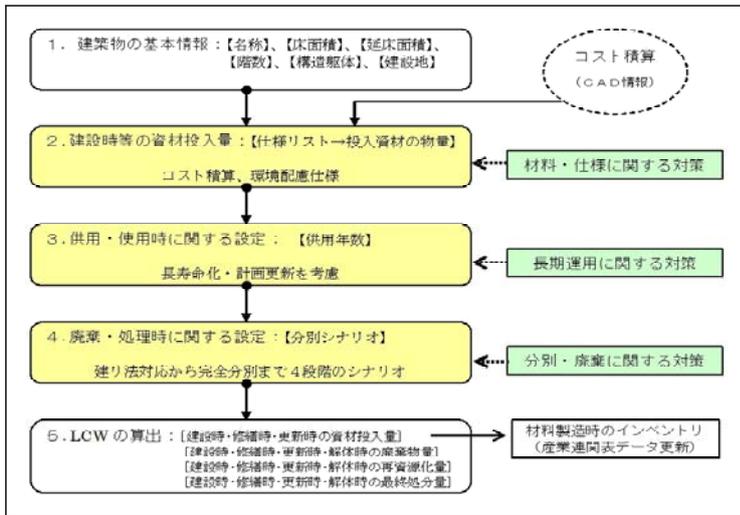
そこで、運用時の実績データの取得や解体実態の調査により、CO<sub>2</sub>と廃棄物の排出にかかる詳細なデータを取得・整備し、こうしたデータの詳細な検討に基づいて、簡便ながら一定の精度を有する排出量の算出手法を開発した。これにより、従来、用途と床面積を指標として一律に計算されていた排出量推計値に対して、建築設計と設備システムの設計



### 2-3-2. 建築物の資源投入量の把握による廃棄物排出量の算出手法の開発

廃棄物排出量算定にかかる建材・設備機器インベントリの整理、解体実績データの分析と解体シナリオに基づく廃棄物・副産物量推計手法の検討を中心に、LCWの算定手法を開発した。

建材・設備機器のインベントリ整理に関して、建築コストの積算に用いる書式、項目名称、数量算出単位との整合を図り、将来的なCADデータとの統合を含めて算定手法を構築している点と、修繕・更新を考慮したライフサイクルシナリオや廃棄物処理の実態に基づいた分別シナリオを作成し



LCWの算定条件の明示化を図っている点が、今回の技術開発の特徴である(図20及び図21)。

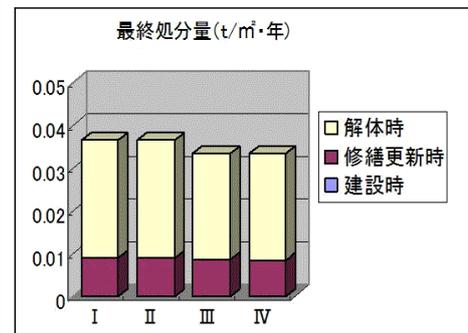
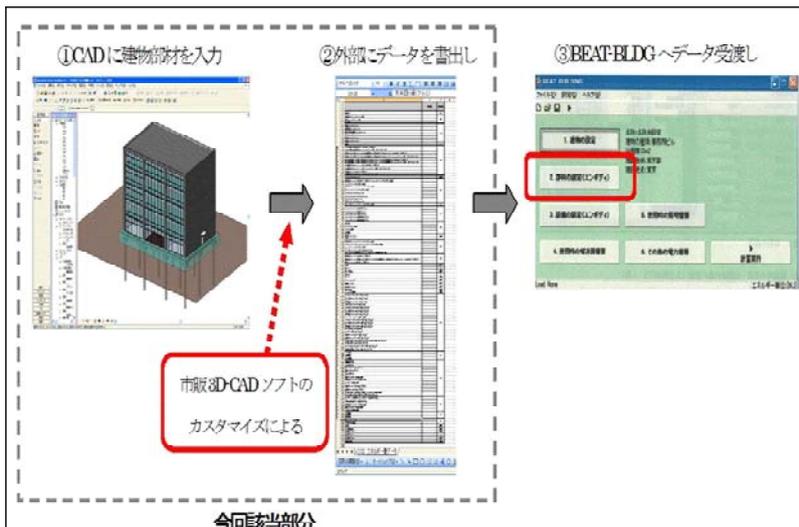


図20 ライフサイクルにおける廃棄物排出量算出の全体フロー

図21 LCWに係る算出例

### 2-3-3. 設計段階における排出量算出と低減技術選択のための支援ツールの開発

設備を中心とした運用時のエネルギー消費に伴う排出量の算出及び建物の資源消費に伴う排出量の算出の推計手法の開発成果の適用と、資源投入量把握へのCADデータの活用を中心テーマとして、建築物の設計図書やCADデータから、LCE、LCCO<sub>2</sub>と



LCWを算出する設計支援システム (BEAT<sup>2</sup>)-Bldg) を開発した(図22及び図23)。

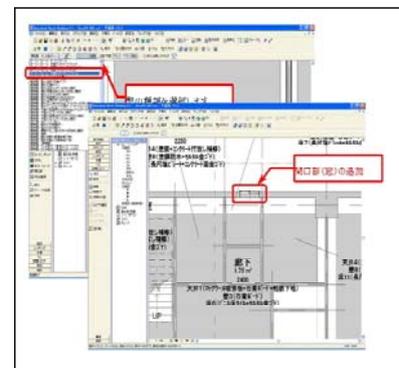


図22 設計支援システムの概念図

図23 CAD入力例





### 3. 多世代利用型超長期住宅及び宅地の形成・管理技術の開発

#### 3-1. はじめに

「つくっては壊す」フロー消費型の社会から「いいものをつくって、きちんと手入れして、長く大切に使う」ストック型社会への転換のために、住宅の長寿命化（いわゆる200年住宅）の促進が大きな政策課題となってきた。

このため、社会資本整備審議会住宅地分科会答申「長期にわたり使用可能な質の高い住宅を整備・普及させていくために講ずべき方策」（平成20年2月）を踏まえ、「長期優良住宅の普及の促進に関する法律案」を国会に提出するとともに、住宅の長寿命化促進税制等の税制措置、超長期住宅先導的モデル事業等の予算措置等により、その促進が図られているところである（図26及び図27）。

このような状況の中で、国土技術政策総合研究所では、平成20年度より3箇年の計画で、住宅の長寿命化を図るための総合技術開発プロジェクト「多世代利用型超長期住宅及び宅地の形成・管理技術の開発」（以下「多世代利用総プロ」という）を開始した。

この多世代利用総プロにおいては、多世代にわたって利用可能な社会的資産となりうる「多世代利用型超長期住宅」の実現に向けて、①形成技術、②改修・改変技術、③管理技術、④宅地等基盤整備技術、の4つの研究開発課題に取り組みこととしている。

#### 3-2. 研究の概要

多世代利用総プロにおいては、住宅の長寿命化を図るための高度な耐震性・耐久性・可変性・更新性と優れた維持管理性能を

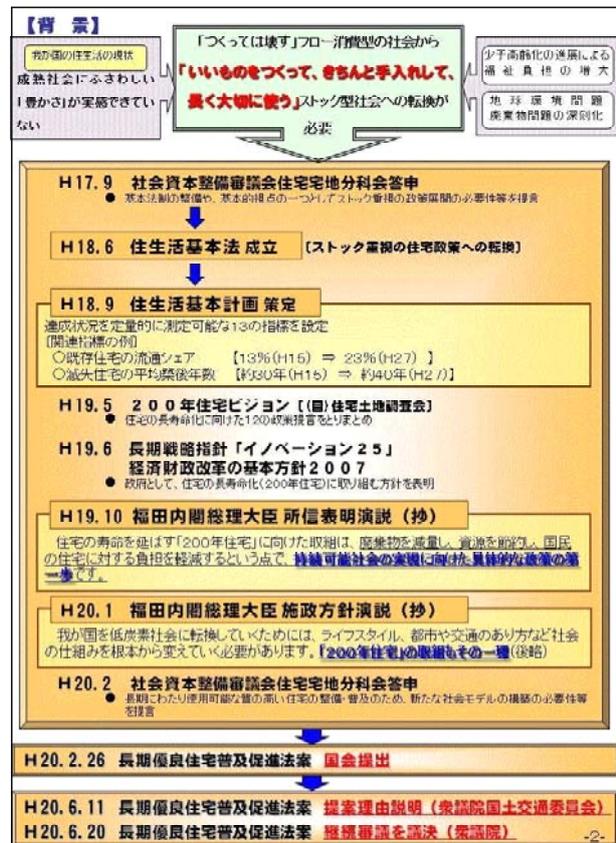


図26 住宅長寿命化に関する取組の経緯

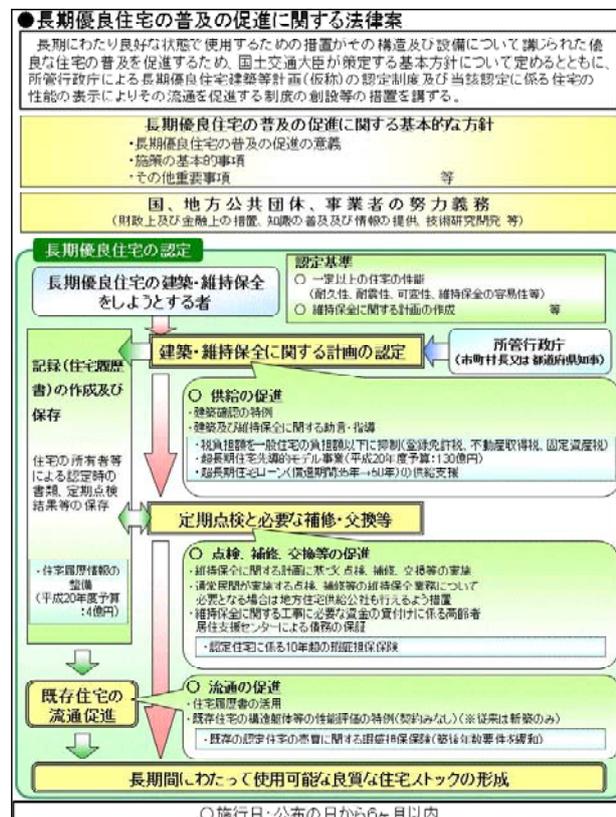


図27 長期優良住宅普及促進法案概要

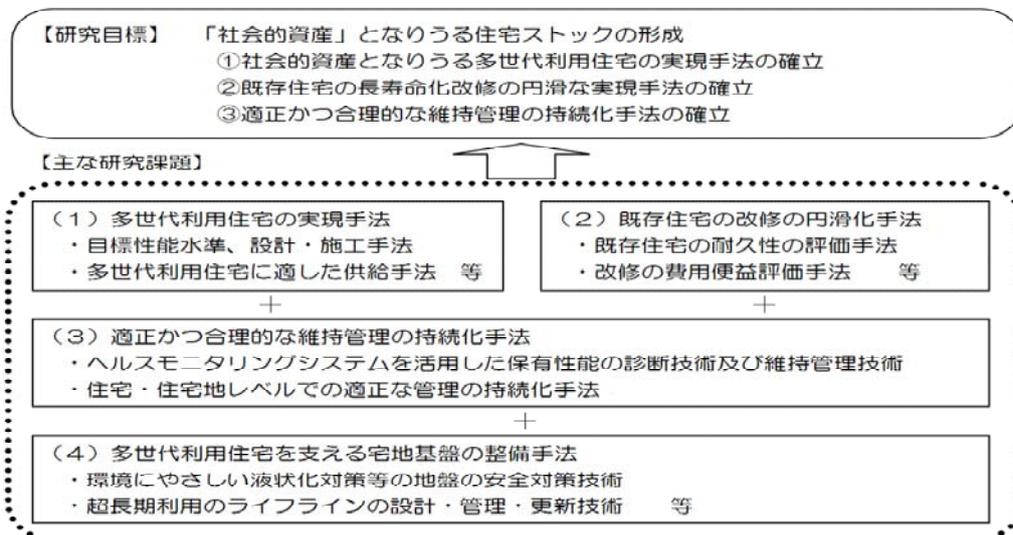
備え、多世代にわたって利用可能な社会的資産となりうる新しい住宅像を「多世代利用型超長期住宅」（以下「多世代利用住宅」という。）と定義し、多世代利用住宅（共同住宅及び戸建住宅）とそれを支える宅地・街区レベルでの目標性能水準を明らかにするとともに、その実現に向けて、新築時の設計・建設・維持管理に係る技術開発を、ハード及びソフト両面から実施する。

また、既存住宅については、その保有性能に応じて長寿命化改修を実施する際の目標性能水準を明らかにするとともに、長寿命化改修を促進するための技術開発をハード及びソフト両面から実施する（図28）。



図28 多世代利用総プロの概要

研究のポイントは、以下の通りである。



### 3-3. 研究の進め方

多世代利用総プロの実施にあたっては、技術開発検討会（座長：深尾精一教授（首都大学東京））のもと、5つの部門を設け、それぞれが連携を保ちつつ、研究開発を進めていくこととしている（図29）。

なお、10月10日に第1回の技術開発検討会を行ったところである。

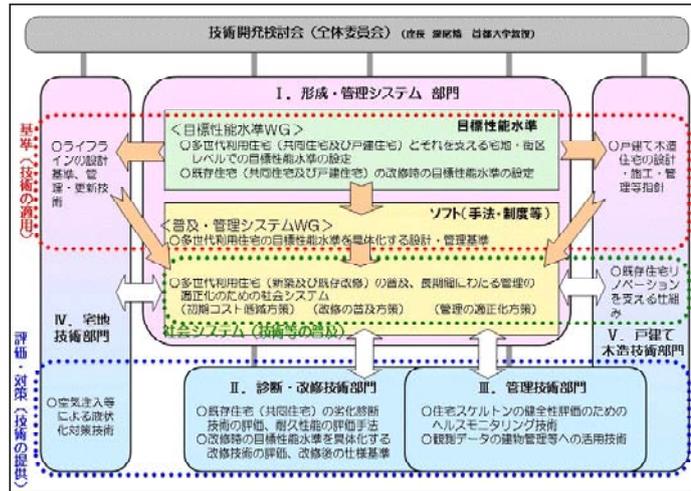


図29 5つの研究部門の相互関係

#### 3-3-1. 形成・管理システム部門

社会的資産となりうる多世代利用住宅の実現に向けて、多世代利用住宅（共同住宅及び戸建住宅）とそれを支える宅地・街区レベルでの目標性能水準について検討するとともに、既存住宅について、保有性能に応じた長寿命化改修を促進するための目標性能水準を明らかにする。

また、多世代利用住宅（共同住宅）に適した供給手法（不動産の所有・権利システム）、既存住宅の保有性能に応じた長寿命化改修の普及促進方策、建設後の長期にわたる適正な維持管理の担保方策等のソフト面での研究開発を行う。

#### 3-3-2. 診断・改修技術部門

既存共同住宅の改修の促進に向けて、既存建物の劣化診断技術（目視を支援する内視鏡やロボット、非破壊検査法、破壊を伴う検査法等）の評価及び耐久性能の評価手法の開発を行うとともに、改修時の目標性能水準を具体化する改修技術の評価及び改修後の仕様基準等のハード面での研究開発を行う。

#### 3-3-3. 管理技術部門

技術者の目視等に基づく点検、診断方法を代替又は補完する新たな建物診断技術として、情報通信技術を利用したヘルスマonitoring技術に着目し、住宅スケルトン（構造・共用設備）の健全性評価に適用するヘルスマonitoringシステム、及びモニタリングにより得られたデータの建物管理への活用手法を開発する（図30）。

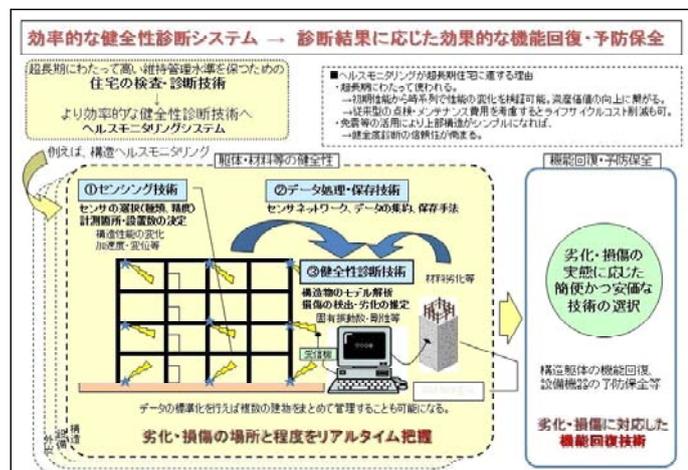


図30 ヘルスマonitoring技術のイメージ

### 3-3-4. 宅地技術部門

多世代利用住宅を支える宅地等基盤の安全性の確保のため、環境にやさしい耐震対策技術として、空気注入による液状化抑制技術の開発を行う。また、幹線道路地下と建築物内をつなぐエアポケット領域を着眼点として、超長期メンテナンスを容易化するライフライン共同埋設収容設備の標準設計を開発する。

なお、空気注入法による地盤液状化対策の実大振動実験については、9月30日に第1回実験を行ったところである(図31)。

<b>&lt;目的&gt;</b> 多世代利用型超長期住宅を支える宅地基盤の安全性向上に関する技術開発の一環として、地震時を想定し、宅地地盤の液状化による住宅の被害を抑制するための環境汚染のない技術を開発することを旨として、実大地盤内に空気を注入した上で振動実験を行い、その効果を確認する。
<b>&lt;空気注入法&gt;</b> 地盤内へ空気を注入することにより、空気が圧縮する性質を利用して水の動きを抑制し、液状化の発生を抑える工法。 空気注入により液状化抑制効果があることは、理論的には以前から指摘されているが、実大規模での実験による検証は今回が初めて。
<b>&lt;実験内容&gt;</b> <b>◎実験施設・試験体の概要</b> ・場所：つくば市立原1 独立行政法人 建築研究所内、大型せん断土槽 ・土槽のサイズ：10m×3.6m×深さ5m ・上記土槽内に深さ4.8mの試験体地盤を作成 ・試験体内に、加速時計、水圧計等を埋込  <b>◎実験方法</b> ・マイクロバブル水(気泡発生時の径が10~100μmの微細な気泡を含む水)をパイプを通して試験地盤内に注入(対策有りの場合) ・2Hzの正弦波(50gal~100gal(試験体の状況により最大200gal)程度を想定)により加振 ・1.5t/m <sup>2</sup> 程度(2階建て木造住宅相当)のフーチング(1.3m×1.3m×高さ0.5mのコンクリート塊)を地盤上に設置し、液状化による沈下、転倒等の状況を確認

図31 空気注入法による地盤液状化対策の実大振動実験概要

### 3-3-5. 戸建て木造技術部門

戸建て木造住宅について、当該住宅の固有の長寿命化の意義と効果の整理や、長寿命化の実現のための条件・要点を明確にしたうえで、多世代利用住宅としての新築住宅及び既存住宅の実現のための設計・施工・管理等指針(改修・流通を含む)の開発を行う。

## 3-4. 成果目標

この多世代利用総プロの研究開発成果としては、以下のような事項を目標として考えている。

(1) 社会的資産となりうる多世代利用住宅の形成(新築及び既存住宅の長寿命化)に向けた指針等の提示

- ① 多世代利用住宅とそれを支える宅地・街区の設計及び管理の指針を提示する。
- ② 戸建て木造住宅について、長寿命化のための設計・施工・管理等の指針を提示する。
- ③ 既存住宅の保有性能や仕様に応じた改修時の目標性能水準とその改修技術を提示する。

(2) 多世代利用住宅(住宅の長寿命化)を実現するソリューション技術の提示

- ① 多世代利用住宅の初期取得コストの上昇をカバーし、超長期にわたる維持管理体制の持続化を容易にする事業手法として利用権制度を提案し、実現化に向けた不動産法制度、管理システム等を提示する。
- ② 既存住宅の改修の円滑化に向けて、既存住宅の耐久性の評価手法、改修の費用便益の評価手法を提示する。

- ③ センサによる観測データに基づく建物診断技術として、住宅スケルトンの健全性評価に適用するヘルスマonitoring技術システムを提示する。また、モニタリングによって得られたデータを活用した維持管理手法を提示する。
- ④ 多世代利用住宅を支える宅地の安全性の確保のため、環境にやさしい耐震対策技術として、空気注入による液状化抑制技術を提示する。
- ⑤ 戸建て木造住宅の「住み継ぎ」が容易になるよう、点検、補修・交換しやすい設計・仕様等を提示する。また、既存戸建て木造住宅の性能向上リノベーションを支える仕組みを提示する。

## おわりに

住宅分野における持続可能社会実現に向けた取り組みの観点から、人口減少対応及びLCCO<sub>2</sub>（ライフサイクルCO<sub>2</sub>）削減に関する近年の研究成果及び住宅長寿命化に関する新たな研究開発の動向について報告した。

いずれのテーマも日本の直面する大きな課題に関わるものであり、今後とも、継続的な研究を進めるとともに、研究成果が住宅施策や住宅生産の場に役立つよう、関係機関との密接な連携や積極的な情報発信を行っていきたいと考えている。

なお、「2. 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」で紹介した「地球環境への影響を計る指標であるLCCO<sub>2</sub>とLCWを、建築、設備の設計者が設計内容に即してパソコン上で簡便に算出し、自らの環境対策の効果を定量的に確認できるソフトウェア（BEAT-Bldg）」については、国土技術政策総合研究所ホームページ内の「<http://www.nilim.go.jp/lab/ieg/beat.htm>」にて公開している。

また、「3. 多世代利用型超長期住宅及び宅地の形成・管理技術の開発」で紹介した技術開発検討会における資料等についても、同じく、「<http://www.nilim.go.jp/tasedai/portal.htm>」にて公開している。

岩手・宮城内陸地震における河道閉塞

(天然ダム) 対応について

危機管理技術研究センター長

西本 晴男

# 岩手・宮城内陸地震における河道閉塞（天然ダム）対応について

危機管理技術研究センター長  
西本晴男

## 1. はじめに

平成20年6月14日に発生した最大震度6強の地震は、岩手・宮城県境付近を中心に大きな被害をもたらした。特に、震源が栗駒火山の火山噴出物が厚く堆積している山体直下であったことから、多くの山腹崩壊等の土砂災害が発生した。このため、国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センターおよび土木研究所土砂管理研究グループが災害直後より現地調査を始め、種々の危機管理的現地対応等を行ったのでその概要を報告する。なお、本稿で用いた数値等は、既往資料や速報値によるものを含むため、今後変更される可能性がある。

## 2. 地震と土砂災害の概要

### 2.1 地震の概要

6月14日8時43分に、北緯39度1.7分、東経140度52.8分（岩手県内陸南部）の深さ8kmを震源とするM7.2の地震が発生した。この地震により、震度6強を記録したのが岩手県奥州市と宮城県栗原市、震度6弱を記録したのが宮城県大崎市、震度5強は岩手県一関市、宮城県仙台市、秋田県湯沢市をはじめ多くの市町村において記録し、北海道から関東まで広い範囲で揺れが観測された。この地震では、多くの余震が観測されたが震度5強以上の強い余震は観測されなかった。

### 2.2 土砂災害の概要

今回の地震で発生した土砂災害のうち、特に緊急の対応を行う必要があった河道閉塞（天然ダム）（以下、「天然ダム」と書く）は岩手県一関市の磐井川流域と、宮城県栗原市の迫川流域に集中して発生した。このほか、三迫川上流域のドゾウ沢の源頭部を発生源とする大規模な土石流が発生した。また、二迫川に建設された荒砥沢ダムの貯水池末端付近で大規模な地すべりが発生した（図-1）。

この地震によって48件の土砂災害（土石流24件、地すべり9件、がけ崩れ15件（平成20年7月31日まで本省保全課調べ）を含め、約3,500箇所以上の山腹崩壊・地すべりが発生<sup>1)</sup>している。これらの土砂災害によって、18名の死者・行方不明者が出た。

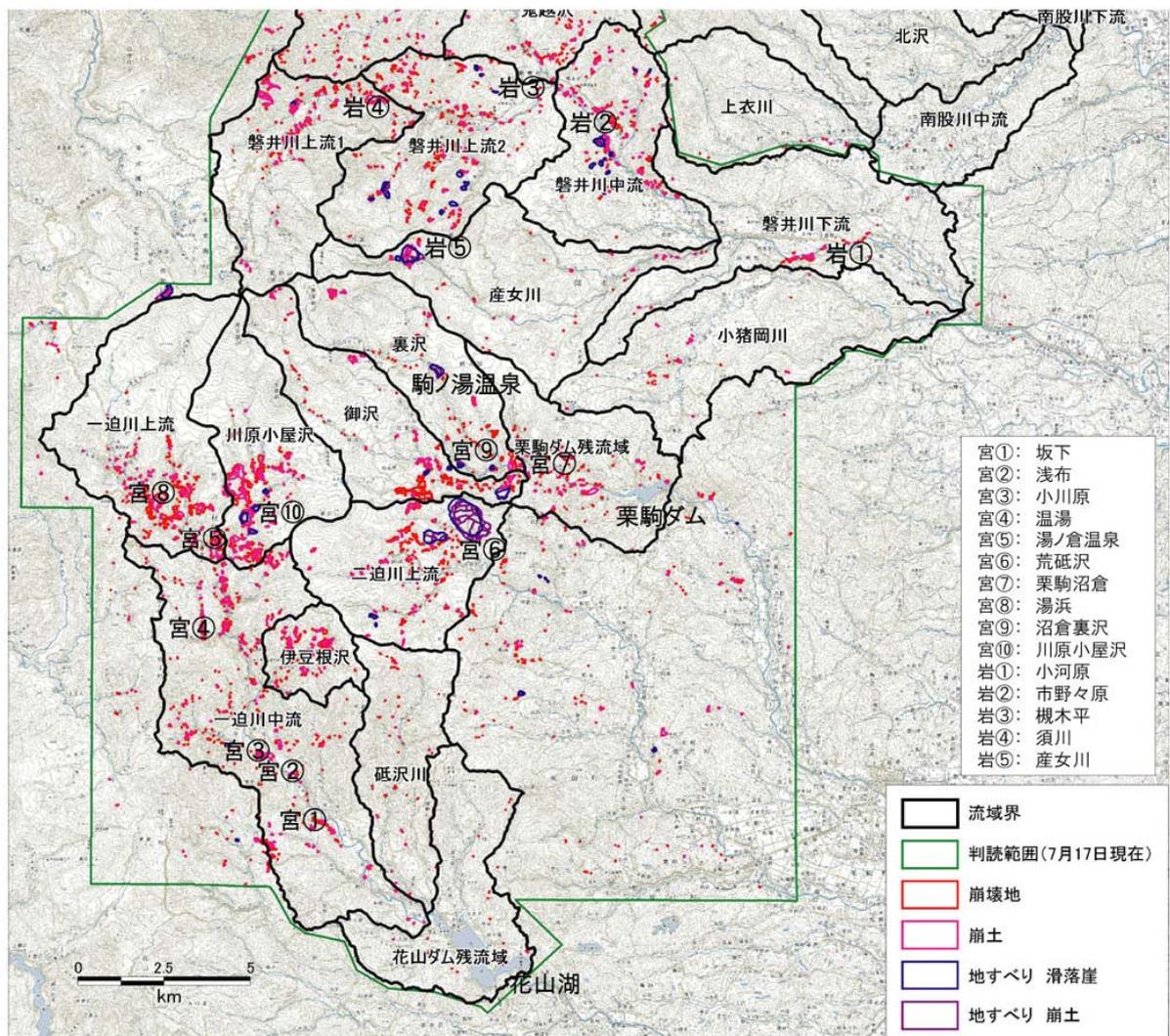


図-1 崩壊地および緊急の対応を検討した天然ダムの位置<sup>1)</sup>

### 3. 地震後の土砂災害対応活動

国総研危機管理技術研究センターおよび土木研究所土砂管理研究グループは、発災当日よりTFC-FORCE 隊員等として職員を派遣し、現地での技術支援を行った。7月末までのその総数は延べ80人日となり、その後も状況変化に対応して随時職員の派遣を続けている。

現地で行った支援活動は主に以下の8項目に分類される。

#### 1) 先遣隊としての状況把握

地震発生日に宮城県入りし、東北地方整備局にて打ち合わせを行い、翌日早朝よりヘリコプターにより状況把握を行い、多数の山腹崩壊箇所のうち天然ダムを形成する可能性のあるものを抽出していった。多数の山腹崩壊が発生した場合、初動調査としてはヘリによる調査に頼らざ

るを得ないが、その中から湛水が生じていない段階で河道閉塞箇所を見つけ出すことは意外に困難であり、地整職員と同乗して調査方法等を指導した。

## 2) 土砂災害対策緊急支援チームの指揮

大規模地震後には、斜面が実際には崩壊していなくても表層土が緩んでいたり、斜面や溪流の途中に不安定土砂が滞留している場合があるため、土砂災害危険箇所に対して安全確認を行う必要がある。特に、震度が5強を超えると崩壊箇所が多数になる可能性があるため、対象エリアが広範になると地元機関だけでは対応が困難になる場合がある。そのため、今回の地震でも第4章に詳述しているように多数の調査支援チームを組織した。その総指揮を国総研危機管理技術研究センター長が執った。

## 3) 災害状況・諸元の把握、想定現象の提示

大規模な災害現象は経験する機会が多くはないため、状況判断や今後起こりうる現象の想定が難しい。そのため、第5章から第10章までに示すように、主要現象に対して状況把握・分析を行い、今後の展開を予想して、対策を実行する主体である地方整備局や県などに対して、所見・分析結果等を応急対策・恒久対策の方向性決定のための判断材料として提供した。

## 4) 警戒避難体制構築支援

大規模災害直後には、被害が及ぶ可能性のある地域の住民は、まず避難をしてもらうことになるが、状況が判明するにしたがって避難の範囲を縮小していく必要が生ずる。その場合に、想定される現象に対して、実際に発生する、あるいは発生が予想される段階になってから避難しても間に合う場合にはセンサー類を整備することで対応が可能となる。また、行方不明者の捜索活動や危険な区域内での応急対策を実施する人に対しても、警戒避難体制の整備は安全確保のために重要である。多数の崩壊箇所等が広域に発生した今回のケースでは、TVカメラ、土石流検知ワイヤーセンサ、水位計、雨量計等、多数のセンサを効率的に配置する必要があった。また、目的も、河道内での作業者に対するものと、流域住民に対するものがあり、情報伝達システムにも配慮が必要であった。

## 5) 観測困難箇所への新規開発機器の投入

今回形成された天然ダムのうち、一迫川最上流の湯浜地区については侵入路が無く、ヘリによる目視観察以外には状況把握が極めて困難であった。そのため、土研火山・土石流チームでは東北地整からの依頼に対応して、約1週間でヘリによる投入が可能な水位観測ブイを開発・製作し、7月5日に現地に投入して衛星携帯を通じてのデータ取得を可能にした。

## 6) 関係機関の活動の安全確保指導

今回の災害では、10月末時点でもなお8名の行方不明者がいる。発災直後には、自衛隊、県警、消防、地元市などが毎日数百人規模で被災者の救出・捜索活動を行った。その際に、土砂災害に関しては知識をあまり持っていない人が多数危険地域内で行動することになるため、現地対策本部等において注意点の説明を行い、その後も個別捜索箇所等に関する安全確認の依頼に対応した。

#### 7) 現地状況変化の確認・解説

第10章に紹介する天然ダムからの出水のように、現地では日々状況が変化しており、それが周辺の安全度にどのような変化をもたらしているのかは、地域内の関係者の重大な関心事である。天然ダムでの越流侵食や荒砥沢の大規模地すべり周辺における斜面状況変化、降雨後の天然ダムの状況変化、応急対策による周辺地域の安全度変化等、様々な局面で関係者やマスコミを含む一般の人向けに状況を解説する必要があった。10月末までに、国総研・土研としての調査所見等を記者発表する機会が延べ12回あった。

#### 8) 学会調査への支援

大規模災害時には専門性の高いメンバーで構成された学会調査団が調査に入るケースが多いが、現場担当者が対応しきれない場合に、既取得の情報を提供することで調査の効率化を図ることができる。

### 4. 土砂災害危険箇所緊急点検

岩手・宮城両県で土砂災害が発生したことをふまえ、土砂災害危険箇所等の緊急点検を6月15日より19日まで5日間にわたり実施した(写真-1)。

点検・調査対象は、震度6強・6弱・5強を観測した岩手県5市町、宮城県6市町における2,770箇所の土砂災害危険箇所とした。

点検体制としては、国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター長を本部長とする支援チームを、下記機関の150班、約670名で編成した。

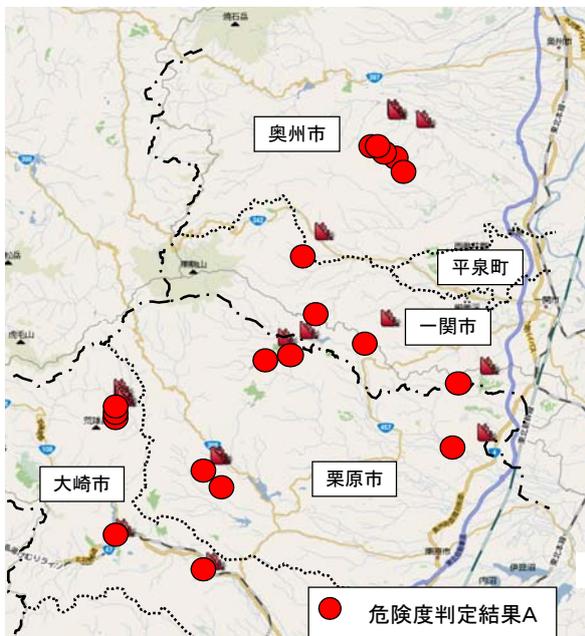
- ・国土交通省-TEC-FORCEで参加(延べ約310名:本省砂防部砂防計画課、北海道開発局、東北地方整備局、関東地方整備局、北陸地方整備局、中部地方整備局、国土技術政策総合研究所)
- ・県(延べ約240名:青森県、秋田県、山形県、福島県、栃木県、群馬県、新潟県)
- ・(財)砂防・地すべり技術センター(延べ約30名)
- ・岩手県(40名)、宮城県(5名)

なお、現地本部は、東北地方整備局岩手河川国道事務所一関出張所に設置された。

点検・調査の結果、Aランク(応急対応が必要)と判断された20箇所(図-2)について、岩手県及び宮城県、関係市に連絡し、県・市は応急対策を実施した。



写真-1 土砂災害危険箇所の緊急点検の様子（左：宮城県旧栗駒町、右：宮城県旧鳴子町）



危険度判定結果A(20箇所)の分布

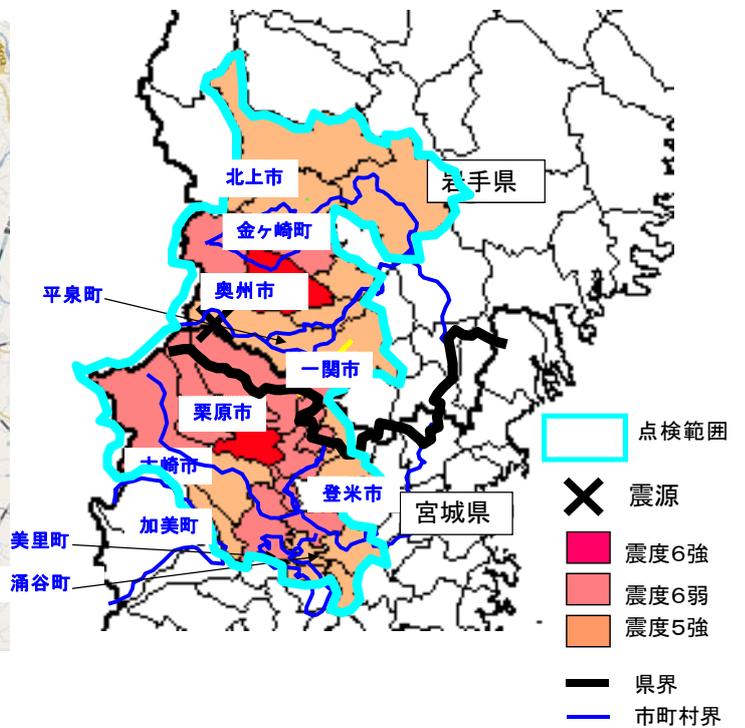


図-2 土砂災害危険箇所等の緊急点検結果（危険度判定結果A）

## 5. 三迫川で発生した土石流

三迫川上流域のドゾウ沢の源頭部では、地震により大規模な崩壊が発生し、崩壊土砂が土石流化した。崩壊地の幅は約 200m、長さ（水平距離）は約 300m であった。この土石流により崩壊地から下流約 4.8km の右岸に位置する駒ノ湯温泉では、死者 5 名・行方不明 2 名の被害が生じた。また、土石流は、崩壊地から約 10km 下流の行者の滝付近まで流下した痕跡が見られた。崩壊地から駒ノ湯温泉までの区間の平均勾配は約 10 度、土石流が停止したと考えられる行者の滝の上流側の縦断勾配は約 2 度であり、土石流の等価摩擦係数（崩壊土砂の水平移動距離に対する鉛直移動（落下）距離の比）は約 0.1 であった。石川<sup>2)</sup> は過去の地震によって発生した土石流の等価摩擦係数は 0.08 から 0.25 の範囲であることを示した。すなわち、今回の土石流はこれまでの地震による土石流の中でも、勾配の緩い位置まで到達する等価摩擦係数の小さい土石流であったと言える。

崩壊地から駒ノ湯温泉までの区間の流下幅は、崩壊地直下を除くと約 100m で、現河床から約 50m の高さまで土石流が流下した痕跡が見られた。崩壊地から駒ノ湯温泉までの区間の湾曲部で顕著な偏流が見られ（写真-2）、内湾側と外湾側でその痕跡水位に 23~40m の水位差が生じていた（[http://www.gsi.go.jp/BOUDAI/h20-iwatemiyagi/index\\_komanoyu.html](http://www.gsi.go.jp/BOUDAI/h20-iwatemiyagi/index_komanoyu.html)）。この結果を用いて、水山・上原<sup>3)</sup> の手法に従い流速を算出すると、断面 1~断面 3 の区間を土石流は 20m/s 前後の流速で流下したものと考えられた（表-1）。

地震発生から 2 週間後の 6 月 28 日時点で、駒ノ湯温泉付近の堆積物は表面は乾燥しつつあるものの、内部は高い含水状態で、堆積物上の歩行は困難であった。6 月 28 日に、地表から 10~20cm の深さから採取したサンプルの含水比は 38% であった。地震の発生から同調査時点までにはほとんど降雨がなかったことから、土石流発生当初はさらに高い含水比であったと考えられ、等価摩擦係数が小さかった事実と矛盾しない。また、堆積物には、最大 5 m 程度の巨礫が含まれているものの、大半が細粒の土砂 ( $D_{50}=0.168$  mm) であった。駒ノ湯温泉には 7 棟の建物があったが、土石流による土砂の堆積後には 1 棟のみ確認できる状況であった。確認できた 1 棟は時計周りにほぼ 90° 回転した状態であった。地形図から推定すると、駒ノ湯温泉付近では、10~15m 程度土砂が堆積しているものと考えられた。



写真-2 三迫川上流で発生した土石流の状況 (6/15 撮影)

表-1 偏流状況に基づく三迫川上流で発生した土石流の流速推定結果

項目	水位差	流下幅	曲率半径	流速
	m	m	m	m/sec
断面1	23	115	730.4	12.0 ~ 26.8
断面2	36	90	230.2	9.5 ~ 21.3
断面3	40	100	140.7	7.4 ~ 16.6

## 6. 荒砥沢ダム上流の大規模地すべり

### 6.1 はじめに

本地すべりは、宮城県栗原市栗駒の荒砥沢ダム上流で発生した長さ1,400m、幅810m（宮城県作成 荒砥沢ダム貯水池上流地すべり資料より引用）の大規模なものであり、地震で動いた地すべりとしては国内最大級と言われている(写真-3)。この地すべりにより、ダム貯水池内への大量の土砂の流入による利水容量の減少や、地すべり地周辺道路の寸断などの被害が発生している。

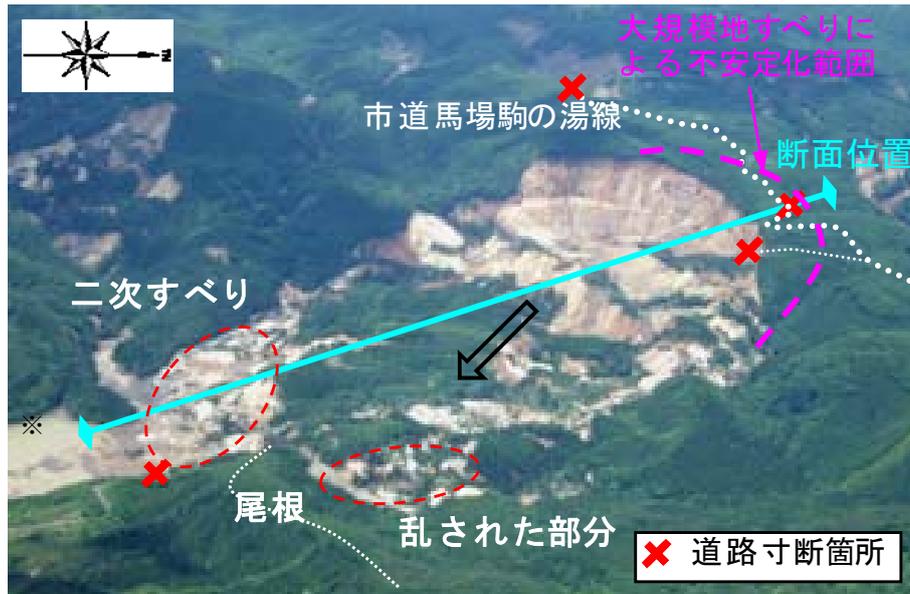


写真-3 大規模地すべり全景(6/15 空撮)

## 6.2 地形地質

周辺の地形は、平均勾配  $10^\circ$  程度の緩やかな起伏が見られる南向きの緩斜面であり、既存文献<sup>4)</sup>では地すべり地形が抽出されている。地すべり発生地の地形的特徴は、地すべり土塊本体は原形をとどめているが、地すべり地の上部には、本体の移動により形成した複数の陥没帯と前後に分離して三角に尖った形の分離小丘(引張り部)が帯状をなして交互に分布することである。また、末端部の一部には、圧縮により土塊が乱された部分と二次すべりを起こした部分が確認される。

地すべり地周辺の地質は、下位が泥岩、上位が軽石凝灰岩を主体とする層から構成され、その構造は約  $5^\circ$  で貯水池側に傾斜している緩い流れ盤構造をなすと考えられ、それらを火山噴出物が覆っている(図-3)。すべり面は、軽石凝灰岩主体層の下面付近であり、地すべり土塊は主に軽石凝灰岩からなると推定される。

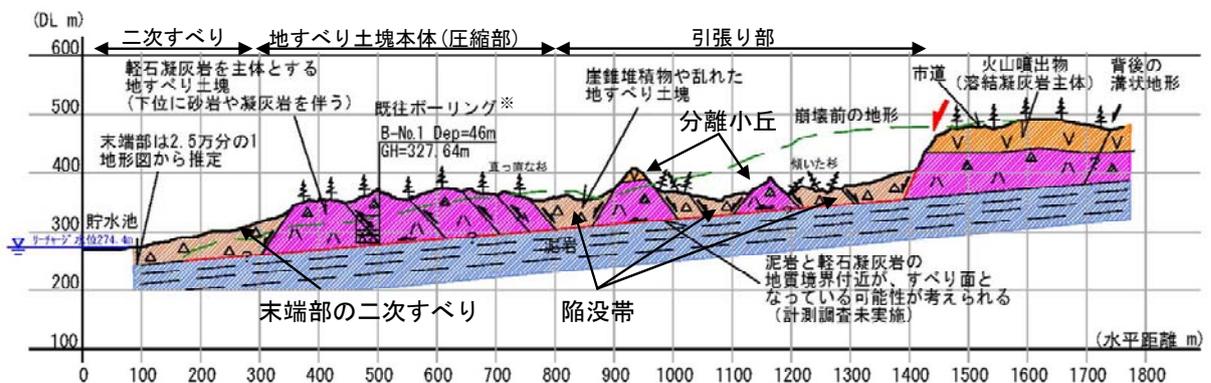


図-3 想定縦断面図

### 6.3 地すべり発生機構

本地すべりは、過去に発生した地すべり地の一部が、1,000gal を超える強い地震動によって滑動したものである。また、地すべりのタイプは、直線的なすべり面の形状、および引張り部と地すべり本体の圧縮部が明瞭に区分される地形の特徴から、すべり面が直線で末端が開放された流れ盤の地すべり(通称:椅子型地すべり)と考えられる。

地すべり滑動時の状況は、①地すべり本体が広い範囲で斜面下方に動きながら、本体の上部が何個かの分離小丘に分かれて取り残された。②次に地すべり本体が斜面下方の尾根に達し、地すべり末端部は強い圧縮を受けて土塊の一部が乱されるとともに、貯水池付近の開放部分では二次すべりが発生したものと推定される。

### 6.4 今後について

今回の地震により、多数の箇所道路が寸断し孤立集落が生じているため(耕英地区)、道路の復旧が急務となっている。写真-3の市道馬場駒の湯線は、耕英地区の孤立集落解消のために復旧が最優先とされる路線の一部が大規模地すべりにより不安定化していることが判った。そこで、現在地すべりチームでは宮城県からの要請を受けて、地すべりによる不安定化した範囲を避けて安全に通行できるルートを選定し、迂回路をいち早く建設できるように技術支援している。

## 7. 天然ダムの概況と対応

今回の地震では、平成16年10月の新潟県中越地震以来となる、多数の天然ダムが形成されたことが特徴である。国土交通省東北地方整備局、岩手県、宮城県の3者は、比較的大規模な天然ダムで、決壊等が発生した場合に流域の安全性に重大な影響を及ぼす可能性があると考えられるものとして15箇所(岩手県内5箇所、宮城県内10箇所)を把握した(図-1)。このうち、岩①小河原、岩③槻木平、岩④須川、宮①坂下、宮⑥荒砥沢、宮⑩川原小屋沢については、閉塞箇所付近に砂防えん堤やダム等の施設があり流出土砂の調節が可能、あるいは、行方不明者捜索時やその後の出水により河道が確保されて崩壊的決壊の可能性が低くなったという理由で、緊急対応は行わなかった。それ以外の9箇所については、国土交通省が直轄災害関連緊急砂防事業によって対応を行っている。岩②市野々原、宮②浅布、宮③小川原、宮⑦沼倉については河道開削を行い、湛水・崩壊的決壊の危険性を回避した。岩⑤産女川、宮④温湯、宮⑨沼倉裏沢については、現地作業の困難性と安全確保の観点から、下流の既設砂防えん堤の除石等を行っている。宮⑤湯ノ倉温泉(写真-4)、宮⑧湯浜については、湛水のポンプ排水、天然ダム土塊の開削および土塊の安定化等の対策を実施(湯浜は準備中)している。



写真-4 湯ノ倉温泉のポンプ排水 (7/8 撮影)

## 8. 迫川における天然ダムの危険度評価

### 8.1 危険度評価の概要

迫川で形成した天然ダムが決壊して出水が生じた際の家屋の浸水可能性を検討した。まず、決壊による出水のピーク流量と流下能力を比較評価し、次いで、溪流の湾曲や合流等の地形条件と連続して形成された天然ダムの影響を考慮した2次元シミュレーションによる集落の浸水可能性を詳細に評価した。

### 8.2 緊急危険度評価

表-2は天然ダムの形状とピーク流量の推定値を示したものである。なお、平成20年6月25日時点ですでに救助活動による開削あるいは自然に水が天然ダムの表面を流れていた箇所(川原小屋沢、温湯、小川原、浅布、坂下)は「越流による決壊」を想定し、表中では「-」と記載した。ここでは、湛水池へ流入する時点の水量を実績値とした場合と近傍の駒ノ湯アメダス観測所における既往最大24時間雨量からの推定値とした場合の2ケースを対象とした。この結果、ピーク流量は最大で900m<sup>3</sup>/s程度であった。

表-3は迫川に沿って存在する集落内のいくつかの地点で推定した、等流状態の流下能力を示したものである。その結果、流下能力はピーク流量の推定値と比べて温湯温泉、猪ノ沢、大田の集落で下回り、その他の集落で上回った。

表-2 ピーク流量の推定値 (緊急危険度評価)

河道閉塞 (天然ダム)の名称	形状			決壊する過程			ピーク流量の推定値 [m <sup>3</sup> /s]	
				決壊まで要する時間[日]		越流		
	高さ [m]	幅 [m]	長さ [m]	越流による決壊	パイピングによる決壊		湛水池に流入する水量を実績値とした場合	既往最大24時間雨量からの推定値とした場合
湯浜	45	50	1200	39.2	1716	越流	15~838	273~838
湯ノ倉	20	53	630	3.4	1081	越流	10~471	187~528
川原小屋沢	30	50	600	-	-	越流	15~572	123~572

表-3 各集落付近での流下能力

地区名	流下能力 [m <sup>3</sup> /s]
温湯温泉	230～1200
小川原・切留	1850～3021
浅布	1194～8201
猪ノ沢・坂下・中村・大向	260～4900
早坂	1110～1150
大田	180～4900

### 8.3 詳細危険度評価

図-4 は、湛水池に流入する流量を実績値とした場合での、各集落が存在する区間内を三角形に分割した要素における水深と堆積深の和のうち最大値をプロットしたものである。温湯温泉と切留・穴ノ原では、水深と堆積深の和が家屋のある地盤の標高と河床の標高の差を越えたことから、家屋が浸水する可能性が高いことが分かった。猪ノ沢、坂下・中村、越戸、大田では、家屋が浸水する可能性が低いことが分かった。

図-5 は図-4 と同様であるが、湛水池に流入する流量を推定値とした場合のものである。湛水池に流入する流量を実績値とした場合と比べると、湛水池に流入する水量が多いため、水深と堆積深の和はなかなか小さくならなかった。大田を除く集落では、水深と堆積深の和が家屋のある地盤の標高と河床の標高の差を越えたことから、家屋が浸水する可能性が高いことが分かった。大田では、水深と堆積深の和は家屋のある地盤の標高と河床の標高の差よりも小さかった。

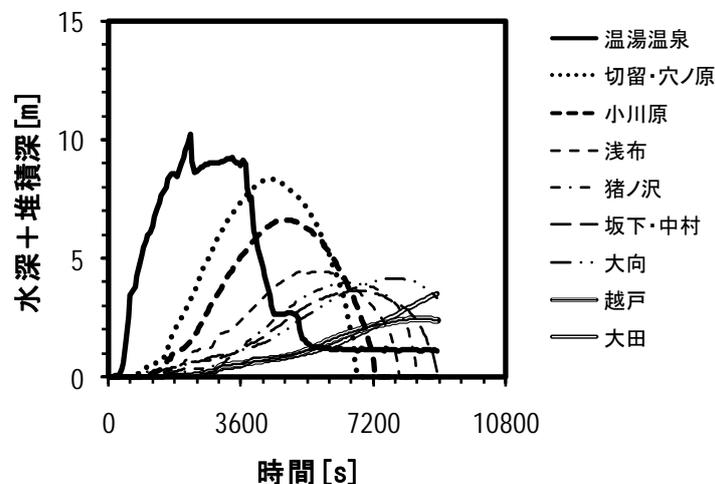


図-4 水深と堆積深の和の時間変化（湛水池に流入する水量を実績値とした場合）

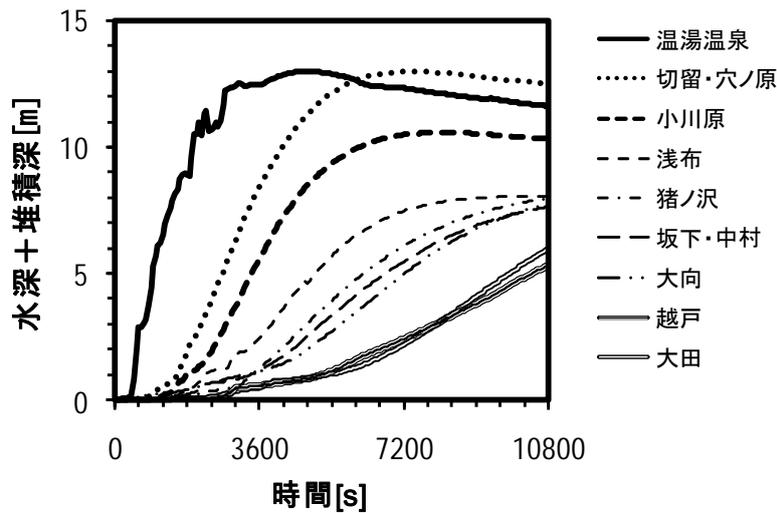


図-5 水深と堆積深の和の時間変化（既往最大 24 時間雨量からの推定値とした場合）

#### 8.4 天然ダム危険度評価のまとめ

第 8 章をまとめると次のようになる。1)小川原と浅布で形成した天然ダムでは、河道を閉塞している土砂を開削して排水路を設置し、流水が通過できる河道を確保するとともに、家屋の浸水を防ぐ必要がある。2)湯浜と湯ノ倉で形成した天然ダムでは、ポンプや排水路などによる湛水池の水を排水するといった応急対策により、決壊を防ぐ必要がある。3)湛水池が満水となっていない湯浜と湯ノ倉では、湛水池の水位を監視する必要がある。

### 9. 沼倉裏沢の天然ダムおける越流

#### 9.1 栗駒ダムにおける流入量の変化

平成 20 年 6 月 21 日午前 0 時 30 分に、栗駒ダムの流入量が急激に増加しはじめ、同 1 時 20 分最大流量が約  $100\text{m}^3/\text{s}$  に達した。その後、急激に、栗駒ダムの流入量は減少し、増加開始から約 2 時間後には、ほぼ元の値に戻る急激な流入量の増減が観測された（国土交通省砂防部ホームページより）。なお、この栗駒ダムへの流入量の増加が生じた時間帯に、大きな余震や降雨は見られなかった。

#### 9.2 天然ダムの形状の変化

急激な流入量の変動があった直後の 6 月 21 日午前中にヘリコプターにより、上空から、栗駒ダムの上流域の調査を実施した結果、沼倉裏沢地区にできた天然ダムにおいて、越流により侵食が生じた痕跡が見られ、湛水域が縮小されているのが確認でき（写真-5）、同箇所の天然ダム土隴の侵食により栗駒ダムの流入量の急激な増加が生じたものと考えられた。

同地区では、右岸斜面で地震により発生した崩壊性地すべりにより天然ダムができた。当初の堰止め幅は約 150m、堰止め長は約 550m、堰止め高さは約 30m あった。地形図によるとこの地点

付近の元の河床勾配は1/14（約4°）であった。

一方、6月21日の越水により侵食された流路の幅は流路の底で20m～30mであり、下流に行くほど広がっていた。また、流路の側壁の勾配は急なところで45度程度であり、流路の深さは5～14m程度であった（写真-6、図-6）。侵食後の流路の縦断勾配は天然ダム箇所の上流端付近で1/8（約7°）、上流端付近1/24（約2°）であった。

### 9.3 粒径の変化

天然ダムを形成している土砂は砂などの細粒分と粒径数cmから数10cmの礫等に混じって、直径が1～5mの巨礫も混入していた。左岸側で21日の越水による侵食を受けずに残った天然ダムの地表面の粒径を調査した結果、約40%の地点が2cm以下の砂などに、約10%の地点が50cm以上の巨礫に覆われていた（図-7）。

一方、侵食後の河床には、天然ダムを形成した土砂に多く見られた2cm以下の細粒分はほとんど見られず、アーマーコート化していた（図-8）。



写真-5 越水による侵食前後の沼倉裏沢地区の天然ダムの様子  
（左：6/20撮影、右：6/21撮影）



写真-6 天然ダム上流端の状況（7/3撮影、下流を望む）

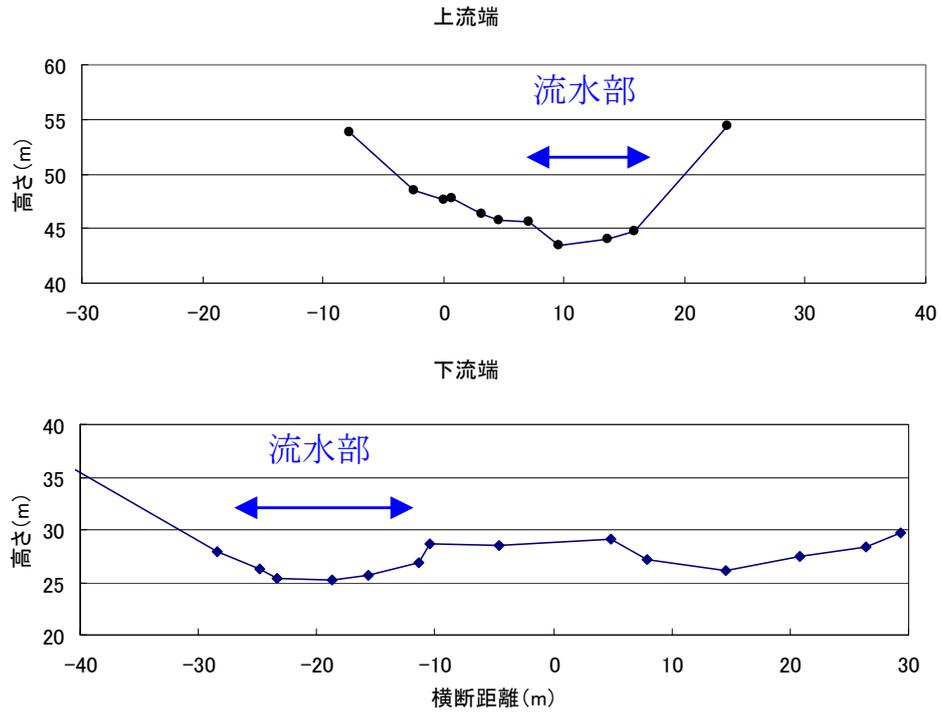


図-6 侵食された流路の横断面図

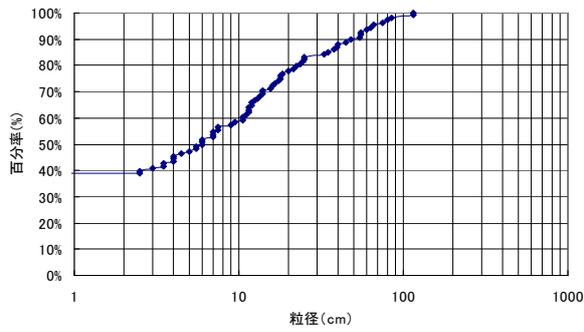


図-7 天然ダムの地表面粒径分布の百分率

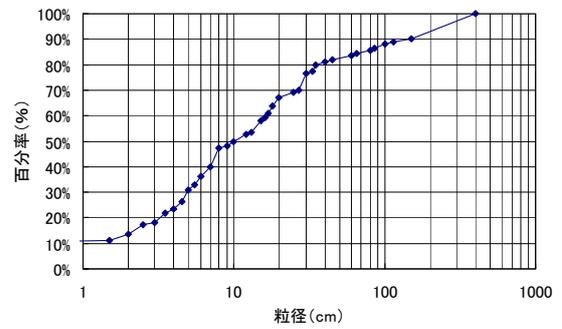


図-8 侵食後の河床粒径分布の百分率

## 10. 地震時斜面崩壊危険度評価手法の適用

地震時斜面崩壊危険度評価手法<sup>5)</sup>を今回の地震に適用した。本手法は、斜面の勾配と平均曲率および地表面最大加速度を用いて判別得点を算出し、斜面の崩壊しやすさを相対的に評価する方法である。判別得点の高い地域は、低い地域と比べて崩壊しやすいと評価できる。

斜面の勾配および平均曲率は、数値地図 50m メッシュ (標高) のデータを、バイキュービック法を用いて 10m メッシュへ変換して算出した。地表面最大加速度については、(独)防災科学技術研究所が提供している K-net (<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>) の最大加速度を用いて、観測点における最大加速度を平滑化した。図-9 により、一迫川、二迫川、三迫川 (栗原市) 及び磐井川 (一関市) 流域は他の地域に比べて相対的に高い判別得点であり、斜面の崩壊しやすい条件であったと推定できる。これは、本手法が斜面の震後点検を行う際の優先範囲の選定に有効であることを示唆している。

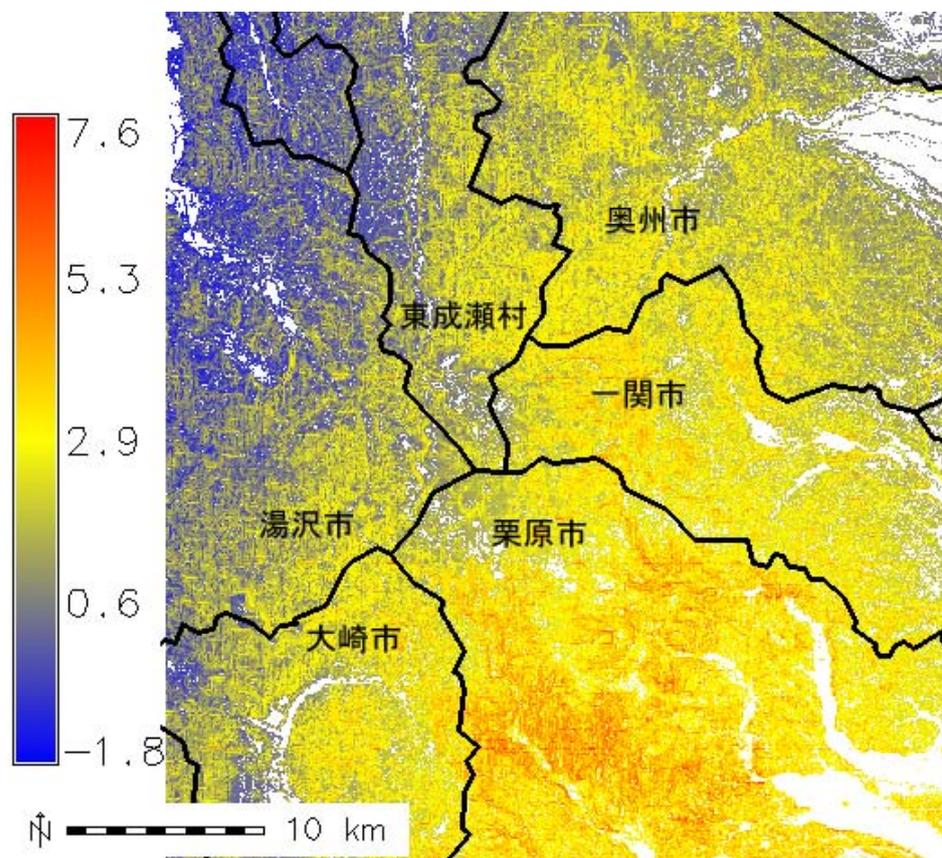


図-9 判別得点分布 (実線 : 市町村界)

## 11. まとめ

大規模災害時で、特に救助活動が継続している場合には、現場は大混乱をしている。大規模災害は発生頻度が高くはないので、防災業務に携わっている担当者であっても知識・経験が十分であるとは限らない。

第3章で述べたように、国総研・土研からの派遣者は様々な現地対応業務を行った。今回我々が行った危機管理的現地対応は、ひとことで言うと、現地では「何が起こったのかわからない」、「これから何が起こるのかわからない」ことで恐怖と混乱に陥っており、それらの疑問に対して適切な助言を行うことで必要な活動をスムーズに行えるようにするということに尽きると思われる。

国総研・土研の研究者は、日本全国の大規模災害に関する知識・知見の修得と実際の緊急対応の場数を踏む機会を持っており、国内で最も災害時の危機管理に関する経験を有している集団であるといえる。したがって、今後も災害時の危機管理の実態と課題を集積して行って、ノウハウを維持・普及していくことが重要な使命であるといえる。

近年、地震による土砂災害の発生が目立ってきている。今後も、東海地震を始めとして、大規模な海溝型地震の発生が予想されているとともに、内陸直下型地震は予測が困難であるという現状から、地震時の事前および危機管理的対応については十分な検討を行っておく必要がある。

本稿をまとめるに当たり、東北地方整備局、岩手県、宮城県の関係各位に多くのご協力を頂いた。ここに深甚なる感謝を申し上げる。

### 参考文献

- 1) 岩手県県土整備部砂防災害課・宮城県土木部防災砂防課：平成20年岩手・宮城内陸地震に係る土砂災害対策技術検討会 第3回委員会 参考資料、2008
- 2) 石川芳治：地震による土石流発生に係わる地形、地質条件、砂防学会誌、51-5、p. 35-42、1999
- 3) 水山高久、上原信司：湾曲水路における土石流の挙動、土木技術資料、23-5、p. 15-20、1981
- 4) 防災科学技術研究所、地すべり地形分布図、1982
- 5) 内田太郎、片岡正次郎、岩男忠明、松尾修、寺田秀樹、中野泰雄、杉浦信男、小山内信智：地震による斜面崩壊危険度評価手法に関する研究、国土技術政策総合研究所資料第204号、2004

# 世界経済の動脈物流の実態

—世界を駆けめぐる国際コンテナ貨物の最新事情—

港湾研究部長

高橋 宏直

# 世界経済の動脈物流の実態 —世界を駆けめぐる国際海上コンテナ貨物の最新情報—

港湾研究部長 高橋宏直

## 1. はじめに

世界を駆けめぐる国際海上コンテナ貨物輸送に関する港湾整備政策を企画・立案するためには、わが国を取り巻く世界的なコンテナ船動静・コンテナ貨物流動の現況，経済産業の将来動向を把握・分析する必要がある。

本稿では、これらの視点から国総研港湾研究部で実施している最近の研究成果を報告する。なお、本稿は大きく 2. 現況動向に対する分析と 3. 将来動向に対する考察から構成されている。

## 2. 現況動向に対する分析

### 2.1 国際海上コンテナの規格とサイズ別の動向<sup>1)</sup>

#### 2.1.1 コンテナの ISO 規格

##### 1) コンテナの標準化の歴史

国際海上コンテナ輸送に使用されるコンテナについては、国際標準化機構 (ISO) によって外形寸法，内寸寸法，強度，コンテナの積み上げや固定に必要な隅金具などが決められており，国際的な船やトレーラー等によるスムーズな複合一貫輸送に大いに貢献している。コンテナの国際標準化に向けた動きはおよそ半世紀前，1960 年代に米国を中心に議論が活発化したと言われている。現在のコンテナの標準化の概要を，既存の文献 (2, 3) などをもとに以下に概観する。

米国では，国際海上コンテナ輸送は，1950 年代から既に実施されており，マルコム・マクリーン創設の米国の船会社であるシーランド社は，長さ 35ft のコンテナを，またハワイとのコンテナ輸送を展開していたマトソン社は 24ft の長さのコンテナを採用するなど，様々な長さのコンテナが存在していた<sup>3)</sup>。船社ごとにコンテナのサイズが異なると，船へのコンテナの積み付けや，荷役機械でサイズの違うコンテナの取扱いをしなければならない，スプレッダーと呼ばれる荷役時の補助具を複数準備しなければならないなど不都合が多く，輸送が非常に非効率となるおそれがあった<sup>3)</sup>。そこで，1958 年に米国運輸省海事管理局 (MARAD) がその統一に乗り出し，船社などをはじめとする関係機関との様々な調整，紆余曲折を経て 1961 年に長さ 10, 20, 30, 40ft のコンテナのみを規格品とすることが定められ，米連邦海事局 (FMB) も，規格サイズのコンテナを運ぶ船にのみ補助金を出すという通達を出した<sup>3)</sup>。

このあと米国は，国際標準化機構 (ISO) に対してコンテナの規格統一を働きかけ，1961 年に ISO の中にコンテナの規格を担当する技術委員会 TC104 (Freight Container) が設置され，コンテナの規格などが議論されることとなった (2, 3)。1964 年には，長さ 10ft, 20ft,

30ft, 40ft, 高さ 8ft, 幅 8ft 等のサイズが ISO 規格化, 1966 年には高さ 8ft6inch が追加, 1965 年にはシーランド社の改良型の隅金具が ISO 規格化, さらに 2 年後の 1967 年には強度なども考慮した隅金具が TC104 で承認されるなど, 米国規格のコンテナが国際的な標準規格となり, この頃からリース会社も大量のコンテナを注文し始め, コンテナリゼーションが大いに発展することとなった<sup>3)</sup>.

その後, 1970 年代後半には 1ft 高さの高い 9ft6inch の背高コンテナが, 1980 年代には長さ 45ft の長大コンテナが米国で出現し, 1993 年には 40ft の背高コンテナである 1AAA と 30ft の背高コンテナである 1BBB の 2 つが ISO 規格化, 45ft コンテナの 1EEE (高さ 9ft6inch), 1EE (高さ 8ft6inch) も 2005 年 10 月に ISO 規格化されている<sup>4~6)</sup>.

## 2) コンテナの ISO 規格概要

現在の ISO 規格では, 国際海上コンテナは, 長さが 10ft, 20ft, 30ft, 40ft, 45ft の 5 種となるが, 10ft や 30ft コンテナは, 国際的な海上コンテナ輸送で使用されている例は少ない. また, 我が国で鉄道用コンテナとして主に使用されている長さ 12ft (最大積載重量 5 トン) のコンテナは, ISO の規格外である.

表-1 に, 20ft, 40ft, 40ft 背高, 45ft の 4 種の国際海上コンテナの主要なサイズや, 標準的な自重などを想定した積載可能重量などの概略を示す. 1993 年に規格化された 40ft 背高コンテナ(1AAA)は, 一般的にノーマルコンテナと呼ばれる高さ 8ft6inch の 40ft コンテナである 1AA(以後「40ft ノーマルコンテナ」と呼ぶ)よりも 1ft (約 30cm) 高い 9ft6inch の高さがあり, 内容積は約 12%増しである. また, 2005 年 10 月に ISO 規格に追加された 45ft コンテナは, 40ft コンテナよりも 5ft (約 1.5m) 長く, 45ft コンテナの自重を含めた総重量は, 30.48 トン(30LT:LTはロングトンの略で 1016kg)で, 40ft ノーマルコンテナ, 40ft 背高コンテナと同じとなっている.

45ft コンテナで高さ 9ft6inch の 1EEE と呼ばれるコンテナは, 最大積荷重量は, 40ft ノーマルコンテナを 1 とすると, 自重の関係で 0.96 程度となるが, 内容積は 40ft ノー

表-1 ISO のコンテナ規格例(ドライコンテナ) <sup>4~6)</sup>

種類	20'(8'6"High)	40'(8'6"High)	40'(9'6"High)	45'(9'6"High)	
外法寸法	長さ	6,058mm (19'10" 1/2)	12,192mm (40'0")	12,192mm (40'0")	13,716mm (45'0")
	幅	2,438mm(8'0")	2,438mm(8'0")	2,438mm(8'0")	2,438mm(8'0")
	高さ	2,591mm(8'6")	2,591mm(8'6")	2,896mm(9'6")	2,896mm(9'6")
自重 <sup>(注)</sup>	2,400kg	3,810kg	3,970kg	4,800kg	
最大積荷重量 <sup>(注)</sup>	28,080kg[1.05]	26,670kg[1.00]	26,510kg[0.99]	25,680kg [0.96]	
最大総重量	30,480kg	30,480kg	30,480kg	30,480kg	
内容積	33.0m <sup>3</sup> [0.49]	67.7m <sup>3</sup> [1.00]	76.0m <sup>3</sup> [1.12]	86.0m <sup>3</sup> [1.27]	

注) 自重は代表的な事例の記載。最大積載重量は自重を元に最大総重量から自重を減じた試算値。

注) 最大積載重量、内容積の[ ]は、40ft (ノーマル) コンテナを 1 としたときの比率。

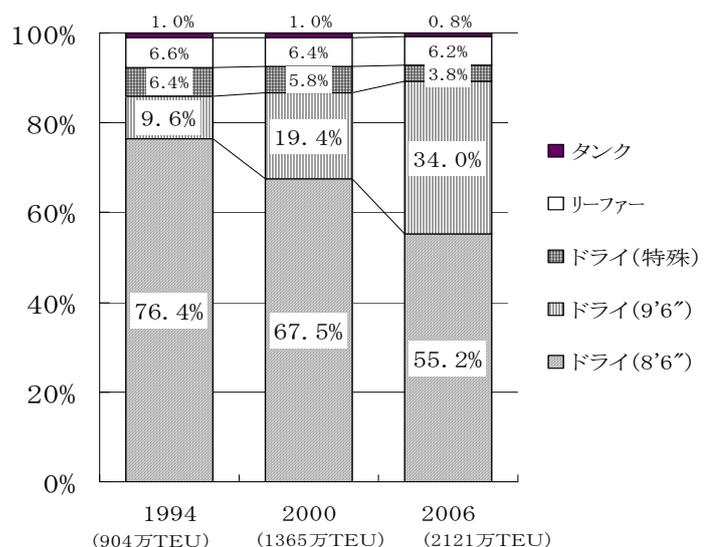
マルコンテナの約 27%増し、40ft 背高コンテナに比べても約 13%増しで、繊維・雑貨などの容積勝ち貨物輸送に適している。20ft コンテナについては、かつての最大総重量は 24.0 トンであったが、表-1 では 30.48 トンと表記している。これは、2005 年 9 月の ISO668 Amendmednt1<sup>4)</sup>による数字の変更を反映したものである。それまでは、20ft の最大積載重量は 24 トンであり、ISO668<sup>5)</sup>では、30ft コンテナの 1BBB, 1BB, 1B, 1BX と 20ft コンテナの 1CC, 1C, 1CX コンテナについては、最大重量 30.48 トンを超えない範囲であれば、重量テストの実施などの条件をクリアすれば、ISO コンテナとして取り扱えることとなっていた。

## 2.1.2 サイズ別のコンテナの動向

国際海上輸送用のコンテナは、文献 7)によれば、2006 年現在で約 2,121 万 TEU、個数ベースでは 1,393 万個ある。2,121 万 TEU のうち、5 割強が船会社所有、約 4 割強がコンテナリース会社、残りの数パーセントがその他、運送業者の保有等となっている。この文献 7)のデータをもとに、コンテナのタイプ別の推移を図-1 に示す。2006 年現在 2,121 万 TEU のコンテナがあるが、これは冷凍や冷蔵貨物を運ぶリーファーコンテナや、液体を運ぶタンクコンテナ等の特殊コンテナも含んでいる。2006 年では、最も普及し多種類の貨物輸送に使用されるドライコンテナが全体の約 9 割を占めており、8ft6inch の高さのものが、55.2%にあたる 1,171 万 TEU、9ft6inch のいわゆる背高(ハイキューブ)コンテナが 34.0%、で 720 万 TEU となっている。リーファーコンテナは、全体の 6.2%にあたる 131 万 TEU である。年次別の推移をみると、高さ 8ft6inch のシェアが 1994 年の 76.4%から大きく減り、ハイキューブコンテナが大きくシェアを伸ばしている。

次に、ドライコンテナのサイズ別の推移(TEU ベース)を図-2 に示す。2006 年現在では、全体 1,891 万 TEU のうち 20ft コンテナが 31.7%にあたる 599 万 TEU、40ft のノーマルコンテナが、30.2%にあたる 572 万 TEU、40ft 背高コンテナが 36.1%にあたる 682 万 TEU、45ft コンテナが 2.0%にあたる 37 万 TEU、残りがその他の長さのコンテナとなっている。

1994 年から 2006 年までの 12 年間で、世界のドライコンテナが、712 万 TEU から 1,891 万 TEU となり、年率 8.5%の伸びを示しているのに対して、40ft 背高コンテナは、1994 年の 58 万 TEU が 2006 年には 682 万 TEU と年率 22.8%の伸びと急増している。また、まだ量は少ないものの、45ft コンテナについても、1994 年の



資料：Market Analysis World Container Census 2007をもとに作成

図-1 国際海上コンテナタイプ別の推移

10万TEUが2006年には37万TEUと、年率11.9%で伸びている。また、図-2の2007年以降のプロットは、文献7)に記載されている予測値をプロットしたものであるが、40ft背高コンテナは今後も大きく増加、また量は少ないものの、45ftコンテナについても増加を続けるとされている。

なお、背高コンテナを通常のセミトレーラー連結車に積載すると、車両の高さが3.8mを上回り4.1mほどの高さとなる。従来は、この背高海上コンテナの通行に関しては、事前に警察庁交通局交通規制課長及び国土交通省道路局道路交通管理課長が審査のうえ指定した経路(これを「指定経路」とよぶ)のみを通行許可の対象とすることが定められていた。しかし、この指定経路制度は、2004年(平成16年)2月の車両制限令の改正に伴い廃止され、道路管理者が支障ないと認めて指定した「高さ指定道路」にかかわることとなり、現在は通行する車両の高さが4.1mまでの車両は、高さ指定道路の走行であれば許可申請は不要となっている。

したがって、背高コンテナを積載したセミトレーラーについても、高さ指定道路を通行するのであれば、許可無しに通行が可能となっている。道路交通法による高さに関する規定は、上述の車両制限令と同じ、車両の保安基準は、貨物の積載の状況は問わず、車両の高さ自体が3.8mという規定となる。

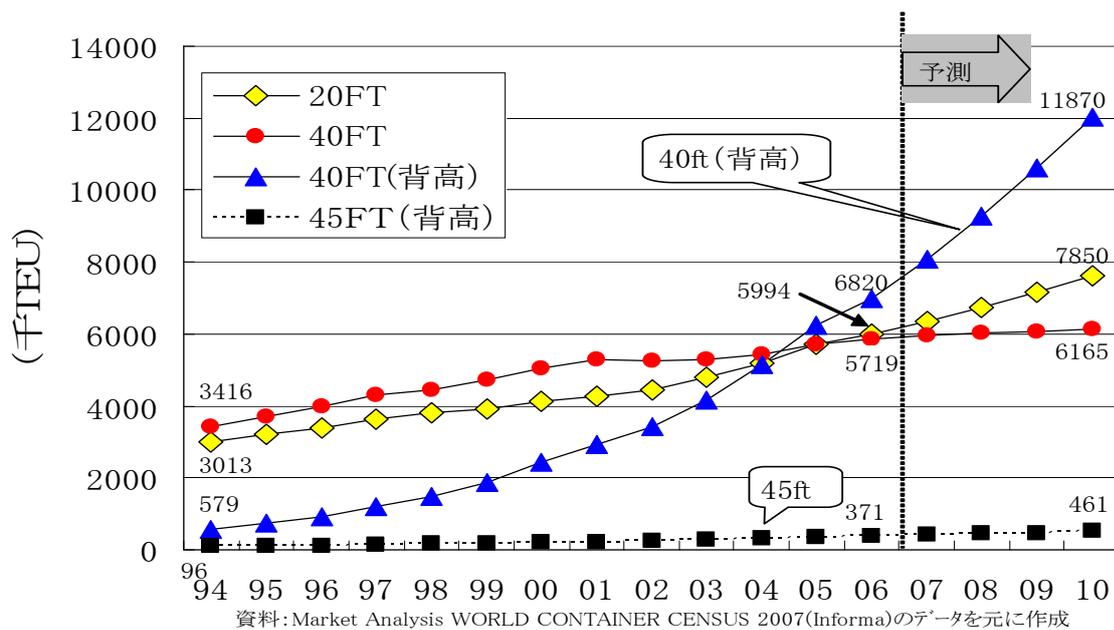


図-2 国際海上コンテナ(ドライ)の保有量推移

### 2.1.3 サイズ別の積載貨物重量分布

2007年のアジア-北米コンテナ貨物(東航貨物)について、サイズ別の積載重量分布を図-3に示す。アジア地域全体の東航貨物では、1個あたりの平均積載重量は、20ftコンテナ14.4トン、40ftコンテナ10.6トン、45ftコンテナ9.2トンであり、さらにTEUベースの平均積載重量で考えると、20ftは14.4トンで変わらないが、40ftは5.3トン、45ftは

4.1 トンとなり、20ft コンテナ容積が一番小さいにもかかわらず、もっとも重い貨物輸送により多く利用されている。1個あたりの重量の分布形である図-3をみても、20ft コンテナの積載重量分布には、16～18 トンにピークがあるのに対して、40ft コンテナでは、6～8 トンに大きなピークがある。45ft コンテナについても、40ft と同様に、6～8 トンにピークのある分布であり、重量的には比較的軽い貨物輸送に利用されている。

中国と日本の東航貨物についての分布についても、アジア地域全体でのコンテナサイズ別の重量分布とほぼ同じような分布形となっている。コンテナサイズ別の1個あたりの平均積載重量でも、中国では、20ft で14.1 トン、40ft で10.4 トン、45ft で9.2 トン、日本では、20ft で12.9 トン、40ft で11.2 トン、45ft で9.8 トンと、20ft の方がより重量の重い貨物、45ft の方がより軽い貨物を運んでいる状況である。

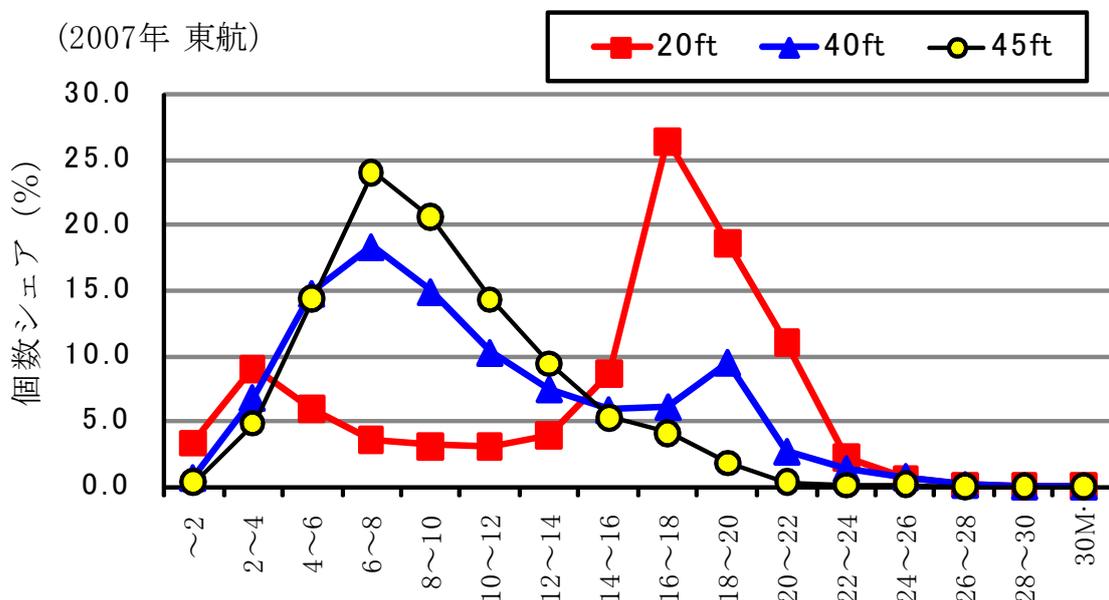


図-3 コンテナサイズ別の重量分布(アジア-北米間貨物)

## 2.2 フルコンテナ船の動静分析<sup>8,9)</sup>

### 2.2.1 分析手法

動静分析は、LMIU (Lloyd's Marine Intelligence Unit) の寄港実績データと LRF (Lloyd's Register - Fairplay) の船舶諸元データを用いて分析した。具体的には、船舶のIMOナンバーをキーに、LMIUの寄港実績データ(何月何日にどこの港に寄港したのか)とLRFの船舶諸元データとをリンク付けして一体的に用いた。以降において、このデータをLloyd'sデータと称する。また、各年は1月～12月の暦年を指し、LRFの船舶諸元の時点は、寄港実績の年末のデータを用いた(例えば、2007年寄港実績には、2007年12月末時点の船舶諸元を使用)。

なお、ここでの動静分析については、全て外航フルコンテナ船を対象としている。これ

は、寄港実績や船型分析において、セミコンテナ船を含めると、コンテナ以外の積み卸しのための寄港が含まれてしまう点や積載能力（TEU Capacity）と船の大きさを関係づけることが出来ない点を考慮したものである。

## 2.2.2 フルコンテナ船の船型分析

Lloyd's データによれば、2007年に世界で就航していたフルコンテナ船は4,239隻で、前年の2006年に比べて9.4%増であった。図-4にフルコンテナ船就航隻数の推移を示すが、2007年現在で1990年当時の約3.5倍のフルコンテナ船が就航しており、フルコンテナ船は、順調に増加し続けてきたと言える。

次に、就航船の積載能力（TEU Capacity）の合計値である総船腹量の推移を見たのが、図-5である。2007年のフルコンテナ船の総船腹量は1,063万TEUとなり、初めて1,000万TEUを超えていた。前年比で見ると13.2%増であり、就航隻数より船腹量の増加率が高いことから、就航船の平均船型より大きな積載能力の船が多く投入されたことが判った。1990年比では、2007年の総船腹量は約6.9倍に達していた。

さらに、総船腹量を隻数で除すことにより、平均船型の推移を求めた結果を、図-4に隻数の推移と合わせて示した（右軸）。2007年のフルコンテナ船の平均船型は2,527TEU、前年比3.4%増であった。1990年比では、2007年の平均船型は約2倍に達し、年々大型化していた。

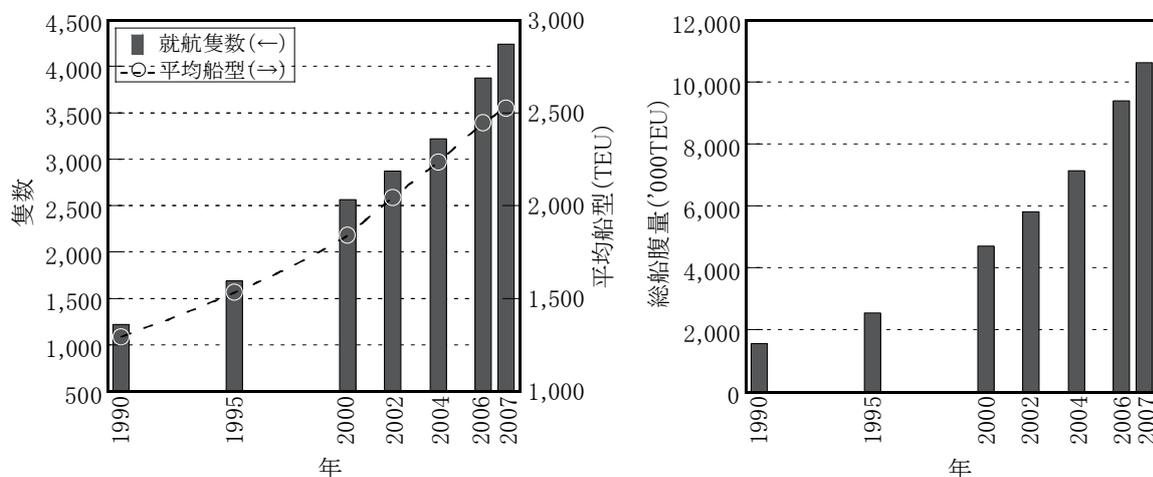


図-4 フルコンテナ船就航隻数・平均船型の推移 図-5 フルコンテナ船の総船腹量の推移

ここで、パナマ運河の拡張について触れておく<sup>10)</sup>。この拡張計画は、現存のパナマ運河の稼働率が93%に達していることから、今後の需要の増加に対応するため、2つの閘門施設の新設（太平洋側及び大西洋側）、新閘門へのアクセス水路の整備、既存水路の拡張等を行うものである。整備費用は52億5千万ドルで、運河通航料の段階的な値上げにより賄われ、2014年完了予定とされている。現在の閘門を通航できる最大船型と拡張後の新閘門を通過できる最大船型を比較したのが図-6である。通航できる最大船の諸元が、幅で32m→49m、

長さで 294m→366m と拡大しており,積載能力 12,000TEU のコンテナ船が通航可能とされている。また,拡張後の運河を通航可能な船型として,12,800TEU クラスが発注されたとの報道も見られる<sup>11)</sup>。

就航隻数の推移を,船型 Type によって見たのが,図-7 である。船型は,現在のパナマ運河を通航できる最大の船型(型幅=32m,全長=294m)の Panamax と,これより小さい Under に分類した。また,現在のパナマ運河を通航できない船型については,2006 年 10 月にパナマ政府においてパナマ運河の拡張が正式に決定されたことを受け,本資料では,拡張後のパナマ運河を通航可能な Over Panamax (型幅=49m,全長=366m)と,拡張後のパナマ運河も通航できない Super Over Panamax に分類した。型幅(B)及び全長(L)が不明な船は除外している。また,右図に当該期間中に投入されたフルコンテナ船の船型 Type も併せて記載した。図-7 より,隻数で見た場合,Under>Panamax>Over Panamax>Super Over Panamax との順になっていることが判った。ただし,投入隻数では,2001 年始→2002 年末のみ,Panamax より Over Panamax の方が多くなっていた。

一方,この船型 Type において就航船腹量の推移を見たのが,図-8 である。既に現存の総船腹量の面では,Under≒Panamax≒Over Panamax となっていた。さらに,投入船腹量の面では,2001 年始以降 Over Panamax が一番多くなっていることも判った。輸送能力面では,Over Panamax に負っている部分が急激に増加してきたものと推察された。ただし,Over Panamax については,2007 年一年間の投入船腹量で見ると,2005 年始から 2006 年末までの年間平均投入船腹量に比べて減少が見られた。

なお,拡張後のパナマ運河を通航できない Super Over Panamax は,2007 年末で 13 隻就航しており,いずれも Maersk 社であった。

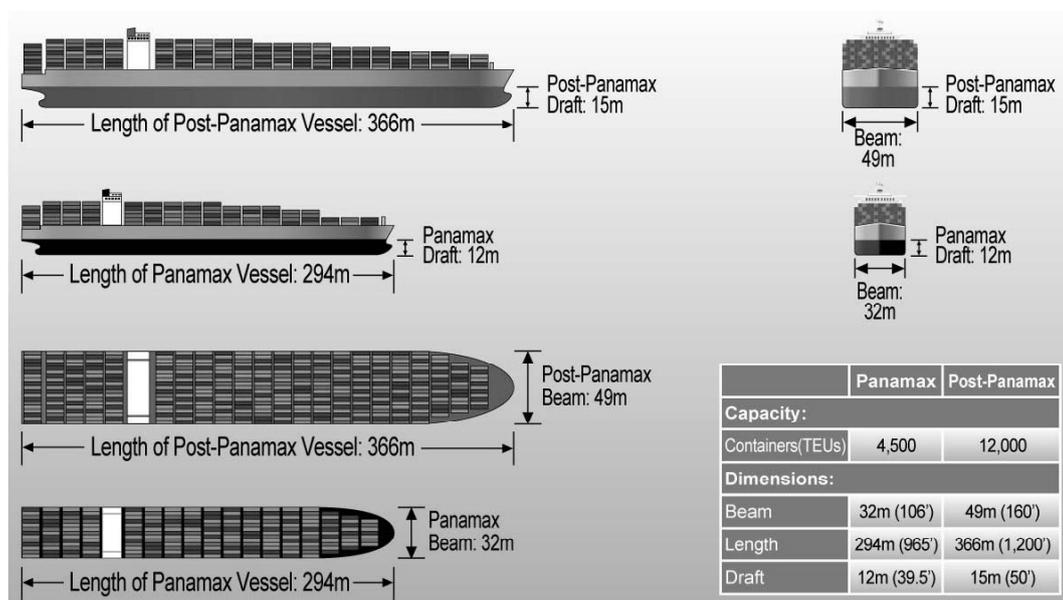


図-6 既存閘門の最大船型 (Panamax) と新閘門通航の最大船型 (Post-Panamax) の比較

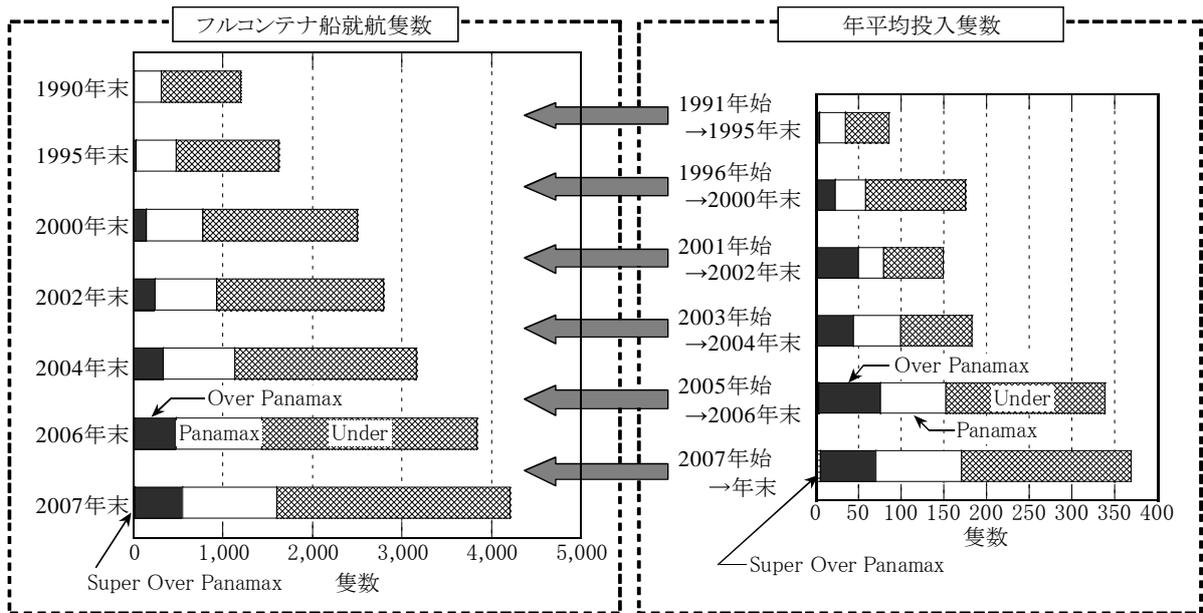


図-7 船型 Type によるフルコンテナ船就航隻数の推移

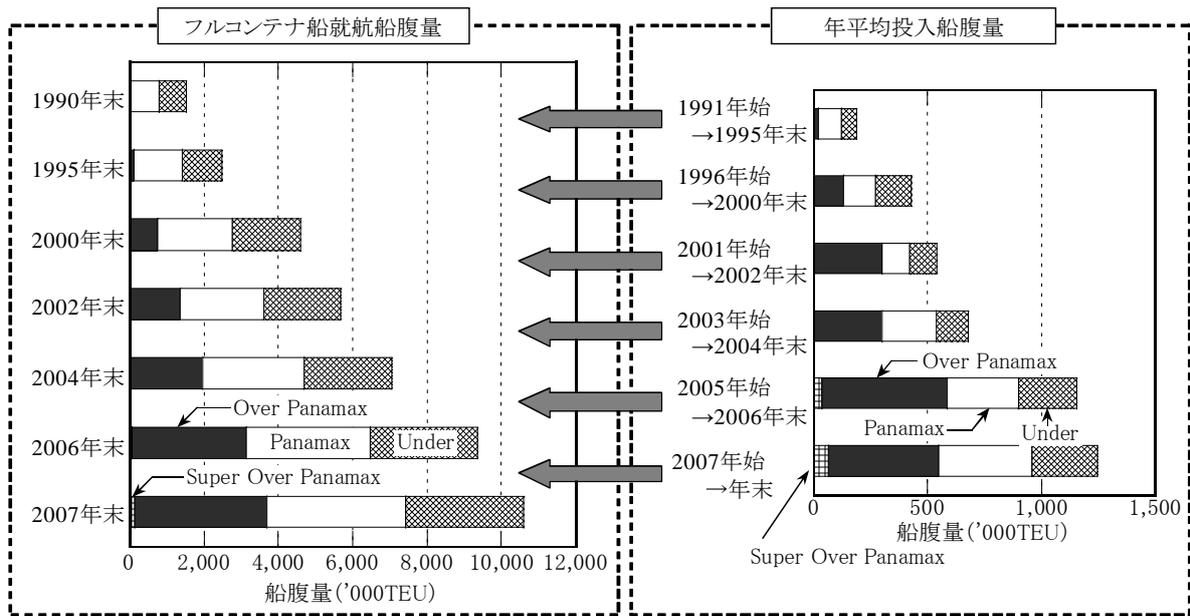


図-8 船型 Type によるフルコンテナ船就航船腹量の推移

### 2.2.3 基幹航路への大型船投入によるカスケード効果の分析

カスケード (cascade) とは、階段状に水が落ちる滝のことで、転じてカスケード効果 (cascading effect, カスケード現象とも言う) とは、ある反応が次々と他に影響していくことを指す。近年のコンテナ航路に関して、基幹航路の急激な大型化が、他の航路の大型化を連鎖的に引き起こしているとの指摘があり、この現象が基幹航路への大型コンテナ船投入によるカスケード効果と称されている。



量を算定するものである。この手法により外貿実入コンテナの地域間総流動量を推計した結果が、表-2 である。この中で、例えば NA-NA は NA（北米）域内の総流動量である。他地域との港湾取扱量は、表の数値となる（例えば、NA 港湾の対 SA 取扱量は 297 万 TEU）が、域内流動の場合、仕向・仕出のどちらも域内であることから、2 倍の値となる。全世界の外貿実入コンテナ流動量は、1 億 4,665 万 TEU と推計された。最も多い流動量は、東アジア（EA）域内で、次いで欧州－東アジア（EU－EA）、北米－東アジア（NA－EA）の基幹航路となっていた。

さらに、2000 年から 2006 年の総流動量について、東アジア（EA）発着の総流動量の推移を見たのが表-3 である。全世界の 2000 年から 2006 年の総流動量が 1.80 倍になっていたのに対し、北米－東アジア（NA－EA）及び東アジア（EA）域内流動は同程度の伸び率であった。一方、欧州－東アジア（EU－EA）や、東アジア（EA）対その他地域（オセアニア、南米等）の流動は 2.0 倍以上に増加をしており、その結果、世界全体の総流動に占める東アジア域内発着（流動の発地もしくは着地のいずれかが東アジア地域）コンテナの総流動は、2000 年の 62.9%から、5.0 ポイント上昇し、2006 年には 67.9%となっていた。東アジア（EA）地域が世界のコンテナ流動の中心となっていることが、データにおいて改めて確認された。

表-3 東アジア（EA）発着流動量の推移

('000TEU)

	2006年		2004年		2002年		2000年		06/00
NA－EA	22,201	15.1%	18,187	14.8%	14,282	14.9%	12,118	14.9%	1.83
EU－EA	23,120	15.8%	18,632	15.2%	13,505	14.1%	10,843	13.3%	2.13
EA内	39,452	26.9%	34,003	27.7%	25,834	27.0%	21,532	26.4%	1.83
EA－他	14,773	10.1%	11,087	9.0%	8,118	8.5%	6,731	8.3%	2.19
EA計	99,547	67.9%	81,909	66.8%	61,739	64.5%	51,224	62.9%	1.94
世界計	146,645		122,552		95,780		81,499		1.80

2006 年及び 2000 年の全世界の外貿実入コンテナ総流動を分かりやすく世界地図に表示したのが図-11 および図-12 である。流動量は主要な地域間に限定して示した。2000 年当時、総流動量が 1 千万 TEU を超えていた航路は北米－東アジア（NA－EA）、欧州－東アジア（EU－EA）及び東アジア（EA）域内流動で、これら 3 航路の総流動量は、2006 年には、各航路共に 2 千万 TEU を超えていた。3 航路は、いずれも東アジア（EA）発着流動であり、次いで流動量が多いのが欧州（EU）内で、後は 1 千万 TEU 未満との状況であった。また、2000 年から 2006 年にかけて、全世界の総流動量が 1.80 倍の増加であったのに対し、北米－東アジア（NA－EA）航路及び東アジア（EA）域内航路で 1.83 倍、欧州－東アジア（EU－EA）航路で 2.13 倍の増加となっており、東アジア全体では、1.94 倍の増加となっていた。

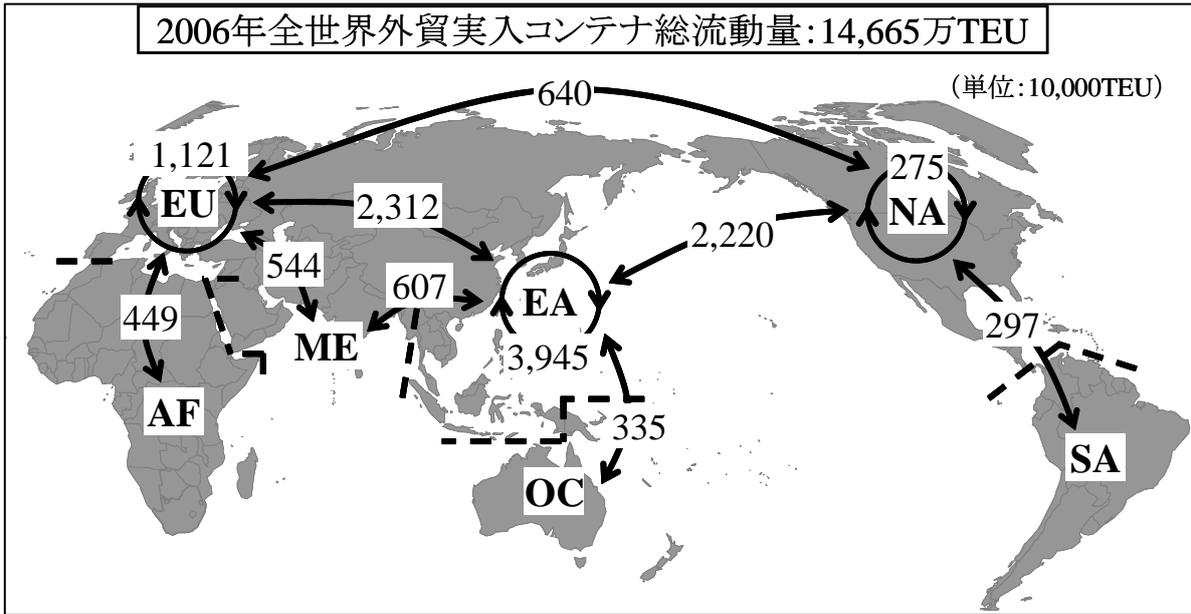


図-11 全世界の外貿実入コンテナの総流動 (2006年)

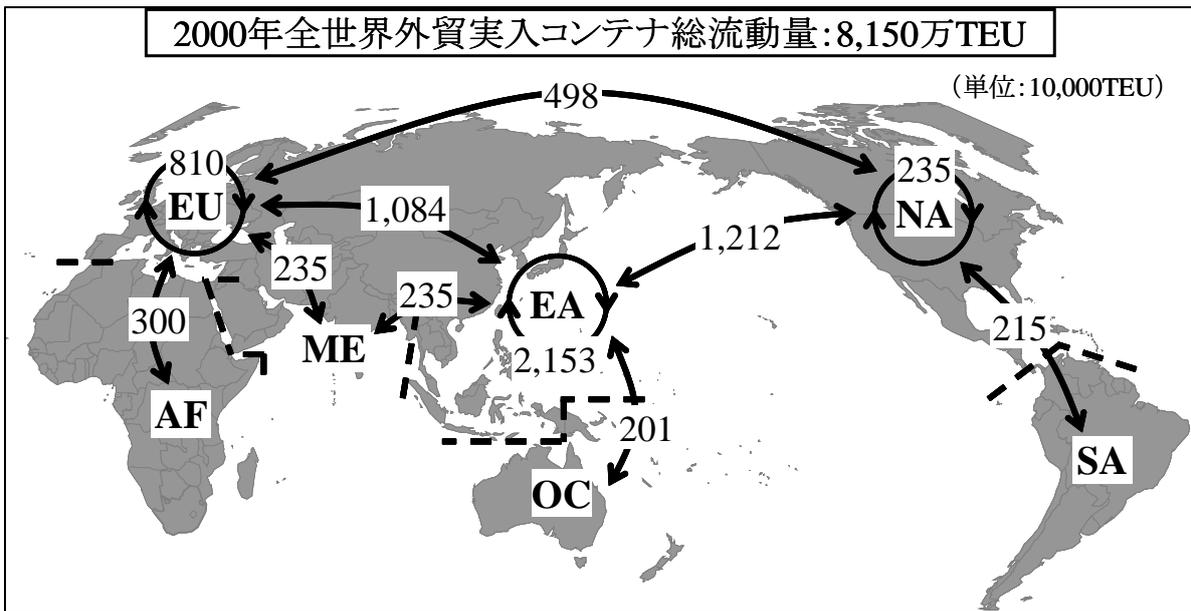


図-12 全世界の外貿実入コンテナの総流動 (2000年)

### 3. 将来動向に対する考察

#### 3.1 21世紀に迎える日本の課題

##### 3.1.1 国内外拠点の戦略的転換と機能分業<sup>12)</sup>

わが国の企業、特に製造業はこれまでの対外直接投資の結果、海外生産比率は20%近く

にまで達し、業種別には図-13に示すように輸送機械が37.8%と最も高く、次いで電気機械、化学となっている。この結果、例えばアジア現地法人の日本向けの販売比率（対日本輸出比率）が22.1%であるのに対して、現地販売比率は半分を超える51.9%にまで達している。このようにわが国の企業の海外（特にアジア）への展開目的が、生産拠点からアジアの経済成長を背景とした生産・販売としての活力拠点へと転換してきている。

一方で、これらの海外拠点は国内拠点と適切に機能分業を図ることが必要である。例えば、図-14の薄型テレビの事例では国内のパネル一極生産を中核とした国内外拠点間のネットワーク型機能分業が図られている。さらに、別の事例では国内拠点が全く関与しない海外拠点間のみの製造・販売のネットワーク型機能分業も図られている。

したがって、21世紀では国内外拠点を生産から販売の機能をも有する活力拠点へと転換を図るとともに、この国内外拠点による国際ネットワーク型機能分業体制の構築が第1の課題となる。

\*注：3.1.1での値は全法人ベースでの2006年度値

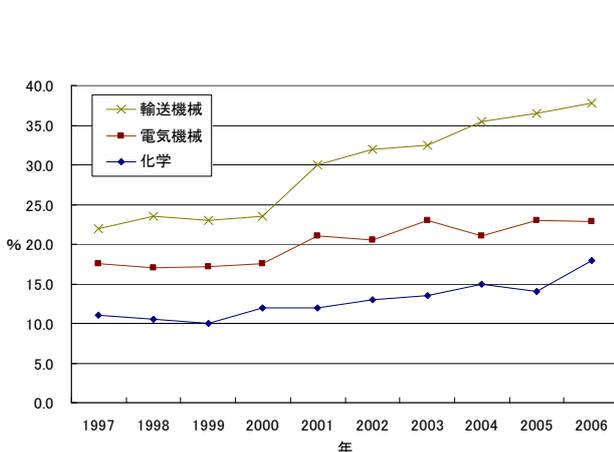


図-13 我が国製造業の海外生産比率

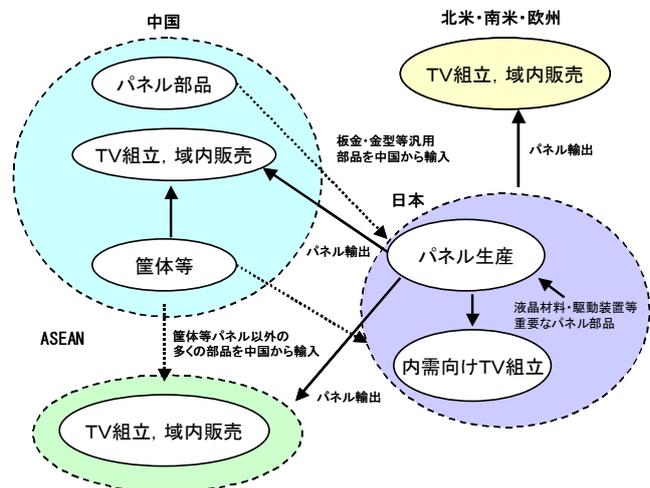


図-14 薄型TVの生産体系事例

### 3.1.2 経済連携の国際的進展

本年7月のWTO（世界貿易機関）閣僚会合では合意に至らなかったものの、一方でFTA（自由貿易協定）、EPA（経済連携協定）等の形態による貿易の自由化が進展している。現に、わが国にとって初めての多国間EPAである日・ASEAN包括経済連携協定が本年4月に締結され、ASEAN内での部品供給網に対する関税削減のメリットを受けられるようになった。その結果、日本で開発・生産した高付加価値部品を用いたASEAN域内での製品生産が進展することが想定される。

この貿易自由化では、通常は日本と相手国に関する交渉動向が注目されている。しかしながら、日本以外の第3国間の交渉も進展しており、その結果はわが国にも大きく影響を与える。例えば、インドは既に12の国・地域とFTAの締結がなされており、さらに日本を含む18の国・地域とFTAの交渉あるいは調整が進められている<sup>13)</sup>。

この貿易自由化動向の影響を把握するために、国際貿易分析モデル\*<sup>注)</sup>による結果を図

-15 に示す。この図-15 では、2007 年 8 月時点で締結から交渉までが確認されている F T A ・ E P A （第 3 国間のみも含む）が、全ての関税率が 0%として実施された場合での輸出入額の増減率の結果を示す。ここでは、先に示したインドが 20%と大きく突出し、次いでベトナム、タイ他で 10%超、さらに多くの国・地域において 5%超となっている。特に、アジアの国・地域が上位を占めていることが明らかになる。

したがって、21 世紀において世界各国・各地域、特にアジア圏域で進展する関税削減を超えた経済連携動向に的確に対応することが第 2 の課題となる。

\*注：2001 年版データベースに基づく G T A P モデル

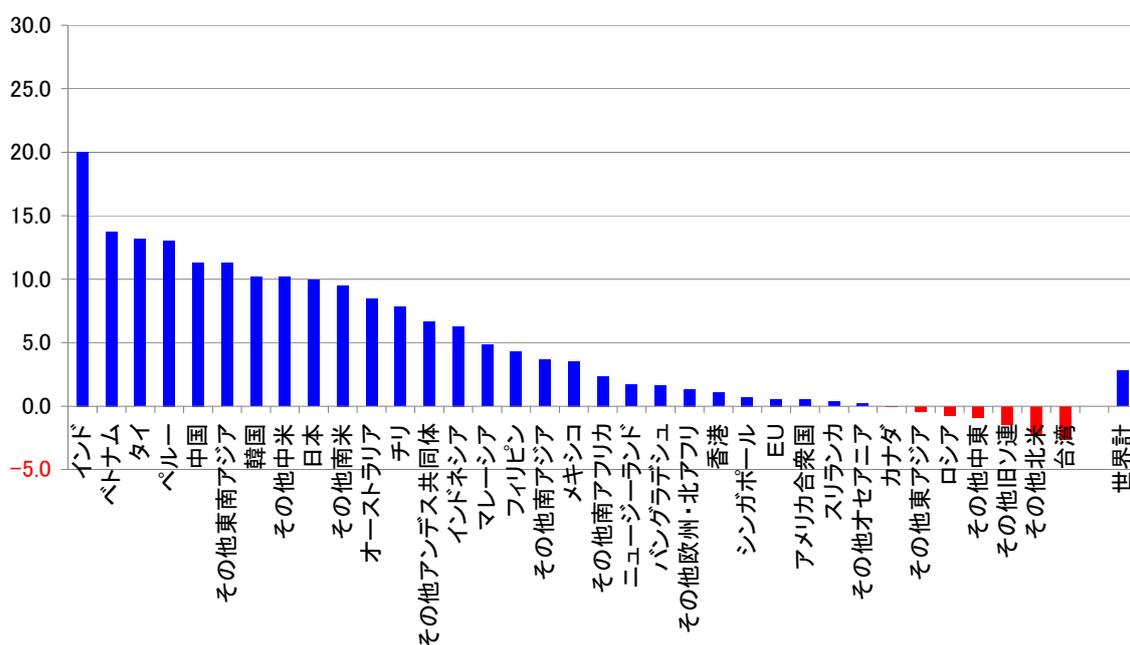


図-15 FTA・EPA が進展した場合の輸出入額の変動予測 (GTAP モデルによる)

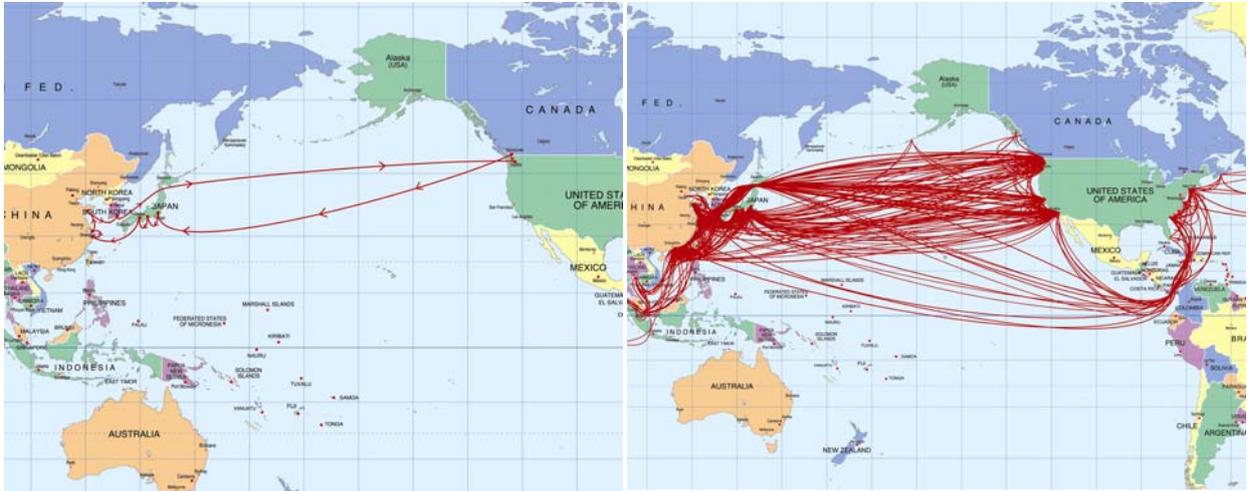
## 3.2 21 世紀日本企業における Route A 戦略

### 3.2.1 Route A を認識

現在、製品等の一般貨物（原油、石炭等の原料を除く）の大半は海上コンテナにより国際輸送されている。2006 年における海上コンテナ流動実態を図-11 に示した。この図から、流動量が最も多いのは東アジア圏域（E A）内であり、次いで東アジア圏域を O D（起終点）とする欧州（E U）、北米（N A）との流動量が多く、これら全て 2000 年から約 2 倍も増加している。この海上コンテナはコンテナ船で輸送されており、この海上コンテナ輸送量増加の背景には図-4, 5 に示した世界的なコンテナ船の隻数増大、船型大型化、寄港港数増大、さらにコンテナ船の高速性が挙げられる。

このコンテナ船の航行経路は航空機のように O D 間を結ぶ直線ではなく、図-16 に示すように複数の寄港地を周回するループとなっている。このループの形状（寄港地の設定）

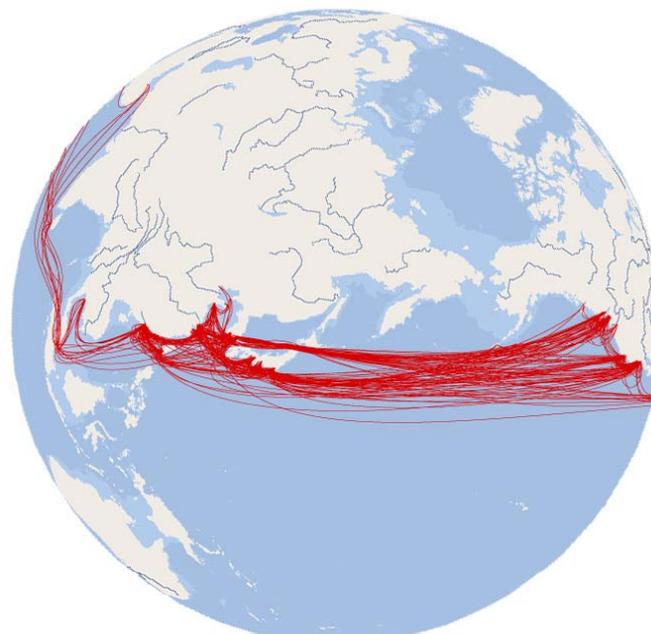
は船社ごとに異なり，**図-17**では2007年11月の1週間に津軽海峡を通航あるいは東京湾に寄港した対北米航路コンテナ船の全ループを重ね合わせた結果を示している．この図では主に太平洋を対象としているが東ではパナマ運河を越えて欧州に，西ではマラッカ海峡を越えて欧州と繋がるループも存在している．



**図-16** コンテナ船のループの事例

**図-17** 対北米コンテナ航路のループ

**図-17**はメルカトル図法の世界地図上での表示のためにループは幅広く展開しているように見える．しかしながら，これを丸い地球の形状にあわせて，さらに大圏コースとして想定される赤道線上に表示した結果を**図-18**に示す．この結果，この航路帯はマラッカ海峡～ベトナム～中国～韓国～日本～北米西岸～パナマ運河がほぼ一直線上の大圏コース上に位置していることが明らかになる．さらに，**図-11**からこのマラッカ海峡から北米間の直線的航路帯で世界の海上コンテナの半分近くが流動していることから，アジア（Asia）と北米（America）を結ぶ高速・大量物流帯をRoute Aとする．



**図-18** 対北米コンテナ航路のループ図

したがって、アジア圏域を中心とした国際ネットワーク型機能分業体制構築と経済連携進展への対応するために、先ずこの Route A の存在を認識することが重要である。

### 3.2.2 Route A の活用

#### 1) ループの把握と誘致

大胆に例えると、Route A は東海道新幹線と考えることができる。北米が東京、日本他東アジア圏が名古屋、東南アジア圏が大阪に相当するとし、その間を往復するものの停車駅、移動時間が大きく異なる【のぞみ】、【ひかり】、【こだま】が各ループのコンテナ船が対応すると考えられる。

図-18 では多数のループの重ね合わせのために明確になっていないが、ループの特性（寄港地、投入されている船舶規模他）は各船社の判断により大きく異なっている。ある意味で【のぞみ】に最も近いと考えられるループを図-19 に示す。このループでは、北米1港と中国2港との間をシャトル運航しており、ロサンゼルス港で船積みされた海上コンテナは13日後には上海港で船卸しされている。これとは別のループでは、途中の寄港地が多いためロサンゼルス港から上海港までには約2倍の25日間を要している。



図-19 北米・中国シャトルループ

このループは、コンテナ貨物需要に応じた収益を確保するために船社により頻繁に変更される。したがって、企業における現在の国際ネットワークでのループが有効ではない場合（例えば、拠点地にループが存在しない、相手港までの航行日数が長い等）には、新たなループを誘致することが必要である。その際に、例えば対象拠点の目前に多くのループが通過している場合に全ループの誘致は非現実的であるが、その拠点にとって有効なループのみを誘致することは現実的であり、その実現は対象拠点とネットワーク全体のポテンシャルを一気に高めることになる。

## 2) ローカルループ時空間展開の把握

Route Aとしての図-18では、東アジアと北米西岸を結ぶ基幹航路のみを表示しているが、これ以外にも例えばアジア圏域内で完結する等のローカルループが存在する。このローカルループは、日本にODを有する場合のみならず第3国間のみにもODを有するループを把握することが重要である。

例えば、図-15 でインドに次いで高い結果のベトナムのホーチミン港および極東ロシアのウラジオストック港にODを有するローカルループについて、2001、2007年の11月の1週間を対象に図-18と同様に整理した結果を図-20、21に示す。これらの図から、今後著しい成長が想定されるこれらの拠点を核とするローカルループが、時空間的に大きく拡大している結果が明らかになる。

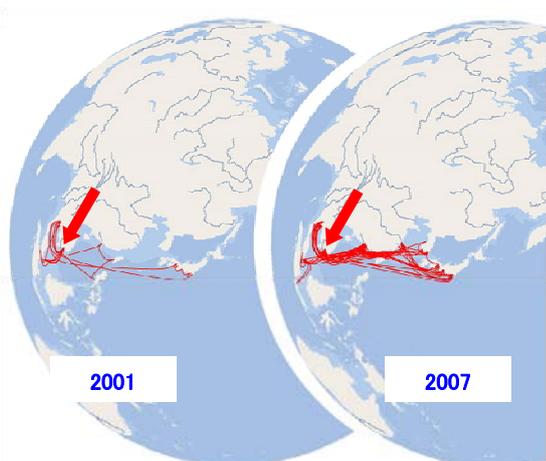


図-20 ベトナム ホーチミン港  
拠点ローカルループ

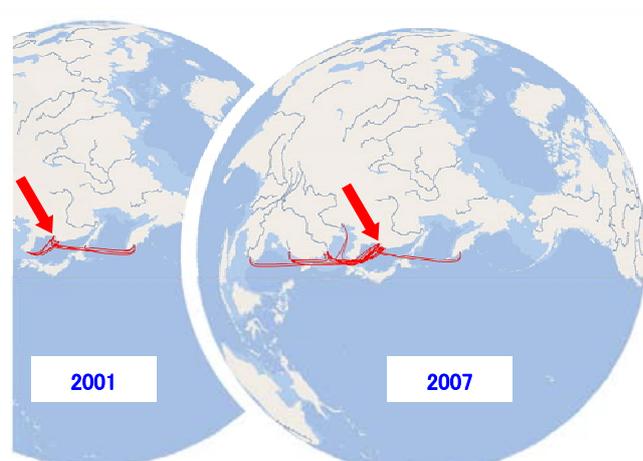


図-21 ロシア ウラジオストック港  
拠点のローカルループ

また、この分析対象期間に限定した場合には、ベトナム（ホーチミン港）と日本の港湾とを結ぶループは拡大している。これに対して、極東ロシア（ウラジオストック港）に関しては未だに日本と結ぶループは存在していないものの中国・韓国とを結ぶループは拡大していることが明らかになる。このようにFTA・EPAが締結されていないものの、実態的な経済連携の進展を確認することができる。

したがって、現実的な経済連携の動向に対応して、第3国の拠点間によりネットワーク型機能分業を構築するには、このローカルループの存在と時空間展開を把握して対応することが必要である。

\*注：3.2の航路図は実際の航跡図ではなく想定図として表示している。なお、寄港地データは2007年11月11～17日を対象としたLMIUのデータベースに基づく。

\*注：図18～21の世界地図はマイクロソフト社ソフトのエンカルタ、図16,17の世界地図はデザインエクスチェンジ社ソフトのMAPIO PRO WORLDによる。

### 3. おわりに

国総研港湾研究部では、日々変化する国際動向に即した研究の実施が必要であると認識している。将に、この原稿を執筆中に米国のサブプライム問題を発端とする金融危機による世界経済の急変が発生した。その結果、これまでの中国・日本を中心とする東アジアから北米向けの輸出コンテナ流動が、短期間で急変することが当然に想定される。当面は、この激変への対応策が急がれるものの、変化後の枠組みの中で日本の新たな経済成長戦略が求められることは云うまでもない。

その戦略として、東アジア圏の経済連携の進展による東アジア圏全体の中でのわが国の経済成長を目指すことが一つの方策であり、そのための **Route A**、特にローカルループの整備が重要であると考えられる。今後も更なる考察を進める所存である。

#### 【参考文献】

- 1) 渡部富博・二田義規・柴崎隆一・赤倉康寛：コンテナサイズに視点をおいた国際海上コンテナ輸送に関する基礎的分析，国土技術政策総合研究所資料 No. 478，2008. 9
- 2) 渡辺逸郎：コンテナ船の話，成山堂書店，2006 年
- 3) マルク・レビンソン，村井章子訳：コンテナ物語，日経 BP 社，2007 年
- 4) ISO 668 AMENDMENT 1:Series 1 freight containers - Classification, dimensions and ratings-, 2005, 9
- 5) ISO 668 Fifth edition :Series 1 freight containers - Classification, dimensions and ratings, 1995. 12
- 6) ISO 668 AMENDMENT 2:Series 1 freight containers - Classification, dimensions and ratings-45containers, 2005, 10
- 7) Informa:Market Analysis World Container Census 2007, 2007
- 8) 赤倉康寛・二田義規・渡部富博：世界のコンテナ船動静及びコンテナ貨物動静分析(2007)，国土技術政策総合研究所資料 No. 432，2007. 9
- 9) 二田義規・赤倉康寛・渡部富博：世界のコンテナ船動静及びコンテナ貨物動静分析(2008)，国土技術政策総合研究所資料 No. 467，2008. 6
- 10) Panama Canal Authority : Proposal for the Expansion of the Panama Canal Third Set of Locks Project, 2006.
- 11) 1 万 TEU 超級コンテナ船で商談進む：海事プレス，2007 年 5 月 28 日付記事，2007.
- 12) 経済産業省，厚生労働省，文部科学省：2008 年版ものづくり白書
- 13) 外務省経済局：日本の経済連携協定（EPA）交渉-現状と課題-，2008. 8

-----  
国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of N I L I M

N o . 482                  December 2008

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