ISSN 1346－7328
国総研資料 第699号
平 成 ２４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.699 December 2012

平成24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(2012)

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

国土技術政策総合研究所資料　　Technical Note of NILIM
第 699 号　　2012年12月　　No.699　　December 2012

平成24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(2012)

概要

本資料は、「平成24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。

ｷｰﾜｰﾄﾞ　：　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 2012.

Key Words : Lecture Meeting, NILIM

目　　次

◇プログラム　…… 1

◇講　演　集

下水処理場をエネルギー拠点に
　－下水道革新的技術実証事業（B-DASH）－ …… 5
下水道研究部長　堀江　信之

都市の集約化及び低炭素都市づくりに向けた研究の取り組み …… 25
都市研究部長　柴田　好之

建築分野における震災対応等の基準整備に関わる研究　…… 43
建築研究部長　向井　昭義

強くしなやかな国土を支える
　道路ネットワーク形成に向けた研究最前線　…… 55
道路研究部長　森　望

水災害分野における現場からの気候変動適応
　～現象の苛烈化と不確実性に
　　立ち向かうための河川技術の方向～　…… 77
河川研究部長　藤田　光一

深層崩壊～その実態と対応～　…… 95
危機管理技術研究センター長　後藤　宏二

沿岸域の環境再生に求められる視点　…… 113
沿岸海洋・防災研究部長　鈴木　武

わが国におけるLCCの台頭と空港政策　…… 131
空港研究部長　傍士　清志

社会資本のストックマネジメントの推進に向けて　…… 151
研究総務官
兼　総合技術政策研究センター長　岸田　弘之

平成24年度　国土交通省

国総研講演会

土木学会認定
CPDプログラム

平成24年12月4日（火）10:00～17:00（9:30開場）

プログラム

特別講演（10:10～11:10）

『100年後のクルマとエネルギー
―電気自動車の周辺から―』

東京大学大学院新領域創成科学研究科教授　堀　洋一

一般講演（11:10～16:55）

▶ 下水処理場をエネルギー拠点に ―下水道革新的技術実証事業（B-DASH）―	下水道研究部長　堀江 信之
▶ 都市の集約化及び低炭素都市づくりに向けた研究の取り組み	都市研究部長　柴田 好之
▶ 建築分野における震災対応等の基準整備に関わる研究	建築研究部長　向井 昭義
▶ 強くしなやかな国土を支える 道路ネットワーク形成に向けた研究最前線	道路研究部長　森　望
▶ 水災害分野における現場からの気候変動適応 ～現象の苛烈化と不確実性に立ち向かうための河川技術の方向～	河川研究部長　藤田 光一
▶ 深層崩壊～その実態と対応～	危機管理技術研究センター長　後藤 宏二
▶ 沿岸域の環境再生に求められる視点	沿岸海洋・防災研究部長　鈴木 武
▶ わが国におけるLCCの台頭と空港政策	空港研究部長　傍士 清志
▶ 社会資本のストックマネジメントの推進に向けて	研究総務官 兼　総合技術政策研究センター長　岸田 弘之

お申し込み・お問い合せ

国総研ホームページよりお申し込みください　http://www.nilim.go.jp/

お問い合せは　国土技術政策総合研究所　企画部企画課　まで

ＴＥＬ：０２９－８６４－２６７４　E-mail：kouenkai2012@nilim.go.jp

定　員

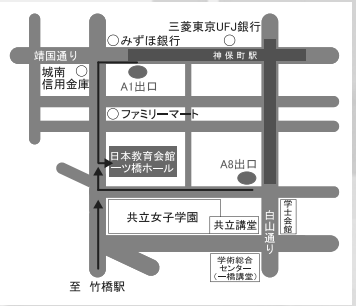
８００名（入場無料　申込先着順）

会　場

日本教育会館　一ツ橋ホール（東京都千代田区一ツ橋2-6-2）

地下鉄都営新宿線・東京メトロ半蔵門線　神保町駅（A1出口）下車徒歩3分
地下鉄都営三田線　神保町駅（A8出口）　下車徒歩5分
東京メトロ東西線　竹橋駅（北の丸公園側出口）　下車徒歩5分

【会場のご案内】



プ　ロ　グ　ラ　ム

10:00～10:10　開会の挨拶　所長　上総　周平

◆特別講演

10:10～11:10　100 年後のクルマとエネルギー　－電気自動車の周辺から－
東京大学大学院新領域創成科学研究科　教授　堀　洋一

◆一般講演

11:10～11:40　下水処理場をエネルギー拠点に
－下水道革新的技術実証事業（B-DASH）－
下水道研究部長　堀江　信之

11:40～12:10　都市の集約化及び低炭素都市づくりに向けた研究の取り組み
都市研究部長　柴田　好之

12:10～13:10　休　憩

13:10～13:40　建築分野における震災対応等の基準整備に関わる研究
建築研究部長　向井　昭義

13:40～14:10　強くしなやかな国土を支える道路ネットワーク形成に向けた研究最前線
道路研究部長　森　望

14:10～14:40　水災害分野における現場からの気候変動適応
～現象の苛烈化と不確実性に立ち向かうための河川技術の方向～
河川研究部長　藤田　光一

14:40～15:10　深層崩壊～その実態と対応～
危機管理技術研究センター長　後藤　宏二

15:10～15:25　休　憩

15:25～15:55　沿岸域の環境再生に求められる視点
沿岸海洋・防災研究部長　鈴木　武

15:55～16:25　わが国における LCC の台頭と空港政策
空港研究部長　傍士　清志

16:25～16:55　社会資本のストックマネジメントの推進に向けて
研究総務官 兼 総合技術政策研究センター長　岸田　弘之

16:55～17:00　閉会の挨拶　副所長　浦辺　信一

講演者及び演題

特別講演

100 年後のクルマとエネルギー　ー電気自動車の周辺からー

東京大学大学院新領域創成科学研究科　教授

堀　　洋一

＜プロフィール＞

昭和30年愛媛県生まれ。昭和58年東京大学大学院博士課程修了（電子工学）。平成20年より現職。専門は制御工学とその産業応用。より効率的な電気自動車の可能性として、道路に埋設された充電装置から「ワイヤレス給電」技術によって、蓄電量の少ない「キャパシタ」への走行中の充電を提唱している。

一般講演

下水処理場をエネルギー拠点に

ー下水道革新的技術実証事業（B-DASH）ー

下水道研究部長　　堀江　信之

昨春の原発事故以降、電力の逼迫が長期にわたって続く中、汚水の処理に大きなエネルギーを必要とする下水処理場をエネルギー拠点に転換し、処理コストも大幅低減する革新的技術を公募、実際の処理場において実規模で実証し、日本の下水処理場を変えるとともに世界への技術展開も目指す大型研究がスタートしている。下水汚泥や下水からエネルギーを産み出したり、リン資源を回収するなど、全７プロジェクトの概要･特徴や、これまでの中間成果について、簡潔に紹介する。

都市の集約化及び低炭素都市づくりに向けた研究の取り組み

都市研究部長　　柴田　好之

「都市の低炭素化の促進に関する法律」が年内に施行されるなど、都市を集約型の構造に転換するとともに、あわせて低炭素化に取り組むことが一層重要な課題となっており、関連して取り組んできたコンパクトな都市構造の実現、エネルギーの面的活用、ヒートアイランド対策に関する研究の成果を紹介するとともに、主に地方都市を念頭に今後の課題についてお話しする。

建築分野における震災対応等の基準整備に関わる研究

建築研究部長　　向井　昭義

構造、防火、環境等の建築分野において基準整備のために建築研究部が取り組んでいる研究課題や建築基準整備促進事業における調査結果をもとに基準原案作成に取り組んでいる課題等について概説する。特に、技術原案作成を行っている「天井脱落対策」や「エスカレーター落下対策」に加え、建築物の「竜巻対策」や技術基準の見直し原案を検討するために設置している検討体制についても紹介する。

強くしなやかな国土を支える
道路ネットワーク形成に向けた研究最前線

道路研究部長　　森　　望

東日本大震災はじめ自然災害による被災、高齢化する道路資産の増大と多発する事故・損傷への対応等のために取り組んでいる道路構造物の諸技術基準改定のための研究、科学的保全のための評価・維持管理手法の研究、また、双方向型カーナビの普及、ITS スポットの全国展開等に伴う交通量、旅行速度等のプローブデータ活用による道路の評価に関する研究等技術政策研究の最前線について道路政策と関連させて紹介する。

水災害分野における現場からの気候変動適応
～現象の苛烈化と不確実性に立ち向かうための河川技術の方向～

河川研究部長　　藤田　光一

地球温暖化に伴う気候変化の予測研究が進展し、水災害苛烈化の懸念が高まる中、我が国の河川および流域などの実態を踏まえたとき、そうした予測研究の成果が現場での適応策の検討において具体的にどのような意味を持つかを述べる。諸外国と対比した場合の我が国における気候変動適応の特徴、気象予測が持つ不確実性の捉え方、適応策と既往の施策との関係についての話題を絡めながら、気候変動影響を奇貨として水災害を乗り切ることができる靭性を持った国土づくりに向け、現場の実態を見すえてのポイントを解説する。

深層崩壊～その実態と対応～

危機管理技術研究センター長　　後藤　宏二

平成 23 年 9 月の台風 12 号災害では、紀伊半島において 70 箇所以上の深層崩壊が発生し、そのうち 17 箇所において天然ダム（河道閉塞）が形成されるなど激甚な被害となった。深層崩壊は特定の地質や地質構造の地域で多く発生するなどの指摘がされているが、いまだ発生・移動機構等において未解明の部分も多い。本講演では、近年の発生実態およびこれまでの取り組みについて紹介するとともに、今後、適切かつ効果的な対策を検討するにあたって、解決すべき技術的課題について述べる。

沿岸域の環境再生に求められる視点

沿岸海洋・防災研究部長　　鈴木　武

沿岸域の環境再生は平成 13 年に都市再生プロジェクトに位置づけられて以来、様々な取組が重ねられ、生物生息場の拡大と質の向上、陸域からの環境負荷の低減、貧酸素水塊の発生抑制等に向けて一定の成果が上げられてきた。そうした沿岸域の環境再生の取組を東京湾を中心に振り返ったうえで、これからの沿岸域の環境再生を進めていくうえで求められる取組の視点を紹介する。

わが国における LCC の台頭と空港政策

空港研究部長　　傍士　清志

世界の航空市場に価格革命をもたらした格安航空会社（LCC）が、平成 24 年、わが国においても相次いで本格的に就航し、今年はさながら LCC 元年ともいうべき年になった。

これを受けて関西国際空港や成田国際空港では LCC の運航を支援する専用ターミナルの整備が行われるなど、新しい航空ビジネスを空港運営の中核に据えた空港運営が始まっている。内外の LCC を巡る空港の取り組みを紹介するとともに、今後の路線展開の可能性についても考察する。

社会資本のストックマネジメントの推進に向けて

研究総務官　兼 総合技術政策研究センター長　岸田　弘之

高齢化する社会資本の増大に伴い、つくったものを長持ちさせ大事に使うストック型社会への転換が今後の大きな課題となっている。このため国総研では「ストックマネジメント研究会」を設置し、各分野の現状と課題に関する情報交換や研究推進すべき事項等の検討を進めている。特に、点検・監視技術の開発が重要であることから、予防保全に関する総合技術開発プロジェクトを現在実施している。本講演では、最近のこれらの取り組みの状況と今後の方向性について紹介する。

下水処理場をエネルギー拠点に

－下水道革新的技術実証事業（B-DASH）－

下水道研究部長

堀江　信之

下水処理場をエネルギー拠点に－下水道革新的技術実証事業（B-DASH）－

下水道研究部長　堀江　信之

１．日本のエネルギー・資源事情と下水道

我が国はエネルギーの大半を輸入しており、原発事故以降、電力事情の逼迫が当分続くとともに、燃料輸入費の急増等から、貿易収支の赤字化に留まらず、経常収支も赤字化するに至っている。新興国の急速な発展等から近年、世界的な各種資源・エネルギー需給の逼迫も度々起こっており、地球環境の保全も含めて、循環型社会への転換、低炭素社会の構築が求められている。中でもエネルギーについては、固定価格買取制度の開始にも見られるように、再生可能エネルギーへの転換が急務となっている。

下水道は、水洗トイレが普及する一方で川や海の水質が改善するなど、国民生活に不可欠な社会資本として、ようやく 76%まで普及が進んできているが、大量に発生する汚水の浄化には大きな電力を要し、それだけで我が国の総電力消費量の 0.7%近くを占める。また、下水や汚泥の処理に伴い温室効果ガスが発生し、自治体が実施する公共事業の中でも最大級の温室効果ガス排出源となっており、未普及地域解消や高度処理化により更に増加が続くことから、地球温暖化防止に一定の役割を果たそうとする我が国において、その削減も急がれる。

一方で下水道については、下水汚泥や下水の持つエネルギー価値やリン等資源ポテンシャルに期待が高まっており、省エネ・省資源のみならず、積極的にエネルギー・資源を創出する取組も始まっている。京都議定書目標達成計画（平成 20 年 3 月閣議決定）では、対策を行わなかった場合と比較し、2008～2012 年度の 5 年間平均で 207 万トンの温室効果ガスの削減が位置付けられている（省エネ・新エネ対策 91 万トン、下水汚泥の高温焼却 116 万トン）。

このように、従来の下水を排除・処理する一過性のシステムから、集めた物質等を資源・エネルギーとして活用・再生する循環型システムへと転換することが「下水道ビジョン 2100」（平成 17 年）でも打ち出されているが、潜在的なポテンシャルに対して実際に活用されている割合がわずかであることから（**表１．１**参照）、国土交通省では下水道施設における省エネ対策、バイオガス化や汚泥の燃料化、太陽光・小水力発電の導入等の新エネ対策、下水汚泥の高温焼却化について、新技術の普及・促進を含めた具体的な取組を、マニュアル策定や交付金等で支援している。

また、世界的な食料需要の急増やリン鉱石の主要産出国である中国、アメリカの輸出制限等により価格が乱高下しているリンについても、下水に一定量含まれることから、下水汚泥等からリンを回収、利用するマニュアルの策定や交付金等で、取組を推進している。

このような下水道の資源・エネルギー利用の推進に関する中期的な目標としては、8 月 31 日に閣議決定された第３次社会資本整備重点計画（平成 24～28 年度）に次の通り示されている。

①下水汚泥エネルギー化率：下水汚泥中の有機物のうち、消化ガス発電や固形燃料化等エネルギー利用された割合

【約 13％（H22 年度末）→約 29％（H28 年度末）】

②下水道に係る温室効果ガス排出削減：下水道における省エネ・創エネ対策および下水汚泥焼却の高度化による温室効果ガス排出削減量

【約 129 万ｔ－CO_2／年（H21 年度末）→約 246 万ｔ－CO_2／年（H28 年度末）】

表１．１　下水道における資源・エネルギー利用の現状

ポテンシャルの区分	賦存量		利用状況
下水汚泥	下水汚泥発生量： 223万トン/年 （乾燥ベース）	発電可能量：36億kWh/年 →約67万世帯の 年間電力消費量に相当	エネルギー利用 された割合は約1割
下水熱	下水処理量： 140億m^3/年	7,800Gcal/h →約1,500万世帯の 年間冷暖房熱源に相当	下水熱を利用した 地域熱供給は3箇所
リン	流入するリン： 6万トン/年	我が国の年間のリン 輸入量の約1割に相当	利用されたリンの 割合は約1割
太陽光発電、 風力発電、 小水力発電	処理場数： 2,023箇所	発電可能量：23億kWh/年 →約43万世帯の 年間電力消費量に相当	エネルギー利用された 割合は約0.4%

（賦存量：2005年度（リンは2006年度）、利用状況：2010年度（リンは2006年度））
出典：下水道統計等に基づき国土交通省下水道部が作成

このような社会的要請及び行政ニーズを踏まえ、国土交通省下水道部では、優れた革新的技術の実証、普及により下水道事業におけるコスト縮減や再生可能エネルギー等の創出を実現し、併せて、本邦企業による水ビジネスの海外展開を支援するため、「下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト）」を平成 23 年度から開始し、国土技術政策総合研究所下水道研究部が実証研究の実施機関となっている。

（B-DASH プロジェクト：Breakthrough by Dynamic Approach in Sewage High TechnologyProject）

２．B-DASH プロジェクトの概要

これは、①国土交通省下水道部がテーマを設定して革新的技術の実証提案を募集し、②下水道革新的技術実証事業評価委員会による厳正な採択審査を行い、③採択された案件を国土技術政策総合研究所からの委託研究により実規模プラントを実際の処理場に設置して実証、ガイドライン作成を行うものである。

平成 23 年案件については、［1］水処理技術（高度処理を除く）、［2］バイオガス回収技術、［3］バイオガス精製技術、［4］バイオガス発電技術に係る革新的技術を含むシステムについて前年度中に公募を行い、2 件を採択し、23 年度に研究委託契約し、実証施設の設置を終えて実証運転を開始、現在に至っているところである。

平成 24 年案件については、[1]下水汚泥固形燃料化技術、[2]下水熱利用技術（未処理下水の熱利用に限る。）、[3]栄養塩（窒素）除去技術（水処理に係る技術は除

く）、[4]栄養塩（リン）除去技術（水処理に係る技術は除く。回収技術を含むことは可。）に係る革新的技術について前年度中に公募と５件の採択を行い、実証施設の建設を進めているところである。**図２．１**及び**表２．１**に各案件の内容を示す。

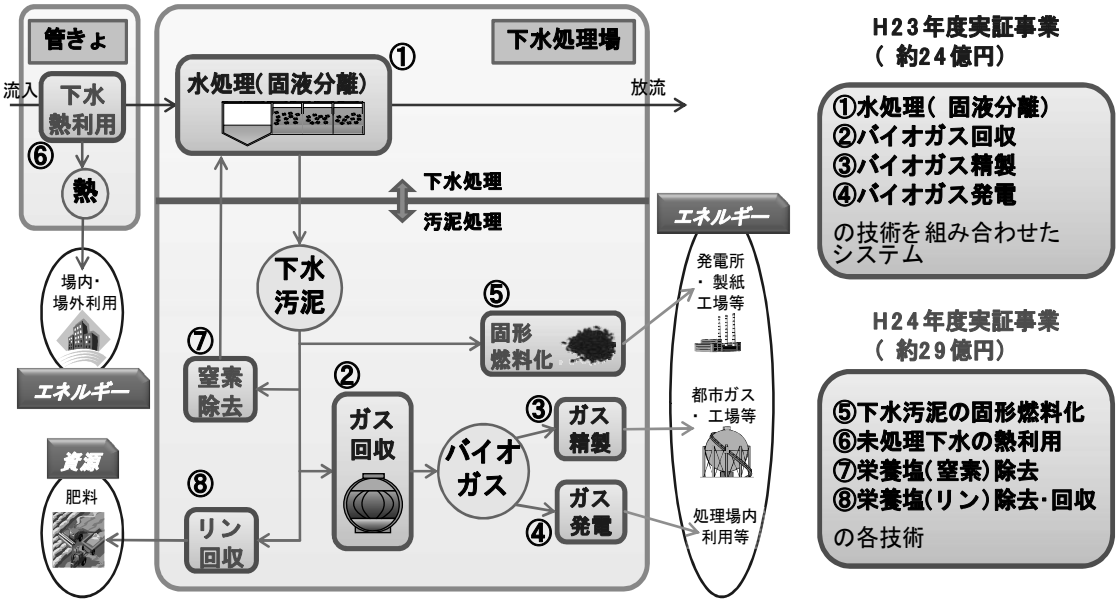


図２．１　下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト）の概要（全体）

表２．１　B-DASH プロジェクトの各実証事業の概要

採択年度 (No.)	実証対象 テーマ	実証事業名	実施者	実証 フィールド	実証事業の概要
平成23（1）	①水処理 ②ガス回収 ④ガス発電	超高効率固液分離技術を用いたエネルギーマネジメントシステムに関する実証事業	メタウォーター(株)・地方共同法人日本下水道事業団　共同研究体	大阪市中浜下水処理場	徹底的な固液分離と資源回収を基本コンセプトに省エネ・創エネ両面から下水処理場全体をマネジメントする「エネルギー自給型下水処理場」を目指し、「超高効率固液分離」「高効率高温消化」「スマート発電システム」を組み合わせ、システムとして機能させることによる、温室効果ガス排出量削減および建設費・維持管理費削減効果を実証
（2）	②ガス回収 ③ガス精製 ④ガス発電	神戸市東灘処理場再生可能エネルギー生産・革新的技術実証事業	(株)神鋼環境ソリューション・神戸市共同研究体	神戸市東灘処理場	地域バイオマスを下水処理場に受け入れてバイオガス発生量を増加させ、有効利用することによる温室効果ガス排出量削減を実証する。また、鋼板製消化槽、新型バイオガス精製装置、高効率ヒートポンプ等を組み合わせることによる建設費・維持管理費削減効果を実証
平成24（1）	⑤固形燃料化	温室効果ガスを排出しない次世代型下水汚泥固形燃料化技術	長崎市・長崎総合科学大学・三菱長崎機工株式会社　共同研究体	長崎市東部下水処理場	連続式水熱反応器および高速消化槽を用いて生成した消化ガスを利用して消化汚泥を固形燃料化することによるコスト縮減効果や再生可能エネルギー創出効果等を実証
（2）	⑤固形燃料化	廃熱利用型　低コスト下水汚泥固形燃料化技術	JFEエンジニアリング株式会社	松山市西部浄化センター	焼却炉廃熱利用による下水汚泥固形燃料の低コスト製造や、製造燃料の焼却炉利用による補助燃料の削減等によるコスト縮減効果や省エネルギー効果等を実証
（3）	⑥下水熱利用	管路内設置型熱回収技術を用いた下水熱利用に関する実証事業	大阪市・積水化学工業株式会社・東亜グラウト工業株式会社　共同研究体	大阪市海老江下水処理場	管更正組込方式の管路内設置型熱回収技術によるコスト縮減効果や省エネルギー効果等を実証
（4）	⑦窒素除去	固定床型アナモックスプロセスによる高効率窒素除去技術に関する技術実証事業	熊本市・地方共同法人日本下水道事業団・株式会社タクマ　共同研究体	熊本市東部浄化センター	汚泥処理の返流水等からの窒素除去に、固定床方式を用いた高効率なアナモックス反応技術を適用させることによるコスト縮減効果や省エネルギー効果等を実証
（5）	⑧リン回収	神戸市東灘処理場栄養塩除去と資源再生(リン)　革新的技術実証事業－KOBEハーベスト(大収穫)プロジェクト－	水ing株式会社・神戸市・三菱商事アグリサービス株式会社　共同研究体	神戸市東灘処理場	消化汚泥からのリン除去回収技術の高効率化によるコスト縮減効果や得られたリン資源の利活用等を実証

３．平成 23 年度採択事業（システム）の実証研究の内容

３．１　超高効率固液分離技術を用いたエネルギーマネジメントシステムに関する実証研究

３．１．１　研究概要

実施者　メタウォーター株式会社・地方共同法人日本下水道事業団共同研究体

実証フィールド　大阪市中浜下水処理場

概要　本実証研究は、一次処理を「超高効率固液分離」に，消化を「高効率高温消化」に置換え、また発電及び処理場各設備の電気設備を統括する「スマート発電システム」を加えたトータル的な下水処理システムであり、低負荷型水処理による「省エネ」と，取込みバイオマス最大化汚泥処理による「創エネ」を同時に実現する（**図３．１．１**参照）。

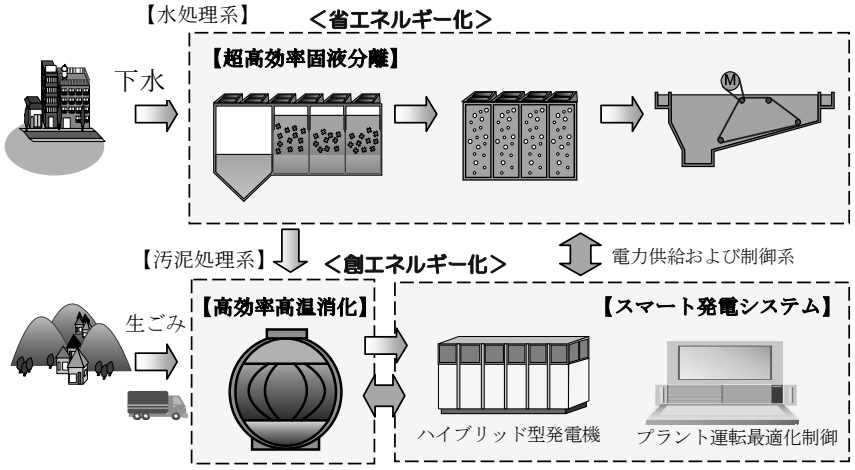


図３．１．１　超高効率固液分離技術を用いた
エネルギーマネジメントシステムに関する実証研究の概要

３．１．２　技術内容

「超高効率固液分離」、「高効率高温消化」、「スマート発電システム」の３つ技術を組み合わせ、システムとして機能させることにより、建設・維持管理コスト削減および温室効果ガス排出量削減を実証する。大阪市中浜下水処理場に建設した実証施設の全体を**図３．１．２**に示す。

（１）超高効率固液分離

流入下水中の生汚泥を徹底的に回収するろ過方式の固液分離技術であり、流入下水の汚濁成分の除去性能は、従前の最初沈殿池よりも大幅に向上する。このため、エネルギー価値の高い生汚泥の回収量が大きく増加する。また、生物反応槽に流入する BOD 負荷量が減少するため、曝気空気量の削減および余剰汚泥の削減が期待できる。

（２）高効率高温消化

高効率高温消化は、発酵に係る細菌を消化タンクに充填された担体表面に固定化、高濃度保持することにより、高負荷処理でかつ安定した消化を実現する。消化槽容積を従前に比べ大幅に小型化を図る。また消化槽に地域バイオマスである生ごみを投入し、消化ガス量増加と混合消化工程の安定性を実証する。

（３）スマート発電システム

スマート発電システムは、「プラント最適化制御システム」と「ハイブリッド燃料電池」で構成される。「プラント運転最適化制御システム」では、プラント運用に与える影響（水位や濁度などの計測情報）を把握しながら制御対象設備の運転・停止と最適化制御を行うシステムである。「ハイブリッド燃料電池」は、消化ガスと都市ガス併用により、消化ガスを 100%活用しつつ低出力でも高い発電効率を維持する。

スマート発電システムは状況に応じて各負荷機器の最適な制御や発電によりピーク電力抑制や電力需要の平準化を図る。

図３．１．２　実証研究施設

３．１．３　これまでに得られた結果

本実証研究は、実証施設（5,700㎥/日、0.48t-DS/日）における検証データ等を基に 50,000㎥/日規模の従来技術と革新的技術における建設費、維持管理費及び温室効果ガス排出量等の削減効果について試算を行った。従来技術と革新的技術の比較対象として生ごみ受入を想定する場合とし、生ごみ受入時は革新的技術では混合消化、従来技術では焼却としている（**図３．１．３**参照）。

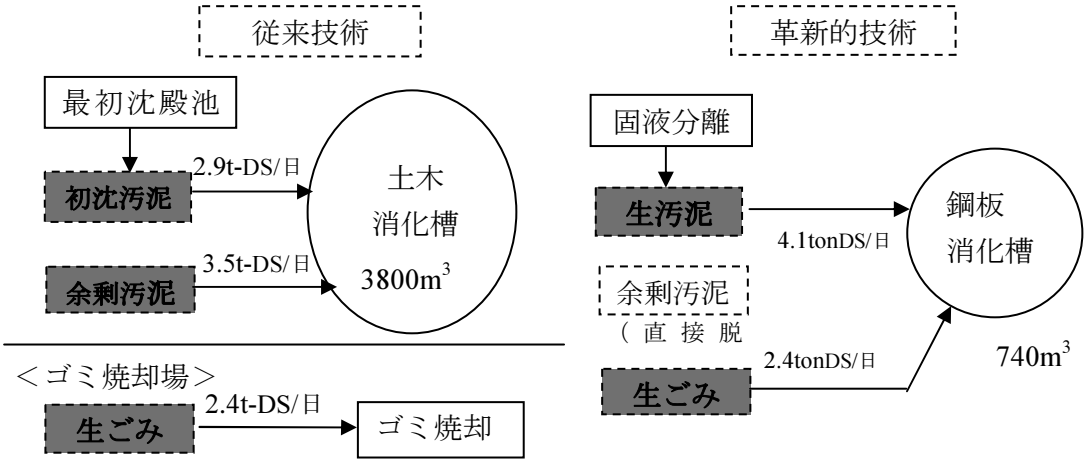


図３．１．３　従来技術と革新的技術の比較対象（下水汚泥＋生ごみ）

(1)建設コスト縮減効果

評価対象規模において、建設コストで 33%(縮減額 1400 百万円)、年価で 25%(縮減額 37 百万円)の縮減が期待できる。

(2)維持管理コスト縮減効果(電力・点検・補修・薬品)

評価対象規模において、年価で 18%の維持管理コスト縮減が期待できる。

(3)ライフサイクルコスト縮減効果

評価対象規模において、撤去コストを含むライフサイクルコストは 30%縮減が期待できる。

(4)温室効果ガス排出量削減効果(ライフサイクル CO_2＝$LCCO_2$)

評価対象規模において、65%の温室効果ガス排出量削減が期待できる。

３．２　神戸市東灘処理場　再生可能エネルギー生産・革新的技術実証研究

３．２．１　研究概要

【実施者】株式会社神鋼環境ソリューション・神戸市共同研究体

【実証フィールド】神戸市東灘処理場

【概要】

本実証研究は、実証場所である東灘処理場周辺に賦存する食品系バイオマス・木質系バイオマスの収集、及び未利用の下水熱の活用により、有効利用可能な消化ガス量を増やし、温室効果ガス排出量の削減を図るとともに、汚泥消化にかかる設備の建設コスト・維持管理コストの低減を検証するものである。

下水汚泥の嫌気性消化から発生する消化ガスはカーボンニュートラルな燃料であるため、有効利用を促進することにより化石燃料使用量の削減や地球温暖化防止に寄与できる資源として注目されている。しかし、設備導入に係る費用が高額であること、維持管理に手間を要すること、特に中小規模の処理場では、有効利用な消化ガス量が少ないこと等から、国内下水処理場における汚泥消化・ガス有効利用設備の普及は停滞状況にある。

３．２．２　技術内容

本実証研究は、バイオガス回収技術とバイオガス精製技術に大別され、バイオガス回収技術は、地域バイオマス受入調整設備、高機能鋼板製消化槽、下水熱回収高効率ヒートポンプから構成され、バイオガス精製技術は、新型バイオガス精製・貯留・圧送システムより構成されている。各技術の概要は次の通りである（**図３．２．１**参照）。

⑴ 地域バイオマス受入調整設備

地域バイオマスの受入れに当たっては、下水道の本来の機能に影響を与えないことが重要な要素であり、「下水道に好適」な地域バイオマスとして確認されたバイオマスを収集し、下水汚泥と混合して消化を行うことによりバイオガス発生量を増加させると共に、地域バイオマスとの相乗効果により消化汚泥の脱水性向上を図る。

地域バイオマスの対象は、食品製造系廃棄物と、木質系廃棄物から構成される。食品製造系バイオマスは、食品工場からの汚泥、廃棄固形物及び廃棄液体を事前テストにより選定し、それぞれホッパに受入れた後、混合調整槽で下水汚泥と混合・一時貯留される。木質系バイオマスは、六甲山からの間伐材、公園や道路の街路樹の剪定枝を事前テストで選定する。それぞれ膨潤化処理後、混合調整槽で下水汚泥と混合し、必要に応じて加温処理後、調整槽で一時貯留される。

⑵ 高機能鋼板製消化槽

消化槽を鋼板製にすることで、建設コストの低減及び工事工期の大幅な短縮が可能となる。また、各種センサ類を設置しメタン発酵状況を可視化することで、安定運転の継続、維持管理コストの削減を検証し、汚泥消化の普及促進を図る。

⑶ 下水熱回収高効率ヒートポンプ

下水処理水の熱を回収して高機能鋼板製消化槽の加温及び木質系バイオマスの前処理の熱源に利用できる高効率ヒートポンプを採用している。ヒートポンプ内部を循環している冷媒を、下水熱を利用して蒸発させる仕組みで、下水熱回収用の熱交換は下水処理水放流水路内で行っている。

(4) 新型バイオガス精製・貯留・圧送システム

新型バイオガス精製装置は、装置全体をパッケージ化することで現地工事工数を低減し、ガスコンプレッサの仕様変更により低動力化及び維持管理性改善を図る。また、従来は減圧塔と脱気塔を個別設置していたが一体型とすることで省スペース化を図る。また、システムとしての消費電力低減のため、循環水の冷却効率の改善を図る。

貯留・圧送システムでは、精製ガスの貯留に円筒形中圧ガスホルダを採用することにより、工場完成品のトラック輸送が可能であり現地工事を大幅に削減できる。

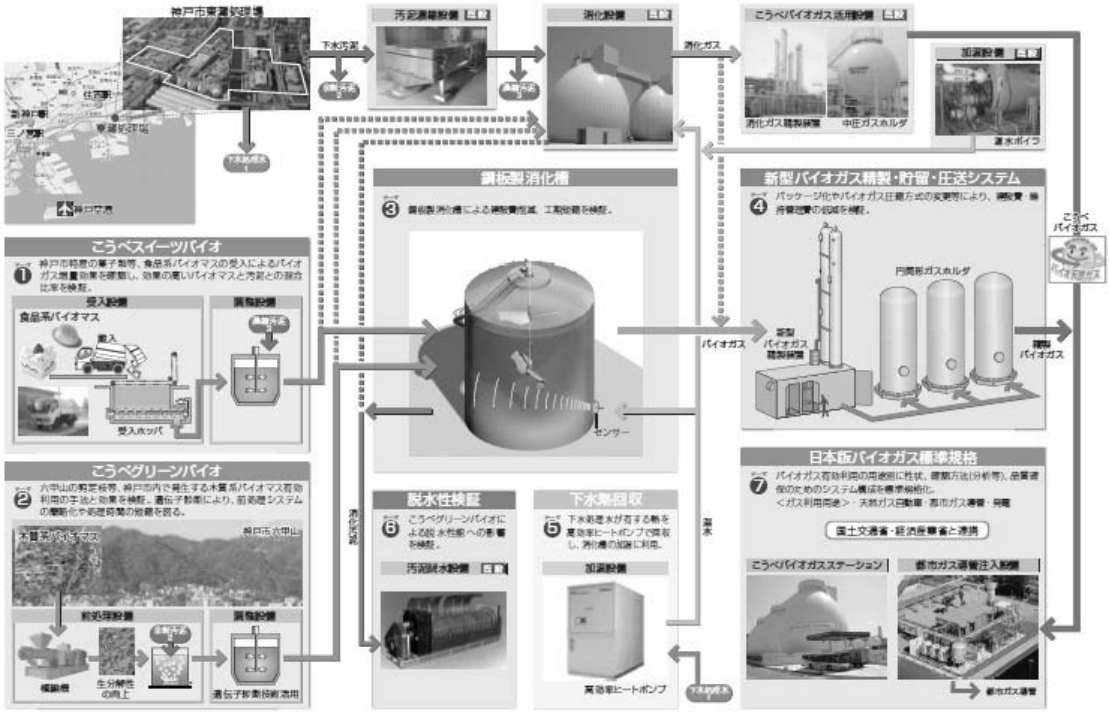


図３．２．１　神戸市東灘処理場　再生可能エネルギー生産・革新的技術実証研究の概要

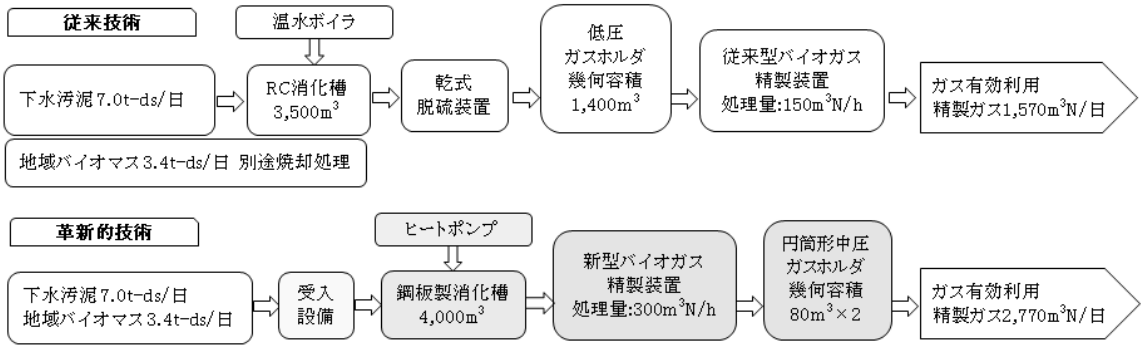


図３．２．２　本実証研究と今回比較対象とした従来技術

３．２．３　これまでに得られた結果

図３．２．２に示した従来技術との比較から、建設・維持管理コスト及び温室効果ガス排出量等の削減効果について算出し、下記結果が得られた。

(1)建設コスト縮減効果

評価対象規模において、建設コストで 31%(縮減額 697 百万円)、年価で 25%(縮減額 37 百万円)の縮減が可能である。

(2)維持管理コスト縮減効果

評価対象規模において、156%の維持管理コスト縮減が可能である。

(3)ライフサイクルコスト縮減効果

評価対象規模において、撤去コストを含むライフサイクルコストは 50%縮減が可能である。

(4)温室効果ガス排出量削減効果(ライフサイクル CO_2＝$LCCO_2$)

評価対象規模において、1010%(削減量 950 t-CO_2/年)の温室効果ガス排出量削減が可能である。

(5)下水道に好適な地域バイオマス選定手法

地域バイオマス受入れに際し、溶解性、組成等の観点から下水道に好適か否かの判定基準を策定した。高機能鋼板製消化槽の安定稼働実績から、本判定基準が適切であると判断できた。

(6)工期短縮効果

従来技術に比べ、革新的技術の採用により、鋼板製消化槽で約 50%(572 日→273 日:休日含む)、新型バイオガス精製装置で約 50%(220 日→110 日:休日含む)、円筒形中圧ガスホルダで約 50%(243 日→115 日:休日含む)の工期短縮効果がある。特に中圧ガスホルダの現地工事期間は、約 1/50(197 日→4 日:休日含む)工期短縮効果がある。

４．平成 24 年度採択事業（要素技術）の実証研究の内容

４．１　温室効果ガスを排出しない次世代下水汚泥固形燃料化技術実証研究

４．１．１　研究概要

【実施者】長崎市・長崎総合科学大学・三菱長崎機工株式会社共同研究体

【実証フィールド】長崎市東部下水処理場

【概要】

本実証研究は、長崎市東部下水処理場から排出される下水汚泥全量と長崎市中央卸売市場で発生する青果物の残品、残渣を、「水熱処理技術」を用い、消化ガスを発生させ、この消化ガスにより水熱処理に必要な全てのエネルギーを賄い、設備電力以外は外部からの化石燃料をほとんど用いずに固形燃料を製造する技術を実証するものである。

実証フィールドとなる長崎市東部下水処理場の周辺には中央卸売市場や熱電併給施設、農業地区（野菜）があり、本研究で製造した固形燃料による地域施設の連携を目指している。具体的な固形燃料の活用想定として、固形燃料を熱電併給施設で利用して発電を検討することで、電力会社から供給される電力消費量を最小限に保ち、地産地消のエネルギーの活用を図る。また、固形燃料を、同地域内で生産されている馬鈴薯等の肥料として活用を検討することで地域内循環の促進を図るものである（**図４．１．１**参照）。

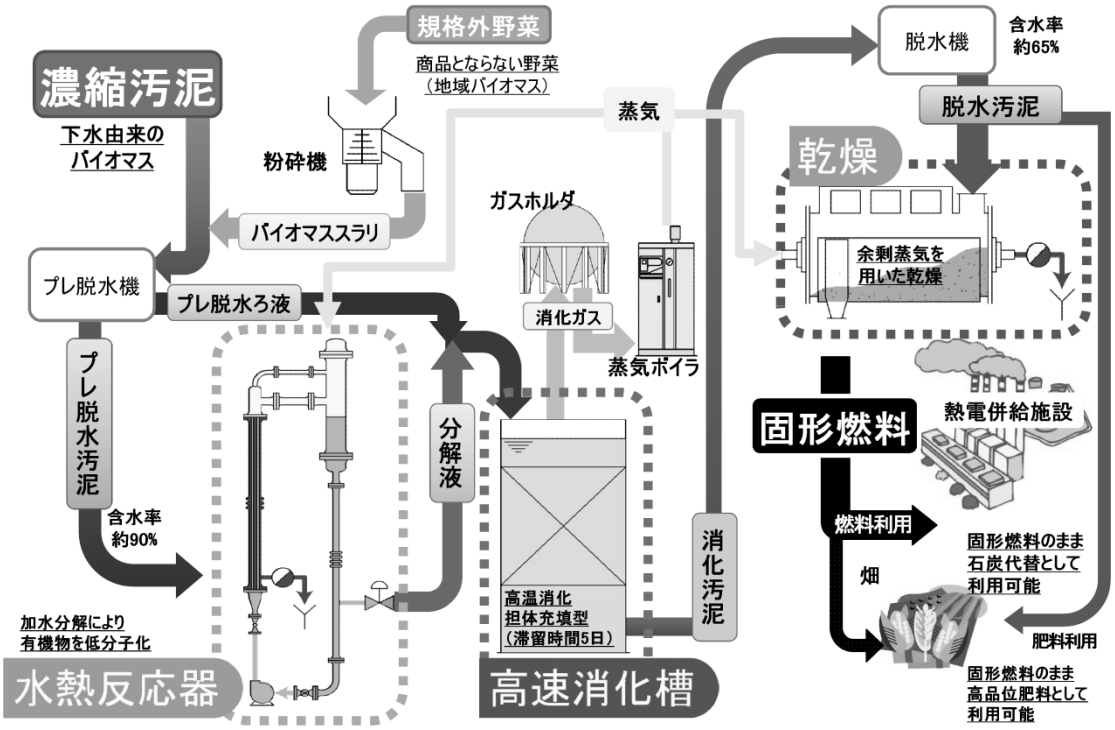


図４．１．１　温室効果ガスを排出しない次世代下水汚泥固形燃料化技術の概要

４．１．２　技術内容

今回実証を行う技術は、下水汚泥以外の有機廃棄物も処理することが可能な「高性能連続式水熱反応器」を用いて、「易分解性有機物」を連続的に消化しやすいカルボン酸類などに加水分解させた後、「担体充填型高速消化槽」により高速で消化ガスに転換させるとともに、消化しにくい「難分解性有機物」を固形燃料化する無駄のないプロセスとすることを目指している。

技術の特徴は、水熱処理により脱水汚泥の低含水率化が図れ、下水汚泥から転換した消化ガスのみで固形燃料を製造していくところにあり、製造過程も含め、温室効果ガスの排出・吸収の収支が吸収側、つまりエネルギー生成側になることが期待される。これにより、ランニングコストも低く抑えることができると考えられる（**図４．１．２**参照）。

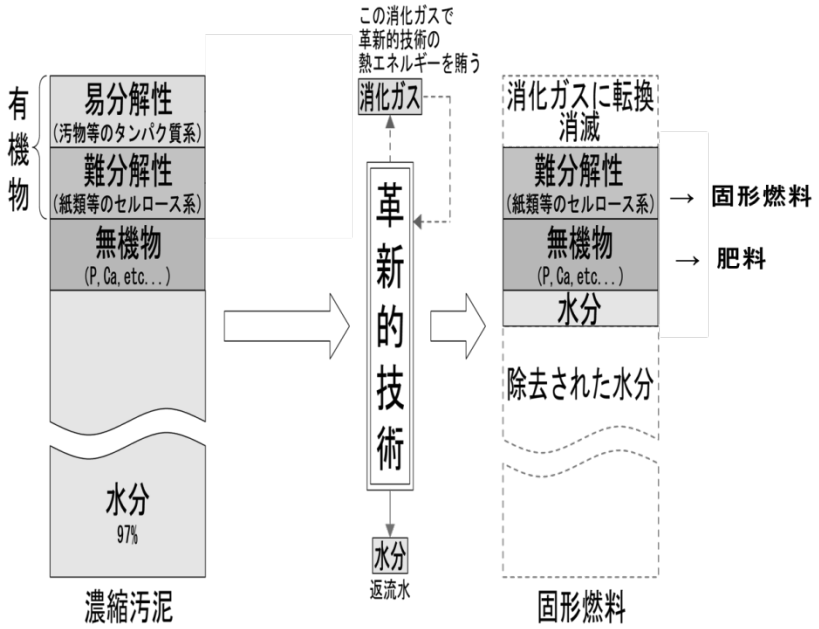


図４．１．２ 技術の原理

同じ下水汚泥に、コンポスト処理を施して製造した現在市販されている有機肥料と、本技術で製造した固形燃料を肥料分析比較すると、本方式で製造した固形燃料の方がリンを 3～4 倍多く含有しており、その他の有効成分も市販有機肥料よりも含有率が高く、あわせて、小松菜による植害試験を行った結果、有機肥料に対し、18%程度の成育増との調査結果もあるため、有用な肥料となることを想定している。また、肥料化事業は施肥時期に需要が集中するため、通年での流通の可否が懸案だったが、本技術は「燃料」と「肥料」をフレキシブルに対応させられるため、地域特性、季節により使い分けることができ、利活用の幅が広がると期待できる。

東日本大震災に端を発する化石燃料の高騰や世界規模で枯渇が懸念される良質なリン資源の確保が課題となり地域経済がひっ迫するなか、本事業を通じて地域内循環モデルの具現化に向けた参考となるよう取組んでいく。

４．２　廃熱利用型 低コスト下水汚泥固形燃料化技術実証研究

４．２．１　研究概要

【実施者】JFE エンジニアリング株式会社

【実証フィールド】松山市西部浄化センター

【概要】

消化プロセスがある下水処理場では、汚泥中の有機物が減少し、脱水汚泥の含水率が高くなるため、焼却設備において補助燃料を必要とすることが多い。本実証研究では松山市西部浄化センターに設置された既設焼却炉等の廃熱を利用して汚泥固形燃料を低コストで製造し、有効利用すると同時に焼却補助燃料を削減するシステムを開発・実証するものである。

この研究では汚泥固形燃料製造施設の安定運転を実証するとともに、製造された汚泥固形燃料の燃料特性と固形燃料化製造への影響因子を把握する。また、汚泥固形燃料の補助燃料代替あるいは場外利用による維持管理費削減効果、温暖化ガス削減効果について評価を行う（**図４．２．１**参照）。

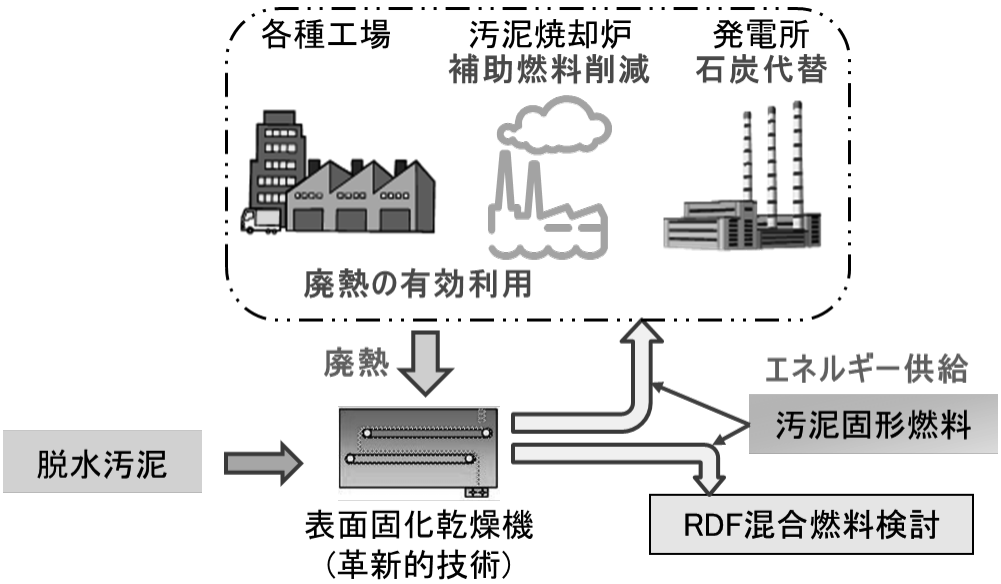


図４．２．１　廃熱利用型 低コスト下水汚泥固形燃料化技術の概要

４．２．２　技術内容

本研究で実証する革新技術は、焼却炉廃熱を利用した「表面固化乾燥機」による汚泥固形燃料製造である。この技術では 200-300 度の低温廃熱を汚泥固化物の乾燥に利用するため、製造時のエネルギー消費を従来の乾燥技術より低減できる。熱源としては下水汚泥焼却炉だけでなく、近隣の各種工場・発電所等で発生する廃熱も想定される（**図４．２．２**参照）。

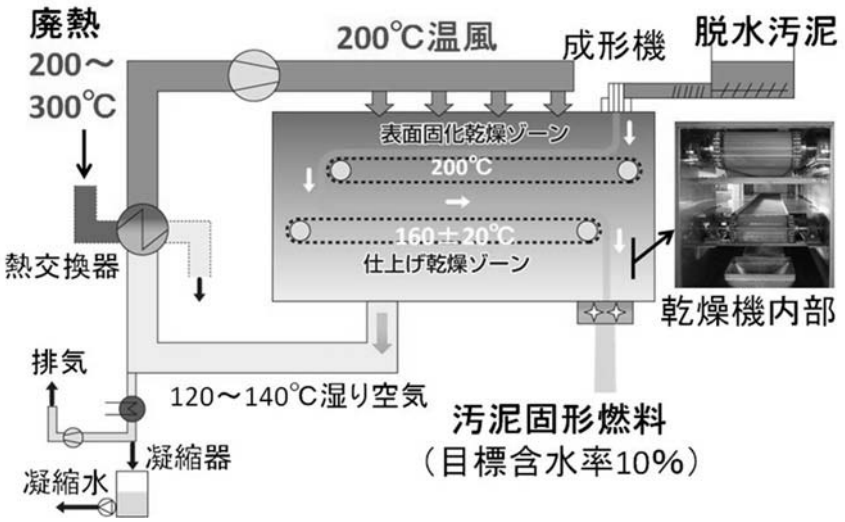


図４．２．２　技術の原理

低温で乾燥させることから、製造された燃料は炭化汚泥燃料と比較して保有熱量が大きい。また、従来の乾燥汚泥燃料は悪臭や粉塵の発生が問題となっていたが、この「表面固化乾燥機」では、成型後に表面乾燥を行うことで悪臭と粉塵の発生を減らすことが可能である。

製造された燃料は汚泥焼却の際の補助燃料として利用する。これにより、従来補助燃料として使用していた重油の使用量が削減できるため、維持管理費を低減し、かつ温暖化ガスの発生量も削減することが可能となる。乾燥汚泥固形燃料は場内で補助燃料として利用するだけでなく、セメント工場、火力発電所等で石炭代替燃料としての受け入れが期待される。

今回の実証研究では汚泥固形燃料の販路を拡大し普及展開をはかるために、松山市近郊に位置する RDF 製造施設において、RDF との混合成型についても検討する。RDF には塩素が 0.4-0.6%含まれており、汚泥固形燃料と混合成型することで塩素濃度を低減し腐食対策に寄与すると考えられる。

４．３　管路内設置型熱回収技術を用いた下水熱利用に関する実証研究

４．３．１　研究概要

【実施者】大阪市・積水化学工業株式会社・東亜グラウト工業株式会社共同研究体
【実証フィールド】大阪市海老江処理場
【概要】

下水道における低炭素・循環型システム構築手法のひとつとして下水熱利用が考えられる。我が国の下水道管路延長は約 40 万キロメートルが整備され、多くの家庭や事業所に接続されているとともに、管路内には外気に比べて安定した温度の下水が流れており様々な場所で熱利用が可能である。また、下水熱利用の技術は、様々な研究がされており、革新的技術による下水熱利用を普及させることで省エネルギー化に大きく貢献できる。

そのためには、下水熱利用にかかる革新的技術について実規模レベルの施設を配置して技術的な検証に基づく、ガイドラインの作成、全国の下水道施設への導入促進を図ることが必要である。

本研究では、管路内設置型熱回収技術を用いた下水熱利用技術により、管路内設置熱交換器による熱回収・利用技術のコスト削減効果、省エネルギー・CO2 排出削減効果、および管路更生工事との同時施工による効果を実証することを目的する。

本実証研究の施設は、海老江処理場内に都市内の下水道管を模擬した管きょを布設し、その内側に管更生工事と同時に熱回収管を設置する。熱回収管を設置した管きょとヒートポンプとの間で循環水を循環させて熱を回収し、海老江処理場に隣接する下水道科学館で夏期は冷房に、冬季は暖房に活用する予定である（**図４．３．１**参照）。

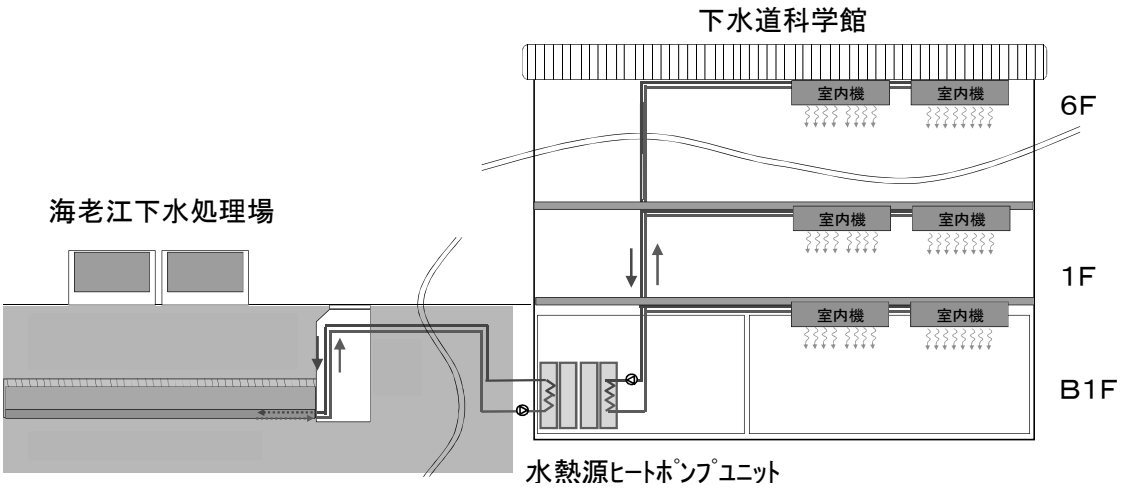


図４．３．１　管路内設置型熱回収技術を用いた下水熱利用に関する実証実験施設

４．３．２　技術内容

本技術は、管路内設置型熱回収技術と老朽化した下水道管路の改築更新・耐震化技術である更生工法を組み合わせた技術（更生管組込方式）を用い、管路更生と同時に管路内に熱交換器を設置して、管路内施設を流れる未処理下水から熱を回収・利用す

るものである。下水の温度は、夏場は大気より数度低く、冬場は大気より 10℃程度高いという特性がある。特に冬場は、暖房等に係るエネルギーコストが大きくなっている。そのため下水の温度と大気の温度差を活用し、ヒートポンプを組み合わせることにより、回収された下水熱は、ヒートポンプにより室内冷暖房等の熱源として利用することができる（**図４．３．２**参照）。

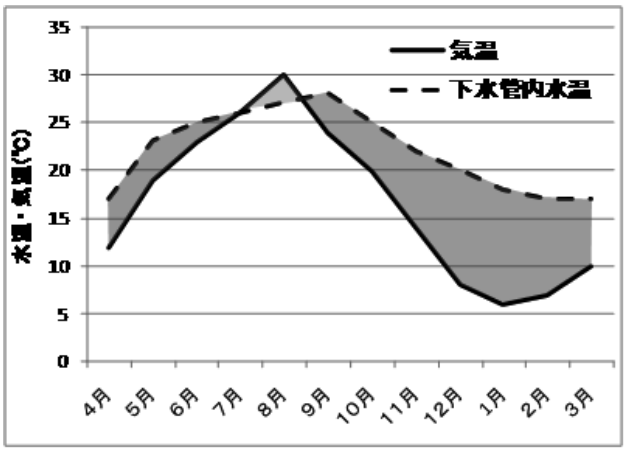


図４．３．２　外気温と下水管内水温の温度差の例

従来のポンプ場等の未処理下水からの熱利用は管路外設置熱交換器による熱回収・利用であり、熱交換のための付帯設備の設置や維持管理が必要である。しかし、本技術では、下水管渠内の未処理下水から管路内設置熱交換器により直接熱回収・利用が可能になる。また、更生管工法を同時に行うため、管きょの修繕も同時に行うことが可能になる（**図４．３．３**参照）。

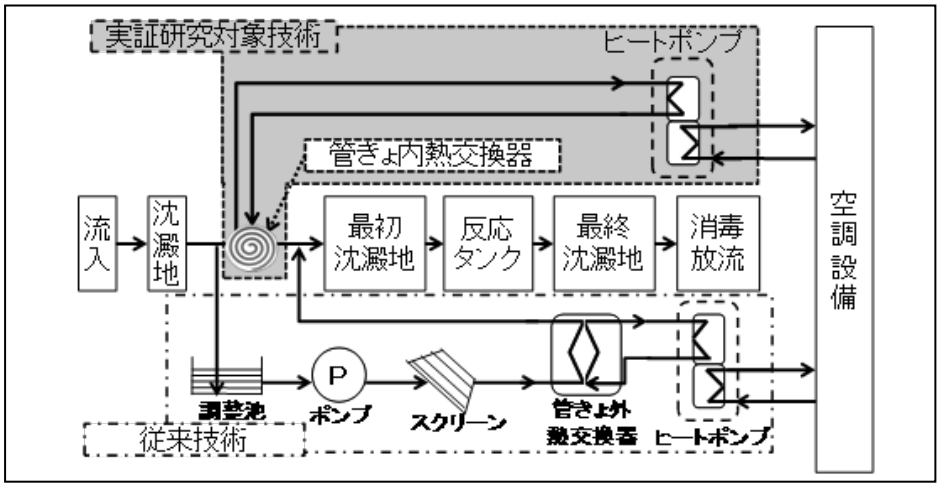


図４．３．３　従来技術との比較例

本技術は従来技術と比較し以下の利点が期待される。

１）建設費削減：専用ポンプ・スクリーン・配管等付帯設備が不要。

２）CO2 の削減：未処理下水の持つ熱を直接利用するため効率的な熱交換が可能。

３）維持管理費の削減：付帯設備の維持管理費の削減及び老朽管の更生が同時に可能。

４．４　固定床型アナモックスプロセスによる高効率窒素除去技術に関する技術実証研究

４．４．１　研究概要

【実施者】熊本市・地方共同法人日本下水道事業団・株式会社タクマ共同研究体
【実証フィールド】熊本市東部浄化センター
【概要】

本実証研究は、熊本市東部浄化センター内に実施設規模相当の実証プラントを設置して、嫌気性消化汚泥脱水ろ液を処理対象とした連続運転を実施し、返流水の個別処理施設としての適用性、有用性を実証する。なお、本実証プラントは、アナモックスプロセスとしては国内最大級である。

近年、下水道施設では、処理の高度化・低コスト化に加え、省エネルギー・創エネルギー化が求められている。その中で、バイオマスとしての下水汚泥からエネルギーを回収できる嫌気性消化プロセスによるメタン回収技術が再び注目を浴びているが、同技術の普及を難しくしている課題の一つに、高濃度の窒素およびりんを含む返流水の処理がある。その対応策として、返流水から窒素を除去する工程を新たに設ける返流水個別処理があり、そこでの窒素除去技術として注目されているのがアナモックスプロセスである（**図４．４．１**参照）。実証施設を設置する東部浄化センターでも、汚泥処理（濃縮－消化－脱水）の返流水中の高濃度の窒素処理が課題となっている。

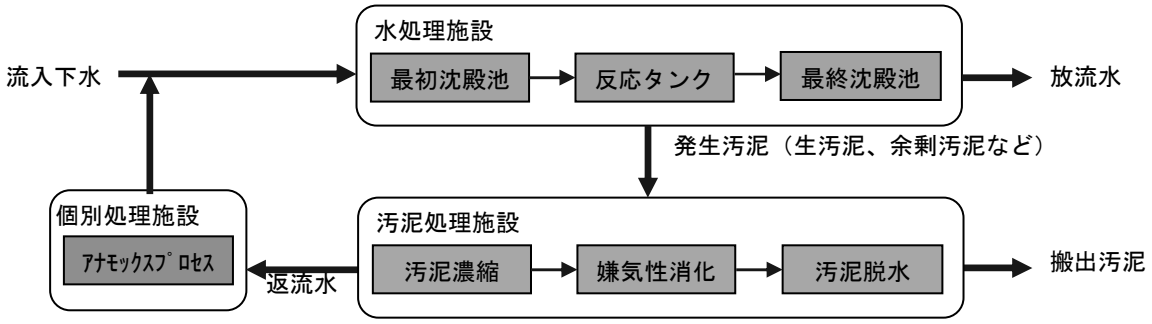


図４．４．１ 下水道施設におけるアナモックスプロセスの導入イメージ

４．４．２　技術内容

本技術は、1990 年代にオランダデルフト工科大学の研究グループによって発見された亜硝酸とアンモニアを基質として窒素ガスを生成するというアナモックス（anaerobic ammonium oxidation；嫌気性アンモニア酸化）細菌を利用し、低コストで省エネルギーな窒素除去を実現するものである。アナモックス細菌は Planctomycetals 目に属する独立栄養性細菌で、無酸素条件下においてアンモニア性窒素(NH_4^+-N)を電子供与体、亜硝酸性窒素(NO_2^--N)を電子受容体として直接窒素ガスへ変換する極めて特殊な代謝経路を持つ。この細菌を排水中の窒素除去に応用することにより、曝気、

循環ポンプおよび薬品等の従来のランニングコストを大幅に削減できる。基本フローは、流入するアンモニアの一部を亜硝酸に酸化する部分亜硝酸化工程と、脱窒のためのアナモックス工程を組み合わせたものとなる。

なお、本技術は、平成 22 年 4 月に日本下水道事業団技術評価委員会にて「アナモックス反応を利用した窒素除去技術に関する報告書」として纏められており、この報告書によると、従来の代表的な窒素除去技術である硝化・脱窒法に比べて、アナモックスプロセスでは以下の特徴がある（**図４．４．２～図４．４．４**参照）。

図４．４．２　アナモックス細菌の培養状況

・部分亜硝酸化工程での送風量は、従来技術の硝化槽必要量の半量以下となる。
・アナモックス工程では、メタノール等の有機物の添加なしに脱窒処理できる。
・アナモックス細菌の脱窒速度が早いため、反応タンク容量を縮小できる。
・アナモックス細菌の増殖収率が小さいため、汚泥発生量の削減が期待できる。

本実証事業を通して、嫌気性消化プロセスによるメタン回収技術と本技術を組み合わせた省エネルギー化・温室効果ガス排出抑制を備えたハイブリッド技術の普及展開を図る。

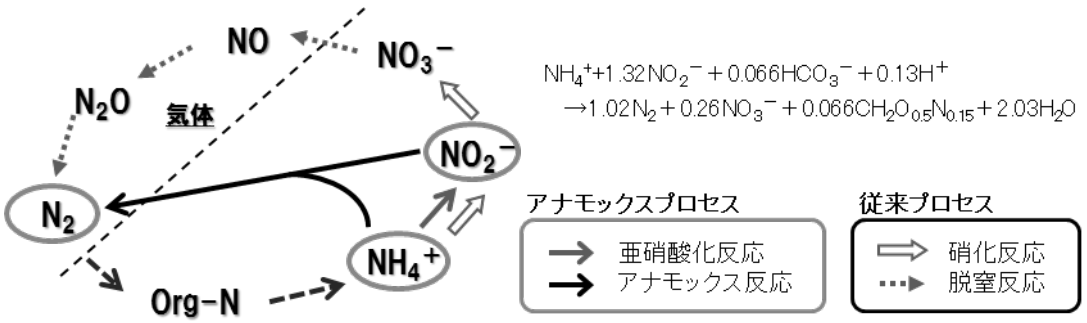


図４．４．３　アナモックス反応経路および化学量論式

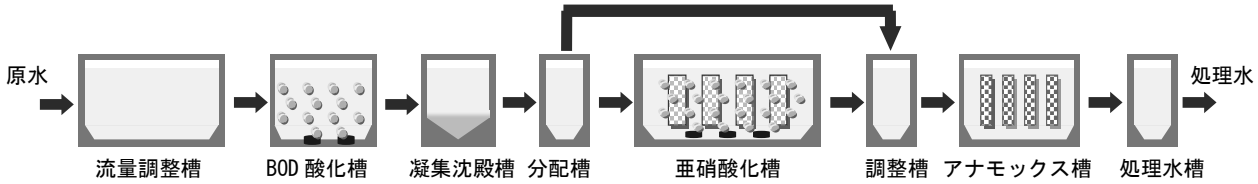


図４．４．４　固定床アナモックスプロセスの処理フロー

４．５　栄養塩類除去と資源再生（リン）革新的技術実証研究

４．５．１　研究概要

【実施者】水 ing 株式会社・神戸市・三菱商事アグリサービス株式会社共同研究体

【実証フィールド】神戸市東灘処理場

【概要】

本実証研究は下水処理場において高効率で温室効果ガス発生量と建設コストを削減できる革新的技術のうち、富栄養化原因物質であるリンを除去する新規開発技術について、実規模施設を設置・運転・計測することにより、処理の安定性やエネルギー使用量およびコスト構造などを実証することを目的とするものである。

４．５．２　技術内容

下水汚泥の減量化や汚泥からのバイオガス回収を目的として行われる嫌気性消化工程では、汚泥の一部可溶化が不可避的に生じ、汚泥に取り込まれたリンも相当部分が可溶化する。そのため、嫌気性汚泥消化工程を採用する下水処理施設のリン除去率を高めるためには、可溶化したリンを除去する必要があり、①可溶化により下水処理工程に戻るリンの量をあらかじめ処理計画に盛り込んでおくか、②汚泥処理工程の中で可溶化したリンを除去して下水処理工程への戻りを防止する方法が必要である。

本実証研究の技術は、上記②のうち、嫌気性消化工程の後の汚泥に適用する方法として、リン酸マグネシウムアンモニウム（以下、MAP）を生成させてリンを除去・回収するものである。生成する MAP は不純物の少ない結晶であり、リン資源として利用可能である。従来技術としては、嫌気性消化汚泥の脱水分離液を対象とした MAP 法が実用化されているが、本実証研究の技術は脱水する前の嫌気性消化汚泥から MAP としてリンを除去・回収する点で従来技術とは異なる（**図４．５．１**参照）。

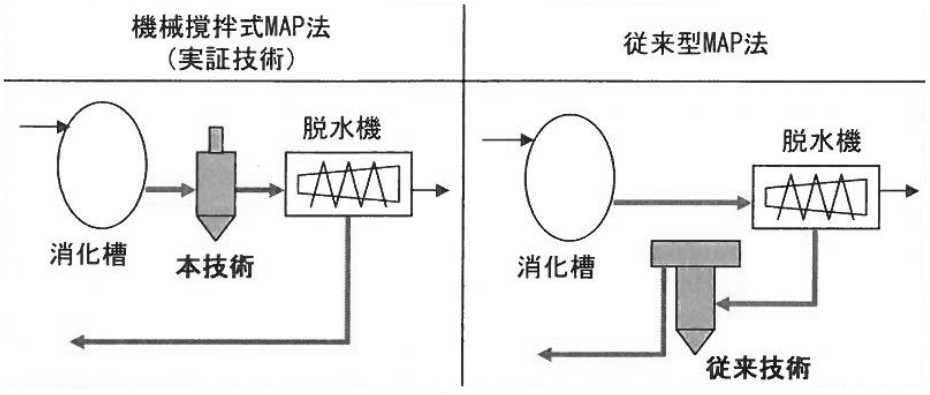


図４．５．１　栄養塩類除去と資源再生（リン）革新的技術実証研究の実証技術と従来技術の相違

本技術は従来技術と比較して、以下の利点が期待される。

１）リン除去回収量が多い（従来比+40%）。

２）必要薬品量が少ない（従来比 30%程度減）。

３）汚泥発生量の減少（従来比 3%程度減）。

４）建設費減少（従来比 30％程度減）。

現在、消化汚泥処理量 239m^3/d の実証研究施設を神戸市東灘下水処理場内に建設中である。リン除去回収施設には、消化汚泥に水酸化マグネシウム等を添加して MAP を生成・分離する本技術のコアとなる部分と、生成した MAP の洗浄・乾燥設備、さらに乾燥 MAP を計量して肥料原料として製品出荷するための袋詰めと、荷役・搬出のために必要な一連の施設が設置される。コア部分の詳細を**図４．５．２**に、リン除去・回収施設部分の完成予想図を**図４．５．３**に示す。

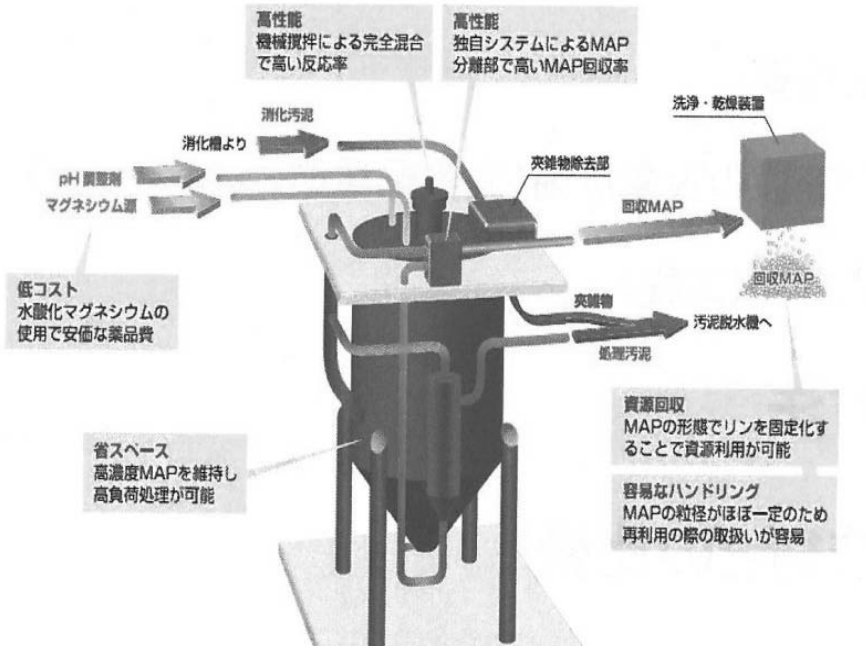


図４．５．２　リン除去回収施設の主反応装置

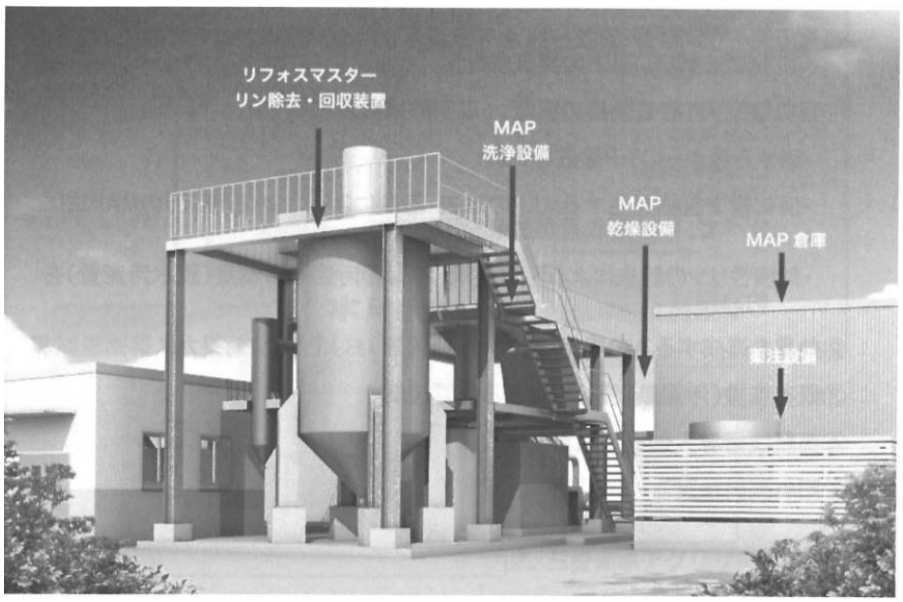


図４．５．３　リン除去・回収施設の完成予想図

５．おわりに

国土技術政策総合研究所では、これらの B-DASH プロジェクトの実証研究の成果を踏まえて、下水道事業者が導入検討する際に参考にできるガイドラインを、革新的技術ごとに策定していく予定である。これらの優れた技術が民間活力により全国に普及されることを支援するとともに、国際展開による海外水ビジネスの促進も目指すものである（**図５．１**参照）。

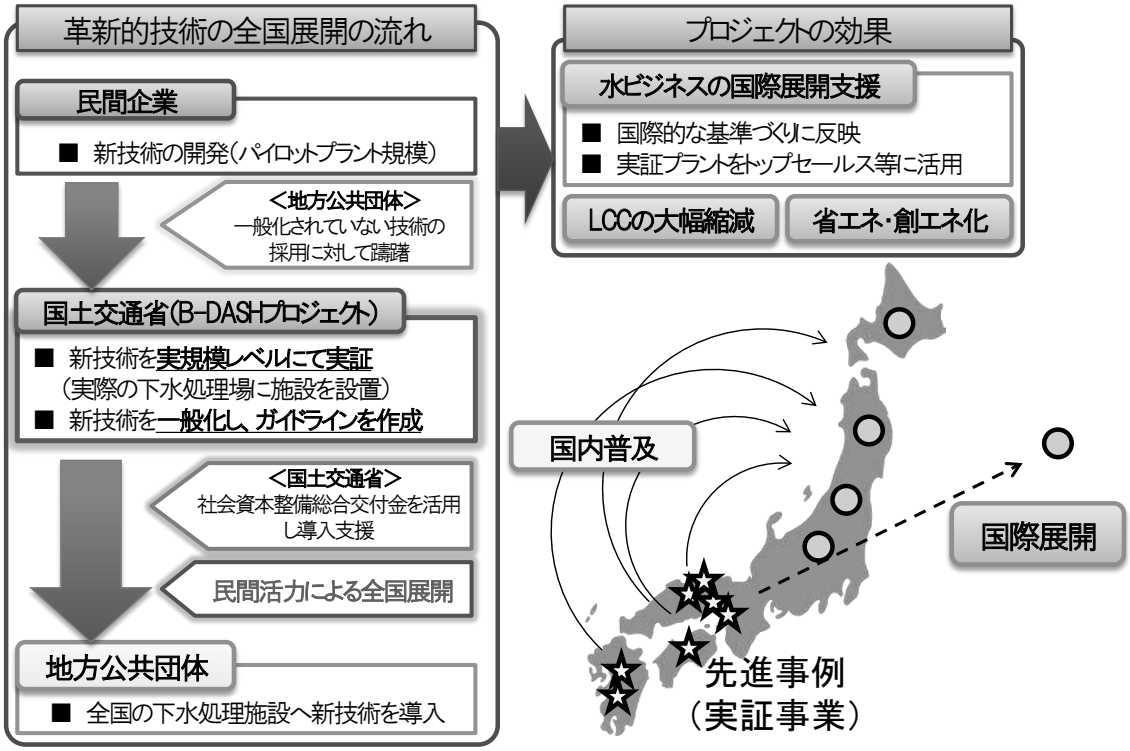


図５．１　B-DASH プロジェクト実証研究成果の普及展開

都市の集約化及び低炭素都市づくりに向けた
研究の取り組み

都市研究部長

柴田　好之

都市の集約化及び低炭素都市づくりに向けた研究の取り組み

都市研究部長　柴田　好之

１．はじめに

「コンパクトで効率的な集約型都市構造を持つ都市は、低炭素型のエコロジカルな都市である。逆に、エコロジカルな都市を目指せば、集約型の都市構造に行き着く。・・我が国が直面している諸課題を踏まえると、多くの都市が目指すべき基本的方向は『エコ・コンパクトシティ』であると考えられる。」

平成 21 年 6 月、社会資本整備審議会都市政策の基本的な課題と方向検討小委員会報告において、都市の将来ビジョンに関する共通の方針として、「エコ・コンパクトシティ」の実現、が掲げられた。

国土交通省都市・地域整備局は、平成 22 年 8 月に「低炭素まちづくりガイドライン」を公表し、低炭素都市づくりの総論としての基本的考え方を整理するとともに、交通・都市構造、エネルギー（民生家庭・民生業務)、みどりの 3 つの分野から低炭素都市づくりに関する対策を詳述し、さらに施策効果把握のための方法論等をとりまとめている。

また、本年 9 月 3 日に公表された社会資本整備審議会都市計画制度小委員会中間とりまとめ「都市計画に関する諸制度の今後の展開について」においては、「都市計画の制度面、運用面において、『集約型都市構造化』と『都市と緑・農の共生』の双方が共に実現された都市を目指すべき都市像とする」と基本的な考え方を述べた。さらに、早急に講ずべき都市の低炭素化に係る施策として、低炭素化を進めるためのまちづくり計画の制度化、市街化区域等への都市機能の集約と公共交通機関の利用促進、民間による集約事業に対する支援、エネルギーの効率的な利用、緑地の保全・緑化の推進等、都市の低炭素化を進めるための新たな制度の構築が急務であるとしている。

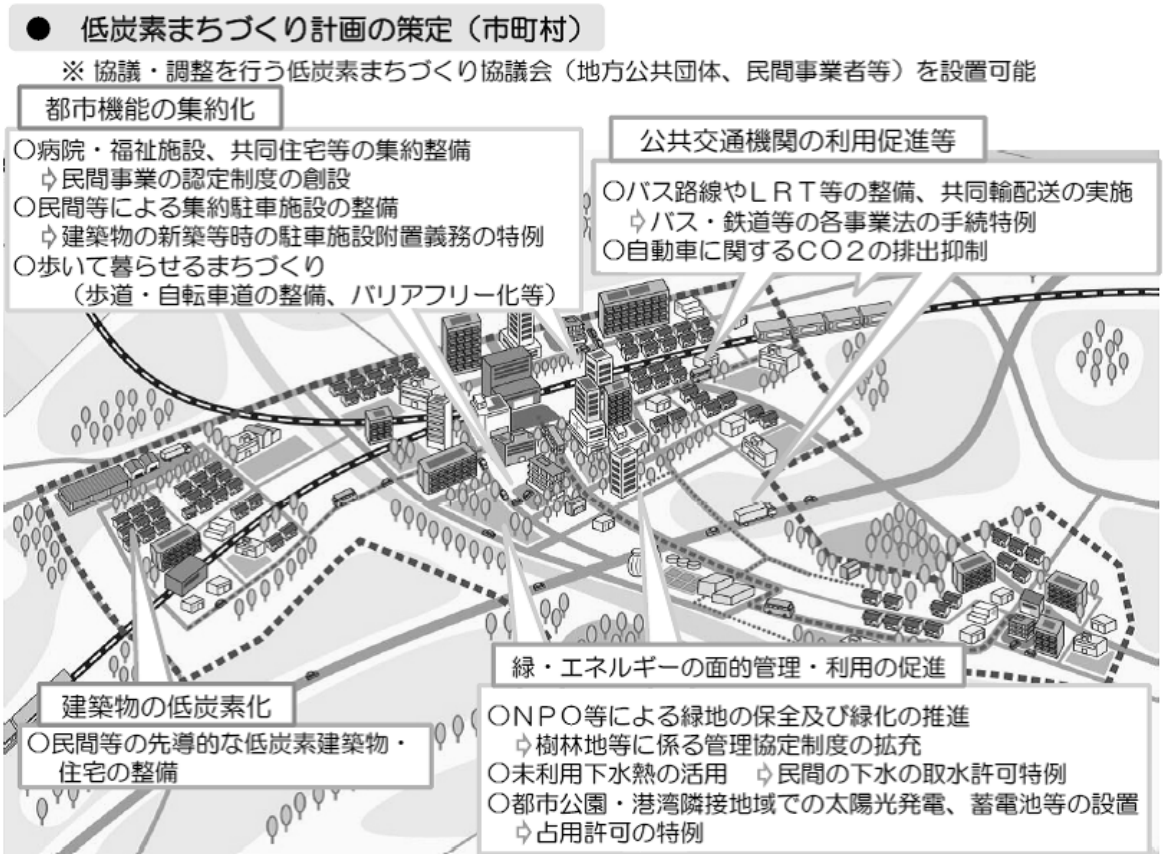
そして、都市の低炭素化を図るため、都市の低炭素化の促進に関する基本的な方針の策定、市町村による低炭素まちづくり計画の作成及びこれに基づく特別の措置等を講じる「都市の低炭素化の促進に関する法律」が 9 月 5 日に公布され、3 ヶ月以内に施行されることとなっている。

今後、地方公共団体においては、「低炭素まちづくり計画」の策定や計画区域内において都市の低炭素化に資する民間事業者の事業を支援する集約促進都市開発支援事業の実施などの取り組みが本格化することが期待される。

国総研都市研究部は、都市の集約化及び低炭素都市づくりに関連して、都市構造や省エネルギー、ヒートアイランド対策等の研究を多年にわたって実施し、地方公共団体における実際の施策検討を支援するツール開発も進めてきている。本講演においては、それらの取組の概要を示すとともに、主に地方都市を念頭に、都市の集約化に関する事例と併せて今後の研究の方向性について紹介する。

２．都市の低炭素化の促進に関する法律

今般施行される都市の低炭素化の促進に関する法律は、上記の中間とりまとめ「都市計画に関する諸制度の今後の展開について」に沿って、低炭素化を進めるためのまちづくり計画の制度化、市街化区域等への都市機能の集約と公共交通機関の利用促進等を進めるための新たな制度であり、国土交通大臣、環境大臣及び経済産業大臣が都市の低炭素化の促進に関する基本的な方針を定め、市町村は、基本方針に基づき、市街化区域等のうち都市の低炭素化の促進に関する施策を総合的に推進することが効果的であると認められる区域について低炭素まちづくり計画を策定することができることとされている。



図－１　低炭素まちづくり計画策定のイメージ
（国土交通省記者発表資料）

個別の都市の低炭素化に関する課題は都市の規模や気候などの特性により異なり、また都市機能の集約化等との関係でいえば中心市街地活性化、子育て・高齢者福祉などの施策との連携も不可欠であって、取り組むべき施策も多様なものとなることから、地域の実情に精通した市町村が地域の課題やニーズを精査したうえで具体的な施策を選択し、住民や民間事業者を含めた関係者の理解の下、計画をとりまとめる必要がある。

本稿の執筆時点ではまだ大臣が定める基本方針の内容が明らかになっていないが、やはり中間とりまとめにおいては、医療・福祉施設、商業施設等が住まいに身近なところで集積し、あるいは、高齢者をはじめとする住民が自家用車に過度に頼ることなく公共交通に

より医療、福祉施設等にアクセスできるなど、日常生活に必要なサービスや行政サービスが住まいなどの身近に存在する「集約型都市構造化」、都市を支える流域圏や崖線などに存在するまとまった緑の保全によるヒートアイランド現象の緩和や生物多様性の保全、市街地中心部など日常生活の身近なところにおける緑地の保全・緑化、消費地に近い食料生産地や避難地・レクレーションの場等の多様な役割を果たす農地の一定程度の保全などを図る「都市と緑・農の共生」などを目指すべきである、とされており、これが基本的な考え方になるものと考えられる。

施策メニューは低炭素都市づくりガイドラインが参考となり、施策を展開する範囲において低炭素まちづくり計画の計画区域を設定し、区域内で公共及び民間の取組を集中させることとなるが、適切な数値により目標をフォローしながら、都市の集約化及び低炭素都市づくりを効果的に進めて行くことが求められる。

今後、基本方針の公表に合わせた計画策定に関するマニュアルの提示、また、時期をみて低炭素都市づくりガイドラインの見直しなども行われるものと見込まれ、これまでの成果の反映・普及に努めていくこととする。

３．低炭素都市づくりガイドラインと都市研究部のこれまでの取組

３．１　低炭素都市づくりガイドラインと都市研究部の研究課題

「低炭素都市づくりガイドラインとは何か」について、ガイドラインには以下のとおり記されている。

「都市においては多様な活動が複合的に展開されており、実施すべき地球温暖化対策が多岐にわたることから、どのような対策を実施すればよいか等についての考え方を示すとともに、都市レベルでの温室効果ガス排出量・吸収量の現況把握や対策による削減効果の予測等に関する方法論などを示すことが求められていることから、低炭素づくりの推進にあたり考えるべき事項や取組の基本的考え方、対策方針の立案とその方策、低炭素都市づくりの施策効果の把握方法等を示すことにより地方公共団体の取組を支援することを目的に、本ガイドラインを作成した。」

そして図－２に示されているように、

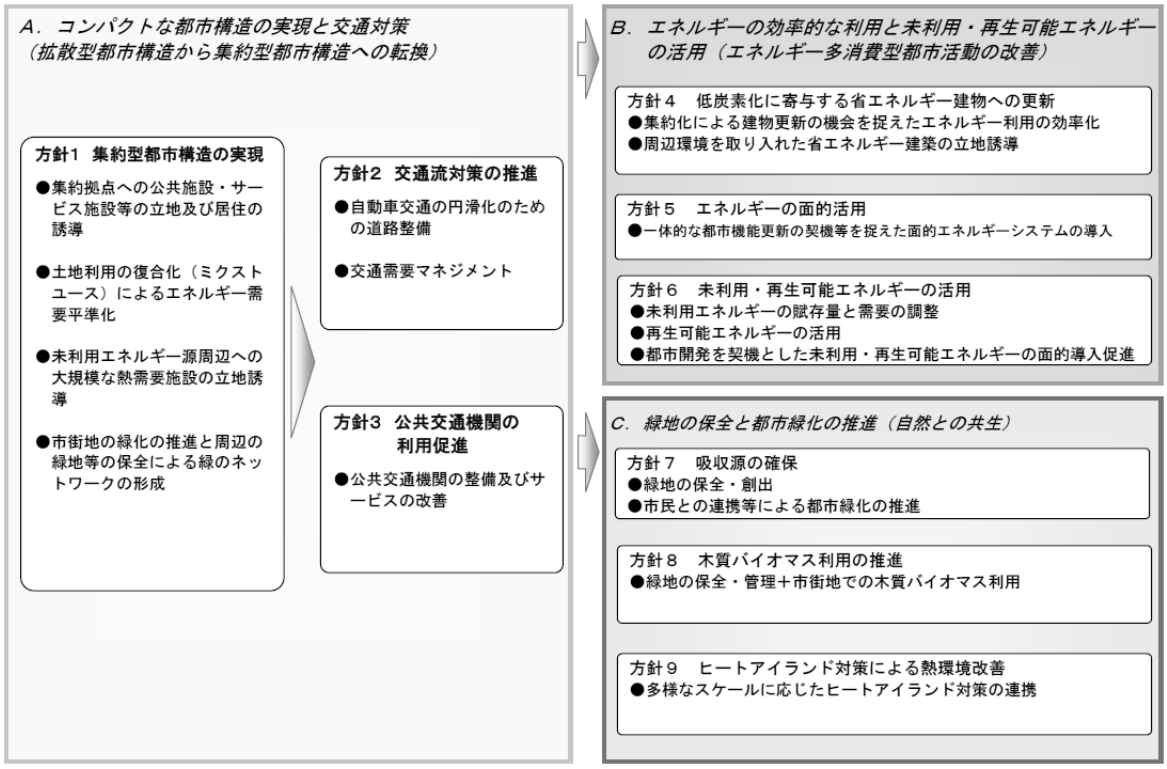
Ａ．コンパクトな都市構造の実現と交通対策

Ｂ．エネルギーの効率的な利用と未利用・再生可能エネルギーの活用

Ｃ．緑地の保全と都市緑化の推進

の３つの分野にわたって９の方針が提示され、さらに分野ごとに対策メニュー及び効果分析の方法が整理されている。

地方公共団体においては、都市の将来像や気候特性・産業特性に応じた適切な方策を選定し、都市計画区域マスタープラン・市町村マスタープラン、都市・総合交通戦略等の計画への反映を図るものである。



図－２　ガイドラインにおける低炭素都市づくりの考え方と方針
（国土交通省ホームページ）

都市研究部においては、対策メニューのうち、

A．交通・都市構造分野において

対策メニュー1　集約型都市構造への転換

①公共施設・サービス施設等の集約拠点への立地

②交通拠点への立地

B．エネルギー分野において

対策メニュー7　エネルギーの利用効率を高めるための方策

①エネルギーの面的利用

②土地利用の複合化（ミクストユース）

C．みどり分野において

対策メニュー16　ヒートアイランド対策〈都市スケール〉

①都市環境気候図

②風の道等に配慮した開発

の各分野について、国が示す基本的な考え方等の根拠となるデータの整理を行うとともに、地方公共団体が施策体系を整理する際に、選択肢の優劣の判断、施策の対象エリアの設定、施策効果の測定などについて数値データ等による評価・判断が可能となるよう支援することを目的として研究を進めている。

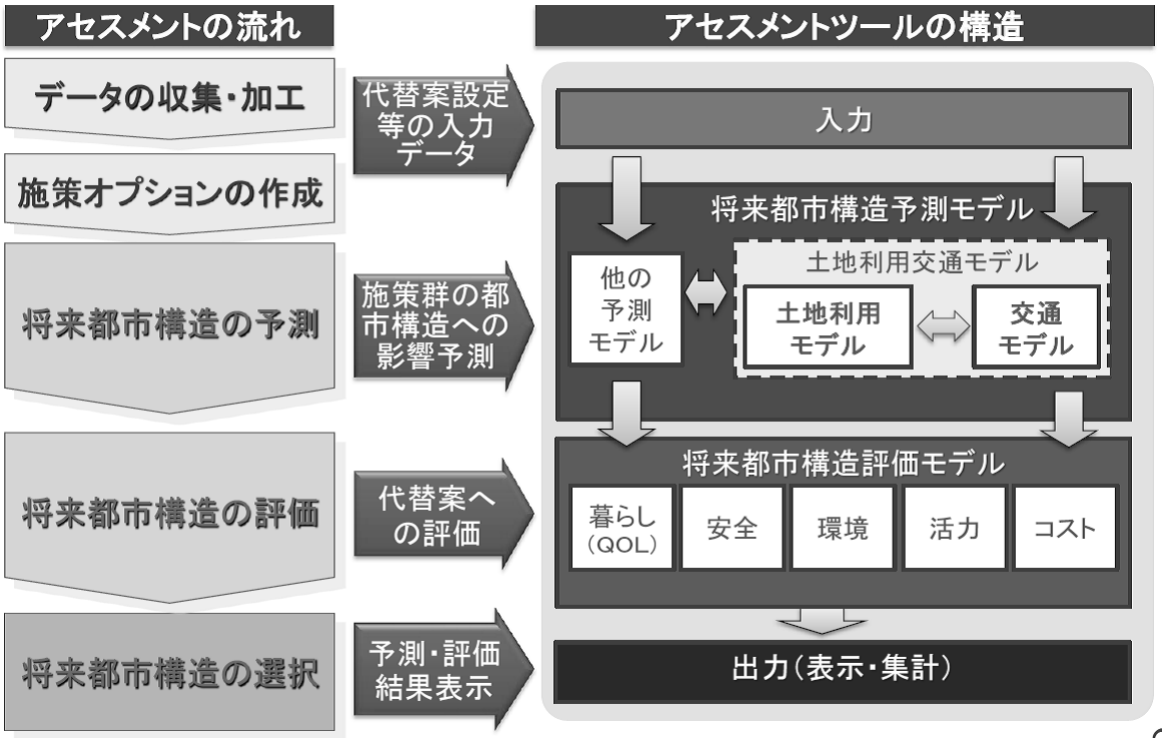
以下、関連する主な研究課題の取組を紹介する。

３．２　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

多くの地方都市においては、右肩上がりの成長を前提とした郊外への市街地の拡散的拡大が進んだこともあり、人口減少・高齢化が著しい地域を中心に、都市インフラの維持・管理、行政サービスの非効率化、生活利便性の低下、空地や空家の管理などの問題が顕在化している。このため、市民の QOL（生活の質）の向上、住民満足度の高い行政サービスの提供を効率的に進めるための都市構造の再編や都市経営戦略の再構築が必要となっている。

都市構造の再編を進めようとすると一部には痛みを伴うこととなることから、将来の都市構造に関する施策群から構成される複数の代替案を設定し、市民に対してそれぞれのメリット、デメリットを客観的･定量的に比較可能な形で提示し、合意を得た上で決定する、という過程が不可欠である。この一連の過程を「都市の将来像アセスメント」と呼び平成 19 年度から研究を進めている。

研究におけるアセスメントツールの構成とツールを用いたアセスメントの流れの概要を図-３に示した。

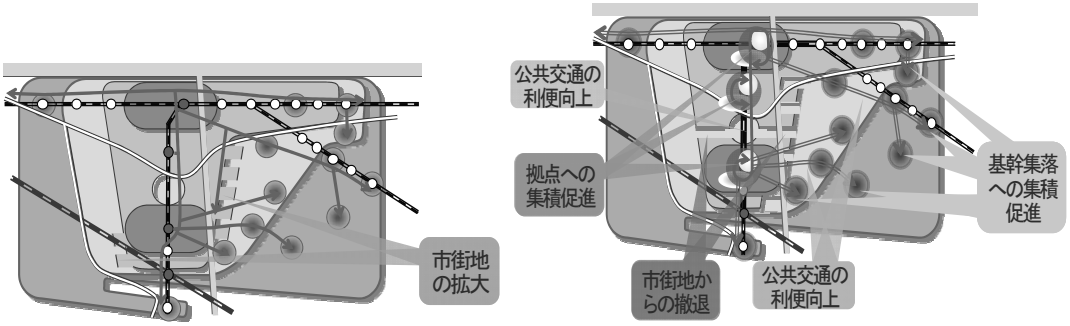


図－３　都市・地域の将来像アセスメントツールの全体像

アセスメントツールは、各代替案から導かれる将来の都市構造を予測するモデルと予測された結果を評価するモデル等からなり、パソコン上で稼働する。

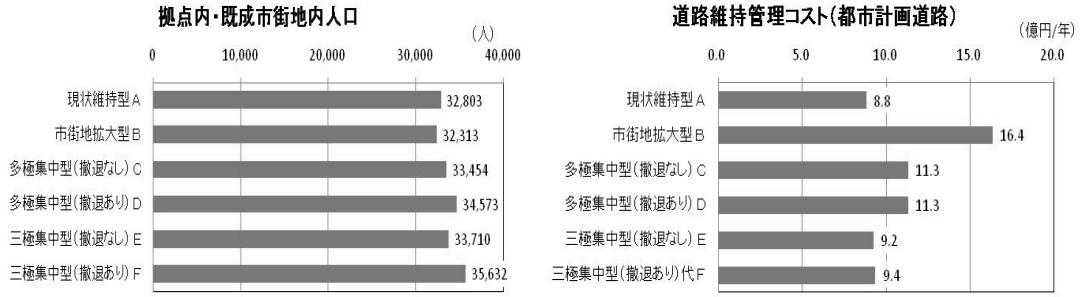
将来都市構造モデルについては土地利用と交通の相互作用を表す土地利用交通モデルを採用しつつ、人口減少期において必要な観点を導入するなどの対応を図っている。このモデルにおいては、暮らし・安全・環境・活力・コストの 5 分野にわたる 36 種類の指標

を算定可能としており、特性の異なる都市・地域におけるケーススタディにより有効性を確認している。図－４、５に計画代替案の設定例と評価結果の例を示した。



B　市街地拡大型　　D 多極集中型（郊外部市街地から撤退あり）

図－４　計画代替案の設定例



図－５　将来都市構造の評価結果の例

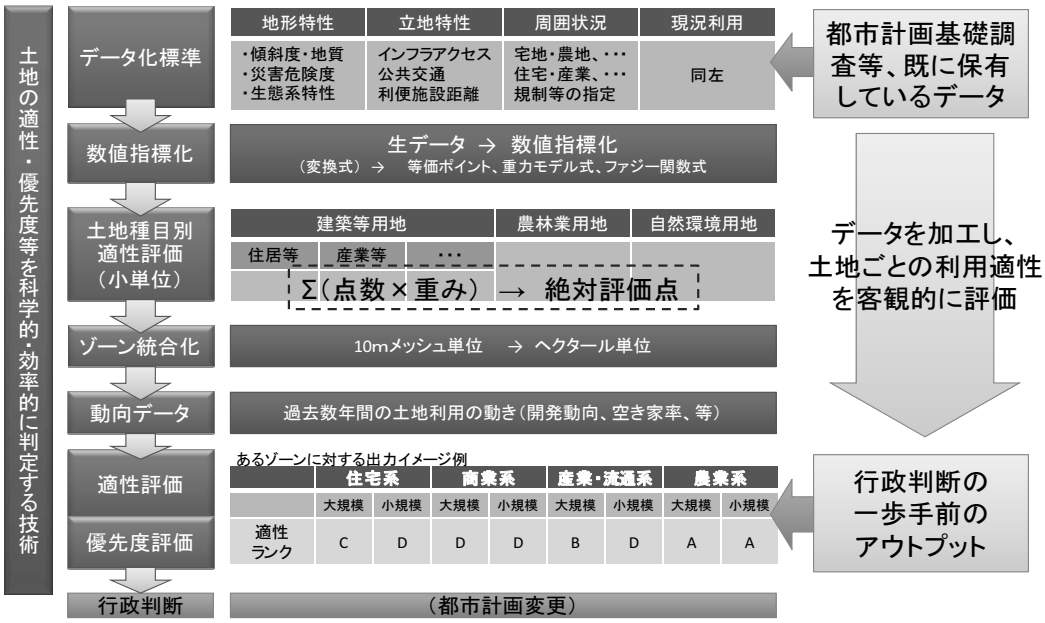
今後は、ケーススタディを重ねながらツールの実用性の向上を図り、地方公共団体における活用に資するためのガイダンスを用意することを目指していく。

３．３　都市計画における戦略的土地利用マネジメントに向けた土地適性評価技術に関する研究

都市の集約化を図り、低炭素型の都市構造を確立するためには、都市計画基礎調査等においてこれまで行われてきている土地の現況調査について、土地の潜在的な利用適性の分析・評価へと高度化し、開発と保全、高度利用や市街地の縮退などに係るきめ細かな行政判断を行うにあたって明確な説明力を付与できる汎用的な手法が必要である。

このため、平成 23 年度に着手した本研究においては、土地の有する多様な状況データ（傾斜度等の地形、災害危険度、生態系特性、各種インフラへのアクセス、各種利便施設との距離、周辺土地利用など）について同じ空間単位における演算を可能とするため、数値指標に変換しつつ統一空間単位（10ｍメッシュ）に加工・処理し、土地種目別に指標ごとの重みづけを考慮して適性の評価点を算出、土地利用の動向と合わせて適性の評価を行う技術の確立を目指しているものである。アウトプットは、地方公共団体における都市計画の見直し作業などを進める場面において、土地の利用や保全の優先度の判断材料として

の活用を意図している。



図－６　土地適性評価の実施イメージ

成果の活用により土地の利用や保全が適切にマネジメントされることは都市的土地利用の拡散防止や集約化に資するものであるが、近年の重要課題、例えば空き家の増加などにより生じる都市インフラ整備・管理の効率の悪い地区の抽出、市街地内のみどりのきめ細かなデータ化による環境寄与度の評価、各種災害ハザード情報と土地利用の連携強化、などの課題に対する対応策の検討にも有用なものとなると考えている。

３．４　熱エネルギーの面的利用による低炭素まちづくり

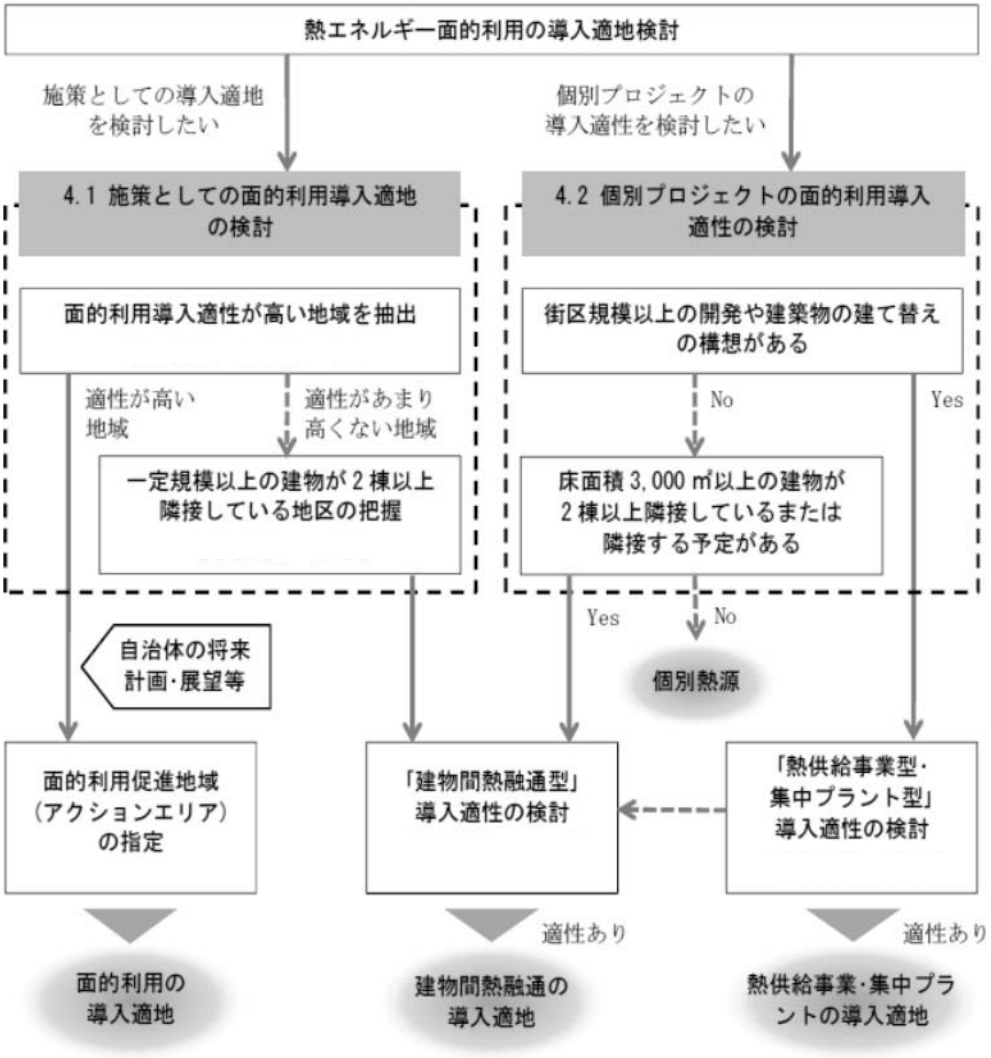
低炭素都市づくりガイドラインのエネルギー分野においては、建物及び地区・街区のエネルギーの利用効率の向上を図るため、都市をコンパクト化し環境負荷の小さな都市構造に転換することに併せて、都市基盤が充実し利便性の高い市街地の密度を高めることや多様な用途が集積した複合的な土地利用（ミクストユース）に改善し、エネルギー負荷のパターンが多様な建物がまとまって立地することが考えられる、とされている。

そのための方策のメニューとしては、複数用途の建築物のエネルギーのバランスを面的に調整すること、エネルギーの面的利用を推進すること、が掲げられており、本研究においては、低炭素まちづくりに貢献する熱エネルギーの面的利用を効果的に進めるため、地方公共団体において熱エネルギーの面的利用適地の検討、熱エネルギーの面的利用の導入効果の評価等について科学的データに基づいた検討を行うことを可能とすることを目指している。

熱エネルギーの面的利用としては、①熱供給事業型、②集中プラント型、③建物間融通型に類型化されているが、地域エネルギー負荷の集約効果により、高効率機器の採用、適切な機器分類による部分負荷への効率的対応、単独の建物では難しい未利用エネルギー

（清掃工場廃熱や下水の温度差エネルギーなど）や大規模なコージェネレーションなどの導入が可能となるなどにより省エネルギー効果が期待されるほか、ヒートアイランド対策、防災機能の向上、電力負荷の平準化などの効果も期待される。

熱エネルギー面的利用の導入適地には、行政サイドが都市計画マスタープランなどでアクションエリアに指定し、面的利用を積極的に導入推進する場合に加え、個別プロジェクトの導入適性を検討することも念頭に図－７のとおり整理を行った。



図－７　熱エネルギー面的利用導入適地の検討フロー

面的利用の導入適性が高い地域の判断基準例としては、

①　地域面積 2.5ha 以上（町丁目相当）の地域で、熱負荷密度 4.2TJ/ha 以上

②　法定容積率 500%以上

のほか、

③　未利用エネルギー源から近い地域

も考えられる。

また、個別プロジェクトの面的利用導入適性としては、

① 熱供給事業型・集中プラント型については、街区規模以上の開発構想があって、用途が混合している、エリア内に幹線道路が少ない、などを考慮し、未利用エネルギー源が近い場合は活用の可能性を検討する。

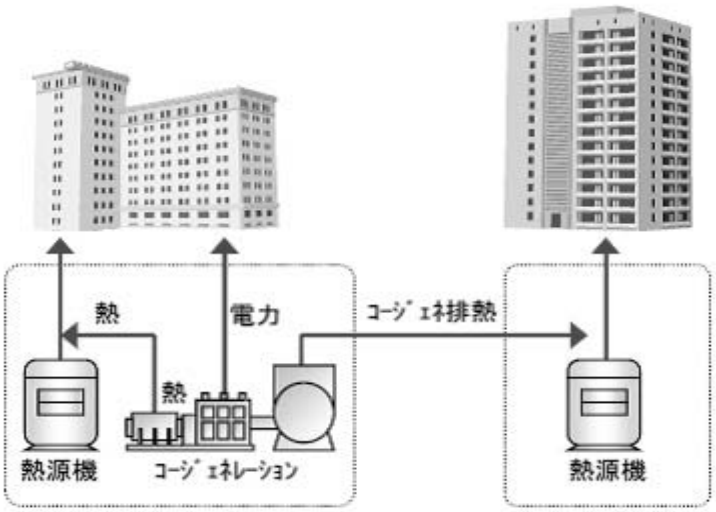
② 建物間熱融通型については、建物間の距離が近い、用途が混合している、などを考慮し、未利用エネルギー源が近い場合は活用の可能性を検討する。

と整理した。

一方本研究においては、熱の面的利用の導入効果の試算も行っており、ここでは建物間熱融通（コージェネ排熱利用、高効率機器優先運転）の導入効果の例を示す。

コージェネレーションシステムは優れた省エネシステムであるが、熱需要の少ない時期には排熱が余剰となる場合もある。建物間熱融通を行うことにより、熱需要の少ない時期にも排熱を有効に活用でき、また、高効率機器を優先運転することにより、全体のエネルギー効率を向上させることができる。

試算として、20,000 ㎡の業務施設と 10,000 ㎡のホテルを考え、業務施設側にコージェネを導入、業務施設で使い切れない排熱を熱融通によりホテルで利用することとした（図－８、表－１）。なお、評価としては熱需要のみを対象とし、電力需要については評価の対象外としている。



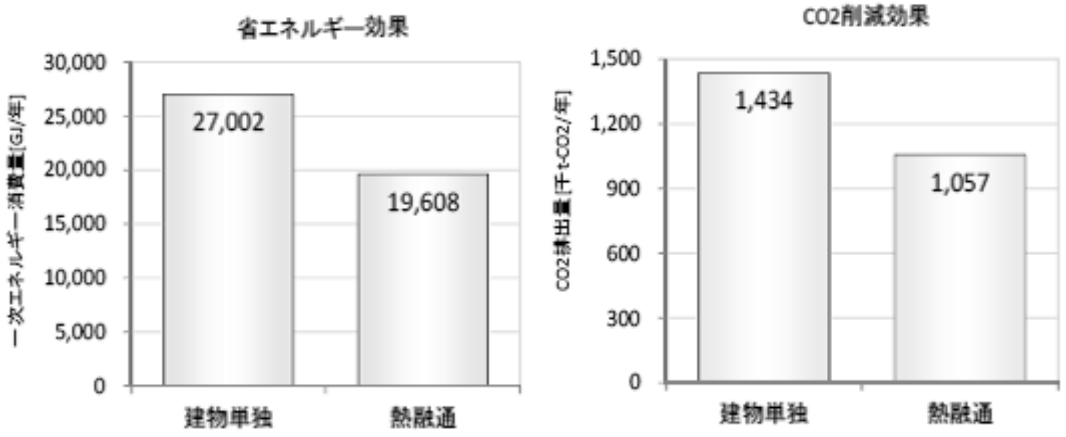
図－８　試算を行ったシステムのイメージ

	建物1	建物2
用途	業務	ホテル
床面積	20,000㎡	10,000㎡
熱源方式	電動･吸収併用方式(CGS有り)	吸収方式(CGS無)
熱源の効率レベル	最新型効率	最新型効率×0.8
熱融通配管長さ	50m	

表－１　試算を行った際の検討条件

建物単独の場合と比較した結果として、2 施設合計でコージェネ発電量・排熱回収量とも同様であるが、利用量が異なった。熱融通を行わない場合、コージェネの排熱利用率は年平均で 68.3%だが、熱融通を行うことにより、熱損失を除くと 100%の利用率となった。

また、熱需要のみの評価で、省エネルギー率 27.4%、CO_2削減率 26.3%と非常に高い導入効果が期待できた（図－９）。もちろんあくまで一定の条件下での試算であり、実際の検討に当たっては専門家と協議した上で熱源設備を適切に計画する必要がある。



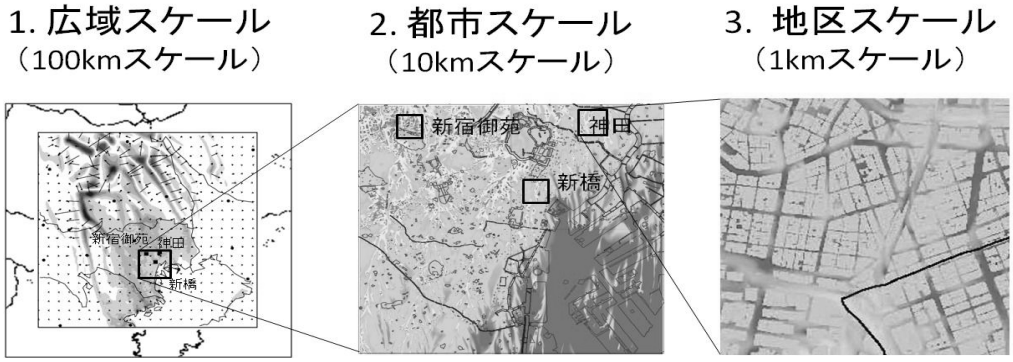
図－９　試算における省エネルギー効果・CO_2削減効果例（熱需要のみの評価）

地方公共団体に対しては、熱エネルギーの面的活用の意義・効果や事例紹介、導入適地検討の手順、導入効果の試算例等を「手引き」という形で整理し、提供していくことを考えている。また、導入効果等の算定についてはプログラムの開発を行ったところであり、地方公共団体に対する支援の体制を整えていきたい。

３．５　ヒートアイランド対策に関する評価技術の開発

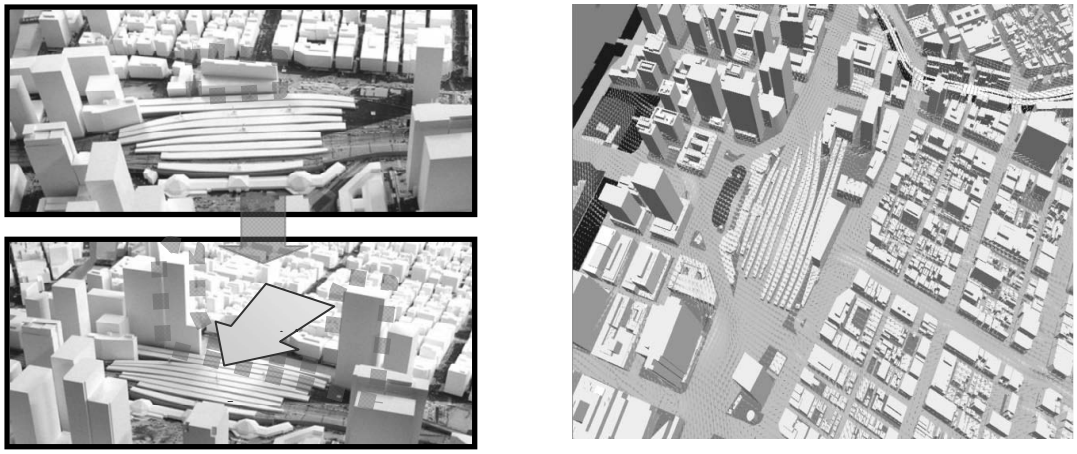
ヒートアイランド対策については低炭素都市づくりガイドラインのみどり分野の対策メニューの一つに位置づけられているが、大都市等においてはヒートアイランド現象により冷房需要が増大し，エネルギーの大量消費につながることから、低炭素都市づくりの観点からも対策が必要である。ヒートアイランド現象は、都心部から郊外に向かって、都市とその周辺の広い範囲に影響を及ぼす可能性があり、効果的に対策を講じるためには、その影響範囲を把握し、重点的に対策を講じる範囲を明確にしつつ具体的な対策を検討する必要がある。

また、検討にあたっては、①広域スケールを対象に、気象観測データや都市気候シミュレーション等により影響範囲を広域的に把握し、②都市スケールで対策の基本方針を検討、③地区スケールで具体の屋上・地上緑化、保水性舗装、風通しの確保、地域冷暖房などの個別対策を検討するという手順が重要である（図－１０）。



図－１０　スケールに基づく段階的な対策の検討

ヒートアイランド対策については、平成 16 年に「ヒートアイランド対策大綱」が決定され、数値シミュレーションモデル等により対策を総合的に評価する手法の開発等に努めることとされたことを受け、総合技術開発プロジェクト「都市空間の熱環境評価・対策技術の開発」によるシミュレーション技術の開発等を行ってきた（図－１１）。



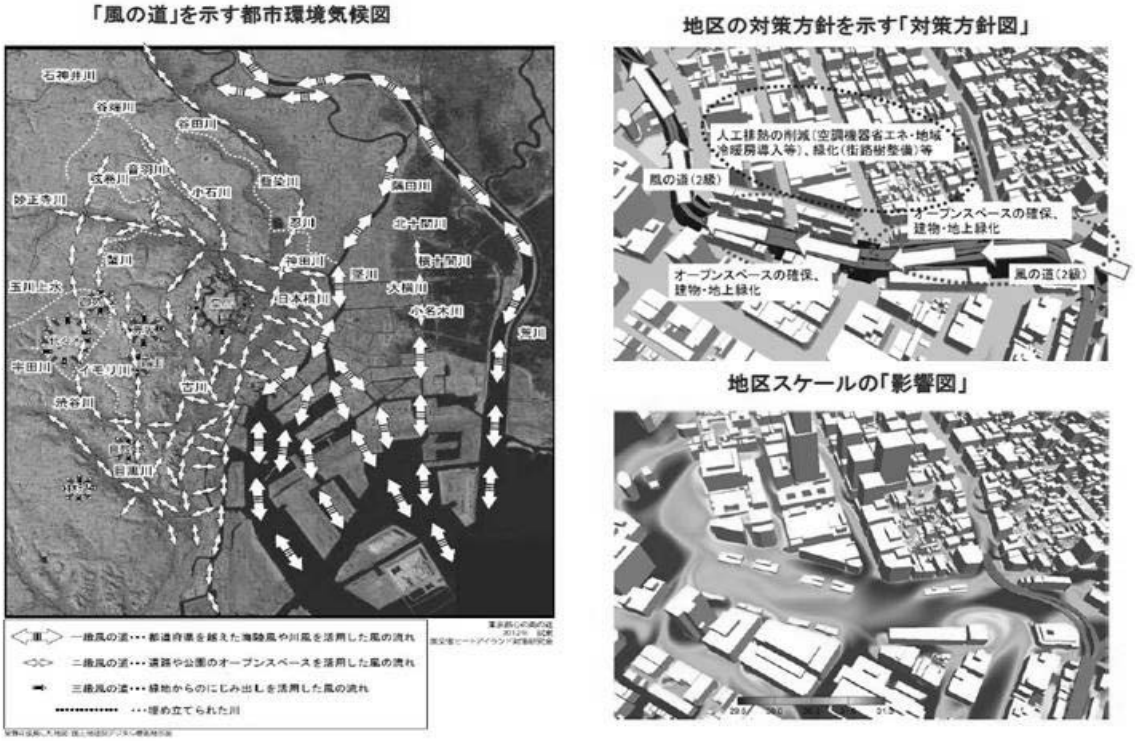
図－１１　東京駅周辺の再開発に伴う「風の道」の形成に関するケーススタディ
（左図：風洞実験、右図：地球シミュレータによるシミュレーション）

近年は、本省における都市計画の運用手法調査に参画したほか、省 CO_2 効果からみたヒートアイランド対策評価、そして都市計画のための都市環境気候図の標準化へと研究を進めてきている。

ヒートアイランド対策の省 CO_2 効果の評価については、ケーススタディとして区部の 500m 四方の市街地を対象に、風の道や緑化、人工排熱削減等の様々な対策による、夏季・冬季あるいは年間を通じた市街地の熱環境や建物空調負荷、CO_2 排出量への効果・影響を定量化し、市街地の容積率、建ぺい率、建物用途などの地域特性に応じた効果の原単位を設定、これらをもとに、ヒートアイランド対策の個別あるいは複合的な対策を導入した場合の熱環境緩和効果、空調負荷軽減効果、省 CO_2 効果をパソコン上で簡易に予測できる評価ツールを作成した（図－１２）。地方公共団体の関係部局における施策検討の支援ツールとして普及を図っていきたい。

図－１２　地方公共団体等向けの評価ツール（パソコンソフト）

一方、都市環境気候図の標準化については、ドイツにおいて地区詳細計画を作成する際の基礎資料となる気候分析図（クリマアトラス）も参考にしつつ、日本の臨海部に立地する大都市において数百メートルの厚みをもって流入する海風に注目し、風の道を都市計画に適用する方法の検討を行っており、ケーススタディ等の成果も踏まえながらヒートアイランド対策マップ（案）を作成するとともに、その作成の考え方をとりまとめ、今後の都市計画ガイドラインとして地方公共団体に提供することを目指している（図－１３）。



図－１３　ヒートアイランド対策マップ（案）の検討事例

現在作成しているヒートアイランド対策マップの例を図－１４に示した。ヒートアイランド対策マップは、都市の熱環境の現況を示す「現況図」と現況を踏まえて中長期的視点から対策の方針を示す「対策方針図」、対策方針図に対して開発事業主体者等がヒートアイランド対策に配慮した計画の効果・影響をシミュレーション等によって示す「影響図」の３つから構成され、それぞれ広域スケール、都市スケール、地区スケールについて作成することを想定している。

４．都市の集約化に関する事例と今後の研究の方向性

４．１　青森市の基本的な方針

青森都市計画マスタープランにおいては、全体構想として、市街地の低密度での拡散化、中心市街地の空洞化、インフラ整備が市街地拡大に追いつかない、などの課題に対応し、無秩序な市街地拡大の抑制、都市機能の集約化や複合化による快適な居住環境の創出、地域コミュニティ意識の向上、中心市街地の活性化等によるコンパクト・シティの形成、を基本理念としている。

これを受け、土地利用の方針として

① 市街地の拡大に伴う新たな行財政需要を抑制

② 既存のストックを有効活用した効率的で効果的な都市整備

③ 市街地の周辺に広がる自然・農業環境との調和

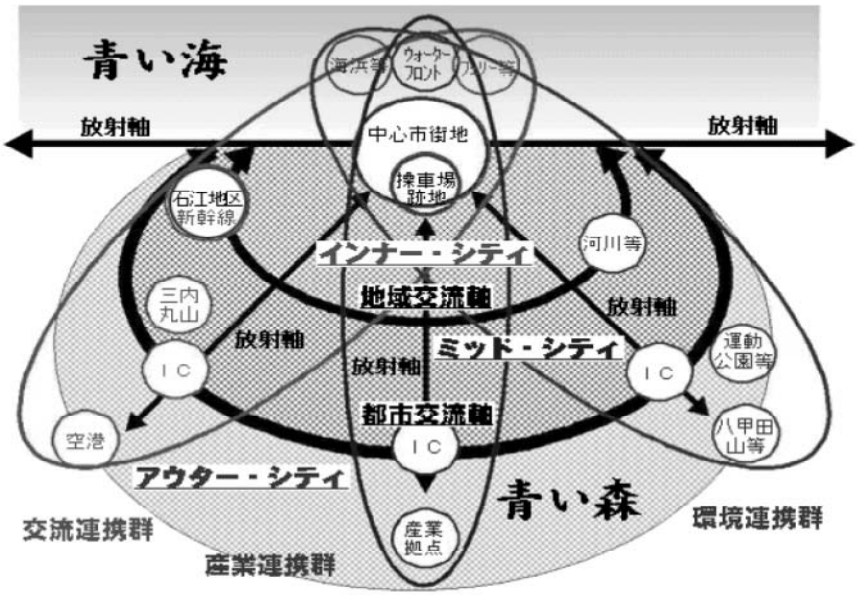
を掲げ、

・インナー(Inner-City) ‥昭和 45 年頃に既成市街地となっていた、まちなみの老朽化が進む密集市街地や中心市街地を含むエリアで、都市整備を重点的に行い市街地の再構築などを進めようというエリア

・ミッド(Mid-City) ‥インナーとアウターの間のエリアで、多くが低層の住宅地となっており、一部を今後の宅地需要などに応じて良質な宅地の供給を行うストックエリアとし、計画的な土地利用を誘導、無秩序な郊外の開発を抑制していこうとするエリア

・アウター(Outer-City) ‥外環状線（一般国道７号青森環状道路）から外側の地域で、都市化を抑制し、自然環境、営農環境の保全に努め、開発は原則として認めないエリアとしている。

特色としては、都市整備の投資効率、低炭素化、拠点への機能集積などを重視し、市街地拡大の限界線を設定したこと、インナーシティへの重点投資、とりわけ中心市街地の活性化を重視していることが挙げられる。しかし、中心市街地及び拠点地区における都市機能の集積を除くと、「集約化」を意識した方向性の提示としてはさらに深化させる余地、例えば、インナーシティやミッドシティにおける投資効率、行政サービスの効率を考えた場合の日常生活圏（徒歩圏）の考え方、それと関連づけた公共交通機関の利便性向上策などが求められるのではないか、と思われる。



図－１４　青森市　将来都市構造の概念図（パターン図）

４．２　富山市の基本的な方針

富山市都市マスタープランにおいては、まちづくりの理念として、市街地の外延化を背景とした公共交通の衰退、割高な行政サービスコスト、都心の空洞化という課題に対処するため、まちづくりの理念として「鉄軌道をはじめとする公共交通を活性化させ、その沿線に居住・商業・業務・文化等の都市の諸機能を集積させることにより、公共交通を軸とした拠点集中型のコンパクトなまちづくり」の実現を目指します、としている。

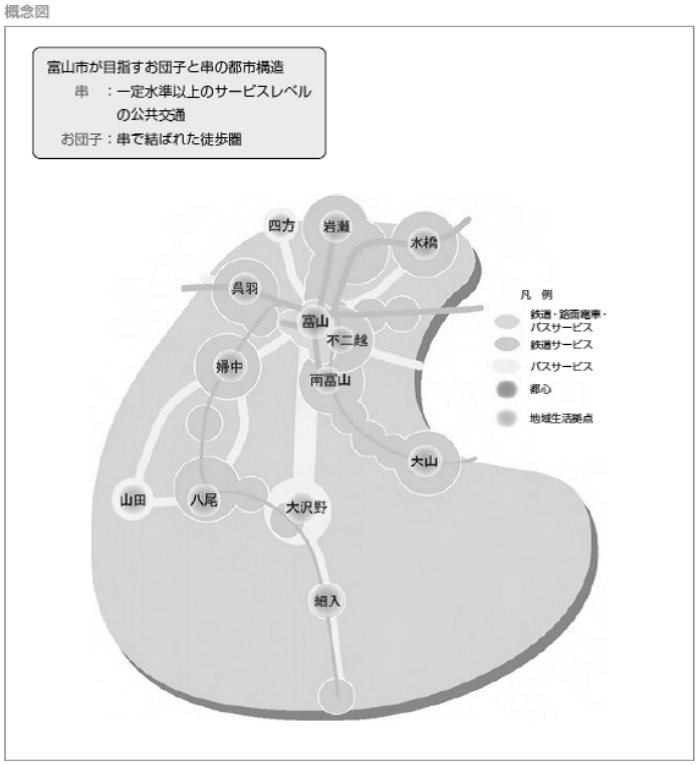
また、自ら富山型コンパクトなまちづくりの特徴として

①徒歩と公共交通による生活の実現

②お団子と串の都市構造

を掲げ、徒歩圏（お団子）と公共交通（串）から成るクラスター型の都市構造を目指す、としており、まちづくりの進め方としても、規制的手法ではなく、駅等を中心とした徒歩圏における街の魅力を高めることによりそこに住みたいと思える市民を増やす、まちなか居住が選択できる環境を提供する、恵まれた鉄軌道網やバス等の公共交通機関の活性化を柱とし、公共交通の沿線に地域の核となる拠点を整備する、としている。

そして、最寄り品小売業や医療施設、金融・郵便サービスなどの生活利便施設が徒歩圏の範囲にまとまって立地する地域生活拠点を設定し、全ての鉄軌道と重要なバス路線区間を公共交通軸に位置づけるとともに、公共交通軸のうちすべての鉄軌道と運行頻度の高いバス路線の沿線の徒歩圏を居住推進地区としている。



図－１５　　富山市　まちづくりの理念　概念図

特徴としては、公共交通の軸とした鉄軌道路線と運行頻度の高いバス路線の沿線の駅等を中心とした徒歩圏を対象として必要な行政サービスほかの都市機能の整備や人口集積を重点的に誘導することを計画に位置づけ、住宅取得等に対する支援を具体化している。

逆に言えば集約化に関し、お団子とならないエリアについては、もともと公共交通の条件が悪いのに加えて行政サービスのレベルに差をつけ、利便性の高いところへの移転を誘導することを企図していることとなる。

もっとも、お団子とならないエリアのうち中山間地域については人口現象に歯止めをかける、地域社会の参画と協力によって生活交通の確保を目指すと方針を示しており、残る両者の中間の領域については、人口のお団子エリアへの転出を誘導し、人口を減らしていくことにより目指していく将来像はどういうものか、低密度化住宅地なのか、あるいは他用途への土地利用転換なのか、を示すには至っていない。

４．３　夕張市の基本的な方針

夕張市は平成 22 年に財政再生団体の指定を受けるなど大変厳しい財政状況にあり、夕張市まちづくりマスタープランにおいても、「かつての人口規模を前提とした社会基盤の維持管理や市街地毎に分散した人々の生活を支えることの負担は大きく・・」という認識を前提として基本理念を構築したことが伺える。

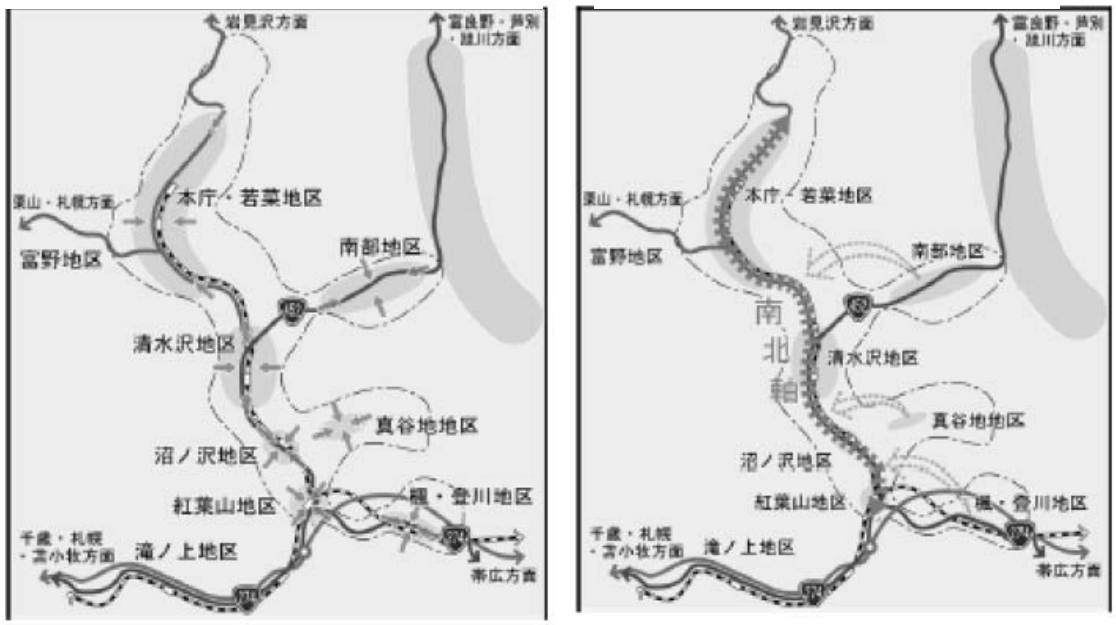
基本目標（ビジョン）として、「都市経営コストを軽減するコンパクトなまちづくり」を掲げ、関連して

①市街地のコンパクト化による効率的な都市基盤の維持管理
②都市基盤の協働による地域管理の推進
を基本方針としている。

そして、将来構造として、2 骨格軸（都市骨格軸・広域連携軸）、1 都市拠点（清水沢地区）、4 地域内再編地区の形成を目指す、としているが、別の節を立てて「将来都市構造の再編プロセス」を特記し、「夕張市の特徴や人口分布、都市基盤施設の維持管理費用の縮減等を考慮すると、長期的には、例えば・・・既存ストックが集積している南北軸に市街地を集約化することが、持続可能な地域社会の構築に向けて必要になります。その際、南北軸上に位置していない地区においては、従来のように市街地を形成して居住するというよりは、・・・」と居住地としての機能を転換していく方向性を示している。

併せて、このような都市構造の再編に住民の理解と合意を得るには相当程度の時間が必要であり、また多くの費用も係ることから、当面は地区ごとの市営住宅の再編・集約化を中心にコンパクト化を図る、との段階的な再編プロセスの計画としている。

当面の市街地：地区ごとにコンパクト化　　**将来の市街地：都市構造の転換**



図－１６　夕張市　将来都市構造の再編プロセス

この夕張市の都市構造再編プロセスの計画は、財政制約から既存の一定のまとまりのある地区であっても立地条件等が不利なところについて将来的に居住者に対する行政サービスを縮小せざるを得ないこと、そして該当する地区を明示していることが特色である。

現在都市研究部が行っている集約型都市構造を実現するための市街地の縮退方策についての研究においても夕張市の取組を対象としているところであるが、現地においては、プランに沿って公営住宅の再編・集約化の動きが具体的に始まっているところである。

４．４　集約型都市構造の実現に関する今後の研究の方向性

以上３都市の事例を見てきたが、「都市の集約化」といっても

①　市街地拡大限界線の設定と中心部への都市機能の集積

②　公共交通機関を軸とした日常生活圏（徒歩圏）の再構築と都市拠点との連携

③　財政制約等を反映した行政サービス範囲の縮小プロセスの可視化

と将来の人口等の動向、既存の都市基盤ストックの状況、財政状況、あるいは時代背景などによって構造再編の取組の強弱には大きな差違が生じている。

都市の低炭素化の促進に関する法律は、①あるいは②といった施策展開とマッチするものであり、また、多くの地方都市において取組が進められている中心市街地活性化の施策とも連携したものとなると考えられる。

しかしながら、特に地方都市を想定した場合、人口の減少と高齢者の割合の増加という基調のもと、医療・介護・福祉サービス提供体制の整備、学校の耐震化、中心市街地の活性化、老朽インフラの更新、防災体制の強化など早急に対応すべき課題が山積している状況であり、一方で、平成の大合併に伴う国の財政支援が縮小に向かう時期にもなってきており、都市経営コストの削減はますます切迫した課題になることから、③の縮退を考えるような「集約化」に向けた厳しい再編策が地方公共団体の選択肢となることを想定した研究の取組が必要と考えている。いわゆるオールドタウン問題も都市全体の構造の中で検討すべき課題である。

地方公共団体にとっては、厳しい再編を伴う「都市の集約化」という方向性について住民はじめ関係者に説明する場合、財政状況から求められる歳出の制約と行政サービスの水準や都市インフラの維持・更新などとの関連といった身近で切実な問題として理解を求めていくこととなり、これらについて他都市との比較なども含め複数の代替案の提示とそれぞれのメリット・デメリットなどを客観的なデータをもとに説明できるよう準備を進めなければならない。

我々としても、従来の取組の成果が地方公共団体にとって実際に活用しやすいものとなるよう工夫を重ねていくとともに、集約化に伴う都市構造の再編に関し、新たな課題に取り組んでいく必要があると考えている。

私見ではあるが、想定される取組として、

①　集約化の施策効果の測定を行うためには、都市レベル等で入手可能なデータの内から当該都市の特性等に見合った適切な評価指標を選定する必要があり、そのための都市の集約化の進捗度合いの評価手法

②　様々な行政サービスのサービス圏域や公共交通・徒歩などの移動手段を考慮しながら、財政の制約等の下でサービスを継続すべきエリア・撤退を考慮すべきエリアを即地的に検討する必要が生じてくるが、それらのエリア抽出の計画手法

③　沿岸都市等において都市の防災構造化の観点との整合性を図りながら都市の集約化を検討する際の計画手法

④　都市的土地利用を他用途に転換する際に農業振興と一体的な事業展開を行う場合の土地利用計画・事業手法

などが考えられるが、客観データを用いた技術的なアプローチの観点からテーマ設定やアウトプットのイメージ設定を行っていく必要があり、関係方面からの助言などをいただければ幸いである。

参考文献

1）木内望ほか、「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」、平成22年度国総研年報

2）高柳百合子ほか、「都市におけるエネルギー需要・供給者間の連携と温室効果ガス排出量取引に関する研究」、平成23年度国総研年報

3）鍵屋浩司、「地球温暖化及びヒートアイランド対策に寄与する屋上空間活用の最適化に関する研究」、平成22年度国総研年報

4）国総研プロジェクト研究報告　第20号、都市空間の熱環境評価・対策技術の開発、2008年1月

5）国総研資料　第583号、地球シミュレータを用いた東京23区全域における高解像度のヒートアイランド数値解析、2010年3月

6）今井晴彦ほか、「まちづくり政策実現ガイド」、2010年2月、ぎょうせい

7）牧瀬稔ほか、「人口減少時代における地域政策のヒント」、2009年10月、東京法令出版

8）OECD東京センターホームページ、「コンパクトシティ：将来の道」日本語概要「コンパクトシティ政策：世界5都市のケーススタディと国別比較」、2012年6月

9）柳沢厚ほか、「都市・農村の新しい土地利用戦略」、2003年5月、学芸出版社

建築分野における震災対応等の基準整備に関わる研究

建築研究部長

向井　昭義

建築分野における震災対応等の基準整備に関わる研究

建築研究部長　向井　昭義

１．はじめに

本資料は、構造、防火、環境等の建築分野において基準整備等のために建築研究部が取り組んでいる研究課題や建築基準整備促進事業における調査結果をもとに震災対応等の基準原案作成に取り組んでいる課題等について概説するものである。

２．建築研究部の使命

建築研究部では、国民や社会のニーズに応え、安全・安心で快適な生活環境を実現するため、建築基準法、住宅品確法（住宅の品質確保の促進等に関する法律)、省エネ法（エネルギーの使用の合理化に関する法律）等の技術基準において、構造、防火、そして環境・設備の各分野の企画・立案や策定・改訂に対して科学的・技術的な知見に基づき行政支援することを使命としている。

平成 24 年度研究基本方針（建築研究部）

http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/busyoukai/kenkyuhoushin2012/05kenchiku.pdf

３．当該分野の状況・動向について

（１）構造、防火、設備の各分野

構造、防火、設備の構造、防火、設備の各分野の状況・動向に関しては、建築基準法を中心とした動きを見ることでその動向を把握することができる。

平成 10 年 6 月に公布された改正建築基準法により、建築確認・検査の民間開放、建築基準の性能規定化等基準体系の見直し、中間検査の導入などが行われ、建築確認・検査の民間開放や中間検査の導入は平成 11 年 5 月に施行され､建築基準の性能規定化等基準体系の見直しは平成 12 年 6 月に施行された｡その後､構造計算プログラムの出力を偽装して建築確認・検査を受けるという構造計算書偽装事件、建材の防火性能大臣認定を不正に取得するという問題、昇降機や遊戯施設での人身事故など、建築基準法に係わる問題や事故が発生し､このような問題の再発防止対策の一環として､平成 18 年 6 月に公布された建築基準法や建築士法などの改正が行われ、建築確認・検査の厳格化などが行われた。またその後、制度の円滑な普及を目的とする各種施策が実施されている。

一方、構造計算書偽装事件とも関係し、住宅供給の信頼・安心確保のため住宅品確法で定められた瑕疵担保責任を確実に果たすために住宅瑕疵担保履行法（特定住宅瑕疵担保責任の履行の確保等に関する法律）が平成 19 年 5 月に公布され、平成 21 年 10 月以後に引き渡される新築住宅から保険加入又は供託が義務づけられている。

また、公共建築物木材利用促進法（公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律）が平成 22 年 5 月に公布、10 月に施行され、木材の耐火性等に関する研究により建築基準法における規制の緩和の可能性の検討が行われている。

（２）環境分野

他方、環境の分野の状況・動向に関しては、省エネ法を中心とした動きを見ることでその動向を把握することができる。

建築物の運用時エネルギーの削減に向けては、平成 20 年 4 月には住宅を対象とした省エネ改修促進税制が創設され、また、平成 21 年 4 月には省エネ基準の改訂強化により、省エネ計画書の提出対象の拡大や住宅を対象とした事業主基準が策定された。そして、今後も、事業主基準の適用拡大や集合住宅への展開、業務用建築物における省エネ計画書の内容の再検討、そして省エネ法の義務化など、建築物や住宅から排出される二酸化炭素の削減に向けた検討が継続的に行われる予定となっている。また、平成 22 年 3 月から運用がスタートした住宅エコポイントは、平成 23 年 11 月から復興支援・住宅エコポイントとして再スタートしている。

地球温暖化問題に関しては、京都議定書の第 1 約束期間（平成 20～24 年）への対応の他、平成 32 年までに温室効果ガスを 25%削減するという目標提案などもなされ、建築分野における二酸化炭素排出量の大幅削減の実現のため､種々の施策が実施されてきている。

一方で、建設時エネルギーの削減に向けストックの効率的な活用を目的とした、長期にわたり良好な状態で使用するための措置が講じられた優良な住宅の普及を促進するため長期優良住宅法（長期優良住宅の普及の促進に関する法律）が平成 20 年 12 月に公布され、平成 21 年 6 月から施行されている｡並行して既存住宅を長期に利用するためのリフォームを安心して実施できるようにするための保険制度の検討などが行われるとともに、平成 24 年 2 月からは持続可能社会における既存共同住宅ストックの再生に向けた勉強会が開始されている。

（３）東日本大震災関連

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）では、地震動による建築物等被害に加えて、地震直後に発生した津波により東北地方沿岸の広い地域で多くの建築物が流失などして、未曾有の人的被害がもたらされた。技術基準における早急な対応が必要な事項として、津波、長周期地震動、天井落下、液状化が掲げられ、それぞれ検討が行なわれている。これらの内、津波に関しては、東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針を国土交通本省と連携して策定し、これが平成 23 年 12 月に公布された津波防災地域づくり法に基づく指定避難施設の技術基準告示に位置づけられた。また、エスカレーターの脱落被害が判明し、技術基準に関して追加的な検討が始められた。省エネ関連では震災以降、世の中の節電意識が高まっている。

４．建築研究部が主体となって取り組んでいるプロジェクト研究

建築研究部が主体となって取り組んでいるプロジェクト研究の概要を以下に示す。

（１）低炭素・水素エネルギーシステム活用社会に向けた都市システム技術の開発（研究期間 H21～H24）

a)研究の背景と方針

わが国の二酸化炭素排出量のうち、業務および家庭部門からの排出は国全体の 31.0%（2006 年度）を占め、その増加率は他部門に比べ著しく 1990 年度比 35.3%に達している。エネルギーの化石燃料への過度の依存から脱却するための 1 つの方法として、水素と燃料電池技術を活用した都市エネルギーシステムの構築が考えられる。本研究では、課題となっている水素配管技術等のインフラ技術、業務建築等需要側の省エネルギー技術、都市エネルギーシステム評価技術の開発に取り組む。

b)研究目標

水素をエネルギー媒体に用い、化石燃料に過度に依存しない都市エネルギーシステムの構築に向けて、水素配管を安全に、かつ二酸化炭素排出量の最小化を実現するための建設技術を開発する。建築側での負荷削減、高効率設備機器の活用、再生エネルギー設備の活用と合わせて、都市の化石燃料依存度を評価する手法を開発する。

c)研究成果の活用

水素を活用するにあたり、爆発や金属脆性による配管強度低下といったデメリットへの対策として、検知・防爆・耐震安全対策技術や低コスト水素配管の活用が必要になる。それらの技術によって水素配管敷設にあたっての安全性確保とコストの評価を行えるようになる。

また、建築物等の需要側の省エネルギー技術開発を通じて、省エネルギー技術の直接的な普及促進と省エネ基準等の施策への反映が期待できる。さらに都市エネルギーシステム評価手法を開発することで、都市全体の省エネルギー性、環境負荷、コストを総合的に評価することを可能とし、低炭素・水素エネルギー活用社会における都市システムのあり方に関して定量的な根拠にもとづく提言を行うことができる。

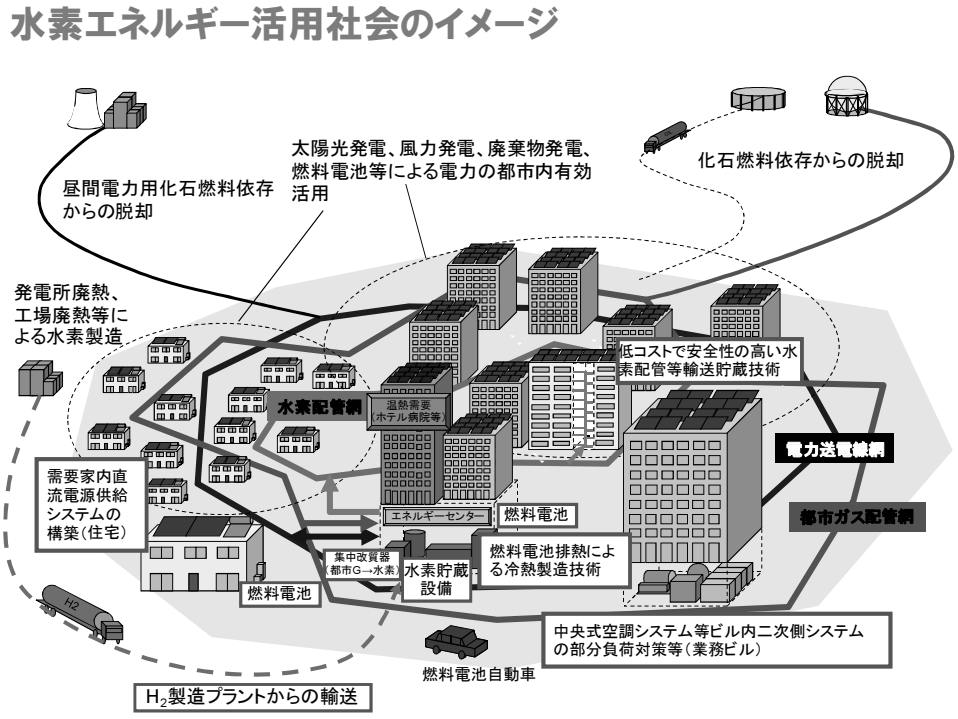


図 1　水素エネルギー活用社会のイメージ

（２）地震動情報の高度化に対応した建築物の耐震性能評価技術の開発（研究期間 H22～H24）

a)研究の背景と方針

近年の地震観測網の整備や地震学の進展に伴い、任意地点での地震動の特性が詳細に解明されつつある。観測または予測された地震動の中には、現在の耐震設計で想定している設計用地震力のレベルを上回るものもある。一方、建築物に作用する地震力は、地表面上の地震動がそのまま建築物に入力するとみなした場合より、かなり低減される場合のあることが知られている。建築物の耐震性能を適切に評価するには、地震動をより精度良く予測することに加え、このような「地震動」と「地震力」との関係を見極めることが重要である。

そのため、本研究では、民間、大学等の関係機関にも協力を呼びかけ、少しでも多くの建築物の地震観測記録を収集、分析して「地震動」と「地震力」との関係を明らかにし、地震動情報の高度化に対応したより合理的な建築物の耐震性能評価技術の開発に取り組む。

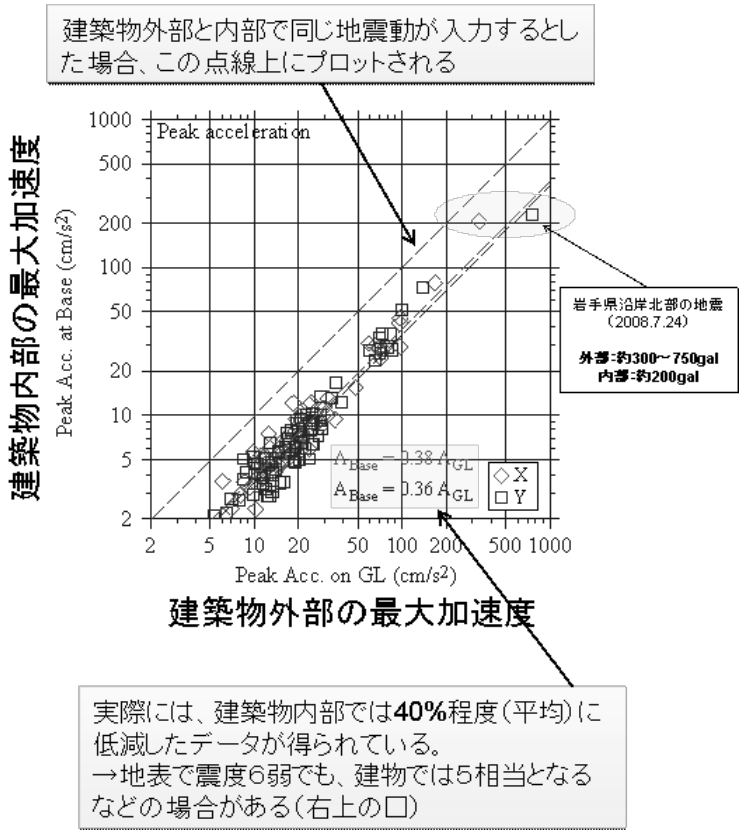


図２　建築物外部（地表面）と建築物内部（地下１階）で観測された地震動の比較例

b)研究目標

地表面の「地震動」と建築物に作用する「地震力」との関係を明らかにして、①建築物と地盤の特性の双方を考慮した地震力評価手法、②地震観測結果に基づく継続的な耐震設計技術の改良方法、③地震観測結果に基づく地盤を含めた効率的な耐震改修技術の開発を

行う。

c)研究成果の活用

地震学の最新の知見に基づき予測された「地震動」に対し、建築物の耐震性能をより高いレベルの工学的知見に基づき評価することが可能となる。これにより、巨大地震が予測された場合の建築物一般の耐震基準の点検や個々の建築物の耐震改修を不必要に安全率を高く設定することなく、合理的に行うことができるようになる。従来よりも、精確に建築物の耐震性能を評価できるようになるため、建築物に対する安全・安心の度合いが高まるといえる。

また、建築物の地震観測は、本研究終了後も実施されるべきものであり、本研究においてこのような地震観測結果に基づく「継続的な耐震設計技術の改良方法」を開発することで、将来の地震学の進展にも対応しつつ耐震設計の精度を常に向上させることを可能とする。

（3）再生可能エネルギーに着目した建築物の新技術導入に関する研究（研究期間 H23～H25）

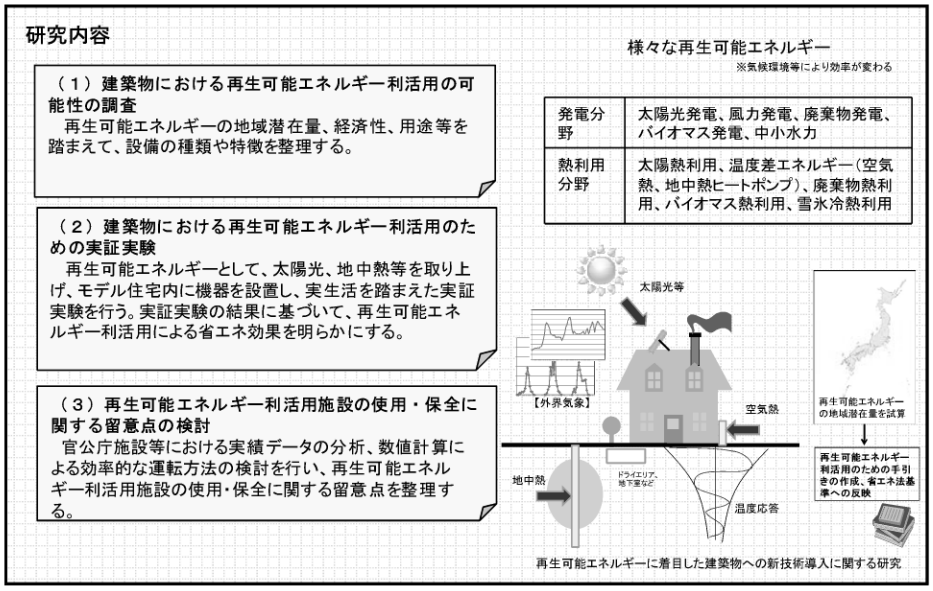


図３　再生可能エネルギーに着目した建築物の新技術導入に関する研究内容

a)研究の背景と方針

政府は、温室効果ガスの排出の量の削減に関する中長期的な目標として、2020 年までに CO2 を 1990 年度比 25%削減、一次エネルギー供給量に占める太陽光発電などの再生可能エネルギー供給量の割合 10%達成を目指している。

生活水準と共に建物のエネルギー消費は年々増加傾向にある。建物の熱的構造や機器効率化を一層進めると共に、これからは建物敷地内に存在する自然エネルギーを活用することも大事であり、再生可能エネルギーを取り入れた新たな基準の策定が必要とされている。

b)研究目標

基準等に太陽光や地中熱等の再生可能エネルギーを位置づける。また、官公庁施設などに導入して社会への普及を図る。

c)研究成果の活用

省エネ建物を普及させ、CO2　25%削減の達成を図る。

（4）木造３階建学校の火災安全性に関する研究（研究期間 H23～H27）

a)研究の背景と方針

木材は鉄やアルミニウム等に比べ、材料製造時の炭素放出量が少なく、地球温暖化防止に有効であるとともに、学校の室内の湿度変化を緩和させ、快適性を高めることができるなどのメリットがある。しかし、現行の建築基準法では３階建学校には高い耐火性を要求しており、木造で建設することは現状で困難となっている。これらの規制について、平成22 年の「公共建築物等における木材利用の促進に関する法律」施行や閣議決定で、木材の耐火性等に関する研究の成果を踏まえて必要な見直しを行うことが決定された。

木造３階建て学校の建設実現に向けて、火災安全上必要な性能とは何かを検討するとともに、その性能が満足される範囲で現行規制を緩和することが可能な条件を技術的見地から見いだすことが必要となる。

b)研究目標

木造３階建て学校の実大火災実験や関連する要素実験、シミュレーション等の調査検討を行い、避難が安全にできること、火災による周囲への熱・火の粉・倒壊などの影響が少ないこと、急速な倒壊などによる消防上の障害が少ないこと等の火災時の安全性が確保されるような技術基準の整備に資する検討を行うことを目標としている。

c)研究成果の活用

木造３階建て学校に要求される火災時の安全性能を明確にし、科学的根拠に基づく技術基準案を作成する。建築基準法へ反映されることで、木造３階建て学校が建設可能となれば、新たな経済効果、伝統技術者の育成、地場産業の活性化、学校室内の快適性の向上といった効果が見込まれる。

実大実験や要素実験の結果から、木質部位の仕様が持つ性能を確認し、これらのバリエーションを例示仕様として告示等へ追加することで､木材利用の普及･促進が期待される。

(a)　　(b)

写真１　平成 23 年度　予備実験

５．技術基準の見直し（技術原案の提示）を行う体制

建築研究部では、東日本大震災の被害を踏まえた対応や個別の研究開発に対応した課題設定を行い、技術原案の検討・提示を行っている。

東日本大震災に関連した主なものとしては、

a)津波避難ビルの構造上の要件に関する基準

b)天井脱落対策等に関する技術基準

c)長周期地震動への対応方策の検討

研究開発に関連したものとしては、

d)大規模木造建築に係る防火基準の見直し検討

などがある。

これらについては、国土技術政策総合研究所に学会等の有識者をメンバーとした建築構造基準委員会、建築防火基準委員会を設置・運営し、実務者等の意見を踏まえつつ技術基準の見直しを行う体制を整備している。

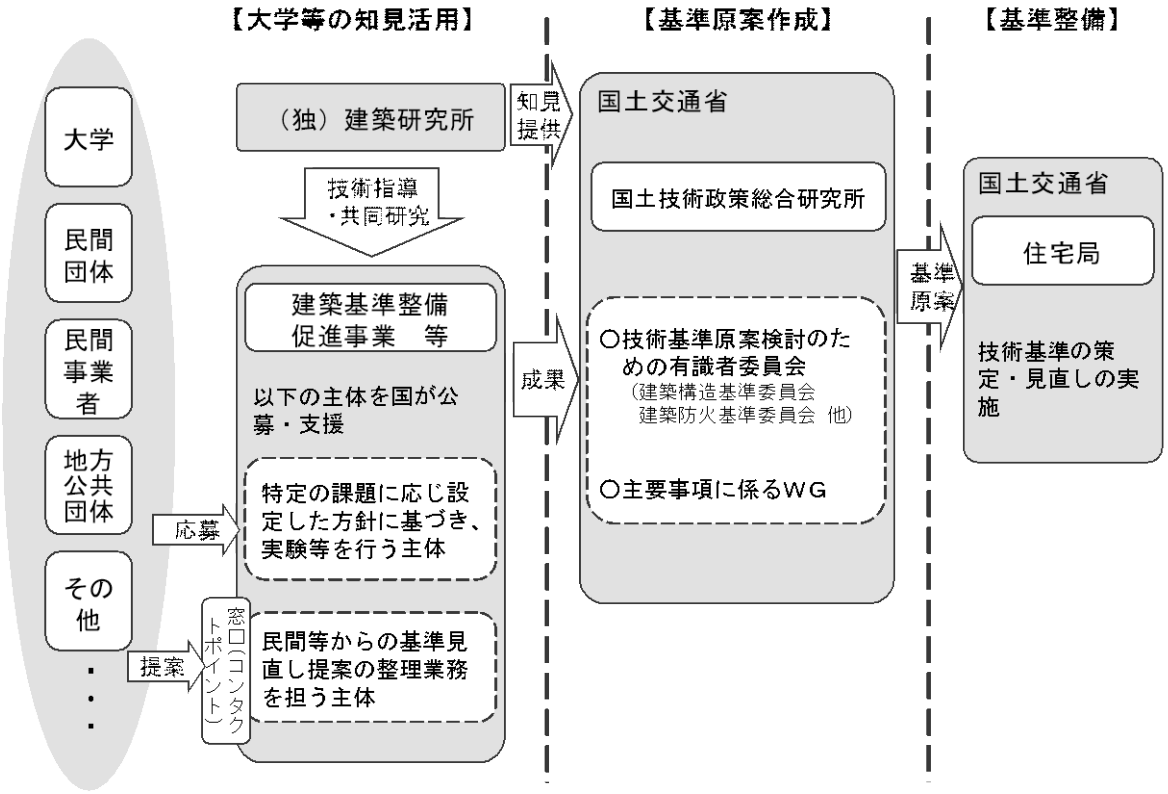


図４　建築関連技術基準の検討体制

特に東日本大震災関連では以下の検討を行っている。

建築構造基準委員会（委員長　久保哲夫　東京大学名誉教授）では平成 23 年 4 月 21 日及び 22 日に同委員会による現地調査を実施する等、東日本大震災における建築物被害を踏まえた対策の検討を開始した。

同委員会においては、以下のとおり対策について審議を重ねた。

第 1 回(平成 23 年 6 月 18 日)

・建築物の被害調査について

・津波による建築物被害を踏まえた対応について

・地震動による非構造部材の被害を踏まえた対応について

・長周期地震動対策について

第 2 回(平成 23 年 8 月 18 日)

・津波による建築物被害を踏まえた対応について

・地震動による非構造部材の被害を踏まえた対応について

第 3 回（平成 23 年 10 月 13 日）

・津波による建築物被害を踏まえた対応について

・長周期地震動への対応について

第 4 回（平成 24 年 7 月 9 日）

・東日本大震災への対応状況について

・天井脱落対策に係る技術基準原案について

・エスカレーター落下防止対策に係る技術基準原案について

・長周期地震動への対応について

第 5 回（平成 24 年 10 月 22 日）

・天井脱落対策に係る技術基準原案について

・エスカレーター落下防止対策に係る技術基準原案について

これらの審議を踏まえ、津波避難ビルに関する構造上の要件に関する指針の見直し（平成 23 年 11 月 17 日付け住宅局長通知)、津波防災地域づくり法に基づく指定避難施設の技術基準告示（平成 23 年 12 月 27 日国土交通省告示 1318 号等）に反映されるとともに、平成 24 年 7 月 31 日から 9 月 15 日まで天井脱落防止のための技術基準原案及びエスカレーター落下防止のための技術基準原案についてパブリックコメントを行った。

また、建築防火基準委員会（委員長　辻本誠　東京理科大学教授）では以下の通り審議を行っている。

第 1 回(平成 24 年 10 月 10 日)

・大規模木造建築物の実大実験について

６．天井脱落防止対策技術原案等

6.1 天井脱落対策技術原案

東日本大震災においては、広範囲に多数の建築物で天井脱落被害が生じている。

従来、建築基準法施行令において、地震動により脱落しないことは規定されていたが、具体の技術基準は規定されておらず、技術的助言において対策が示されていた。

これらの被害を踏まえ、平成 23 年度の建築基準整備促進事業（国が建築基準法等にお

ける技術基準を策定・改訂する上で必要な事項について、国の設定した課題に関し、実験等の基礎的なデータ・技術的知見の収集・蓄積等を行うものを公募して、その費用に対し補助を行う事業。平成 20 年度創設、平成 24 年度は 27 課題について調査実施）を活用して検討を進めることとし、調査課題として「41.地震被害を踏まえた非構造部材の基準の整備に資する検討」を設定し、公募により選定された一般社団法人建築性能基準推進協会において委員会が設置され、被害分析等が進められた。

この成果を踏まえ、国土技術政策総合研究所において、天井脱落基準対策検討 STG を建築構造基準委員会技術基準原案作成 TG に設置し、技術基準原案の作成作業を行った。

技術基準原案については、第４回建築構造基準委員会の審議を踏まえ、住宅局及び国土技術政策総合研究所により「建築物における天井脱落対策試案」としてとりまとめ、平成 24 年 7 月 31 日から 9 月 15 日までに意見募集（パブリックコメント）を行った。

この技術基準原案の概要は、以下のとおりである。

・天井の脱落対策の適用範囲として、６ｍ以上の高さにある面積 200 ㎡以上の吊り天井を対象とする。応答倍率がごく小さい天井（直天井等）は対象としない。

・天井の脱落対策の適用方法として、耐震性等を考慮した天井の仕様を定める方法（仕様ルート）、天井の耐震性等を計算で検証する方法（計算ルート）、その他高度な計算などの特別な手段によって天井の耐震性等を検証する方法（特殊検証ルート）を設定している。

(1)仕様ルート

仕様１として、天井単位面積質量 2kg/m^2 以下の天井、2kg/m^2 超～6kg/m^2 以下の天井、6kg/m^2 超～20kg/m^2 以下の天井それぞれについて、その天井質量に応じた天井の仕様を設定した。具体的な項目としては、吊りボルトの本数・配置方法、吊り長さ、天井を構成する天井材相互の緊結、吊り金具等の緊結、水平補剛材の配置、斜め部材の数・配置方法、斜め部材の接合部及び斜め部材周囲の部材相互の緊結、天井面と周辺部位等の間のクリアランス、エキスパンションジョイント部分の措置、天井面に段差を生じる部分や折れ曲がる部分の措置等である。

これらの仕様のほか、仕様２として、落下する天井材を保持するように天井面より下の位置にネットを設置する措置、部材をロープ等で吊り天井面が外れても下まで落ちないような措置（フェールセーフ）も示した。

(2)計算ルート

一続きの天井が一質点系にモデル化できる天井（水平で面内剛性があるもの等）について、耐震性等を計算で検証する方法を設定している。

①常時荷重に対する安全性の検証

固定荷重（及び積載荷重の和）によって、吊り天井の各部に生ずる力を計算し、当該力の 3 倍の力に対して構成部材及び接合部が損傷（部材相互の間のずれやすべりを含む）しないことを確かめる。

②地震動に対する耐震性の検証

スペクトル法、簡易スペクトル法、震度法のいずれかの方法により、天井面に生ずる加速度または震度を求め、これによる慣性力によって天井を構成する部材及び接合部が損傷

しないことを確かめる。

③クリアランスの検証

天井面に生ずる水平変位を算定し、周囲の壁、天井相互又は設備（天井と一体として挙動するものを除く）等との間に衝突が生じないことを確かめる。

(3)特殊検証ルート

時刻歴応答解析等高度な計算などの特別な手段によって天井の耐震性等を検証する方法を設定している。

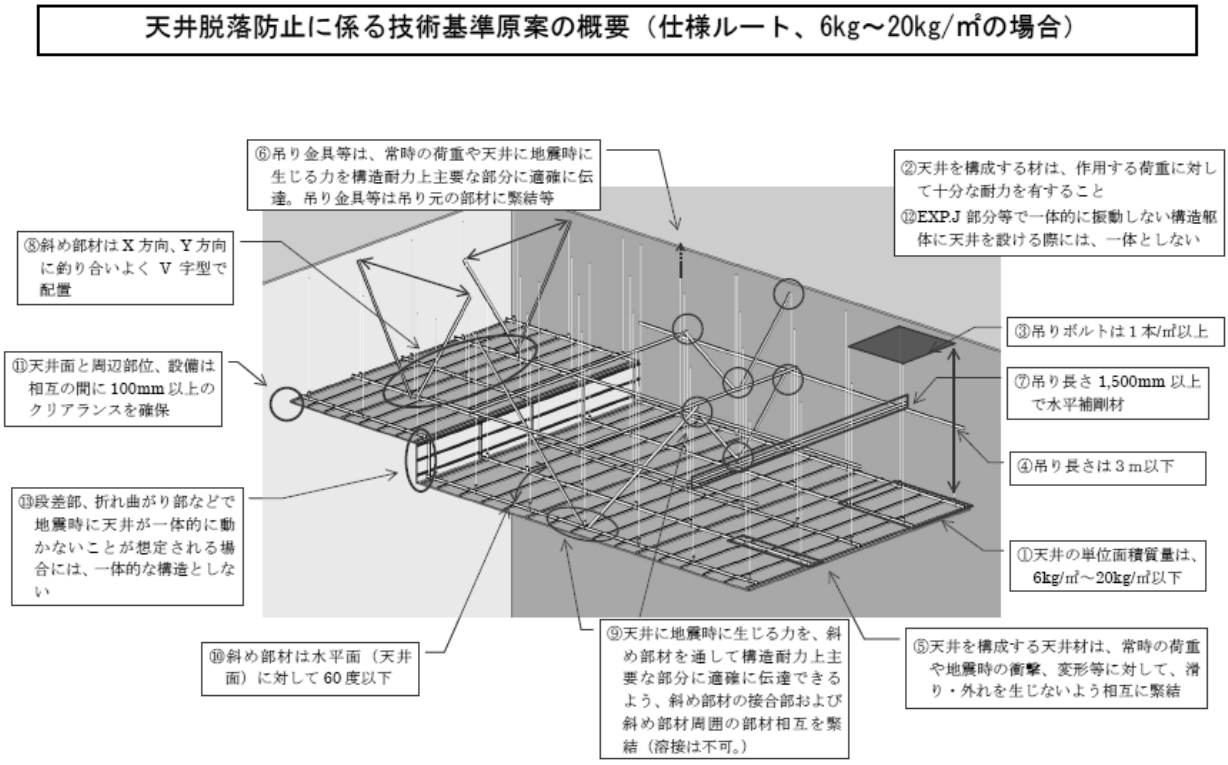


図５　天井脱落対策試案の概要（仕様ルートの例）

6.2 エスカレーター落下防止対策試案

東日本大震災及びその余震において、ショッピングセンターに設定されていたエスカレーターが落下するという被害が複数発生した。

エスカレーターの設置については、建築基準法令では構造躯体への「かかり代」については、具体の規定はなかったが、業界の指針において層間変位 1/100＋20㎜ の「かかり代」を設けることとされてきた。

これらの被害を踏まえ、平成 23 年度の建築基準整備促進事業を活用して被害分析と技術的な要件に係るデータの整理を進めることとして、調査課題として「45.昇降機に係る地震安全対策に関する検討」を設定し、公募により選定された一般社団法人建築性能基準推進協会において、構造分野の有識者、昇降機分野の有識者による委員会が設置され、被害分析と落下防止のための技術的知見の収集整理等が進められた。

これらの成果、および第４回建築構造基準委員会の審議を踏まえ、住宅局及び国土技術政策総合研究所により「エスカレーターの落下防止対策試案」として技術基準案をとりまとめ、平成 24 年 7 月 31 日から 9 月 15 日までに意見募集(パブリックコメント)を行った。

この落下防止対策技術原案の概要は、以下のとおりである。

大規模地震時におけるエスカレーター落下防止として以下の構造方法を設定した。

①十分な「かかり代」を設ける構造方法

「かかり代」は昇降高さ（揚程）の 1/40 以上を原則とし、中規模地震時の層間変形角が 1/200 を超える場合は割増し補正する。ただし、構造計算によって確かめた層間変形を用いる場合は、1/100 を下限として緩和できる。

②ワイヤロープ等による落下防止措置を講じる構造方法

昇降高さ（揚程）の 1/100 以上の「かかり代」を設けた上で、ワイヤロープ等による落下防止措置（バックアップ措置）を講ずる。

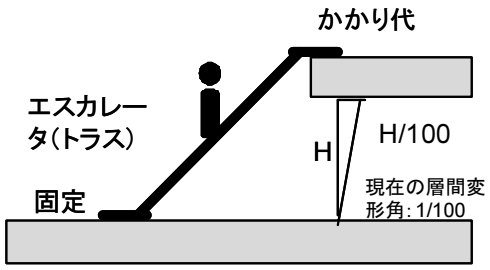


図６　エスカレーターの「かかり代」

７．竜巻による建築物被害

平成 24 年 5 月 6 日、茨城県つくば市の北条地区、大砂地区及び筑波北部工業団地を中心に竜巻による建築物の被害が発生した。国土技術政策総合研究所と建築研究所では、つくば市内での建築物の被害発生直後より、被害の概要を把握するための現地調査を実施した。その結果を速報としてまとめている。

国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人建築研究所：「平成 24 年 5 月 6 日に茨城県つくば市で発生した竜巻による建築物被害（速報)」（平成 24 年 5 月 8 日）

(http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h24tsukuba/h24tsukuba.pdf)

木造建築物の主な被害は、基礎を伴う上部構造の転倒、上部構造の倒壊、上部構造の飛散、上部構造の水平移動、小屋組の破壊・飛散、開口部の損壊、屋根ふき材と外壁材の脱落・飛散等であった。鉄骨造建築物の主な被害は、小屋組の破壊・飛散と外装材の損傷、構造骨組の残留変形、車庫の転倒であった。鉄筋コンクリート造建築物の主な被害は、開口部・建具の損壊である。

また、竜巻通過時に発生する多数の飛来物による外装仕上げ材や開口部の被害も多数確認された。

写真２　転倒した木造住宅の基礎底面

写真３　開口部等が損壊した集合住宅

基礎を伴う上部構造の転倒が生じた木造住宅について、水平方向の旋回流や急激な気圧低下によって生じる力、建築物の転倒メカニズム、建築物重量等のいくつかの計算上の仮定に基づき、建築物の基礎の風上端が浮き上がり始める風速を推定した。その結果を下記の報告としてまとめている。

国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人建築研究所：「転倒した木造建築物に作用した風速の推定について」（平成 24 年 6 月 19 日）

(http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h24tsukuba/wind.pdf)

今後は、竜巻の非定常な風荷重の評価とともに飛来物に対する外装材の評価手法の検討の必要性も考えられる。そしてそれらを竜巻等の突風による災害後も機能の維持が必要な建築物等に利用することが考えられる。

強くしなやかな国土を支える

道路ネットワーク形成に向けた研究最前線

道路研究部長

森　　望

強くしなやかな国土を支える道路ネットワーク形成に向けた研究最前線

道路研究部長　森　望

はじめに

道路は，国民生活や経済活動を支える最も基盤的な社会資本であり、2011 年東北地方太平洋沖地震をはじめとする大規模な災害時には、救援や復旧・復興活動を支えるインフラとしても非常に重要な役割を担うことが再認識されたところである。

しかしながら、我が国の実状としては、建設後年数を経た橋梁等の道路構造物が増加し、その維持管理を適切に進めることが喫緊の課題となり、その一方で、道路ネットワークの整備状況は、首都圏の環状道路や地方部の高規格幹線道路など、決して十分とは言えず、早期整備が必要な状況である。

本稿では、今後の道路構造物の維持管理や道路ネットワークの課題分析等に関して、国土技術政策総合研究所（以下、「国総研」）において取り組んでいる研究について、紹介する。

1. 道路構造物の維持管理

2011 年東日本大震災を契機として、今後、発生が懸念される東海、南海、東南海地震などの巨大地震による被害想定の見直しなど、震災に対する社会資本の在り方についての議論が行われているところである。特に、太平洋沿岸部で甚大な津波被害を受けた今回の震災では、東北道や一般国道 4 号といった東北地方の南北を縦貫する幹線道路から沿岸主要都市へのアクセスルートが早期に確保できたことが、地震後の復旧・復興に大きく貢献したように、道路ネットワークを構成する道路の、橋梁、トンネル、土工、舗装は、それぞれ単体ではなく、路線として一体となり道路としての機能を発揮させなければならない。更には、限られた予算と人員の制約の中で、道路ネットワークとして必要な水準を維持していくためには、道路ネットワークとしての予防保全的な維持管理が求められる。

1.1　道路構造物のおかれている現状

国が管理する直轄国道の道路橋においては、橋梁定期点検要領（案）（平成 16 年 3 月、国道・防災課）に基づき、供用後 2 年以内の初回点検、その後は 5 年間隔で実施されている。一方で、地方公共団体管理の道路においては、定期点検の必要性を認識しつつも、予算や人員の制約から、点検が行われていないケースもある。また、トンネル、土工については、点検により、対策の必要性の観点からの評価が行われているものの、道路橋のように、客観的なデータとしての損傷状況に関する記録の蓄積は行われてきていない。したがって、トンネル、土工については、今後、点検で取得すべきデータとその評価方法について提案できるように、過去の点検記録等を用いた分析を実施しているところである。ここでは、主に、道路橋に関する資産の現状と点検データの分析の事例、道路ネットワークとしての状態評価の試みについて述べる。

1.2　道路橋資産の現状

現在、我が国では、約 65 万橋の道路橋資産を保有している[1)]。そのうち、橋長 15m 以上の橋梁（約 16 万橋）では、建設後 40 年以上のものが約 30%、建設後 30 年以上のものが約 50%と、急速に高齢化が進んでいる（図 1-1）。また、それに伴い、経年劣化による損傷が増加している。この中には、鋼トラス橋斜材の破断や鋼主桁の重大な疲労亀裂、プレストレストコンクリート橋の緊張材の腐食による破断など、深刻な損傷も発生している[2)]。図 1-2 は全国の地方整備局で行われた直轄道路橋の定期点検[3)]結果を整理したものである。図 1-2(a)に、対策区分の判定結果別橋梁数の比率を示す。全国の直轄道路橋の約 40%が、C（速やかに補修を行う必要がある。）と判定されており、少なくとも次回の点検（5 年間隔）までには補修等を行う必要があると判断されている。また、図 1-2(b)は、架設年代（橋年齢区分）毎の橋の状態を整理したものである。個々の橋梁が置かれている条件は様々であるものの、全体的な傾向としては、経年に従ってより深刻な状態のものが多くなっている。なお、供用開始から 40 年以上経過したものでは、状態区分の内訳がほぼ同じとなっており，平均的な劣化の状況に大きな差がない結果となっている。これは、供用開始から 40 年以上経過した橋では、塗装の更新など、様々な補修補強が行われているものが含まれている可能性が考えられ、適切な時期に適切な対策を行うことの重要性を示唆しているものと考えられる。

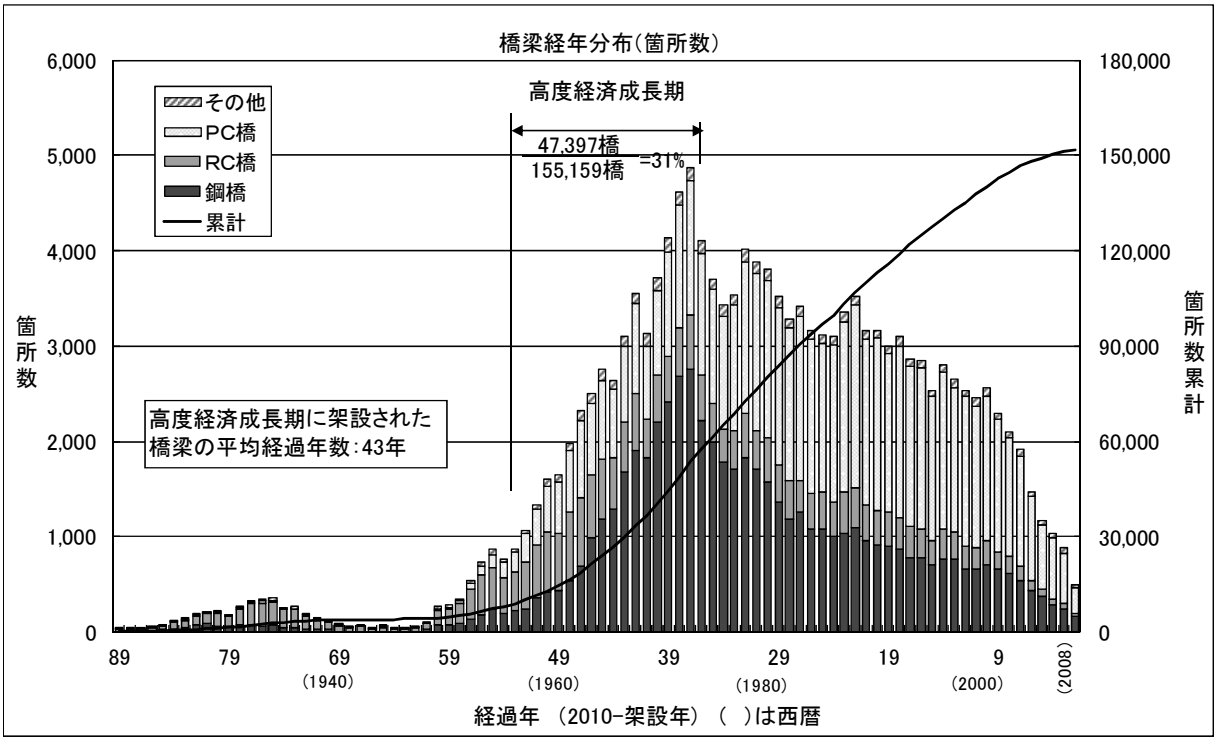
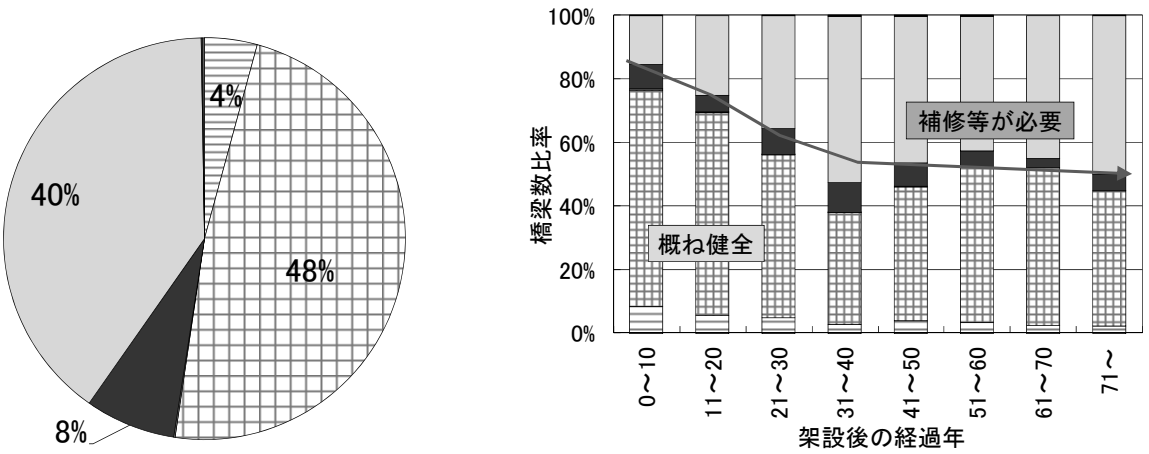


図 1-1　橋梁数の経年変化（橋長 15m 以上のもの）（国総研資料第 645 号より）



(a)対策区分別橋梁数比率　　(b)判定区分の経年変化

【凡例】

対策判定区分		判定の内容
E1		橋梁構造の安全性の観点から、緊急対応の必要がある。
E2		その他、緊急対応の必要がある。
C		速やかに補修等を行う必要がある。
S		詳細調査の必要がある。
M		維持工事で対応する必要がある。
B		状況に応じて補修を行う必要がある。
A		補修を行う必要がない。

図 1-2　直轄道路橋の定期点検結果（国総研資料第 645 号より）

以上のように、様々な環境で長期に供用される道路橋では、建設から年数を経るに従って様々な劣化や損傷等が生じるものであり、設計上の目標や仮定にかかわらず、供用し続ける限り、点検などによる状態の適切な把握と劣化や損傷に対する補修・補強などの維持管理を実施していくことが必要である。したがって、現在の厳しい財政状況下、予防保全などの取組みにより管理費を抑制しつつ、これらの膨大な道路資産を長期にわたり良好な状態に維持していくことは社会的にも重要な課題となっている。

1.3　点検データの分析による道路橋の現状の把握

橋梁点検の体系は、異常の早期発見・早期対処のための日常パトロール、定期的に橋の各部に近接して損傷の有無や機能状態を目視で詳細に把握する定期点検、一般的な目視点検だけでは損傷把握が不十分な塩害等の事象に対する特定点検、地震や台風で被災の恐れがある場合の異常時点検等から構成されている。同じ橋に対して、これら異なる複数の点検が補完し合い実施されることで、橋の最新情報が的確に把握できる。なお、これらは、各管理者の判断と責任でもって選択、実施されているのが実情であり、点検水準が全国で必ずしも統一されていないという課題がある。

一方で、どの点検も目視による点検を基本としており、地中部、水中部、部材内部の状況は、間接的にでも表面に何らかの症状が現れない限り捕捉できない。また、日常パトロールも含め点検は間欠的であり、突発的な異常を直ちに知るには限界がある。このような

課題が浮き彫りとなった近年の事例として、主桁に発生した大規模な疲労き裂を定期点検時に初めて発見した例、コンクリートに埋め込まれたトラス橋の斜材がコンクリート内部で腐食して突然破断した例、鋼製のパイルベント橋脚が水中部で大きく断面欠損していることを点検以外の調査で偶然発見した例[2)]などが挙げられる。平成 24 年に改定された道路橋示方書[4)]では、こうした、点検や補修補強などの維持管理が困難な構造を避けるように、設計段階から配慮すべきである旨の規定が盛り込まれ、今後、整備される道路橋については、維持管理の確実性及び容易さが十分に考慮された構造が採用されていくことが求められている。

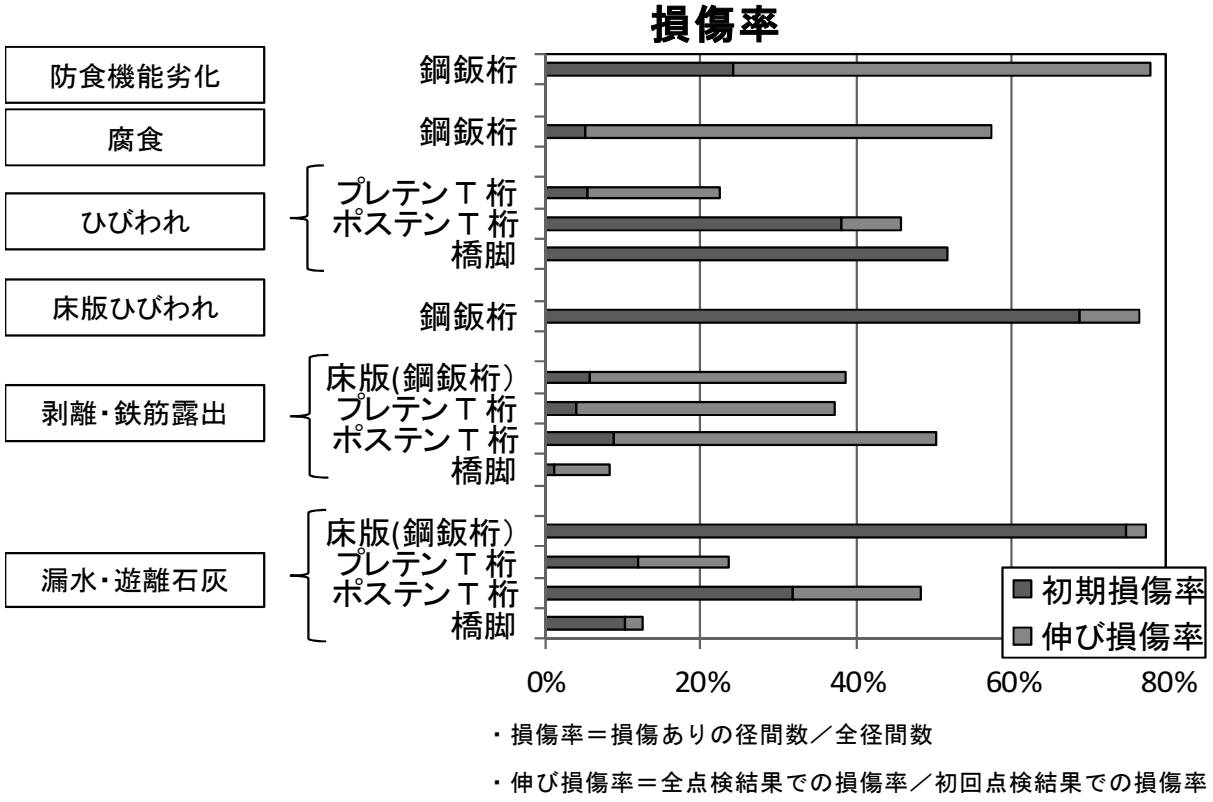


図 1-3　初回点検結果および全点検結果での損傷発生状況

図 1-3 は、初期品質が劣化進行に与える影響を分析するために、平成 16 年橋梁定期点検要領（案）に基づき点検された、直轄 8 地整にて管理する道路橋における全点検結果と、そのうち、供用後 2 年以内に行われる初回点検結果のそれぞれに対する損傷種類別の損傷率を、主な損傷の主な部位について積算棒グラフとして示したものである。損傷の特徴は、大きく 3 タイプに区分された。初期損傷率が小さく、その後の経年により損傷率が増加するものとして、腐食、剥離・鉄筋露出、初期損傷率がやや高く、その後の経年により損傷率が増加するものとして、防食機能の劣化、初期損傷率は高いものの、その後の経年による増加は少ないものとして、ひびわれ、漏水・遊離石灰、床版ひびわれである。第 3 番目のタイプの損傷は、初期損傷の発生を抑制すれば、又は初期損傷に早期に対処すれば、予防保全に有効に寄与する可能性があることを示唆していると考えられる。引き続き、デー

タが増えつつある 2 巡目 3 巡目の点検結果を用いて、初期損傷の有無による損傷進行の違いに着目し、分析を進めているところである。

1.4　管理者の違いによる損傷傾向の分析

地方公共団体の管理する橋においては、定期点検の必要性を認識しつつも予算や人員の制約から定期的な点検が実施されていないケースもある。そこで、直轄道路橋の点検体系が地方公共団体の点検導入の際の参考となるか把握するため、地方公共団体が管理する道路橋の主な損傷の発生状況について、同地域にある直轄事務所管理の道路橋と比較した（図 1-4）。

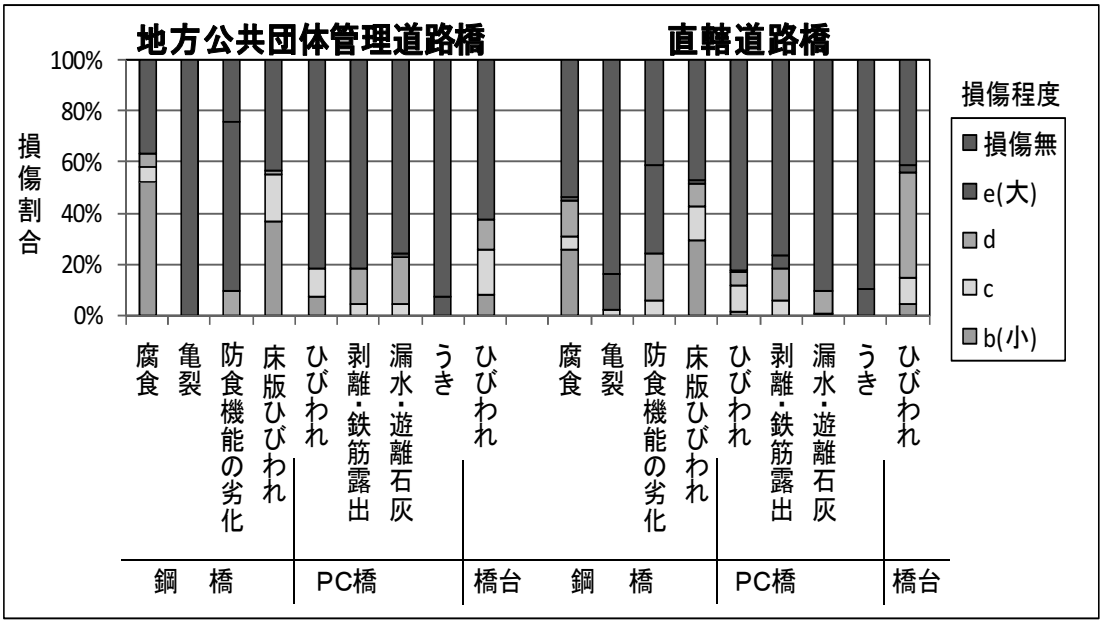


図 1-4　直轄道路橋と地公体管理道路橋の損傷状況

地方公共団体では、直轄と比較し、点検レベル（近接程度）の違いはあるものの、地方公共団体では鋼橋の亀裂が見られていない。また、その他の損傷の傾向は直轄道路橋と大きな違いは見られない。鋼橋の亀裂については、大型車交通量の影響が考えられるものの、それ以外は管理者による損傷発生傾向の違いは顕著ではないと考えられる。以上から、直轄の点検要領や本分析結果などは、地方公共団体での管理においても参考となる重要な情報になるものと考えている。

1.5　道路橋における将来予測によるアセットマネジメント

致命的な事態を防ぐには、橋の最新情報を把握して深刻な状態を見逃さず確実に是正していくことが不可欠である。しかし、時間とともに進行する劣化や損傷には、深刻化する前に措置すれば安価で確実に耐久性が向上できるものも多くあることが分かってきている。そのため、単に最新の状態を知るだけではなく、様々なデータを駆使して将来を予測し、適切なタイミングで対策を行う予防保全に向けた取り組みが始まっている。代表的な例は、

橋梁マネジメントシステム（BMS）と呼ばれ、橋の損傷の進行を理論や経験を取り込んだ統計処理やコンピュータシュミレーションによって予測し、更に補修時期や工法を変えて維持管理シナリオに対応したライフサイクルコストの試算などを行うものである。橋梁管理と BMS の関係を図 1-5 に示す。直轄道路橋でも、コンクリートの塩害、RC 床版の疲労、鋼部材の腐食などの劣化予測が行える BMS を作成して検証を進めている[5)]。

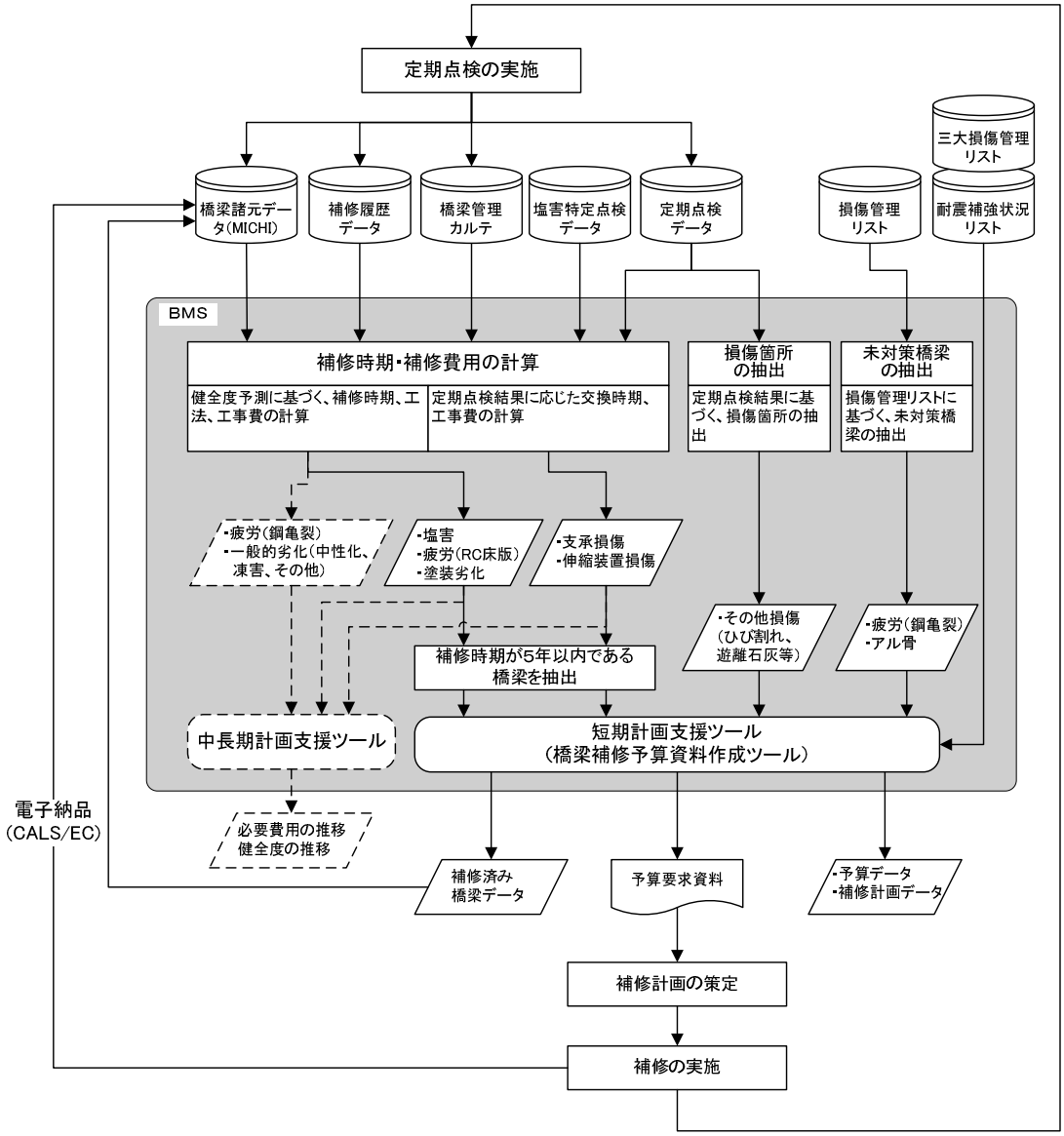
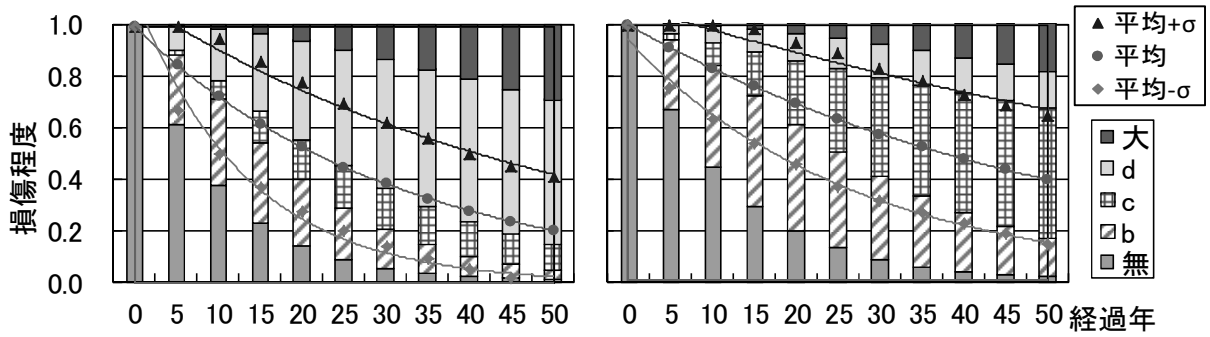


図 1-5　橋梁管理の流れと BMS の関係

しかし、ここで重要なことは、橋は極めて複雑な構造体であり、かつ、架橋環境や利用実態によっても劣化進展の状態は千差万別であるため、予測と現実の間には大きな乖離が避けられないことである。劣化予測の一例を図 1-6 に示す。



（a）桁端部　　（b）桁中間部

図 1-6　鋼板桁橋の主桁腐食（A、B 塗装系）の劣化曲線

この図は、全国の直轄道路橋を対象に、一般塗装系の塗装を施した鋼主桁の腐食の進行を、桁端部と桁中間部に区分し、同一橋梁の同一箇所に対して異なる時期に行われた 2 回の定期点検結果から、マルコフ遷移として求めたものである。同図には、損傷程度「無」～「大」を 1.0～0.0 の数値に置き換えた上で求めた各年の平均とその近似曲線を、標準偏差を含めて示している。部位により腐食の進行に差があることが読み取れる。

一方、標準偏差を考慮した劣化曲線からは、劣化曲線の信頼性は高くないことが分かる。腐食の進行は、架橋環境（沿岸部かどうか、凍結防止剤散布の有無など）でも異なるし、同じ橋でも部位毎に異なる [6] など、損傷はローカルな条件に大きく影響される。つまり、統計から求めた劣化予測には圧倒的に大きなバラツキがあるのが実態であるということが明らかとなってきた。このバラツキの程度も考慮した将来の資産価値の推計を行うために、信頼性を考慮した劣化予測手法の開発を進めているところである。

しかしながら、将来予測に基づいて予防的な措置を行ったり、補修補強時期の最適化、予算の重点配分などの予算戦略を模索したりすることは、道路資産全体のライフサイクルコストの最小化に資する合理的な維持管理手法であるものの、将来予測の信頼性には解消困難な大きな限界があり、それらに過度に依存しない現実的で信頼性の高い維持管理体系の構築が不可欠であると考えている。

1.6　道路ネットワークとしての維持管理

道路ネットワークは、構造面から見た場合、橋梁、トンネル、土工、舗装の道路構造物群から成り立っている。近年、新設構造物では特定の機能における性能に着目した基準に基づく整備が進められつつあり、既設構造物に対しても機能の性能状態に着目して合理的に管理しようとする検討が進められている。道路構造物も将来的には、各構造物の個々の性能のみならず、道路ネットワークとの関わりの中でその性能を評価して、全体として調和のとれた合理的な整備や管理を行うことが必要である。

例えば、地震発生時にこれらのどれかが被災すれば、ある区間は通行規制を余儀なくされる。道路構造物の種類に応じて復旧期間に差はあるものの、路線として一定の管理水準を確保するためには、道路構造物を群として捉えた同一観点からの評価を行い、選択と集

中でもって脆弱部に対処することが、今後重要となる。現状では、道路構造物の状態について、道路利用者や一般国民に理解しやすく示されているとは言えず、点検、補修・補強等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。このため、国総研では、点検データを用いて、道路構造物の種類を問わず共通の指標で現有性能を評価する手法の開発を進めている。現有性能は、道路の通行機能と道路構造物の機能について表 1-1 に示す整理を行い、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 性能各々の総合評価指標を設定している。

表 1-1 道路の通行機能と道路構造物の機能、性能との関係

<table>
<tr><th>道路法</th><th>通行機能</th><th>道路構造物の機能</th><th colspan="2">道路構造物の性能</th></tr>
<tr><td rowspan="2">通常の衝撃に対して安全</td><td>安全性</td><td rowspan="2">路面の確実な支持</td><td>耐荷性</td><td>重量車両の通行に対する信頼性</td></tr>
<tr><td>信頼性</td><td>災害抵抗性</td><td>災害時に所要の機能・性能が発揮されることの信頼性</td></tr>
<tr><td rowspan="2">安全かつ円滑な交通の確保</td><td>円滑性</td><td>路面の平坦性の維持</td><td rowspan="2">走行安全性</td><td rowspan="2">平常時の安全・快適な車両走行に対する信頼性</td></tr>
<tr><td>快適性</td><td>走行空間の確保</td></tr>
</table>

指標は、構造物に損傷がない状態で発揮されるはずの性能が損傷等によって損なわれている程度のみに着目することとしている。これは、現在一般に供されている道路構造物の基本的な性能には極端に大きな差異がないと考えられることと、地震対策が未実施等の別途に既存不適格性を個別に評価し得る要因は、損傷状態とは別に明確に特定できることから、損傷状態による評価とは別に把握しており、両者を適宜組み合わせて活用することが適当であると考えるためである。今後、既設構造物が建設当時に適用された基準や設計・施工技術との関係において実際に具備している性能水準を明らかにして、現況評価に反映させる手法を確立していく予定である。

橋梁、土工、トンネル、舗装について、3 性能の低下誘因、性能が低下する素因を表 1-2 に示す。表の下段には、性能が低下する素因に対して、現状の一般的な点検における把握状況を合わせて示している。未把握の素因は性能面からの状態把握のために不可欠であり、現在の点検等で把握できていない事象が抽出されたものと考えることができる。

これらの指標の算出は、構造物の種類を問わず、その性能に関連する部材の点検結果に基づく損傷程度と、性能への影響に応じた重み係数で計算される。算出結果は、数値そのものではなく、「補修等の必要性のない程度の健全状態」（60 点以上）、「早期に補修する必要性が高いと考えられる状態」（30 点以上 60 点未満）、「所要の性能を満足していない可能性が高い状態」（30 点未満）の 3 区分で評価することとした。これは、限られた点検データから機械的に個々の構造物の状態を定量化することの限界を考慮し、一方で指標化の目的と想定する活用方法を検討した結果である。

表 1-2　道路構造物の性能低下素因と把握状況

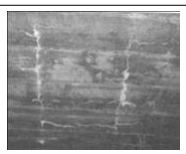
性能		耐荷性	災害抵抗性		走行安全性	
性能低下誘因		重交通荷重	地震	豪雨	（突発性事故）	（路面状態）
性能が低下する素因	橋梁	・主桁 ・床版の疲労損傷や材料劣化	・下部工の傾斜 ・支承の損傷 ・落下防止構造の損傷	・洗掘	・床版の疲労損傷や材料劣化	・段差（伸縮装置）の状況
	土工 （盛土・切土）	－	・対策工の損傷 ・のり面の変状 ・路掛坂無	・対策工の損傷 ・のり面の変状	・対策工の損傷 ・のり面の変状 ・浮き石 ・表土の浸食	－
	トンネル	－	・覆工のひびわれや材料劣化 ・背面空洞 ・抗口の変状	－	・覆工のひびわれや材料劣化 ・異常土圧	－
	舗装	－	－	－	・路面下の空洞	・摩耗、流動

：定性的把握
：未把握
：定量的把握

走行安全性の観点で総合評価指標した事例を表 1-3 に示す。例えば、総合評価指標が 30 点未満に判定されたものは、橋梁の床版の抜け落ち、トンネル坑門からのコンクリート片の落下及び斜面の表層土の崩壊の危険性の高い状態で、いずれも通常走行に対して潜在的危険性が構造物の種類に拘わらず同じ程度であることを表現している。

道路構造物毎の総合評価指標等に基づき、道路ネットワークの性能マップの例を図 1-7 に示す。各道路構造物で、機能ごと（耐荷性、災害抵抗性、走行安全性）に評価が異なること、機能ごとにどの路線の性能が劣っているかなどについて、視覚的にとらえることが可能となっている。この図は、道路をネットワークとして評価して対策の優先度を決定するなどの全体最適管理に用いることができると考えている。

表 1-3　走行安全性の総合評価指標の例

	橋梁	トンネル	土工
30点未満	 床版抜け落ち	 坑口上部コンクリートの「うき」	 表層土のずり落ち
60点未満	 床版の遊離石灰を伴うひびわれ	 覆工側壁部の「うき」	 壁面より水のしみ出し

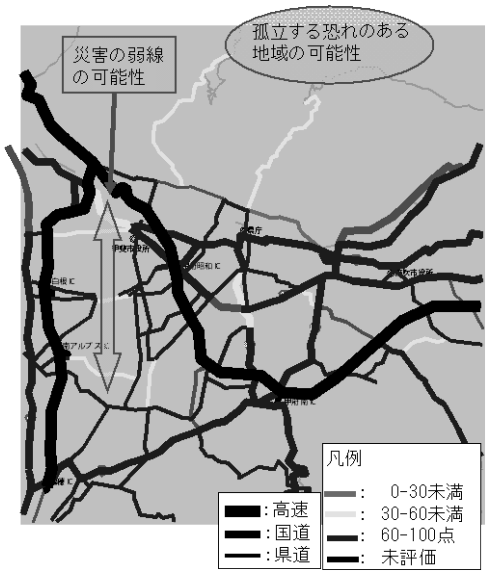


図 1-7　ネットワークの性能マップ（イメージ）

平成 23 年 3 月の東日本大震災では､津波による道路構造物の被災は甚大であった一方、地震動による被災は、橋梁及びトンネルにおいては顕著でない中、土工構造物においては法面・盛土を始めとして少なからず被災した。この被災の程度と性能指標とを対比し、適

合性を検証した。東日本大震災における土工構造物の被災程度と性能指標の関係を、表 1-4 に示す。なお、被災の程度は、被災図や写真から読み取った定性的評価である。被災無しで 30 点未満が多いのは安全側の設定からは許容されると考えられる一方、被災大で 60 点以上は数は少ないものの不整合である。被災大の内容は、舗装のクラックや盛土肩部の変状等の指標算出に考慮していないものに加え、切土表層部の流出など指標算出項目も含まれているなど、今度の課題が抽出された。

表 1-4　土工構造物の性能指標と被災の程度との相関

①法面　（箇所）

性能指標	被災の程度		
	無	小	大
60点以上	10	2	6
30～60点	21	4	4
30点未満	58	15	10

②盛土　（箇所）

性能指標	被災の程度		
	無	小	大
60点以上	6	1	5
30～60点	2	2	1
30点未満	20	7	2

1.7　大規模災害に向けた取組み

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災では、巨大津波の発生により社会資本が甚大な被害を受けた。道路橋においても、沿岸部や河川部の道路橋の上部工や橋台背面土が津波により流出するなど、過去にあまり例のない被害が多数確認された [7)]。また、橋本体には、大きな損傷が生じていないものの、橋台背面土の沈下により段差が発生し、供用性に影響を与えた事例も見られた。

東北地方太平洋沖地震の地震発生直後から、道路部門においては、（独）土木研究所構造物メンテナンスセンターと連携し、国土交通省の緊急災害対策派遣隊（TEC-FORCE）として現地での技術指導にあたるとともに、自主調査チームを編成し、現地での被災状況について調査を実施している。

地震動による被害については、兵庫県南部地震以降に改定された道路橋示方書により設計された橋梁やこれに準じて耐震補強が行われた橋梁では、落橋が危惧されるような致命的な被害は確認されていない。一方で、耐震補強が施されていない橋梁には、これまでの大規模な地震においてもみられた損傷が確認された。写真 1-1 は、架橋位置が約 400m 離れた近接する 2 橋について、耐震補強の有無による被災状況を対比したものである。地盤条件も大きく変わらず、同方向に架橋されていることから、ほぼ同程度の地震動の影響を受けたものと推察される。耐震補強が完了していた橋では、特に被害が認められないものの、耐震補強されていない橋では、橋脚の段落し部のせん断ひび割れの発生や支承部の損壊などが生じており、震災後には通行止め措置がとられている。このように、今回の震災において、地震動による被害については、兵庫県南部地震以降取り組んできた耐震補強により補強された橋梁では致命的な損傷が見られなかったことから、これまで進めてきた耐震設計の整備と耐震補強策の有効性が確認できたと考えている。

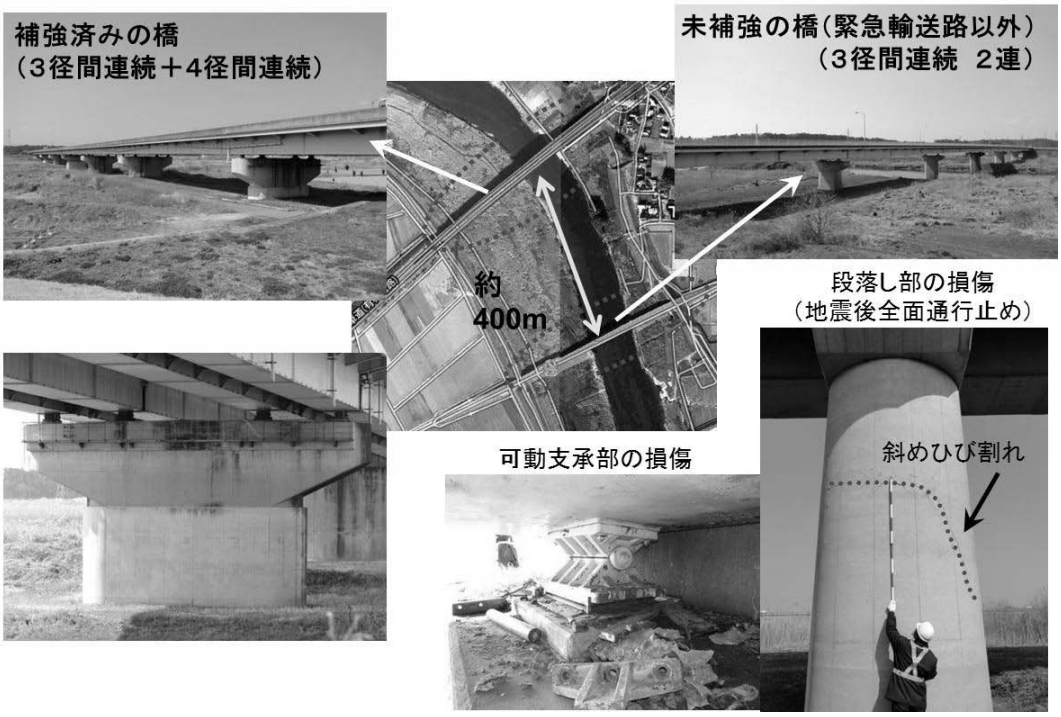


写真 1-1　耐震補強された橋とその近傍の耐震補強されていない橋

津波による被害については、材種、形式、規模を問わず、多数の上部工が流出している。一方で、上部工高さを大きく超える浸水が生じたにも拘わらず、大きな損傷を生じなかったものも多い。写真 1-2 は、沿岸部に架けられた PC 橋の事例である。上部構造が反転して落下している桁や、隣の桁と離れずにそばに着地している桁、流出していない桁など、近接しているにも拘わらず、多岐にわたる損傷となっており、これらの津波外力と橋梁の各種条件の複雑な相関関係の解明が必要であると考えている。このように、津波が橋に及ぼす影響については、不明な点も多く、現在、各機関において被害メカニズムの解明や津波による橋への影響の評価方法などについて、調査や研究が進められているところであり、現時点で基準化には至っていない。平成 24 年道路橋示方書では、このような状況を踏まえて、津波による浸水が予想される地域の道路橋の計画にあたっては、地域の防災計画や関連する道路網の計画とも整合するように、橋梁架橋位置や形式の選定を行うように規定するに留まっている。

国総研においては、道路橋設計基準において、津波外力に対して設定すべき要求性能を明らかにするため、東日本大震災で津波の影響を受けた橋梁について、その被害及び抵抗メカニズムの分析を行っている。特に、基準化にあたっては、レベル 2 地震動の作用を受けた後に、津波の作用を受ける道路橋に対し、地震後の供用性や復旧性に応じて、レベル 2 地震動により認めることのできる損傷形態と、設定した損傷性状に確実に制御するために必要な条件について明らかにする必要があると考えている。今回の震災において、上部構造が流出した橋梁における下部構造の損傷形態は様々であり、橋脚に致命的な損傷が生じていないものもあれば、橋脚基部で著しい損傷を受けたものもある（写真 1-3）。こうした様々な損傷形態に対し、必要な要求性能水準を設定し、設計において要求性能を満足

するように、損傷を制御することも考えられる。

写真 1-2　近接した橋梁における多岐にわたる被災形態の例

（a）橋脚は比較的健全な例　　（b）橋脚に致命的な損傷が生じた例

写真 1-3　上部構造流出橋梁における下部構造の損傷形態の事例

2. 民間プローブデータの活用による道路のサービスレベルの評価と確保

本章では、民間プローブデータを利用した「全国の旅行速度の把握」、「交通円滑化のための要対策箇所の抽出方法の研究開発」、「道路のサービスレベルの評価指標の開発」、「都市間道路ネットワークの現状と課題に関する研究動向」などの研究の紹介を通じて、道路のサービスレベルの評価と確保に関する研究動向を紹介したい。

2.1　民間プローブデータとは

民間プローブデータは、自動車メーカーやカーナビメーカー、携帯電話等のアプリケーションサービスプロバイダが、会員のカーナビ、携帯電話、スマートフォン、タブレット端末の GPS 機能を用いて収集している一般車両の時間と位置に関するデータである。

これら民間プローブデータは、時間情報と位置情報と有していることから、一つの特徴として旅行速度に関し従前実施してきた実走行調査に比べ時間的空間的に大量のデータとして集計することが可能である。国総研では、このような特徴を有する民間プローブデータを道路計画、道路施策の評価をはじめとする道路分野への活用について検討を行っている（図 2-1）。

現在、国総研で取得しているデータは、全国の幹線道路を対象に、デジタル道路地図（以下「DRM」という。）の区間毎に 15 分単位の平均所要時間データである。そのデータ項目は、表 2-1 の通りである。

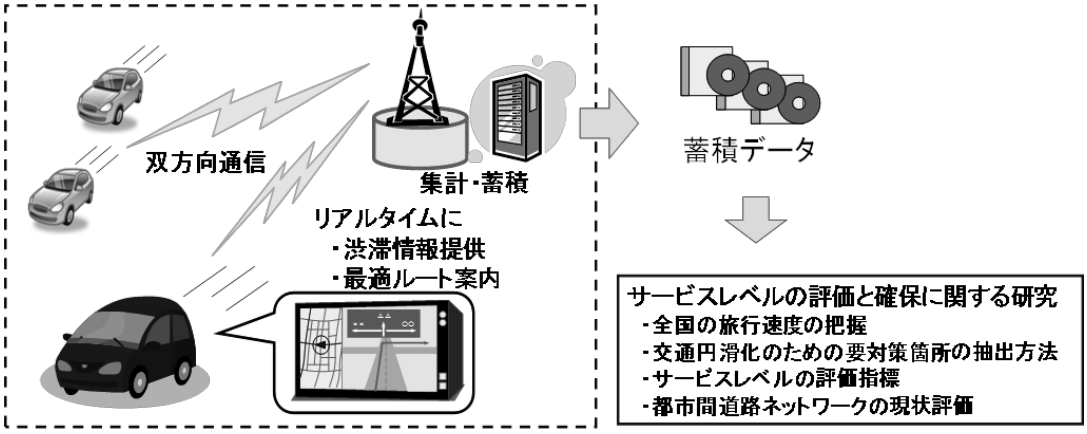


図 2-1　プローブデータの活用

表 2-1　一般車プローブデータの項目

進入ノード	退出ノード	日付	進入時間（15分毎）	平均所要時間（秒）	情報件数（件）
0001	0002	20120416	1015	90	2
0002	0001	20120416	1015	80	1
0002	0001	20120416	1030	85	3
・・・	・・・	・・・	・・・	・・・	・・・

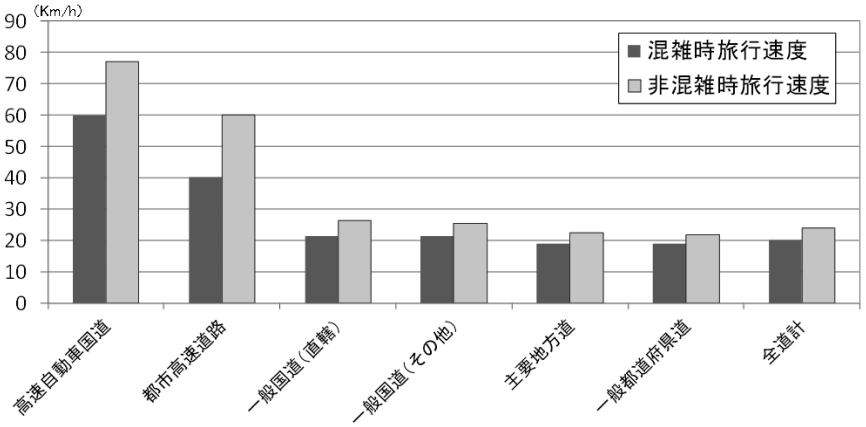
2.2　全国の旅行速度の把握

2.2.1　混雑時旅行速度と非混雑時旅行速度など時間別の旅行速度 [9)]

平成 17 年以前の道路交通センサスでは、混雑時の旅行速度として混雑方向のみを対象に試験車両による実走行調査を行っていたが、平成 22 年調査においては、民間プローブデータの活用により、方向別、更には混雑時・非混雑時別をはじめとする道路区間別・地域別・方向別・時間帯別の旅行速度の把握が可能となった。

図 2-2 は、平成 22 年道路交通センサス旅行速度を用いた分析の一例として DID 地域における混雑時と非混雑時の両方の旅行速度を道路種別別に比較したものである。この図よ

り、高速道路では、混雑時と非混雑時とで大きな速度変化が起こっている一方、一般道路ではその速度差は数 km/h 以下と小さいことがわかる。このように、時間的空間的に豊富な民間プローブデータの活用により、混雑時間帯・非混雑時間帯など時間を区切った分析が可能であり、より道路利用の実情をきめ細かく捉えた対策の検討につなげることができるといえる。



※1 混雑時旅行速度:7時台、8時台、17時台、18時台の旅行速度のうち最も遅い時間の旅行速度
※2 非混雑時旅行速度:9時台～16時台の平均旅行速度

図 2-2 DID 地域における混雑時・非混雑時旅行速度の比較

2.2.2 旅行速度の季節変動[10)]

図 2-3 は、季節変動の把握事例として、全国の直轄国道を対象に、秋季（平成 23 年 10 月）と冬期（平成 24 年 2 月）の平日朝ピーク時間（7 時台～8 時台）の交通調査基本区間（図 2-4 参照）別に平均旅行速度を算定し、その速度比（2 月/10 月）を算定したものである。この際、上下方向いずれもプローブデータが取得されている場合のみを算定対象とし、上下方向いずれかでプローブデータが取得されていない場合は未取得として扱った。

この事例では、プローブデータの活用により、北海道や東北、北陸、中国の日本海側で冬期の気象条件の影響を反映した速度低下の実態も把握できることがわかる。

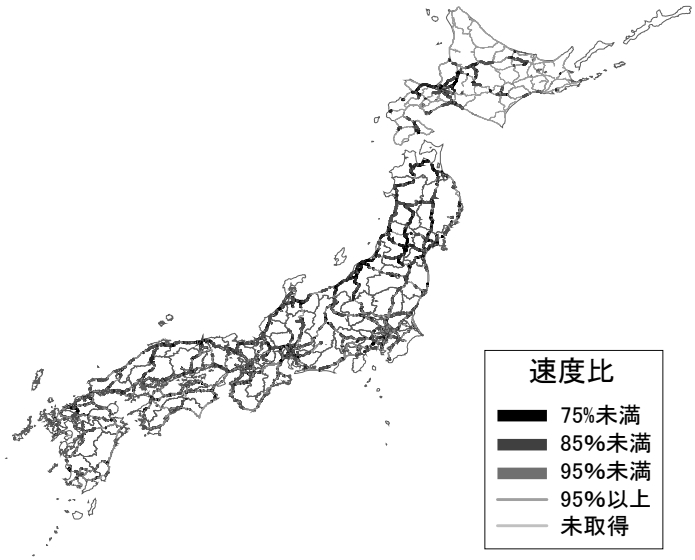


図 2-3 直轄国道における 10 月と 2 月の速度比較(2 月/10 月)

2.3　交通円滑化のための混雑状況の把握

我が国における道路交通の諸課題の中で、交通渋滞による損失は依然として大きく、道路の交通円滑化は非常に重要な施策である。交通円滑化に関しては、実測データに基づき、渋滞発生の著しい交差点である「主要渋滞ポイント」を抽出し、優先順位を付けて重点的対策を行うことが求められる。

一般的に、渋滞は、交差点や隘路などのボトルネック箇所を起点として発生することが多く、その影響は道路ネットワーク上に広がっていく。したがって、より効果の高い交通円滑化を推進していくためには、どこが交通のボトルネックとなっているか、その影響がどのようなメカニズムでどの程度の範囲に及んでいるかを把握することが必要である。

国総研では、効率的に“ボトルネック箇所を特定”し、“線的又は面的に広がる渋滞の程度を把握”するため、図 2-4 に示すように、ボトルネックとなりうる主要交差点毎に区間を切った区間を交通調査基本区間として定義した。これを受けて、平成 22 年に実施された道路交通センサス調査に本定義が導入され、全国 9 万の交通調査基本区間となった。この交通調査基本区間は、区間の接続情報も保持しており、交差点の抽出が可能となっている。図 2-5 は、東京及びその近郊の交通調査基本区間同士の交差点を対象として、交差点への流入方向の損失時間を合計した交差点単位の損失時間の面的な分析例である。これまで膨大な労力を有した広域の交差点単位の損失時間の集計、地図への描画を容易に実施できることとなった。

また、渋滞は線的に又は面的に広がることから、あるボトルネック交差点を起点とする渋滞を正確に評価しようとする場合、図 2-6 に示すように、複数の交通調査基本区間、必要な場合は一定規模のネットワークについて影響範囲を特定する必要がある。この評価ため、現在、民間プローブデータを用いて、時間別に渋滞の影響範囲の拡大状況の把握を試みている。

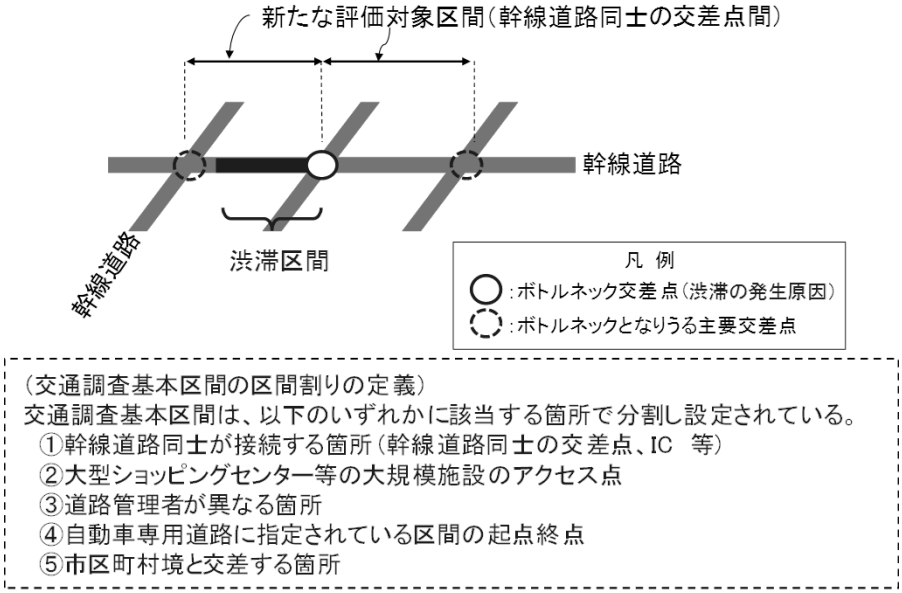


図 2-4　交通調査基本区間のイメージと区間割の定義 [11)]

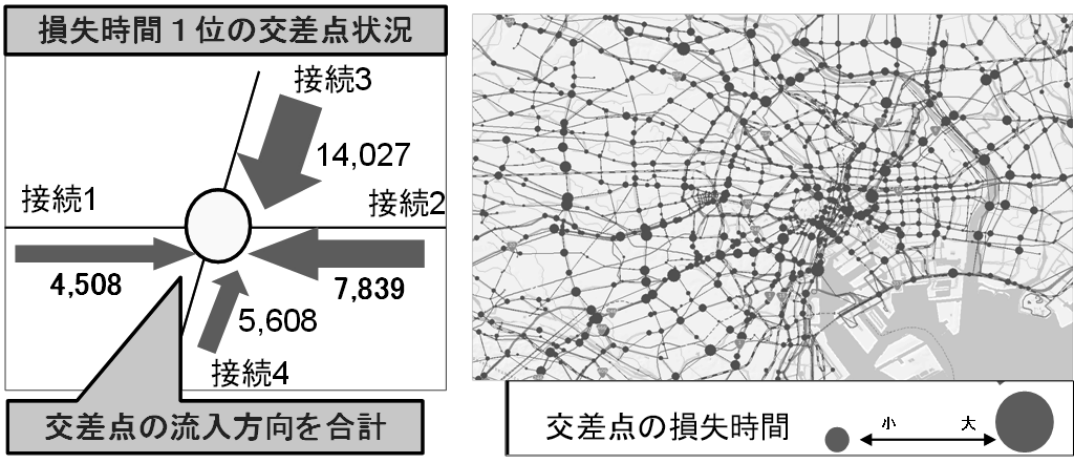


図 2-5　交差点単位の渋滞量の定量化例

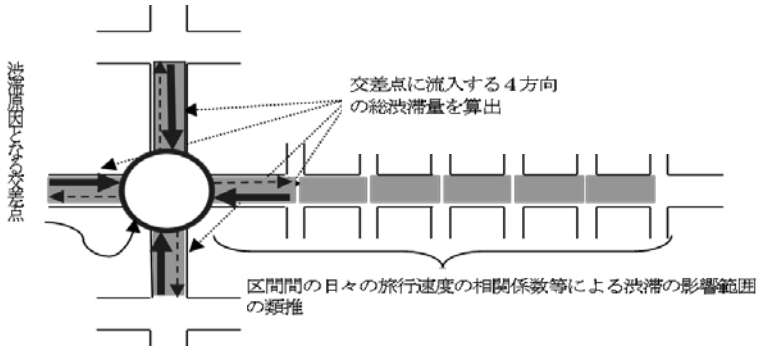


図 2-6　複数の区間にまたがって影響を及ぼしている渋滞

2.4　道路のサービスレベルの把握

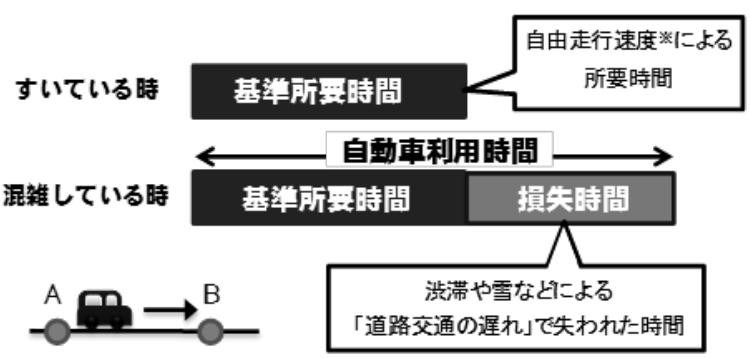
2.4.1　損失時間 [10)]

損失時間は、渋滞等がない自由走行の時と比べ余計にかかる時間を示し、道路のサービスレベルを評価する代表的な指標として活用されている。その算定は、自由旅行速度時の所要時間と実際の所要時間の差を区間毎に算出した後、その損失時間に当該区間の交通量及び平均乗車人員を乗じて合計することにより算出するものである（図 2-7）。

実走行調査により旅行速度データを収集していた平成 17 年度以前は、旅行速度データが収集できる道路区間も限られており、全国の一部の道路区間の算定にとどまっていた。一方で、民間プローブデータは、道路種別・区間・時間帯等に関係なくデータが蓄積されていることから、広域の道路区間を対象として、実測データに基づく損失時間の算定が可能となる。

また、自由走行速度は、平成 17 年以前のセンサスでは、一般国道であれば DID 内は 35km/h、DID 外は 50km/h という形で道路種別や DID の別により、一律の自由走行速度を設定していた。民間プローブデータを用いることで、自由走行速度についても実データに基づく設定が可能となる。現在は、自由走行速度として、特異的に速度の高い車両を除くため、区間

毎の年間実績速度の上位 10%タイル値が採用されている。



$$LS_k = \sum_{j \in J} \sum_i \alpha_i \times Q_{ijk} \times \left(\frac{L_k}{V_{jk}} - \frac{L_k}{V_{k0}}\right) \quad \cdots(式1)$$

ただし、LS_k：区間kの損失時間（人時間/月）

α_i　：車種i（大型、小型）の平均乗車人員

Q_{ijk}：区間kにおける時間帯jの車種iの交通量（上下別、平休別）

L_k　：区間kの延長

V_{jk}：時間帯j（7時～18時の昼間12時間におけるj時間帯を対象とする）における旅行速度（上下別、平休別）

V_{k0}　：区間kにおける自由旅行速度※（上下別）

図 2-7　損失時間の算定式と算定イメージ

2.4.2　時間信頼性[10)]

道路施策の実行による旅行時間の短縮効果については、従来は平均所要時間の短縮という形でしか表現できなかった。しかし、このように日々のプローブ旅行時間データを有効活用することにより、従来から議論検討はされてきたものの評価手法として確立されていなかった定時性を新しい指標として活用できると考えている。なお、定時性は時間信頼性とも呼ばれ、米国、英国などでは、道路交通のサービスレベルをあらわす指標として近年注目されており、道路事業評価における評価項目としても活用され始めている（図2-8）。国総研では、道路事業評価での時間信頼性便益の算定手法、道路施策による時間信頼性の向上効果の評価手法構築を目指して、プローブ旅行時間データの分析による幹線道路における道路条件や交通条件をもとにした時間信頼性指標に関する研究に取り組んでいる。

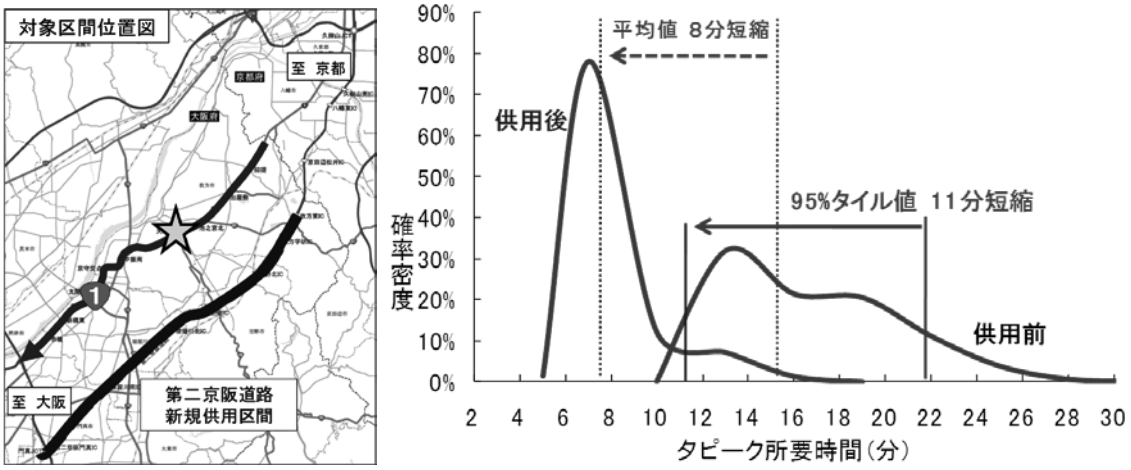


図2-8　第二京阪道路供用（平成22年3月20日供用）に伴う一般国道1号の主要渋滞ポイント（☆印）の通過に要する所要時間の時間信頼性の向上効果

2.5 都市間道路ネットワークの現状と課題の把握

2.5.1 都市間道路のサービスの現状 [12)]

隣接する生活圏の中心都市間の平均旅行時間を図 2-9 に示す。平均旅行時間については移動距離に起因するため、ゾーン面積が大きく都市間距離が長い北海道等において、隣接する生活圏の中心都市への移動に時間がかかっている。また、長野県や岐阜県などの山間部において､隣接生活圏への移動に 2 時間以上を要する生活圏ゾーンも存在する､さらに、中国地方においては、山陽側あるいは山陰側の縦断ルートに比べ、山陽・山陰間の横断ルートにおいて旅行時間が長くなる傾向にある。このように、民間プローブデータの活用により、全国を対象として都市間移動の所要時間の算定が可能となる。

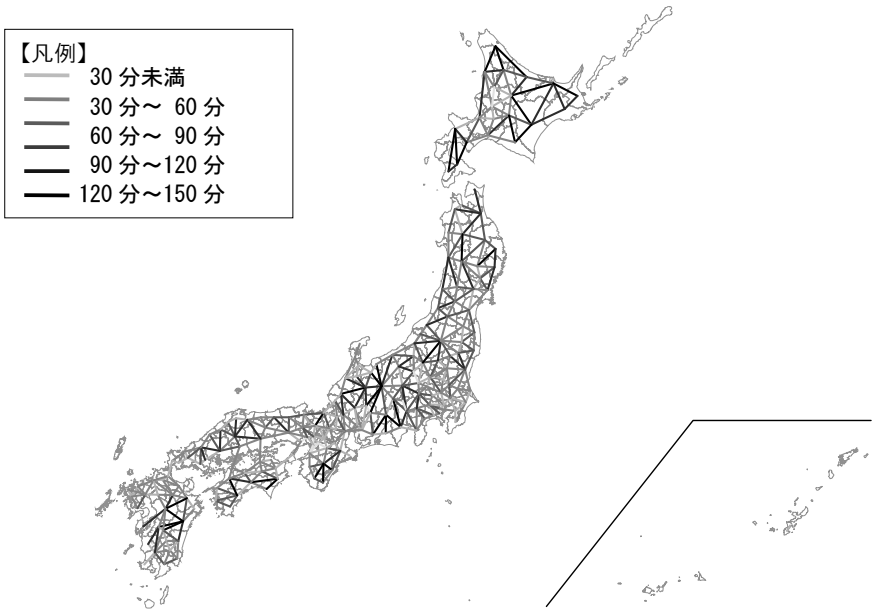


図 2-9　隣接する生活圏の中心都市間の平均旅行時間の比較

次に、隣接する生活圏の中心都市間の平均旅行速度を図 2-10 に示す。平均旅行速度では、東京、大阪都市圏において 30km/h 未満の低い旅行速度がみられるほか、三陸沿岸や、近畿・四国地方の太平洋側等においても、旅行速度の低い地域が存在する。これらの地方部においては､高速道路の未整備区間の存在やアクセス不良が要因となったと考えられる。旅行速度の低下がプローブデータの活用により把握できている。このように、民間プローブデータの活用により、全国を対象とした都市間移動の旅行速度の低下状況の把握が可能となる。

2.5.2 都市間道路のサービスの低下要因 [12)]

図 2-11 に本州の都府県庁所在地間の高速道路を利用したルート探索結果を用いて集計した道路の種級区分別の平均旅行速度の集計結果を示す。

次に、図 2-12 に本州の都府県庁所在地間の一般道のみを利用したルートにおける平均旅行速度と信号交差点密度の関係を示す。都市間平均旅行速度は、信号交差点密度が高いほど低下する傾向にある。信号交差点が少ない方が、高いサービスレベルを確保できてい

ることが分かる。

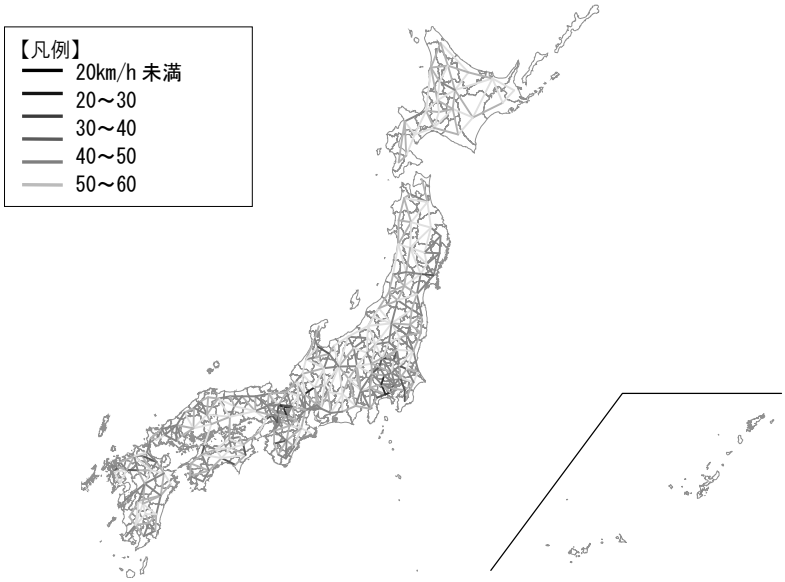


図 2-10　隣接する生活圏の中心都市間の平均旅行速度の比較

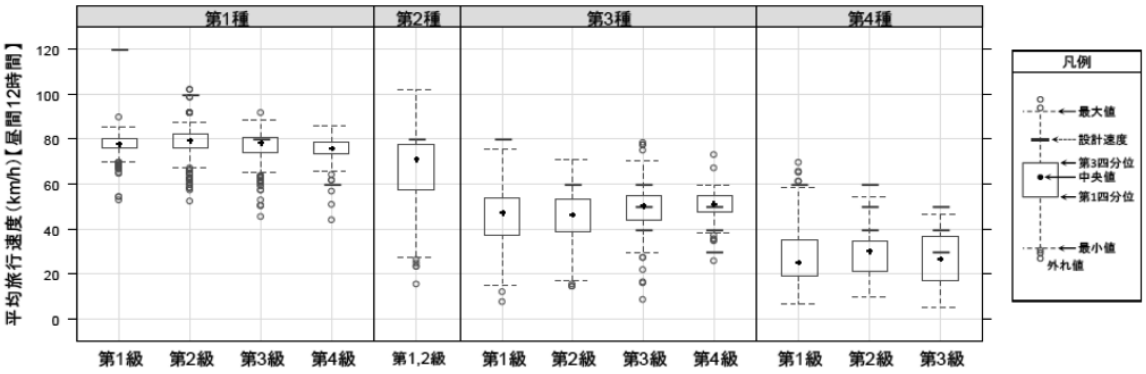


図 2-11　道路種級区分別の平均旅行速度特性

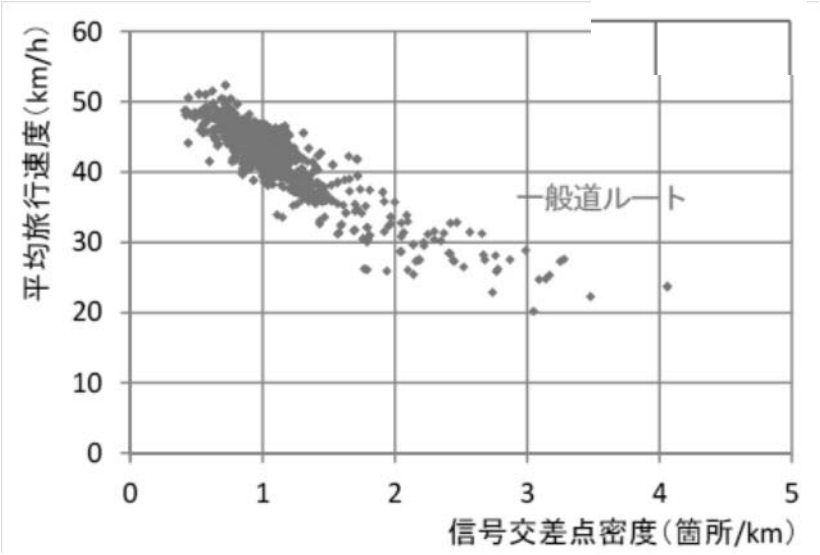


図 2-12　都府県庁所在地間の平均旅行速度と信号交差点密度

2.6　今後の研究展開

民間プローブデータという時間的空間的に大量のデータ取得が可能であるという特徴と全国約 9 万の交通調査基本区間とをリンクさせることによる分析手法とその結果を紹介した。これらの分析結果は、現在のところ一次集計に近いものであるが、これらを用いた指標、評価手法、統合的･総合的な手法を目指して取り組んで行きたい。

また、このようなどちらかと言えばマクロ、あるいはそれに近い集計･分析という活用に加え、ミクロな活用も考えられる。例えば、表 2-1 に示すように、現在国総研が取得している民間プローブデータは、DRM 区間単位のデータであるものの、交差点の右左折・直進の別が分かれば、交差点の方向別分析が可能となる。また、プローブデータから急な加減速地点が分かれば、交通安全への活用も考えられる。今後は、プローブデータの更なる活用という観点でも研究を行っていく予定である。

2.6.1　交差点の方向別交通流分析 [13)]

図 2-13 は、交差点の右左折・直進の判別が可能なプローブデータを用いて、京急蒲田駅近くの東蒲田二丁目交差点を対象として実施した交差点通過時間の右左折・直進の方向別分析事例である。平成 23 年 2 月から 11 月までの 10 カ月のプローブデータを用いて、北側からの流入について、右折と直進との所要時間の比較を行った。8 時台の直進と右折との所要時間分布を比較したところ直進の所要時間より、右折の所要時間の方が明らかに大きいことが分かった。また、右折車両が本線に影響を与えている可能性があると考えられる。

今後は、道路区間のサービスレベルの評価だけでなく、本事例のように、交差点通過時間の方向別分析に取り組み、交差点を対象としたサービスレベルの低下要因抽出と対策検討に活用できるような手法の研究に取り組んで行きたい。

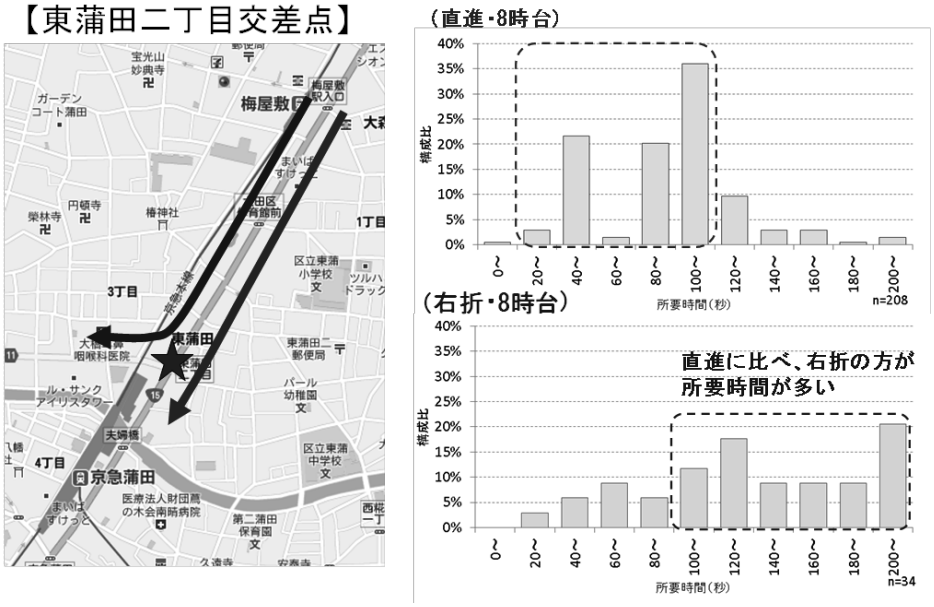


図 2-13　プローブデータを用いた交差点の方向別分析

2.6.2　急な加減速を用いた潜在的な事故危険個所の抽出[14)]

交通安全対策は、交通事故発生状況及び現地の道路交通環境等から事故危険箇所の抽出、事故要因分析、対策立案、実施、効果検証、追加対策の必要性検討といったサイクルで実施される。幹線道路の交通安全対策におけるこのサイクルは、基本的に事故データを基にして行われるが、交通事故が稀な現象であることから、対策箇所の抽出から対策の実施まで、実際に発生した交通事故を対策の対象として実行されることとなる。また、効果の検証において数年の期間が必要であり、効果検証の結果、追加対策が必要となった場合は、効果検証まで更に期間が必要となる。現状では事故発生は多くはないもののヒヤリとする事象の発生が多い潜在的に事故の危険性を有する箇所の抽出が難しい、また、生活道路に多いと言われている物損事故については事故データとして蓄積されていないことから、生活道路の交通安全対策は、必要なデータが必ずしも十分に収集されていないという課題もある。

このような課題に応えるべく、交通安全対策における上記のサイクルを進めるにあたって必要なデータのより効率的な取得・分析を可能とする手法として、プローブデータを活用する方法についての研究を進めている。

すでに、プローブデータの交通安全対策への活用事例としては、急ブレーキが多数発生した箇所を抽出し、交通安全対策の実施箇所の選定に役立てられている例もある。その他にも、生活道路におけるプローブデータを用いることにより、走行速度の状況を面的に把握し､交通安全対策の検討や効果把握に活用することも考えられる｡このようなことから、国総研では、プローブデータから取得できるデータと危険箇所抽出や交通安全対策の効果把握に必要なデータの種類や精度等の関係を検証し、交通安全対策へのプローブデータの活用について調査研究を進めている。

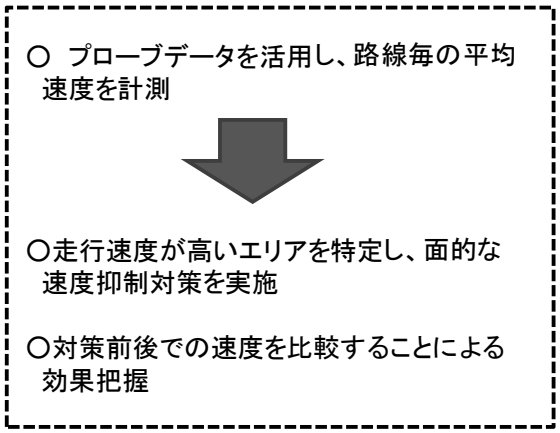


図 2-14　生活道路におけるプローブデータ活用のイメージ

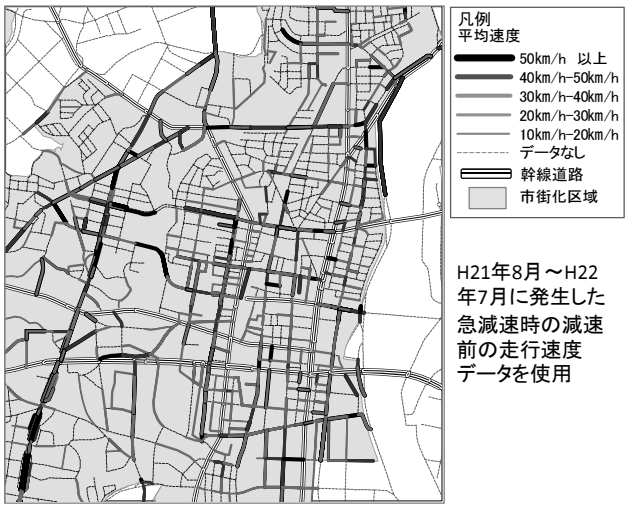


図 2-15　民間プローブデータによる生活道路の走行速度把握の例

おわりに

以上、道路構造物の維持管理と道路のサービスレベルについて、国総研道路研究部での研究の取組みを紹介した。国総研道路研究部では、この他にも道路交通の安全性向上、空間再構築等に関する研究にも取り組んでいる。

今後も、国総研道路研究部では安全かつ円滑・快適な道路交通を将来にわたって経済的に維持・確保していくための、ハード、ソフト両面の研究を進めていきたいと考えており、関係各位のご指導、ご協力をお願いする次第である。

（参考文献）

1) 平成 21 年度・平成 22 年度道路構造物に関する基本データ集、国土技術政策総合研究所資料第 635 号、2011
2) 玉越隆史：橋梁事故からの教訓－米国ミネソタ州 I-35W 落橋事故の例を踏まえて－、土木技術 Vol.66、No.9、pp36-41、2011.9
3) 橋梁定期点検要領(案) 平成 16 年 3 月 国土交通省道路局、
4) http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo3_2.pdf
5) 道路橋示方書・同解説 Ⅰ共通編、（社）日本道路協会、2012.4
6) 道路橋の計画的管理に関する調査研究―橋梁マネジメントシステム(BMS)―、国総研資料第 523 号、2009
7) 道路橋の健全度に関する基礎的調査に関する研究―道路橋に関する基礎データ収集要領(案)―、国総研資料第 381 号、2007
8) 平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報、国土技術政策総合研究所資料 第 646 号、土木研究所資料 第 4202 号、2011
9) 道路交通センサス一般交通量調査の見直しと新たな展開、土木計画学研究・講演集 Vol.45、2012
10) 道路交通データの収集・分析の新たな展開～プローブ旅行時間データ等の活用に向けて～、国総研資料第 614 号、2010
11) 交通調査基本区間標準・基本交差点標準、国総研資料第 666 号、2011
12) 都市間道路のサービス水準の実態と道路階層性評価、土木計画学研究・講演集 Vol.45、2012
13) プローブデータを用いた交差点における交通動向分析のケーススタディ、土木計画学研究・講演集 Vol.45、2012
14) 社会資本整備審議会道路分科会 第４０回基本政策部会配布資料、国土交通省、2012.08.30

水災害分野における現場からの気候変動適応

～現象の苛烈化と不確実性に立ち向かうための

河川技術の方向～

河川研究部長

藤田　光一

水災害分野における現場からの気候変動適応
～現象の苛烈化と不確実性に立ち向かうための河川技術の方向～

河川研究部長　藤田　光一

１．はじめに

社会資本整備審議会が河川分科会「気候変動に適応した治水対策検討小委員会」での検討を通じてとりまとめた答申（2008）「水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について」は，当分野における日本で初めての本格的な適応策検討である．本答申では，激化する水災害を完全に防御することは難しいため，人的被害を抑え，国家機能の麻痺の回避など被害の最小化を目標とする基本的方向性の下で，施設整備に加え，地域づくりと一体となった適応策，危機管理対応を中心とした適応策なども含めて，水災害に適応した強靭な社会を総合的に目指す必要性が強調されている．

その後，気候変動予測技術の進展は急で，気候変動による水災害に関わる外力や基本量の変化に関する情報が大幅に充実してきている．本稿では，そうした成果を踏まえつつ，我が国の河川および流域などの実態を踏まえたとき，気候変動予測の研究成果が現場での適応策の検討において具体的にどのような意味を持つかを述べる．その上で，諸外国と対比した場合の我が国における気候変動適応の特徴，気候変動予測が持つ不確実性の捉え方，適応策と既往の施策との関係についての話題を絡めながら，気候変動影響により苛烈化が懸念される水災害を乗り切ることができる靭性を持った国土にづくりに向け，現場の実態を見すえてのポイントを解説することを狙う．

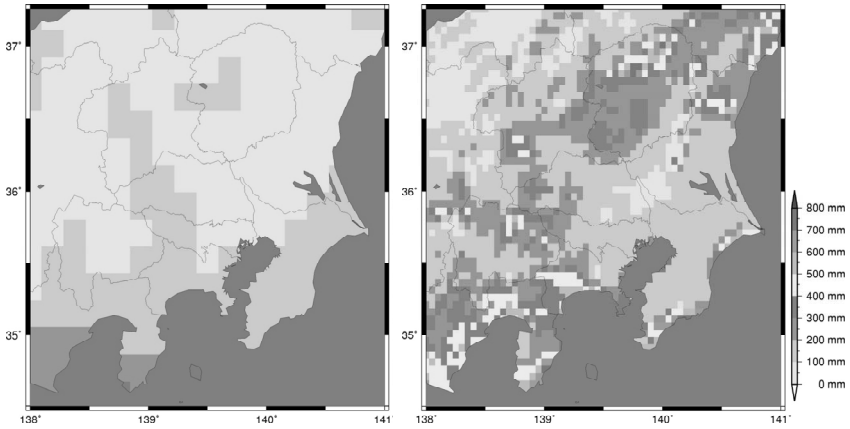
なお，適応の対象として，海面上昇，寡雨・渇水，生態系への影響なども同様の重要性を持つが，本講演では限られた紙数・時間の中で議論が散漫にならないように，豪雨の増加が直接的にもたらす影響に絞って話を進める．また，講演者の昨年度の講演内容（藤田2011）と密接な関係を持つので，必要に応じ併読いただければありがたい．以下，多くの数字を示しながら議論を進めていくが，全体として検討途上であり，これらを個々の施策に直接適用するにはまだ距離があること，本講演における数字は，あくまで適応策検討の方向性やポイントを掘り下げるための材料としての位置づけであることにご留意いただきたい．

２．気候変動予測結果の翻訳―治水方策への影響が見えるように

２．１　翻訳の重要性

日本の河川流域は，大陸の河川に比較してスケールが小さく，地形も急峻かつ複雑であるため，水害への対応を実務レベルで検討するのに必要な解像度あるいは細密性をもって，豪雨という極端現象の地球温暖化影響を再現・予測することは従来相当に困難とされてきた．しかし，計算能力の急伸を背景としたモデル改良と高解像度化（たとえばこの 5 年でも日本周辺の計算メッシュが 20km から 5km，2km，さらに 1km と急速に細密になってきている）の進展によって，少なくとも外形的には，気候変動による豪雨変化の予測技術が，

日本の河川流域スケールにも適用しうるレベルに到達しつつある．



図−1　大気モデルの超高解像度化は何をもたらすか？

※両者とも，革新プログラムで実施された前期実験結果から，2095 年についての 72 時間最大雨量の空間分布を表示

図−1 は，文部科学省による「21 世紀気候変動予測革新プログラム」（2007 -2011 年度；以下「革新プログラム」と略称；http://www.jamstec.go.jp/kakushin21/jp/reports.html）の下で行われた「超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究」（研究代表者；気象庁気象研究所 鬼頭昭雄 気候研究部長）において用いられた大気モデルの出力結果の一例である．この研究では，従来用いられていなかった水平方向に非常に細かい格子を持った大気モデルによる極端な現象の正確な予測が検討されており，20km 格子間隔（メッシュ）で地球全体を覆う大気モデル（GCM20）をベースに，日本付近の領域では 5km，2km および 1km 格子間隔を採用した大気モデル（それぞれ RCM5，RCM2，RCM1）が構築されている．この図から，計算メッシュ 20km と 5km とでは，降雨の空間分布に与える山地地形の影響の再現のレベルが大きく異なることが容易に理解される．その絶対的な精度は別にしても，RCM5 のような超高解像度の大気モデルは，降雨現象について，日本の河川流域スケールに見合う細密な情報を提供するものと言える．

となれば，いよいよ，地球温暖化に伴う気候変動による豪雨変化の予測結果が実河川の治水方策に具体的にどのような意味を持つのか，すなわち「気候変動予測結果の実務への翻訳」がより一層重みを持つことになる．その理由は次のようである．第一は，科学技術分野として急速な進展が見られるとはいえ，後述のように気候変動予測結果の実務への適用性には依然課題があり，したがって，治水方策に関わる実務技術者が予測結果を使いこなすリテラシーを身につけ，気候変動予測の成果を最大限かつ適切に活用する状況をつくることがますます大切となるからである．第二は，気候変動予測にたずさわる研究者と適応策検討を担う研究者や実務技術者との間での双方向のやりとりを活発化することが，適応策の検討において今後重要となり，実際の適応策検討に生かせる気候変動予測について，実務の側からも積極的に発信することが求められるからである．

２．２　翻訳の基本的なスタンス－気候変動影響の“伝播特性”を把握する

ここでは，いたずらに細部に入り込むことを避け（実際の適応策の検討では詳細な検討が必要なのは当然だが），全体の構図を見通すことを優先して極力単純化した方法をとる．すなわち，以下の 4 つを調べることを土台に「翻訳」作業に取りかかる．

●雨　豪雨（ある継続時間，ある超過確率の降雨量）が気候変動によりどう変化（増大）するか？　➔　式(1)のα（豪雨量倍率）はいかほどか？

$$r_f = \alpha \cdot r_p \quad \cdots (1)$$

r_f：将来（気候変動後）の豪雨量，　r_p：現在（気候下）の豪雨量

別の表現として，豪雨量変化率：$\alpha - 1 = \frac{\Delta r}{r}$　　$\cdots(2)$

Δr：気候変動による豪雨量変化

●流量　それにより洪水ピーク流量はどう変化（増大）するか？　➔　式(3)のβ（洪水ピーク流量倍率）はいかほどか？

$$Q_f = \beta Q_p \quad \cdots(3)$$

Q_f：r_fによる洪水ピーク流量（気候変動後）

Q_p：r_pによる洪水ピーク流量（現在気候下）

●河川整備労力　気候変動による上記の変化（増大）量を河川整備で全て吸収しようとした時，目標とする治水安全度を達成するための河川整備に要する労力がどれだけ増えるか（いわば“逃げ水効果”の度合い）？ ➔　式(4)のγ（河川整備労力倍率）はいかほどか？

$$W_f = \gamma W_p \quad \cdots(4)$$

W_p：所定の治水安全度を達成するために必要な河川整備の労力（現在気候下）

W_f：上記と同じ所定の治水安全度を達成するために必要な河川整備の労力（気候変動後；将来）

●氾濫可能性　河川整備に関して適応策をとらなかった場合に，気候変動影響によって河川からの氾濫が起こる確率がどれだけ変化（増加）するか？　➔　式(5)のε（氾濫発生確率の倍率）はいかほどか？

$$\left(\frac{1}{T_f}\right) = \varepsilon\left(\frac{1}{T_p}\right) \quad \cdots(5)$$

T_p：現在気候下での氾濫発生の確率年

T_f：気候変動後（将来）の氾濫発生の確率年

これらを俯瞰的に見ることは，**図-2** のように，気候変動による豪雨量の変化（増大）が治水方策に関する諸項目にどのように伝播していくか？を大局的に把握することを意味する．以下，この天（気候変動予測）から地（河川・流域における治水方策の実務）への伝播の大まかな特性を見ていく．

２．３　伝播特性に関わる α, β, γ, ε の算定法

技術検討の詳細を述べることは本講演の主目的ではないので参考文献（服部ほか 2012）にゆずり，ここでは算定法の要点のみを説明する．

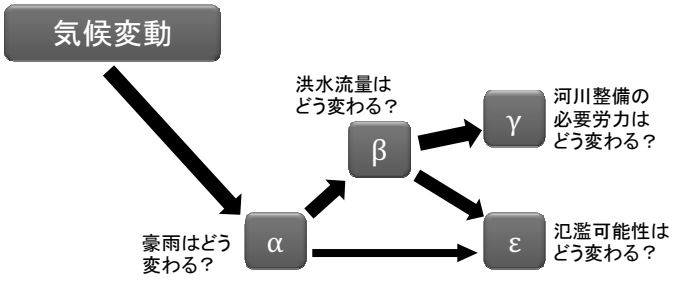


図-2　気候変動による豪雨量の変化（増大）が治水方策に関する諸項目にどのように伝播していくか？

（１）豪雨量の倍率 α

気候変動予測については，前述の気象庁気象研究所による大気モデル GCM20 と RCM5（開発段階にしたがって，いずれにも前期バージョンと後期バージョンがある）を用いた温暖化予測実験の結果（鬼頭（研究代表者）2011）を用いている．現在(1979～2003 年)，近未来(2015～2039 年)および将来(2075～2099 年)の降雨量出力データを用い，継続時間 24，48，72 時間等の年最大雨量を抽出し，河川整備基本方針で計画対象としているようなレベルを中心とした超過確率年に対応する豪雨について，［現在→近未来］，［現在→将来］に関する α 値を算出している．

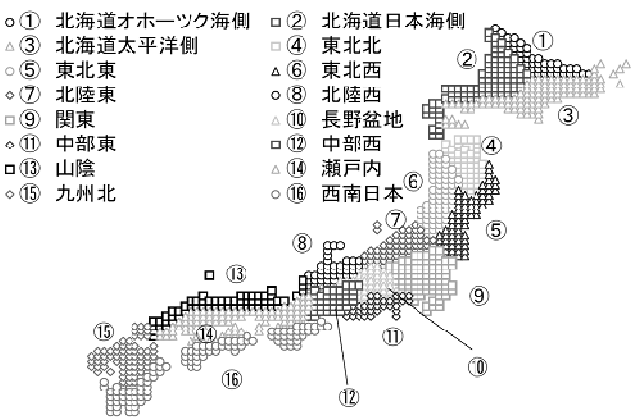


図-3　豪雨変化の算定に用いた地域分割（16 分割）

ここで問題となるのは，温暖化予測実験の計算期間が 25 年程度であり（地球シミュレーターをもってしても多ケースの予測実験を行うだけの余裕はまだ無い状況），超過確率年 100～200 年の豪雨量を推定するにはデータ数が少ないことである．そこで，限られた期間の予測実験結果からより多くのデータ数を確保するため，**図-3** に示すように，日本全土を複数の地域に分割し，各分割地域に含まれる n 個の格子点の年最大雨量データ（25 年分）をその地域の雨量特性を反映した 1 組のデータセットとして扱うこととしている（柏井ほか 2008；Linsley ほか 1949）．それでもなお種々の理由で統計的推定に誤差を伴うことから，α の中央値とともに，その 95%信頼区間を上位・下位として算出，表示している．

（２）洪水ピーク流量の倍率 β

河川整備基本方針の策定などに用いられている既往の算定手法を採用して，河川整備基本方針の検討で用いている継続時間に対応した降雨ハイエト（r_pに対応）から洪水ピーク流量Q_pを，同様に$r_f = \alpha \cdot r_p$から Q_fを算定し，β 値を得るという手法を用いている．

（３）河川整備労力の倍率 γ

河川整備基本方針に示されている計画規模に相当する洪水を現況の整備途上の河道に流下させると，**図-4** に示すように最高水位 Hp が計画高水位 H_{HWL} を上回る区間が生じる．その区間が長大であり，かつその区間の川幅が広いほど，さらに計画高水位を上回った水深が大きいほど今後必要な整備規模が増大すると単純化して取り扱っている．すなわち整備労力の大きさを表す指標として**図-4** 中の塗られた部分の水量 W を用い，これを整備労力と呼び，γ 値を算定している．現在気候下および近未来・将来気候下における河川整備労力 W_p，W_f は，それぞれ，現状で想定していた整備労力と，気候変動の

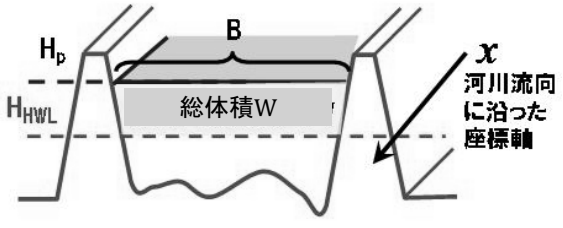


図-4　河川整備労力を概括的に表す指標の算定法の説明

影響を吸収するための拡充分をそれに加えた整備労力に対応する．

さて，河川整備労力の倍率γは，一義的には，施設整備（いわゆるハード対応）による気候変化への適応の困難度を概括的に表す１つの指標である．しかし施設整備による適応が困難である場合にはソフト的施策の質・量をより充実させることも必要となり，ソフト施策の効果が簡単に発現するというわけではないことを理解すれば，この指標はまた，ハードとソフトを組み合わせた適応策全般の困難度をも評価しうるものとできる．そして，γ という指標は，気候変動適応の困難度に基づき適応策の方向性の検討を行いやすくすることを狙ったものであり，適応策全てを河川の施設整備（ハード対策）によって行うことを意図したものではない．

（４）河川からの氾濫可能性の倍率ε

将来気候下における各水系の基準地点流量の生起確率分布を算定し，この分布から現行の河川整備基本方針規模相当の流量の超過確率 $1/T_f$ を求めた．この値と現行の計画規模流量に対応する超過確率 $1/T_p$（たとえば 1/100 等）との比 T_p/T_f として，氾濫生起確率の倍率εを算出している．

２．４　翻訳結果１－各分割地域で豪雨量はどう変化するか？

まず，豪雨量の倍率αの算定結果を見ていく．**図-5** に，４つの気候変動予測モデル（GCM20 前期，RCM5 前期，GCM20 後期，RCM5 後期）それぞれを用いて，各分割地域の年最大日雨量の変化率を算定した結果を，近未来と将来気候について示す（一連の検討では，年最大降雨に関する気候変動影響が種々の生起確率の豪雨についても同様に現れる

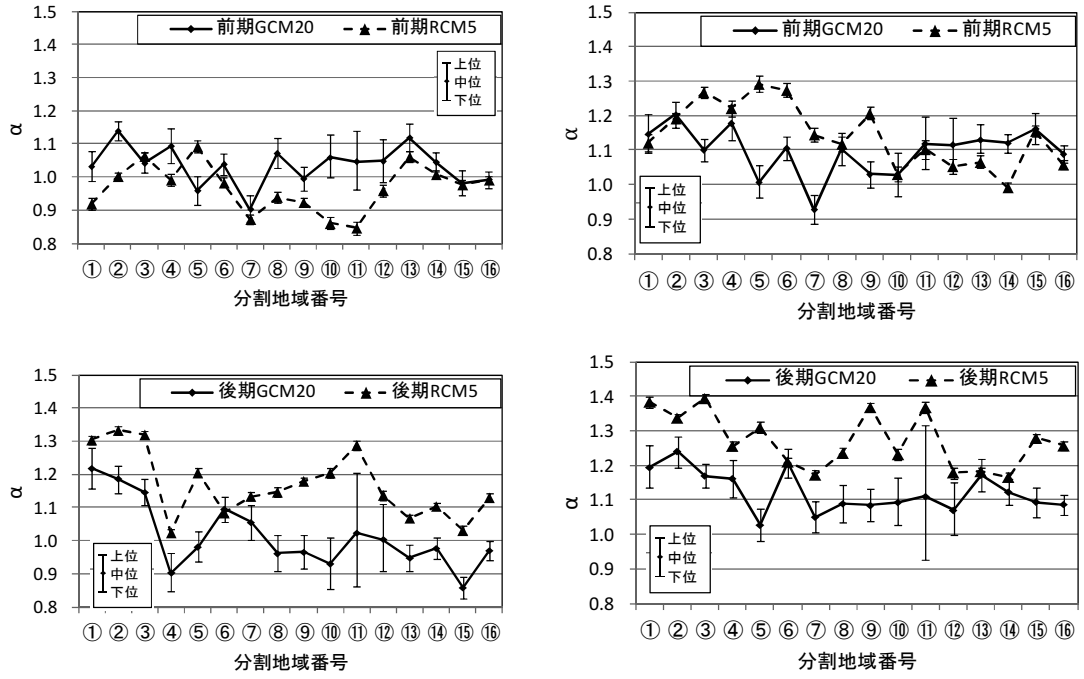


図-5　各気候変動予測モデルによる豪雨量倍率α（24 時間降雨）
＜左：近未来，右：将来＞

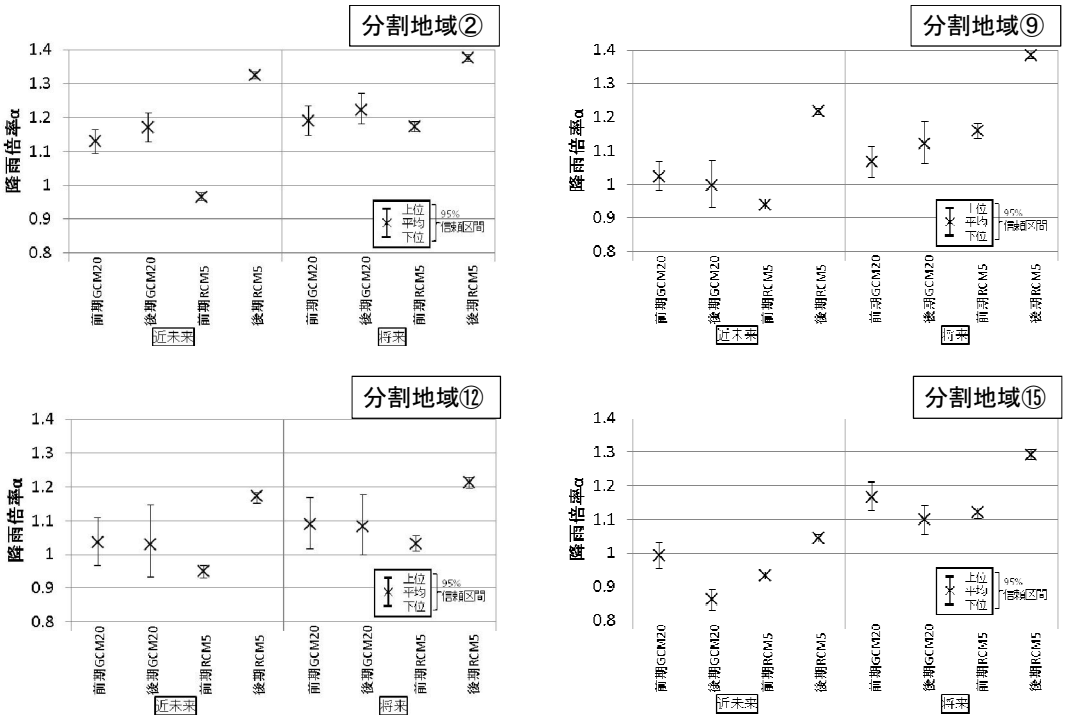


図-6　気候変動予測モデルと近未来・将来の違いによる豪雨量倍率 α の違い（24 時間降雨）

という近似的取り扱いを行っている）. なお上位と下位の差(95%信頼区間の幅)について, RCM5 が GCM20 に比べて小さくなっているのは，RCM5 の分割地域内の計算格子点数が GCM20 の 16 倍あるという有効データ数の違いによるものである．さて，**図-5** から，将来についてみると，α 値が全体としては 1.0 付近から 1.4 付近に分布していること，中央値, 上位－下位値の幅のいずれについても分割地域によって値がかなり異なっていること，メッシュの小さいRCMによる方がより大きなα値となる傾向があることがわかる. そして, 全体的には近未来に比較して将来のα値が大きくなること，しかし近未来の中でもモデルによってはかなり大きなα値を示しているものがある.

図-6 は，４つの分割地域を取り出し，４モデルによる近未来と将来のα値を比較したものであり，近未来に対して将来のα値が大きくなる傾向がより見やすくなっている．その上でこの図からは，計算期間が短いことに起因する個々のモデルの上位－下位値の幅もさることながら，α 中央値のモデルごとの違いもそれなりに存在することがわかる．これが適応策検討にどのような意味を持つかについては，α→β，γ，ε という伝播特性について述べた後，再度掘り下げることにする.

近未来は適応策準備の時間が短く施策選択の幅が狭くなることから，施策検討にとって将来とは異なる重要な意味を持つ．近未来における豪雨量増加が将来に比べるとそれ程ではないという**図-5**，**図-6** から読み取れる全体的傾向は，適応策実施に与えられた時間的猶予という観点からは安心材料と言えるが，こうした解釈を実務に反映させる際には計算結果の持つ信頼性や地域特性を踏まえて行うことが必要である.

２．５　翻訳結果２－豪雨量変化から治水方策に関する諸項目への伝播特性

α（豪雨量倍率）の中央値および上下限値に対して，β（洪水ピーク流量倍率），γ（河川整備労力倍率），ε（氾濫可能性倍率）それぞれの全水系単純平均値を算定した結果を**図-7** に示す．この図から，マクロに見れば，β，γ，ε 値となるにしたがってα値変化の伝播がより増幅して現れること，すなわち，施策に近い指標になるほど豪雨量増大に対する応答の鋭敏度が増すことがわかる．このことは，予測の信頼性の幅の伝播についても同様である．ε 値や γ 値は（β 値も一定程度），気候変動が治水に与える影響の度合い（深刻度）や適応の困難度にある程度対応する概括指標であることから，**図-7** に示される特性は，豪雨という極端現象の予測結果のわずかなズレが，適応策検討の前提に大きなズレをもたらしうることを示すものと言える．

こうした伝播特性をより明確に把握するために，「変化の伝搬」にも着目するとよい．すなわち，以下の関係を調べることである．

$$\frac{\Delta r}{r} \rightarrow \frac{\Delta Q}{Q}, \frac{\Delta W}{W}, \frac{\Delta(1/T)}{(1/T)} \qquad \cdots(6)$$

ここでΔは気候変動による変化分を表し，したがって上式の各項は「気候変動による変化率」を表す．**図-8** は，洪水ピーク流量，河川整備労力，氾濫可能性

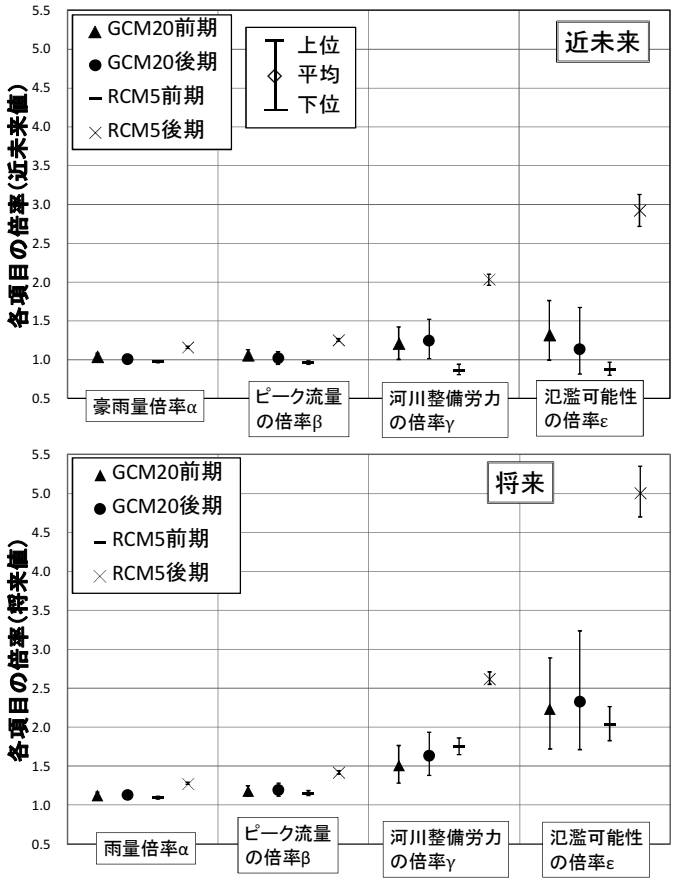


図-7　α，β，γ，εの中央値，上位・下位値の全体傾向
（全国一級水系の単純平均で表示）
＜上：近未来，下：将来＞

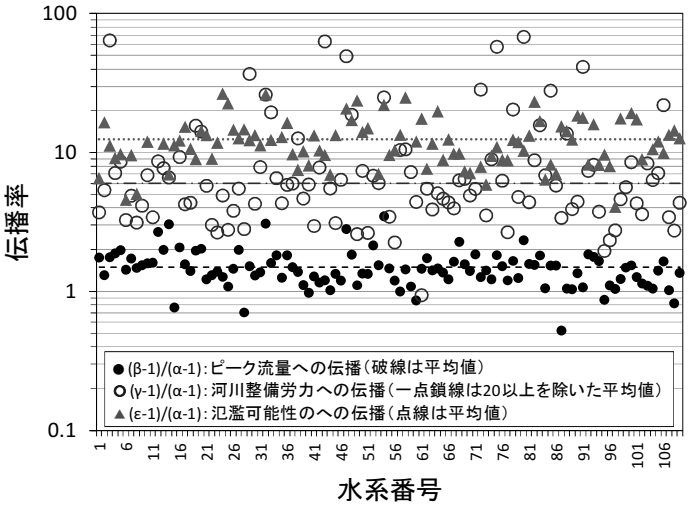


図-8　豪雨量の変化が洪水ピーク流量，河川整備労力，氾濫可能性の変化にどう伝播するか？

※将来；4 気候変動予測モデルの結果から

それぞれの変化率（それぞれβ-1，γ-1，ε-1 で表される）を豪雨量の変化率（α-1）で割った値を「伝播率」として，１級水系すべてについてプロットしたものである．ここでは４気候変動予測モデルの将来の出力を用いている．この図から，伝播率は水系によってかなりばらつくものの，洪水ピーク流量，河川整備労力，氾濫可能性の間には明確な差が存在することがわかる．すなわち，豪雨量変化から洪水ピーク流量変化への平均的伝播率が 1.5 程度であるのに対して，河川整備労力変化への伝播率は 6.0 程度，氾濫可能性変化への伝播率は 12 程度となっている（いずれも全水系の単純平均値；ただし河川整備労力に関する伝播率については 20 以上の水系を除いて平均）．以上のことは，全体的傾向として，豪雨量の変化が洪水ピーク流量の変化には 1.5 倍に，河川整備労力の変化には 6 倍に，氾濫可能性の変化には 12 倍に増幅して現れることを示すものである．

２．６　翻訳結果３－豪雨量変化予測に要求される精度を適応策検討の側から考えるという視点

議論を単純にするため，上記の平均的な伝播率に基づいて，洪水ピーク流量，河川整備労力，氾濫可能性それぞれの変化率と豪雨量の変化率との関係を図化したのが**図-9** である．この図を縦軸から横軸の方向に読むことによって，洪水ピーク流量，河川整備労力，氾濫可能性に与える気候変動影響を一定の精度をもって把握しようとする時に，豪雨量変化率に対しどの程度の精度を求めることになるかを考えることができる．たとえば，氾濫可能性および河川整備労力の変化率推定が±0.5 以内のズレでよしとするならば，それでも豪雨量変化率に求められる許容誤差はそれぞれ±0.04 と±0.1 程度以下となり，もしこれを±0.1 以内に抑えようとする場合，それぞれ±0.01 と±0.02 程度以下にしなければならないことになる．後者は，気候変動による豪雨量倍率α の誤差をそれぞれ±1%と±2%程度以下に，前者であっても，それぞれ±4%と±10%程度以下に抑えることに当たる．こうした要求水準は，**図-6** に示したα 値の状況に照らし，気候変動予測が急速に発達してきている今日においてなお高いハードルと言える．

以上のことは，しかし，豪雨などの極端現象に関する気候変動予測の営為と成果の価値を減じることにはならない．豪雨生起確率の分析について，気候変動予測だけについて厳密に議論することもフェアとは言えない面がある．ここで重要なことは，気候変動による豪雨予測の精度が顕著に向上してきている一方，それを治水の適応策に直接関係する指標に翻訳すると，**図-7** と**図-8** に示した特徴が一因となって未だ精度不十分な状況

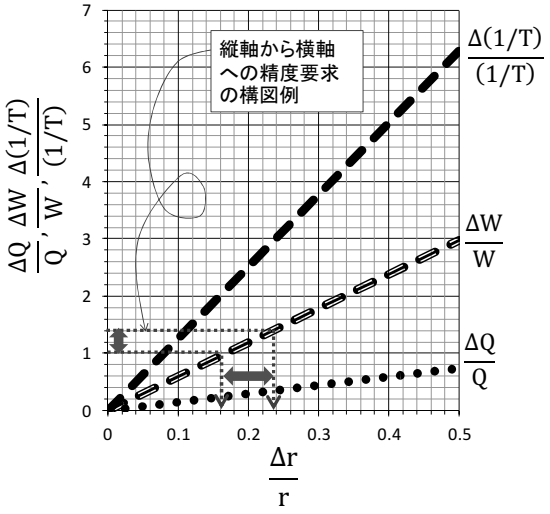


図-9　洪水ピーク流量，河川整備労力，氾濫可能性それぞれの変化率と豪雨量変化率との関係の代表例示

にあると理解することであろう．そしてこのことは，新しい高度なモデルによる気候変動予測結果が出るたびに一喜一憂するのではなく，予測精度の向上の根幹的トレンドを適切に把握し，信頼性のより高い情報とそうではない情報を適切に使い分けるというあるべき態度につながる．さらには，気候変動予測の進展を待つだけでなく，適応策を検討するために具体的にどのような情報（精度を含む）が必要となるかを，治水方策の実務に近い側から積極的に発信していくというスタンスの重要性に行き着くはずである．

３．治水方策の気候変動適応に関して日本が置かれた大局的状況

３．１　豪雨量変化から治水方策に関する諸項目への伝播はなぜ増幅するか？

本章では，２章に述べた結果も踏まえ，気候変動適応に関して日本が置かれた大局的状況を現時点でどう見るか？を考えていく．その本題に入る前に，上述の増幅という特性が現れる理由を掘り下げてみる．その吟味は，日本が置かれた状況の一般性と個別性の分析に役立つ情報をもたらす.

（１）α→β における増幅について

降雨の時間変化パターンを変えずに降雨強度を全体的に増大させると，当然洪水ピーク流量も増大する.その際の降雨量と洪水流量ハイドログラフとの間に「非線形の応答関係」が見られる，すなわち降雨量の変化（増大）率よりもピーク流量の変化（増大）率が大きくなる特性が現れることはよく知られている（たとえば，山田 2003）．伝播率 1.5 という数字も種々の分析で議論されている数字と整合している．本講演で紹介しているのは，実測値による検証を経て実務で用いられてきた降雨―流出計算による結果に基づくものであり，こうした一般的に見られる非線形性が α から β への伝播にも現れたと言える．なお，この非線形性には，気候変動による豪雨量増大が洪水調節施設の機能発揮に限界をもたらし（計画規模など一定の洪水規模に対して効果を適確に発揮するように諸設定がなされていると考えられることから),豪雨量のさらなる増大により洪水調節効果が減退したことによる影響が付加されている可能性がある.いずれにしても，気候変動による豪雨量増大は，降雨－流出関係の非線形性という水文流出現象の基本的性質に改めて焦点を当てさせることになる.

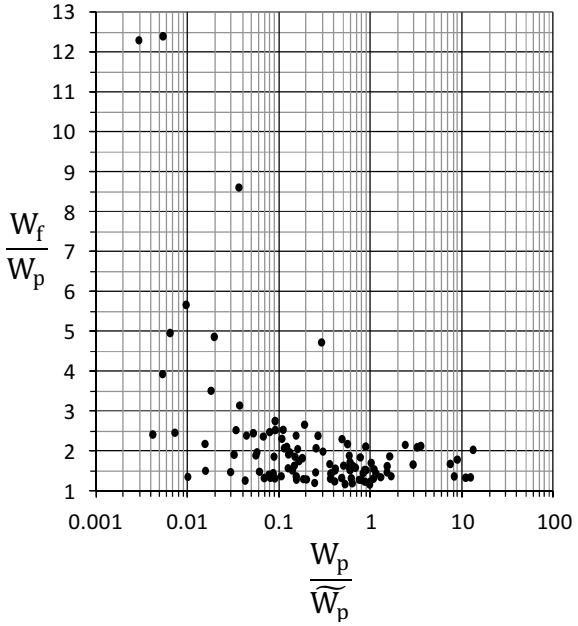


図-10　W_f/W_p と W_P との関係（後期 GCM20・将来・中位の結果を全水系についてプロット）

※W_P は全水系の単純平均で基準化

（２）α→γ における増幅について

α→β すなわち豪雨量変化から洪水ピーク流量変化への平均的伝播率が 1.5 程度であるのに対して，α→γ すなわち河川整備労力変化への伝播率が

6.0 程度と一気に大きくなるのはなぜであろうか？

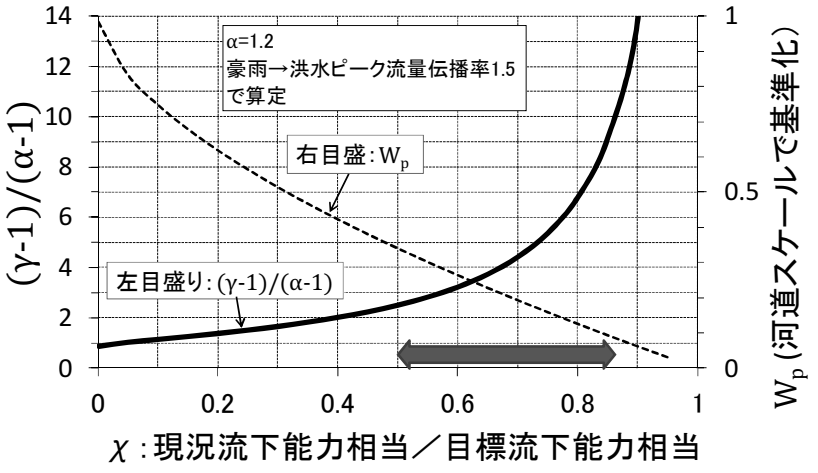
これを考える前段として，W_f/W_p と W_p との関係を全水系についてプロットしたものを**図−10** に示す（気候変動予測の計算結果は後期 GCM20・将来・中位）．なお横軸の W_p は全水系の単純平均である $\widetilde{W_p}$ で基準化している．この図から，W_p が非常に小さい一部の水系について W_f/W_p が顕著に大きくなる傾向が見られるものの，全体としては W_p の小さい一部の水系が W_f/W_p を全体的に押し上げているという状況ではなく，横軸 0.05〜10 という幅広い範囲において W_f/W_p が 1.2〜2.5 ぐらいの間にかたまっていることがわかる．

ここで，**図−4** に示した W 算出の定義に立ち戻って，W_f/W_p の決まり方を原理的に考えてみる．式(7)は，河道における流れを矩形・縦断方向一様断面における等流で表現し，W_f/W_p に当たる量を近似的に導いたものである（藤田ほか 2011）．

$$\frac{W_f}{W_p} - 1 = \gamma - 1 = \frac{\{p(\alpha-1)+1\}^{\frac{3}{5}}-1}{1-\chi^{\frac{3}{5}}} \qquad \cdots(7)$$

ここで，χ は治水目標上の流下能力に対する現況流下能力の比であり，治水整備率に相当するパラメータとして導入したものである．また，p は，豪雨量変化から洪水ピーク流量変化への伝播率(β-1)/(α-1)である．ここで p に上記の 1.5 を，α には 1.2 を与え，豪雨量変化から河川整備労力変化への伝播率(γ-1)/(α-1)を χ との関係で表すと，**図−11** のようになる．この図によれば，河川整備労力変化に関する伝播率は治水整備率に対応するパラメータ χ に強く依存する．すなわち，治水整備が進捗している状況では，治水目標に到達するための残りの整備労力が相対的に小さいので，気候変動による豪雨量増加は γ に増幅して現れる．逆に治水整備がほとんど進んでいない状況では，**図−11** において χ=0 の時，(γ-1)/(α-1)がほぼ 1 となっていることからわかるように，豪雨量変化から河川整備労力変化への有意な増幅は見られなくなる．河川整備労力変化への伝播率の主なばらつき範囲が 2.5〜9 程度となっていること（**図−8** 参照），**図−11** においてこれに対応する χ 値が 0.5〜0.85 辺りであること，これが日本の一級水系における治水整備の進捗度合いと大局的には整合的であると考えられることから，**図−11** で表現された(γ-1)/(α-1)〜χ 関係は，細部はさておき本質を大まかには捉えている可能性がある（このことのさらなる精査を通じ確認していく必要はある）．

さて，とりあえず**図−11** の妥当性を認めて議論を進めるならば，治水施策における気候変動適応の難度の構図を考える上で，治水整備率が重要な因子の１つ



図−11　豪雨量変化→河川整備労力変化の伝播率と治水整備進捗度との関係についての考察図

になるという見方に行き着く．これは以下のようである．**図-11** に併記した W_p（右側の縦軸がスケール）と χ との関係も合わせて参照されたい．なおこの図の W_p は同一水系について表現したものであり，異なる水系の W_p をプロットした**図-10** とは趣旨が異なることに留意されたい．

①治水整備がまだ初期段階の場合

χ が 0 に近いと表現され，豪雨量変化の河川整備労力変化への増幅はほとんど見られない．したがって，この場合，気候変動影響と言うよりは，W_P すなわち残している（あるいはこれから本格化する）河川整備労力そのものの大きさが支配的になる．

②治水整備がほぼ完了している場合

χ 値が 1 に近い状況である．**図-11** に示されている通り上記の増幅が非常に大きくなるものの，W_P が既に非常に小さくなっているので，大きな γ 値が問題になるのではなく，W_f そのものが適応の難度を支配することになる．

③治水整備の進捗が両者の中間である場合

まだ相当の W_P を残している一方，γ 値も**図-11** に示す通りかなり大きくなる．この場合，適応の難度が γ と W_P の両方から支配されることになる．

大局的に見ると，日本の河川の多くは③の状況に当てはまるのではないか．となれば，このことは，γ 値が大きな値を取ることがかなり“こたえる”状況にあり，したがって豪雨量変化から河川整備労力変化への伝播率が大きい（増幅の度合いが大きい）ことに敏感にならざるをえないことを意味する．

以上のことは，さらに，気候変動が治水施策に及ぼす影響を考える際に，その水系における治水整備の進捗度合いによって影響の仕方が異なることも踏まえた整理・分析が重要になることを示唆している．豪雨量の増え方だけでは適応の難度がつかめないことを踏まえ，**図-2** に示した気象・水文から地文への伝播の仕方を把握し，それと当該河川水系における諸状況・特性（治水の歴史的経緯を含む）との関係に目を向けることが大事であり，またそれゆえに，この検討段階において河川水系それぞれの個別性が重要度を増すということである．こうした観点は，日本を含む諸外国の適応策を比較検討する際にも持っておくべきではないか．

（３）α→ε における増幅について

豪雨量変化から氾濫可能性変化への伝播率が前述のように 10 のオーダーになることについては次のように理解できる．ある継続時間の降雨量 r と超過確率年 T との関係を，式形が単純なフェア式タイプにより次のように表現する．

$$r = \theta \cdot T^{m} \qquad \cdots(8)$$

気候変動が降雨に与える影響が θ のみに現れるとすると，現在気候（添え字 p），将来気候（添え字 f）について以下の関係が得られる．

$$\frac{\frac{1}{T_f}}{\frac{1}{T_p}} = \alpha^{\frac{1}{m}} \cdot \left(\frac{r_p}{r_f}\right)^{\frac{1}{m}} \qquad \cdots(9)$$

気候変動後も変動前と同じ降雨量となるために超確率年をどれだけ減じる必要があるか？

は，上式で $r_p/r_f=1$ と置いた次式の関係から求めることができる．

$$\frac{\frac{1}{T_f}}{\frac{1}{T_p}} = \alpha^{\frac{1}{m}} \quad \cdots(10)$$

日本の降雨特性に対応した m 値は一般に 1 を大きく下回り，0.2 前後になることが多い（たとえば，土木研究所 2001）．m=0.2，α=1.3 を与えると，超過確率年比$(1/T_f)/(1/T_p)$は 3.71 となり，これに対応する伝播率はおよそ 9 となる．

以上のように，式(8)に代表される降雨量～超確率年関係において，超過確率年が降雨量変化に敏感に応答する特性をそもそも持つことが，豪雨量変化から氾濫可能性変化への伝播率が上記のように大きな値を持つ基本的な理由である．

３．２ 「相当のインパクトが見込まれる．水系ごとに差がある．そして不確実性も伴う．」という課題

以上に示してきた内容を踏まえると，**図-7**，**図-8**，**図-9** に示した特性から，治水方策に与える気候変動の影響度が全体としては相当に大きくなる可能性が高いこと，同時に，**図-5**，**図-6** の特性からわかるように，その影響度の予測に相当に大きな幅がある，すなわち不確実性があることを認識した上で，気候変動に関わる適応策検討を行わなくてはならないと言える．そして，このことには 3.1 で示したように，自然的特性と人間が積み重ねてきた営為に関わる特性がモザイク的に関係している．そのために，気候変動による豪雨量の変化以上に，河川水系ごとに影響の出方が違ってくる．このことは個々の水系の状況把握の重要性を改めて示すものである．そして，施策を立案・遂行する立場から見ると，予測の信頼性がさらに向上して α の推定幅が十分小さくなる状況，また，モデル更新の度に各地域の α 値が違ってくる状況から脱却することが好ましい．しかし，一方，**図-7**，**図-8**，**図-9** に示されるような特性と，地球温暖化に伴う極端かつ低頻度事象の変化予測の本質的困難さを踏まえると，この先の極端現象変化予測の急速なレベル向上を引き続き期待する一方で，それをただ待つだけではなく，並行して極端現象の変化予測に実務上無視し得ない有意な幅があることを前提とした種々の検討を行うことが大事になってくる．このために，予測の不確実性を前提にした施策の“取り組み方”に関する議論を本格化させることが求められる．

４．諸外国の適応策の概況

ここで諸外国の適応策に触れておく．ここでは，政府の適応策として先進的な取り組みがなされている代表として，オランダ，英国，ドイツの事例を取り上げる．内容は全て各国政府から出された資料に基づいている．冒頭に述べたように，気候変動による降雨量増大に直接関わる治水施策に焦点を絞っている．なお，国総研の気候変動適応研究本部（http://www.nilim.go.jp/lab/kikou-site/20info.html）においては，諸外国の気候変動適応策についての情報収集・分析を定期的に行っており，以下に述べる内容も，その直近の報告（板垣，吉谷 2012）からの抜粋である．根拠資料を含む詳細はそちらを参照されたい．

４．１　オランダの事例

オランダでは，2006 年に KNMI（オランダ王立気象研究所）が 2050 年までの 4 つの気候シナリオを発表している．気候変動による外力増加については次のような見込みが提示されている．

・2100 年までに 1990 年比最大 85cm の海水面上昇，

・ライン川ロビス地点の 1/1,250 洪水流量が 2100 年までに 17,000～22,000m^3/s に増加（現在の設定は 16,000m^3/s）．

また，デルタ委員会は 2008 年に，2050 年までに海水面が 0.2～0.4m，2100 年までに 0.65～1.3m 上昇と予測している．ライン川の洪水流量の増加予測には大きな幅があるが，現状では上流のドイツで氾濫することを見込めることから，オランダまで流下しうる洪水流量を 18,000m^3/s としている．これは，気候変動による洪水流量増の予測の幅を，河川の物理的条件を踏まえ小さくしている例と言える．ただし今度は，上流ドイツにおけるライン川改修が，不確実性をもたらす新たなファクターとして考慮対象となってくる．

2001 年に，その時までの洪水生起状況を踏まえ，ライン川ロビス地点での計画対象洪水流量が 15000^3/s から 16000^3/s に引き上げられ，この増加分に対応するための河川整備等を 2015 年目途に完了させることになっている．これは 3.1(2) で述べた②の状況に当たる．その先の洪水流量増への対応については引き続き種々の検討がなされているようである．

その中で，“デルタ堤防”が具体的な適応策の 1 つとして打ち出されている．デルタ堤防は，通常の堤防よりも高く，幅広に，（越水に対し）強く造られ，その導入により越水に際しても突然の制御不能な破堤を実質上無くすことで越水時の破堤氾濫による莫大な被害を大幅に軽減し，気候変動による脆弱性の増加を抑えることを狙っている．都市の再開発と機能を共有することも想定されており，日本のスーパー堤防と共通する部分が多い．

４．２　英国の事例

英国では，2008 年に制定された気候変動法が，2050 年までに英国が達成すべき温室効果ガス排出削減のための長期目標および気候変動影響適応のために取るべき手順を規定している．この中で，全国の気候変動影響に関するリスク評価を 5 年ごとに行い，国家適応プログラムを作成し，それも同じく 5 年ごとに見直すことを定めている．このリスク評価では，UKCP09（2009 年英国気候予測 : 気象庁ハドレーセンター等が 2099 年までの気候を予測. 従来の英国の気候シナリオよりも空間･時間的により詳細な情報を提供するとともに，不確実性に係るより多くの情報を提供）の予測結果を利用して 2100 年までの評価が行われ，700 を超える気候変動によるリスクから優先度に基づき選定された 100 以上のリスクについて，影響の大きさと確からしさの観点から分析がなされている．

適応策に密接に関係する取り組みとしては，環境食料農村地域省（Defra）が 2006 年の段階で，イングランドおよびウェールズ地方を対象に，気候変動適応の検討対象とする海面上昇量やピーク降雨強度・洪水流量の増加量を時期ごとに示した上で，公的資金による洪水および海岸管理に関する事業の計画策定や評価などにおいて，提示された量を基本的に考慮することとし，その内容を示した手引きを発出している．ここで，海面上昇については，地盤沈下込みで，各地域の「見込んでおく量（allowances）」が時期別の上昇速度の

形で示されている．一方，ピーク降雨強度・洪水流量については，「指標となる感度範囲（Indicative Sensitivity Ranges)」が時期別に増加率（前述の α-1，β-1 に対応）の形で次のように示されている．

・ピーク降雨強度

1990-2025：+5%，2025-2055：+10%，2055-2085：+20%，2085-2115：+30%.

・ピーク流量

1990-2025：+10%，2025-2115：+20%.

ここで，ピーク降雨強度を用いるのは小流域が望ましいとしている．また，ピーク洪水流量の増加率については，さらに検討が必要であることを認識した上での実務的な推奨値であり，テムズ川などの大規模な流域については詳細な範囲設定が別途なされるべきとしている．

ここで，「見込んでおく量」と「感度範囲」の違いは確からしさの違いに基づいている．海面上昇量は確からしさがより大きいため，基本案や代替案の策定にストレートに算入するが，ピーク降雨強度・洪水流量の増大については確からしさが相対的に小さいため，提示された感度範囲を用いて基本案や代替案について感度分析を行い，その結果を踏まえた対策案の選定，最適な対策実施時期の検討を求めている．

４．３　ドイツの事例

ドイツの気候変動適応策は地方（州）によりだいぶ異なり，いくつかの地方では気候変動適応策決定に直結する文書を発出済みである一方，いくつかの地方（州）では，より効果的な政策決定のための調査を重要な地域で実施している段階にある．その中で，ドイツのバーデン=ビュルテンベルク，バイエルン，ラインラント・プファルツの各州では，新しい洪水防御施設計画時に 2050 年までの気候変動の影響を気候変動因数として設計流量算定時に考慮する（この因数を既往計画の洪水流量に掛ける）ことになっており，この因数が地域・洪水規模別に設定されている．実際の河川整備時には，従来の設計流量に対応する高さの堤防を整備するとともに隣接地を確保し，必要な時に容易に堤防のかさ上げ・拡幅を可能とすること，橋梁については，はじめから気候変動因数を考慮した設計流量に対応して計画すること，擁壁については，将来かさ上げが必要になっても困難が生じないよう設計することなどが合わせて示されている．

５．日本における気候変動適応策検討におけるポイントー技術的課題を中心に

前章までの内容を踏まえ，現時点で考えられる適応策検討に関わるポイントについて，技術的観点を中心に以下で論じる．

●従前の治水目標を気候変動下においても引き続き達成するための技術的手段が十分用意されているか？

これは，**図-5** や**図-6** に示す外力（豪雨量）の増大，**図-7** に示す増幅特性を覚悟した上で，従来設定されていた治水目標に対して河川氾濫を起こさせないという状況を確保しようとしたとき，そのための河川整備に関する技術的手段を現時点でどの程度持ち合わせているか？　その限界が認識できているか？という論点である．代表的例示をするなら，2-4

割のピーク流量増を吸収するために，現在の計画よりも河道の流下能力をさらに増大させること，あるいは洪水ピーク流量の低減をさらにはかることが必要となり，したがって，河道設計や洪水調節に関わる技術的観点から，その可能性と限界を把握することが適応策検討の土台の 1 つとなる．

流下能力の増大というと，大規模な引堤等に頼らなくて済むという実行可能性の観点から，また，しばしば数字上は流下能力増が説明できてしまうことから，河道の掘削という手段に傾きがちであるが，流下能力の 2–4 割増に見合う河道掘削をさらに行うことが広い意味の河川技術として本当に妥当であるのか・どこまで可能であるのか（藤田 2006），河道設計・管理上の根本的な問い（福岡 2010）が改めて提示されていると言えよう．

●河川整備の手段の拡充

こうした可能性と限界の把握は，逆に手段拡充の必要性を具体的に認識させることにつながり，それは気候変動適応のための新たな技術展開につながっていく．河道設計の考え方を新たに構築する取り組み（福岡 2010），降雨予測などの新技術を活用して既存ダムの洪水調節能力を高める方法の追求（鳥居 2012），河道管理の合理化をはかる技術的枠組みの検討（大沼ほか 2009）など，先端技術を突破口にするものから，確立されたと思われていた技術体系のリノベーションを目指すもの，さらには従来技術の地道な改良の積み重ねまで，様々な切り口からの技術展開が期待される．総合治水を社会技術と融合させて，流域治水として洪水ピーク流量の制御を住民ぐるみで行っていくという新たな取り組み（島谷ほか 2010）も，手段拡充の新機軸と言えよう．これらの成果が適切に組み合わされ集積したときに，全体として気候変動影響をどの程度吸収できるかを，適用に際しての留意事項とともに評価していくことが大事になる．

●設計以上の外力を受けた治水施設（群）の（システムとしての）機能発揮・喪失状況に対する理解増進と必要な対応策の検討

このような手段の拡充が精力的に行われたとしても，従来よりも大きな外力が治水施設に作用し，ある場合には設計上の外力を上回ってしまうことが気候変動によって起こりやすくなる状況を現気候以上に考えざるを得ない．したがって，適応策を考えるに際して，施設の「壊れ方」と「機能維持→喪失の過程」を理解し，それを表現する技術が求められる．ここでは，防災・減災施設群のシステムとしての総体的な機能発揮・喪失に関わる挙動を分析することも大事な課題になる．以上の内容や位置づけについては昨年度講演（藤田 2011）の 4.2.4 を中心に詳述しているので，必要に応じ参照されたい．

このポイントを適応策という観点からとらえた場合，外力が増大するために生じる可能性が増大すると考えられる破壊および機能喪失事象の中で，特に対処を考える必要性が高いものを特定し，対処法を検討することが大事となろう．このためにも，少なくとも気候変動により起こりうる外力増の範囲については優先的に，その作用が治水施設（群）および機能発揮に及ぼす影響とそれにより起こりうる被害等を体系的に調べることが重要である．

●災害の起こり方のコントロール（緩和，靭性の付与）というアプローチの強化

そして，この議論の延長上には，この標題のポイントが浮かび上がる．これについては，

講演者の昨年度の講演「リスクを意識した治水技術体系の展望と課題」（藤田 2011）の主題であるので，ここで再度述べることは控える．重要なことは，気候変動がもたらす外力増が否応なしに上記のアプローチの強化を促進させる明確な因子になっており，また，このアプローチが適応策検討全般に関わってくるという点である．このことは，いわゆる超過洪水への対応と気候変動適応が相互に密接に関係していることを改めて示す．

●防御レベルの後退という事態へのスタンス

気候変動下での治水において特徴的なことの１つは，ほうっておくと，土地利用の高度化などの人間社会の側に発する直接要因とは無関係に，時間とともに災害を受けやすくなるという状況が生じる得ることである．こうした事態は，少なくとも近代化・都市化・産業化が進んだここ一世紀半の間には未経験のものと考えられる．今までは，防災施策の進展により，長らく，防御レベルが時間とともに増大するのが基調であって，それによって人間の側の災害対応能力が劣化する側面があることは（それへの対処法とともに）しばしば議論されてきたが，災害の危険度が時間とともに減少するトレンドから増大基調に転じ継続する状況での人間社会の応答については未知な部分が多いのではないか．こうした課題認識も踏まえ，時間とともに防御レベルが後退する懸念に対して，最低限，後退はさせないのというスタンスで臨むかなどが適応策上の１つの論点になるかもしれず，それは気候変動影響が現れる（事態変化の）スピードへの対抗のスタンスを決めることにもなる．

●不確実性への対応

3.2 に述べた「相当のインパクトが見込まれる．水系ごとに差がある．そして不確実性も伴う.」の中で，外力増やその治水施策への影響度が少なからず不確実性を伴うことは，気候変動適応の特質を代表するものと言える．このことが適応策検討にもたらす意味は複雑であるが,後悔が生じる構図の単純な説明例を持ち出し,議論の若干の整理を試みたい.

図-12 は，**図-9** のうち，河川整備労力の変化率だけを抜き出して，豪雨変化率との関係を模式的に表示したものである．豪雨変化率の予測には幅が設定されている．ここで，豪雨予測幅の中央値を選んで，それに対応する整備労力の増分を加えるという適応策を実施したとする（図中の○印）．その後，気候変動が起こり，実際の豪雨量変化率が大きい側に振れたとすると，○の右側の点線のゾーンで示される「もっとやっておくべきだったと悟る」後悔や，二重線のゾーンで示される「ちょっとした労力増をケチったことのツケの大きさを悟る」後悔が生じ得る．逆に，実際の豪雨量変化率が小さい側に振れたとすると，○の左側の二重線で示される「やりすぎて無駄だったと悟る」後悔が生じ得る．前二者の後悔を避けようとすると，○の設定位置を予測幅の右方にずらす（整備労力の増分を大きくする）ことになるが，その場合，三番目の後悔が生じる可能性が増大してしまう．

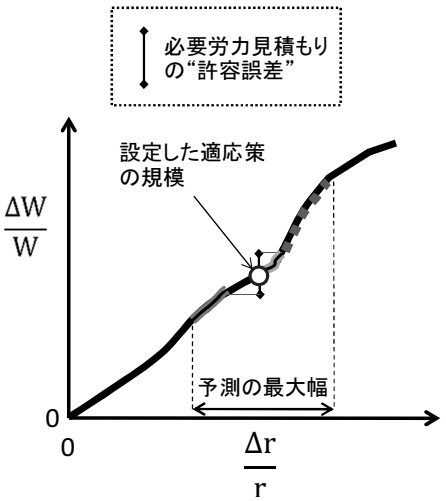


図-12　予測の幅により“後悔”が生じる構図の説明例

この説明をもう一段実際的なものにするために，当該適応策が目標とした外力の実際の出現が予測からずれた時に（特に大きい方に），どのような被害が生じるかという視点を加えることになる．たとえば，気候変動影響は，想定被害～豪雨生起の超過確率年の関係を表す曲線が ΔT 分左にずれることを意味する（図-13 参照）．ここで，この曲線の立ち上がりが急であれば（図中のⅠ），気候変動影響による被害増大の程度，河川整備に関わる適応策の投入量が結果として過小だったことによる被害増大の程度のどちらも大きくなる．このよう場合には，少々無駄になる可能性があっても，予測幅の中でより安全側の外力増想定が選択される方向が考えられる．以上のことは，また，想定被害～豪雨生起の超過確率年の曲線の立ち上がりが緩いことが（図中のⅡ），換言すれば，施設群の設計外力を超えても被害が徐々にしか増えない構造あるいはシステムを具備していることが，不確実性への対処にも有利となることを示しており，重要なポイントである．

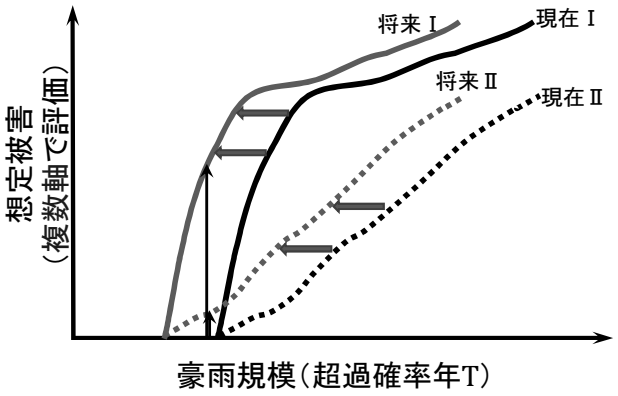


図-13　被害～豪雨規模関係における気候変動影響
※関係を表す曲線の立ち上がり方の違いが何をもたらすかの説明．上向き矢印は被害の代表比較．

●モニタリングと順応的対応のあり方

不確実性への対処法として，・気候変動の出方がはっきりした時点で適応策を講じる，・適応策を将来時点で実施することが種々の点で高コストを伴う，あるいは時間を要しすぎて適応に間に合わないことが考えられる場合については，そうしたことが生じにくくする事前措置を予め施しておく，というアプローチが当然有力となる．これが実効的となるためには，事前措置のコストを（適応策本体に比較して）小さくできること，気候変動を探知してからのアクションで間に合うことの担保，気候変動を的確に探知できること，が要件となる．このうち３番目については，日本の治水目標水準のようにある程度大きな豪雨（したがって低頻度）が対象になっている場合に，たとえば，観測されたデータから低頻度事象の生起の変化を適応策が間に合うタイミングで探知できるのか？という技術課題に突き当たる．ここが，“日常的現象”の気候変動による変化を扱う場合との本質的な違いと言える．これは，非定常性(non-stationarity)が進行したとき，低頻度の極端現象についてどのような手法で計画や管理をすべきか，という重要な技術的課題である（竹内 2010）．この分野の科学的進展を評価の上，計画での利用を検討することは適応策検討において重要な位置を占める（吉谷 2012）．適応策に関わる判断への活用を目的とする気候変動のモニタリング戦略は，こうした観点を踏まえることがポイントとなる．

いずれにしても，外力が内包する不確実性を完全に除去するのは困難と考え，外力の作用（大きさ，性質，タイミングなど）を幅広に捉えて「シナリオ分析」を行い，そこから適応策実施について総合的な判断を下し，それを継続的にチェックしていくという基本的

フレームの構築・実践が求められていると言える．

６．おわりに－気候変動を奇貨として

気候変動は治水施策の推進にとって重荷ではあるが，長年にわたり培ってきた治水に関わる技術政策を進化させる重要な機会とも捉えるべきである．気候変動という新たに（あるいは，いよいよ）認識すべき流域への負荷という課題を奇貨として，長らく持ち越していた根本的課題の解決を図るという視点も持ちつつ，我々が流域圏単位で本質的に保持すべきシステムを明示し，それを実現する方策を積極的に提示するというスタンスを打ち出すことで，靭性を持った国土づくりを支える技術が活発に展開されることを期待したい．

【参考文献】

板垣修，吉谷純一(2012)：米英蘭の水災害・水資源管理に係る気候変動適応策に関する事例調査，国総研気候変動適応研究本部．
http://www.nilim.go.jp/lab/fdg/info/research-results/itagaki-kikouhendou.pdf

大沼克弘，武内慶了，今村能之，藤田光一，西本直史，平井新太郎，宮内信(2009)：セグメント２河道を対象とした河道掘削後の戦略的河道管理に関する研究，土木学会水工学委員会河川部会，河川技術論文集，第 15 巻，pp.291-296．

柏井条介，土屋修一，石神孝之: 気候変動による豪雨時の降雨量変化予測(2008)：国土技術政策総合研究所資料，第 462 号．

鬼頭昭雄（研究代表者）(2012)：超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究，21 世紀気候変動予測革新プログラム，平成 23 年度研究成果報告書，pp.17-87．

島谷幸宏，山下三平，渡辺亮一，山下輝和，角銅久美子：治水・環境のための流域治水をいかに進めるか？(2010)，土木学会水工学委員会河川部会，河川技術論文集，第 16 巻，pp.17-22．

社会資本整備審議会（2008）：水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について（答申）．http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/kikouhendou/pdf/toshin.pdf

竹内邦良(2010)：連邦水関係機関共催「非定常性，水文頻度解析，水マネジメント」ワークショップ参加報告，河川 763 号，日本河川協会．

土木研究所（2001-）：アメダス降雨確率解析プログラム．
http://www.pwri.go.jp/jpn/seika/amedas/top.htm

鳥居謙一(2012)：ダム管理の高度化に向けて，土木学会水工学委員会・海岸工学委員会，水工学シリーズ，12-A-9．

服部敦，板垣修，土屋修，加藤拓磨，藤田光一(2012)；気候変化の治水施策への影響に関する全国マクロ評価，土木学会水工学委員会河川部会，河川技術論文集，第 18 巻，pp.481-486．

福岡捷二(2010)：治水と環境の調和した治水適応策としての河幅，断面形の検討方法，土木学会水工学委員会河川部会，河川技術論文集，第 16 巻，pp.5-10．

藤田光一(2006)：河道変化を治水・環境保全の接点においた川づくりの考え方，2006 年度(第 42 回)水工学に関する夏期研修会，土木学会水工学委員会・海岸工学委員会，A-8．

藤田光一，服部敦，菊森佳幹，野口賢二，土屋修一（2011）：気候変動に伴う河川管理等への影響評価，21 世紀気候変動予測革新プログラム 超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究（課題代表者：鬼頭昭雄），平成 22 年度研究成果報告書，pp.76-88．

藤田光一(2011)：リスクを意識した治水技術体系の展望と課題，平成 23 年度国土技術政策総合研究所講演会講演集，国土技術政策総合研究所資料，第 655 号，pp.91-108．

山田正(2003)：山地流出の非線形性に関する研究，土木学会水工学論文集，第 47 巻，pp.259-264．

吉谷純一(2012)：水災害における適応策に関する研究動向，九州技報，第 51 号，pp.11-15．

Linsley, R.K., M.A. Kohler, and J.L.H. Paulhus (1949): Applied Hydrology, McGraw-Hill Book Company, Inc., pp. 560-561, 1949.

深層崩壊～その実態と対応～

危機管理技術研究センター長

後藤　宏二

深層崩壊～その実態と対応～

危機管理技術研究センター長　後藤　宏二

1. はじめに

平成 9 年（1997 年）鹿児島出水市針原川、平成 15 年（2003 年）熊本県水俣市集川、平成 17 年（2005 年）宮崎県鰐塚山山系など、近年、深層崩壊による大規模な土石流が発生し下流域に甚大な被害が発生している。また、平成 23 年（2011 年）9 月には台風 12 号にともなう豪雨により、紀伊半島において多数の深層崩壊が発生し、三重県、奈良県、和歌山県では、土砂災害により死者 43 名、行方不明者 13 名、全壊家屋 98 戸、半壊家屋 46 戸に達する激甚な被害となった（国土交通省砂防部調べ）。台風 12 号災害では、深層崩壊とみられる崩壊が 72 箇所確認され、深層崩壊にともなう 5 箇所の河道閉塞（天然ダム）（以下、「天然ダム」という。）において、越流・決壊による土石流災害のおそれが急迫しているとして、改正土砂災害防止法に基づく緊急調査が実施された。

国土交通省では、平成 22 年（2010 年）8 月に「深層崩壊推定頻度マップ」、平成 24 年（2012 年）9 月に「深層崩壊渓流レベル評価マップ」、「深層崩壊跡地密度マップ」を公表するなど、深層崩壊に関する調査を進めるとともに、警戒避難体制の強化に向け、深層崩壊の推定頻度が特に高い地域を中心に、大規模な崩壊の発生を検知するセンサーの設置を進めているところである。しかし、深層崩壊の発生要因、規模・影響範囲の予測等については未解明の部分も多く、深層崩壊による被害の防止・軽減に向けた、ハード・ソフト対策を検討する上での課題となっている。

本稿では、近年の大規模土砂災害を踏まえて、深層崩壊の発生実態およびこれまでの取り組みについて報告するとともに、今後、適切かつ効果的な対策を立案するにあたって、解決すべき技術的課題等について紹介する。

2. 深層崩壊の実態

2.1　深層崩壊の特徴

砂防用語集では深層崩壊を、「山崩れ・崖崩れなどの斜面崩壊のうち、すべり面が表層崩壊より深部で発生し、表土層だけでなく深層の地盤までもが崩壊土塊となる比較的規模の大きな崩壊現象」と解説している。また、（独）土木研究所の「深層崩壊の発生の恐れのある渓流抽出マニュアル（案）」では、深層崩壊の特徴として以下の３点を挙げている。

①斜面を構成する土塊は崩壊と同時にバラバラになって移動するか、あるいは原型を留めてすべり始めた後にバラバラになる。

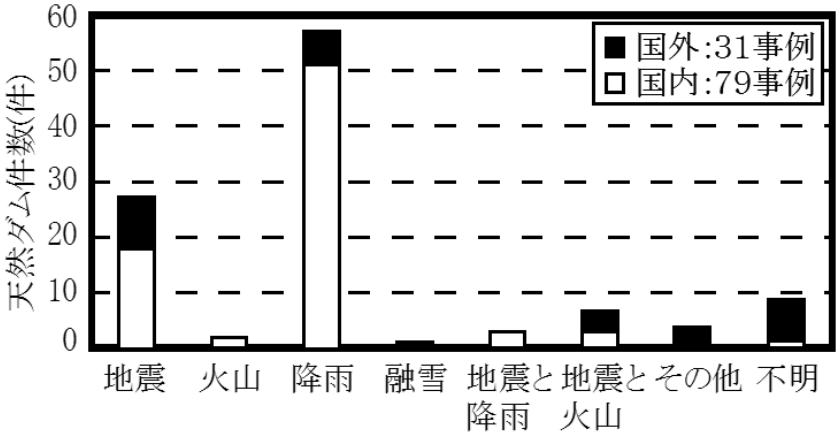
②崩壊土塊（土砂）は高速で移動する。

③崩壊土塊（土砂）の大部分は崩壊範囲の外へ移動する場合が多い。

深層崩壊による土砂災害は、一般的な土石流・がけ崩れ災害と比べると、発生頻度は低いといえる。しかし、崩壊規模が大きいため、一度発生すると被害が甚大化するおそれがある。また、深層崩壊は降雨のピーク後に発生する場合があると指摘されており、降雨の

減少をもって、崩壊発生の危険性が低くなったと評価することは適切ではないといえる。深層崩壊の発生誘因としては、降雨、地震、融雪、火山噴火等が挙げられるが、発生件数からは降雨と地震によるものが多い（図－1）。

写真－1～写真－4 に豪雨および地震により発生した深層崩壊を示す。



図－１　深層崩壊の発生誘因
（旧建設省中部地方建設局河川計画課：天然ダム調査事例集と米国土木学会 Landslide dams より）

写真－１　宮崎県鰐塚山山系（豪雨）

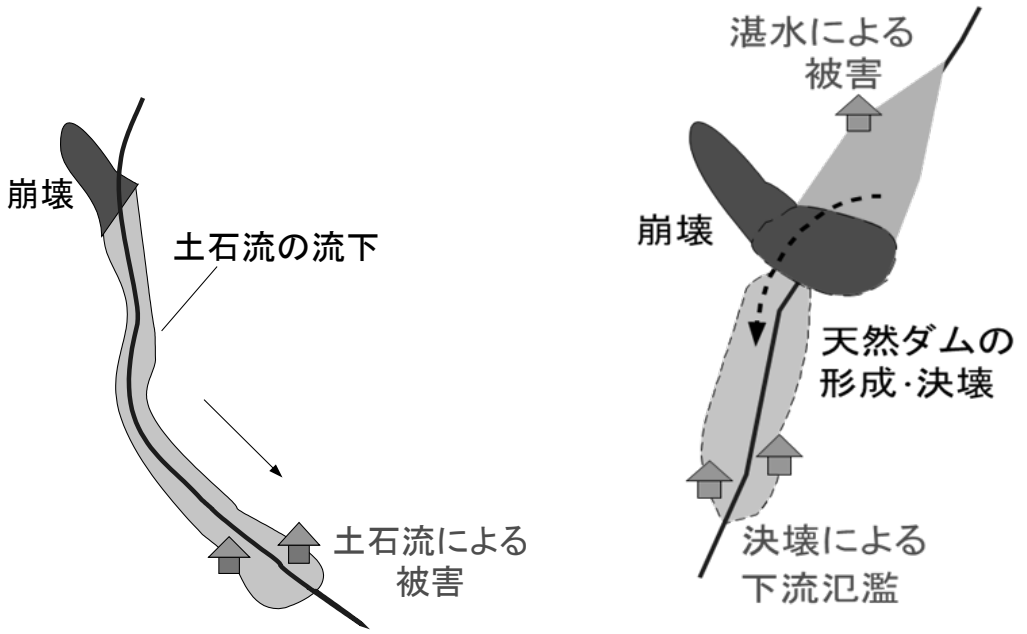
写真－２　奈良県十津川村栗平（豪雨）

写真－３　宮城県栗原市沼倉裏沢
（岩手・宮城内陸地震）

写真－４　宮城県栗原市湯ノ倉
（岩手・宮城内陸地震）

2.2　深層崩壊による災害形態

深層崩壊は発生頻度は低いものの、一度発生すると崩壊規模が大きいことから甚大な被害が発生するおそれがあることは前述した。深層崩壊による災害形態としては、崩壊土砂が直接河道に流入して土石流化する場合と、崩壊土砂が河道を閉塞し天然ダムを形成する場合に大別される。前者は崩壊土砂が流動化して渓流等を流下し、下流の集落で氾濫することによって被害が生じる。後者については、被害形態はさらに 2 つに大別され、崩壊土砂が河道内に堆積し天然ダムを形成し、その上流における湛水による浸水被害と、天然ダムが決壊することによって生じる土石流・洪水に起因する氾濫被害に分類される（図－2）。

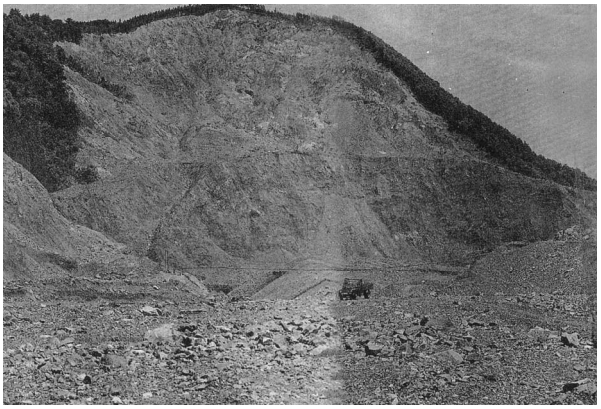


図－２　深層崩壊による災害形態

前者の形態の災害事例としては、平成 9 年（1997 年）7 月の鹿児島県出水市針原川、平成 15 年（2003 年）7 月の熊本県水俣市集川の土石流災害が挙げられる。針原川では 21 名、集川では 15 名の人的被害が発生した。また、地震による深層崩壊では、平成 20 年（2008 年）6 月の岩手・宮城内陸地震において、ドゾウ沢で発生した土石流が駒の湯温泉を襲い 7 名の犠牲者を出した土石流災害がある（写真－5）。

後者の形態のうち、天然ダムの湛水による災害事例としては、明治 44 年(1911 年)8 月長野県白馬村において、稗田山の崩壊土砂が姫川との合流地点を閉塞し、上流の下里瀬集落の大半を水没させ、死者 23 名の人的被害が発生している。また、天然ダム決壊による土石流・洪水被害事例としては、明治 22 年（1889 年）十津川災害、昭和 28 年(1953 年)有田川災害が挙げられる。十津川災害では、奈良県･和歌山県において多数の天然ダムが形成され、その決壊により 1,000 名以上の犠牲者が生じている。また、有田川災害では、19 箇所の天然ダムが形成され、残存した複数の天然ダムが、2 カ月後の台風 13 号の豪雨により決壊した。そのうち花園村の金剛寺で発生した天然ダム決壊では下流に洪水被害を引き起こしている（写真－6）。

写真－５　宮城県栗原市ドゾウ沢
（岩手・宮城内陸地震）



写真－６　昭和 28 年（1953 年）有田川災害
花園村金剛寺(旧大塔村)

地震によるものとしては、平成 16 年((2004 年)新潟県中越地震、平成 20 年(2008 年)岩手・宮城内陸地震において多数の天然ダムが発生し、集落や温泉旅館が湛水により水没したが、国土交通省・都道府県により施工された仮排水路等の緊急工事により、天然ダムの決壊までにはいたらなかった。

海外の事例としては、平成 21 年（2009 年）8 月に台湾に上陸したモーラコット台風による土砂災害が挙げられる。モーラコット台風は、3 日雨量約 2,800ｍｍを越える異常な降雨をもたらし、高雄県小林村で発生した大規模な深層崩壊や天然ダムの決壊による土石流・洪水等により 500 名以上が犠牲となった。

2.3　深層崩壊の発生状況

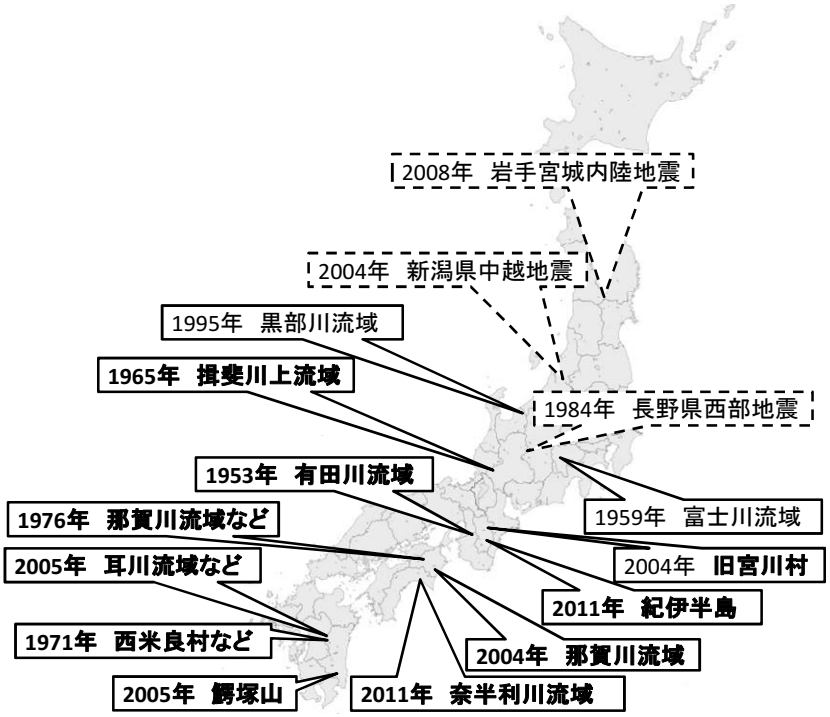
（独）土木研究所は、明治時代以降から平成 22 年（2010 年）度までの間において、降雨により発生したと考えられる深層崩壊事例を「過去の深層崩壊事例について（～平成 22 年度）」として公表している。この事例には、既往の調査結果等から深層崩壊と確認された、または、推定される事例および崩壊規模が大きい事例（崩壊土砂量が概ね 10 万㎥以上、崩壊面積が 1ｈａ以上、崩壊深さが 5ｍ以上）の 188 事例が掲載されている。発生地域は北海道・東北地方から四国・九州地方に及んでおり、なかでも奈良県、和歌山県の発生事例が多いことが特徴的である。

図－3 は戦後において、一つの降雨または地震により複数の深層崩壊が発生した地域を示したものである。ここで、降雨によるものは、上述の「過去の深層崩壊事例について」より抽出し、地震によるものは代表的なものを示した。この図から、一つの降雨および地震において深層崩壊が複数発生している地域は、九州南部から四国、紀伊半島までの西南日本に集中していることが窺える。また、東北地方では豪雨による深層崩壊の複数発生はなく、地震によるもののみとなっていることが分かる。

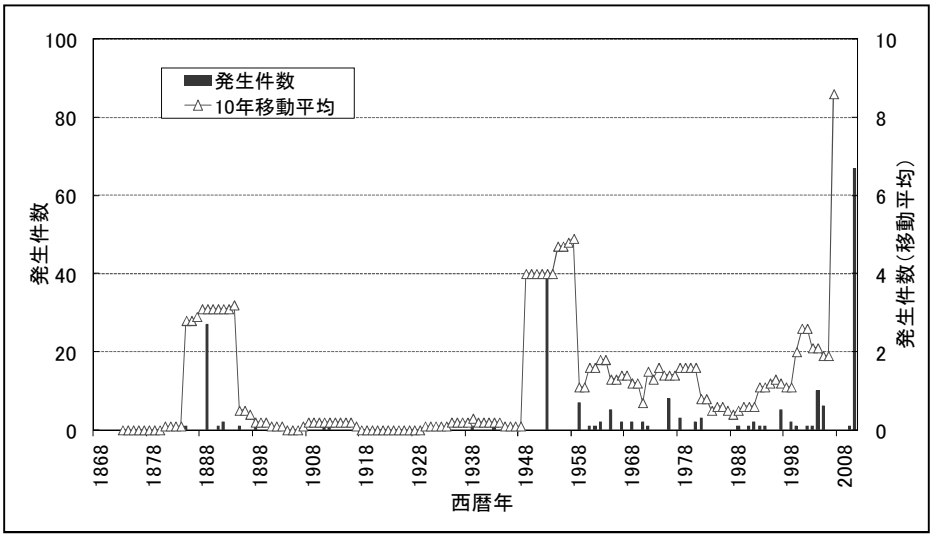
図－4 は明治期以降における、崩壊土砂量 10 万㎥以上の崩壊発生状況を経年的に示したものである。発生件数が多い年は、明治 22 年（1989 年）十津川災害、昭和 28 年（1953 年）有田川災害、平成 23 年（2011 年）台風 12 号災害によるものである。10 年間移動平均をみると、近年、増加傾向であることが分かる。また、図－5 は過去 30 年間を、10 年単位

で区切り、50㎜/h 以上の降雨の発生回数、土砂災害発生件数、深層崩壊発生件数の 10 年平均を示したものである。この図からも 50㎜/h 以上の降雨の発生回数が増加するのとあわせ、土砂災害発生件数と深層崩壊発生件数が増加していることが分かる。

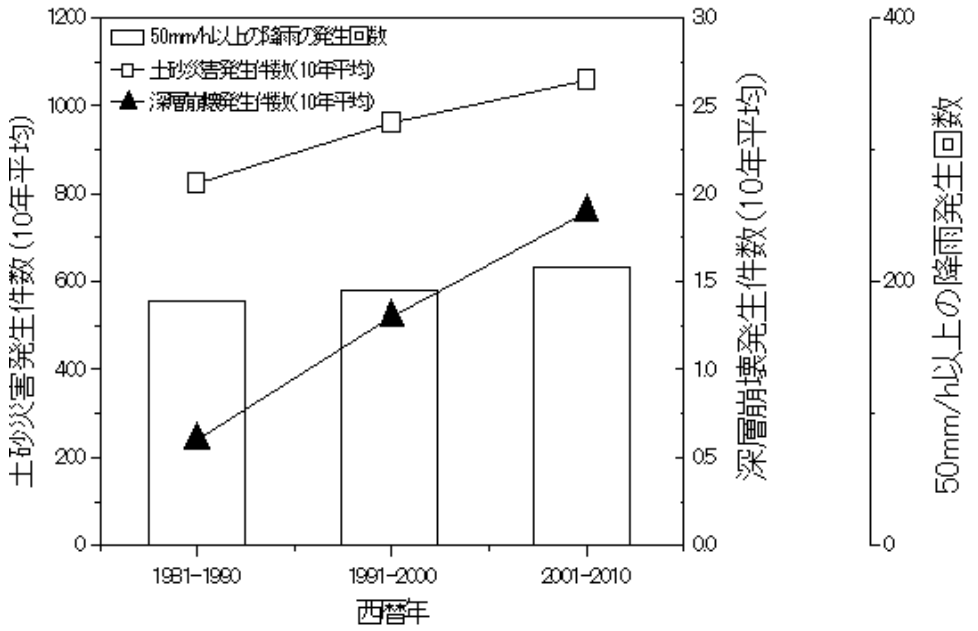
地球温暖化等による降雨の激甚化をはじめ、大規模地震の発生、火山活動の活発化等が指摘されるなか、深層崩壊の発生リスクは今後とも高まっていくものと推測され、早急に深層崩壊をはじめとする大規模土砂災害への対応策を検討する必要があるといえる。



図－３　深層崩壊が複数同時発生した箇所
実線は降雨、破線は地震によるもの



図－４　深層崩壊発生の経年変化



図－５　降雨と深層崩壊の発生状況

3. 深層崩壊の定義

3.1　地すべり、表層崩壊、深層崩壊の特徴

前章において、深層崩壊の特徴および災害形態について若干触れたが、ここでは（社）砂防学会が平成 24 年（2012 年）3 月に取りまとめた、「深層崩壊に関する基本的事項に係わる検討委員会の報告・提言（以下、「提言」という。）」を参考として、「地すべり」、「表層崩壊」、「深層崩壊」の特徴を対比しつつ整理を行う。

一般に地すべりは、その移動土塊・岩塊の動きは継続的あるいは断続的であり、その移動速度は小さく、土塊･岩塊は移動中にあまり撹乱を受けない。一方、崩壊は土塊・岩塊の動きは突発的で一過性であり、その移動速度は大きく、運動中に激しい撹乱を受けて原形を保たない場合が多いとされる。地すべりと崩壊の特徴を比較したものを表－1 に示す。

さらに、崩壊は主としてすべり面の深さにより表層崩壊と深層崩壊に分けられる。表層崩壊はすべり面の深さが約 2m以内であり、移動土塊は表層の風化土層である場合が多く、地質に対する関連性は少ないのに対し、深層崩壊のすべり面は、表層崩壊よりも深い位置にあり、移動土塊・岩塊は基盤を含んで移動する場合が多く、特定の地質や地質構造の地域で多く発生し、特に我が国では四万十帯などの付加体での発生頻度が高いとされる。表層崩壊と深層崩壊の特徴を比較したものを表－2 に示す。

すべり面の深さが異なることより､表層崩壊では樹木の根系による緊縛力が､崩壊抑止効果としてある程度発揮される場合があるが、深層崩壊ではすべり面が深く根系の緊縛力の効果は期待できない。

すべり面の深さの違いは、崩壊土砂量の多少にも影響し、表層崩壊に比較して、深層崩壊の土砂量は大きいものとなる。深層崩壊の土砂量は、約 1 万㎥～数億㎥まで非常に範囲が広く、土砂量が大きいほど等価摩擦係数が小さくなり到達距離は大きく、また、土砂量

が大きいほど発生頻度は小さくなる。このような特徴は、表層崩壊および深層崩壊の発生・流下機構の違いを反映していると考えられる。表－3 に表層崩壊と深層崩壊の規模と特徴を対比して示す。また、「地すべり」、「表層崩壊」、「深層崩壊」の区分フローを図－4 に示す。

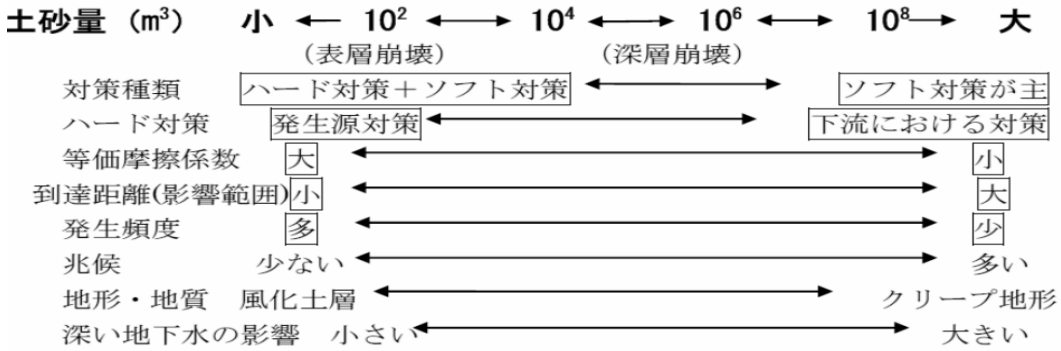
表－１　地すべりと崩壊の比較

	地すべり	崩壊
①地形	緩勾配 地すべり地形	急勾配 非火山地域では斜面の変形等の特徴が見られる場合がある
②活動状況	継続的、断続的に動いている、再発性	突発性
③移動速度	小さい	大きい
④土塊	乱れない（原型をほぼ保つ）、斜面上にとどまる	乱れる（原型が崩れる）、大部分が斜面から抜け落ちる

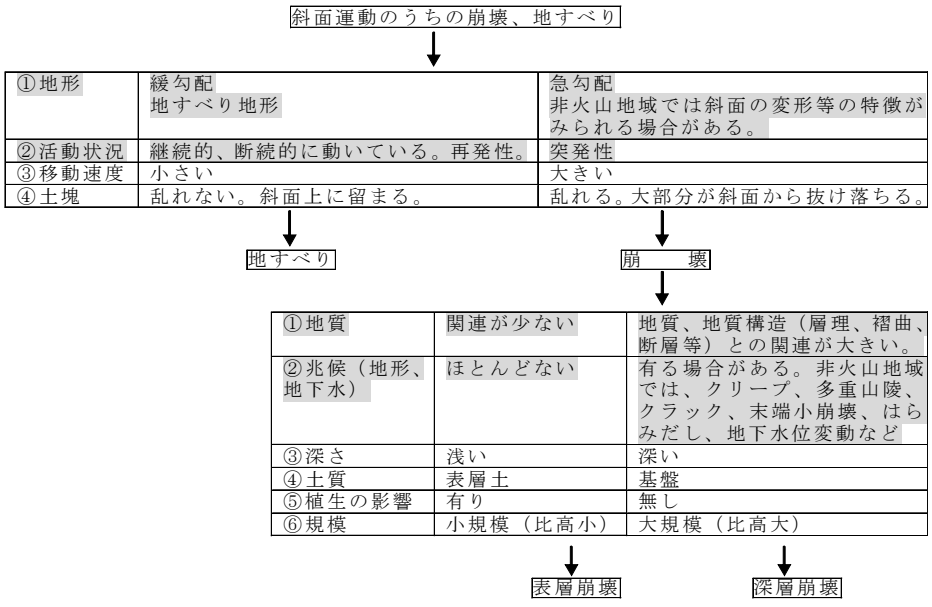
表－２　表層崩壊と深層崩壊の比較

	表層崩壊	深層崩壊
①地質	関連が少ない	地質、地質構造（層理、褶曲、断層等）との関連が大きい
②兆候 （地形・地下水）	ほとんどない	有る場合がある、非火山地域ではクリープ、多重山稜、クラック、末端小崩壊、はらみだし、地下水位変動など
③深さ	浅い	深い
④土質	表層土	基盤
⑤植生の影響	有り	なし
⑥規模	小規模（比高小）	大規模（比高大）

表－３　深層崩壊の規模と特徴



表－４　地すべり、表層崩壊、深層崩壊の区分フロー



注）網掛け部は発生前の予測段階で調査が比較的容易な項目。

3.2　深層崩壊の定義

（社）砂防学会の「提言」では、「地すべり」、「表層崩壊」、「深層崩壊」の特徴を踏まえ、深層崩壊の定義を以下とおり提案している。

「山地および丘陵地の斜面の一部が表土層（風化の進んだ層）のみならずその下の基盤を含んで崩壊する現象を指す。その特徴を述べれば移動土塊・岩塊の動きは突発的で一過性であり、その移動速度は大きく、運動中に激しい撹乱を受けて原形を保たない場合が多い。特定の地質や地質構造の地域で多く発生し、特に我が国では四万十帯などの付加体における発生頻度が高い。すべり面の位置が深いために樹木の根系による崩壊抑止効果は期待できない。表層崩壊に比べて土砂量は大きく、土砂量の範囲は極めて広い。土砂量が大きいほど等価摩擦係数が小さくなり到達距離は大きくなる傾向を持つ。土砂量が大きいほど発生頻度は小さくなる。発生誘因には、降雨、地震、融雪、火山噴火等があるが、発生件数からは、降雨と地震によるものが多い。」

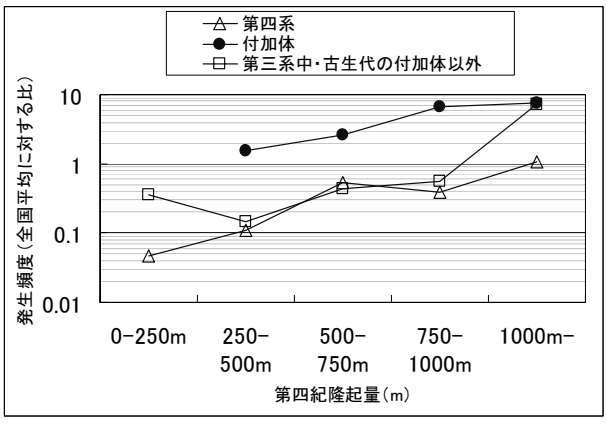
上記の定義では、移動土塊・岩塊の動きが突発的かつ一過性であること、運動中に攪乱を受け原形を保たないという点で地すべりとの相違を表し、すべり面の深さ、樹木の根茎の崩壊抑止効果の点から表層崩壊との相違を表しているといえる。しかしながら、本定義は定性的な内容となっており、例えば、深層崩壊の土砂量を取り上げても、表層崩壊との境界上の規模のものから、数億㎥に達する巨大崩壊まで非常に幅広い、また、地すべりと崩壊の区分を、「①地形」、「②活動状況」、「③移動速度」、「④土塊」の観点から整理しているが、両者の中間的な土砂移動現象の存在は否定できないところである。深層崩壊対策の検討にあたっては、上述した特徴を対比・整理することによる定義に加え、土塊・岩塊の移動に関する物理モデル等からのアプローチが必要であると考える。

4. 深層崩壊危険地域に関するマップ

4.1　深層崩壊推定頻度マップ

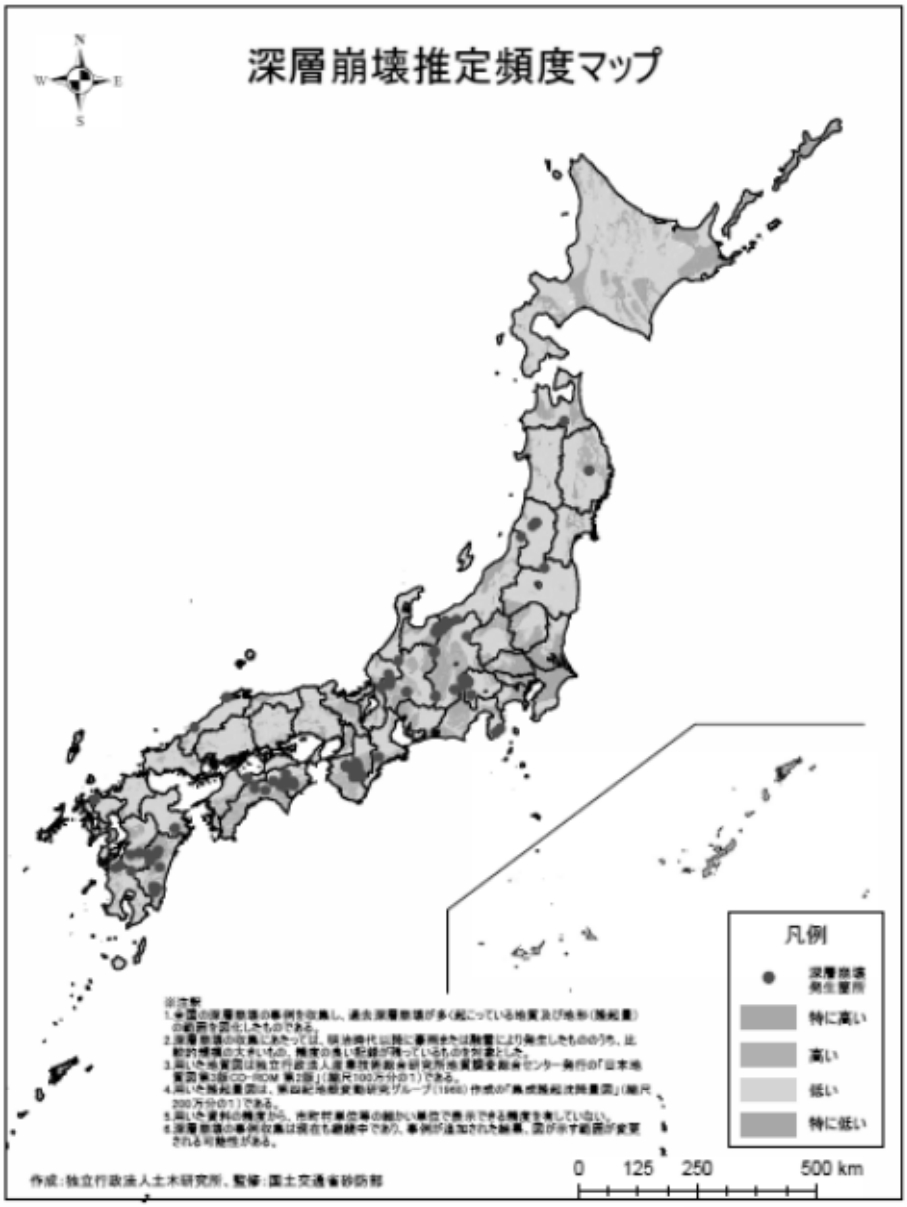
深層崩壊に起因する大規模土砂災害の防止・軽減対策を検討するにあたって、深層崩壊の発生するおそれのある箇所を予測することは極めて重要である。

（独）土木研究所では、明治期(1968 年)以降に豪雨または融雪により発生した深層崩壊発生事例のうち、発生場所と発生時期が特定できる 122 事例を用いて、地質や起伏量と深層崩壊発生の関係を整理した。その結果、「第四紀隆起量と崩壊密度には密接な関係が認められる」、「第四系の崩壊密度は第三系、中古生界に比べて小さい」、「付加体の崩壊密度は第四紀隆起量、地質年代によらず付加体以外のものに比べて高い」という知見を得た(図－6）。これらの知見を基に、深層崩壊の発生密度を全国平均の 5 倍以上の地域を「特に高い」、1 倍以上の地域を「高い」、0.1



図－6　第四紀隆起量、地質と深層崩壊の関係

倍以上の地域を「低い」、それ以下の地域を「特に低い」の４段階に区分し、地図上で表したものが深層崩壊推定頻度マップである（図－7）。なお、深層崩壊推定頻度マップは、深層崩壊の発生する危険度を全国レベルで相対的に評価したものであることに留意する必要がある。



図－７　深層崩壊推定頻度マップ

4.2　深層崩壊渓流レベル評価マップ

（独）土木研究所では、深層崩壊推定頻度マップの作成に引き続き、渓流（小流域）レベルで危険度を評価する手法を「深層崩壊の発生の恐れのある渓流抽出マニュアル(案)」として取りまとめた。

既往の調査から、「深層崩壊が過去に発生した箇所の周辺」、「線状凹地、岩盤クリープ斜面等の深層崩壊の前兆現象と考えられる地形的な特徴が見られる箇所の周辺」、「斜

面勾配が急でかつ集水面積が大きい斜面」において、深層崩壊の発生する確率が高いことが明らかとなっている。本マニュアルではこれらを踏まえ、以下の三条件を深層崩壊の発生する危険度の高い渓流を抽出する指標とし、より多くの条件を満たす渓流を危険度の高い渓流として評価することとしている(図－8）。

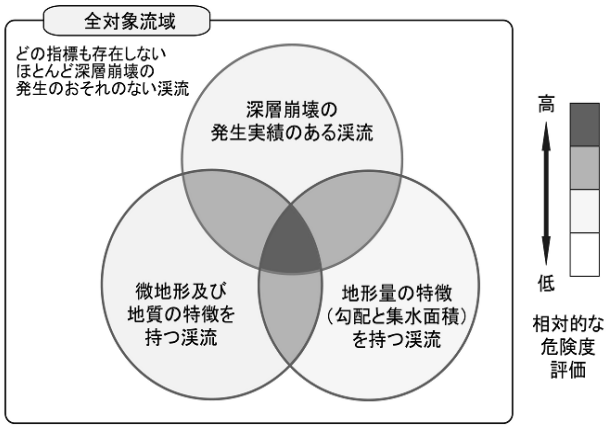
①深層崩壊の実績のある渓流（過去の文献や空中写真の判読により抽出）

②深層崩壊の発生と関連性の高い地質構造・微地形要素がある渓流（地質図や空中写真判読により抽出）

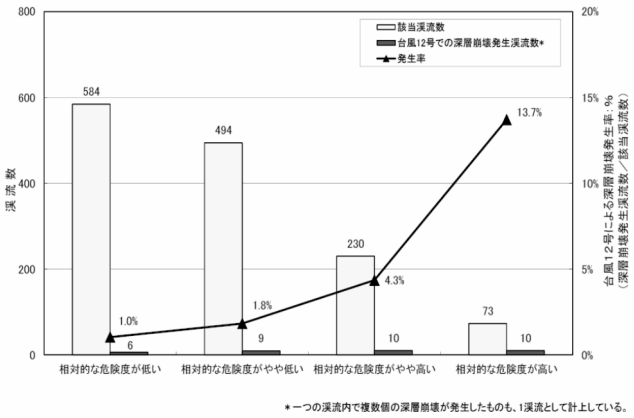
③勾配および集水面積の大きい斜面が多い渓流（DEM を用いて算出）

深層崩壊の発生と関連性の高い地質構造・微地形要素、地形量については、地質や気候の影響などから地域によって異なることが考えられるため、過去の発生履歴と地質構造・微地形要素、地形量の関係を整理し、検討対象地域ごとにそれぞれの指標を設定することとしている。本手法により深層崩壊のおそれのある渓流を抽出した例を図－9 に示す。

渓流レベルでの評価結果について、平成 23 年の台風 12 号により深層崩壊が発生した紀伊山地で検証を行ったところ、相対的な危険度が高いほど深層崩壊の発生率が高く、相対的危険度が高い渓流では、相対的危険度が最も低い渓流に比べて発生率が 14 倍となった（図－10）。なお、本マップについても評価区域内の相対的な危険度を表したものであることに留意する必要がある。



図－８　危険度評価の指標



図－１０　紀伊山地のおける危険度別渓流数と台風 12 号による深層崩壊発生状況

5. 改正土砂災害防止法に基づく緊急調査

平成 23 年（2011 年）5 月に施行された改正土砂災害防止法では、天然ダムによる湛水および決壊にともなう土石流、火山噴火にともなう降灰後の土石流、地すべりによる重大な土砂災害が急迫していると認められるとき、国または都道府県は緊急調査を実施し、被害が想定される区域と時期について、土砂災害緊急情報として関係市町村長に通知し避難指示等の判断を支援するとともに、一般に周知することと規定されている。

国土技術政策総合研究所及び（独）土木研究所は、台風 12 号災害にかかる緊急調査等の一連の対応において、近畿地方整備局に対し技術的支援を継続的に行った。その概要を以下に記述する。

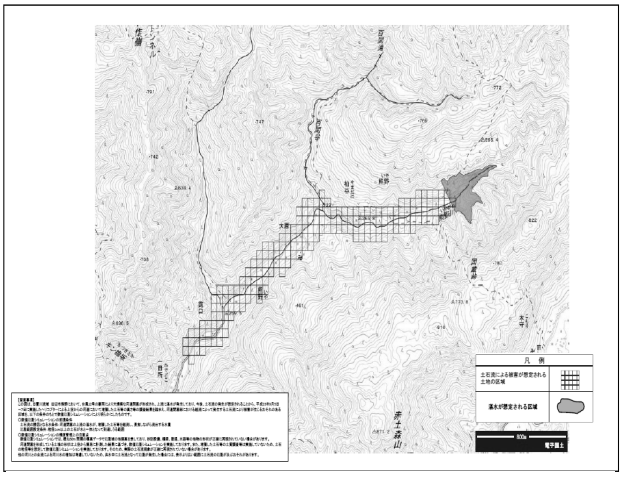
図－９　深層崩壊渓流レベル評価マップ

災害発生直後より、ヘリコプターおよび衛星画像を用いた天然ダムの形成確認調査を実施し、決壊による土石流災害のおそれのある天然ダムとして5地区（赤谷、長殿、栗平、北股、熊野）が抽出された。形成確認調査に続き、土石流による被害のおそれのある区域を推定するため、天然ダムの比高等の形状計測をヘリコプターからレザー測距計を用いて行い、一次元河床変動計算と二次元氾濫計算を組み合わせた氾濫シミュレーション計算により想定氾濫区域の推定を行った。台風12号災害では、9月6日に緊急調査に着手し、2日後の9月8日に土石流等による被害のおそれのある区域を土砂災害緊急情報として通知・公表している（図－11）。

想定氾濫区域の推定と並行して、天然ダムの監視・観測体制の整備を進めた。天然ダムの決壊形態としては、過去の事例では越流浸食によるものが多く、決壊による土石流被害を軽減するためには､湛水位を把握し越流の開始時期を予測することが極めて重要となる。しかしながら、天然ダムの形成箇所は、主に山間部であり周辺の地形が急峻であること、また、道路が斜面崩壊等により寸断され陸路によるアクセスが困難であることが多く、監視・観測体制を整備するにあたっての大きな支障となっていた。

今回、湛水位の観測に岩手・宮城内陸地震の際に開発された土研式水位観測ブイ（以下、「観測ブイ」という。）を使用した。観測ブイは上述した悪条件下での使用を想定し、ヘリコプターによる運搬・設置、衛星通信を介したデータ送信等の機能を有したものである（写真－7）。また、観測ブイによる水位観測に加えて、監視カメラ、ワイヤーセンサー等の監視・観測機器の整備を図り、土石流等の発生検知に努めたところである。

なお、市町村等に通知した土砂災害緊急情報は、その後の地形状況の変化およびレーザープロファイラによる地形計測結果等を反映させ氾濫シミュレーション計算を再度行い、想定氾濫区域の変更について通知・周知を行っている。



図－１１　土砂災害が想定される区域

写真－７　土研式水位観測ブイ

6. 土砂災害監視システム

6.1　大規模崩壊監視警戒システム

深層崩壊の発生に起因し天然ダムが形成され、その天然ダムが決壊した場合、大規模な

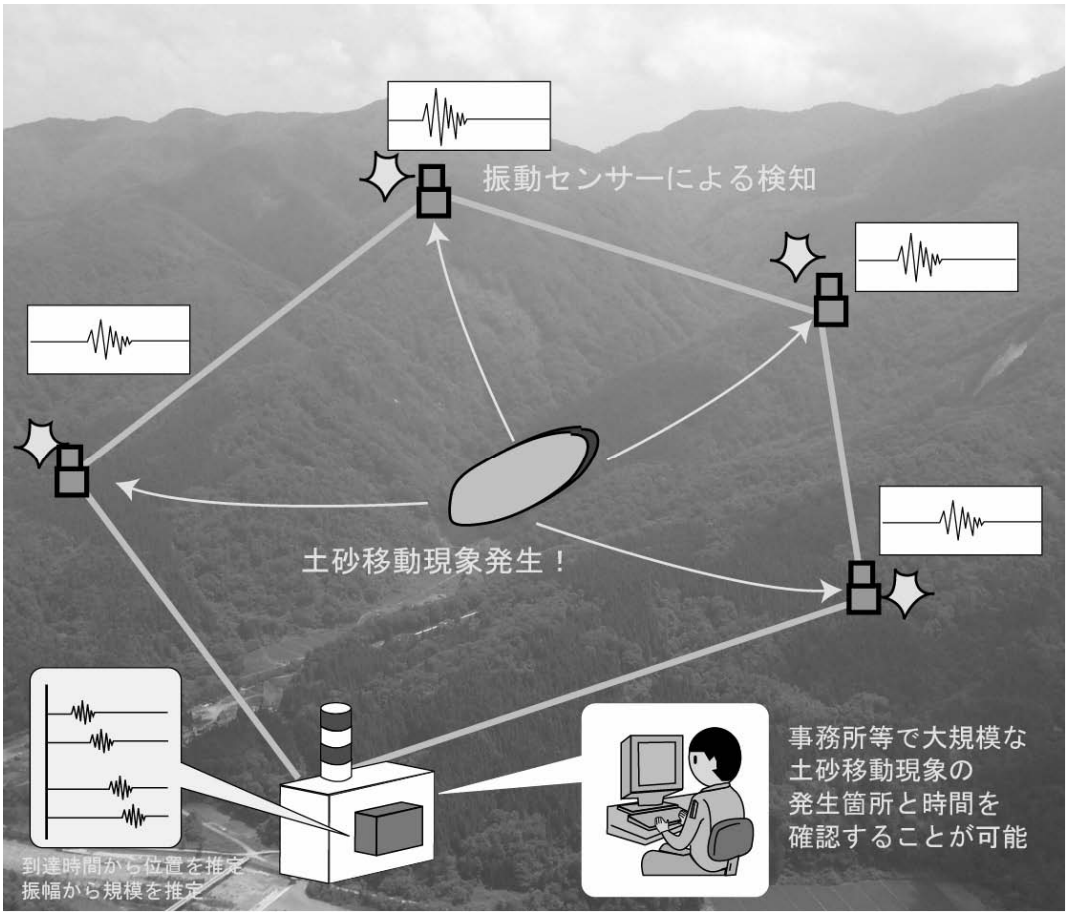
土石流が発生し下流域に甚大な被害をおよぼすおそれが高い。また、土砂災害防止法では、被害の想定される区域と時期の情報を土砂災害緊急情報として、迅速に市町村等へ通知することを求めている。迅速な対応を可能とするためには、天然ダムの発生した時期、場所を速やかに把握できる体制を構築する必要があり、現在、国土交通省では、「雨量レーダー」、「振動センサーによる大規模土砂移動検知システム」および「衛星 SAR 画像による大規模崩壊箇所の緊急判読調査」の手法を組み合わせた大規模崩壊監視警戒システムの構築を進めている。

6.2　振動センサーによる大規模土砂移動検知システム

深層崩壊等の大規模な土砂移動現象が発生した際に生じる地盤振動は、条件によっては数 10km 先の地震計においても検知されることが従来から知られている。

振動センサーによる大規模土砂移動検知システムは、山地地域に配置した振動センサーをネットワーク化し、検知した地盤振動から地震の震源特定技術を用い、大規模な土砂移動現象の発生位置と時間を推定するものである。

国土交通省および各地方整備局では、深層崩壊の推定頻度が特に高い地域において、振動センサーによる大規模土砂移動検知システムを構築し、深層崩壊および天然ダムの監視警戒体制の整備を図っているところである（図－12）。

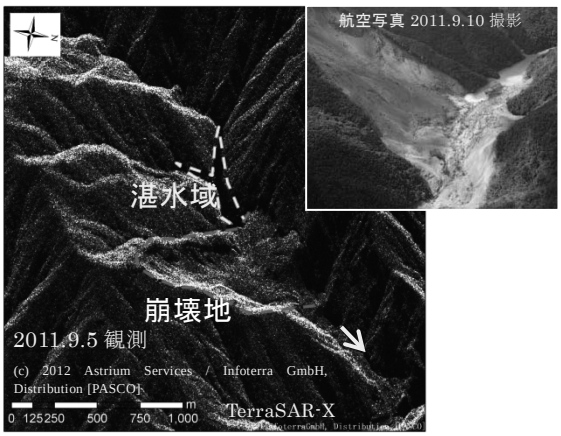


図－１２　大規模土砂移動検知システムの概要

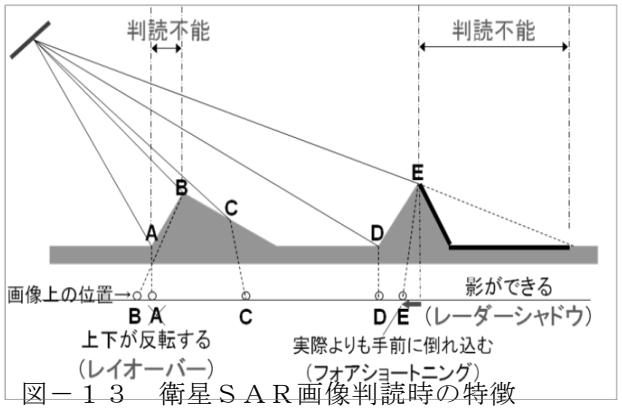
6.3　衛星合成開口レーダ画像による深層崩壊判読

衛星合成開口レーダー（以下「衛星 SAR」という。）は、夜間や悪天候等の状況に左右されることなく画像撮影が可能である特徴を有している。平成 23 年(2011 年)年台風 12 号災害では､衛星SAR画像を用いて8箇所の深層崩壊等の抽出を行うことができた(写真－8)。

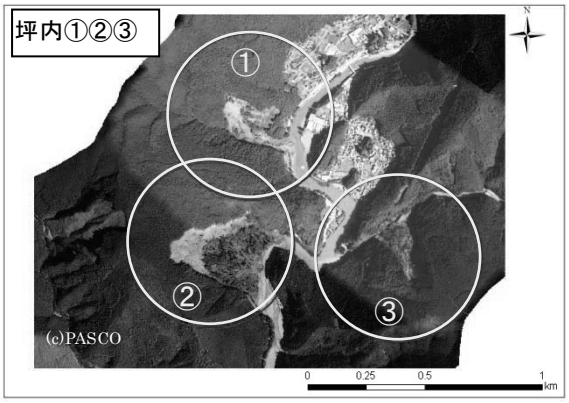
衛星 SAR 画像の判読においては、図－13 に示すとおり光学画像の判読とは異なる特徴があり、これらの特徴を踏まえた、衛星 SAR 画像の撮影条件等の検討を目的として、入射角、分解能等の異なる複数の画像を用い､台風 12 号災害において発生した深層崩壊の視認性等の評価を行った。天川村坪内地区の崩壊地画像を参考事例として示す（写真－9、10）。



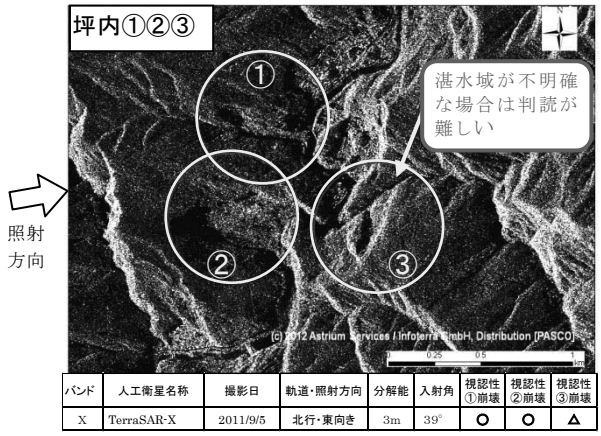
写真－８　衛星ＳＡＲ画像により発見された深層崩壊（奈良県五條市赤谷）



図－１３　衛星ＳＡＲ画像判読時の特徴



写真－９　奈良県天川村坪内地区（簡易オルソ）



バンド	人工衛星名称	撮影日	軌道・照射方向	分解能	入射角	視認性①崩壊	視認性②崩壊	視認性③崩壊
X	TerraSAR-X	2011/9/5	北行・東向き	3m	39°	○	○	△

写真－１０　奈良県天川村坪内地区（衛星ＳＡＲ画像）

衛星 SAR 画像の撮影条件等についての検討結果を以下に列記する。

①電波の入射角

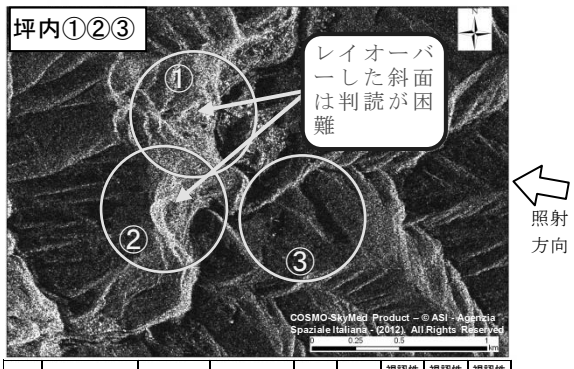
衛星 SAR 画像撮影時の入射角が小さくなると、入射方向と正対する箇所がレイオーバーとなって判読不能となる。また、反対に入射角が大きいと急勾配地域でレーダーシャドウの割合が大きくなる傾向がある。撮影時の入射角としては、概ね 35°～50°の入射角が適していると評価された。

②分解能

天然ダムの抽出を目的とした場合、衛星 SAR 画像の分解能は 3m より高分解能であることが必要である。しかし、現在運用中の衛星では、分解能 3m の場合における撮影範囲面積が 1,500km^2～2,500km^2 であるのに対して、分解能 1m 程度の場合には撮影範囲面積が 1/10 以下となるなど、分解能により撮影範囲面積が大きく変化することに留意する必要がある。

③撮影回数

片側照射の衛星 SAR 画像のみでは、写真－11 に示すように斜面方位や斜面の傾斜角度によっては抽出率が落ち、台風 12 号災害の事例では深層崩壊による天然ダムの抽出率は 50～70%程度となった。しかし、東西両側からの画像 2 枚を用いた場合には抽出率は約 90%に向上した。

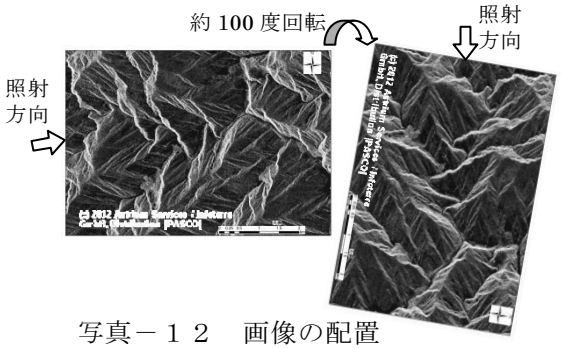


バンド	人工衛星名称	撮影日	軌道・照射方向	分解能	入射角	視認性①崩壊	視認性②崩壊	視認性③崩壊
X	COSMO-SkyMed	2011/9/10	南行・西向き	3m	34°	×	×	△

写真－１１　電波入射方向と正対する衛星 SAR 画像

④判読する衛星 SAR 画像の正立配置

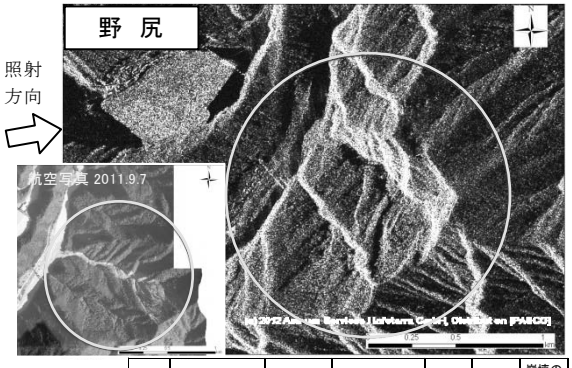
照射方向と衛星 SAR 画像の配置の関係については、照射方向が上方からとなるように回転させて画像を配置した方が、より正確な判読が可能であった（写真－12）。



写真－１２　画像の配置

⑤判読困難箇所

水平投影面積が 1ha 未満の天然ダムは判読が困難であった。また、写真－13 のように、視認性が良好な画像であっても、河道閉塞による湛水域が形成されていない場合には、大規模な崩壊地であっても見逃し易いことに注意し判読作業を行う必要がある。



バンド	人工衛星名称	撮影日	軌道・照射方向	分解能	入射角	崩壊の視認性
X	TerraSAR-X	2011/9/5	北行・東向き	3m	39°	×

写真－１３　湛水域が無く崩壊地等の判読が困難な衛星 SAR 画像

⑥画像判読の手順

画像判読を行う際には、天然ダムの決壊にともない甚大な被害が予測される集落の上流および集水面積が大きく天然ダムが短時間で満水になると予想される本川沿いを最優先に判読・確認を行う。続いて、主要支川、支渓へと順次判読・確認を行うのが効率的である。

⑦入手画像の選定

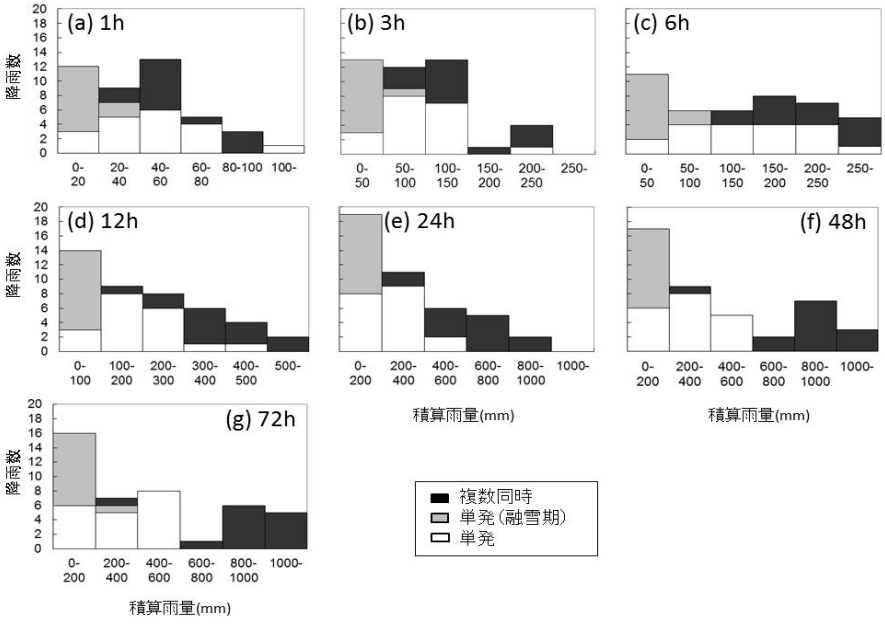
現在運用されている衛星 SAR 衛星の撮影頻度は、衛星軌道位置から 4 日に 1 回程度の衛星から約 12 時間毎まで様々である。また、画像撮影依頼から画像入手までに要する時間も幅がある。これらを念頭に置き、良好な条件で、必要範囲の画像を最速で入手可能な衛星を選定することが重要である。

6.4　深層崩壊と降雨との関係

深層崩壊対策を進める上で、発生箇所の予測と同様に重要なものとして、深層崩壊を引き起こす降雨条件の把握等が挙げられる。

(独)土木研究所が取りまとめた、「過去の深層崩壊事例について（～平成 22 年度）」のうち、アメダスが整備された昭和 51 年（1976 年）以降の深層崩壊を対象として、一つの降雨で一つの深層崩壊が発生した事例（以下「単発イベント」という。）と複数の深層崩壊が発生した事例（以下「同時複数イベント」という。）に着目し、発生日およびその前 3 日間の計 4 日間を解析対象期間として、連続 1 時間、3、6、12、24、48、72 時間の最大雨量との関係を整理を行った。

図－14 は深層崩壊を起こした降雨について、各連続時間ごとに最大雨量の頻度分布を示したものである。最大雨量が連続 12 時間以内の場合では、単発イベントと同時複数イベントの最大雨量は明確に分離できないが、連続 48 時間以上となると、1 つの同時複数イベントを除き、連続 48 時間雨量 600㎜ で明瞭に分離できた。このことから、ある一定規模以上の降雨（最大 48 時間雨量で 600㎜ 以上）があった場合に、複数の深層崩壊を発生する可能性があることを示唆しているものと考えられる。引き続き、各種降雨指標を用いた検討を行い、深層崩壊を引き起こす降雨条件の把握、深層崩壊の発生時期の予測へと進めていきたいと考えている。



図－１４　深層崩壊を引き起こした降雨の最大雨量の頻度分布

7. 深層崩壊に対する今後の対応

7.1 深層崩壊対策に必要な調査・研究

これまでも述べてきたが、深層崩壊による被害の防止・軽減に向けた対策を検討する上で、深層崩壊の発生する恐れのある地域を把握することは極めて重要である。また、警戒・避難体制の実効性を高めるためには、深層崩壊の発生を一定の精度で予測することが必要である。調査・研究を推進するにあたっては、深層崩壊の発生頻度が必ずしも高くないことを念頭に置き、成果の検証を行いながら、具体的な対策に結びつけていく必要があると考える。今後、取り組むべき事項としては以下の内容が挙げられる。

①発生・移動機構の解明
②発生危険個所の予測
③発生規模の予測
④発生時刻の予測
⑤発生頻度の評価
⑥被害範囲・外力の推定

発生・移動機構の解明にあたっては、豪雨および地震による深層崩壊の発生機構に関する物理モデルからのアプローチ、地質構造や岩盤内の浸透流の移動過程、地震動の伝播特性等について検討が必要であると考える。また、航空レーザー測量や空中電磁探査、人工衛星リモートセンシングなどの技術を用いて、従来得るのが困難であった詳細な表面地形、面的な地下構造、微小な地表面の変位などの情報が得られるようになってきている。このような最新の技術も活用しながら発生機構の解明や発生予測手法の確立へとつなげていくことが必要である。

7.2 深層崩壊対策の基本的考え方

深層崩壊対策は、一般の土砂災害対策と同様、ハード対策とソフト対策を組み合わせて実施することが基本となる。但し、深層崩壊の場合は崩壊土量が大規模なものとなることを踏まえ、ハード・ソフト対策をより一層効果的に連携させることが求められる。

構造物（ハード対策）により、崩壊発生にともなう移動土砂量を低減させ、土砂の到達範囲の縮小や外力の低下を図った上で、ソフト対策による的確な避難を実施し、人命被害の回避につなげることが基本と考えられる。ハード・ソフト対策をより確実なものとしていくために、今後、取り組むべき事項としては以下の内容が挙げられる。

【ハード対策】
①作用外力に応じた施設の柔軟な設計と被害軽減効果の評価
②より効果の高い施設の配置計画や構造、形式の選定

【ソフト対策】
③深層崩壊の特性を踏まえた警報の運用
④安全な避難場所の確保
⑤前兆的現象の監視と避難への活用
⑥災害時の避難行動等の分析と地域防災計画へのフィードバック

また、対策の実施にあたっては、調査・研究の成果を速やかに対策へと反映させ、より合理的な対策へとつなげていくことが重要である。さらに、深層崩壊が発生した際の緊急的な対応としては、迅速に現地状況を把握し、関係機関と情報共有を図り円滑な住民の避難行動に結びつけることが求められる。具体的には、前述した大規模崩壊監視警戒システムの整備を推進し、国土監視機能を高め、迅速な初動対応を可能とする体制を構築する必要がある。また、天然ダムの決壊等への対応においては、被害の想定される区域と時期をより短時間に精度良く推定することを可能とする、観測機器や予測技術の開発を進める必要がある。

8. おわりに

深層崩壊は、規模が大きいために一度発生すると、尊い人命が失われるとともに地域に甚大な影響をもたらす。

深層崩壊の発生頻度は表層崩壊に比べると比較的低く、また、地質や地質構造の影響を強く受けるため発生・移動機構等に不明の点も多い。現在、国土交通省では、河川砂防技術研究開発公募「深層崩壊の発生危険斜面の抽出手法および避難基準策定手法の開発」において発生・移動機構および危険箇所予測等の検討を行っているところである。

深層崩壊対策を進めていく上では、少なくとも人命の被害は防ぐという認識に立ち、ハード・ソフト対策を積極的に推進するとともに、「発災時の緊急対応」、「警戒避難体制の確立」、「有効な対策工法」等の開発・高度化を図る必要がある。そのためには、防災関係機関･研究機関が深層崩壊に関する情報を広く共有し連携していくことが求められる。また、深層崩壊の発生する可能性の高い地域における防災教育や地域防災を担う地方自治体職員に対する技術的支援等を積極的に実施するなど、地域の防災力向上に取り組んでいく必要があると考える。

【参考文献】

1）（社）砂防学会,深層崩壊に関する基本事項に関わる検討委員会報告・提言,P1～27,2012

2）小山内ほか,深層崩壊に関する基本事項の検討,平成 24 年度砂防学会研究発表会概要集,P12～13,2012

3）(独)土木研究所，深層崩壊の発生の恐れのある渓流抽出マニュアル(案)，土木研究所資料第 4115 号，P1～P21，2008

4）国土交通省,深層崩壊に関する全国マップについて,記者発表資料,2010

5）国土交通省,深層崩壊に関する渓流（小渓流）レベルの調査について,記者発表資料,2012

6）水野ほか,衛星ＳＡＲ画像による大規模崩壊の緊急判読調査手法の実用化,土木技術資料 54-10,P6～9,2012

7）内田ほか,深層崩壊を引き起こした降雨の特徴,平成 24 年度砂防学会研究発表会概要集,P332～333,2012

沿岸域の環境再生に求められる視点

沿岸海洋・防災研究部長

鈴木　武

沿岸域の環境再生に求められる視点

沿岸海洋・防災研究部長　　鈴木　武

１．はじめに

背後に大きな人口・経済集積を抱えた閉鎖性の高い海域では，生活排水などが大量に流れ込むことに加え，外海との海水の循環が起こりにくいため，富栄養化による慢性的な赤潮の発生や，有機底泥の蓄積等による貧酸素水塊の形成が，水産動植物へ大きな影響を与えるなど水環境の問題が発生している．

こうした沿岸域の水環境問題を改善していくため，内閣府内閣官房都市再生本部は，平成 13 年 12 月の第三次決定において，都市再生プロジェクトに「海の再生」を位置づけた．

これを受け，海上保安庁，国土交通省，環境省，水産庁および関連地方公共団体等は，平成 15 年 3 月，「東京湾再生のための行動計画」を策定した．その後，平成 16 年 3 月には「大阪湾再生行動計画」が，平成 19 年 3 月には「伊勢湾再生行動計画」と「広島湾再生行動計画」が策定された．それらの行動計画では，汚濁負荷削減，海域の環境改善，環境モニタリング等の各種施策を推進することが述べられている．

これら行動計画を受け，海の環境を再生するために様々な取り組みがなされてきた．そして，平成 24 年度末で「東京湾再生のための行動計画」が作られてちょうど 10 年になる．この機会を捉え，これまでの取り組みを東京湾の再生を題材に振り返るとともに，これからの取り組みを考えていくための視点を述べることとする．

２．東京湾再生のこれまで

東京湾は首都圏の中央部に位置する閉鎖性海域である．その臨海部や流域には人口・産業が集中し，日本を牽引する都市・産業機能が形成されている．首都圏（1 都 3 県）の面積は 14,000km^2 と国土の 4%に過ぎないが，人口は 3500 万人を超え（全国の 28%），工業出荷額は 47 兆円を超え，国内の 18%となっている．

東京湾の海域は，船舶の航行，漁業，海洋性レクリエーションなどに稠密な利用がなされている．東京湾内の 6 港は，年間 19 万隻の船舶が入港し，年間 5 億トン以上の貨物を取り扱い，首都圏の産業や都市の活動を支えている．また，漁獲量は年間 15,000 トンである．臨海部には，物流・産業施設，都市の供給処理施設のほか，レジャー・レクリエーション拠点，親水護岸，人工海浜，海釣り施設などの親水空間が整備されており，人々の海への回帰，水質の改善，そして生態系の回復が求められている．

このような東京湾に対し，「東京湾再生のための行動計画」では「快適に水遊びができ，多くの生物が生息する，親しみやすく美しい「海」を取り戻し，首都圏にふさわしい『東京湾』を創出する．」ことを目標とした．その目標達成をめざし，(1)陸域負荷削減，(2)海

域における環境改善，(3)東京湾のモニタリングの 3 つの分科会を設け，取り組みを行ってきた．各分科会の取組項目は以下の通りである．

表- 1　各分科会の取組項目

分科会	取組項目
陸域負荷削減	①陸域からの汚濁負荷削減のための総量削減計画の実施と効果的な事業施策の実施，②汚水処理施設の整備・普及及び高度処理の促進，③雨天時における流出負荷の削減 ④河川の浄化対策，⑤面源から発生する汚濁負荷の削減，⑥浮遊ごみ等の回収
海域における環境改善	①海域の汚濁負荷の削減，②海域の浄化能力の向上
東京湾のモニタリング	①モニタリングの充実，②モニタリングデータの共有化及び発信，③市民のモニタリング活動

こうした取り組みのうち，沿岸海洋・防災研究部で関わりの深い「海域における環境改善」と「東京湾のモニタリング」について述べていく．

「海域における環境改善」には「海域汚濁負荷の削減」と「海域の浄化能力の向上」の二つの取組項目がある．一つ目の「海域汚濁負荷の削減」については，汚泥の堆積が著しい運河等で堆積有機物をはじめとする底泥の除去，良質な土砂を用いた浅場等の造成による底質の改善，清掃船等による海面を漂う浮遊ゴミ等の効率的な回収，NPO や漁業者等による海底ゴミの回収，海浜・干潟の清掃活動等が進められた．

「海域の浄化能力の向上」については，現存する貴重な干潟や藻場等を可能な限り保全，干潟・浅場・海浜・磯場を再生・創造，長期的な観点に立った生物学的なネットワーク化，生物付着を促進する港湾構造物等を整備，底生生物等の生息場の創出を目指した緩傾斜護岸への改修，青潮の発生要因のひとつとされる過去の土砂採取等による深堀跡の埋め戻し等が進められた．

「東京湾のモニタリング」については，底層 DO と底生生物についてのモニタリングの充実，モニタリングポストや船舶等による海潮流と水質のモニタリングの強化，関連情報を集約した Web サイトの整備，地域住民と協同した海浜清掃や漂着ゴミ分類調査，東京湾で環境保全活動を行う市民や NPO との連携強化が進められた．

これら取り組みの中で沿岸海洋・防災研究部が担った主な取り組みの内容と今後の展開の方向性を以下に述べる．

３．　東京湾環境一斉調査の取り組み

東京湾の藻場の保全・再生に向けて，また，市民が体感しやすい新たな指標として，平成 23 年度の東京湾水質一斉調査において透明度調査を試行的に実施した．実施の結果，透明度調査は空間的な指標として適性を持っていることと，時間的な変動について配慮する必要があることが示唆された．

３．１　東京湾水質一斉調査の概要

東京湾水質一斉調査は，東京湾再生推進会議[1)]モニタリング分科会，九都県市首脳会議環境問題対策委員会水質改善専門部会および東京湾岸自治体環境保全会議の連携により，平成 20 年度より実施されてきた．東京湾水質一斉調査は，モニタリング分科会の諮問機関である東京湾モニタリング研究会の助言を受け，多様な主体が協働しモニタリングを実施することにより，国民・流域住民の東京湾再生への関心の醸成を図るほか，東京湾とその関係する陸域の水質環境の把握および汚濁メカニズムの解明を目的として実施されてきた（図-1）．

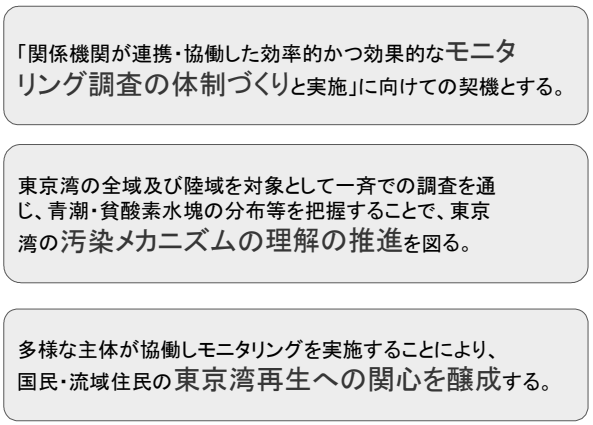


図-1　東京湾水質一斉調査の目的

表-2　東京湾水質一斉調査の概要

実施年度		H20	H21	H22	H23
調査日（環境調査の対象期間）		7月2日（水）（7/1～7/4）	8月5日（水）（8/1～8/9）	8月4日（水）（7/24～8/23）	8月3日（水）（7/28～8/30）
参加機関	国	3	5	5	5
	地方自治体	20	39	32	32
	市民団体等	5	10	6	8
	大学・研究機関	12	13	14	17
	企業等	7	81	74	77
	計	47	148	131	139
調査地点	陸域	381	438	394	371
	海域	224	311	356	449
	計	605	749	750	820
調査項目	陸域	COD、水温、流量 （流心での観測）			
	海域	DO、水温、塩分 （1m毎の断面観測）			左に加え、透明度・生物調査を推奨項目とする
環境啓発活動	イベント等	7－8月に開催されたイベントを対象とする			

東京湾水質一斉調査が開始された平成 20 年には，47 機関・団体が海域で 224 点，陸域で 381 点の調査を実施した．調査にあたり，共通の調査項目として海域では溶存酸素（DO），水温，塩分が，陸域（河川・湖沼）では化学的酸素要求量（COD），水温，塩分が設定された．調査方法は，基本的に海域では観測機器による海面下 0.5m～海底上 1m までの 1m 毎の断面観測，陸域では観測機器により流心部（水面下から全水深の 20%の位置）での観測とした．また，こうした調査結果と共に，環境教育等の関連イベントについても募集し情報を収集してきた．各調査の結果は，速報・報告書として取りまとめられ，東京湾再生推進会議の Web ページで公開されるとともに，ワークショップ開催を通して，議論・共有され，東京湾環境マップとしてまとめられてきた[2)]．平成 23 年からは，それまでのワークショップでの議論を反映し，環境調査の推奨項目として，透明度，生物調査が追加された（表-2）．

３．２　新たな指標としての透明度

環境省は平成 22 年に閉鎖性海域中長期ビジョン[3)]（以下，ビジョンとする）を発表し，生物の生息等を評価するために透明度やDOを導入するという方向性を示した．同ビジョンで整理された昭和 57－59 年と平成 18－20 年の透明度の平均値を比べてみると，内湾域の透明度が湾奥の北部で高く，湾口に近い南部で低いという分布をしていた昭和 50 年後半に比べて，透明度が都市域を中心とする西岸側で高く，盤洲干潟のある千葉側（東側）で低くなっているように，分布形状が変化するとともに，値の幅も広がってきているように見える．藻場との関係は，このスケールで見ている限りでは顕著でないものの，DOと共に，環境の変化を敏感に表現する指標としての妥当性が見て取れる（図-2）．

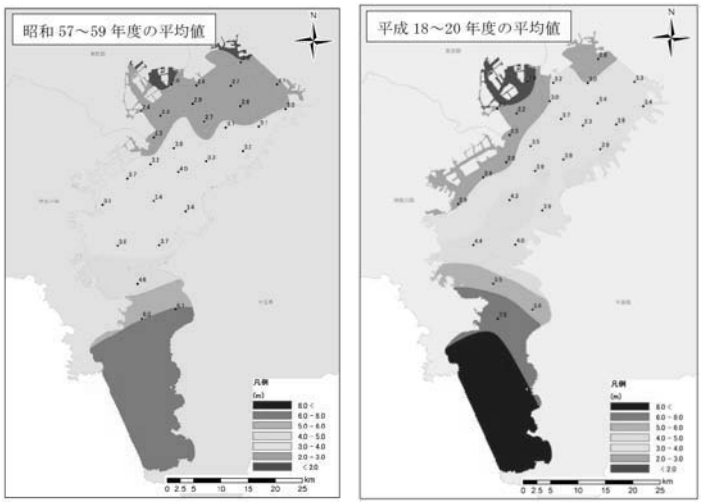


図-2 東京湾における透明度の分布

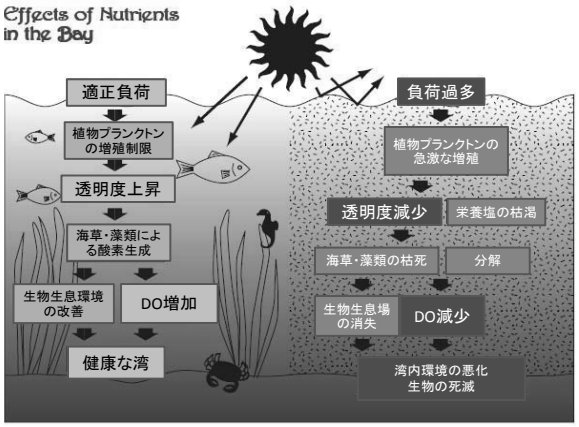


図-3 透明度と湾内環境の概念モデル

透明度と湾内環境の健全性については，Howes, Williams & Rasmussen(1999)[4)]に，栄養塩の湾内流入が適正であれば，藻類の繁殖が制限され，透明度が上昇し，DOの増加，生物環境の改善を通して，健康な湾が形成される一方で，負荷が過多であれば，藻類の急激な繁殖により，透明度が減少するとともに栄養塩の枯渇による藻類の枯死，分解が進み，DOの減少，生物影響を経て湾内環境が悪化することが概念モデル（図-3）と共に示されている．

３．３　透明度調査の結果

国土技術政策総合研究所では，平成 23 年度の水質一斉調査に合わせ，湾内および，港湾域を中心とする 126 点において透明度を観測した．平成 23 年 8 月 3 日の 8:00 から 16:00 の間に調査を実施した（図-4 左）．

東京港周辺の拡大図を図-4 右に示す．拡大して見ると，運河域から，航路域を通って葛西沖にいくまでに，平均的には透明度が徐々に高くなっていくことが判る．しかし，港口や河口では，局所的に透明度の高い領域が存在し，様々な影響が錯綜している様子も見て

取れる．図-4 からは，滑らかな透明度分布が得られており，河川からの影響域の特定等，場の特性を検討するのに適当な指標であることが推察される．

他機関において調査された透明度も合わせると，水質一斉調査当日には 273 地点で透明度が計測されていた．そのすべてを同時にプロットすると，図-5 のようになり，図-4 で見られたような滑らかな分布になっていない．これは，隣接する調査地点での観測時間が数時間以上異なることに起因している．

時間毎に分けてプロットすると，図-6 のようになり，図-4 に準ずる滑らかな分布が得られた．このことにより，透明度が大きな時間的変化をしていることが示唆された．

透明度の支配要因を推定するために，国土技術政策総合研究所が行った内湾での透明度測定データを目的変数とし，水質一斉調査で得られた懸濁物（SS），クロロフィル量（Chl），

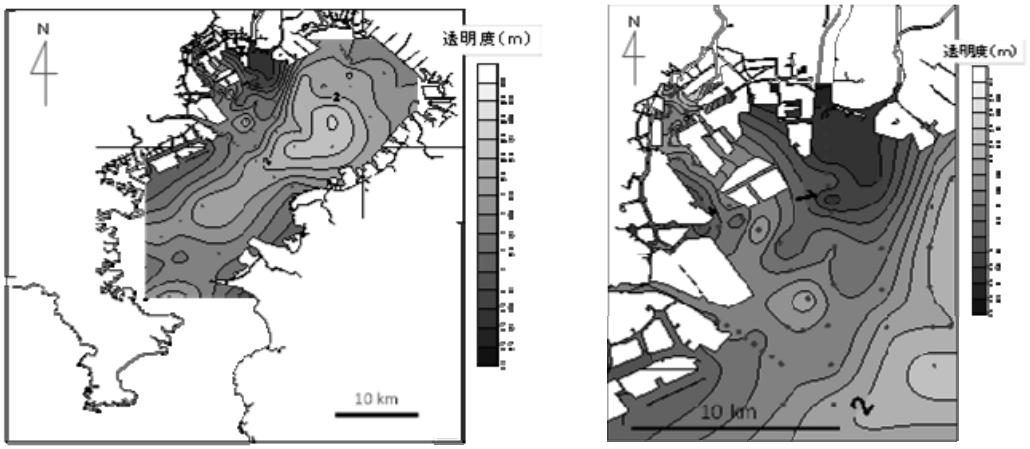


図-4 国土技術政策総合研究所による透明度調査地点と結果（左：東京湾，右：東京港周辺）

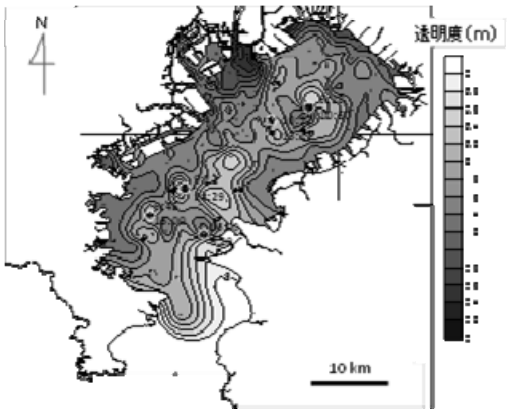


図-5 全データを使った透明度分布

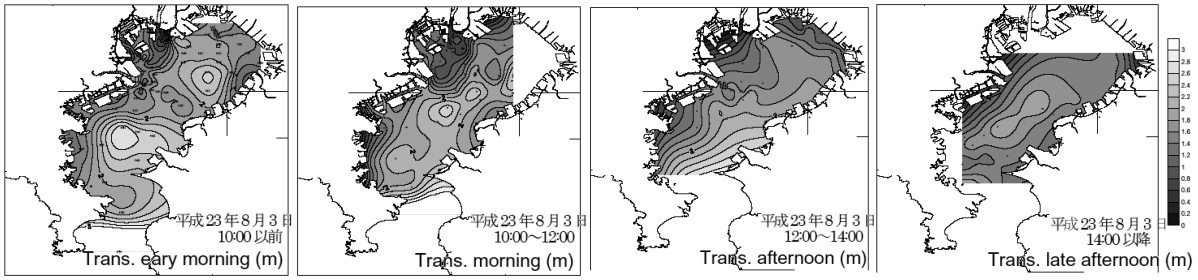


図-6 時間帯別透明度調査結果　a）10：00 以前，b）10：00-12：00，c）12：00-14：00，d）14：00 以降

有機物濃度（COD）を説明変数として重回帰分析を行った．ただし，国土技術政策総合研究所のデータ測定点と，水質測定点が異なるので，各々のデータを湾内を 20×20 格子状に区切ったグリッドデータとして平滑化した後，グリッド点毎にデータを対応させて回帰分析を行った．

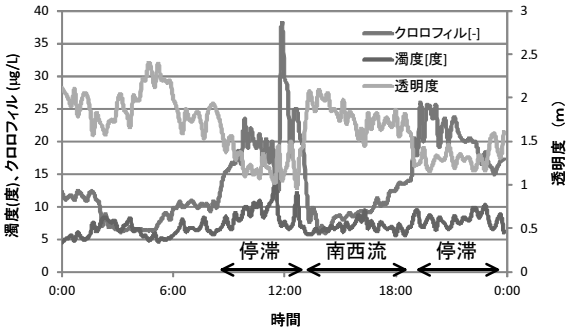


図-7 透明度変化の推定

その結果，COD の寄与率は低く，式(1)のように透明度の逆数である透過率が SS と Chl に比例するという結果になった．前出のビジョンでの推定式を式(2)として併記すると，同様の傾向であったことが判る．

$$\text{透明度 (m)} = 1.6 / (0.084 \times SS + 0.021 \times Chl + 0.12) \quad (1)$$

$$\text{透明度 (m)} = 1.6 / (0.139 \times SS + 0.04 \times Chl + 0.04) \quad (2)$$

透明度を支配要因から推定する式(1)が得られたので，1 日でどの程度の透明度の変化があるかについて，8 月 3 日の東京灯標の水質観測データを用いて確認した（図-7）．透明度は，数時間で 2.3m から 1m まで変化していたことになる．特に，昼間，流れが停滞していた時にクロロフィルが増加することで透明度が下がることや，潮汐流によって新たな水塊と入れ替わることや，夜間の植物プランクトンの減少が透明度を周期的，短期的に向上させている様子が推定される結果となった．クロロフィル量（植物プランクトンの増殖）や浮遊懸濁物を抑制することが透明度向上の鍵であることが示唆された．

４． マハゼ調査の意義・方法・今後

多くの人々が生活する都市臨海部の運河域などが，生物の生息場として高いポテンシャルを有し，また高い生態系サービスを提供できる場として注目されてきている．また，このような沿岸域の持続的な利用や生態系サービスの向上において，統合的沿岸域管理の重要性が，アジェンダ 21 や海洋基本法をはじめ国内外の様々なところで指摘されている．ところが現状においては，広域な沿岸域を横断的・包括的に評価できる指標および手法が不十分なため，環境評価の結果を統合的な沿岸域の管理に反映できない状況にある．

それを解決する手法として，流域を横断する生物の特性を利用して，環境を包括的に評価する手法を構築することを考えた．ここで着目したのが“マハゼ”である．マハゼは，水際から水深 15m 以浅を生息域とし，内湾域と河口域を行き来する．春に深場（水深 8m～15m）で発生し河口域へ遡上し，春から夏にかけて浅場砂泥域（水深 0m～3m）で生活し，秋に成熟とともに徐々に深場へ移動し，冬に深場で産卵する（図-8）．また，マハゼは水質，底質および生息場などの環境変化の影響を強く受けている．例えば，東京湾におけるマハゼの漁獲量は，東京湾沿岸の高度成長による生物棲息環境の悪化に伴い，1962 年以前には 300t 程度あったものが，2003 年には 5t にまで落ち込でいる[5]．

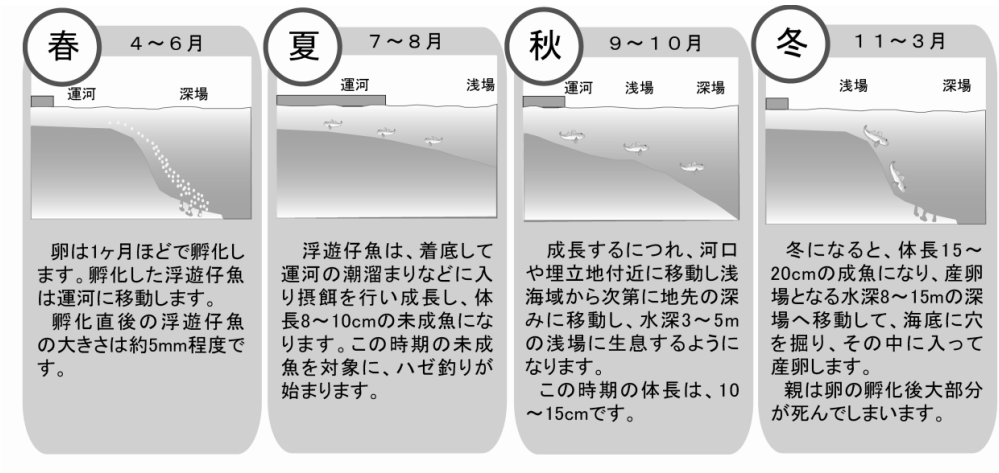


図-8　マハゼの生活史[6)]

４．１　調査・分析の手法

2009 年から 2012 年夏季にかけて東京港ならびに横浜港南の各地点（図-9）において，マハゼを採取した．採取した 4 地点●における全長組成分布に対して，分布の特徴を表す統計量として分散と歪度を求めた．また 9 地点▲について，耳石の輪紋数と輪紋幅（写真-1），Sr，Ca 含有量（EPMA 法により 3μm 毎）を測定し，マハゼのふ化時期および日齢ごとの塩分環境の推定を行った[7)]．海水と淡水を行き来する魚類は，高塩分下では耳石の Sr/Ca が高く，低塩分下では低い値を示す[8)]．図-8 に示したように深場で産卵し浅場に移動した場合は，塩分が高い場所から低い場所へ移動したことになり，Sr/Ca は高い値から低い値になる．

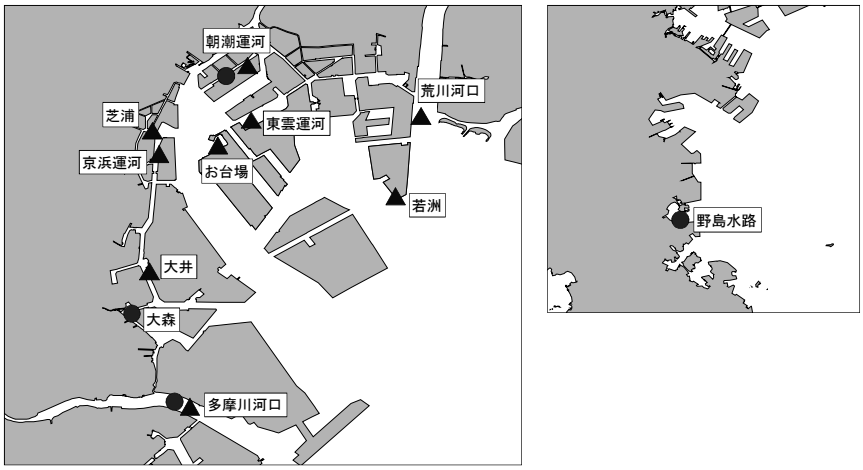


図-9　調査地点図（左：東京港，右：横浜港南）
（●：全長組成分布解析地点，▲：耳石解析地点）

４．２　調査結果から見えてきたこと

全長組成分布の分散と歪度の関係を用いて，生息・生育空間のネットワーク（生息場のつながり）の強さの評価ができる可能性が見えてきた．分散と歪度の関係には，3 種類のパターンがあった（図-10）．生息・生育空間のネットワークの観点からみると，P_A は周

辺水域に産卵時期が異なる産卵場が存在し，その産卵場からの供給の経路が形成されていること，P_B は周辺水域には産卵時期が異なる産卵場が存在しないことと，転出の経路のみが形成されていること，そして，P_C は周囲の産卵場や生息場がネットワーク化されておらず，孤立した状態にあると考えられている．

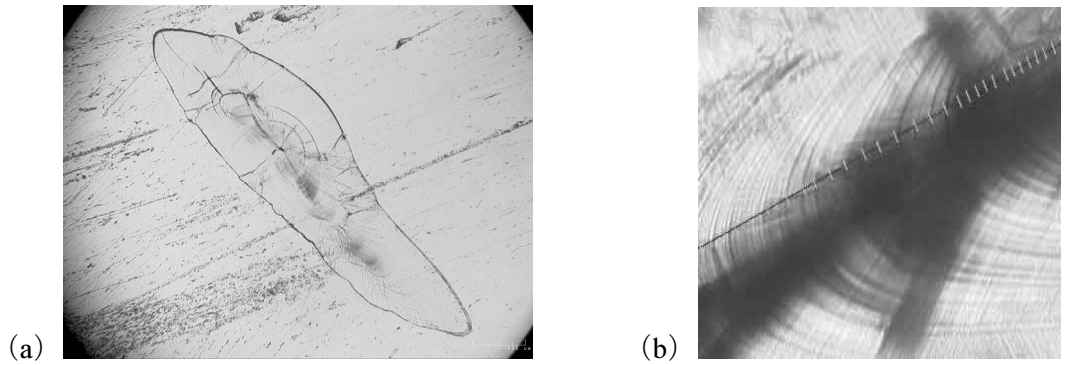


写真-1　耳石（a）および耳石の輪紋（b）

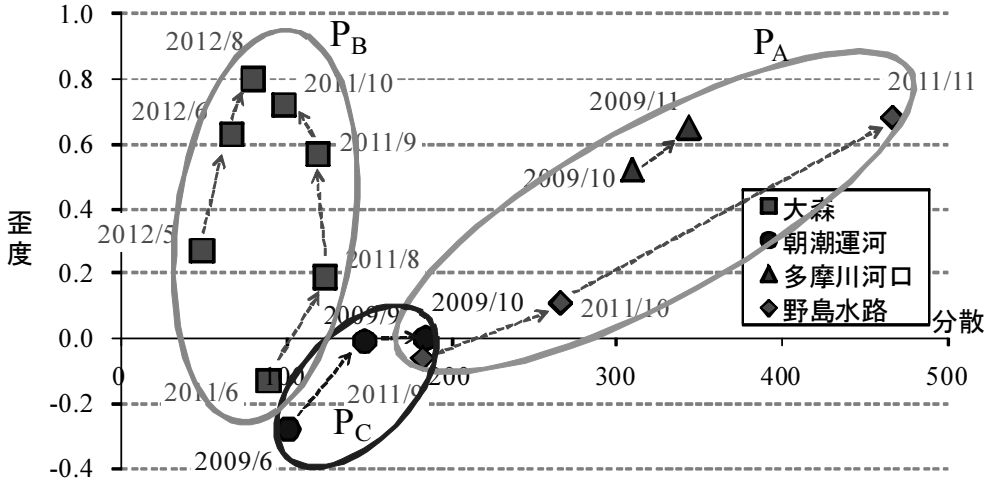


図-10　全長組成分布の分散と歪度関係
（図中の数字は採取の年月を示す.）

また耳石の主要な変動パターンに基づくグループ化を用いても，生息・生育空間のネットワークの強さを評価できる可能性が示された．グループは 2 つあり，一つは定説の行動パターンであるパターン 1 が主体である多摩川河口, 大井, 荒川河口, 若洲のグループ（G1），一つはパターン 1 がほとんどない京浜運河，お台場，東雲運河，朝潮運河の運河域のグループ（G2）である（図-11）．ただし芝浦は例外的であった．運河域のグループにおいて，パターン 1 がないことは，運河域のマハゼは本来の生活史に沿う移動が全くできていないことを示す．

以上のような考えの下に，多摩川河口と朝潮運河に対して，生息・生育空間のネットワークを評価すると次のようになった．河口干潟が存在する多摩川河口は，自然な幅広い産

卵期間を持つ幾つもの産卵場からの供給の経路が存在することから，つながりの強い生態系ネットワークが存在している水域と考えられる．一方，人工環境に囲まれ，貧酸素水塊が 11 月まで続き，周辺の深場がヘドロであり産卵場として利用できない朝潮運河は，限定された産卵期間しかない産卵場からの加入しかなく，しかもそのつながりは非常に弱いことから，生息場も生態系ネットワークも劣化している水域と考えられる．

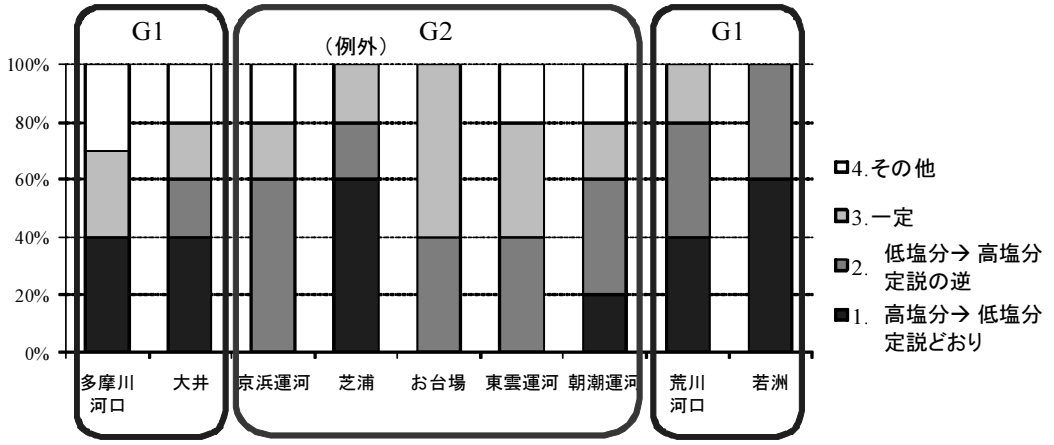


図-11　採取地点別の変動パターンの割合

４．３　今後の展開

マハゼの全長組成分布解析や耳石解析によって，生息・生育空間のネットワークの強さの観点から，沿岸域の環境を包括的に評価できる可能性があることが示された．今後はこのような指標を利用して，各水域を横断的・包括的に評価する．そして，生態系ネットワークのつながりが弱いと評価された水域に対しては，どのパスのつながりが弱いかを抽出し，広域的な観点から環境を改善する方法の提案を図っていくことが重要と考えられる．この広域的な観点からの環境改善手法は，既往の局所的・個別の環境改善手法を実施しても期待する程の成果が得ることができなかったところで効果的に機能することが期待される．

５．　環境共生護岸の取り組み[9)]

日本の沿岸域では，防災のための堤防等の築造や臨海部の開発による埋め立て等により自然海岸が減少し，特に流域人口の多い三大湾（東京湾，伊勢・三河湾，大阪湾）では，構造物によって人工化された水際線の割合が湾内の海岸線総延長の 80%を超えている（第 5 回自然環境保全基礎調査報告書（1998，環境省）より試算）．このような都市型の沿岸域において自然再生を推進するためには，港湾域の人工水際線を生物の生息場所として利用し，環境改善を図ることが有効な施策の一つとなる．

５．１　生物共生型港湾構造物の実証実験

港湾域の人工構造物に対し環境修復の機能を持たせる試みは，1971 年着工の四日市港霞ヶ浦地区の透水型ケーソン防波堤，1974 年着工の相馬港大津地区の緩傾斜式護岸，1978 年着工の輪島港輪島崎地区の擬岩防波堤，1981 年着工の千葉港千葉中央地区の階段式護岸等 1970 年代に始まった．その後，藻場の機能を持たせたり，親水施設としての機能を持たせたりとより広範な環境（生物・親水）に配慮した形状の防波堤・護岸が全国的に整備されるようになった．エコポート政策（1994 年策定）を経て，2011 年時点で完成予定を含め全国計 66 カ所において環境配慮型防波堤･護岸が造成･着手されていた．2009 年には，老朽化した護岸を復旧する際に，海洋生物の生息環境としての機能にも配慮し，生物共生型港湾構造物とする実験的な取り組みが，秋田港（大浜地区），新潟港（西港地区），堺泉北港（堺 2 区），北九州港（洞海地区），石垣港（新港地区）の計 5 カ所において行われた．

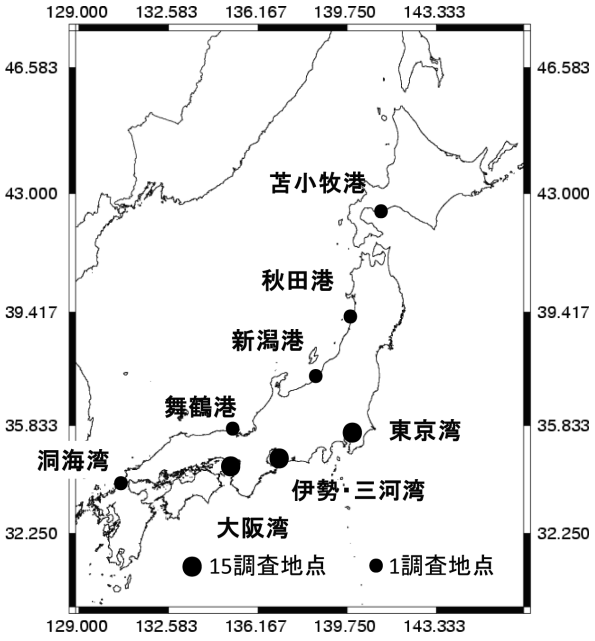


図-12　港湾構造物への付着生物調査地点

５．２　付着生物実態調査

このような背景を踏まえ，日本全国の概況を把握するために，三大湾（東京湾，伊勢・三河湾，大阪湾）および地方の主要港湾域（苫小牧港，秋田港，新潟港，舞鶴港，洞海湾）を調査対象とし，

１）全国の人工水際線における付着生物の現状を統一的な手法により把握し，

２）様々な空間スケールにおける変異，勾配と局所的な環境要因との関係性について検討するため，各海域の付着生物種組成・群集構造・多様度指数の共通性と特異性について基礎的解析を実施することを目的に調査を実施した．

現地調査は東京湾，伊勢・三河湾，大阪湾の各湾 15 カ所ずつ，苫小牧港，秋田港，新潟港，舞鶴湾，洞海湾においては各 1 ヶ所ずつの防波堤や護岸を調査地点とした（図-12）．調査は 2009 年 12 月～2010 年 2 月の間で行った．各調査地点においては水深の上中下の 3 測点と同水深で 3 コドラート（33cm×33cm）の合計 9 コドラートを設定し，サーバーネットとスクレーパーを用いてコドラート内のすべての生物を採集し，実験室に持ち帰って同定した．

また，各地の生物分布の調査結果をもとに，広域的な要因（空間変異や緯度勾配）や局所的な要因（深度や堤防前波高）との関連性を検討し，三大湾および地方の主要港湾域における共通性と特異性を明らかにした（表-1，図-13）．

表-1　付着生物調査で観察された地域・港別出現種数

調査海域	東京湾	伊勢･三河湾	大阪湾	苫小牧港	秋田港	新潟港	舞鶴港	洞海湾
調査地点数	15	15	15	1	1	1	1	1
海域に出現した種数	159	185	264	112	65	118	100	114
調査地点あたりの種数	44.5	48.7	96.9	112	65	118	100	114

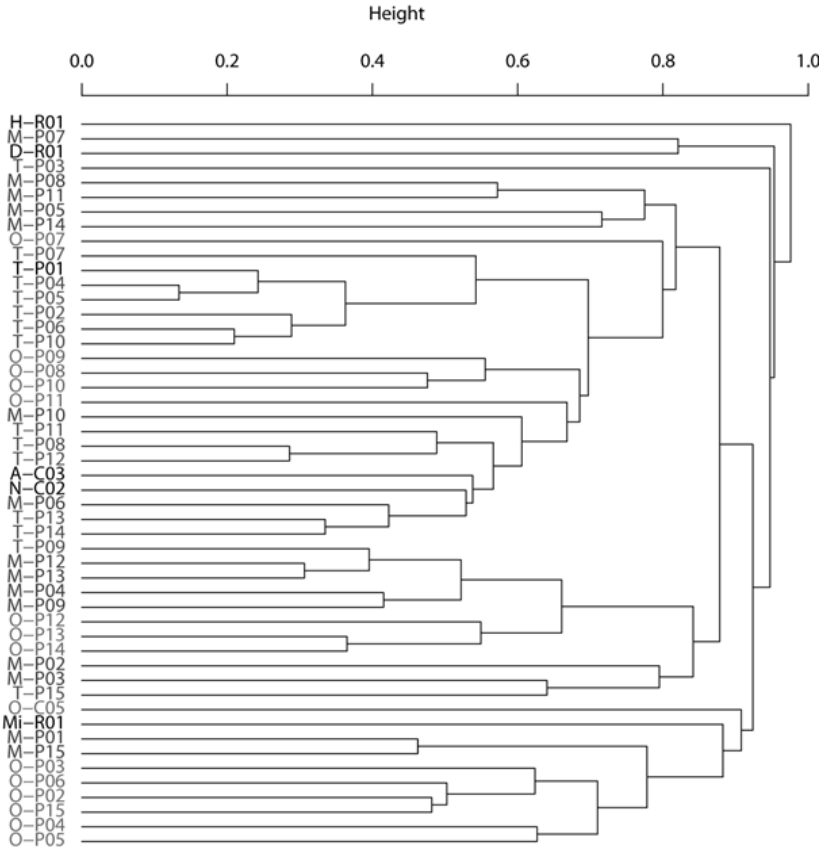


図-13　群集構造の類似度（個体数の重みづけをした解析）
（T-P：東京湾，M-P：伊勢・三河湾，O-P，O-C：大阪湾，
H-R：苫小牧港，A-C：秋田港，N-C：新潟港，MI-R：舞鶴港，D-R：洞海湾）

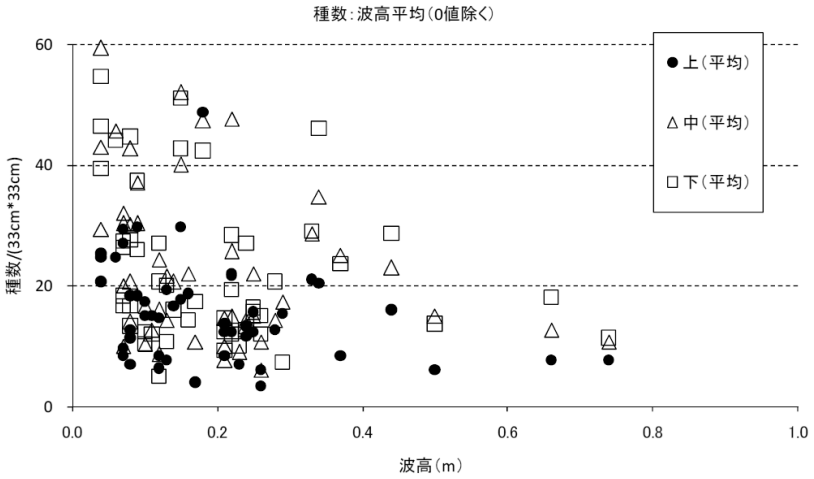


図-14 波高と付着生物種数の関係（上層・中層・下層）

港湾構造物の構造形式や数十年スケールの建設年数と付着生物の種数や多様度との関連性は無かったものの，波高が大きくなるにつれて最大出現種数が直線的に減少すること(図-14)．また，水深との関係については種数は平均水面下 1.0～6.0m の範囲で最大となり，個体数は平均水面付近で最大となることなどが確認された．

５．３　生物共生型港湾構造物のあり方

調査分析の結果から，湾域の生物ネットワークが広域的な多様度を支配し，水深および波高が群集構造を，水質や干出頻度，温度・塩分変化，光環境などが種組成を支配していることが推察される整理結果を得た．

生物共生型港湾構造物の企画，立案時の目標設定においては，その海域の生物ネットワークの現状や緯度勾配に起因する種の多様度を把握し，ターゲットとする生物の種組成を想定するとともに，目標とする生息生物の種数を増やそうとする時には波高に着目し，場所の選定や波向きに配慮することが重要である．波あたりが強い場所に構造物を設置する場合には，データに基づいて目標の種数を減ずることも検討すべきである．なお，多様度を上げる手法として，特定の水深帯（平均水面下 1.0～6.0m）に生物の生息に配慮した構造物をつくることも有効と考えられる．しかし，平均水面付近にそのような構造物を造ると，目標とする生物の個体数，湿重量を多くすることが期待できる一方で，特定の種が繁殖することで多様性を失う危険性があることも念頭に考えておかなければならない．その場において個体数を増やすのか，多様度を増やすのか等，目的を明確にして，水深帯を考えることが重要である．

現在取り組んでいる生物共生型港湾構造物では，鉛直壁ばかりではなく，緩傾斜，テラス型の干潟等，護岸部に生物生息に適した構造を積極的に配置する試みがなされている．複雑な構造になればなるほど，支配的となる環境要因も複雑になるものの，基本的には，種組成を支配する環境要因，群集構造を支配する支配要因についてモデル化し，検討することが有効であると考えられる．

６．海洋レーダー技術の利用

６．１　海洋レーダーの周波数割り当てとその意義

現在，日本では約 50 局の海洋レーダー運用されており，潮流・海流のモニタリング，漂流ゴミのモニタリング，浮遊ゴミ回収の効率化，波浪観測，津波観測，漂流探察・救護などへの利用を目指して，実証的に実験が進められてきた．しかし，無線局運用には免許が求められるが，実験局としての免許しか付与されない状況であった．これは，有限の資源である電波の利用や衛星軌道の割り当てについて国際的な利用調整を目的とした国際規則である無線通信規則に，海洋レーダーが規定されておらず，一般的なレーダーと同様の扱いを受けており，海洋レーダーの運用の中心となっている 3-50MHz の短波‐超短波帯にはごく一部の例外を除いて，運用が許されていないためであった．

この無線通信規則を改定するためには，3〜4 年に 1 度開催されている世界規模の公式会議である世界無線通信会議での審議が必要であり，日本は，米国，フランスなどの海洋レーダー推進国とともに，2007 年から 7 回にわたるアジア太平洋準備会合での合意形成会議，WRC-07 での議題としての採用決議，その後 4 年間かけた合計 8 回の国際無線通信連合無線部会での技術文書（勧告・報告）の作成会合，WRC-12 準備会合など，多くの関係者による共同作業を通して，規則改正に向けた働きかけを行った．

2012 年世界無線通信会議（通称：WRC-12）が，平成 24 年 1 月 23 日から 2 月 17 日にかけてスイス・ジュネーブで開催され，日本で配備が進んでいる海洋レーダーへの正式な周波数分配（4−39MHz 帯の中の 8 帯域）が決定した（表-2）．

今回の WRC-12 で海洋レーダーへの周波数分配が正式に認定されたことにより，今まで各国が個別に実験局として暫定的に運用してきた海洋レーダー局による周波数利用を整理することができることとなった．これは，他の電波利用者への有害な混信を軽減・回避するとともに，海洋レーダー局の安定運用に不可欠な運用免許を取得するための国際手続きをクリアしたことになる．

今回の決定により，信頼性の高い海洋モニタリングシステムとして海洋レーダーを開発・利用していくことができるようになった．今後，沿岸・海上の安全の確保，沿岸管理の高度化に寄与していくことが期待されている．

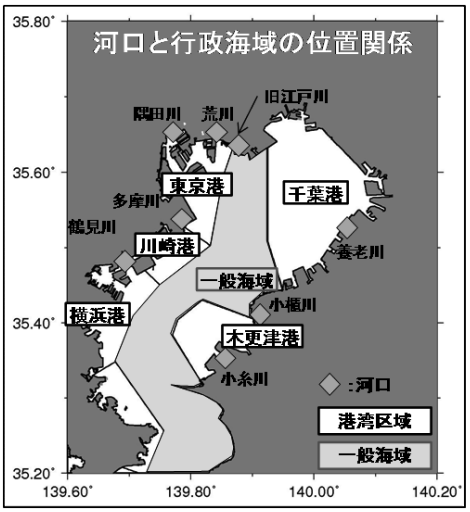
表−2 海洋レーダーに分配された周波数

帯域区分	日本の既存局運用周波数 ＊不連続な割り当て	日本からの提案周波数 （含：APT共同提案） ×APT提案に反対 ○日本のみ提案	第3地域に対する WRC−12での分配帯域 A:5. A115, F:5. F115適用
4.5MHz +/−1MHz		×3 155−3 200(s)	SUP
		×4 438−4 488(s)	4 438−4 488(s)A
	5 032−5 047.5(15/海保)		−
		5 400−5 450(p)	5 250−5 275(s)A
9MHz +/−2MHz	9 214−9 272*(25/NICT)	○9 200−9 300(p)	−
			9 305−9 355(s)F
12MHz +/−1MHz		×12 100−12 200(s)	SUP
			13 450−13 550(s)A
	13 921−13 971(50/北大他)	13 900−14 000(s)	SUP
16MHz +/−2MHz		NOC	−
			16 100−16 200(s)F
26MHz +/−4MHz		22 855−23 000(p)	SUP
	24 465−24 565(100/港湾他)	24 450−24 600(p)	24 450−24 600(s)A
		26 175−26 325(s)	26 200−26 350(s)A
		27 350−27 500(s)	SUP
43MHz +/−4MHz			39 500−40 000(p)A
		41 015−41 515(s)	41 015−41 665(p/韓国)
	41750−42750(300/港湾他)		43 350−44 000(p/韓国)
		46 500−47 000(s)	SUP

６．２　海ゴミ研究の現状と今後の展開

６．２．１　東京湾におけるゴミ回収事業

近年，日本の沿岸域における漂流・漂着ゴミ問題が顕在化しつつあり，沿岸環境に対する影響の懸念や経済的な被害に関する数多くの報告がなされている[10),11),12),13),14)]．最近ではプラスチック製ゴミに含まれる化学汚染物質に着目した研究が始められている．漂流・漂着ゴミは海岸や海洋における新たな汚染物質輸送媒体として注目され始めたのである[10)~13)]．また，東北地方太平洋沖地震による津波に起因する漂流物 150 万トンのうち約 4 万トンが漂流物として太平洋



図−15　東京湾の港湾区域

を漂流し，2012 年秋頃から本格的に北米大陸やハワイ諸島に漂着するのではないか，と推測されている．この本格的な漂着に先立って八戸港から流失した浮き桟橋がオレゴン州の海岸に漂着し，その解体作業に 8 万ドルを要したというニュースがこの夏マスコミを賑わせた．

東京湾では，港湾区域については港湾管理者が，一般海域については国土交通省関東地方整備局（以下，関東地整）が環境整備事業の一環として漂流ゴミを回収している（図-15）．例えば，2008 年度は港湾管理者と関東地整が回収したゴミ量は約 7600m^3 で，その内訳について見てみると横浜港内の回収量が最も多く約 3200m^3，続いて東京港内の 2000m^3，以下，千葉港の 1200m^3，木更津港の 900m^3，一般海域の 300m^3 の順番となっている（図-16(a)）．それぞれの海域に配備されている回収船の数に開きがあるため，環境整備船 1 隻・1 日当たりの回収量でみると各海域とも大きな違いはない．回収された漂流ゴミの内訳は関東地整が継続的に整理しおり，2008 年度の実績では，葦・草や竹，木片などの自然系の漂流ゴミが 83%を占めていた（図-16(b)）．二瓶ら[15]は，出水時に荒川河口の橋からネットによる直接ゴミ採集を行った．その結果，ゴミのほとんどが自然系のゴミであった．それらを勘案すると，東京湾の漂流ゴミは，自然系の漂流ゴミが大半を占めていると考えられる．

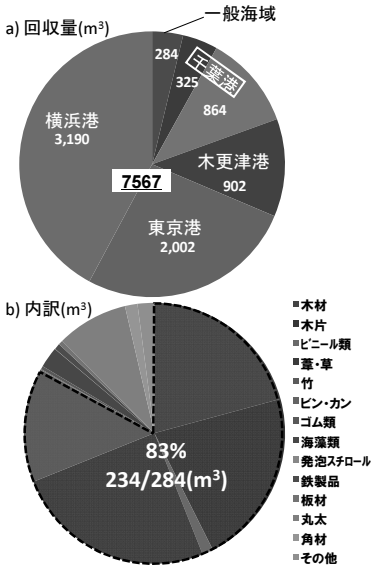


図-16　2008 年度のゴミ回収量(a)と一般海域におけるゴミの内訳(b)

漂流ゴミの湾内環境に対する影響を評価するためには，まずゴミ流入量や流入時期を把握することが必要である．また漂流ゴミの回収目標を適切に設定し，そして回収船の効率的な運用を図るためにも，ゴミの流入源，流入量や流入時期を把握することが必要である．漂流ゴミの多くは自然系であるため河川を介して湾内に流入していると想定されるが，流入源，流入量そして流入時期が明らかになっていない．世界の閉鎖性海域においても海洋ゴミの収支が把握されている海域は存在しない可能性がある．

国土技術政策総合研究所では，環境整備事業の目標設定や環境整備船の効率的な運用に資するため，東京湾におけるゴミ収支（流入源，流入量，流入時期や海底への沈降量，湾外への流出量）を明らかにすることを目指している．流入時期や湾内での漂流過程を明らかにすることで，港湾管理者と関東地整が連携をとりやすくなり，より効率的に漂流ゴミに対処することができるようになる．現在，ゴミ収支解明に向けた第一歩として，代表的なゴミである葦・草について湾内に流入する量を明らかにすることに取り組んでいる．

６．２．２　ゴミ流入量の推定方法

ゴミの湾内への流入量を把握するため，Kako et al.[16]（以下，K2010）と同様な方法で流入源，流入量，流入時期を推測した．K2010 は漂着ゴミ調査の結果と海洋数値モデルを用

いて東シナ海におけるゴミの流入源及び流入量を推定した．この推定方法を利用するためには，対象とする海域表層の流れ場の時空間変化と，対象海域内のいずれかの地点でのゴミ量の時間変化の情報が必要である．東京湾の場合，前者は海洋レーダーによる観測結果，後者は環境整備船による漂流ゴミ回収データによって把握することができる．東京湾では関東地整が設置した海洋レーダーによってほぼ全域が 1 時間毎に空間解像度 1.5km で計測されている．また，一般海域での漂流ゴミの回収量，種類及び回収日は関東地整によって把握されている．東シナ海と東京湾では表層流動場の時空間スケールが大きく異なるため，国土技術政策総合研究所では K2010 の方法が東京湾に適用可能であるかを検討し，適用可能であることを確認した[17]．

ゴミの東京湾への流入量を推定するためには，まず，関東地整の環境整備船による航跡データからある場所ある時刻での回収量を把握する．続いてゴミ回収時刻にゴミ回収場所に中立粒子を配置し，レーダーによる流速データをもとに中立粒子を逆方向に追跡する．中立粒子が河口域に到達したら，こんどはそこから中立粒子を多数放流し，実際にゴミが回収された時刻に回収された場所に到達するか確認する．到達した粒子が放出された箇所が発生源と考える．

次に発生源からゴミをある数だけ放出して順方向の粒子追跡計算を行い，そのうちどれだけが回収場所に到達するかを計算する．そして，実際の回収量だけ回収時刻に回収場所に漂流しているためには，どれだけ流入していたはずかをラグランジュの未定定数法によって推計する．そのゴミ流入量に港湾管理者のゴミ回収量を加えることによって 1 年間のゴミ流入量とする[18]．

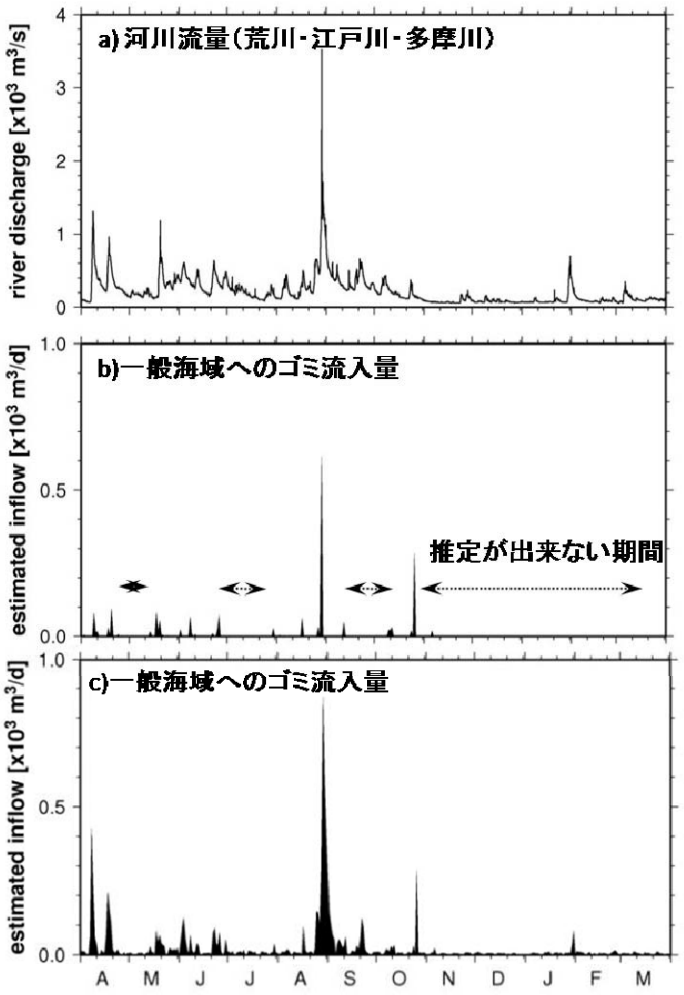


図-17　a)河川流量，b)環境整備船回収量による推定結果，c)環境整備船と河川流量からの推定結果

６．２．３　結果と今後の展開

2008 年度 1 年間のゴミ流入量の推定結果を図-17 に示す[18]．図の中に流入量を推定できなかった時期がある．これは，この時期に環境整備船がゴミ回収作業を行っていなかったためである．推定が出来た時期のゴミ流入量と同時期の

河川流量を比較したところ，高い正の相関関係があった．そこで，推定出来なかった時期の河川流量とこの相関関係からその時期のゴミ流量を推定した．

それらの結果，8 月末から 9 月上旬に発生した出水時（5 日間）に年間流入量の約 26%が集中していることが分かった．栄養塩や土砂輸送同様に，漂流ゴミに対しても出水の影響が大きいといえる．

2008 年間 1 年間で見てみると，河川から約 450t が流入し，そのうち約 40%を港湾管理者と関東地整が回収している（図-18）．海底に沈降した量は現時点では把握できていないが，湾内の環境に与える影響は特に大きいと推測される．今後の大きな課題である．

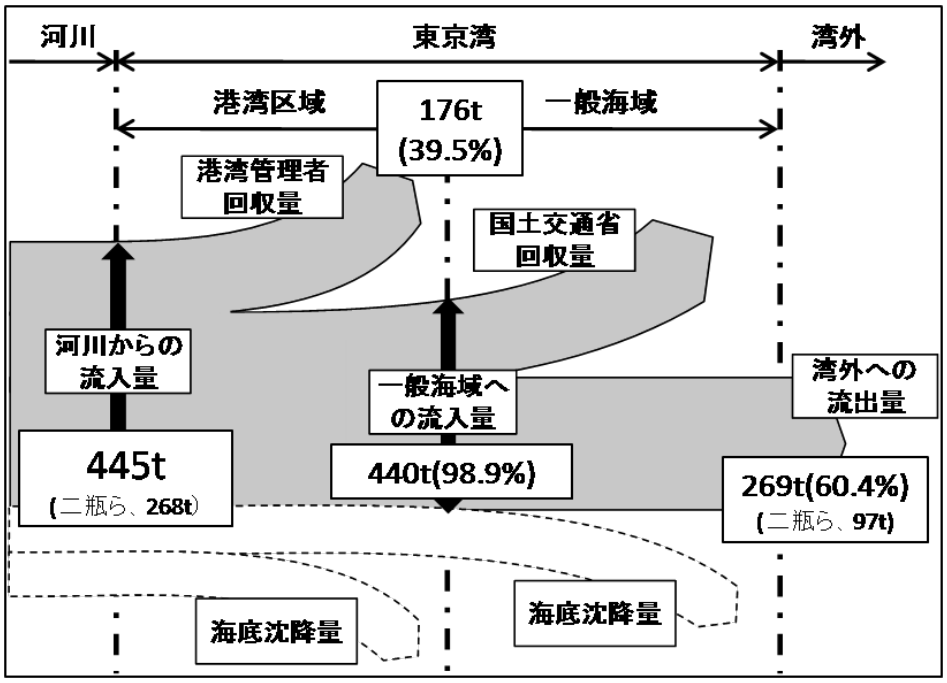


図-18　2008 年度におけるゴミ（葦・草）の収支

湾内への流入量，流入源，流入時期が把握できたので，それに対応する中立粒子を流入源から放流することによって，2008 年度 1 年間の湾内でのゴミの漂流過程を再現することができる．そこで漂流過程の再現計算を行い，それに実際の環境整備船の航跡を重ねてみた．夏の出水時において国土技術政策総合研究所で推定したゴミ集積海域で環境整備船がゴミを回収していたことが確認できた．

ゴミ流入量は河川流入量と相関が高いため，河川流入量が分かればゴミ流入量も概ね推定できる．これと 1 時間毎に更新される海洋レーダーの流れを組み合わせることによって準リアルタイムで漂流ゴミ分布を推測することができる．現在は，2009 年度を対象に同様の流入量計算を行う一方で，出水時における東京湾内での漂流ゴミ分布の調査を行い，海洋レーダーで予測した漂流ゴミ分布の推定精度を検証することに取り組んでいる．

東京湾に流入するゴミ量が把握されてこなかったのと同様に，日本の海岸，あるいは世界の海岸に漂着しているゴミ量，あるいは海洋に存在するゴミ量についても推定がなされていない．そのため，漂着ゴミの存在量を明らかにすべく，人工衛星画像や航空機撮影画

像の解析に基づく漂着ゴミ量の把握を試みている．そのために画像解析に基づくプラスチックゴミ量の自動計測技術を開発した[19]．海洋ゴミ問題を解決するためには，ゴミを削減するための施策と共に，このような基礎的な技術の開発を欠かすことはできない．

7． おわりに

低迷する日本の経済を再生するため，経済活動の多くが行われ，国家の活力の源泉である「都市」の魅力と国際競争力を高め，その再生を果たすという目標の下に，民間の力を都市に振り向けることをねらいとした経済構造改革である「都市再生」が進められた．その一環として平成 13 年 12 月に「海の再生」が都市再生プロジェクトに位置づけられた．その後 10 年にわたり多くの人たちが「海の再生」に取り組んできた．国土技術政策総合研究所もその一翼を担い，東京湾環境一斉調査，マハゼ調査，環境共生護岸技術そして海洋レーダー技術の研究など幾つかの取り組みを行ってきた．そうした取り組みによって「海の再生」に向けた技術や情報の蓄積が進んできたが，「海の再生」は容易に達成することのできない大きな目標である．首都圏の中央部に位置する東京湾を自然的な快適性や生物生産などの面から価値の高いものにしていくことは日本の経済や社会にとって明らかに恵の多いものである．それは極めて困難な目標であるが，知識を増やし，技術を磨き，頭脳の限りを尽くし，あきらめることなく目標に向かって挑戦をしていくことが必要である．ここでは，近年の国土技術政策総合研究所の取り組みを紹介し，その延長線上にある取り組みの方向性を紹介した．だがそれだけで「海の再生」が現実のものになるわけではない．こうした取り組みを踏み台にして「海の再生」にさらに一歩でも二歩でも詰め寄ることができる取り組みに発展させていくことを心に念じ，これからの研究に取り組んでいきたい．

参考文献

1) 東京湾再生推進会議：東京湾再生のための行動計画，36p，2003.
2) 東京湾再生推進会議モニタリング分科会, 九都県市首脳会議環境問題対策委員会水質改善専門部会, 東京湾岸自治体環境保全会議 : 東京湾環境マップ 陸と海をつなぐ河口域・浅瀬，調査の発展，Ver.6，2012.
3) 閉鎖性海域中長期ビジョン策定に係る懇談会 : 閉鎖性海域中長期ビジョン, 環境省, 86p, 2010.
4) Howes, B.L., T. Williams and M. Rasmussen: Nutrient Related water quality of Buzzards Bay embayments: a synthesis of Bay waters monitoring 1992-1998. Coalition for Buzzards Bay, 127p, 1999.
5) 工藤貴史・吉野暢之：東京湾における人とマハゼの関係史，財団法人東京水産振興会，水産振興，No.516，62p，2010.
6) 国土技術政策総合研究所沿岸海洋・防災研究部海洋環境研究室 : 東京湾環境マップ－京浜運河編－，2008.

7) 上村了美 : マハゼの耳石が語ること , 社団法人海洋調査協会 , 海洋調査協会報 , No.107, pp.15-19，2012.
8) 新井崇臣 : 魚類の回遊履歴 : 解析手法の現状と課題 , 魚類学雑誌 , No.49, pp.1-23, 2002.
9) 上村了美・吉田潤・岡田知也・古川恵太 : 港湾構造物に生息する付着生物群集の全国比較 , 国土技術政策総合研究所報告，No.44，51p，2011.
10) 中島悦子ら : 長崎県五島列島における漂着ゴミ由来の重金属の定量化，2010 年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集，205，2010.
11) 栗山雄司ら : 東京湾ならびに相模湾におけるレジンペレットによる海域汚染の実態とその起源，日本水産学会誌，Vol.68，No.2，pp.164-171，2002
12) Endo, S. et al.: Concentration of polychlorinated biphenyls (PCBs) in beached resin pellets: variability among individual particles and regional differences, Marine Pollution Bulletin, No.50, pp.1103-1114, 2005.
13) Mato, Y. et al.: Plastic resin pellets as a transport medium of toxic chemicals in the marine environment, Environmental Science & Technology, No.35, pp.318-324, 2001.
14) 竹田春美ら : 離島生活の生命線である航路の運行再開を目指して～鹿児島県南西沖での大規模漂流木回収～，平成 22 年度九州国土交通研究会，2010.
15) 二瓶 泰雄ら:出水時大河川における浮遊ゴミ輸送特性に関する現地観測と湾内 DO 環境へ及ぼす影響，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.66，No.1，pp.1171-1175，2010.
16) Kako, S.et al: Inverse estimation of drifting-object outflows using actual observation data, Journal of Oceanography, Vol.66, pp.291-297, 2010.
17) 片岡智哉・日向博文 : 漂流ゴミ流入量に対する逆推定手法の東京湾への適用性と推定結果の水平拡散係数依存性，沿岸海洋研究，Vol.49，No.2，pp.113-126，2012.
18) Kataoka, T. et al.: Numerical Estimation of Floating Macro-debris Inflow Flux into Tokyo Bay, 50th Estuarine & Coastal Sciences Association (ECSA) Conference, O4.28, 2012.
19) Kataoka et al.: A new technique for detecting colored macro plastic debris on beaches using webcam images and CIELUV, Marine Pollution Bulletin, Vol.64, pp.1829-1836, 2012.

わが国におけるLCCの台頭と空港政策

空港研究部長

傍士　清志

わが国におけるLCCの台頭と空港政策

空港研究部長　傍士　清志

１．はじめに

世界の航空市場に価格革命をもたらした格安航空会社（LCC）が，2010 年以降次々とわが国航空市場に参入し,2012 年には本邦企業が出資した日の丸 LCC3 社が相次いで就航し，にわかに脚光を浴びている．

図-1にインターネットの検索サイトGoogleでの「LCC」という語の日本における検索状況の推移を示す．春秋航空が茨城＝上海間で片道4,000円というキャンペーン価格を発表してセンセーションを巻き起こした2010年秋以降，日あたりの検索回数は急増し，ピーチ・アビエーションが関西国際空港を拠点として就航した2012年3月のピークを経て，エアアジア・ジャパン，ジェットスター・ジャパンがそれぞれ成田空港を拠点として運航開始した2012年夏には過去最高の検索回数を記録している．LCCは連日報道でも取り上げられ，社会現象ともいえる盛り上がりを見せ，国民の注目を集めている．

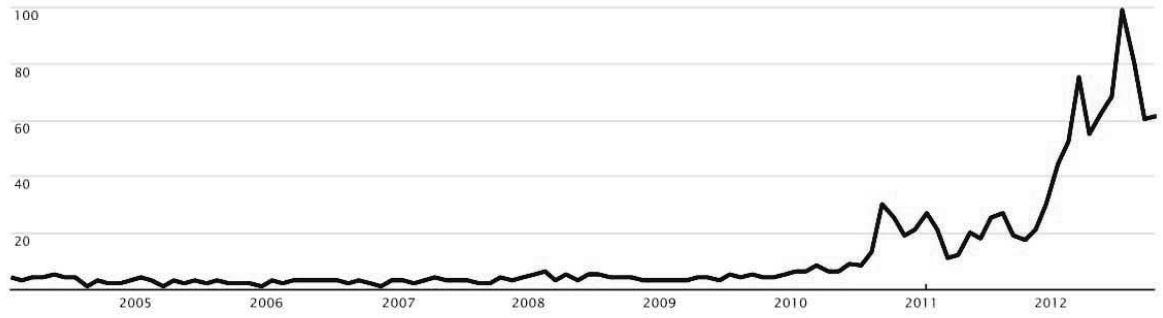


図-1　検索語「LCC」の推移　（Google trend：日本語サイト）　最大値を 100 とした相対表示

LCC に対する国土交通省の取り組みについては，平成 22 年 5 月 17 日に公表された国土交通省成長戦略のうち,「我が国の成長に貢献する航空政策へ」と題された航空分野において，LCC 参入促進による利用者メリットを拡大することとされ，LCC の参入促進が行政施策目標として規定されている．

具体的な参入支援に向けた施策として,オープンスカイの推進，拠点空港における LCC 専用ターミナルの整備,国際動向に迅速・的確に対応した技術規制の緩和等があげられ，これら施策の総動員によりLCC をはじめとした新規航空企業の参入の促進のほか，既存航空会社の競争力向上を図り，成長著しいアジア地域からのインバウンド旅行者の受け入れ体制を強化することとされている（巻末資料参照）．

２．格安航空会社（LCC)の歩みと現状

2.1　LCCの定義

LCCとはロー・コスト・キャリア（Low-Cost Carrier)の頭文字を取った略語である．直訳すれば「低経費航空会社」ということになるが，訳語として一般的なのは「格安航空会社」という言葉であり，マスコミの報道等を通じてこの用語が一般的に使われることが多いことから本稿でもこれに従うこととする．

LCCに対し，従来からのエアラインは幅広いサービス（フルサービス）を提供することから，フル・サービス・エアライン（FSA：Full Service Airline)と呼ばれる．大きな路線網（ネットワーク）を有することからネットワーク・キャリア（Network Carrier)と呼ばれたり，従来型のビジネスモデルで路線展開を行うことからレガシー・キャリア（Legacy Carrier)と呼ばれたりすることもある．本稿では以下FSAの用語を用いることとする．

それではLCCとFSAの差はどこにあるのかを明らかにするために,典型的なLCCのビジネスモデルについて，その特徴を以下のとおり列挙する．

①運航機材の統一

LCCの多くは運航する機材を一種類に限定している．ほとんどのLCCはボーイング社のBoeing737シリーズかエアバス社のAirbus A320ファミリーを採用している．単一機材に限定することによって運航の効率化を図ることができるからである．航空会社が複数機材を運航した場合，乗務員の訓練も別々に行わなければならないし，それに伴うシミュレータなどの訓練機材も非効率になる．整備作業も別々で予備部品は大幅に増加する．整備士にもそれぞれの機種の整備資格が必要となる．また,座席配置や定員の異なる機材があると予約システムなども複雑になるなど，いずれにせよ複数機材の運用はコストの増大を招くことから，LCCは機材の統一によってコストの削減を図っている．

図-2　Boeing737

図-3　Airbus A320

②サービスの抑制

多くのLCCは機内サービスを全く提供しないか，あっても有料で，ノンフリル・エアライン（Non-frills Airline）とも呼ばれる（フリルとは洋服の袖や襟についている飾りのことで,転じて航空会社の過剰なサービスを指す）．

ドリンクや機内食を廃止すれば，仕入れ費用だけでなく，搭載などに必要な人員を削減でき，わずかながら離陸重量の低下による燃費の向上にも寄与する．実際にはLCCでもドリンクなどは有料化して提供されている場合が多いが，この場合は収益増要因となる．

また,個人用モニターなどの娯楽システムもコスト縮減の観点から提供されないが,就航が飛行時間で１～４時間程度の比較的短い路線に絞り込まれているため，乗客にとってさほど大きなストレス要因とはならないと判断されている．

③機内の座席数の最大化

LCCでは１機のシートの前後幅（シートピッチ）を最小化し，１機の航空機で運べる旅客の数を可能な限り多くしている．FSAではシートピッチは31～34インチの場合が通常であるが，LCCでは29インチまで圧縮する例もある．座席は全てエコノミークラスにして，座席指定を行わない自由席とするケースも多い．図-4にはA320を例にとってLCCとFSAの座席配置を示す．LCCでは180席が確保される一方，FSAではビジネスクラスのシートが配置され，シートピッチにも余裕を持たせた結果，110席となっている．

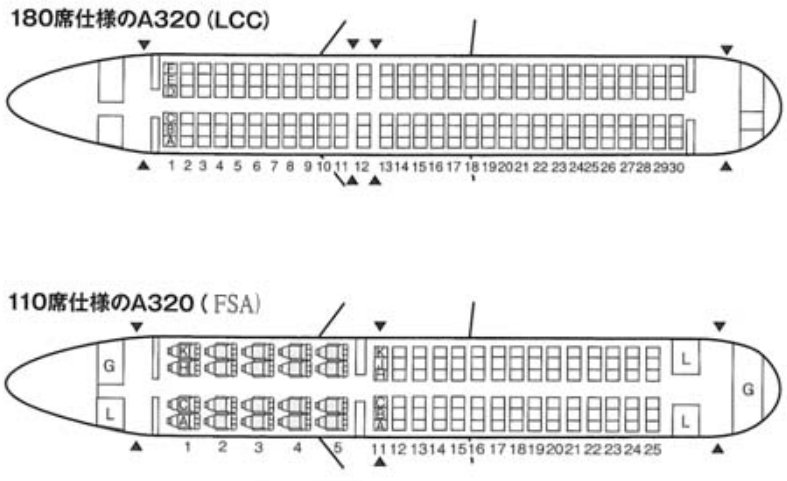


図-4　LCC と FSA の座席配置

④機材稼働率の最大化と自走式マヌーバー

航空機が空港に到着し，再び出発するまでの折り返し時間をターンアラウンドタイムというが，FSAでは通常40～50分に設定している．これに対し，LCCでは国内線の場合30分程度に短縮することにより，機材の稼働効率を上げている．

わが国では地方空港であっても乗降にボーディングブリッジ（搭乗橋）を使う例が多い．図-5はボーディングブリッジを使用する場合と自走式の場合の駐機方式を示す．前者では，出発する際にはトーイングトラクターを用いたプッシュバックを行う必要があり，旅客の快適性が向上する反面，時間的ロスやコストの上昇を生む．LCCではあえてボーディングブリッジを使わず，自走式のマヌーバリング（地上走行）とタラッ

プ車を併用し，運用効率を上げているケースが多い．

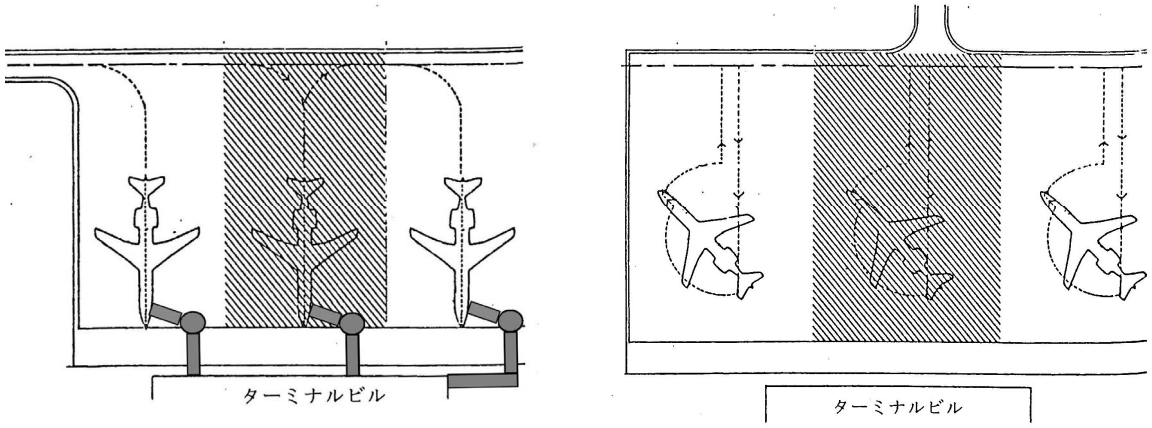


図-5　プッシュバック式（左）と自走式(右）の地上走行動線

図-6　トーイングトラクター

図-7　ボーディングブリッジ

これによって､FSAが一日3往復しかできない路線を4往復したりするケースもあるが，一方で，LCCの定時発着率はFSAに比べて低くなることが多く，ある空港で発生した遅延を終日取り戻せず,最終的に空港の運用時間の制限内に運航不能となり欠航となってしまうといった事例も報告されている．

⑤第二空港（セカンダリー・エアポート）の利用

海外のLCCでは着陸料や施設使用料が高いメイン空港を避け，地域の第二（あるいは第三，第四の）空港を利用する例が多い．例えばロンドン周辺には5つの民間空港があるが，我が国の航空会社をはじめとするFSAは主にヒースロー空港を利用しているのに対し，第二，第三空港に相当するガトウィックやスタンステッドにはLCCが数多く発着する.中でもスタンステッド空港はLCCながら今や世界最大級のメガキャリアに成長したライアン・エアが拠点の1つとしている．同空港はロンドン市内からおよそ50km離れており利用者にとってはいささか不便であるものの，拠点として利用するLCCにとってはメリットが大きい．着陸料や施設利用料が安いことに加えて，メイン空港ほど混雑

していないため発着枠を確保しやすい.

一方，アジア諸国では先行投資して大規模な空港を整備しており，空港使用料もけっして高くない.LCCがセカンダリー空港を利用する必然性は一部の空港を除きあまりないといえる．このため，セカンダリー空港の利用にかえてLCC専用のターミナルビルを建設する例がシンガポールやマレーシアで先行し，我が国でも2012年から複数空港で広まっている．具体的なLCC専用ターミナルの例については，次章で記述する.

⑥インターネットの最大活用

LCCの予約はほぼインターネット予約に集約されている.インターネット予約の最大の利点は，システムを整えてしまえば後は利用者自身が必要な作業をして航空券を発券してくれることだ．予約センターや空港カウンターに大人数の人員を配置するFSAに比べれば大幅に人件費を削減することが可能となる．ほとんどの予約を自社のウェブサイトで受け付け、コールセンターの予約係の人数を減らしている.例えばライアン・エア(アイルランド）では電話予約の場合や空港における搭乗券発券の場合,20～40ポンドの割増料金を徴収している.また,これに加えて自社ウェブサイトで旅行傷害保険,格安ホテル,格安レンタカーなどの販売によって手数料収入を得ている.

高齢者やIT弱者には利用しにくいが，インターネット社会が進展する時代背景からすれば,LCCがインターネット利用を前提としたビジネスモデルを構築することは必然ともいえる.

表-1　ライアン・エアのWeb予約と電話予約の手数料の比較

（単位:英ポンド）

	Web 予約	電話予約	備考
管理料金	5	5	予約システムのコスト
電話予約	ー	20	コールセンター予約
優先搭乗	4	5	
空港搭乗券発行	ー	40	
乳幼児	20	20	2歳未満に適用
手荷物(1個目)	25	45	15kg以下
手荷物(2個目)	35	70	15kg以下
便変更(1片道)	25	40	
名前変更(1旅客)	100	150	

(2011年1月現在)

出典:航空経営研究室

2.2 LCCの起源

LCCの端緒といえる航空会社を規定することは必ずしも容易ではなく，1950年代からアメリカでは国内線において通常のエアラインより安い運賃を提供する企業が出現している．そのような状況の中,米国のパシフィック・サウスウエスト航空が西海岸の高需要短距離路線に単一機材を投入し，他社より短いターンアラウンドタイムを実現し，他社よりも安い運賃を提供するという今日のLCCビジネスモデルに近い形態を実現している．

この低運賃ビジネスモデルに注目して1971年，現代のLCCの起源ともいうべきサウスウエスト航空がテキサスに誕生している．サウスウエストは大手航空会社と熾烈な競争を繰り広げつつ，徐々に事業を拡大していった．サウスウエストが現代のLCCの起源といわれる理由は同社が機内のミールやドリンクサービスを省略し，機材は基本的にB737シリーズに統一，混雑しないセカンダリー空港を使い，短いターンアラウンドタイムで航空機の稼働率を上げるという，今日のLCCの要件をほぼクリアしているためである．その後米国においては様々なLCCが出現し，そして消えていったが，サウスウエストはこの熾烈な競争を生き抜き，今日では世界最大のLCCの地位を占めるに至っている．同社は全ての航空企業の中でもデルタに次ぐ2番目の旅客輸送実績（2010)をあげている。

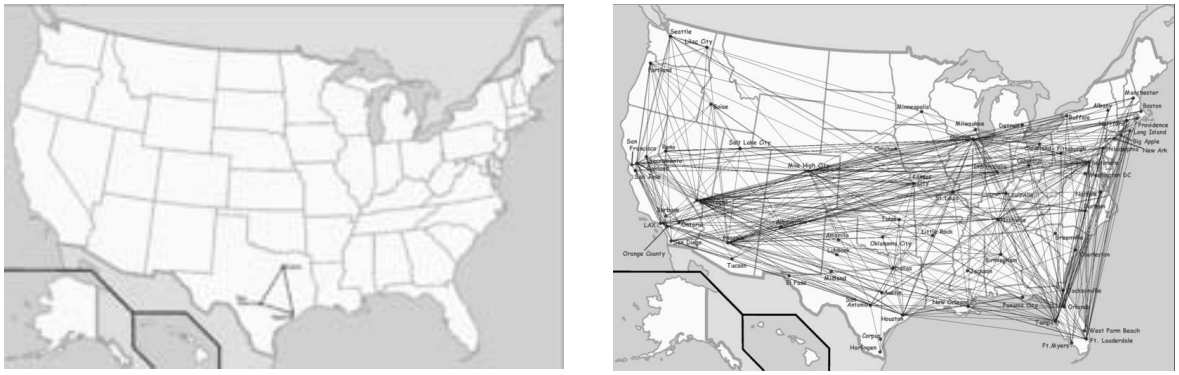


図-8　サウスウエストの国内線ネットワーク(左：創業当時、右 2011)

2.3　世界におけるLCCの現状

図-9は世界におけるLCC 座席数シェアの推移を示している．総座席数に占めるLCCのシェアは，2001年に8.0 %であったが，2011年には16.3%増の24.3%にまで急激に増加している．

一方で，図-10に示すように，LCC 座席数シェアは地域によって大きな相違がある.アジア太平洋地域は,他地域と比較して相対的LCCの比率が低い．しかしながら，近年エアアジア（マレーシア）やジェットスター（オーストラリア）などがこの地域で急激にシェアを延ばしていることから，アジア太平洋地域でのLCCのシェア拡大が予想される．

図-11 は日本における国内路線と国際路線のLCC 座席数シェアの推移を示している．国内路線におけるシェアは,スカイマークをはじめとする新興航空会社の合計であり，LCCの定義と必ずしも一致しない部分もあるが，後述するように，我が国ではFSAが出資したLCCが本年次々と就航を開始したことから,日本を中心としたアジア太平洋地域において,今後LCCはますます成長するものと期待される．

国際線LCCのわが国に乗り入れについては,2007 年に大阪／関西に乗り入れたジェットスター・ジャパンをはじめ，外資系LCC の参入が相次いでおり，現時点では8社のLCCが我が国に就航している（表-2参照）．それら外資系LCCは，2007 年の0.4 % から2011年には2.6%にまでわが国における国際線座席数シェアを増加させている．

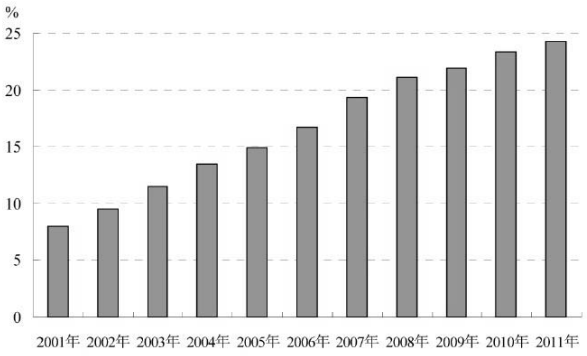


図-9　LCC の座席シェアの推移

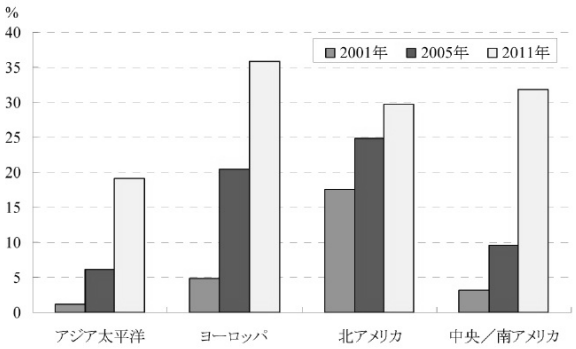


図-10　地域別 LCC の座席シェアの推移

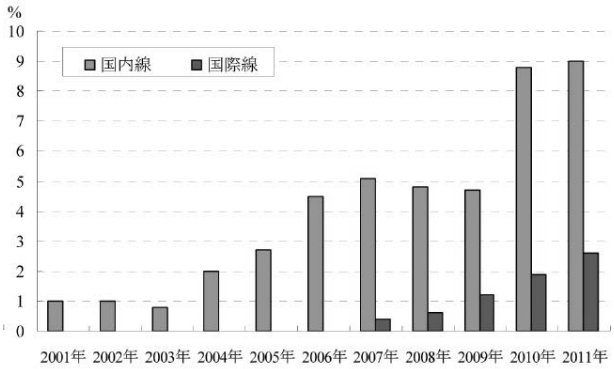


図-11　わが国における LCC の座席シェアの推移

表-2　わが国に乗り入れている国際線LCC一覧

	航空企業	国	路線(2012年9月第3週における便数)	就航年
1	ジェットスター航空	オーストラリア	大阪／関西－ケアンズ(5)、大阪／関西－ゴールド・コースト(5)	2007年
			東京／成田－ケアンズ(7)、東京／成田－ゴールド・コースト(6) 東京／成田－マニラ(4)	2008年
2	セブ・パシフィック航空	フィリピン	大阪／関西－マニラ(3)	2008年
3	済州航空	韓国	大阪／関西－ソウル／仁川(7)、大阪／関西－ソウル／金浦(7)	2009年
			名古屋／中部－ソウル／金浦(7)	2010年
			大阪／関西－済州(5)	2011年
			名古屋／中部－ソウル／仁川(7)	2012年
			福岡－ソウル／仁川(7)	2012年
4	エア・プサン	韓国	福岡－釜山(7)	2010年
			大阪／関西－釜山(7)	2010年
			東京／成田－釜山(7)	2011年
5	ジェットスター・アジア航空	シンガポール	大阪／関西－台北／桃園－シンガポール(14)	2010年
			大阪／関西－マニラ－シンガポール(7)	2012年
6	春秋航空	中国	茨城－上海／浦東(3)	2010年
			高松－上海／浦東(2)	2011年
7	エア・アジアX	マレーシア	東京／羽田－クアラルンプール(3)	2010年
			大阪／関西－クアラルンプール(4)	2011年
8	ジン・エア	韓国	札幌／新千歳－ソウル／仁川(4)	2011年

一方，表-3は2010 年における乗客数からみた世界の航空企業ランキングを示している．サウスウェスト航空やライアン・エア，イージー・ジェットは，主要なネットワーク・キャリアとともに，世界のトップ15 を占めている．これらは,典型的なLCC のビジネスモデルによって，図-12に示すような低コストを達成していることから輸送実績を伸ばしているとみられる．

表-3　世界の航空企業の輸送実績ランキング

順位	航空企業	国／地域	乗客数	RPKs	座席利用率	営業収入	営業利益	純利益
			(千人)	(百万)	(%)	(百万ドル)		
1	デルタ航空	アメリカ	162,615	310,956	83.0	31,755	2,217	593
2	サウスウェスト航空	アメリカ	106,307	125,778	79.3	12,104	988	459
3	ユナイテッド航空	アメリカ	99,452	297,129	83.9	34,013	1,818	854
4	アメリカン航空	アメリカ	86,204	201,944	81.9	22,170	308	-471
5	中国南方航空	中国	76,455	111,327	79.2	11,676	954	973
6	ライアン・エア	アイルランド	72,100	—	83.0	5,119	689	528
7	エール・フランスーKLM	フランス	71,320	204,737	81.6	33,317	127	865
8	中国東方航空	中国	64,878	93,054	78.0	11,296	864	802
9	ルフトハンザ・ドイツ航空	ドイツ	58,916	129,668	79.4	36,191	1,642	1,498
10	USエアウェイズ	アメリカ	51,853	94,938	82.4	11,908	781	502
11	イージー・ジェット	イギリス	48,800	56,128	89.2	4,697	274	192
12	中国国際航空	中国	46,241	86,212	80.3	12,513	1,658	1,871
13	全日空	日本	45,743	58,414	67.5	16,385	818	281
14	日本航空	日本	34,795	59,740	68.9	16,441	2,274	—
15	TAM航空	ブラジル	34,553	51,446	71.9	6,830	609	402

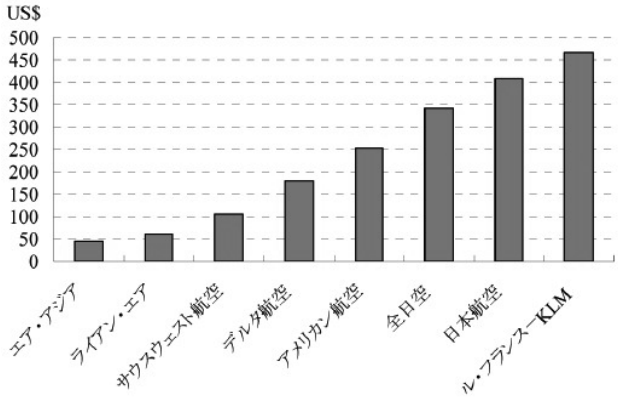


図-12　航空企業における乗客
一人当たり営業費用の比較

また，図-13には代表的なFSAとLCCの有効座席マイルあたりの営業コストを比較している．なお，この図に取り上げた３社のうち，アメリカン航空はFSAの代表であり，ジェットブルーは高いサービス水準で知られる米LCC，エアアジアはLCCの中でもとりわけ低コスト構造を達成しているマレーシアの企業である．

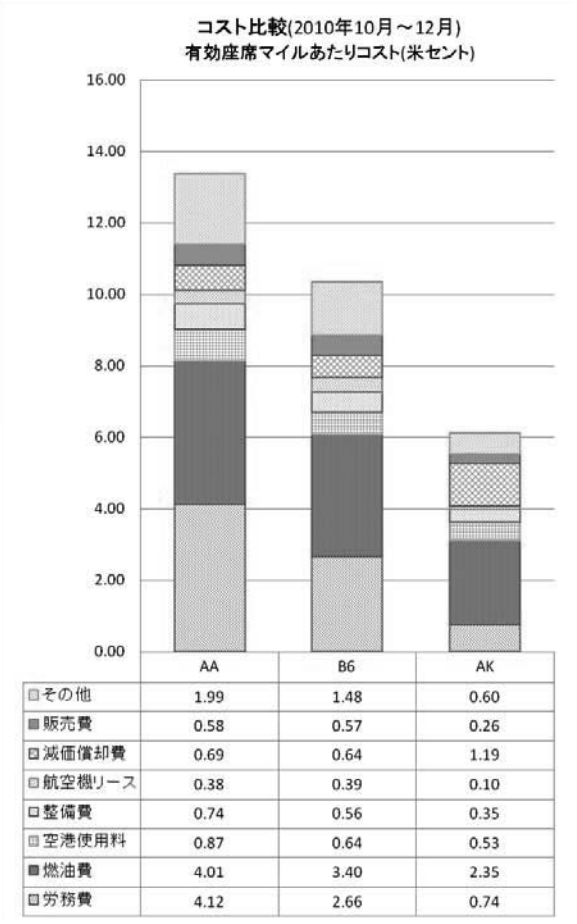


図-13　FSA と LCC のコスト比較
（アメリカン，ジェットブルー，エアアジアの例）

同図に示すとおり，有効座席マイルあたりの営業コストはアメリカンの13.83セントに対して，ジェットブルーは10.35セント，エアアジアは6.11セントと，FSAとLCCには大きなコスト構造の差が見られる．アメリカンに比べジェットブルーは25%，エアアジアは56%もコストが安い．とりわけエアアジアの労務費が飛び抜けて安いことが特徴的である．これら３社は就航路線をはじめとする事業規模が異なっており単純に比較はできないものの，格安運賃を提供できるビジネスモデルをLCCが構築していることが分かる．

2.4　わが国企業によるLCCの設立・運航状況

2012年，全日空（ANA）及び日本航空（JAL）は相次いでLCCを外国資本等と共同出資して設立し,路線就航した．各社ともにフライト準備時間を短縮した高稼働率とし，付加サービスを有料選択化しての低コスト運航を行っている．各社は低価格運賃設定を通じ，新たな需要層を創出するなど，日本経済の活性化に繋げていくとしている．

表-4　わが国におけるLCC各社の概要

会社名	ピーチ・アビエーション㈱	エアアジア・ジャパン㈱	ジェットスター・ジャパン㈱
資本金	150億円 （ANA 38.7%, First Eastern -Aviation Holding Limited 33.3%, 産業革新機構 28.0%）	10億円 順次50億円まで増資予定 （ANA 67%, エアアジア 33%）	48億円 今後120億円まで増資予定 （カンタスグループ　33.3%, JAL 33.3%, 三菱商事16.7%,東京ｾﾝﾁｭﾘｰﾘｰｽ16.7%）
拠点空港	関西国際空港	成田国際空港	成田国際空港
使用機材	エアバスA320-200型機 ※2011年11月に初号機受領，2年で10機	エアバスA320-200型機 （就航後A330の導入計画あり）	エアバスA320 ※当初は3機,その後3年間で24機まで増機
運航路線　国内線	関西＝札幌（2012年3月） 関西＝福岡（2012年3月） 関西＝長崎（2012年3月） 関西＝鹿児島（2012年4月） 関西＝那覇（2012年10月）	成田＝札幌（2012年8月） 成田＝福岡（2012年8月） 成田＝那覇（2012年8月）	成田＝札幌（2012年7月） 成田＝福岡（2012年7月） 成田＝那覇（2012年7月） 成田＝関西（2012年7月） 関西＝札幌（2012年8月） 関西＝福岡（2012年8月）
運航路線　国際線	関西＝仁川（2012年5月）， 香港（7月），桃園（9月）	成田＝仁川（2012年10月） 成田＝釜山（2012年10月）	中国、韓国などの短距離国際線を予定（2013年中）
許可申請状況	申請日　平成23年4月13日 許可日　平成23年7月7日	申請日　平成23年10月27日 許可日　平成24年2月2日	申請日　平成23年12月21日 許可日　平成24年4月6日
JAL・ANA中期計画との関係	マルチブランド戦略 （「ANAブランド」ではカバーしきれない市場に訴求し需要喚起する「LCCブランド」として活用）	マルチブランド戦略 （「ANAブランド」ではカバーしきれない市場に訴求し需要喚起する「LCCブランド」として活用）	戦略的パートナーとして補完的に活用
事業形態の特徴	ANAから独立した事業運営	ANAの連結子会社。連携・調整が図られる事業運営	JALから独立した事業運営

３．LCC専用ターミナル

3.1　世界のLCC専用ターミナル

先にも述べたとおり,欧米LCCの多くはセカンダリー空港を利用しており,LCC専用ターミナルを新設する例は希である．表-5からも分かるとおり，欧米のLCCターミナルは既存ビルの改修や貨物ターミナルからの転用といった例がほとんどである.これに対し，わが国を含めアジア諸国では拠点空港においてLCC専用ターミナルを新設する例が多い．以下ではアジアにおけるLCC専用ターミナルの整備動向について述べる.

表-5　世界のLCC専用ターミナル（開業順）

ローコストターミナル	所在地国	開業年	利用LCC	タイプ
タンベレ・ビルカラ空港 ターミナル2	フィンランド	2003	**ライアンエア**、ウィズエア	カーゴターミナル改装
スギポール空港 ピアH&M	オランダ	2005	**イージージェット**、BMIベイビー、フライビー、 ジェット2ドットコム、エアベルリン	コンコース改装
マルセイユ・プロヴァンス空港 ターミナル2	フランス	2006	**ライアンエア**、ジェット4ユー、 ジャーマン・ウィングス、イージージェット、 ペガサスエアラインズ	カーゴターミナル改装
ミラノ・マルペンサ空港 ターミナル2	イタリア	2006	**イージージェット**、ジャーマン・ウィングス	ターミナル改修
クアラルンプール空港 LCCターミナル(LCCT)	マレーシア	2006	**エアアジア**、**エアアジアX**、タイガー航空、 セブ・パシフィック、ファイヤーフライ	新規建設
チャンギ空港 バジェット・ターミナル(BT)	シンガポール	2006	**タイガー航空**、ベルジャヤエア、 ファイヤーフライ、セブ・パシフィック	新規建設
リヨン・サン・テグジュベリ空港 ターミナル3	フランス	2008	**イージージェット**、トランサヴィア・フランス	旧ターミナル改修
ジョン・F・ケネディ空港 ターミナル5	米国	2008	**ジェット・ブルー**	旧ターミナル改修
ボルドー空港 ボルドーIllico	フランス	2010	**イージージェット**、BMIベービー、フライビー、 ジェット2ドットコム、ライアンエア、 ノルウェー・エアシャトル	旧ターミナル改修

3.2　アジア諸国におけるLCC専用ターミナルの現状

3.2.1　シンガポール・チャンギ空港

チャンギ空港のバジェットターミナル（LCC専用ターミナル）は年間270万人の計画旅客取扱規模で2006年にオープンした．平屋構造で搭乗橋を設けず，むき出しの天井や安価なフロアタイルなどで建設費を極力抑制している．また，バジェットターミナルは鉄道駅のあるターミナル１～３から離れているため，一般旅客はバスによる移動を強いられる．LCC専用ターミナルを利用する航空会社はタイガーエアウェイズ，ベルジャヤ・エア，セブ・パシフィック，ファイアフライ，サウス・イースト・アジア航空などのシンガポールをはじめとしたアジア諸国を拠点におくLCCであった.

図-14　チャンギ空港バジェットターミナル
（LCC 専用ターミナル）

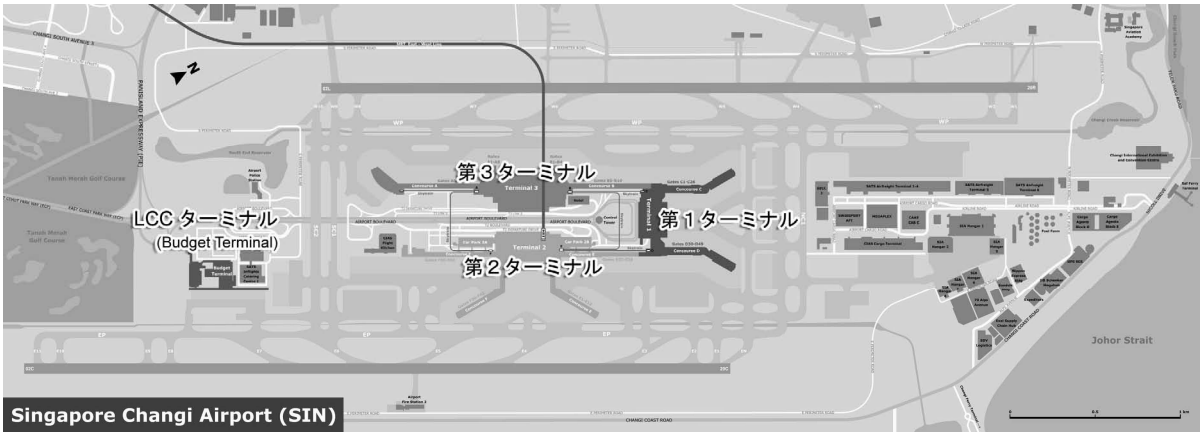


図-15　チャンギ空港平面図

ところが，LCCが予想を超える早さで成長し，2011年は460万人以上が利用するまでに至ったため，バジェットターミナルは2012年9月25日をもってクローズされ，これを撤去したのち，現在地により大きなターミナルビル（ターミナル4）が建設されることとなった．ターミナル４は，2013年に建設が開始され，2017年に完成予定である．バジェットターミナルよりも効率的な旅客対応や素早い航空機のターンアラウンドが可能となるほか，飲食店や小売店など既存のバジェットターミナルにはない施設も充実する計画で，搭乗橋は設置されないという．わが国に先駆けてLCC時代の到来を見たチャンギ空港において，どのようなコンセプトでLCCターミナルが展開されるか大いに注目される．

なお，ターミナル4完成までの間は，LCCはターミナル2からのリモート・エプロン運用となる．これに伴って，LCCの利用客に課される空港使用税は，従来の18シンガポール・ドルから28シンガポール・ドルへと値上げされている．（1シンガポール・ドル = 63.5 円：2012年10月2日現在）

3.2.2　マレーシア・クアラルンプール空港

クアラルンプール国際空港（KLIA）はわが国の円借款の供与を受けて建設され，1998年供用開始している．開港当初は黒川紀章氏が設計したターミナル本館並びにサテライトのみで運用されていたが，LCC 需要の高まりにつれ LCC 専用ターミナルが建設されることとなり，シンガポール・チャンギ空港のバジェットターミナルと同年の 2006 年に供用開始している．エアアジアやエアアジア X（中・長距離路線を運航するエアアジアの関連会社）を中心として，セブ・パシフィック，タイガーエアなど東南アジア地域の主たる LCC が利用している．約 32 億円の事業費をかけて造られたこのターミナルは，LCC のビジネスモデルに合わせ，同一フロアに国内/国際線の出発/到着フロアが配置されている．

しかし，このLCCターミナルの主たるユーザーであるエアアジアグループが急速に旅

客を獲得して行くにつれ，メインターミナルと遠く離れたLCCターミナルのデメリットが問題視されるようになっている．このため既存LCCターミナルを貨物取扱施設に転用するとともに，新しいターミナルをメインターミナルの近傍に建設し，乗り継ぎの利便を図るとともに，アクセス鉄道のサービスが享受できるようにする構想が検討されている．

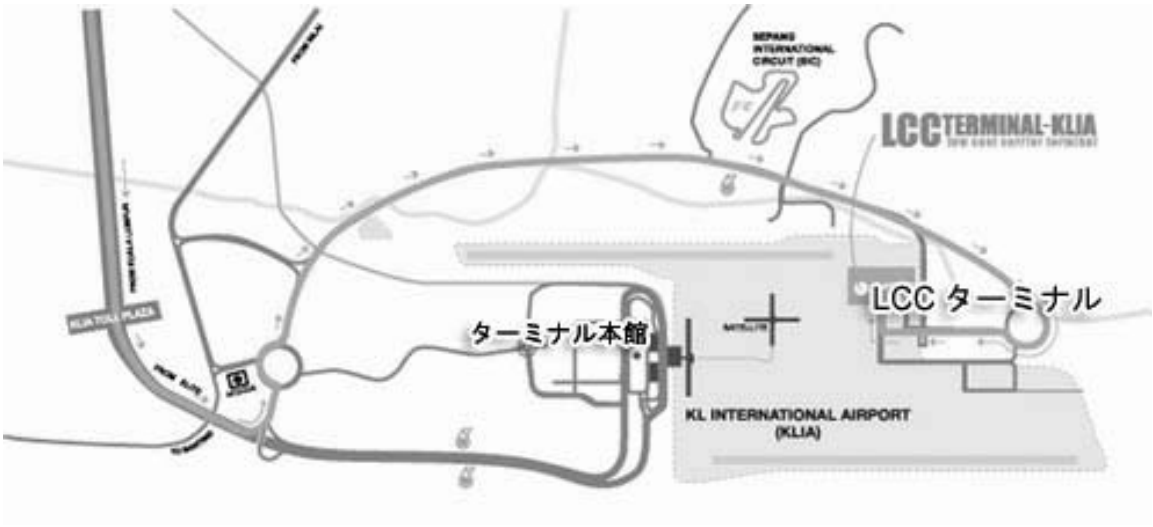


図-16　KLIA 平面図（LCC ターミナルへのアクセス）

図-17　LCC 専用ターミナルカーブサイド

図-18　LCC 専用ターミナル出発ロビー

3.3　わが国におけるLCC専用ターミナルの現状

3.3.1　関西国際空港におけるLCC専用ターミナル

関西国際空港においては，わが国ではじめての本格的LCCターミナル(第２ターミナル）が建設され，2012年10月28日供用開始される．計画条件は，拠点エアラインとして名乗りを上げたピーチ・アビエーションが公表した機材導入計画を基礎としており，就航2年経過時点で航空機(A320-200)を10機保有し，

表-6　　第２ターミナルの諸元

名称	第2ターミナル
	（LCCターミナル）
構成	ターミナル棟（平屋建て）
	コンコース棟（２階建て）
建築面積	約28,000㎡
延床面積	約29,000㎡
最高高さ	7.8m
取扱旅客数	国際：130万人/年
	国内：270万人/年

国内線および国際線で運航することとしている.これを受け入れ可能な施設として，平屋建てのターミナルビルと，それに隣接した小型機用の駐機場（LCC専用エプロン）が整備された．LCC専用エプロンは，航空機の折り返し時間の短縮と牽引車の運用コストの削減の観点から自走式とし,搭乗橋は設置されていない.

第２ターミナルの建設位置はA滑走路と沖合のB滑走路をつなぐ連絡誘導路に沿っており，航空機からのアクセスは良い．一方で，鉄道利用者は第１ターミナルでバスに乗り換える必要がある．ターミナルコンセプトは国際線及び国内線の両エリアを平面的に並べた一層式で，両エリア兼用の出発・到着ロビーを中央に配置することで旅客滞留場所を集約させている.

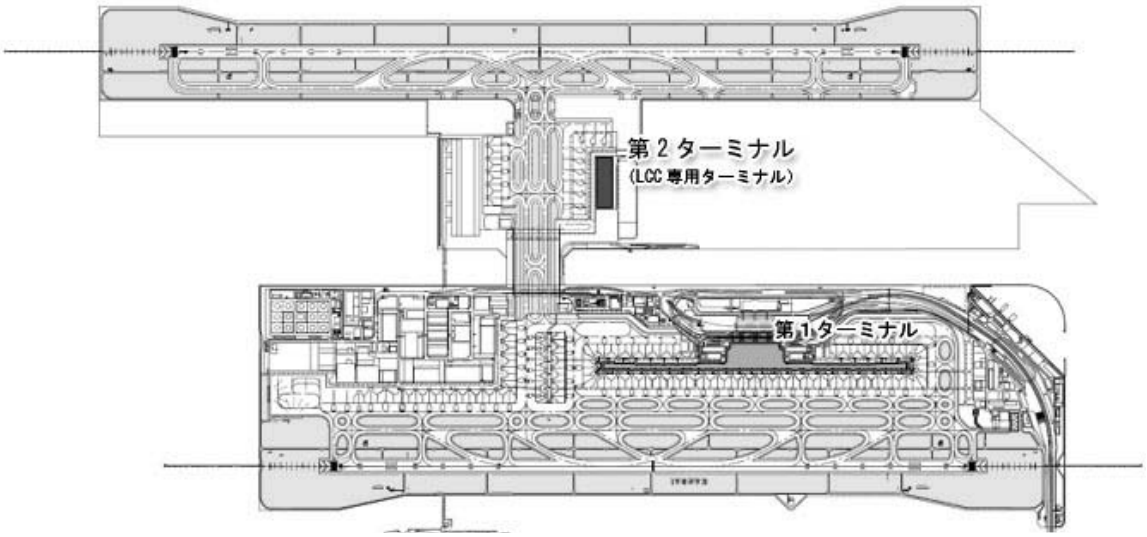


図-19　関西国際空港（第２ターミナル位置図）

図-20　第２ターミナル全景

図-21　第２ターミナル内部

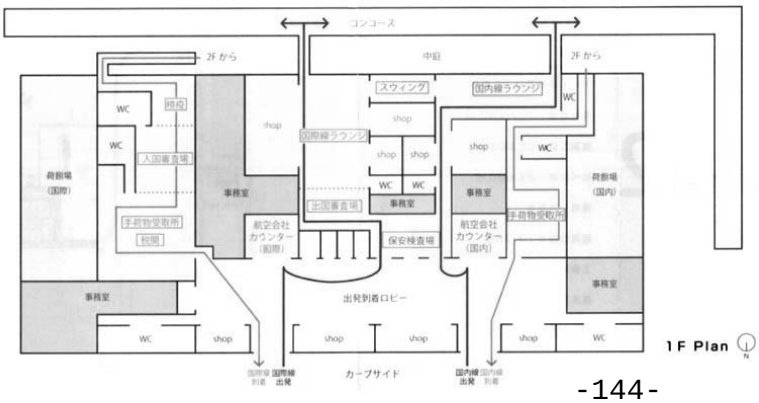


図-22　ターミナルレイアウト

3.3.2　成田国際空港におけるLCCターミナル

成田空港において，今夏LCC本邦2社（ジェットスター，エアアジア）が相次いで就航した．これらに対応するため成田空港会社は当面の対応として，第2ターミナルビルの南北に新たに整備した暫定施設で受け入れている．これら暫定LCCターミナルは南側4,000㎡，北側3,200㎡の規模を有し，合計事業費は約23億円である．この暫定LCCターミナルについては，FSAが利用する本館と同額の使用料としている．

また今後，LCCの旺盛な就航が見込まれるとして，第2ターミナルビル北側地区（現第5貨物ビルの一部及びエプロン）を候補地として2014年度中の完成を目途にLCC専用ターミナルを整備することとし，今年度より設計に着手している．整備にあたっては，既存航空会社とLCCの競合状況等による影響といった今後の需要動向を見極めた上で段階的に進めることとしている．専用ターミナルについては，建設コストを最小限に抑制することにより，航空会社が負担する施設使用料を減額する方針としている．

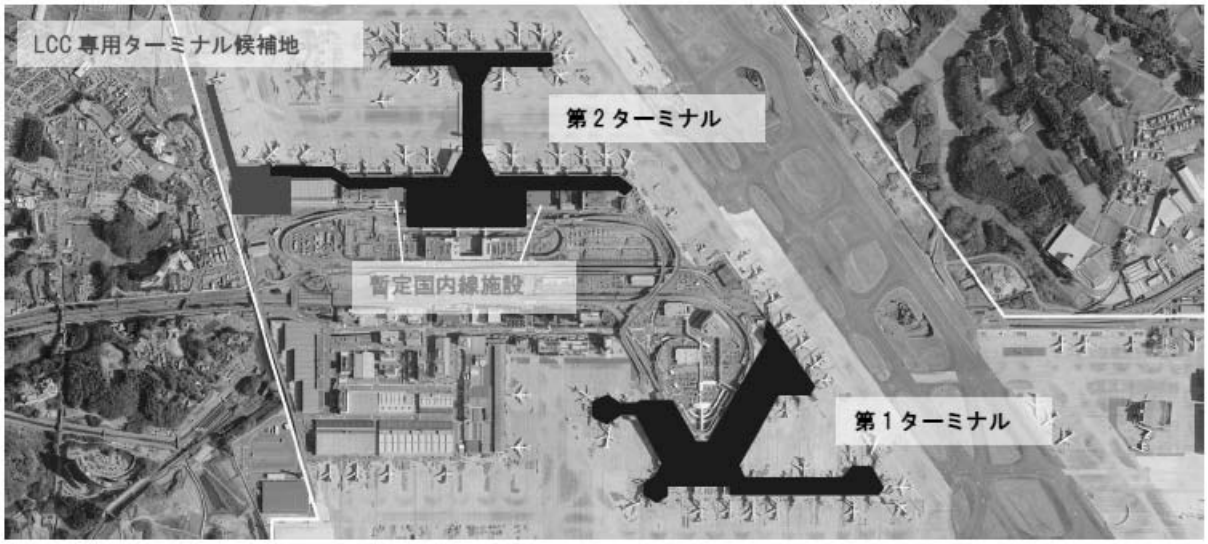


図-23　成田空港LCCターミナル（暫定ターミナル位置及び専用ターミナル候補地）

図-24　暫定ターミナル内部パース

3.3.3　茨城空港のターミナルビル

茨城空港（正式名称：百里飛行場）は2010年3月に開港したが，そのターミナルコンセプトはわが国におけるLCCターミナルの先駆けといって良いものである．これは，空港ターミナルの計画段階で本邦大手航空会社の就航が見込めなかったことから，新興航空会社を中心としてマーケットとの対話を行った結果，エアポートセールスを展開するためには，旅客動線の平面化や搭乗橋を使用しない自走式の航空機マヌーバーを採用するなどにより，航空会社のターミナルコストを低減することが必要と判断したためである．

このターミナルコンセプトはオーストラリアに拠点を置く航空系シンクタンクであるCAPA（航空情報センター）に評価され，同センターから「Low Cost Airport of the year 2011」を授与された．受賞理由は航空会社に適した環境を整備し，LCCの運航をサポートすることにより，東京の北部及びその近郊への価値あるアクセスポイントになっていることなどによる．

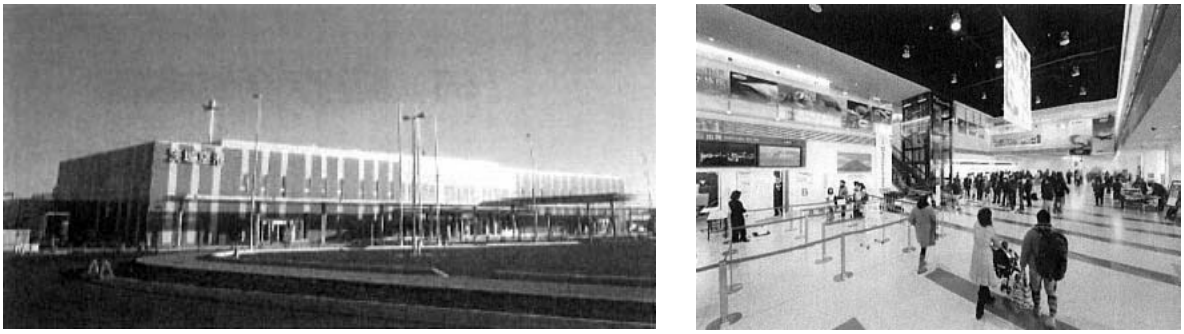


図-25　茨城空港ターミナルビル

3.3.4　那覇空港におけるLCCターミナル

那覇空港では2012年7月にジェットスターが成田空港との間で，同8月にはエアアジア・ジャパンが同じく成田空港との間で新規就航した．また，10月にはピーチ・アビエーションが関西空港との間で路線開設する．全日空系のエアアジア及びピーチについては，既存旅客ターミナルが狭隘なため，国内線を増築するまでの間，空港内の国際貨物ターミナルの一画を改装して暫定ターミナルとして利用する．

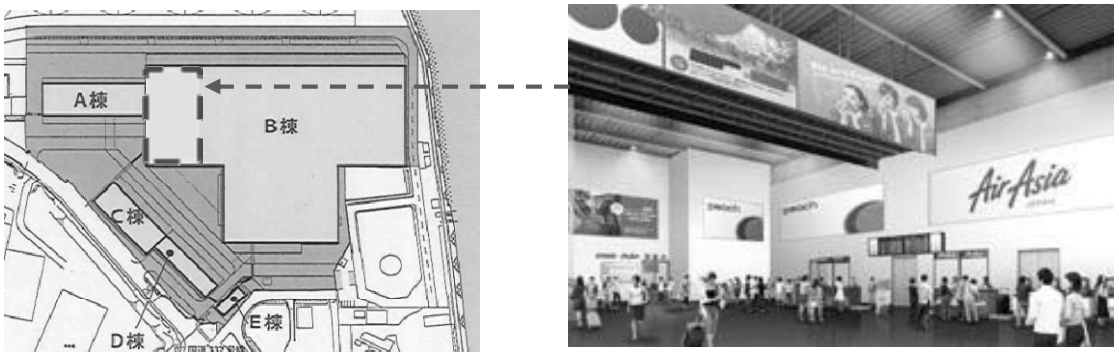


図-26　那覇空港暫定LCCターミナル（位置図及びターミナル内部パース）

４．おわりに

米国でLCCの祖，サウスウエストが産声を上げて40年，その波はアジアに飛び火し，ついに日本の航空市場にも本格的なLCCの時代が到来した．その間幾多のLCCが生まれそして消えていったが，格安航空の流れそのものは今後ますます進展していくものと考えられる．LCC進展の背景には航空市場の自由化とオープンスカイ政策の推進があるからだ．冒頭に述べたように国土交通省もLCCの支援のために様々な施策を講じており，羽田，成田の首都圏両拠点空港の容量拡大とも相まって，わが国の航空市場でもLCCが大きなマーケットシェアを占める日も近い．

その様なトレンドを航空需要予測にどのように取り込んでゆくかが，わたしたち研究所に課せられた大きな課題の一つであると考えている．空港研究部では，既にその取り組みを始め，数編の基礎的な論文も公表しているが，それらを実践的な予測モデルに取り入れて将来のLCCの需要ボリュームを適切に言い当てることはそう簡単なことではない．野心的なチケットプライスが次々と打ち出され，鉄道はおろか長距離バスのマーケットにまで食い込んで需要のパイを拡大していくとの見方がある一方，戦争やテロ，経済不況や流行病などのイベントリスクにどのように反応するのかは未知数である．また，FSAもマーケットがLCCに浸食されるのを黙って見過ごすはずもない．研究は今始まったばかりであるが，大いに期待して頂だきたい．

LCCに対応したターミナル施設のあり方の検討もしばらくは試行錯誤が続く．成田，関空，那覇等，2012年に就航したLCCに対応するターミナルも将来のLCC需要の動向如何によっては更なる手当が必要となってくることも考えられる．10月にオープンする関空の第2ターミナルに次なる拡張を求める声もちらほらと聞こえてくる．

LCCターミナルの整備には二つの論点がある．一つは，そこを拠点とするLCCの必要性である．長期に利用できる空港の設備投資と，短期で判断されがちなLCCの路線参入と撤退は，計画期間が必ずしも一致しない．拠点ではなく目的地として利用するLCCのために専用ターミナルを建設すると，無駄な投資になりかねない．完成直後にそのLCCが撤退するかもしれないからだ．従って，LCCターミナルには，そこを拠点とするLCCが必要となる。関西空港ではピーチが，成田空港でもエアアジア・ジャパンとジェットスター・ジャパンがそこを拠点とする予定である．

もう一つの論点は，LCCターミナルの整備が空港の収益向上に直結するとは断言できないことである．LCCに対しては着陸料やターミナル施設利用料を減免するケースが多いが，これは，空港側経営の視点からすれば航空会社からの収入が多くを望めないことを意味する．従って，専用ターミナルの整備に当たっては，航空系収入を非航空系収入で補完する経営スキームが求められる．シンガポール・チャンギ空港やマレーシア・クアラルンプール空港のLCC専用ターミナルでも飲食，物販関連の施設の充実ぶりが印象的である．LCC旅客も空港で食事やショッピングを楽しむし．LCCでは機内食が有料なこともあり，むしろ空港での飲食の消費は多いとも言われている．LCC時代の空港経営は航空系収入よりも非航空系収入に軸足を移していくことがポイントとなろう．

本稿でも紹介したとおり，極限までコストを抑え，LCCターミナルのお手本とされた

シンガポール・チャンギ空港のLCC専用ターミナルは，誕生後わずか6年でその役割を終え，しばらくはFSAと同居することになった．マレーシア・クアラルンプール空港もしかりである．東南アジアのLCC先行諸国でLCCターミナルが第2ラウンドに入りつつあるなか，わが国のLCC専用ターミナルはどのような姿となるべきなのか．サービス水準の設定のあり方や，施設規模の算定手法など，わたしたち研究所が行政を支援しつつ将来のビジョンを示していくべき課題も多いと考えている．

参考文献

１）国土交通省成長戦略：国土交通省成長戦略会議（平成２２年５月１７日）
２）日本における低費用航空会社（LCC）時代の到来 ①～③：松本　秀暢（関西空港レビュー）
３）LCCが拓く航空市場：杉山純子、成山堂書店
４）LCCの特性を考慮したターミナル計画について： 佐藤浩之
５）「格安航空会社」の企業経営テクニック：赤井奉久、田島由紀子（TAC出版）
６）LCCの使い方：イカロス出版
７）みんなが知りたいLCCの疑問50：秋本俊二（ソフトバンク　クリエイティブ）
８）LCCを使いこなす99の情報：航空経営研究所
９）新しい空港経営の可能性：野村宗訓（関西学院大学出版会）
１０）到来したLCCの波とわが国の行方：花岡伸也（ていくおふ131号）

（参考）国土交通省成長戦略（抜粋）

「LCC 参入促進による利用者メリット拡大」

国土交通省成長戦略会議（平成２２年５月１７日）

１．現状の課題・問題点

近年、低運賃を特色とするLCC（ロー・コスト・キャリア）が、米国を皮切りに欧州、さらには東南アジア等で急成長している。平成20 年の航空会社旅客数ランキング（出典：国際航空運送協会（IATA）資料）では、国際線ではアイルランドのライアンエアー（57,647千人）が1 位、イギリスのイージージェット（35,417 千人）が3 位にランクされ、また国内線ではアメリカのサウスウェスト航空（101,921 千人）が1 位にランクされている。

また、世界の航空輸送市場においては、既にLCC が全体の2～3 割を占める状況となっており、LCC が低価格の選択肢を提供することで、観光や親族訪問等の需要の拡大や利用者メリットの拡充につながっている。

このようにLCC が低コスト・低運賃を実現できている背景としては、低コストオペレーションが可能な二次空港やLCC 専用ターミナルの使用、空港滞在時間の短縮による高い機材回転率、B737 やA320 等の小型の単一機材による整備コストの削減、e チケットを中心とする航空券の販売コストの削減、機内サービスの簡素化等、従来型のFSA（フル・サービス・エアライン）とは全く異なるビジネスモデルによっていることがあげられる。

一方、日本においては、ようやく近年になって、オーストラリアのジェットスター、韓国のチェジュ航空等海外のLCC が国際線に就航する動きが見られるものの、首都圏空港の容量制約、LCC 専用ターミナル等の低コストオペレーションを可能とするインフラの欠如、空港整備に使われる公租公課の存在等から、本格的な参入にはつながっていない。また、国内線においても、一部の航空会社が低運賃を武器に顧客の取り込みを図っているものの、そのビジネスモデルはFSA と大きく異なるものではなく、真の意味でLCC 企業は日本に存在していない。

このことに象徴される我が国航空市場の現状は、アジアインバウンドの取り込み、国内観光需要の拡大、さらには日本経済の取引費用逓減による成長促進という観点から問題である。

そのため、今後、国際線・国内線双方において、LCC をはじめ新規参入の促進のほか、既存航空会社の競争力向上を可能とする環境を整備することが、政策上も求められている。

２．課題に対応した政策案

（１）LCC 専用ターミナルの整備等

LCC 事業者の参入意欲等を踏まえた上で、成田、関空等の拠点空港において、既存のターミナルより低コストで利用可能なLCC 専用ターミナルの整備等の低コストオペレーションの実現について早急に結論を得る。

（２）技術規制の緩和

乗員資格等の相互承認を早期に実現するべく、米国をはじめとする諸外国との協議を積極的に進めていくとともに、ライセンス発給審査の効率化による外国籍運航乗務員の活用円滑化、旅客在機中給油の実施による機材の高稼働化等、まずは航空会社のコスト削減に資する技術規制の緩和を重点的に行う。

これに加え、今後とも国際的動向を踏まえつつ、安全性が確保されることを前提として、技術規制の緩和を不断に実施する。

（３）着陸料体系の再構築等

戦略３に基づき、小型機を優遇する着陸料体系の再構築を図るほか、戦略１に基づく徹底的なオープンスカイの推進、戦略２に基づく羽田・成田の容量拡大等、本報告書に提言する各施策の総動員を図ることで、自ずからLCC の参入促進等につながる環境が整備されるものである。

３．留意点

国際線・国内線双方における低コストサービスの本格的な展開という観点からは、外航系航空会社の我が国への乗り入れのみならず、意欲ある本邦系航空会社についても、我が国の拠点空港に基地を置き、事業拡大を図っていくことが期待される。

社会資本のストックマネジメントの推進に向けて

研究総務官 兼 総合技術政策研究センター長

岸田　弘之

社会資本のストックマネジメントの推進に向けて

研究総務官
兼 総合技術政策研究センター長　　岸田　弘之

１．はじめに

これまで我が国で蓄積されてきた社会資本は、私たちの日々の生活を支えるとともに、産業活動の基盤として大きな役割を果たしてきた。これらの社会資本は、高度経済成長期に集中的に整備されており、今後、その高齢化は確実に進行していく。

この社会資本の高齢化に伴い、損傷リスクが急速に増大する将来においては、社会生活に大きな影響を与えるような事故や災害の急増が懸念される。例えば、日本より社会資本の整備が早かった米国では人命を巻き込む落橋事故が発生しており、我が国でも、平成 19 年に幹線道路の橋梁で落橋につながりかねない主要部材の破断が見つかった他、住宅・建築物の外壁の劣化による剥落、下水道の管路施設の高齢化等が原因となった道路の陥没事故等の重大な二次災害につながり得るような損傷・事故が頻発しつつある兆候が見られている。

図-1 は、50 年以上経過する社会資本の割合を示したものである。現時点（2010 年度）と 20 年後を比較すると、例えば、道路橋（約 8%→約 53%）、水門等河川管理施設（約 23%→約 60%）、下水道管きょ（約 2%→約 19%）、港湾岸壁（約 5%→約 53%）などと急増し、今後、維持管理・更新費の増大が見込まれる。

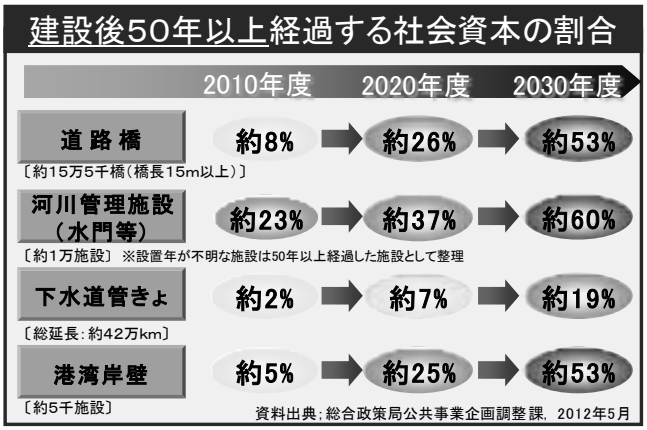


図-1　建設後 50 年以上経過する社会資本の割合

図-2 は、国土交通省所管の社会資本を対象とした、2060 年度までの維持管理・更新費の推計結果を示している。

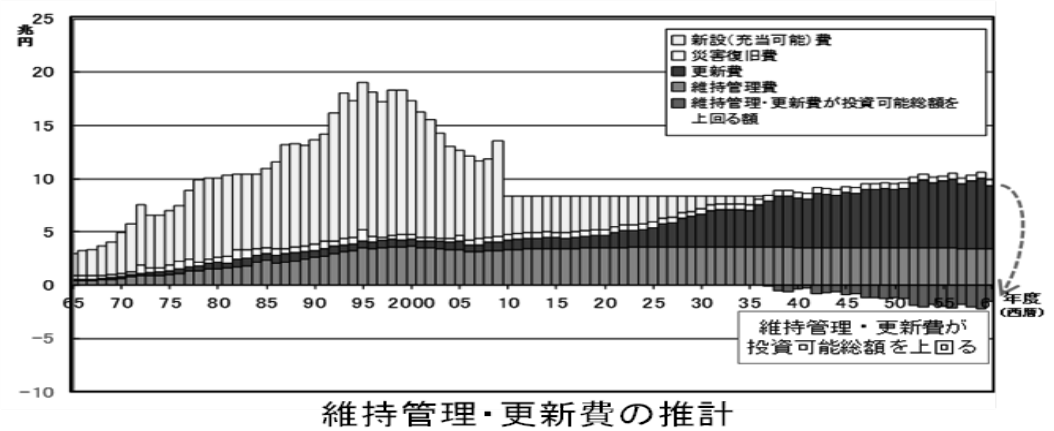
図-2 の上図は、従来通りの維持管理・更新を続けた場合の費用を示しており、維持管理・更新費が投資総額に占める割合は 2010 年度時点で約 50%であるが、2037 年度時点で投資可能総額を上回る。2011 年度から 2060 年度までの 50 年間に必要な更新費は約 190 兆円と推計され、そのうち更新できないストック量が約 30 兆円と試算される。

それに対して図-2 の下図は、図-3 に示すイメージのような予防保全の取組みを実施した場

合の費用を示している。維持管理・更新費が投資可能総額を超えるのは前者に比較して 10 年伸びて 2047 年度となっており、更新できないストック量は 2060 年度までに約 6 兆円と大幅に減少する。

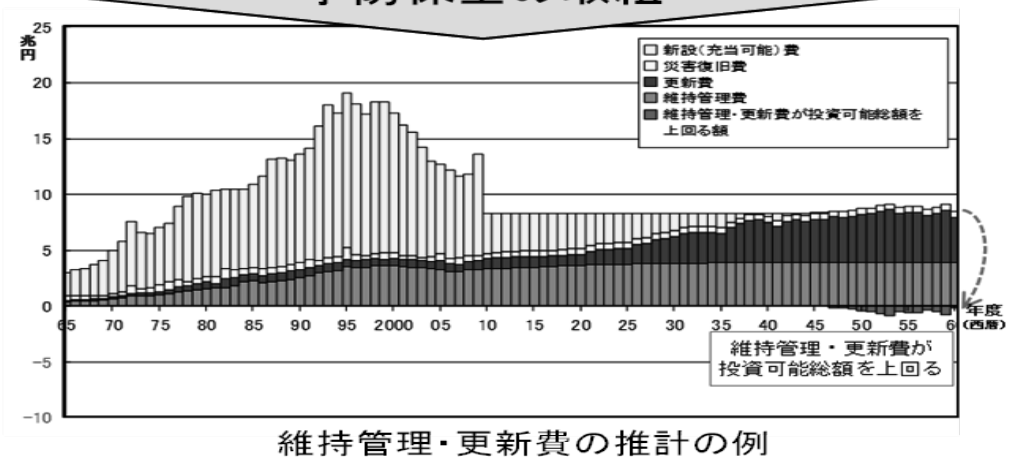
このように、今後の社会資本の高齢化に適切に対応していくには、ライフサイクルコストの縮減や長寿命化を図り、つくったものを長持ちさせて大事に使う「ストック型社会」への転換を推進していく必要がある。

本稿では、社会資本のストックマネジメントの推進に向けた、国土技術政策総合研究所（以下、「国総研」）における最近の取り組み状況と、今後の方向性について紹介する。



維持管理・更新費の推計
（従来通りの維持管理・更新を続けた場合）

予防保全の取組



維持管理・更新費の推計の例
（予防保全の取組みを先進地方公共団体並みに全国に広めた場合）

（出典：国土交通白書２０１０）

図-2　国土交通省所管の社会資本における維持管理・更新費の将来推計 [1)]

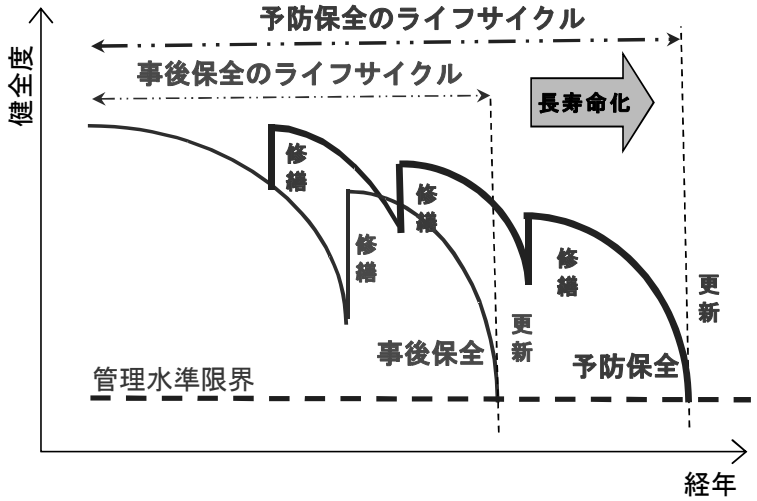


図-3　予防保全のイメージ

２．ストックマネジメント研究会

国総研においては、表-1 に示すような社会基盤施設に関して、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」[2)]を設置している。

表-1　　ストックマネジメント研究会の取り組み対象施設

主に物流・快適性向上のための施設	主に防災のための施設
下水道施設	河川施設（堤防、護岸）
道路施設（舗装、橋梁、トンネル）	ダム施設
港湾施設（係留施設）	海岸施設（堤防、護岸）
空港施設（滑走路、誘導路）	砂防施設（砂防ダム）

同研究会においては、まず、ストックマネジメントを推進するために取り組むべき研究課題全体を整理している。図-4 はその結果を示すものである。

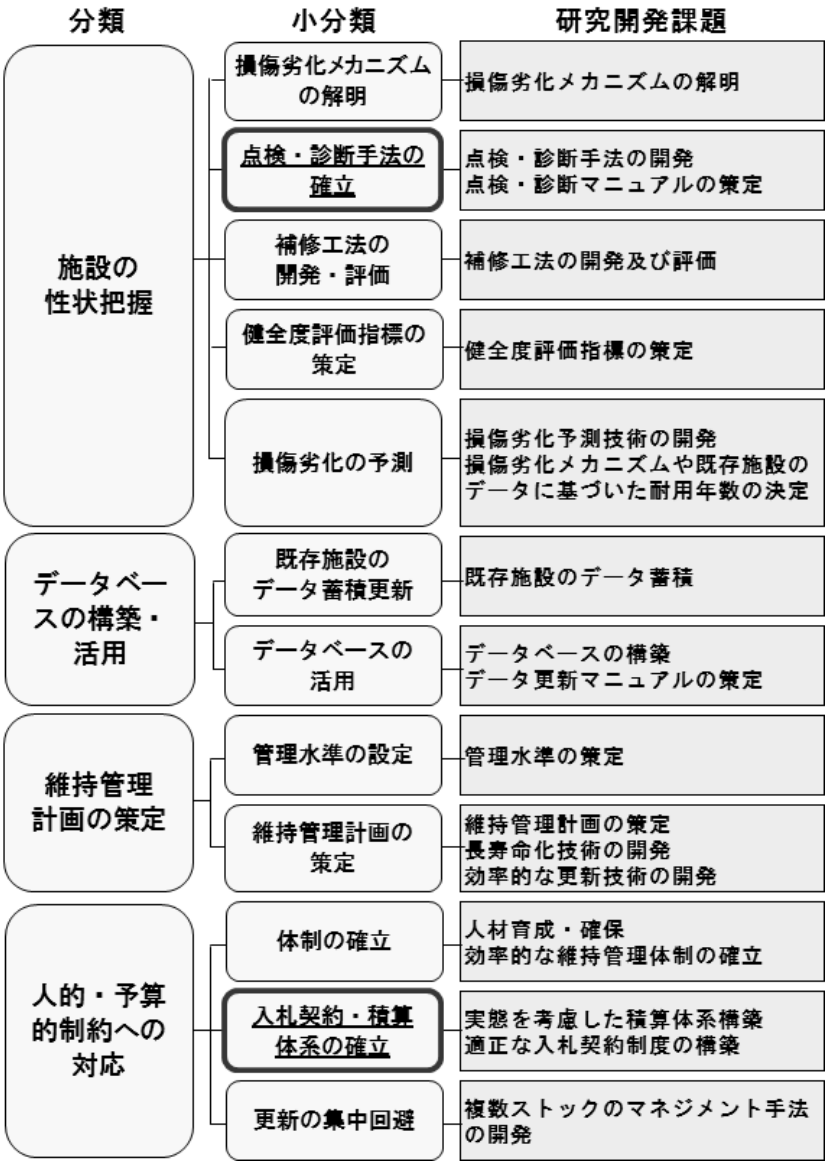
一方、これら研究課題全体を踏まえ、ストックマネジメントを推進するために整備すべき項目である

1）対象構造物の性状把握

2）施設の現状把握

3）計画策定

に着目し、各施設における実際の進捗状況（平成 24 年 7 月時点）をとりまとめたものが図-5 である。



（ストックマネジメント研究会とりまとめ）

図-4　ストックマネジメントの推進に向けた研究課題

図-5 によれば、各施設ごとの状況は、それぞれに要求される性能や機能中断に伴う許容度に大きく違いがあるため、研究・技術開発に関する進捗度に差異等が見られることが分かる。また、各施設に応じたストックマネジメントの考え方が存在することも伺える。

同研究会では、平成 18 年 9 月の設置以降、概ね年に 1～2 回程度の頻度で定期的に情報交換や議論を行い、ストックマネジメントの推進及び底上げに努めている。さらに、同研究会での議論を踏まえた取り組みの一つとして、同研究会構成メンバーに建築部門の担当者が加わり、総合技術開発プロジェクトである「社会資本の予防保全的管理のための点検・監視技術の開発」[3]（平成 22 年度～24 年度）を実施しているところである。

具体的には、施設共通の課題に着目し、技術開発の余地が比較的大きい、目視できない部位や目視による評価が困難な変状に対する点検・診断技術の開発を行っており、その詳細を次章以降に示す。

区分	施設名	主要部材	対象構造物の性状把握					施設の現状把握			計画の策定		調査対象としてイメージした施設管理者	担当研究部・センター
		項目名 / 凡例	損傷劣化メカニズムの解明状況	損傷劣化予測モデルの発展状況	損傷劣化の点検・診断の発展状況	損傷劣化の補強技術の開発	健全度の総合評価指標	新設情報の蓄積状況	修繕・更新情報の蓄積状況	損傷劣化履歴（点検結果）の情報管理	維持管理・更新を判断する管理指標	維持管理の基本方針		
		◎	全ての損傷劣化の種類を把握し、メカニズムを定量分析済み	実用化されている予測式がある	客観的かつ統一的な数値判定が確立	複数の工法があり、実施後の損傷劣化の回復度合まで解明済み	部材・施設全体に対して定量的な判定が可能	竣工年・諸元等を蓄積し、DBで一元管理	時期・内容を蓄積し、DBで一元管理	履歴を蓄積し、DBで一元管理	実用的な指標あり	維持管理計画に基づいたアセットマネジメントを実践		
		○	すべての種類と原因が解明済み	提案された予測式がある	一部主観が入るが統一的な数値判定が確立	損傷劣化に応じた複数の工法がある	主要部材ごとの定量的な判定が可能	竣工年・諸元等を蓄積継続	時期・内容の蓄積継続	履歴の蓄積継続	試行中の指標あり	予防保全を中心に管理		
		△	一部の種類と原因が解明済み	損傷劣化の種類・原因のみ解明済み	客観的な点検・診断基準がない	単一の工法のみ	一部の主要部材に対して定量的な判定が可能	竣工年や諸元等に欠落あり	時期・内容に欠落あり	履歴情報に欠落あり	指標を検討中	一部で予防保全を実施		
		×	未解明	未解明	手法が全くない	交換、更新のみ	判定する指標がない	未整理または状況不明	未整理または状況不明	未整理または状況不明	なし	対処療法的管理を中心に管理		
下水道	管渠	管渠（コンクリート製）	○	○	○	○			×	△	◎	△	都道府県 市町村	下水道研究部
		マンホール（コンクリート製）	○	○	○	○	○	○						
		マンホール蓋（鋳鉄製）	○	○	○	×								
	処理場	コンクリート構造部	○	△	○	○			×	×	◎	△		
		機械設備（駆動部）	○	△	○	×	×	○						
		機械・電気設備	○	△	○	×								
河川	堤防	－	△	△	△	○	△	△	○	－＊	△	△	国（国土交通省）	河川研究部
	水門	－	△	△	△	○	△	◎	○	－＊	△	△		
	ダム	堤体	△	×	○	○	△	○	△	△	○	○		
砂防	砂防	－	○	△	○	○	×	○	△	○	×	×	国（国土交通省）	危機管理技術研究センター
	地すべり防止	－	△	△	○	○	×	△	△	○				
	急傾斜地崩壊対策	－	○	△	○	○	×	○	△	○				
道路	舗装	舗装（表層）	○	◎	◎	○	◎	○	△	◎	◎	△	国（国土交通省）	道路研究部
	橋梁	鋼部材	△	○	○	○								
		コンクリート部材	△	○	○	○	◎	○	△	◎	○	△		
		RC床版	△	○	○	○								
	トンネル	覆工コンクリート	○	△	○	○	×	○	△	○	◎	×		
海岸	堤防・護岸等	コンクリート構造物	○	△	○	○	○	△	△	×	－＊	×	国（国土交通省） 都道府県、市町村	沿岸海洋研究部
港湾	岸壁等	コンクリート構造物	○	○	○	○			×	△	○	◎	国（国土交通省） 都道府県 市町村 一部事務組合	港湾計画部
		鋼構造物	○	◎	○	○	○	△						
		エプロン	○	△	△	○								
	航路・泊地	水域施設	○	○	○	△	○	△	△	△	○	○		
空港	滑走路	滑走路（表層）	○	○	◎	○	△	△	△	○	◎	×	国（国土交通省）	空港研究部

（注）＊：事務所間の差が大きく評価できず

図-5　各施設におけるストックマネジメントの進捗状況（ストックマネジメント研究会とりまとめ、平成 24 年 7 月時点）

３．ストックマネジメントの推進に向けた取り組み

３．１　社会資本の予防保全的管理のための点検・監視技術

３．１．１　技術開発の背景

社会資本の予防保全管理を実現するためには、劣化や損傷を迅速かつ効率的に点検・監視し、その結果を踏まえて適時・適切に補修補強することが必要となる。施設の状態を定期的に点検・診断し、致命的欠陥が発現する前に対策を講じることにより、事故や災害を未然に防ぎ、施設の長寿命化により長期的に見た場合のトータルコスト（ライフサイクルコスト）の縮減を図る「予防保全」の考えに立ったストックマネジメントを進めていくことが必要である。この基本的な考え方を図-6 に示す。

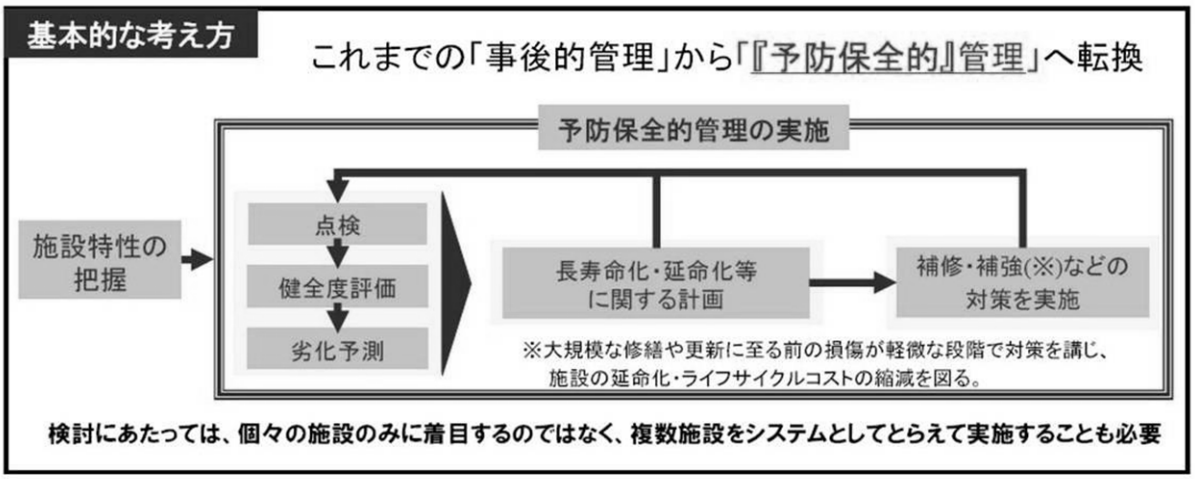


図-6　予防保全的管理の基本的な考え方

図-6 に示すように、予防保全的管理は、個別の施設に対する点検、健全度評価、劣化予測、及び補修補強の 4 つのフェーズから構成される。以下、現状における主な課題をフェーズごとに列記する。

＜点検＞

- スケールが大きい土木構造物でも局所的に密かに進行する亀裂や腐食等が問題となるが、目に見えないような局部損傷の進展を効率的かつ確実に探知する技術は確立されていない。
- また、地中の構造物では、点検自体が困難であり、目視点検では捕捉できない損傷を探知するための調査法の開発が必要である。

＜健全度評価＞

- 部材の劣化状況を踏まえた構造物の性能評価について、十分確立されていない。

＜劣化予測＞

- 橋ひとつを例にとっても、その形式、形状、交通条件、環境条件には様々な要素があり、劣化の要因も複数かつ複合的と考えられるため、個々の劣化メカニズムを研究す

るとともに、実際の構造物の長期挙動観測などによるデータの蓄積や様々な劣化パターンの研究が必要である。

＜補修補強＞

・ 早期に補修補強がなされない、想定どおりの補修補強効果が発揮されないなどの事例があり、劣化状況に応じた効果的な補修補強を行うための技術の開発や、開発結果を検証し、現場へフィードバックするシステムの構築が必要である。

今回の総合技術開発プロジェクト「社会資本の予防保全的管理のための点検・監視技術の開発」では、予防保全管理のサイクルを構成する点検、健全度評価、劣化予測、補修補強の 4 段階のうち、サイクルの最初の段階にあり、先行して技術開発することが効果的で、かつ様々な施設種別を横断して適用することが可能な「点検」について、各分野における次のような点に着目した。

例えば、従来の目視可能な部位の目視による点検・監視では、損傷が相当量進行し表面に現れてから把握されていた。また、構造物の埋込部、狭隘部、高所、閉所等では空間的制約により調査日数や点検費用が大きくなるため、適切な頻度・方法での検査が実施されないケースがあった。さらに、堤防等の土構造物の弱点部は主に表面の目視点検により、橋梁、擁壁等の構造物の日常的な変状は、主に定期的なパトロールや通行者からの通報等により把握されていた。

そうした状況を改善するため、今回の技術開発では、構造物の目視困難な場所を点検可能にする技術、さらに、広範囲で大量な構造物について目視のみで把握されていた変状を効率的・確実に監視する技術の開発を行うこととした。

図-7 は今回の研究開発における点検・監視技術の研究開発方針イメージであり、図-8 には各分野における研究開発技術の概要を示している。開発に当たっては、産業分野での基本技術の開発は進められているものの社会資本施設への応用が進んでいない非破壊検査などについて、多種多様な検査方法及びそのデータについて要求性能、評価基準を実験・確認した上で整備し、民間の技術開発の促進を図ることも視野に入れて取り組んでいる。

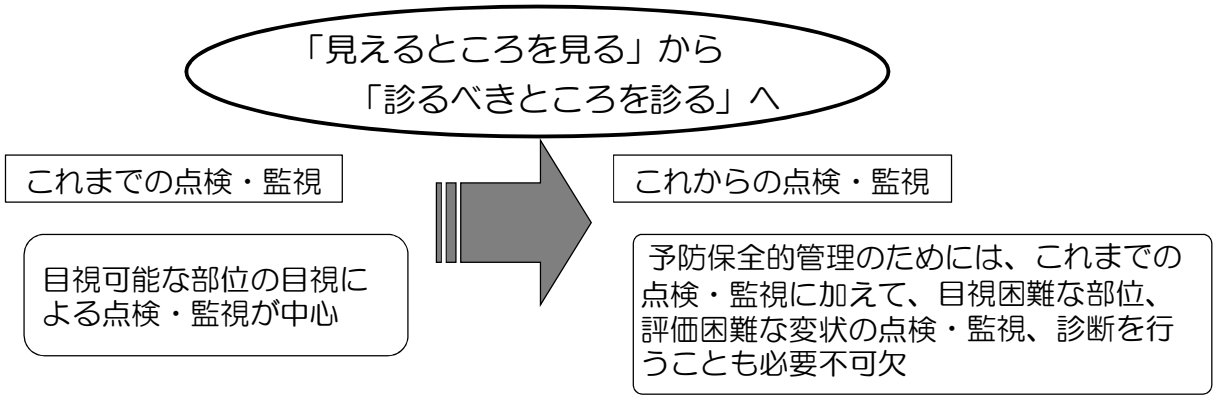


図-7　点検・監視技術の研究開発方針イメージ

本プロジェクトにおいては、図中「開発途上（点検）」の箇所を、研究開発ターゲットとしている

図-8　研究開発技術の概要（社会資本の予防保全的管理のための点検・監視技術の開発）

３．１．２　技術開発内容

(1)　非破壊検査による埋込部・遮蔽部の点検・診断技術

超音波等の産業分野で活用が進んでいる非破壊検査技術や遠隔検査技術等を用いて、土木・建築構造物における鋼材等のコンクリートへの埋込部、部材が複雑に組み合わされた狭隘部、高所の外壁面等の目視困難な部位の点検・診断技術及び評価基準を開発する。従来の方法では、ハツリ検査等の破壊検査、打診検査等のための足場の設置が必要となり、検査コストが高く点検実施率や頻度が低かったが、新しい検査手法を加えることにより点検コストを低減し、点検実施率・頻度を向上させる。これらにより予防保全管理を推進し、構造物の安全性向上を図るものである。

鋼材等コンクリートへの埋込部、狭隘部については、開発段階のモデル構造物を橋梁として、ファイバースコープ、マイクロドリル、駆動装置を組み合わせた構造物内視鏡、ならびに超音波フェーズドアレイ技術を応用した構造物内部聴診装置のプロトタイプ（図-9 ①）を製作し、模擬劣化試験体による促進腐食実験、性能評価実験に取り組んでいる。

高所外壁面については、開発段階のモデル構造物を建築ビルとして、足場を設置せずに一次検査や日常検査を行うための外壁面走行装置（図-9 ②）、ならびに遠隔打診装置のプロトタイプを製作し、模擬劣化試験体による性能評価実験に取り組んでいる。

(2)　画像･データによる目視困難な部位の点検･診断技術

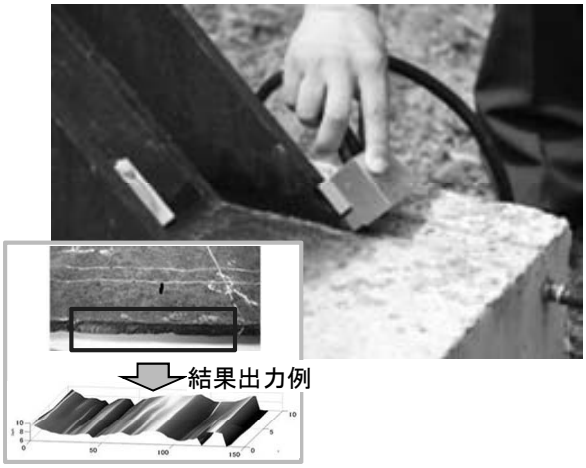
画像・データ技術等を用いて、人が直接近寄れない管路内部、建築物床下等の目視困難な部位の点検・診断技術及び評価基準を開発する。従来からの自走 TV カメラ調査では、画像解像度が低いこと､TV モニター画像を人が判読すること等から検査員の技量により調査速度や精度差があり、また、検査コストが高いことから点検実施率や頻度が低かったが、簡易カメラ（図-9 ③）によるスクリーニング、カメラ小型化等の基本技術を応用し点検装置の機能向上、性能標準化を図ることにより、点検コストを低減し、点検実施率・頻度を向上させる。また、新しい検査方法として触診の遠隔検査技術を開発する。これらのことにより予防保全管理を推進し、構造物の安全性向上を図るものである。

管路内部については、既往の TV カメラ調査データ及び施設管理者・検査オペレータへの聞き取り調査から「見逃してはいけない不具合」を設定し、性能能評価実験のための「見逃してはいけない不具合」の模擬劣化試験体（図-9 ④）を製作し、また、レーザ測量による路上からの点検方法の開発に取り組んでいる。

建築物床下については、床下劣化診断装置（図-9 ⑤）の障害物回避性能、検査装置の搭載能力、画像・データの取得・保存等に関する確認実験、及び触診を遠隔検査するための触診抵抗値の数値化実験に取り組んでいる。

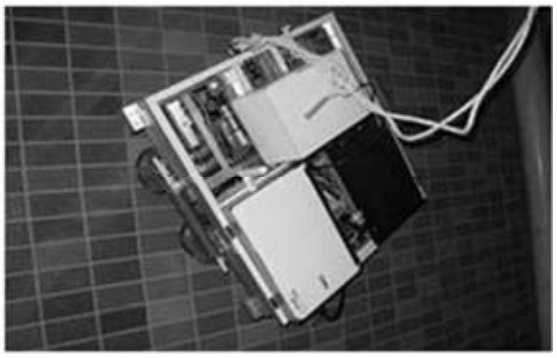
○非破壊検査による埋込部・遮蔽部等の点検・診断技術

構造物の目視困難な埋込部・遮蔽部を対象とした非破壊検査法の開発 【ｺﾝｸﾘｰﾄ埋込部】



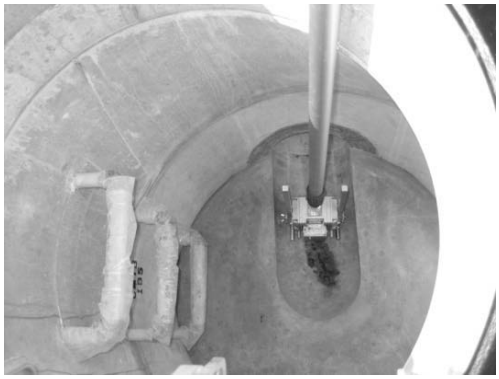
① 鋼材内部（腐食形状）を可視化
（超音波フェーズドアレイ）

外壁面の遠隔診断を目的とした壁面走行型外壁診断装置の開発【RC 建築】



② 壁面走行型外壁診断装置（試作機）
（壁面に吸着しながら移動）

○老朽化した管路の TV カメラ調査によるスクリーニング手法の開発 [4)]



③ 簡易カメラによる可視範囲確認実験

④ 製作した模擬劣化管路（下水道）

○床下木質部材の劣化診断手法の開発

⑤ 床下劣化診断装置（試作機）の機能性実証実験

図-9 研究開発内容の一例

(3)　赤外線を活用した漏水部の点検・監視技術

赤外線サーモセンサーを活用し、現状では検知が不確実であった河川堤防のり面の湿潤部を迅速・簡便に把握する点検・監視技術及び評価基準を開発する。従来からの人手、目視による変状監視では、延長・箇所数が多く多大な労力を要し、検査員の技量により精度差があったが、新しい監視手法を加えることにより、迅速性、確実性を向上させ、構造物の安全性向上を図る。実堤防のり面において、赤外線サーモグラフィ撮影実験、撮影条件、効率性の評価に取り組んでいる。

(4)　位置計測による構造物の監視・変状探知方法

GPS、画像処理等位置の特定技術を活用し、橋梁等構造物の突発的、致命的変状を、迅速・簡便に把握する点検・監視技術及び評価基準を開発する。従来、構造物の重大な変状はパトロールや通行者の通報等により把握され、迅速に把握できないことも見られたことに対して、新しい監視手法を加えることにより、迅速性、確実性を向上させ、道路利用者の安全性向上を図るものである。

モデル構造物を橋梁として、被災事例、損傷事例のデータを収集し、致命的な損傷の発生及び通行規制が必要な損傷の発生を検知するのに必要な測定精度の検討、並びに、GPS 測位方式及び画像処理方式の機器コストと精度に関する評価実験等に取り組んでいる。

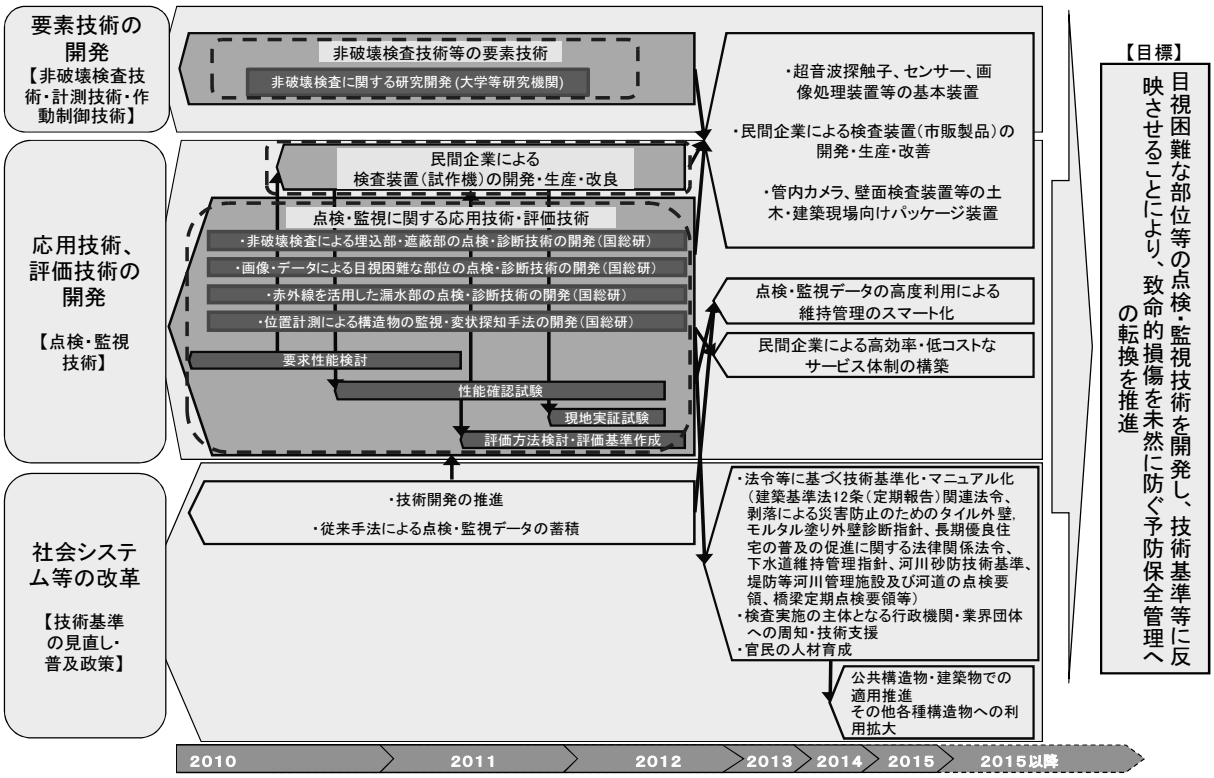
３．１．３　技術開発スケジュール

本プロジェクトでは、現在 3 ヵ年（平成 22 年度から 24 年度まで）の計画で技術開発を進めているところである。損傷事例の整理・分析、基本仕様・要求性能の検討、模擬劣化試験体等の実験装置の製作、検査機器のプロトタイプの製作を経て、性能評価実験、実験結果に応じた検査機器の改良、評価方法の検討等を行い、最終的には実際の現場での適用の推進（実用化）、各種技術基準案、評価基準・マニュアルの作成を目指している。

図-10 は、予防保全的管理全体を推進するためのロードマップを示すものであり、図中の点線が、今回の総合技術開発プロジェクトの研究開発範囲を示したものである。

新たな点検・監視技術の開発により、これまで点検が難しかった個所の監視体制の確立を図り、社会資本の予防保全を可能とし、また、検査装置の開発に加えて評価及び技術基準を一体として構築し、信頼性の高い点検・監視手法として確立を図ることにより、民間の機器メーカの参入等による速やかな普及が期待される。

さらに一連の取り組みにより、予防保全の考え方に基づく適切な維持管理が推進され、国民生活や経済社会活動に甚大な影響を与える社会資本の致命的な損傷の回避、施設の長寿命化によるライフサイクルコスト縮減の進展が期待される。



(図中点線で示す範囲は、今回の総合技術開発プロジェクトの研究開発内容を示す)

図-10　予防保全的管理を推進するためのロードマップ

３．２　各分野における取り組み事例

３．２．１　下水道管路のストックマネジメント

下水道整備の進展に伴い、全国の下水道普及率は平成 23 年度末現在 75%を超え、管きょ延長は約 43 万 km にもおよび、膨大なストックを有するに至っている。今後は、施設の老朽化の進展とともに施設管理費用の増大が見込まれるが、下水道は人々の日常生活や社会経済活動を支える基本的な社会基盤施設であり、計画的かつ効率的な施設管理を行うことにより所期の機能を継続的に発揮していく必要がある。

一方、下水道管路のストックマネジメント手法の導入を促進していくためには、施設管理計画の策定に必要となる施設の健全率の評価・予測手法や、合理的な事業計画を立案するための事業平準化手法等の各種要素技術の確立を図っていくことが求められている。

このような状況を踏まえ、国土交通省に設置された下水道施設のストックマネジメント手法に関する検討委員会（委員長:滝沢智東京大学大学院教授）では、国総研からも積極的に参画し、ストックマネジメントを推進するための諸課題についての検討が行われ、その成果の一つとして、ストックマネジメント手法導入のための指南書となる「下水道施設のストックマネジメント手法に関する手引き（案)」（平成 23 年 9 月）[5]がとりまとめられた。

この手引き（案）は、国総研の過年度研究成果である管きょの健全率予測式や事業平準化手法が反映されたものとなっており、また、現段階では多くの自治体においては、データ蓄積が少なく施設管理情報の整備が不十分であるが、そのような状況においても導入可能な簡

易なストックマネジメント手法と、その段階的なレベルアップの考え方が示されている。

現在、国総研では、ストックマネジメント導入支援の一環として、管きょ劣化データベースの公開と、予算等制約条件下における下水道管きょの調査頻度に関する検討を実施している。管きょ劣化データベースは、計画的な調査・点検や長期的な改築需要の見込み量の検討に必要となる管きょの健全率予測に関して、各下水道事業体の管きょの敷設条件等の特性に配慮した健全率予測式の作成を支援するため、インターネット上で公開するものである。また、下水道管きょの調査頻度に関する検討は、時間経過とともに進行する劣化を対象とした不具合の調査頻度に関して、適切な調査頻度及び適切な補修時期を推定することを目的として、信頼性重視保全保全の考え方や人の健康指標として注目されている健康寿命の考え方を下水道管きょに適用することで、任意の管きょが有するリスクの大きさ（事故発生確率及び事故による社会的影響）に応じたメリハリのある調査頻度の提案を可能とするものである。

今後も、信頼性の高い下水道管路サービスの提供が可能となるよう、ストックマネジメントの導入促進に向けて、引き続き各種研究に取り組んでいきたいと考えている。

３．２．２　道路構造物群の戦略的な維持管理・更新技術

現在、約 68 万橋を有する我が国の道路橋は、戦後の高度経済成長期の急ピッチで整備されたことから、今後確実に高齢化割合が増大する。道路橋の高齢化に伴い、通行規制を伴う深刻で様々な損傷が散見され始めた。高齢橋が少ない時代には、損傷が発見された都度の対応（事後保全）で対処できていたのに対して、高齢化時代では発見された損傷は氷山の一角に過ぎず、次々と同様な事象が発生する危険性を有していると考えられ、先手を打つ維持管理（予防保全）が求められてくる。すなわち、データに基づく科学的な維持管理に移行し、道路橋の長寿命化とライフサイクルコストの縮減を図ることが必要であり、このためには、橋の状態を知り（点検）、それを分析して管理に反映させていくことが重要となる。

このような状況を踏まえ、国総研では、高齢化しつつある膨大な道路構造物資産を経済的に保全し、道路機能の安心を効率的に実現できる維持管理体系、道路構造物の劣化や損傷に対して致命的な事態を未然に防止するための評価技術や予防保全対策、地震災害などの突発事象に対して早期発見による二次的被害の防止などのリスク低減策などの確立によって、科学的根拠に基づく戦略的な維持管理を実現するための研究を重点的に実施している。

以下は、道路橋の点検を中心に、現在研究に取り組んでいる目指すべき道路橋の維持管理像[6)]について紹介する。

図-11 は、目指すべき道路橋の維持管理像について説明するものであり、取組み段階を大きく 3 段階に捉え整理している。

「計画的管理」
- 現状を把握して適切に対策をとる（データに基づく合理的で計画的な管理の実現）

「戦略的管理」
- 将来を予測して、合理的な対策をとる（将来予測に基づく、予防保全と長寿命化の実現（ライフサイクルコストの縮減））

「無理なく無駄なく賢い管理」（スマート・インフラ・メンテナンス・マネジメント）
- 人と科学のベストミックス
- 点検の最適化と「点検と監視」のベストミックス

図-11　目指すべき道路橋の維持管理像

最初の取組み段階は、現状を把握することで必要な対策を確実に行えるようにする「計画的管理」である。これは、効率的な維持管理のためには、道路資産の最新の情報とその分析結果を反映させ、合理的で計画的な維持管理体系を構築することが不可欠であるとの考え方に基づいている。

道路橋の統一的な定期点検は、昭和 63 年の橋梁点検要領（案）の整備とともに開始され、現在は、平成 16 年に見直された橋梁定期点検要領（案）に基づき実施されている。これまでに得られた定期点検データの国総研における分析結果（直轄道路橋約 2 万橋）に基づき、道路橋の維持管理の現状を評価すると、（ここではデータの詳細に関する説明は割愛するが）現状把握は適切な管理の第一歩ではあるものの、目視などで容易に「見えるもの」だけを「ときどき」見ているだけでは足りないと言わざるを得ない状況となっている。

次の取組み段階は、将来を予測し合理的に対策する「戦略的管理」である。

既に、予防保全に向けた取組みが始まっており、直轄道路橋でも、コンクリートの塩害、RC 床版の疲労、鋼部材腐食などの劣化予測が行える橋梁マネジメントシステム（BMS）を作成して検証を進めている。ただし、ここで重要なことは、橋は極めて複雑な構造体であり、かつ架橋環境や利用実態によっても劣化進展の性状は千差万別であるため、シミュレーションと現実の間には大きな乖離が避けられず、統計から求めた劣化予測には圧倒的に大きなバラツキが実態として存在することである。また、このような課題のある劣化曲線さえも得られていない損傷が多数存在しているのも実情である。

将来予測に基づいて予防的な措置を行い、補修補強時期の最適化を模索することは、道路資産全体のライフサイクルコストの最小化に資する合理的な維持管理手法である。しかし、将来予測の信頼性には解消困難な大きな限界があり、それらに過度に依存しない現実的で信頼性の高い維持管理体系の構築が不可欠である。

最後に示す取組み段階は、「無理なく無駄なく賢い管理」である。

情報処理技術や情報伝送技術など最新の科学的手法を柔軟かつ積極的に取り入れ、それらを使いこなす技術者の介在によって、個々の橋梁に対してカスタマイズされた最適な維持管

理が行われると同時に、道路資産全体のライフサイクルコストの最小化、利用者に対するリスクの最小化が、無理なく無駄なく図られている賢い維持管理体系が理想と考えており、これをスマート・インフラ・メンテナンス・マネジメントと呼んでいる。

一方、合理的な維持管理の実現には、未だ様々な課題が残されている。例えば、統計処理による将来予測や補修補強時期の最適化の限界に対しては、それら科学的ツールの限界を考慮して正しく使いこなす人が必要である。また、間欠的な点検をいくら充実させても、突発的な事故や不具合への対応性の向上には限界があり、さらに、優れた技術者による目視点検でも、直視できない異常が致命的な事故の引き金になることも考えられる。

これからの道路橋の維持管理では、落橋等に至るような重大な損傷を未然に防ぐためにも、点検データ及び道路橋の損傷・不具合事例等の知見を管理分析し、既設道路橋の機能・性能を正確に把握・分析し、それらの蓄積されたデータに基づく科学的な維持管理を行っていくことが重要である。その中で、国総研では「人」と「科学」、「点検」と「監視」の最適組み合わせを目指し、全国の直轄の点検データの管理分析、維持管理の合理化・高度化に係る研究、技術的支援等を行っている。

図-12 は、点検・監視に関する要領等に関する現在の整備状況を示すものであるが、目指すべき維持管理像の実現のため、各方面と連携し、引き続き各種研究に取り組んでいきたいと考えている。

<table>
<tr><th rowspan="2">目的</th><th rowspan="2">分類</th><th colspan="8">主たる対象</th><th rowspan="2">方向性と課題</th></tr>
<tr><th colspan="7">本体各部</th><th>特定部位</th></tr>
<tr><td rowspan="3">現状把握
(事後保全)
＋
予防保全</td><td rowspan="2">定期点検</td><td colspan="8">日常点検</td><td rowspan="3">□外観目視の限界克服
・非破壊の活用・精度向上

□バラツキ・不確実性克服
・診断技術、人材
・臨床研究</td></tr>
<tr><td colspan="8">初期点検</td></tr>
<tr><td colspan="8">定期点検（５年毎）</td></tr>
<tr><td>個別点検</td><td>疲労</td><td>塩害</td><td>ASR</td><td>洗掘</td><td>水中</td><td>PC</td><td>地中</td><td>第三者被害予防点検（主に「うき」・「剥離」）</td></tr>
<tr><td rowspan="2">危機管理</td><td>異常検知</td><td colspan="8">モニタリング・常時監視</td><td>□間歇ﾁｪｯｸの限界克服
□予測・予防の限界克服
・技術開発</td></tr>
<tr><td>事前措置</td><td colspan="7">適宜（防水、部分塗装、疲労対策・・・）</td><td>剥落防止など</td><td>□予測の限界克服</td></tr>
</table>

（※ 図中の網掛箇所は、要領等整備済み）

図-12　点検の最適化　～「点検と監視」のベストミックス～

３．２．３　河道・河川管理施設の点検・管理手法の高度化

河川構造物の維持管理、特に劣化河川構造物に係る長期予測に関する技術検討、それを踏まえた中長期マネジメントに関する研究は重要課題であるが、これまでは十分な検討がなされていなかった。そこで、社会資本整備全体の状況を把握しつつ、河川に適した構造物マネジメント技術をフォローする河川構造物管理研究タスクフォース（TF）[7] が国総研・土木研究所の研究担当者により設置された（図-13 参照）。

図-14 は、本省、地方整備局及び河川構造物管理研究タスクフォース（TF）との関係を示したものである。

河川構造物管理研究タスクフォースの実施事項及び現場支援の内容を以下に示す。

実施事項としては、

- 各種河川構造物にかかる劣化予測に関する技術検討及びそのフォロー
- 河川構造物の中長期マネジメント技術に関する研究及び社会資本整備における他研究のフォロー
- 実務レベルにおける点検・劣化診断等に関する技術助言及び中長期コスト予測等に関する行政への助言

を考えている。

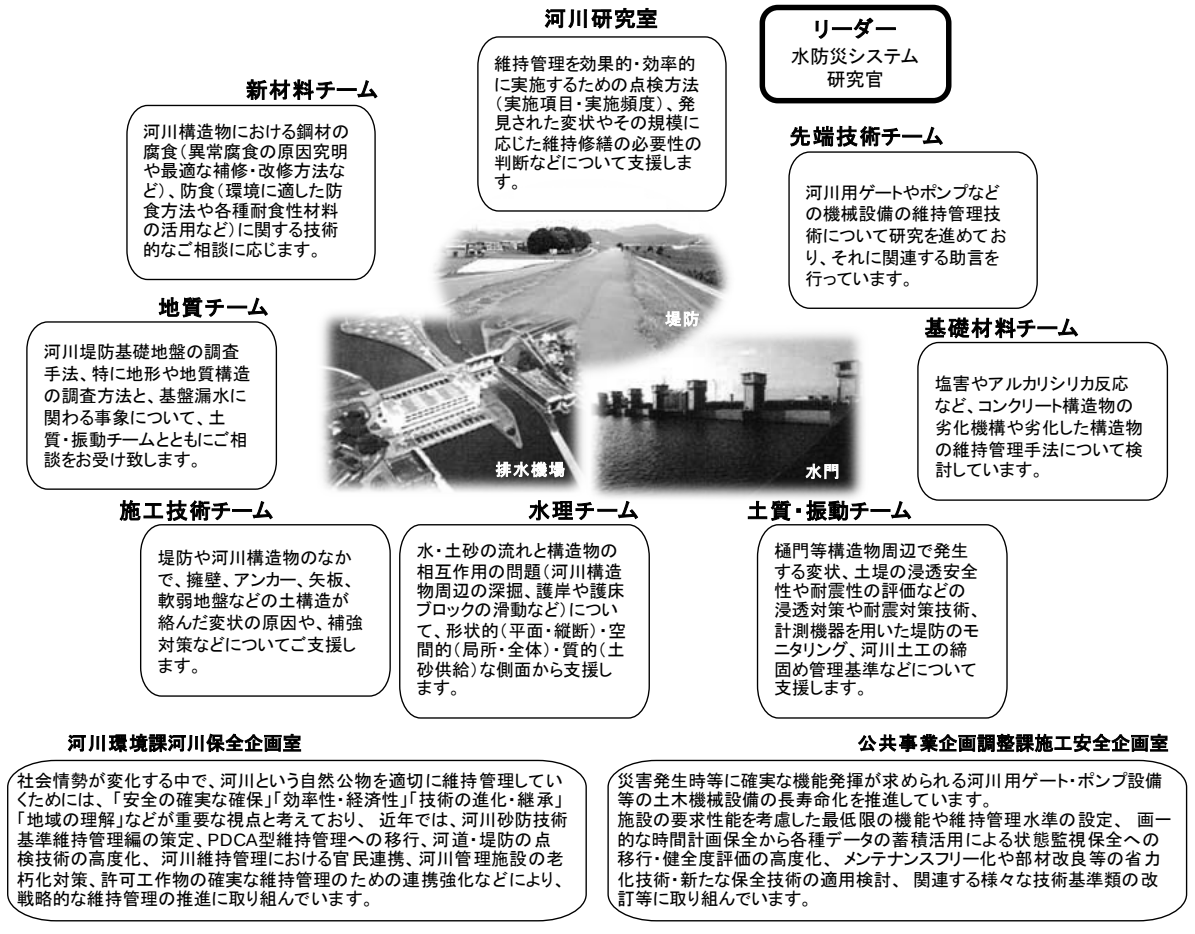


図-13　河川構造物管理研究タスクフォース組織図

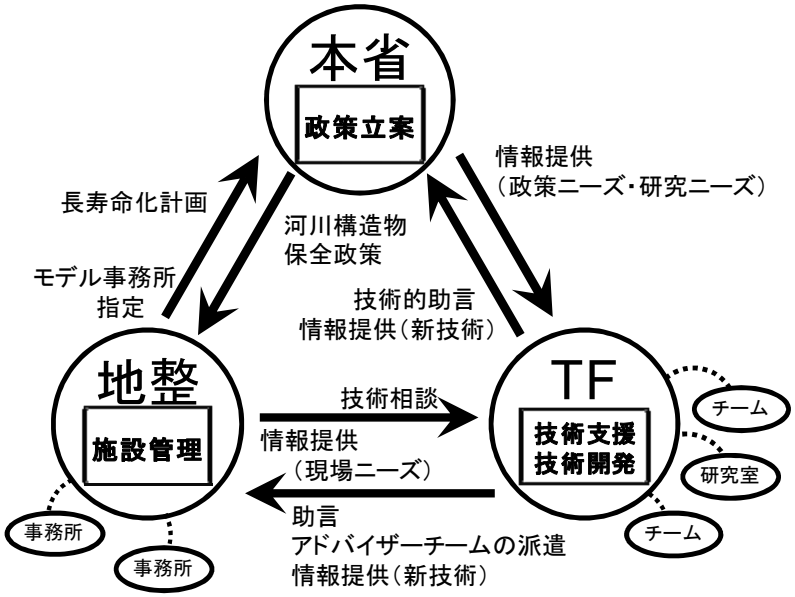


図-14　本省、地方整備局及び河川構造物管理研究タスクフォース（TF）の関係

現場支援としては、次の 3 点を行うことにしている。

(1) 技術相談

河川構造物の維持管理技術には、構造物として土木構造物（コンクリート構造物、鋼構造物、土構造物)、機械施設、電気施設それぞれの技術体系を有するとともに、マネジメントとして点検、分析、評価、補修の横断的な技術体系があり、維持管理の実務においては、これらを総合的に取り扱うことが重要である。国総研、土木研究所の河川構造物の維持管理に関する専門家集団であるタスクフォースは、劣化損傷の状況に応じて、必要な専門家チームを組織して、現場からの技術相談に対応する。また、専門家チームを現地に派遣して、現地指導を行う。

(2) 維持管理ナレッジデータベース

河川構造物の維持管理においては、10 年、20 年単位での「継続」が重要である。このため、補修履歴をその技術的な背景も含めて保存することが重要になる。タスクフォースで受け付けた技術相談の案件については、ナレッジデータベースとして、損傷状況、診断結果、補修方法などをデータベース化して管理する。また、その後も状況についても事務所と連携してモニタリングを継続して追跡調査を継続する。この結果、構造物を継続的に追跡することが可能となるとともに、技術開発のニーズの抽出が可能となる。

(3) 技術情報の発信・交流

より合理的な維持管理には、現場の技術力の向上が不可欠である。このため、タスクフォースのホームページを立ち上げ、劣化事例や補修事例、点検や補修に関する新技術、技術相談案件、事務所の取り組み、タスクフォースメンバーの研究などを紹介し、現場の技術力の向上を目指す。また、産官学をメンバーとしたワークショップを開催し、情報交流の場を創

出する。さらに、異分野の維持管理の動向を把握し、維持管理をより高度化するために、専門家による講演会を開催する。これらの結果はホームページで情報提供する。

３．２．４　維持修繕工事の入札契約・積算体系に関する研究

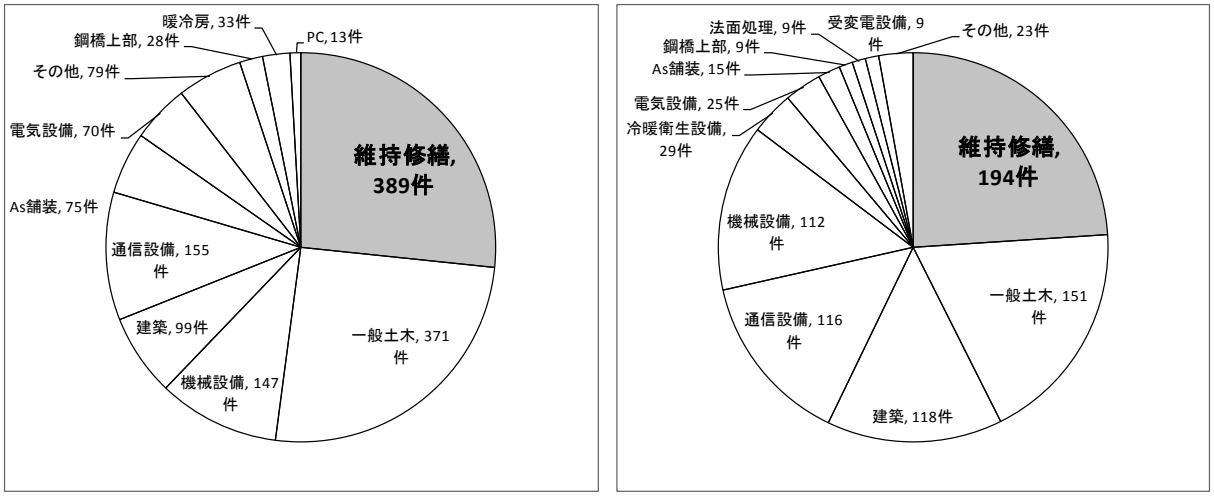
ストックマネジメントを着実に実施する上で、維持管理における調達方法に関する調査研究も必要なテーマである。

図-15 は、平成 21、22 年度における国土交通省発注工事における不調・不落工事の件数を示すものである。図-15 に示すように、維持修繕の工事の調達において、不調・不落工事（応札者がいない、あるいは、応札価格が予定価格を上回り契約が不成立・やり直しとなること）が多数生じていることが分かる。また、工事規模別に分析すると、予定価格が 6,000 万円未満の小規模な工事でその発生率が高いことが明らかとなっている。この維持修繕工事の入札不調・不落の原因としては、契約方法や積算上の問題が一因となっていることが推測される。

このような背景から、維持管理の実態を考慮した適正な入札契約方式や積算体系を整備し、社会資本のストックマネジメントを安定的に実行し得る持続可能な維持管理調達システムを実現することを目的として、契約や積算に関する調査研究を実施している[8)]。

近年、維持管理業務の入札契約方式に関しては、施工エリアの広域化や複数年契約、性能規定型発注など包括的な契約方式が一部において導入されている。これらは、業務量の変動に対し、受注者にとっては裁量拡大によるリスク負担の軽減や、創意工夫に対するインセンティブの付与、発注者にとっては予算管理の容易化などを期待したものと考えられる。

一方、工事価格の適正化に向けた取り組みに関しては、例えば、「見積もりを活用する積算方式」（平成 19 年度～）、「間接工事費実績変更方式」（平成 20 年度～）、「間接工事費の大都市補正」（平成 21 年度～）、「日当たり作業量の補正」「点在施工箇所の間接工事費補正」（平成 22 年度～）等が試行されてきたところである[9)]。



平成 21 年度（N=1,459 件, 10.4%）　　平成 22 年度（N=808 件, 7.0%）

（比率(%)は、発注工事件数（全体）に占める不調・不落工事件数（全体）の割合）

図-15　工種別不調・不落工事件数

現在、国土交通省が発注した河川及び道路施設の維持修繕工事の受注者を対象としたアンケート調査やヒアリング等を各地方整備局と連携して実施し、現状の把握や課題の洗い出しに努めているが、今後さらに、これまでの施策の効果や課題を検証しつつ、また、地方自治体や国外等に見られる先進的な契約事例も参考としながら、維持管理におけるより良い調達方法について検討していきたいと考えている。

４．社会資本のストックマネジメント推進に向けた今後の方向性について

社会資本のストックマネジメントを推進していくために今後必要となる方向性としては、次のようなものが考えられる。

1 点目として、国土マネジメントとしてのストックマネジメント技術の普及に関する取り組みである[10)]。各分野横断的な情報交換等を行い、各研究分野におけるストックマネジメントに関連した取り組みの積極的な情報発信に努めることにより、各分野の各々のストックマネジメントの推進にもつながるものである。また各研究課題についての取り組み成果が、技術基準、指針、マニュアル等の原案に反映され、地方自治体の施設管理においても容易に活用出来るようにしていくことにより、国土全体のマネジメントに寄与していくことになる。

2 点目として、予防保全的な視点に関する取り組みの展開である。現在研究開発中の目視困難な部位や評価困難な変状に関する点検・監視技術や、施設管理情報の整備が不十分であっても導入可能な簡易なストックマネジメント手法は新しい視点として取り組む方向性を示している。これらは、「無理なく無駄なく賢い管理」につながるものと考えている。

3 点目として、社会資本等の維持管理を効率化・高度化するための技術の開発である。住宅・社会資本の計画から設計、施工、維持管理、更新の各段階を通じ、必要な安全性の確保や環境負荷低減を極めて効率的・効果的に実現させていく技術的な解決方策の検討・確立が必要となっている。しかし、現時点においては、住宅・社会資本の整備・保全は、各段階において、個々の施設の最適化を目指して対処しており、多数の施設の効率的な管理や、資源リサイクル等による環境負荷低減が十分に図れていない状況がある。このため、住宅・社会資本の整備・保全における各段階において必要な情報を収集し、その情報を利用して効率的な維持管理・長寿命化を実現するとともに、安全や環境面でも高度化していくため、施設管理に関わる情報の収集・利活用技術の開発を推進する必要があるものと考えている。

また、膨大なストックに関するデータベースの構築等の適切な情報管理も重要である。

５．おわりに

人口減少や少子高齢化が進む我が国においては、高齢化する社会資本の増大に伴い、「つくったものを長持ちさせ大事に使う」というストック型社会への転換が、今後の大きな課題となっており、地方自治体でも共通の課題として、施設の長寿命化や維持修繕、更新を進める必要に迫られている。

このような課題を解決する研究を円滑に進めるために、国総研としても様々な取り組みを行ってきている。本稿ではこれらの取組の一端について報告した。

今後も、社会構造の変化など我が国を取り巻く環境において、社会資本の安全性やサービ

ス水準を確保していくため、各事業分野の現場に立脚したストックマネジメント手法を従来にも増してさらに発展させていく必要がある。研究分野を担う国総研としても、第 4 章で触れた今後の方向性にも十分配慮しながら、各事業分野の特性に応じた個々のストックマネジメント手法に関する研究をさらに深化させるとともに、各事業分野の知見を集約し、その結果を個々の研究にフィードバックするような横断的な取組も必要不可欠なものと考え、関係機関等とも連携しながら一層の取り組みを展開してきたいと考えている。

参考文献

1) 国土交通省編:国土交通白書 2010, p.35, 2010.7
2) 西川和廣:社会資本ストックの戦略的維持管理とは何か, 国土技術政策総合研究所資料 No.482, pp.7-22, 2008.12
3) 駒田達広, 角拓史, 塚原隆夫:予防保全的管理のための点検・監視技術の開発について,土木学会第 29 回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集, pp.9-12, 2011.12
4) 国土技術政策総合研究所下水道研究部:平成 22 年度下水道関係調査研究年次報告集, 国土技術政策総合研究所資料 No.654, pp.115-120, 2011.9
5) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部:下水道施設のストックマネジメント手法に関する手引き（案）, 2011.9
6) 玉越隆史:道路橋の点検体系～スマート・インフラ・メンテナンス・マネジメントに向けて～, 土木技術資料 53-2, pp.52-53, 2011.2
7) 国土交通省国土技術政策総合研究所,独立行政法人土木研究所:河川構造物管理研究タスクフォース, http://www.nilim.go.jp/lab/fag/index.html
8) 駒田達広, 岩塚浩二:維持管理調達の円滑化に関する課題について, 土木学会第 66 回年次学術講演会,第Ⅵ部門, pp.629-630, 2011.9
9) 永松義敬:土木工事積算基準 間接工事比率の改正について, 建設マネジメント技術, No.407, pp.6-9, 2012.4
10) 岸田弘之: 次世代に向けた社会資本整備・管理のための視点,国総研レポート 2012, No.11, pp.6-7, 2012.3

国土技術政策総合研究所資料
TECHNICAL NOTE of ＮＩＬＩＭ
Ｎｏ．699　　December　2012

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