

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第 4345 号

平成 28 年度

土木研究所講演会
講 演 集

平成 28 年 10 月 6 日

国立研究開発法人土木研究所

Copyright © (2016) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人大木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人大木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

土木研究所資料
第4345号 2016年10月

平成28年度土木研究所講演会講演集

企画部研究企画課

要 旨

本資料は、「平成28年度土木研究所講演会」の講演内容をまとめたものである。この講演会は、土木研究所が実施している調査研究の成果や最近の土木技術に関する話題、動向などを各方面に紹介することを目的として毎年1回開催している。

一 目 次 一

◆プロジェクト研究成果報告【グリーンインフラ】

10:15～10:30	バイオマスの可能性を探る ～都市・農村から発生するバイオマスの利用技術～	寒地土木研究所 技術開発調整監 太田 広	1
10:30～10:45	建設材料による CO ₂ 削減 ～低炭素・低環境負荷型の建設材料・建設技術の開発～	先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ長 渡辺 博志	7

◆プロジェクト研究成果報告【ストックマネジメント】

10:55～11:10	新たな道路メンテナンス技術の実現に向けて	構造物メンテナンス研究センター 橋梁構造研究グループ長 金澤 文彦	11
11:10～11:25	積雪寒冷地のインフラを守れ！！ ～寒冷な気象条件により劣化する構造物の機能を維持する技術開発～	寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ長 西本 聰	15
11:25～11:40	新形式の構造物の活用と構造物の長寿命化に向けて	つくば中央研究所 道路技術研究グループ長 並河 良治	21
11:40～11:55	安全・安心な冬の道路を目指して ～寒冷地域における冬期道路のパフォーマンス向上技術に関する研究～	寒地土木研究所 寒地道路研究グループ長 三木 雅之	25

◆熊本地震調査報告

14:20～14:35	熊本地震の緊急調査報告	つくば中央研究所 土砂管理研究グループ長 藤沢 和範	31
-------------	-------------	----------------------------	----

◆プロジェクト研究成果報告【防災】

14:35～14:50	大規模土砂災害を想定内へ	つくば中央研究所 土砂管理研究グループ長 藤沢 和範	35
14:50～15:05	限界状態に挑む ～耐震性能を基盤としたインフラ・システムの耐震技術の開発～	構造物メンテナンス研究センター 橋梁構造研究グループ 上席研究員 大住 道生	41
15:05～15:20	激甚化する水災害の防止・軽減に向けて	つくば中央研究所 技術推進本部長 田村 敬一	47
15:20～15:35	暴風雪災害から身を守るために ～雪氷災害の減災技術に関する研究～	寒地土木研究所 寒地道路研究グループ長 三木 雅之	57
15:35～15:50	新情報技術を活用し水災害の被害軽減に挑む ～水災害軽減に資する洪水予測モデル及び人工衛星を活用した氾濫水理量推定技術の提案～	水災害・リスクマネジメント研究センター 水災害研究グループ長 三宅 且仁	63

◆プロジェクト研究成果報告【自然共生】

16:00～16:15	河道掘削を環境の再生（保全）に活かす ～その具体的なアプローチ（プロセス）の提案～ つくば中央研究所 水環境研究グループ長 森 吉尚	・・・・・・・71
16:15～16:30	流域における健全な土砂動態の確保に向けて つくば中央研究所 水工研究グループ長 佐々木 一英	・・・・・・・75
16:30～16:45	水環境をどう改善するか？ ～流域スケールにおける水質管理技術の開発～ つくば中央研究所 水環境研究グループ長 森 吉尚	・・・・・・・81
16:45～17:00	山・川・海を土砂でつなぐ 寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ長 船木 淳悟	・・・・・・・85
17:00～17:15	北海道の食料生産力を維持向上していくために 寒地土木研究所 寒地農業基盤研究グループ長 竹内 英雄	・・・・・・・89

〔 プロジェクト研究成果報告【グリーンインフラ】 〕

バイオマスの可能性を探る
～都市・農村から発生するバイオマスの利用技術～

建設材料による CO₂削減
～低炭素・低環境負荷型の建設材料・建設技術の開発～

バイオマスの可能性を探る～都市・農村から発生するバイオマスの利用技術～

寒地土木研究所 技術開発調整監 太田 広

1. はじめに

低炭素・循環型社会を構築するため、都市や農村から発生するバイオマスを資源やエネルギーとして、地域で有効活用する技術開発が求められている。また、再生可能エネルギーを使った社会インフラ維持のための環境負荷低減技術の開発や導入が求められている。さらに、新しい技術や社会システムが実現した場合の環境改善性をスタンダードな指標で「見える化」することにより、技術普及を一層進めることが必要である。

ここでは、土木研究所が開発した、下水処理場や公共緑地、畜産場などから発生するバイオマスの効率的な利用技術や社会への導入例を紹介する。また、その導入効果を明らかにするため、バイオマスの広域利用を実現する地域循環型利用システムにおけるエネルギー収支の試算例や二酸化炭素などの温室効果ガス排出量削減効果の評価例を示す。

2. 農村地域から発生するバイオマスの広域利用モデル

2. 1 エネルギー収支を指標にフィージビリティを評価できるバイオマス広域利用モデル

バイオガスプラントは、酪農業で発生する家畜ふん尿や食品工場からの食品加工残渣などのバイオマスを広域的に収集し、利用することが可能である。こうしたバイオガスプラント導入のフィージビリティを判断する1つの指標として、エネルギー収支による評価が行われるが、エネルギー収支の検討を行うにあたっては、その検討範囲、及び、期間を明確にすることが重要である。

本モデルでは、農村地域における有機性バイオマスを電気、熱などのエネルギーに転換するバイオガスプラントのエネルギー収支の検討範囲を図-1のように簡素化した。

バイオガスプラントでは、バイオガスをコーチェネレーションシステムで電気と熱にエネルギー変換し、プラント内部で消費するとともに、余剰分はプラント外部へ供給し、不足するエネルギー(A)は外部から投入する。また、発酵原料となる家畜ふん尿、及び、副原料である食品加工残渣をバイオガスプラントまで運搬するためのエネルギー(F)が必要となる。

そこで、投入エネルギー(A)、(F)に対する産出エネルギー(E)の比率をエネルギー投入産出比($E/(A+F)$)と定義し、これを指標として広域利用のフィージビリティを評価するためのモデルを開発した[式(1)]。

$$\text{エネルギー投入産出比} = \frac{\text{産出エネルギー (E)}}{\text{投入化石エネルギー } [(A)+(F)]} \quad \dots (1)$$

2. 2 広域利用モデル開発の背景と利点

北海道では大規模な農地を生かして、酪農業などの土地利用型農業が展開されている。一方、バイオガスプラントでは、前述の通り、地域で発生する有機性廃棄物（食品加工残渣など）を混合して発酵することができるが、収集が困難であることなどから、バイオガスプラント近傍で発生する有機性廃棄物の利用にとどまっている。バイオマスのより広域的な利用促進を目指す自治体等にとって、バイオマス広域利用のフィージビリティ検討は不可欠であり、本モデルを適用することにより、想定パターンの比較検討、ケーススタディの結果等、バイオガスプラントを核とした資源循環システムの計画や設計に携わる行政担当者、技術者等にとって有用な情報が得られる。

また、日変動や季節変動のあるバイオガスプラントのシミュレーションには、実際の運転に近い計算時間間隔1分間で解析が可能な運転シミュレーションモデル（登録番号P8806-1、土木研究所成果）¹⁾を用いた。これを用いることにより、シミュレーションの期間は、気温の年変化等をシミュレーション結

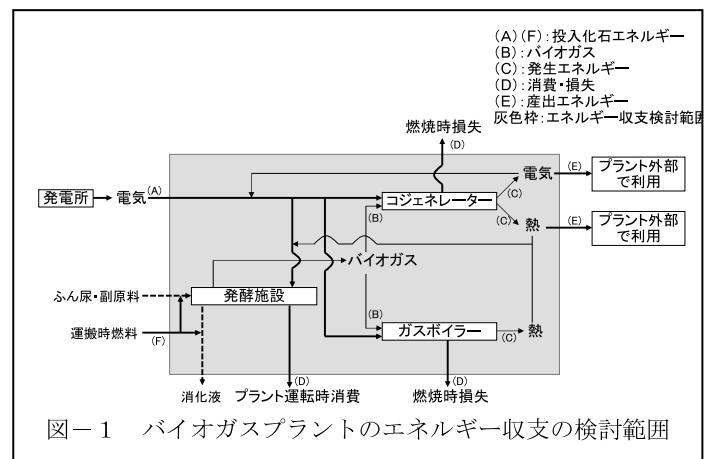


図-1 バイオガスプラントのエネルギー収支の検討範囲

果に反映させるため、1年間とすることが可能である。加えて、想定パターンごとのエネルギー収支を検討しやすいよう、各種パラメータや原料スラリー等の適正投入量やバイオガス単位発生量など様々な原単位を整理した²⁾。

2. 3 北海道でのモデル適用例

次に本モデルの適用例を示す。多量排出事業者（前年度に産業廃棄物を1,000t以上または特別管理産業廃棄物を50t以上発生させた事業者）である乳業工場5工場が立地する北海道釧路、根室地域において、図-2に記号A～Eで示した工場から排出される食品加工残渣を別海町にあるバイオガスプラントまで運搬し、利用する場合を想定し、広域利用モデルを用いてエネルギー収支を試算した。

工場Eは工場A～Dと比較してプラントまでの距離が遠いため、工場A～Dの副原料を利用する場合と、工場A～Eの副原料を利用する場合を比較した。乳業工場からバイオガスプラントまでの運搬距離、食品加工残渣の種類と発生量、副原料としての投入可能量ほか各原料のガス発生量等の原単位は表-1、図-3に示すとおり設定した。

乳業工場A～Dの食品加工残渣を利用する場合のエネルギー収支の結果を図-4に示す。バイオマスの広域収集により運搬のエネルギーが増加するが、エネルギー収支はプラスであり、バイオマスを広域で有効利用できることがわかる。一方、乳業工場A～Eの食品加工残渣を利用する場合の試算結果は図-5のとおり、広域収集の範囲を拡大し過ぎるとエネルギー収支がマイナスになることがわかる。

エネルギー収支を評価指標とする広域利用モデルを適用すれば、地域で発生するバイオマス量、及び、運搬距離等の設定条件が異なるケースごとのフィージビリティを検討できることが示された。

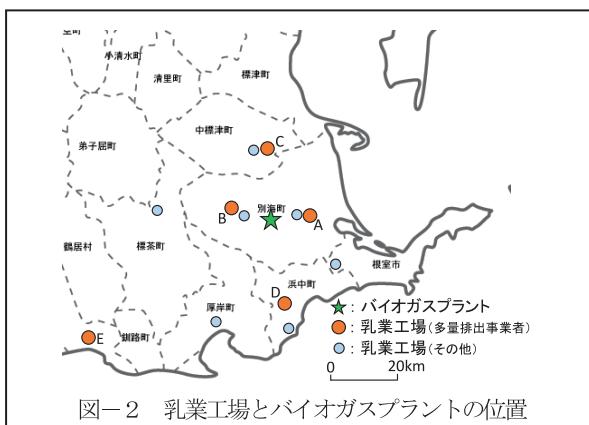


図-2 乳業工場とバイオガスプラントの位置



図-3 バイオガスプラントの規模

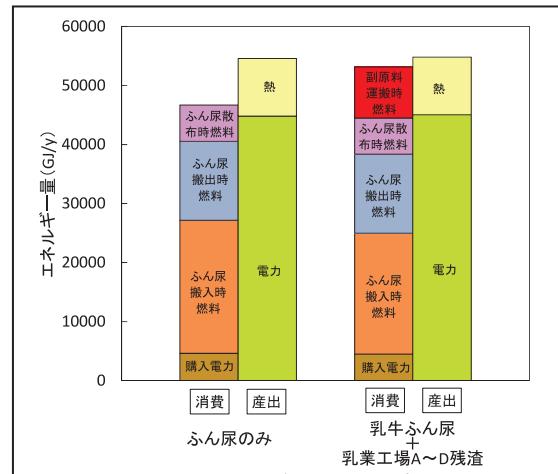
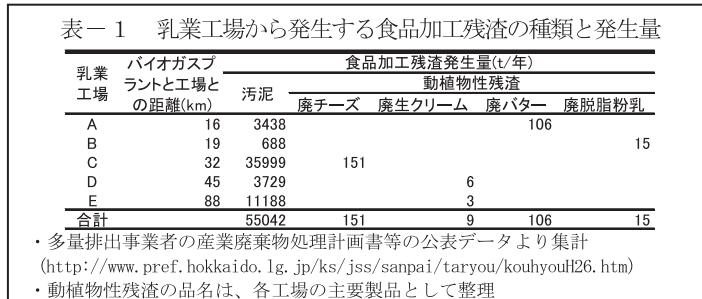


図-4 エネルギー収支
(乳業工場A～Dの副原料を利用する場合)

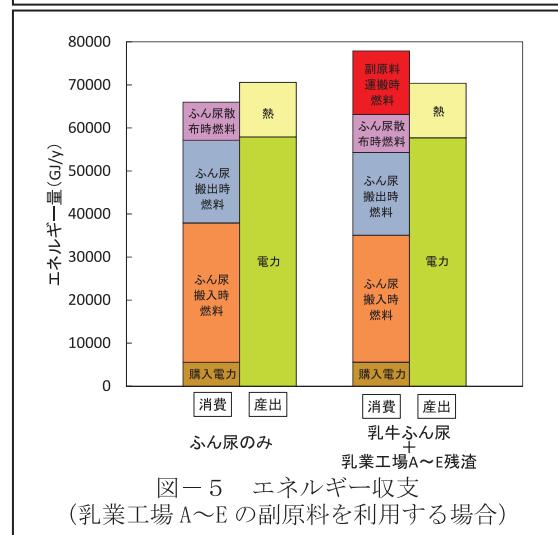


図-5 エネルギー収支
(乳業工場A～Eの副原料を利用する場合)

3. 下水汚泥等の集約化のための高濃度嫌気性消化

3. 1 下水汚泥処理の現状と集約型高濃度嫌気性消化の必要性

下水汚泥のリサイクル手法は、1) 建設資材利用、2) 緑農地利用、3) エネルギー化利用の3点に大別される。現在、下水汚泥のリサイクル利用は、セメント化等の建設資材利用や緑農地利用が主体で、消化ガスや汚泥燃料としてエネルギー化利用されている割合は、発生する下水汚泥中の有機分総量の2割未満にとどまっている⁴⁾。再生可能エネルギーの利用拡大や技術開発は「エネルギー基本計画」（平成26年4月）に謳われており、有効利用が進んでいない下水汚泥のエネルギー化利用の促進が重要である。こうした背景から、下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン（改訂版）が平成26年度末に国土交通省から公表されている⁵⁾が、我が国の下水処理場約2,000カ所のうち、嫌気性消化を行っている処理場数は300カ所程度で近年大きな変化がなく、特に小規模施設での採用例は少ない⁶⁾。この原因として、規模が小さくスケールメリットが働かない処理場が多くあること等が挙げられている⁷⁾。一方、平成27年5月の下水道法の一部改正において、下水道管理者が汚泥等を処理する場合には、燃料や肥料としての再生利用が努力義務化されている。

小規模施設での汚泥の再生利用を促進するためには、拠点となる処理場に、周辺の污水処理施設で発生する汚泥を含めて、地域の有機性廃棄物（地域バイオマス）を集約し、スケールメリットを働かせることが考えられる⁸⁾。集約化においては、汚泥の効率的な運搬のために含水率を減らして体積・重量を減らすとともに、既存消化タンクを最大限活用するために、拠点となる処理場においては、固体物が高濃度である汚泥の消化が必要である。このため、下水汚泥等の集約化のための高濃度嫌気性消化システムの設計手法を開発し、同システムを導入した場合のケーススタディを行った。

3. 2 高濃度嫌気性消化システムの設計手法

嫌気性消化における投入汚泥の高濃度化については、実際の下水処理場において土木研究所が開発した「みずみち棒」を用いた下水汚泥の重力濃縮技術や機械濃縮機を導入する場合、混合汚泥を投入基質濃度（TS）5%程度に濃縮して嫌気性消化すれば、消化ガス発生量増加や加温用燃料の削減を実現でき⁹⁾、高濃度化は加温エネルギーの削減の観点からも消化槽運転の効率化につながることを明らかにした。さらに、高濃度化された汚泥や、他の下水処理場から輸送された脱水汚泥の中温嫌気性消化について、TSを10%以下（負荷率3.2 kgVS/m³/d以下）に設定すれば、投入有機物（VS）当たりのバイオガス発生率が従来と同程度の安定した中温嫌気性消化が可能であること、また、消化槽内溶液の粘度は8 dPa·s以下、アンモニア性窒素濃度はおおむね4,000 mgN/L以下（図-6）であり、搅拌への障害やアンモニア性窒素による阻害も発生しないことを示した。

3. 3 ケーススタディによるコスト及び温室効果ガス排出量の削減効果

次に、石川県中能登町をフィールドとして、拠点となる下水処理場に、複数の小規模な下水処理施設から含水率を低下させた脱水汚泥を運搬するとともに、地域バイオマスを集約し高濃度嫌気性消化を導入するケーススタディを行った。集約型高濃度嫌気性消化を実施した際のコスト、及び、温室効果ガス排出量（CHG）は、現状の個別処理（各バイオマスを個別に処理する場合）に比べて、コストについては固体物重量1トン当たり283円、温室効果ガス排出量については年間約30%の削減が可能であるという試算結果となった。

また、メタン発酵に伴うエネルギー収支の試算を実施したところ、回収エネルギー量に対し、消費エネルギー量（投入汚泥の加温に必要な熱量、発酵槽の放散熱損失、及び、配管等の熱損失）はプラスとなり、余剰排熱が発生する結果となった。この結果に基づき、中能登町では平成29年度の集約型高濃度嫌気性消化システム供用開始を目指し、現在、新たに必要な施設の設計を行っているところである。

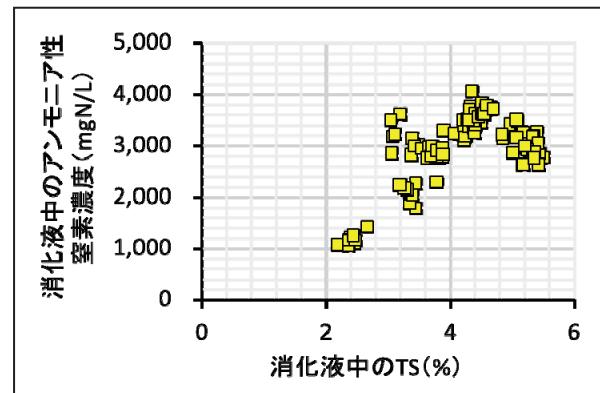


図-6 高濃度中温嫌気性消化におけるアンモニア性窒素濃度

4. 公共緑地から発生する刈草と下水汚泥の混合嫌気性消化技術

4. 1 河川堤防の刈草処分の現状と下水処理場における混合嫌気性消化の意義

河川管理において重要な堤防法面の点検と堤体保全のため、堤防除草が定期的に行われている。除草後の刈草の多くは焼却などにより処理されてきた。刈草をエネルギーとして有効利用し、化石燃料由来のエネルギーを代替することができれば、GHGの排出を削減し、地球温暖化対策として期待される。

下水処理場における混合嫌気性消化とは、他のバイオマスを受け入れて、下水汚泥と混合して嫌気性消化する方法であり、発生するメタンガスを增量させ、増加したメタンガスは、発電等に用いることができる。下水処理場において生ごみや浄化槽汚泥等を受け入れて混合嫌気性消化する事例は増えつつあり、北海道恵庭市、富山県黒部市等5箇所で実施されている¹¹⁾。ここでは、河川管理等で大量に発生する刈草を下水処理場で受け入れ、メタンガスを增量させ資源化するシステムを紹介する。

4. 2 メタン転換率の高い混合嫌気性消化技術の開発

一般的に、下水処理場において下水汚泥の嫌気性消化は中温(35°C)で行われていることが多いが、刈草と下水汚泥の混合嫌気性消化において、高温(55°C)消化することによるメタン生成量増量の可能性がある。このため、約250日間に渡って中温、及び、高温条件下における刈草と下水汚泥の混合嫌気性消化実験を継続して行った¹²⁾。刈草の投入量は、有機物量(VS)で下水汚泥の投入量の半分相当とした。その結果、高温消化は、中温に比べメタンガスの增量が可能な混合嫌気性消化技術であり（中温、高温混合嫌気性消化によるメタン発生量は0.17NL/g-VS、0.19 NL/g-VS）、この技術を用いれば、pH低下やアンモニア性窒素蓄積による阻害影響は発生せずに、消化が可能であることが明らかになった。

また、下水処理場における刈草と下水汚泥の混合嫌気性消化のメタン転換率の優位性を検証するため、下水汚泥を混合せずに刈草のみで嫌気性消化した場合と、刈草と下水汚泥を混合して嫌気性消化した場合を比較した実験¹³⁾を行った。下水汚泥を混合せずに刈草のみで嫌気性消化した場合のメタン生成量よりも、刈草と下水汚泥を混合して嫌気性消化した場合の刈草からのメタン生成量（刈草と下水汚泥の混合嫌気性消化によるメタン生成量と下水汚泥のみの嫌気性消化によるメタン生成量の差）の方が増加していることが示され（図-7）、刈草と下水汚泥を混合して嫌気性消化することにより、メタンガスを增量できることが判明した。刈草と下水汚泥を混合した実験のため、刈草からのメタン生成、もしくは下水汚泥からのメタン生成どちらが向上したのかは区別できないものの、混合消化による促進効果は、栄養バランスの改善や、下水汚泥の酸発酵で活性化する微生物群により刈草の可溶化、及び、酸発酵を促進することなどが、その理由に考えられている。このような観点からも、下水処理場で刈草を受け入れることは、メタン生成量増加への相乗効果が期待できる。

4. 3 地球温暖化対策として有効な刈草の収集範囲の検討

地球温暖化対策として、下水処理場の周辺で発生する刈草を、下水汚泥と混合して嫌気性消化する場合、刈草の運搬距離がその効果に大きく影響を与える。そこで、地球温暖化対策として有効な刈草の収集範囲を明らかにするため、嫌気性消化槽を有する既存の下水処理場へ刈草を運搬し、下水汚泥と混合して嫌気性消化する事業（図-8）において、実施に伴う追加的なGHG排出量、及び、

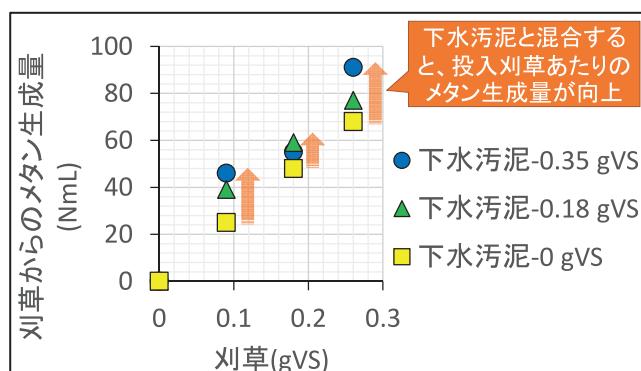


図-7 投入刈草量とメタン生成量の関係

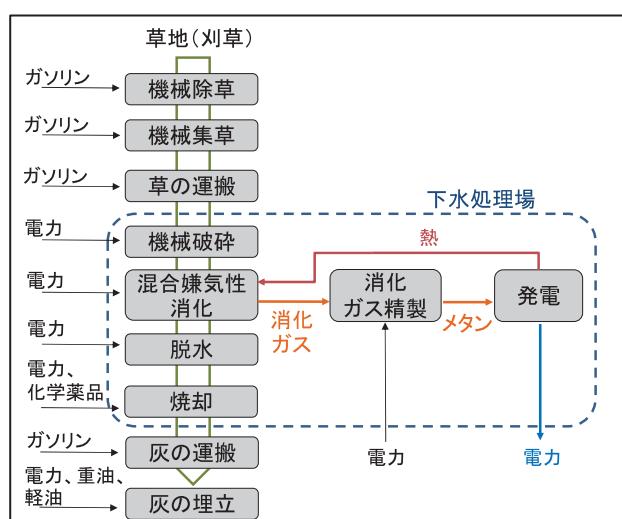


図-8 評価対象とした刈草と下水汚泥の混合嫌気性消化のフロー

刈草を嫌気性消化しメタンガスを得て、発電することによる GHG 排出削減量を試算した¹³⁾。

GHG の排出削減量が排出量を上回るのは、年間走行距離が 163km(年間除草回数は 2 回を仮定し、1 回の除草につきトラックの走行距離 82km)以下のケースであった。迂回率を 1.3 とした場合、本結果から地球温暖化対策として有効な刈草の収集範囲は、下水処理場から直線距離で 31km 以下の範囲であることが示された。具体的な地域の GHG 排出削減量の総量を評価するには、今回試算された 31 キロ圏内を目安に、収集可能な刈草量や運搬条件等を把握することが必要である。なお、GHG を排出したプロセスのうち、運搬プロセス以外では、除草、焼却、消化ガス精製の順に GHG 排出量が大きかった。

5. 下水処理水で培養した藻類のエネルギー利用の可能性

5. 1 下水処理水の特徴とバイオマス生産への期待

放流先の水質改善のため、下水処理水中の栄養塩を除去するとともに、除去・濃縮された栄養塩を資源として有効利用することが期待されており、その方法の一つとして藻類を用いたエネルギー生成に大きな注目が集まっている。下水処理水を用いた藻類培養技術に関しては、比較的エネルギー価の高いポトリオコッカスやユーグレナといった特定の藻類を対象に研究が行われている¹⁴⁾が、夾雜生物が混在する下水では、純粋藻類の培養は容易ではない。一方、ニュージーランド等では、都市下水や工場排水に豊富に含まれる窒素、りんといった栄養塩を用いた土着藻類の培養が実施されてきている^{15), 16)}。ここでは、処理プロセスを経た下水処理水に含まれる栄養塩、焼却炉や消化ガス由来 CO₂といった下水処理場が有する資源を活用することで、土着藻類を活用した排水のさらなる浄化、培養した土着藻類のエネルギー利用について調査した結果を報告する。

5. 2 培養藻類の回収とエネルギー利用の課題

これまで、土木研究所では、屋外に設置した 380 L のレースウェイ式水槽（図-9）において、下水の二次処理水を用いた藻類の培養を実施し、株や栄養塩を添加せず、二次処理水のみでの土着藻類増殖に成功している。培養槽への炭酸（CO₂）添加や HRT（水理学的滞留時間）を操作因子とすることで、培養藻類の高位発熱量が増加することを確認するとともに、藻類培養システムを下水処理場に適用する場合の培養量の予測ツールとして、水温、日射量、降雨などの自然環境の変化を含めた藻類培養数理モデルを構築し、その有用性を示した（図-10）。また、培養した藻類のエネルギー利用方法の検討を行い、藻類の培養、乾燥、脱水などに要する消費エネルギー量と、利用方法ごとの生産エネルギー量を試算したところ、培養藻類を嫌気性消化に用いることでエネルギー活用の可能性があることを示している（図-11）。

今後は、藻類培養の安定化や乾燥時に下水処理場で発生する排熱を利用することや、沈降性を高めるために下水汚泥を利用する等、藻類培養の高効率化、低エネルギー・低コストでの回収、濃縮、脱水技術を開発していくことにより、下水を用いた培養藻類の利用可能性のより一層の拡大を目指していく。

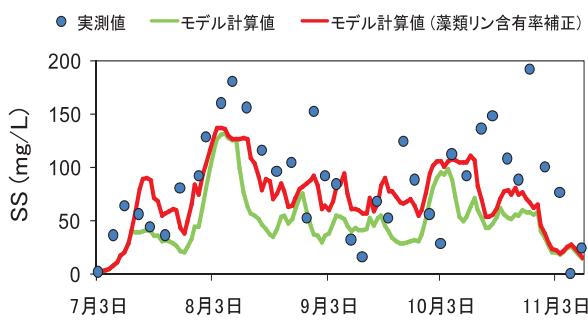


図-10 藻類培養における実測値および数理モデルでの計算値

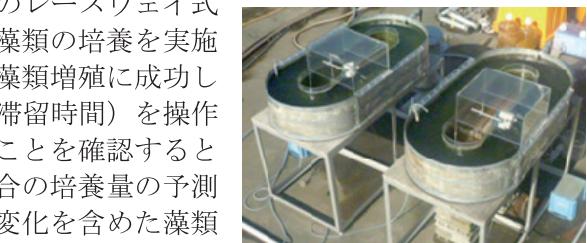


図-9 レースウェイ式
藻類培養装置

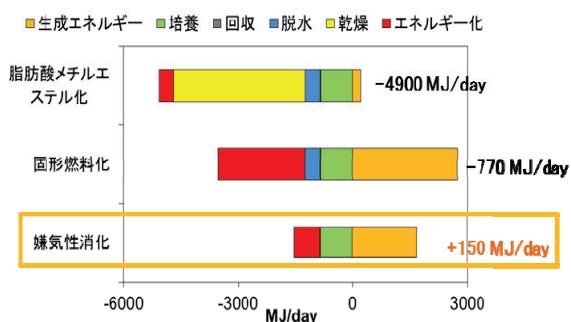


図-11 下水処理場での藻類培養・エネルギー生産

6. おわりに

本稿では、プロジェクト研究「再生可能エネルギーや廃棄物系バイオマス由来肥料の利活用技術・地域への導入技術の研究」の成果のうち、都市や農村から発生するバイオマスを資源やエネルギーとして有効利用するためのバイオマス利用技術や導入した場合の効果を評価する手法を紹介した。今後は、各種マニュアルへの反映や講習会などの場を通じ、これまでに研究開発された技術の社会への普及に努めるほか、都市・農村に賦存する未利用バイオマスの一層の利活用のため、回収・生産・利用技術の効率化や適用範囲の拡大等に資する技術開発を進める。特に、エネルギー利用の可能性が期待される、下水処理水を用いた藻類培養とその利用技術については、他機関との共同研究などにより、今後、実用化に向けた研究開発を進めていきたい。

【参考文献】

- 1) 中山博敬、中村和正、大深正徳：エネルギー収支からみたメタン発酵施設の効率的運転方法の検討、農業土木学会資源循環研究部会論文集、第1号、pp. 25-35、2005
- 2) 中山博敬、千場信司、石田哲也、横濱充宏、今井俊行、菱沼竜男、森田茂：バイオガスプラントにおけるガス利用方式の違いが運転時のエネルギー収支に及ぼす影響、農業施設、42(3)、pp. 109-118、2011
- 3) (独)土木研究所：バイオマスの肥料化・エネルギー化技術の開発と効率的搬送手法の解明、(オンライン)、入手先<<http://www.pwri.go.jp/jpn/seika/project/2010/pdf/pro-16-1.pdf>>、(参照2015.3.18)
- 4) 安陪達哉：下水汚泥資源の平成23年度有効利用調査結果、再生と利用、38、142、pp. 86-88、2014.
- 5) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部：下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン改訂版ー、2015.
- 6) 国土交通省国土技術政策総合研究所：地域における資源・エネルギー循環拠点としての下水処理場の技術的ポテンシャルに関する研究、平成24年度下水道関係調査研究年次報告書集、国総研資料第773号、pp. 109-114、2014.
- 7) 国土交通省、日本下水道協会：新下水道ビジョン、4・106-118、2014.
- 8) 小規模処理場施設に適したメタンガス有効利用支援に関する共同研究報告書、(独)土木研究所共同研究報告書、第460号、2014.
- 9) 宮崎好弘：大胆な汚泥処理プロセス変更による汚泥減量化の取り組み、下水道協会誌、51、617、pp. 21-24、2014.
- 10) 中能登にバイオ発電施設 来年度から整備 17年度稼働目指す、中日新聞、10月29日朝刊、2014.
- 11) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部、下水道資源における有効利用の状況、https://www.zenken.com/kensyuu/kousyuukai/H27/614/614_ota.pdf
- 12) 独立行政法人土木研究所：平成25年度下水道関係調査研究年次報告書集、土木研究所資料第4294号、pp. 7-11、2014.
- 13) 独立行政法人土木研究所：平成26年度下水道関係調査研究年次報告書集、土木研究所資料第4309号、pp. 13-19、2015.
- 14) 鈴木秀幸ら、下水処理場から発生する「未利用資源」を利用したユーグレナ培養技術の実証研究、下水道研究発表会、S-6-2-8、2016
- 15) J.B.K. Park, R.J. Craggs, A.N. Shilton: Recycling algae to improve species control and harvest efficiency from a high rate algal pond, Water Research, Vol. 45, pp. 6637-6649, 2011.
- 16) S. Chinnasmy, A. Bhatnagar, R.W. Hunt, K.C. Das: Microalgae cultivation in a wastewater dominated by carpet mill effluents for biodiesel application, Bioresource Technology, Vol. 101, pp. 3097-3105, 2010.

建設材料による CO₂削減

～低炭素・低環境負荷型の建設材料・建設技術の開発～

材料資源研究グループ グループ長 渡辺博志

1. はじめに

地球温暖化防止や地域環境の保全は、環境に関する行政上の重要な課題であり、社会インフラ分野においてもこれに対応する必要がある。特に、新成長戦略としてグリーン・イノベーションが打ち出されており、資源の循環利用等による低炭素化技術が求められている。また、同戦略や国土交通省技術基本計画の中で、地域資源を最大限活用し地産地消型とするための技術や低公害社会のための低環境負荷型技術の開発が求められている。

こうした背景から、第3期中長期計画ではプロジェクト研究テーマとして「リサイクル資材等による低炭素・低環境負荷型の建設材料・建設技術の開発」を設定し調査研究を行ってきた。資源の循環利用等による低炭素型の建設材料・建設技術を確立するとともに、地域資源を活用し低公害社会に寄与する低環境負荷型建設技術を開発することを目指している。プロジェクト研究の達成目標として、

- ①低炭素型建設材料の開発と品質評価技術の提案
- ②低炭素型建設技術の開発と性能評価技術の提案
- ③低環境負荷型の地域資材・建設発生土利用技術の提案
- ④環境への影響評価技術の提案

を掲げている。この目標を達成するため、個別研究テーマとして「低炭素型セメントの利用技術の開発」「低炭素社会を実現する舗装技術の開発および評価技術に関する研究」「環境安全性に配慮した建設発生土の有効利用技術に関する研究」を行ってきた。ここでは、特に CO₂ 削減とかかわりの深い低炭素型セメントの利用技術と、低炭素社会を実現する舗装技術について、研究成果の紹介を行うこととする。

2. 低炭素型セメントの利用技術

2. 1 概要

建設資材として一般的に使用されているポルトランドセメントは、石灰石を主要な原料とし、これを焼成して製造される。このため、石灰石の焼成工程において、原燃料に起因する CO₂ の排出、並びに石灰石の主成分である炭酸カルシウムが酸化カルシウムに変化する際の CO₂ の排出が避けられない。ここで、コンクリートに使用されるセメントの一部を、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の混合材に置き換えることにより、CO₂ 排出量を下げることが可能となる。これまでにも擁壁やカルバート、橋脚などの一般的な鉄筋コンクリート製土木構造物では、高炉スラグ微粉末をあらかじめ混合した高炉セメント B 種が用いられてきており、高炉スラグを 30%から 60%の範囲で置換した B 種の混合セメントとしてはすでに実績は多い。本研究では、このような B 種の混合セメントが一般的となっている用途に対しては、さらに混合材の混合率を高めること、またプレストレストコンクリート部材のように混合材の使用が一般的でない分野については、プレストレストコンクリート部材の用途に合った一般的な利用技術を示すことを目的とした。検討対象とした低炭素型セメント結合材の位置づ

けを図-1に示す。本研究は、国内8機関((一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会、(株)大林組、大成建設(株)、前田建設工業(株)、戸田建設(株)、西松建設(株)、鐵鋼スラグ協会、電源開発(株))と土木研究所との共同研究成果である。

2. 2 低炭素型セメント

トを用いたコンクリートの耐久性

コンクリート中の混和材の使用量を高めることにより CO_2 削減には寄与するものの、建造された構造物の耐久性が確保できないとすると、ライフサイクルで見たときの CO_2 の削減には寄与しない。このため、耐久性や長期的なクリープの挙動の評価は非常に重要となる。

混和材の使用量を高めることにより、アルカリ骨材反応のリスクは低下するが、同一の水結合材比では普通ポルトランドセメントを用いた場合と比べて、中性化の進行速度は大きくなる。また、中性化の進行はコンクリート中の塩化物イオンの浸透にも影響を与えるため、塩害の劣化にも関与することとなる。一方、プレストレストコンクリート構造物では、プレストレス導入後のコンクリートのクリープによるプレストレスの減少を見込んだ設計を実施するが、混和材を多く用いたコンクリートのクリープ係数について、実験データの蓄積が少なく設計値が定まっていない状況である。このような理由から、ここでは低炭素型セメントを用いたコンクリートの耐久性やクリープ性状の確認を行った結果について紹介する。

低炭素セメントを用いたコンクリートの暴露試験による中性化深さの測定結果によると、例えば図-2に示した通り、水結合材比が同じであれば、スラグの置換率の増加やフライアッシュの置換により、中性化深さは増加する。しかし、通常の土中のように中性化が進行しにくい環境で使用するのであれば問題とならない。また、気中の中性化が進行する環境であっても、水結合材比をやや小さく設定すれば普通ポルトランドセメントとほぼ同等の中性化速度に抑制することが可能である。

一方、コンクリート中の塩化物イオンの浸透性に関する試験結果の一例を図-3に示す。高炉スラグ微粉末の使用により塩分浸透に対する抵抗性が増し、塩害耐久性が向上することがわかる。ただし、水結合材比が大きい配合条件では、中性化が進行し、これにより塩化物イオンの濃縮によりコンクリート内部での塩化物イオンの増加が観察

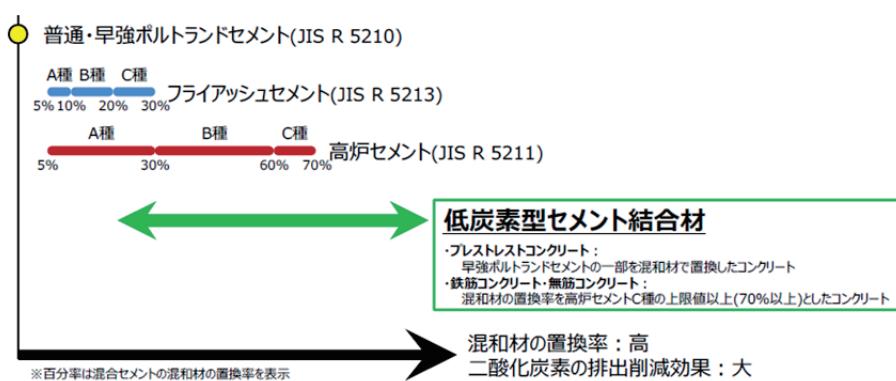


図-1 低炭素型セメント結合材の位置づけ

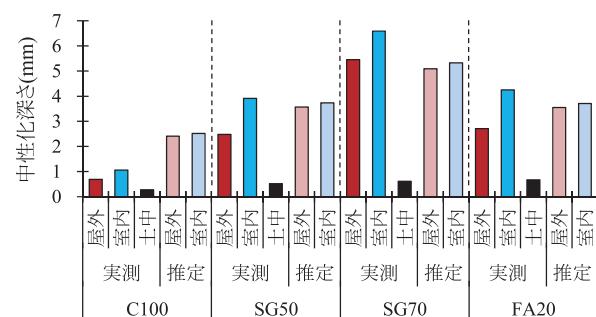


図-2 中性化深さの実測値および推定値

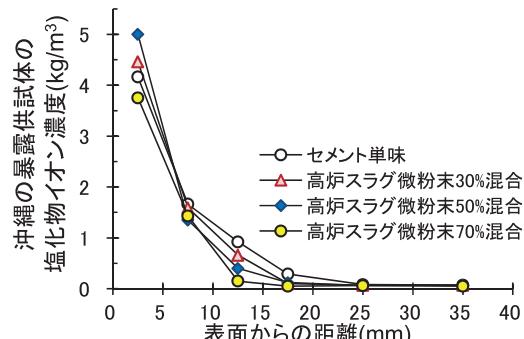


図-3 塩化物イオンの浸透

される。このため、十分な塩害耐久性を発揮させるためには、水結合材比を小さくし、塩化物イオンの浸透に対して中性化の影響が大きくならないような配合条件を選定することが必要である。

次に、プレストレストコンクリート用途として、早強ポルトランドセメントをベースとして、これを高炉スラグ微粉末やフライアッシュで置換したコンクリートのクリープ試験結果を図-4に示す。ここで配合条件としては、プレストレス導入時の圧縮強度を合わせるよう、早強セメント単味の場合は水結合材比を40%とし、混和材を用いた配合条件では水結合材比を35%としている。材齢3日でプレストレスを導入した後のクリープひずみの進行を見ると、それぞれほぼ同一の値となっている。従って、緊張開始時のコンクリートの圧縮強度が同一であれば、混和材の使用はクリープの進展にほぼ影響がないと言える。

3. 舗装分野における低炭素化技術

3. 1 概要

近年舗装分野においても、環境負荷低減に向けた技術が注目を集めている。例えば、日本道路協会「環境に配慮した舗装技術に関するガイドブック」(以下、環境舗装ガイド)では、加熱アスファルト混合物の製造温度低下技術、常温製造技術、長寿命化技術が挙げられている。ここでは、アスファルト舗装材料にかかるCO₂の削減、ならびに舗装供用後の車両通行にかかるCO₂削減を目的とした低燃費舗装について研究成果を紹介する。

3. 2 中温化舗装技術

現在、30°C程度の製造温度低減効果をもつ中温化剤については、すでに様々なタイプのものが開発されており、一般的に製造できるまでになっている。ここでは、さらに低炭素化を進めるために、50°C程度の低減が可能な中温化剤の開発、また流通量の多い再生混合物へ適用可能な中温化剤の開発を行った。

図-5に、開発した中温化剤を用いて50°C低減した場合と、従来品で30°C低減した場合の締固め度および動的安定度(Dynamic Stability)の結果を示す。締固め度については、温度に応じて若干下がっているものの、50°C下げた場合でも99.5%以上の締固め度が得られ締固めに問題ないことが分かる。動的安定度については30°C下げた従来品では通常のものと差がなく、50°C下げた開発品ではやや小さくなっている。しかし、一般的に動的安定度は6000以上であれば十分に大きな値であり、いずれも10000を超えていたため、50°C低減した場合でも十分な動的安定度が得られたことが確認された。実プラントにて、再生中温化アスファルト混合物(改質アスファルト使用)の製造を試みた。アスファルト混合物を写真-1に示す。実プラントにおいても、製造温度を低減させても通常と同等のアスファ

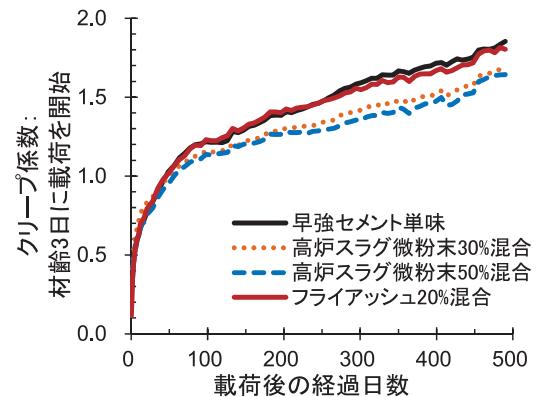


図-4 クリープひずみの測定結果

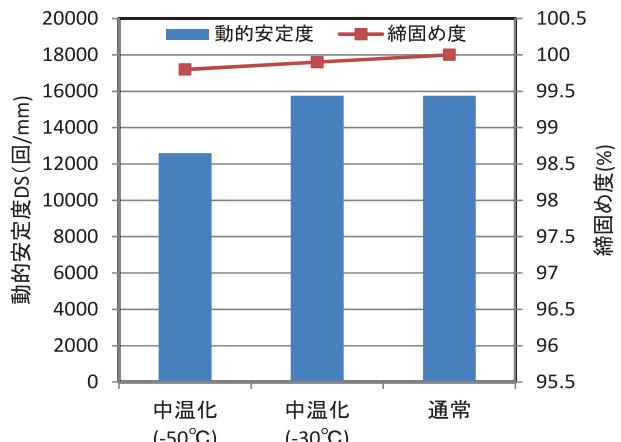


図-5 中温化混合物の締固め度と動的安定度 (改質アスファルトII型)

ルト混合物が製造可能であることを確認した。

3. 3 低燃費舗装技術

本検討では、新たな低炭素舗装技術として、ネガティブテクスチャ路面の形成および施工法の工夫による転がり抵抗低減を実現した舗装技術を(株)NIPPOとの共同研究により開発した。本低燃費舗装技術の開発コンセプトは、「適度なきめ深さを確保しつつ、骨材を表面に緻密にかつ平滑に並べた路面テクスチャ（ネガティブテクスチャ）を有するアスファルト混合物」である。

低燃費舗装による転がり抵抗の低減性能および自動車からのCO₂排出量低減性能を明らかにするため、国土技術政策総合研究所試験走路に4種類の舗装路面各300m試験施工を行い、車載型の排出ガス計測装置により自動車からの排出ガス（以下、排ガス）および燃料消費量を直接測定してその効果を検証した。写真-2は舗設状況を示したものである。

転がり抵抗ならびにCO₂排出量について測定した結果を図-6、7に示す。路面テクスチャが粗い路面（本実験では排水性舗装(13)）より転がり抵抗は小さいことが定量的に示された。また、転がり抵抗の小さな路面を有する舗装は、自動車CO₂排出低減性および自動車走行燃費向上性を有することが定量的に確認出来た。

4. まとめ

我が国は2015年7月に、温室効果ガスを2030年度に2013年度比で26%削減するとの目標を柱とする約束草案を国連に提出した。この目標達成に向けて、さらなる温室効果ガスの削減努力が求められている。ここでは、主として材料・舗装分野での研究成果を紹介したが、これ以外にも例えば、下水道処理施設におけるバイオマス等の再生可能なエネルギーの有効活用なども期待されるところである。社会実装に向けたさらなる研究を実施する予定である。

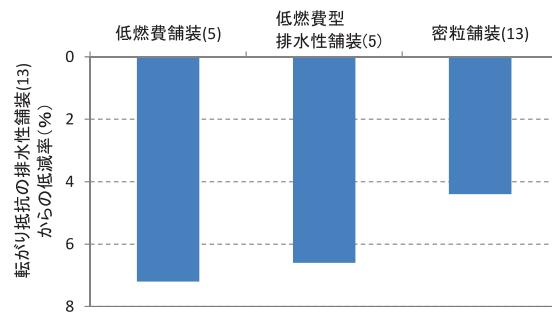


図-6 転がり抵抗の低減率



写真-1 実プラントでの製造温度低減効果の検証



写真-2 舗設状況

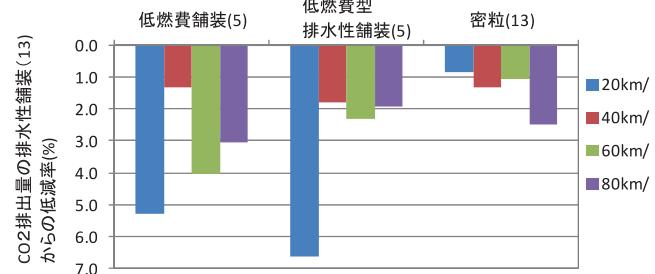


図-7 CO₂削減効果

[プロジェクト研究成果報告【ストックマネジメント】]

新たな道路メンテナンス技術の実現に向けて

積雪寒冷地のインフラを守れ！！

～寒冷な気象条件により劣化する構造物の機能を維持する技術開発～

新形式の構造物の活用と構造物の長寿命化に向けて

安全・安心な冬の道路を目指して

～寒冷地域における冬期道路のパフォーマンス向上技術に関する研究～

新たな道路メンテナンス技術の実現に向けて

橋梁構造研究グループ長 金澤 文彦

1. はじめに

1. 1 新たな道路メンテナンス技術の方向性

高度経済成長期にあわせて加速度的に整備を進めてきた社会資本ストックが、今後、一斉に更新時期を迎えるが、国・地方の財政の逼迫やそれに伴う管理体制の制約等から、従来型の維持管理手法では対応が容易ではないと懸念されている。なかでも構造物・設備等の重大損傷は人命の安全に直接関わることから、安全確保のため、持続可能で戦略的な維持管理の推進が求められている。

これまでの技術開発においては、各種構造物・設備における損傷・変状に対する精度の高い調査点検技術やその結果に基づく適切な診断技術、合理的な補修・補強技術等の個別要素技術が開発されるとともに、それぞれを有機的に結合し戦略的にマネジメントするシステムが開発されてきた。

今後のストックの高齢化、財政的な制約、安全確保等を踏まえた場合、構造物・設備に求められる管理水準を社会的な重要度に応じて合理的・体系的に設定していくことが求められる。こうした管理水準に応じたストックマネジメントを支える要素技術やそれらを組み合わせたマネジメント技術の開発が求められ、これに対応して、第三期中期計画プロジェクト研究「社会資本をより永く使うための維持・管理技術の開発と体系化に関する研究」を進めてきた。本研究は、道路（舗装、橋梁、トンネル）、河川（ダム、水門、樋門、樋管）と様々な社会資本について、管理水準に係る横断的な視点、個別技術の開発に係る知見等を共有して横断的な体制で取り組み、管理水準に応じた構造物の調査・点検手法、構造物の健全度・安全性に関する診断・評価技術、構造物の多様な管理水準・構造条件・損傷状態に応じた効率的な補修・補強技術、構造物や機械設備における管理水準を考慮した社会的リスク評価技術・マネジメント技術の確立を目標に実施し、各分野の技術基準・マニュアル等への反映、約 270 本の論文発表などを行い成果の実用化、早期普及に努めてきた。

本講演では、こうした研究のなかで、落橋、路面陥没、構造物の崩落など重大事故（例えば、写真-1）を防止するために、センサ技術、ICT など新たな技術を活用して従来では検知できなかった変状を早期に把握する技術の開発状況を報告するとともに、道路橋桁端部の腐食環境改善のために民間との共同研究で開発した道路橋桁端部用排水装置を紹介する。



図-1 道路メンテナンスの方向性

出典：連邦運輸安全委員会事故報告書

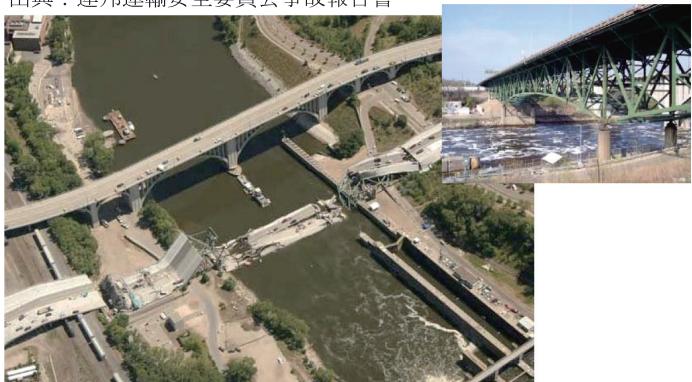


写真-1 米国ミネソタ州 I-35W 橋の崩落（平成 19 年）

2. 調査・点検手法の開発

2. 1 路面性状の効率的取得技術の開発

舗装の調査・点検において一般的な路面性状調査は、わだち掘れ深さ及び平坦性を測線上で調査するため局所的な損傷を検出できない場合があること、調査コスト等の面から幹線道路が主たる対象であること等の課題がある。本研究では、これらの課題の解決に向けて、高度な路面の面的把握手法、及び地方自治体管理道路を想定した路面の簡易的把握手法について研究を行った。

前者に関しては、三菱電機（株）、大林道路（株）、（株）NIPPOとの共同研究で、MMS（Mobile Mapping System）技術を活用し、路面を対象に高精度な三次元点群データを取得し、それを自動処理することにより省力化しながら路面の変状に関する情報を取得する手法を検討した。その結果、例えば車道の境界を示す両側の区画線をもとに車線内に仮想平面を設定し、路面の各三次元点群データについてこの仮想平面からの高さセンターを示すことにより路面の変状を分かりやすく把握すること、仮想平面との凹凸体積により路面の変状を定量化する手法を提案した（図-2）¹⁾。

後者に関しては、一般の乗用車に加速度計などの汎用測定機器を搭載した簡易測定車を活用する手法を検討し、車軸に取り付けた加速度センサから段差等を計測する手法、レーザースキャナを装着して車両走行と連動して制御することによりわだち掘れ形状を把握する手法を提案した。

今後は、更新年数の設定という新たな舗装管理に向けて、既設舗装を適切に評価する技術の開発を推進していきたい。

3. 診断・評価技術

3. 1 土工構造物の健全度診断手法の提案

道路メンテナンス技術小委員会において、道路土工構造物は崩壊のメカニズムに関する技術的知見の蓄積や土質構造等に関する情報が少ないため、支障時の影響や復旧のしやすさ等の特性を踏まえて、点検、モニタリング、通行規制等を活用して当面の安全を確保することが現実的であるとされた。そこで、本研究では土工構造物の中でも支障時の道路交通への影響が大きい箇所で設置されることが多くなってきてている補強土壁を対象に、劣化進行をフォルトツリーで整理し、大規模な崩壊等重大事象に至る前に点検・調査等で検知するかが重要である。特に、外観目視では検知することができない不可視箇所の劣化事象を検知できる調査手法の確立が必要である。

補強材破断は、放置すれば壁面材の脱落にいたる不可視箇所で生じる事象である。壁面材の脱落は、盛土材のこぼれだし等による補強土壁の不安定化や壁面材脱落による第三者被害にいたる可能性の有るものである（写真-2）。本研究では、補強材破断前後で壁面の起振及び振動計測を実施した。実験の結果、補強材破断の前後で

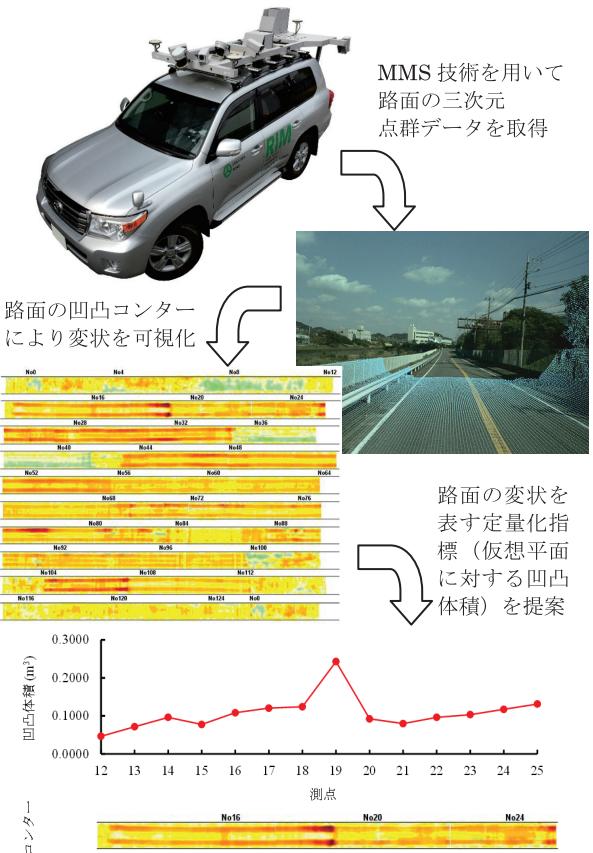


図-2 MMS 技術を用いた路面評価手法



写真-2 壁面材の脱落（補強材破断）

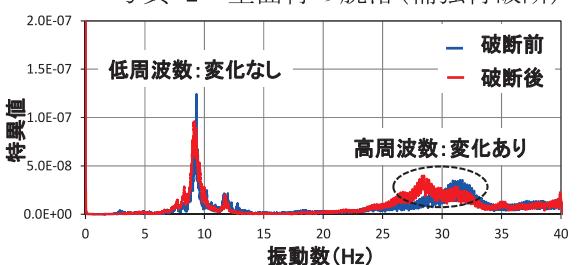


図-3 補強材破断前後の振動特性の変化

高周波数領域における壁面の振動特性の変化に着目することを提案した（図-3）。

今後は、補強材破断箇所を特定するために様々な破断条件による振動データの蓄積・分析が必要である。

3. 2 トンネルの安全状態を簡易に診断する手法の開発

効率的に道路トンネルの維持管理を実施するためには、点検や調査等を通じたトンネルの変状の把握とともに、発生原因の的確な推定、適切な対策等の実施が重要である。しかし、発生しているトンネルの変状のメカニズムや発生原因を確実に判断するためには高度な技術的判断が求められる。また、その変状が致命的な損傷に至る可能性を内含しているかどうかの判断材料があれば、監視や対策の決定が一層合理的になり、効率的な維持管理のあり方に大きく資する可能性が高いと考えられ、その手法の確立が望まれている。

そこで、本研究ではトンネルの安全状態を簡易に診断する手法の適用可能性を把握することを目的として、トンネルの覆工に過大な応力が発生しているかを簡易に判定し、致命的な損傷に至る可能性があるか否かを判断する手法について検討を行い、超音波伝播速度を用いたトンネル覆工の診断手法の提案を行った。具体的には、図-4(a)に示す実大規模の覆工コンクリートの載荷試験により、外力が作用している条件下での破壊に至るまでの覆工内の超音波伝播速度の変化率と覆工コンクリート表面のひずみが一定の関係にあることを明らかにし（図-4(b)）、その適用性を検証した。

今後、現地トンネルでの実証確認を含む種々の条件下で多くのデータを蓄積するとともに、トンネル覆工内側のみから伝播速度を計測する手法の検討が必要である。

3. 3 コンクリート構造物の非破壊検査技術(X線)による診断手法の開発

既設構造物に損傷が見つかった場合、損傷による構造物の性能への影響を評価し、適切な措置を決定する必要がある。このため、損傷が比較的軽微な段階から計画的に対策を施す予防保全型管理への転換や、重篤損傷発見時の適切な措置判断による安全確保が必要となり、そのための技術開発が求められている。

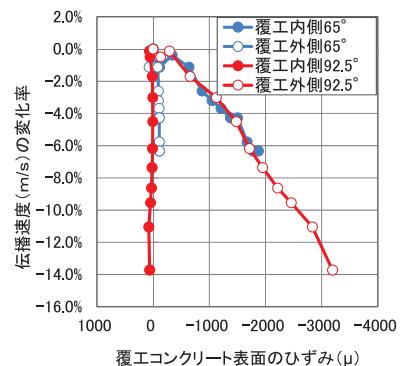
ポストテンション方式のPC構造物では、近年グラウトの充填が十分に行われていない事例が確認されており、対策が進められている。シース内にグラウト未充填箇所が存在すると、雨水や塩化物イオン等がシース内に侵入する恐れがあり、その結果PC鋼材が腐食・破断し、最終的に落橋という重大事故に繋がる可能性もある。

現在、超音波法などによる方法が検討されているが、鋼材が複数配置された個所等での検知は困難である。また、橋梁調査で用いるX線源はその出力300keV程度であるが、厚い部材の場合は、撮像に時間がかかるなど、従来の非破壊検査技術には限界があった。本研究では、東京大学との共同研究で、新たに950keV X線発生装置を開発（写真-3）²⁾し、日本初となる実橋での高出力X線による原位置可視化実験を行った。測定の結果、シース内の鋼材およびその破断状況の画像を取得することができた（写真-4）。

今後は、短時間により鮮明に計測できる技術の開発を目指すとともに



(a) 実大規模の覆工コンクリート載荷試験



(b) 覆工コンクリート表面のひずみと超音波伝播速度の変化率の関係

図-4 超音波伝播速度を用いたトンネル覆工の診断手法の提案

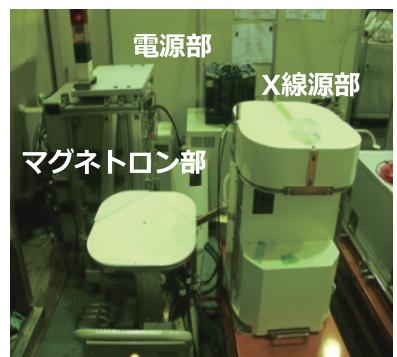


写真-3 高出力X線装置

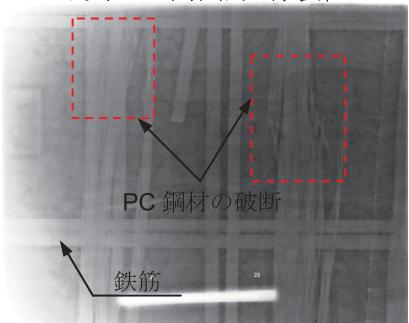


写真-4 高出力X線源を用いた撮影画像

に、実橋でのデータを蓄積し、更に精度を高め、現地で適用されるよう、高出力X線による調査方法と評価手法について技術開発を進める。

4. 補修・補強技術の開発

4. 1 コンクリート橋の桁端部用排水装置の開発

道路橋の桁端部は、狭隘なため湿気がこもりやすい上に、場合により塩分を含む水が伸縮装置から漏水することにより、鋼部材、コンクリート部材ともに腐食(塩害)が生じやすい部位である(図-5)。特に、コンクリート構造物の著しい塩害は、補修・補強が容易でなく、維持管理における大きな負担となる。作業空間が狭い桁端部で塩害が生じると、その対応はさらに難しくなる。また、背の高い橋台、橋脚の場合には高さ方向に劣化範囲が拡がり、縦断勾配がある場合はその勾配に応じて上部構造下面や床版下面に水が流れ込み、広い範囲に劣化が拡がる。凍結防止剤による桁端部の塩害は、止水、排水の対策が十分でなければ、散布量と時間に大きく依存すると考えられ、ある時期を過ぎると路線単位で一斉に桁端部からの塩水に起因する塩害が発生することが懸念される。「できるだけ多くの橋で、かつできるだけ早期に、コンクリート橋桁端部の腐食環境を改善する手法」の開発が喫緊の課題である。

これらのことから、コンクリート橋の桁端部を対象とした漏水対策技術として、東拓工業(株)、(株)ビービーエムとの共同研究で、図-6に示すような、通行規制なしに側面から遊間内部に設置することができる排水装置の開発に取り組んでいる³⁾。

これまで実橋5橋において試験施工を行い、いずれも経過観察を行っている。遊間部分のコンクリート面の状態によって止水の程度に差が見られるものの、試験施工を行った5橋中4橋では、道路幅員方向の8~9割の範囲を止水でき、橋の側方に排水できていることを確認した。また、排水装置の設置に際して必要となる、

狭く長い遊間内の発泡スチロール除去技術、遊間内部の調査方法、止水性を向上させるシーリング技術、排水装置設置時に簡易に高さと勾配を調整するための仮設ツール等、さまざまな周辺技術も開発した。

今後とも、全国の道路管理者に桁端部の漏水対策の必要性とその方法について啓発・普及を図って参りたい。

5. おわりに

道路構造物の長寿命化を図っていくには、「点検→診断→措置→記録」といったメンテナンスサイクルを確実に回していく必要がある。このため、次期中長期計画では調査・監視の効率化と高度な技術、措置が必要な箇所・部位の絞り込みや緊急度の決定方法、現地条件に応じた最適な維持・修繕方法を開発するとともに、市町村管理の道路構造物への対応も含め、多様な管理レベルに応じた維持管理技術を開発し、メンテナンスサイクルの技術面でのスパイラルアップを実現し、社会資本の健全性確保に貢献していくことを目的としている。

【参考文献】

- 1) 森石一志、富樫健司、中村博康、渡邊一弘：三次元点群データを用いた路面の面的評価および構造的健全性との関連性の検討、土木学会論文集E1、Vol. 71、No. 3、I_127~134.
- 2) 大島義信、宇佐美惣、石田雅博、土橋克宏、上坂充：可搬型高出力X線による撤去橋梁の可視化実験、土木技術資料、第57巻、第9号、pp. 34~37、2015.
- 3) 村越潤、田中良樹、藤田育男、坂根泰、田中健司、植田健介：既設コンクリート道路橋桁端部の腐食環境改善への取り組み、土木技術資料、第55巻、第11号、pp. 29~34、2013.

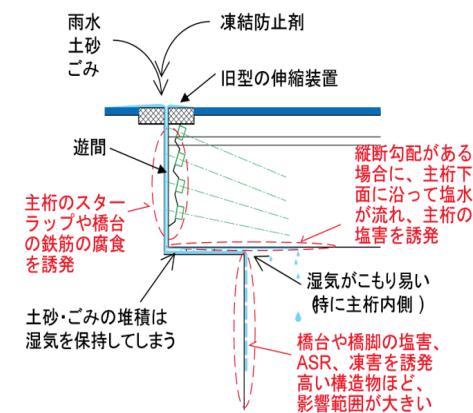


図-5 コンクリート橋桁端部の腐食環境

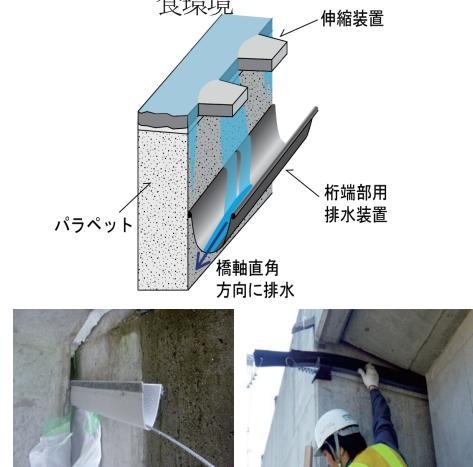


図-6 コンクリート橋桁端部における排水装置の試験施工
(左:ポリエチレン製、右:ゴム製)

積雪寒冷地のインフラを守れ！！

～寒冷な気象条件により劣化する構造物の機能を維持する技術開発～

寒地基礎技術研究グループ長 西本 聰

1. はじめに

気象条件などの厳しい積雪寒冷地における社会資本ストックは、低温、積雪、凍結融解および低温地域に分布する特殊土地盤等の影響を大きく受けている。土木構造物は、その影響による機能低下によって、健全性や耐久性に深刻な問題を生じる場合が多いことから（写真－1～6）、これらに適切に対処し、その機能を維持することが重要となっている。

本プロジェクト研究は、寒冷な自然環境下における土木構造物の戦略的な維持管理を可能とする技術開発を行い、構造物の機能維持を実現することを目的としている。とりわけ、凍結融解や塩害の影響を受けるコンクリートの材料と構造物としての機能を維持するための技術、近年の気象変化の影響を受けている道路舗装および沿岸構造物の劣化・損傷対策技術、さらには道路機能を維持する土構造物の安定化に資する技術の開発を研究の範囲とし、研究を進めてきた。

本講演では、このうち防水システムによる道路橋のコンクリート床版（以下、床版）の劣化防止技術、融雪水の影響を受けるアスファルト舗装の劣化損傷対策技術、凍害劣化を受けるコンクリート開水路（以下、開水路）の耐久性向上技術を中心に、積雪寒冷地における社会資本ストックの維持管理・更新の効率化に資する技術開発の最新情報を紹介する。



写真－1 凍害等による床版の抜落ち



写真－2 凍害等による壁高欄の劣化



写真－3 融雪期のポットホールの発生



写真－4 凍害による開水路の劣化



写真－5 海氷の接触等による鋼矢板の損傷



写真－6 岸壁エプロンの陥没

2. 耐久性の高い床版防水システムの開発

2-1 床版の劣化損傷状況

道路橋床版の劣化要因は、主に大型車輪荷重の繰返し走行による疲労であり、ひび割れを介した床版内部への水の浸入が床版の劣化を50~300倍にまで加速する場合があることが報告されている¹⁾。また、近年では、反応性骨材を含んだ床版において、水の供給によりアルカリシリカ反応が生じて床版の劣化損傷が顕在化した事例もある²⁾。さらに、積雪寒冷地においては、冬期に散布する凍結防止剤等から供給される塩化物イオンの影響による鉄筋腐食や床版コンクリートに浸入した水の凍結融解により発生した上面の凍害劣化が砂利化や床版の抜け落ちに至った事例もある（写真-1）。

これらのことからも、床版の長寿命化を図る上で床版内部へ水を浸入させないことが重要になる。しかしながら、橋面全面への床版防水層（以下、防水層）の設置が基準化されたのは平成14年改訂の道路橋示方書からであり、多くの既設橋梁で防水層が未設置か部分的な設置にとどまっている。また、建設年次が比較的新しい防水層の低機能も一部指摘されている。このため、安全で円滑かつ快適な交通を確保するためには、アスファルト舗装（以下、舗装）、防水層および床版の三位一体の構造をもって床版の劣化損傷を抑止し、さらに橋面に流入した水を速やかに排水するための排水設備までを含めた耐久性の高い床版防水システムの構築が重要になる。

2-2 床版防水システムの設計・施工上の留意事項

積雪寒冷地において、特に防水層の性能低下への影響が大きいと考えられる要因として「防水層施工時の温度」「床版面の研掃の有無」「防水層敷設後の凍結融解作用」「床版面の滯水」を抽出し、施工試験の結果等を踏まえ、これらが防水層の接着特性に与える影響を分析した。それらを基に、床版防水システムを設計・施工する上での留意事項を以下のとおり整理した。

- ・防水層の接着強度は防水層施工時の気温に影響され、特に低温下の施工においては温度管理を確実に行う必要がある。
- ・防水層の付着強度を確保するためには、防水層施工前の床版上面の処理が非常に重要であり、防水層の敷設前には、研掃機等により床版上面コンクリートにある脆弱部を確実に除去する必要がある。
- ・凍結融解の進行とともに防水層とコンクリートの界面（床版側の界面）付近において特に劣化損傷が進行する。凍結融解抵抗性を確保する観点からも防水層施工前の床版上面の処理が重要である。
- ・防水機能の早期低下およびそれに伴う床版の劣化損傷を生じさせないために、舗装内部および防水層上に長期間滯水させない排水計画や排水設備が極めて重要になる。図-1(a)は車歩道境界付近での水の浸入経路を模式的に示したものである。歩道部において水の浸入を抑制するためには、防水層を縁石で立ち上げるのではなく、図-1(b)のような端部処理を講じる必要がある。

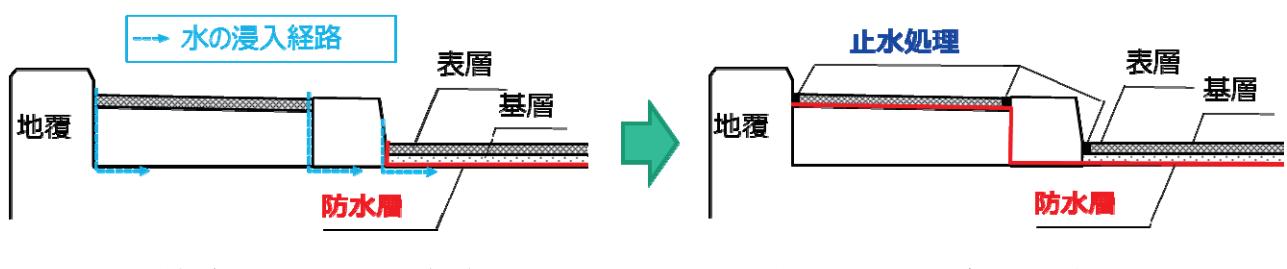


図-1 地覆部の防水層の端部処理

2-3 高耐久排水ますの開発

床版防水システムの重要な構成要素である排水ますに着目し、橋梁定期点検結果を基に、排水ますの劣化損傷状況の把握および従来型排水ますの問題点の整理を行った(図-2)。その結果から、細部構造を改善した高耐久排水ますを提案し(写真-7)、載荷試験による性能確認を行った。また、既設橋梁において排水ますを交換する際の留意事項を整理した。

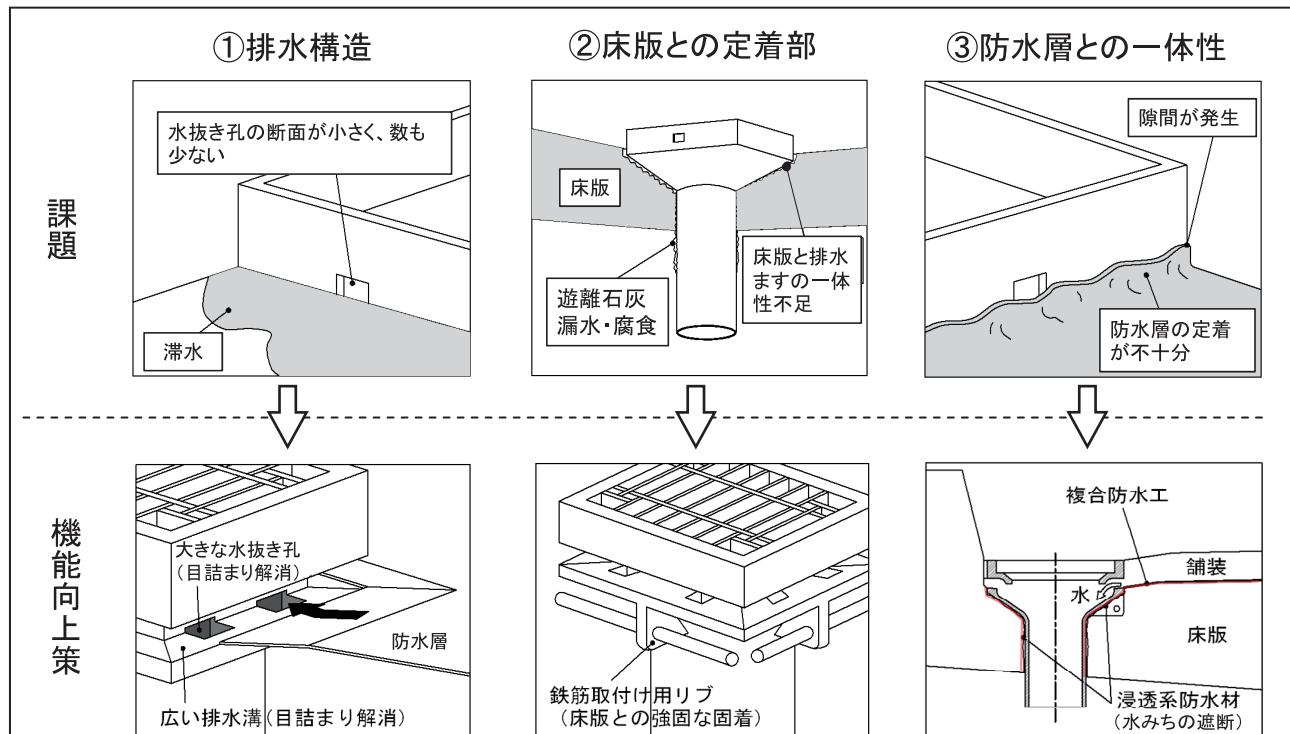


図-2 排水ますの課題点整理と機能向上策の提案



写真-7 高耐久排水ます(左:外観 右:現地設置状況)

3. 融雪水の影響を受けるアスファルト舗装の劣化損傷対策技術の開発

3-1 融雪期における道路舗装の劣化損傷状況

近年、積雪寒冷地では冬期間の気温が上昇し、厳冬期における凍結融解回数の増加、厳冬期の降雨の増加、路面上の雪氷の融雪水滞留時間の増加などの現象が起こっている。これまで、路盤や路床部に凍結融解作用が働き支持力が低下する現象が発生するのは春先の短い期間に限られていたが、厳冬期にも凍結融解作用が働き、さらに厳冬期の降雨や路面上の雪氷融水によって水分が路面や舗装体内に多く供給されることから、道路の構造的損傷と、ひび割れやポットホール等の路面損傷が増加する

可能性は排除できない。

実際に、近年では融雪期のポットホール損傷（写真－3）に関する道路利用者の通報や要望が増加している実態にある。道路機能を維持し、現在の道路資産を安定的に守っていくために、環境条件の変化による融雪水の増加とそれによって発生する機能低下を検証し、融雪水による舗装の損傷への対処技術や、耐久性を向上するための技術開発が必要である。

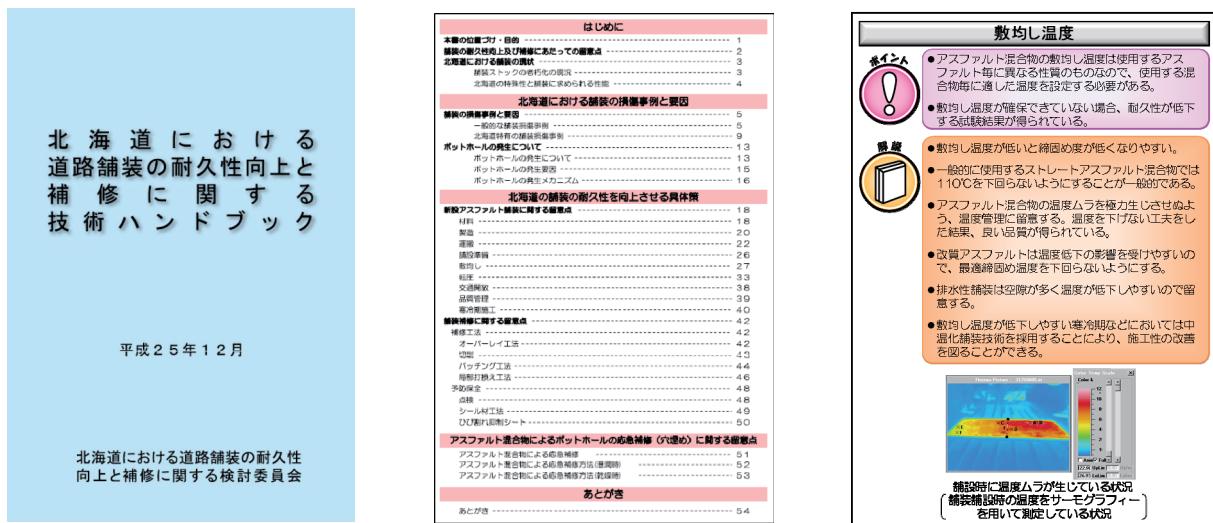
3-2 融雪水に強い舗装補修材料および工法の検討

融雪期に発生したポットホールを応急的に補修する際には、用いられる常温混合物の材料面での性能と施工方法面での配慮が求められる。しかし、常温混合物の材料面での耐久性の評価方法や、施工方法の違いが耐久性に及ぼす影響については定まったものもなく、どのような材料で、どのような方法で施工すると良いのか、判断できない状況にある。

そこで、供用中の道路において、常温混合物や加熱混合物でポットホールを補修して耐久性を調査した。また、様々な補修方法でポットホールを補修して耐久性を調査し、定量的な評価を行った。その結果、常温混合物を用いる場合は全天候型を使用することが望ましく、プラントが近傍にあるなど、融雪期でも加熱混合物の入手・施工が可能な場合には使用を検討することを提案した。

3-3 技術ハンドブックの作成

積雪寒冷地における道路舗装の耐久性向上に向け、道路管理者と共に「北海道における道路舗装の耐久性向上と補修に関する技術ハンドブック」を作成した（図－3）。ハンドブックには、ポットホールの発生メカニズム、新設アスファルト舗装に関する留意点、舗装補修に関する留意点、応急補修に関する留意点等が記されている。ハンドブックはHPで公開して普及を図っており、ダウンロード数2300件以上と現場技術者の間で有効に活用されていると考えられる。



図－3 北海道における道路舗装の耐久性向上と補修に関する技術ハンドブック

（左：表紙 中：目次 右：耐久性向上策の一例）

4. 開水路の更生工法の開発

4-1 開水路の凍害劣化損傷状況

積雪寒冷地特有の開水路の劣化の一つである凍害によるコンクリートひび割れの発生には、水分の

供給等の環境要因が関与している³⁾。農業水利施設の多くを占める開水路は、一般のコンクリート構造物に比べて部材厚が薄い。また、流水との接触が多い上に背面側からは地下水が供給される過湿な供用環境に置かれているものが多い。さらに、寒冷地では非灌漑期は水路内の全面が過酷な気象条件に曝される（写真－8）。このため、開水路は気温や水分の影響を受けやすく、凍害劣化が生じ機能低下がみられる（写真－9）。農業水利施設の機能維持のために、耐久性の高い補修による維持管理手法が求められている。



写真-8 農業用水路の供用環境 (左: 灌漑期、右: 冬期) 写真-9 はく落に進展した事例

4-2 凍害劣化が生じた開水路の更生工法の開発

寒冷地の開水路側壁における凍害ひび割れの発生要因は、側壁内部に供給される水と側壁内部に伝導される温度変化である。このため、寒冷地において凍害が発生している開水路の対策工法では、側壁内部に浸透した水を滞留させず効率的に排出すること、また側壁表面から内部に伝導する温度変化を抑制することを目的とし、水路更生工法の開発を行い、その排水効果と補強効果の検証を行った。ここで「更生」とは、「補修と補強」、「更新」の間に位置する対策のことを指し、「施設を撤去し新しく置き換えることなく、耐久性や構造的耐力を回復または向上させ、失われた機能を補うこと。」と定義される。

工法は、図-4のように、FRPM (Fiberglass Reinforced Plastic Mortar) 板（厚さ 10mm）をアンカーで既設水路内面に設置し、既設水路と FRPM 板の間に中込材としてポーラスコンクリート（厚さ 3cm）を充填するものである（写真-10）。本工法の特長は、既設水路における凍害劣化部を除去せずに、FRPM 板とポーラスコンクリートの合成構造で開水路の機能回復を図ることである。また、本工法では、FRPM 板および中込材を隨時撤去することで、既設水路の更生が繰り返し行えることも特長である。

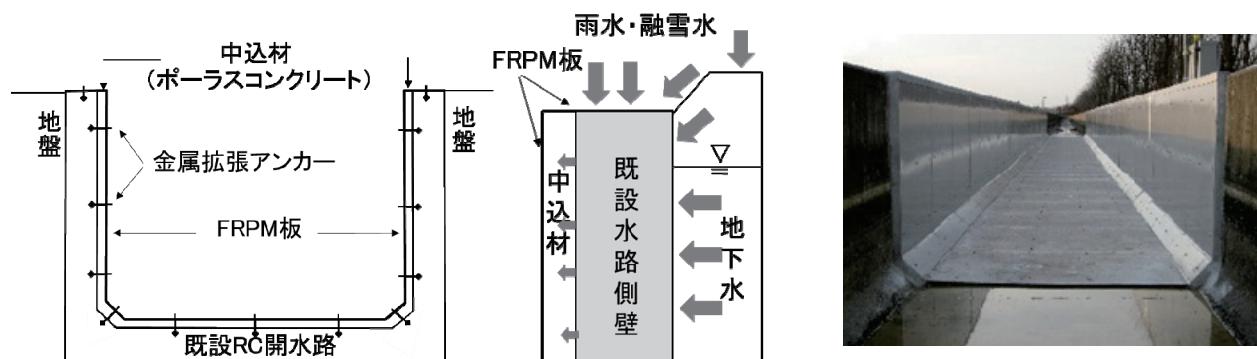


図-4 水路更生工法の概要図

写真-10 水路更生工法の完成状況

5. 軟弱地盤上の盛土構築のための新技術の開発

軟弱地盤上に早期に盛土が構築できる経済的な軟弱地盤対策工法である『グラベル基礎補強併用低改良率固結工法』を開発した。『グラベル基礎補強併用低改良率固結工法』とは、軟弱地盤を柱状に固化処理する際に一般的に用いられる改良率 ($a_p=50\%$) より低い改良率 ($a_p=10\%$) の改良体を盛土直下全面に配置し、その上に碎石層（層厚 $t=0.5m$ ）をジオテキスタイルで覆い囲んだ対策（グラベル基礎補強）を併用した軟弱地盤対策工法である（図-5）。本工法の特徴は以下のとおりである。

- 1) 一般的な固結工法と比較して改良体の本数を大幅に低減できるため、施工性の向上および建設コストの縮減に大きく寄与する。
- 2) 「グラベル基礎補強」は一定の剛性が期待できる構造体として機能するため、改良体間の不同沈下量の低減を図ることが期待できる。
- 3) 「グラベル基礎補強」には盛土の安定性に寄与するせん断抵抗が期待できるため、未改良地盤の側方流動を抑制できる。

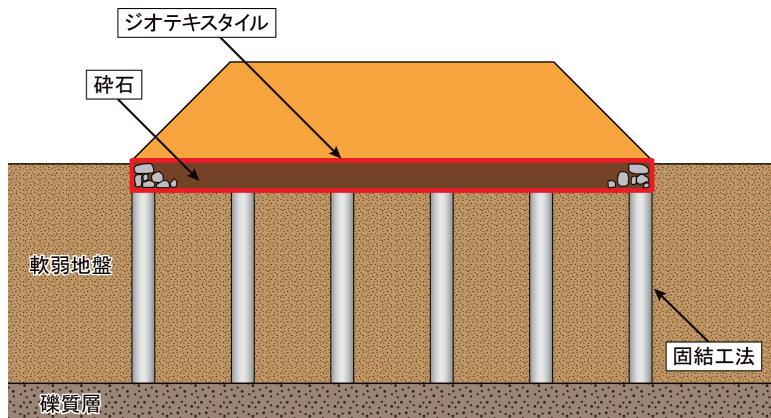


図-5 グラベル基礎補強併用低改良率固結工法

6. おわりに

本プロジェクト研究では、寒冷な自然環境下において機能が低下している社会資本ストックについて、点検・診断手法、劣化予測手法、性能評価手法、適切な施工法等の技術開発を行い、構造物の機能維持の実現を目的として、既設構造物の凍害等による性能低下を防ぐ工法、耐久性を向上させる工法等の提案を行った。研究のフィールドは主に北海道であるが、研究成果は全国の寒冷地で活用可能であると考えられる。また、寒冷地以外でも活用可能な成果は全国への普及を図っていく予定である。

第4期中長期計画（平成28年～33年度）においては、本プロジェクト研究の成果を活用し、橋梁床版や橋面舗装のメンテナンス技術、舗装に影響を及ぼす融雪水の遮水・排水技術等の研究を実施する。さらに、成果の一般化・普遍化に向けて、特にコンクリート構造物の凍害・複合劣化対策の体系化を進めていく。

【参考文献】

- 1) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理、森北出版株式会社、2007
- 2) 五島孝行、大田孝二、梶尾聰、鈴木康範、井戸康清、島田守：アルカリ骨材反応で損傷した道路橋床版の調査、土木学会第68回年次学術講演会講演概要集、pp.835-836、2013
- 3) 農林水産省農村振興局：農業水利施設の長寿命化のための手引き、p.22、2011

新形式の構造物の活用と構造物の長寿命化に向けて

道路技術研究グループ 並河 良治

1. 概要

我が国の社会情勢は、人口減少、急激な少子高齢化や社会资本ストックの老朽化・増大に伴う維持管理更新費の増加などにより、新たな社会资本整備に対する投資余力が減少する状況のなか、国民生活の安定化を図り、地域経済を活性化させるためには、耐久性に優れた社会资本をより効率的・効果的に整備していくことが求められている。

土木研究所では、設計の信頼性と自由度を高め、新技術、新材料の開発・活用を容易にする性能設計法の導入に必要な技術および各種構造物の耐久性を向上させる技術の開発を進めている。これらの研究成果は、関連する技術基準、指針等に反映され、性能設計法の現場への導入が進み、また、耐久性に優れる構造物が広く普及することにより、建設段階や長期的観点においても効率的・効果的な社会资本の整備が可能となるものであることから、研究成果の普及にも一層力を注いでいくこととしている。

本稿においては、上記の視点から実施してきた、性能設計法が未確立の新形式道路構造物及び土工構造物の性能評価技術および性能向上技術の開発、コンクリートおよび寒冷環境下における土構造物の施工時の品質を確保する技術並びにコンクリート構造物および鋼橋梁塗装の耐久性等を評価する技術について開発成果を報告する。

2. 新形式道路構造物および土工構造物等の活用

2.1. プレキャストアーチカルバートの地震時限界性能に関する検討

近年、工期短縮や施工の合理化を目的として、これまで一般的ではなかった大型のプレキャストカルバート工法のような、新形式の道路構造物の使用が見られる。中でも、プレキャスト部材間の継手をヒンジと評価する 2 ヒンジ式アーチカルバートと 3 ヒンジ式アーチカルバート

(以下、2 ヒンジ、3 ヒンジ) は大型プレキャストカルバートにおいて、施工実績の多い工法である(図-1)。

この工法は道路土工カルバート工指針における従来型カルバートの適用範囲外の構造であり、このようなカルバートが大規模地震を受けた際の損傷過程については不明な点が多く、地震に対する安全性を検証するための方法も確立されていない。そのため本研究ではヒンジ式アーチカルバートの性能評価手法を確立することを目的として、模型供試体による載荷実験を行った(図-2)。

実験では、アーチカルバートの模型供試体に対し、地震による繰り返しを模した正負交番載荷を終局に至るまで作用させ、損傷過程や終局後の耐荷性や崩壊の有無を確認することでアーチカルバートの地震時限界性能の評価を行った。

実験の結果、2 ヒンジ、3 ヒンジのいずれもヒンジ部では、終局に至るまで回転機能が失われず耐力を維持することを確認した。今後は、アーチカルバートが地震に対して確保すべき耐震性能を明確にするとともに、耐震性能を満足するための部材の限界状態や地震時挙動の評価方法を提案し、耐震設計法として体系化を目指していく。

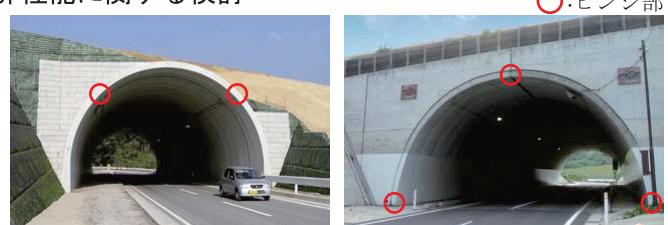


図-1 ヒンジ式アーチカルバート
(a) 2 ヒンジアーチ (b) 3 ヒンジアーチ



図-2 アーチカルバート模型
供試体による載荷実験

2.2. 土工構造物の管理水準を考慮した性能設計に関する検討

土工構造物においては、構造形式によっては修復が容易でないものがある。例えば、補強土壁は通常の盛土に比べて一般に耐震性に優れる一方で、修復が容易ではない傾向がある。このような構造物においては、万一変状が生じた場合の点検方法、補修方法を考慮した設計を行うことが求められる。このため、土工構造物の設計を行う上では、管理水準に応じて異なる要求性能を満足するか否かを、安全性、供用性、修復性の観点から設定される限界状態に対して照査する必要がある。本研究では、土工構造物の管理水準に応じた要求性能を確保するための限界状態を明らかにし、管理水準に応じた要求性能を考慮した性能評価手法・設計手法を提案するため、分割壁を有する補強土壁を対象とした動的遠心模型実験を行い、補強土壁の変形において支配的となる要因を明らかにし、補強土壁の耐震性の指標となる変形量について計算する手法を検討した。

実験の結果、補強土の地震時変形は補強領域のせん断変形が支配的となり、補強土壁が終局状態に近づくと補強領域背面および補強領域下部にすべり面が形成や背面度のこぼれだしが生じることを明らかにした。また、補強領域内のせん断変形に着目した補強土壁の変位を求める手法を提案し、提案した手法による計算結果は模型実験の結果と概ね整合することを確認した。

3. コンクリート構造物、橋梁及び土工構造物の耐久性向上技術の開発

3.1. 性能規定に対応したコンクリート構造物の施工品質管理・検査(コンクリート品質評価)

近年、コンクリート構造物の施工において、不具合リスクを低減させたり、生産性を向上させたりできる種々の技術提案がある。しかし、出来上がりコンクリートの耐久性を直接的に評価する技術は十分に確立されていないこと、従来からの品質管理・検査の方法が仕様規定的であることから、提案技術の評価を行うことは必ずしも容易ではない。

そこで、耐久性を評価できる可能性のある非破壊試験について検討し、材料・配合に起因する塩害抵抗性の違いを評価可能な試験方法として、表面吸水試験(図-5)を提案した。表面吸水試験時の吸水量から新しい材料を用いた場合の塩害抵抗性の良否を評価可能である。

また、スランプの設定を自由にしてもコンクリートの品質を評価できる簡易な評価方法を提案した。従来の土木用コンクリートとスランプが大きく異なると、未経験者には良否を判断しにくいが、スランプ試験中の試料の崩れ方の目視観察(図-6)と簡易ブリーディング試験の併用により、明らかに材料分離しやすいコンクリートを判別できることを示した。

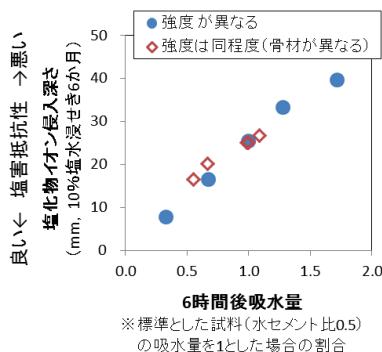


図-5 吸水量と塩害抵抗性の関係

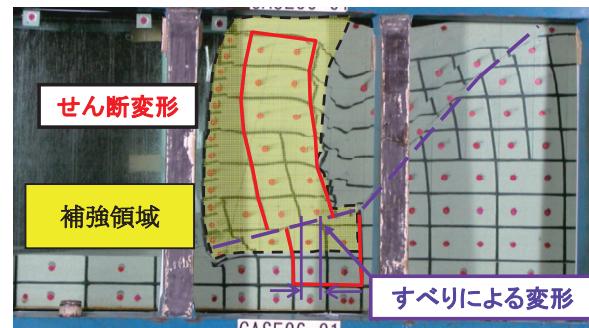


図-3 遠心模型実験による補強土壁の変形状況

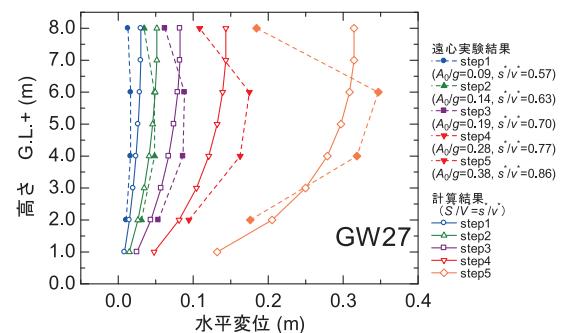


図-4 遠心模型実験と提案手法による補強土壁の変位の比較

○ 通常
※スランプ18cm程度の例



△ 全崩れ
※良否が混在



× 片くずれ
※セメント不足、砂の粒度が悪い



× 顕著な分離
※計量ミス



図-6 スランプ試験中の試料の崩れ方の例

3.2. 性能規定に対応したコンクリート構造物の施工品質管理・検査(材齢初期の凍害を防ぐ養生方法)

コンクリート構造物への要求性能の多様化に伴い、養生など施工に起因したコンクリートの不具合に関する現場技術相談が多く、性能規定に対応した多様なコンクリートへの施工標準の確立が求められている。養生は、ひび割れ等の初期欠陥の防止や長期耐久性を確保する上で重要であり、標準的な養生方法は、所要の圧縮強度の確保を目安として決定される。しかし、水で濡れているコンクリートが継続して厳しい気象作用を受ける場合には、さらに養生を続ける必要があるとされており、耐久性を確保するための適切な養生方法については必ずしも明確になっていない。

このため、特に寒冷期の施工を考慮し、材齢初期の凍害を防止するための養生方法について検討した。湿潤養生直後の飽水度が高い状況で凍結融解を受けた場合、養生期間の延長だけでは必ずしも凍害劣化は防げず、飽水度低下による劣化抑制効果が確認できた(図-7)。これにより、材齢初期の凍害を防止する養生方法として、十分な湿潤養生に加え、さらに養生囲い内で一定期間気中養生を行い、コンクリート表面の飽水度を低下させた後に養生を開放する方法を提案した(図-8)。

3.3. 凍害の各種劣化形態が複合したコンクリート構造物の性能評価法の開発

コンクリートが凍結防止剤を含む融雪水の供給と凍結融解作用を複合的に受けると、図-9に示すようにスケーリングとひび割れが発生・進行する。さらに、塩化物イオンの浸透も促進されることから、早期に鉄筋腐食に至ることが懸念される。このため、寒冷地では凍害の各種劣化形態(スケーリング、ひび割れ)がコンクリートの耐久性に及ぼす影響を適切に照査するための設計法の整備が求められており、寒冷環境下に曝されるコンクリートの性能が時間軸に沿ってどのように低下するかを定量的に確認できる方法が必要となる。

そこで、室内実験と道路橋調査(橋台)で取得したデータをもとに凍害の進行予測式を提案するとともに、凍害の程度から塩化物イオン拡散係数の増加率を決定し、塩化物イオン浸透量を安全側に予測する方法の体系化を図った。①環境の変遷を考慮した剥離度(スケーリングの程度を表す指標で、平均スケーリング深さとスケーリング面積率の積で定義)の進行予測式は図-10で表せる、②スケーリング、ひび割れの程度と塩化物イオン拡散係数の関係を整理した、③Fickの拡散方程式の差分解は、凍害によって塩化物イオン拡散係数が経時変化する際の塩化物イオン量の予測に有効である、等の成果を得た。

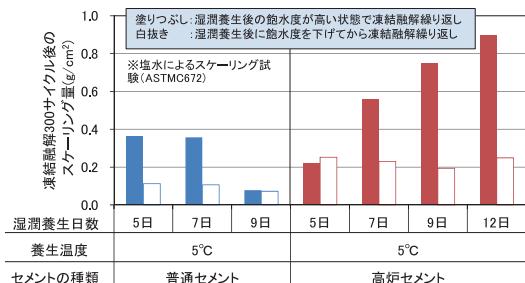


図-7 凍結融解後のスケーリング量

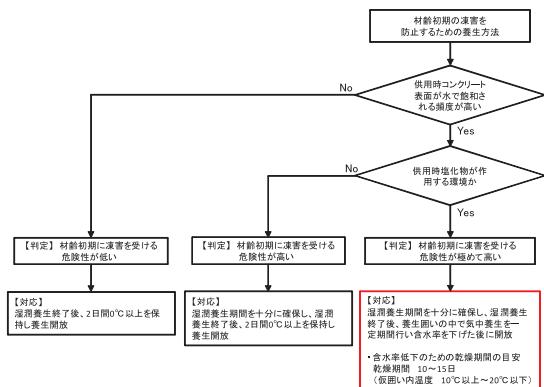


図-8 寒冷期施工時における材齢初期の凍害を防止するための養生方法(案)

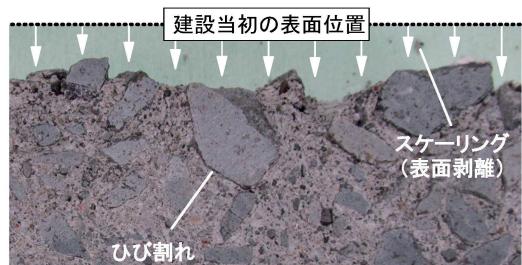


図-9 凍害を受けたコンクリート

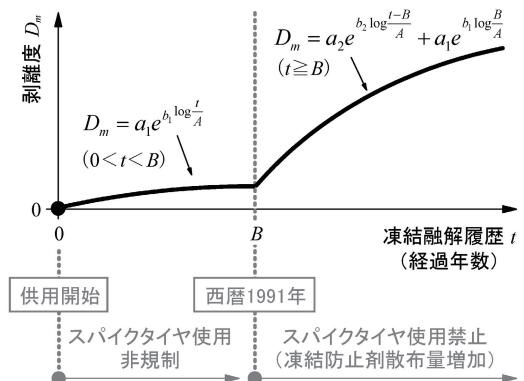


図-10 スケーリング(剥離度)進行予測式

3.4. 鋼道路橋塗装の性能評価

本研究では、鋼道路橋塗装に求められる要求性能を整理し、塗料・塗装の的確な性能評価技術に確立に取り組むことで、塗装設計基準の性能規定化において参考となる基礎的な技術資料の作成をめざした。

「鋼道路橋塗防食便覧」に規定されている新設用塗装系（C-5 塗装系）を標準塗装系と位置付け、その基本性能に関するデータを実験により収集し、現行の規格・基準類等で規定されている試験評価方法・条件の妥当性を検証した。

例えば塗膜の「耐候性」については、JIS K 5600-7-7に基づく促進耐候性試験（キセノンランプ法）により検討した（図-11）。現行の JIS では、2000 時間後の塗膜性状によって上塗り用塗膜の耐候性に関する合否判定が行われている。実施した試験結果において、2000 時間後の光沢保持率に着目すると、ふつ素樹脂塗料およびシリコン変性アクリル樹脂塗料の光沢保持率は 90～100% となっており、いずれも「合格」と判定されるが、より長時間の促進耐候性試験を実施することにより、両者の耐候性の差異が顕著に表れることがわかった。過去に実施している屋外暴露試験等の結果も踏まえて総合的に判断すると、各種塗膜の耐候性を促進耐候性試験で評価するためには、4000 時間を超える長期の試験時間が望ましいことが明らかとなった。

これらのデータや他の試験評価結果等に基づき、鋼橋塗装の要求性能（防食性能、耐久性能、付着性能、景観性能、施工性能、環境性能）ごとに、複層塗膜の性能を適切に評価・判定するために必要な試験評価方法および条件を設定し、それぞれの性能基準値（案）を提案した。

3.5. 積雪寒冷地における冬期土工の品質確保に関する研究

積雪寒冷地では、冬期に施工された盛土が凍結・凍上の影響を受け、融雪期以降に不等沈下・のり面崩壊等の変状が生じ、通常期の施工と比較して盛土品質が低下する場合がある。そこで本研究では、冬期土工における品質確保を目的として、盛土の品質管理基準の提案、低温下での固化処理技術の提案、及び凍結・凍上現象を利用した土の改良技術に関する検討を行い、その成果を現場で活用するためのマニュアルとしてとりまとめることを目指した。

具体的には、冬期施工による盛土の品質調査及び試験施工を通して、盛土の変状を抑制する方法を検討し、盛土の休止回数を少なくする方法、断熱材を使用する方法、非凍上性材料による方法、凍結箇所を除去しながらの施工方法を採用することにより、変状の抑制が可能であることを明らかとした（図-12）。

また、軟弱な材料を有効利用する方法の一つである、セメントや石灰などの固化材を混合する工法について、混合により発生する反応熱を利用することにより、盛土材料の強度発現を実現し、冬期低温下での固化処理が可能であることを確認した。

さらに、凍土に伴う土中水分の移動現象を利用して、高含水比土の含水比を効率的に低下させる実験を行い、超湿地ブルドーザの走行が可能なまでの材料への改良が可能であることを確認した。

以上の検討の結果を「積雪寒冷地における冬期土工の手引き」としてとりまとめるとともに、「北海道における不良土対策マニュアル」に反映させた。

耐候性に関する性能基準(案)	
JIS K 5659の試験条件 ⇒ 4000時間後	
・塗膜外観・割れ・はがれ及び膨れがないこと	
・色の変化：試験初期と比較して色差 ΔE^* が5以下	
・白亜化：等級が1又は0	
・光沢保持率が60%以上	

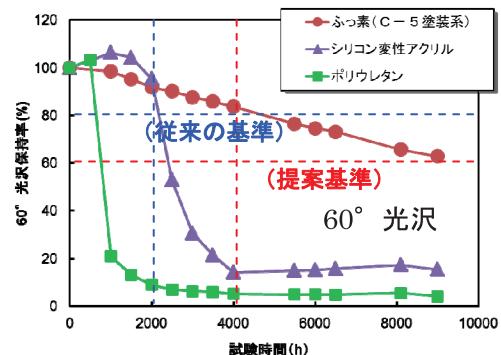


図-11 性能基準（案）の一例（キセノンランプ法（JIS K 5600-7-7）に基づく試験による「耐候性」の性能基準（案））



図-12 冬期土工対策方法

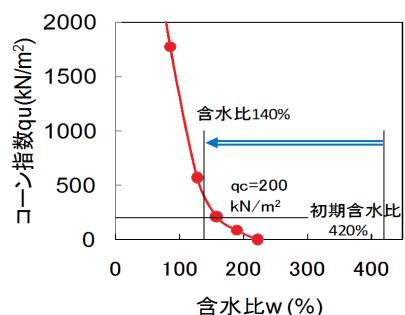


図-13 含水比とコーン指數

安全・安心な冬の道路を目指して

～寒冷地域における冬期道路のパフォーマンス向上技術に関する研究～

寒地道路研究グループ 三木 雅之

1. はじめに

豊かで質の高い国民生活を支え、地域の活力を引き出すためには道路交通が担う機能の維持と向上が不可欠である。迫りくる人口減少や少子高齢化、厳しい財政事情の中では、その機能をより効果的・効率的に維持・向上させる戦略的な維持管理技術の導入が求められる。特に寒冷地では、冬期道路状況に応じて事業投入と機能が均衡する冬期道路管理技術が重要である。また、冬でも快適な歩行空間の確保を図るため、バリアフリーに加え転倒を防止するための技術開発が必要であり、さらに冬期の交通事故に有効な対策技術の向上も非常に重要な課題の一つである。

本プロジェクト研究では、寒冷地の冬期道路交通のパフォーマンスを維持・向上させるため、冬期道路のパフォーマンスに最も影響する冬期路面水準の評価・判断支援・対策技術の開発、路線・区域全体の除雪効率化向上のための技術開発、冬期歩道の安全性・信頼性向上技術の開発及び冬期の交通事故に有効な対策技術の開発を行うための研究に取り組むこととし、以下の達成目標を設定した。

- ・冬期道路管理の効率化、的確性向上技術の開発
- ・冬期歩道の安全性・信頼性向上技術の開発
- ・冬期交通事故に有効な対策技術の開発

これらの目標を達成するため、以下に示す個別の研究課題を設定した。

- ・冬期路面管理水準の判断支援技術に関する研究
- ・効率的な冬期路面管理のための複合的路面処理技術に関する研究
- ・ICTを活用した効率的、効果的な除雪マネジメント技術に関する研究
- ・積雪期における安心・安全な歩道の路面管理技術に関する研究
- ・郊外部における車線逸脱防止対策技術に関する研究

2. 研究の成果

2. 1 冬期路面管理水準の判断支援技術に関する研究

本研究課題では、連続路面すべり抵抗値測定装置の活用により、路線の路面管理の適切な実施判断に資する技術開発として、冬期路面管理水準の妥当性の検討、路線におけるすべり特性の把握と診断技術の開発に関する検討、および道路気象と診断技術に基づいた冬期路面管理水準の判断支援技術の検討を行った。

(1) 冬期路面管理水準の妥当性検討

連続路面すべり抵抗値測定装置(図-1)により測定した路面のすべり抵抗値を用いて、冬期路面管理水準の妥当性を検証するために、現道における路面すべり抵抗モニタリング調査を行った。札幌市内的一般国道をモニタリング区間(一般国道230号の約44km区間)とし、1~2月の平日、約40日間(2往復/日)にわたり、路面管理作業の実施前後においてすべり抵抗値を計測した。また、過年度に取得したモニタリング調査結果、冬期道路管理作業記録データも用いて、冬期路面管理水準の妥当性検討に向けた基礎解析を行った。本解析により、路面すべり抵抗値と、気象および路面管理作業データは相互に関連することが分かり、また、これらのデータにより冬期道路管理水準の妥当性を検証することができた。

(2) 路線におけるすべり特性の把握と診断技術の開発

上述したモニタリング調査により蓄積されたデータを用いて、路線における冬期路面状態(すべりやすさ)の出現傾向、要注意箇所・条件等、路線のすべ



図-1 連続路面すべり抵抗値測定装置

り特性を把握するための基礎的分析を行った。すべり抵抗値データを、気象条件(日最低気温および夜間12時間降雪量)と前日の路面状況(路面すべり抵抗値)で13区分に分け、気象・路面状況別に路線の路面すべり抵抗値分布の再現性を検証し、気象条件毎の路線のすべり傾向分布図(フリクションマップ)の作成手法を構築した。路線のフリクションマップを作成することにより、路面管理上の要注意箇所を把握できるとともに、道路気象や道路構造を考慮して路線のすべり特性の評価・診断が可能になる。

(3) 道路気象と診断技術に基づいた冬期路面管理水準の判断支援技術の検討

実際に冬期道路管理の現場で活用されることを想定し、気象条件によるフリクションマップの分類数の集約、フリクションマップ作成に必要なデータ数とフリクションマップの信頼性を検証し、冬期路面管理事業への適用方法としてフリクションマップ活用マニュアルを提案した。

2. 2 効率的な冬期路面管理のための複合的路面処理技術に関する研究

本研究では、舗装の種類・特性に応じた凍結防止剤の散布技術を確立し、散布剤、散布技術及び散布機械の改良による複合的な凍結路面処理技術を開発することで、より効果的・効率的な凍結路面対策の実施に資する技術開発に取り組んだ。

(1) 舗装種類に合致した効果的・効率的な凍結防止剤等の散布技術の検討

舗装種類毎の適切な散布技術を確立するため、凍結防止剤散布後のすべり抵抗値や路面すべり摩擦係数 μ を推定する手法の確立が必要となる。密粒度舗装、排水性舗装および機能性SMA舗装を対象とした室内実験を実施し(図-2)、 μ と路面氷膜厚の関係、および凍結防止剤の散布量に対して舗装内部に浸透する量の割合を明らかにした。これらの知見を基に、凍結防止剤散布後の μ を推定する手法(路面すべり推定法)を構築し、さらに同手法を粗面系舗装に拡張し、車両通過の影響も組み込んで精度を向上させた。この路面すべり推定法を基に、適切な凍結防止剤散布量を推定するとともに、凍結防止剤散布が不適切な場合には他の冬期路面管理作業を推奨する冬期路面改善シミュレータ(Winter Road Improvement Simulator : WIRIS ウィリス)を開発した。

(2) 散布剤や散布技術の改良、散布機械の改良も含めた凍結路面処理技術の提案

① 機械的改良による散布技術の検討：防滑材の定着性向上を図るために、散布機械の改良による防滑材と加熱水の湿式散布(防滑材加熱水混合散布)について検討した。加熱機器2台と熱交換器1台などから構成される加熱ユニットを介して水溶液タンク内の水を加熱する加熱水混合散布システムを、既存の凍結防止剤散布車に搭載する方式で試作機を製作した(図-3)。なお、試作機は、運転室からの加熱ユニット操作により、最適な温度の加熱水混合散布が可能である。

② 散布剤の改良による散布技術の検討：防滑材散布技術の改良のため試験道路で散布試験を実施し、路面上の防滑材の量とすべり抵抗値の関係を明らかにした。加熱水の温度および混合割合が防滑材の路面残存率に及ぼす影響を明らかにし、防滑材加熱水混合散布の防滑材路面定着特性と路面すべり抵抗値改善効果を定量的に評価した。そして実道における防滑材加熱水混合散布と従来方式の湿式散布の比較試験から、防滑材加熱水混合散布後の路面すべり抵抗値は、従来の散布方式である湿式散布よりも高い値を示す傾向にあることを実証した。



図-2 室内凍結路面走行試験装置



図-3 防滑材加熱水混合散布

2. 3 ICTを活用した効率的、効果的な除雪マネジメント技術に関する研究

本研究は、除雪作業を効率的・効果的に実施するため、詳細な除雪機械稼働情報(位置・作業)や、気象情報等の分析を行い、ICT(Information Communication Technology)を活用して除雪出動判断・除雪機械運用を支援する除雪マネジメント技術を提案するものである。

(1) 気象情報と除雪機械の稼働(位置・作業)情報の可視化による除雪作業効率の分析・評価技術の提案

除雪作業を可視化、分析・評価する方法を検討し、「除雪作業効率分析・評価手順資料(案)」にとりまとめた。また、可視化、分析・評価を容易に行うため、除雪機械の位置情報データを、道路距離と除雪作業時刻を軸とした折れ線グラフで表示する機能(図-4)を開発した。

(2) 気象情報・除雪機械稼働情報の分析とICT技術を活用した情報共有による、除雪出動判断・除雪機械運用支援技術の提案

① 降雪量に応じた出動タイミングの判断を支援するため、各除雪工区の代表的な除雪ルート及び除雪作業所要時間を算出し、その情報を除雪作業グラフで表示する除雪出動判断支援機能を開発した。

② 大雪時などに、隣接工区の除雪作業の支援を行った場合の効果を定量的に把握するため、除雪作業所要時間を予測する除雪機械運用支援機能を開発した。

(3) 除雪機械の位置・作業情報を活用した、除雪機械作業効率化マネジメント技術の運用方法の提案

上記の成果を基に、「除雪機械作業効率化マネジメント技術資料」を作成した。

2. 4 積雪期における安心・安全な歩道の路面管理技術に関する研究

積雪寒冷地の冬期歩道路面では、積雪や路面の凍結により歩行者転倒事故が発生しており、特に交通バリアフリーの観点からも高齢者・移動制約者等に対して歩道空間を改善する路面管理手法および対策が求められている。本研究では、冬期でも快適な歩行空間を提供するため、冬期の歩行者にとって快適な路面性能を明らかにし、適切な路面を提供するための歩道の設計手法、機械除雪と路面管理の最適な組合せ手法について提案することを目的としている。

(1) 高齢化社会に対応した寒冷地歩道の路面性能の解明

冬期歩道路面の様々な路面性状を調査し、冬期歩道の歩行に与える影響が大きい要因の抽出を行った。また、乾燥・湿潤時の歩道路面のすべり抵抗を評価する手法として基準化されている試験法(BPT)では、冬期歩道路面を適切に測定できないため、歩行実験をもとに適切にすべり抵抗値を測定する方法(PPD)を提案した。

(2) 積雪や除雪作業に対応した歩道の設計技術の提案

冬期歩道路面における救急搬送者数の調査結果より、冬期歩道路面における事故の特徴把握を行った。また、バリアフリー区間の縦断勾配設計に関して、歩行者(健常者・高齢者)の主観評価試験を実施し、バリアフリー区間の現行の基準を踏まえて歩道の設計を行うことの妥当性確認を行った。また、開発中の雪氷路面処理装置が舗装に与える影響を検証するため、雪氷がない各種舗装路面にて走行試験を実施し、舗装に与える影響の確認を行った。

(3) 新しい歩道部の冬期路面処理機械の開発

構造が単純で特別な動力を必要とせず、防滑材のみによらずに雪氷路面の改善効果が期待できる海外での雪氷路面破碎処理技術を活用し、歩道部の雪氷路面処理装置(図-5)の開発を行った。活用した破碎機構に加え、破碎によって発生する雪氷片を歩行部から排除する排雪部、薄い雪氷路面に対応するための破碎深さ制御機能を備えた装置を試作した。性能を検証する試験を行い、施工による静摩擦係数値の

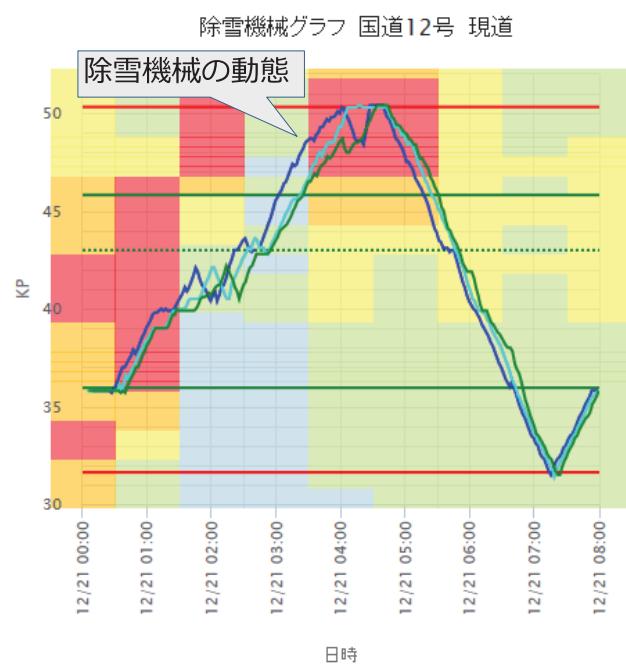


図-4 除雪作業の可視化

増加、大きな不陸の解消、及び車両の取り回しや作業性に問題がないことを確認した。また、実機に向けた雪氷路面処理装置の仕様を作成した。

(4) 最適な冬期の歩道路面管理技術の提案

被験者調査により、アイスバーン、圧雪路面への雪氷路面処理装置及びすべり止め材による路面对策効果の検証を行い、効率的な冬期路面对策方法として防滑材等の散布量及び雪氷路面処理装置による路面処理技術の効果を提案した。

2.5 郊外部における車線逸脱防止対策技術に関する研究

本研究は寒冷地域等における道路交通の安全性を維持・向上させるため、郊外部において死亡事故に至る割合の高い車線逸脱事故の防止対策技術として、諸外国で既に効果を挙げているワイヤロープ式防護柵に着目し、各道路区分に対応した性能、仕様の検討、施工・維持管理手法の検討や路肩への適用性検証、効果の測定の実施を通じて、我が国の条件に適した緩衝型ワイヤロープ式防護柵の開発すること、および、工作物衝突事故対策箇所の選定手法、対策手法等について検討し、工作物衝突事故対策手法の提案を行うこと、から構成される。

(1) 緩衝型ワイヤロープ式防護柵

車両の路外逸脱対策技術として物理的に車線逸脱を防ぐことを目的に、CGシミュレーション、性能確認試験を行って高速道路用(Am種)および一般道路用(Bm種)の緩衝型ワイヤロープ式防護柵(図-6)を開発した。実道への導入に向け、カーブ・サグ等の道路線形条件が厳しい箇所、および橋梁やボックス等の構造物上の条件に適した構造と設置工法の開発、暫定2車線区間への導入方法の検討を行った。さらに、ワイヤの張力が低下した時の衝突時たわみ量を減少させることを目的としたロープ連結材を考案し、性能確認試験を実施して規格を確定した。これらの成果をまとめ、「緩衝型のワイヤロープ式防護柵整備ガイドライン(案)」を作成した。開発した新型防護柵は全国の高速道路等に試行導入され、効果の検証が行われている。

(2) 工作物衝突事故対策手法

車線逸脱事故データの分析を行い、道路条件や交通条件を点数化して要対策箇所を選定する手法を作成し、現地調査手法と対策事例を取りまとめ、「工作物衝突事故対策立案マニュアル(案)」を作成した。個別の工作物衝突事故対策技術として、大型車への警告効果が高いランブルストリップス(図-7)の開発のため、夏期・冬期走行実験、被験者実験を実施して大型車対応ランブルストリップスの推奨規格を作成し、新たに工作機械の開発も行った。これらの成果を取りまとめ、既存の「ランブルストリップス整備ガイドライン(案)」に追加した。



図-5 歩道雪氷路面処理装置



図-6 ワイヤロープ式防護柵



図-7 大型車対応ランブルストリップス

3. おわりに

各個別課題とも着実に研究成果があがり、設定した達成目標を達成することができた。冬期路面管理支援技術、舗装・機械改良及び凍結防止剤散布が一体となった冬期路面対策技術、除雪マネジメント技術、歩道の雪氷路面処理技術、緩衝型ワイヤロープ式防護柵など、道路行政の現場において活用が見込まれる成果が得られた。

研究期間中にも多くの相談や問い合わせがあったことから、本研究に対する道路管理者のニーズは高く、適切な研究目標設定がなされていたと考えている。学会、講習会、WEB、技術相談などを通じ研究成果の発信に努めた結果、研究年次の途中においても開発した技術が試行的に活用された。

今後は成果の実用化と早期普及に向けた取組として、基準・マニュアル等への成果反映、講演会・講習会等の開催、現場への技術指導や助言活動、知的財産権の取得、テレビ・新聞・WEB 等を通じた成果の情報発信、などに取り組む予定である。また、平成 28 年度に開始した第 4 期中長期研究計画では、第 3 期に得られた成果を発展させる研究や、成果の一般化・普遍化等に向けた研究にも取り組んでいるところである。

[熊本地震調査報告]

熊本地震の緊急調査報告

熊本地震の緊急調査報告

土砂管理研究グループ 藤沢 和範

1.はじめに

平成28年熊本地震(平成28年4月14日及び16日に震度7を記録)に対し、土木研究所では、国土交通省九州地方整備局等からの依頼により延べ204名を派遣し、河川堤防等の河川施設、大規模崩壊地、橋梁等の道路施設の被災調査および二次災害防止、被災施設の復旧等に関する高度技術指導を実施した。本稿では、現地における緊急調査に基づいた被害概況等を報告するものである。本文中の数値等には調査時点のものがある点に留意いただきたい。

表-1 派遣者延べ数

	4月	5月	6月	合計
	14~30日	1~31日	1~7日	
河川堤防復旧工法等調査	16	4	0	20
土砂災害状況調査	31	5	0	36
道路橋梁等調査	102	39	7	148
合計	149	48	7	204



写真-1 打ち合わせ風景

2. 熊本地震の概要

平成28年4月14日21時26分頃に熊本県熊本地方の深さ約11kmでマグニチュード(M)6.5の地震(以下「前震」という。)が発生した。その後続いて、4月16日1時25分頃に同地方の深さ約12kmでM7.3の地震(以下「本震」という。)が発生し、これらの2つの地震において熊本県で最大震度7を観測した。気象庁は、これらの一連の地震を「平成28年(2016年)熊本地震」と命名した。熊本県、大分県を中心に甚大な被害を生じ、消防庁の取りまとめによると、7月15日18時30分現在、地震による死者は81名、負傷者は1,424名、住家被害は、全壊8,336棟、半壊26,333棟、一部破損126,289棟、火災発生は16件に上った。

発生日時	2016年4月16日1時25分5.4秒(本震) 2016年4月14日21時26分34.4秒(前震)
震央地名	熊本県熊本地方
マグニチュード	7.3(本震)、6.5(前震)
深さ	12km(本震)、11km(前震)
震度(本震)	7(熊本県西原村、益城町の一部) 6強(南阿蘇村、菊池市、宇土市、大津町、嘉島町、宇城市、合志市、熊本市の一部)
	4月16日1:26、M=5.7(震央:大分県中部)
	4月14日22:07、M=5.8(最大震度6弱)
2016年4月14日21時26分以降に発生した地震 (本震前震を除くマグニチュードM5.8以上)※	4月15日0:03、M=6.4(最大震度6強) 4月16日1:45、M=5.9(最大震度6弱) 4月16日3:03、M=5.9(最大震度5強) 4月16日3:55、M=5.8(最大震度6強) 4月18日20:41、M=5.8(最大震度5強)

3. 災害の概要

3. 1 土砂災害

国土交通省調べ(8月1日時点)によれば、土砂災害発生件数は190件発生しており、その内訳は、土石流等57件(熊本県54件、大分県3件)、地すべり10件(熊本県10件)、がけ崩れ123件(熊本県94件、大分県15件、宮崎県11件、佐賀県1件、長崎県1件、鹿児島県1件)となっており、土砂災害による死者(6月の梅雨前線豪雨の土砂災害による死者5名を含む)は14名である。震度6強以上を記録した熊本県内の市町村を中心に、

4月19日(火)~4月27日(水)にか

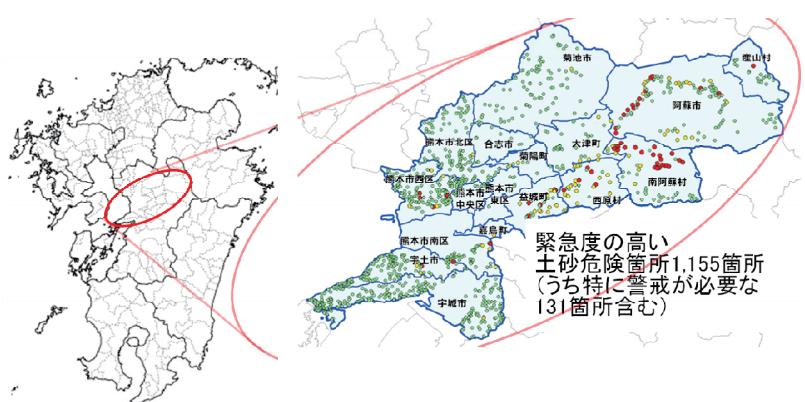


図-2 TECH-FORCEによる危険箇所点検結果
(赤・黄色点が応急的な対策や警戒が必要な箇所)

けて土木研究所等の助言のもと国土交通省の緊急災害対策派遣隊 TEC-FORCE(土砂災害現地調査チーム)が地上調査とヘリコプター調査による緊急点検を実施した。点検の結果、緊急度の高い危険箇所1,155箇所のうち、応急的な対策や警戒が必要な箇所131箇を特定し、地元市町村や県知事に報告した。応急的な対策や警戒が必要な箇所については、阿蘇市、南阿蘇村、益城町周辺に多く分布しており、多様な土砂移動現象の発生により、人家、道路、河川などに被害をもたらしていた。

3. 1 代表的な地区の調査結果

○阿蘇大橋付近の斜面崩壊—大規模な斜面崩壊事例

南阿蘇村の阿蘇大橋上流右岸のカルデラ壁では、崩壊幅約200m、崩壊長約700m、崩壊土量約50万m³に達する大規模な斜面崩壊が発生した(写真-2、崩壊諸元は九州地方整備局による)。

今回崩壊が発生した範囲は、地震発生前の地形図を見るとやや凸状の地形を呈しており、この範囲を含めて地震動により崩壊したと推定される。なお崩壊斜面の地質は輝石安山岩・玄武岩の分布域にあたる。4月17日の現地調査時点では、崩土は概ね直径20~70cm程度の礫を主体としていたが、中には2m程度の巨礫も認められた。また、礫の下には火山碎屑物を主体とする土砂が認められた。16日のヘリによる上空からの調査の結果、崩壊斜面の頂部付近には、馬蹄形上に亀裂の分布が認められた他、その後の調査により隣接する尾根部にも亀裂が発見されたことから、今後の余震や降雨により拡大・新規崩壊が発生する危険が考えられた。そのため、亀裂の監視体制の整備、斜面対策や道路復旧等の工事実施上の安全確保、対策工法の計画に関する留意点について、九州地方整備局に助言し、実際の対策の計画検討に反映された。

○山王谷川

南阿蘇村の中央火口丘南西斜面を流域に有する山王谷川では、上流で発生した崩壊が土石流化し、約2kmを流下し、下流の耕地や住宅地に氾濫した(写真-3)。氾濫した土砂は、黒色を呈した火山噴出物由来と考えられる細粒分主体の土砂である。堆積形状は、耕地上で水平に堆積するのではなく、1m程度の厚さ(調査地点)を維持しながら堆砂の端で30°程度の勾配で堆積していた。このことからある程度の高い濃度を保った状態で流下し氾濫したと考えられる。

○その他の被害



写真-2 阿蘇大橋付近の斜面崩壊



写真-3 山王谷川の氾濫



写真-4 高野台地区の崩壊



写真-5 自然斜面の崩壊



写真-6 人工斜面の崩壊

高野台地区(写真-4)においては、緩傾斜地において大規模な崩壊が発生し被害をもたらした。震度7を記録した益城町内においては、人家に面した自然斜面及び人工斜面の崩壊(写真-5、6)が多数みられた。

○熊本地震により発生した多数の亀裂

崩壊斜面周辺やそれ以外の斜面においても、多数の亀裂が確認され、地震後の降雨により、拡大崩壊や土石流の発生も確認されている。これらの箇所については、引き続き土砂災害の危険性が高まっている状態が継続していることが確認できる。



写真-7 高野台地区の亀裂（亀裂の幅を観測する伸縮計を設置）

写真-7は、高野台地区の崩壊上部において発見された亀裂であり、亀裂の幅を観測する伸縮計を設置し、継続している。写真-8は、阿蘇大橋地区の崩壊崩壊地区において見られた亀裂であり、少なくとも二段にわたって亀裂が発達していることが確認できる。



写真-8 阿蘇大橋地区西側斜面の崩壊箇所上部亀裂)

4. 公共土木施設被害

今回の地震では、周辺地盤が変状した影響によって落橋(写真-9)など100カ所以上の橋梁を点検した。高速道路を跨ぐ橋で特殊な橋脚構造を有する橋において落橋あるいは橋脚に生じた傾斜によって撤去が必要となる被害(写真-10)なども生じた。道路土工の盛土については、沢部や段丘縁辺部及び水辺に接する箇所で崩壊が見られた。これらの発生原因は、基礎地盤の崩壊又は盛



(a) 上部構造の落橋(4月18日)



写真-9 地盤変状の影響による落橋
(全体: 5月1日、右上: 4月17日)



写真-10 特殊な橋脚構造を有する橋の被害
(b) 橋脚の傾斜(4月20日)

土内の水の影響による盛土自体の滑りが考えられる。自然斜面・切土については、強震動による大規模な土砂崩壊のほか、岩盤崩壊や落石が多く見られた。一部では岩盤崩壊で落石防護施設が破損し、岩塊が斜面下の道路に到達した事例も確認された。

河川堤防については、緑川の河川堤防において比較的大きな変状が集中して見られた。河川堤防における代表的な被災状況は、天端舗装の亀裂・段差、全体的な沈下となっている(写真-11)。亀裂深さが2mを超える所もあった。また、場所によっては、のり面のはらみ出し、のり尻の側方移動がみられた。



写真-11 緑川右岸 8.9k 付近の変状

4. 二次被害の防止に向けて

熊本地震被災地での6月梅雨前線豪雨により、新たな土砂災害が発生している。とりわけ、立野地区周辺では、6月の豪雨により多くの斜面において新規崩壊、拡大崩壊及び土石流が発生している(写真-12)。このように強震度の地震の影響を受けた後の地盤は豪雨等に対して極めて脆弱となっており、2次被害の防止に留意しながら被災した公共土木施設の早期復旧に努める必要がある。阿蘇大橋地区における2次災害を予防するための斜面の緊急対策工事及び早期復旧に向けての関係機関への技術的支援を継続して実施している(写真-13)。



写真-12 立野地区の土石流
(6月梅雨前線豪雨)

5. おわりに

土木研究所では、公共土木施設の各分野の現地対応に参加するとともに、自主調査チームを編成し現地に派遣した。今回の熊本地震は、東日本大震災(平成23年東北地方太平洋沖地震)から約5年にあたり、平成16年新潟県中越地震、平成7年兵庫県南部地震と震度7を記録し大きな被害をもたらした地震は数多い。このような巨大地震による二次災害防止と被災施設の復旧に向けた技術支援を引き続き行い、被災地の復興に貢献していきたい。



写真-13 阿蘇大橋地区における斜面の無人化施工

【参考文献】

- 1) 気象庁ホームページ : http://www.jma.go.jp/jma/menu/h28_kumamoto_jishin_menu.html
- 2) 消防庁ホームページ : <http://www.fdma.go.jp/>
- 3) 気象庁ホームページ : <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.php>
- 4) 地震調査研究推進本部ホームページ : <http://www.jishin.go.jp/>
- 5) 国土交通省砂防部 : 平成28年熊本地震による土砂災害の概要<速報版>、pp.2~3、2016
- 6) (社)砂防学会 : 平成28年熊本地震による土砂災害緊急調査に基づく緊急提言、pp.1~3、2016
- 7) 国土地理院 : 平成28年熊本地震・空から見た(航空写真判読)土砂崩壊地分布図、2016
- 8) 国土交通省九州地方整備局 : 阿蘇大橋地区復旧技術検討会(第1回)、2016
- 9) (財)国土開発技術研究センター : 九州地方土木地質図解説書、1986
- 10) 平成28年度(2016)熊本地震の緊急調査速報 : 土木技術資料58-7、pp.6~17

[プロジェクト研究成果報告【防災】]

大規模土砂災害を想定内へ

限界状態に挑む

～耐震性能を基盤としたインフラ・システムの耐震技術の開発～

激甚化する水災害の防止・軽減に向けて

暴風雪災害から身を守るために

～雪氷災害の減災技術に関する研究～

新情報技術を活用し水災害の被害軽減に挑む

～水災害軽減に資する洪水予測モデル及び人工衛星を活用した氾濫水理量推定技術の提案～

大規模土砂災害を想定内へ

土砂管理研究グループ 藤沢 和範

1. はじめに

土砂災害は、毎年 1,000 件近くが発生しており、自然災害としては比較的「身近な」脅威である。このため、国土交通省や都道府県により、砂防法をはじめとするいわゆる「砂防三法」に基づき、砂防堰堤といった土砂災害防止対策のための施設整備が進められているほか、平成 12 年に制定された「土砂災害防止法」に基づき、あらかじめ被害を受けるおそれのある土地の区域を予測し、警戒避難を促すなどの対策が進められている。しかしながら、近年、豪雨の発生頻度の増加、大規模地震の発生および火山活動により、これまで対策の主眼とされてこなかったような大規模な土砂移動による災害が発生、またはその発生の蓋然性が高まりつつあると想定された事例が頻発している。天然ダムを例にあげるように発生頻度が少ない現象については、その対策技術が十分に確立されているとはいえない。知見が少なく、対策の立案が困難あるいは、その俎上にあげられていない現象は、災害対策上、「想定外」と扱われるが、たとえ頻度が少なくともこれまでにも発生し、近い将来に発生が予見される現象や災害は「想定外」としてはならない。

土木研究所では、大規模土砂災害の発生危険個所の抽出、事前の減災対策、そして、応急復旧技術の技術に関する研究を行ったので、本稿ではそれらの技術について紹介を行う。これらの知見が大規模土砂災害を想定内とした対策につながることを期待したい。

2. 近年発生した大規模な土砂災害

2. 1 深層崩壊・天然ダム

平成 16 年 10 月には、中越地震により旧山古志村で、平成 20 年 6 月には、岩手・宮城内陸地震により天然ダムが形成された。さらに、平成 23 年 9 月には、紀伊山地を直撃した台風 12 号に伴う豪雨により、複数箇所で深層崩壊が生じ天然ダムを形成した。

また、海外においても、平成 24 年 7 月に、インドネシア共和国のアンボン島において、豪雨により天然ダムが形成し、平成 25 年 7 月に決壊し、大規模な土石流が発生した。



図－1 紀伊山地の天然ダム（H23 年）



図－2 御嶽山の噴火（H26 年）



図－3 国川地区の流動化する地すべり（H24 年）

2. 2 火山噴火に起因する土砂移動現象

平成 2 年末から噴火が始まった雲仙普賢岳、平成 20 年に噴火した三宅島雄山では、堆積した火碎堆積物により土石流が頻発した。特に、雲仙普賢岳では、水無川下流の広域にわたり土石流が氾濫した。また、平成 23 年の霧島山新燃岳の噴火、多くの犠牲者が生じた平成 26 年の御嶽山の噴火においては、火山灰の堆積が認められた溪流で、土石流等の土砂移動が確認された。

そのほか、平成 27 年の口永良部島の噴火では火碎流の発生において火碎サージが認められた。これらの現象が、積雪のある火山で発生すれば融雪泥流が発生する可能性がある。

2. 3 流動化する地すべり

地すべりは一般に地すべり地塊の長さと同じ距離内で土砂の移動停止するものが多いが、中には長距離を流动して流下し氾濫範囲が広域に及ぶことで大きな災害になるものが少なからず存在する。平成 24 年に、新潟県の国

川地区で発生した地すべりは、その土塊が流動化して移動することにより、地すべり斜面からおよそ 250m 離れた保全対象が被災した。

2. 4 道路斜面等における斜面崩壊、落石、岩盤崩落

道路のり面については、斜面崩壊等のおそれのある箇所に対策施設が整備されているが、その中には老朽化により、その機能の発揮が難しくなっている箇所も増加しつつある。点検による危険箇所の評価の精度も必ずしも十分とはいはず、それに基づく管理についても箇所数も多く、維持・更新に向けた効率的な調査手法などの技術開発が必要である。



図-4 老朽化した道路のり面施設の崩壊

3. 大規模土砂災害等に対する減災、早期復旧技術の開発

大規模な土砂災害による被害を防止・軽減するためには、その発生の危険箇所の把握が重要である。さらに、その抽出した危険箇所において、ハード対策による被害の防止・軽減を実施するとともに、もしハード対策では、完全に土砂移動を防ぐことができない場合においても、人的被害が生じないようなソフト対策を講じる必要がある。また、土砂災害の発生場所や形態によっては、必ずしも事前の対策を行うことができない場合もありうる。その場合は、現場の状況や社会状況やさまざまな制約の中で迅速に応急復旧を行う必要がある。

3. 1 深層崩壊・天然ダム等異常土砂災害の被害推定に関する技術

深層崩壊・天然ダム等異常土砂災害に対応するためには、それらのおそれのある危険箇所を明らかにし、危機管理および砂防施設の整備を行う必要がある。

既往の研究では、深層崩壊のおそれのある場所について、渓流レベルの抽出¹⁾が可能となっていた。さらに、深層崩壊のおそれのある斜面の抽出のため、深層崩壊の発生の関連が高いと想定される「岩盤クリープ」を有する斜面の抽出について、新たに重力変形地形に着目した方法を考案し、岩盤クリープを有する斜面を客観的に評価することができた。さらに、このような斜面で深層崩壊が発生した場合の被害のリスクを評価するために、空中電磁探査により崩壊規模の推定を試みた。本計測結果から得られる比抵抗値の急変する面をすべり面と仮定することにより、崩壊規模を推定することが可能と考えられる（図-5）。今後は、比抵抗値とボーリング結果との比較により、すべり面の推定精度を上げていく予定であるが、広域に分布する深層崩壊の危険斜面の崩壊規模を効率的に一定の精度が可能になることが期待される。

深層崩壊が発生した場合の土砂移動による被害の形態のうち、特に「土石流タイプ」、「天然ダムタイプ」については、崩壊斜面直下のみならず下流域の広範囲にわたる被害が想定されるため、その被害の及ぶ範囲の推定が、減災対策において重要となる。

深層崩壊に起因する土石流は、通常の土石流と比較して流下する土砂量も大きく、流下距離が長くなるが、既往の数値計算モデルでは再現することが困難であった。そこで、細粒土砂を間隙流体としてふるまうと仮定した数値計算モデルを新たに考案した³⁾。これにより、既往の深層崩壊に起因する土石流の到達範囲を良好に再現することが可能となった。

深層崩壊が天然ダムを形成した場合、国は土砂災害防止法に基づき、緊急的に被害の及ぶおそれがあ

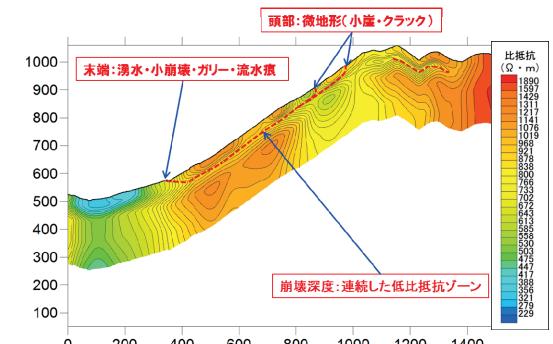


図-5 空中電磁探査結果を活用した崩壊深度推定事例²⁾

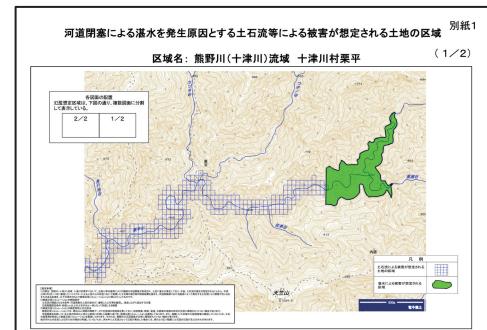


図-6 H23 紀伊山地台風 12 号で公表された土石流の想定氾濫範囲

る範囲の推定を行うことが求められる。現地から得られる情報を用いて、天然ダムの決壊によって発生する土石流の氾濫範囲を緊急に推定する計算プログラムを開発した。平成23年に紀伊山地で発生した天然ダムの形成時には、当プログラムが用いられるなど、今後の緊急時における活用が期待される。

3. 2 火山噴火に起因した土砂災害の緊急減災対策に関する技術

火山噴火に起因して発生する土砂移動は、様々な形態が考えられるがいずれの現象においても、被害の及ぶおそれのある範囲が精度よく推定できることが重要である。降灰後の土石流の規模、火碎流の被害範囲推定、融雪型火山泥流の発生規模推定に資する技術を開発した。

土石流による被害のおそれのある範囲を二次元氾濫計算等で精度よく推定するためには、土石流の流量やその土砂濃度などを精度よく予測する必要がある。このためには、実際の土石流の流下時のデータを計測・解析し、土石流の実態を把握することが重要である。土石流の流体を直接的にサンプリングすることは危険を伴い困難であること、また、精度よく流量を推定するためには1点データだけでなく、流下断面を計測する必要があることから、砂防堰堤の水通し部を通過する土石流の荷重の計測が可能な土石流荷重計、物体の形状を走査・測定可能な測域センサを桜島の有村川に設置した。これらのデータを用いて、時系列的に土石流の土砂濃度、単位堆積重量を推定するほか、流下断面形状と水脈飛距離を測定することにより土石流流速を算出する手法を開発した。

火碎流による減災を達成するためには火碎サージを含む影響範囲を推定する必要がある。火碎サージの危険範囲の推定のために、噴煙柱と大気の密度差に着目した密度流の数理モデルを開発した⁵⁾。平成26年、27年に火碎流が発生した口永良部島での事例をもとにモデルの検証を行ったところ、逆勾配や火口壁の形状などの地形的要因を受けてやや過小評価となる斜面もあるが、火碎サージの主たる到達範囲を推定することができた。

融雪型火山泥流は、積雪した火山山麓斜面に火碎堆積物が流下・堆積した場合に発生すると想定される。氾濫範囲を適切に推定には、融雪量の設定が重要である。高温砂礫の熱エネルギーが融雪に費やされる際には、水が生成されるとともに、昇華により直ちに水蒸気が生成され、大気へ放出する。雪の昇華熱量は雪の水蒸気化率（経験的）と昇華潜熱の積として算出しているが、条件によっては水蒸気発生量が多くなり、ハイドログラフの推定に大きく影響する可能性がある。本研究では昇華熱量の影響度合いを熱伝導解析により検討し、実験結果と比較してその妥当性を確認した。昇華熱量を考慮した解析結果は、それを考慮しない既往モデルと比較し実験結果とよく整合した⁶⁾。今後、この結果を融雪量の推定モデルに反映することでより実際の現象と整合したハイドログラフの推定が可能となると期待される。

3. 3 流動化する地すべりの発生箇所・到達範囲の予測に関する研究

地すべり土塊が流動化した場合、被害は通常想定されているものよりも広範囲に及ぶことが予想されるため、その

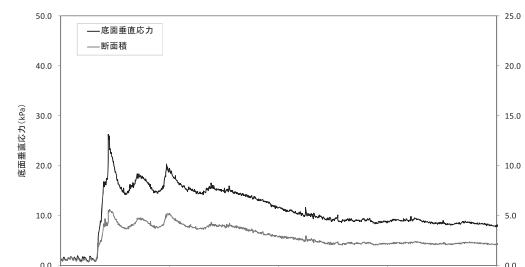


図-7 桜島有村川で計測された時系列の土砂濃度

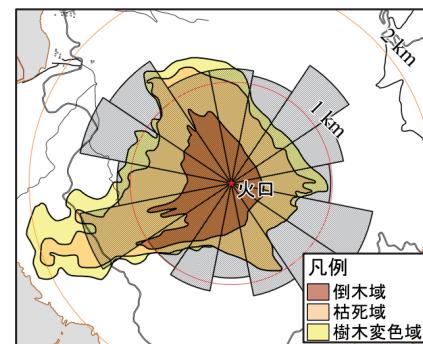


図-8 口永良部島で発生した火碎サージの再現計算

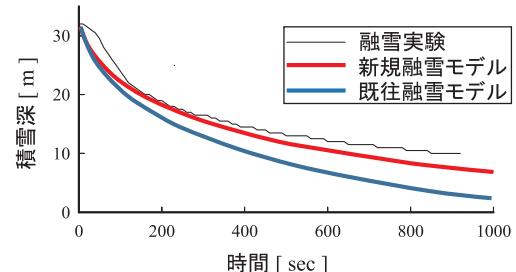


図-9 融雪実験と融雪モデルの解析結果

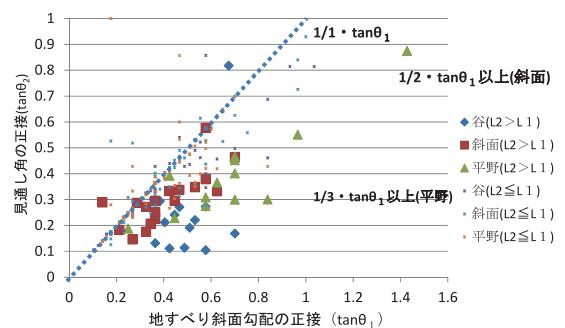


図-9 地すべり斜面勾配の静移設と見通し角の正接の関係

おそれのある地すべり箇所を的確に予測する必要がある。このため、流動化する地すべりの発生要因と発生箇所の予測を目的に、その発生箇所における地形・地質的特徴、運動形態等について調査と考察を行った。融雪を誘因として発生した地すべりの調査事例からは、当初は地すべり的な移動形態であったものが、移動とともに崩壊土砂と水の混合（スラリー化）が底面から生じ、下流に行くほどスラリー化が全体に進行して流体的な移動形態に移行したことが推定された事例、堆積域にあった積雪は土塊内部や底面に巻き込まれることなく周囲に押し出され、融雪水や降雨水の土塊側方への拡散が妨げられ、移動土塊内に水分が貯留されたことなどが推定された事例など、移送堆積域の地形や土地利用状況によって移動形態に差異が認められた。また、その発生箇所は、地すべり発生域下端が勾配約9°の谷地形に接し、谷への流入角度が70°以下であることの2点を満たしていることが条件として示された。また、流動化を引き起こす崩壊性地すべりが発生しやすい斜面の水文地質的特徴として、地下水帯となる透水性境界、地下水を貯めやすい形状の透水性境界が重要な要素として考えられた。

また、適切な避難行動を促進するためには、到達範囲を適切に推定し、その情報を住民に情報提供する必要がある。この予測に資するため、収集した約250の地すべり事例を対象として統計的分析を行った。検討に際しては、移送堆積域の地形に着目し、「谷」、「平野」、「斜面」の各タイプに分類した。その結果、地すべり本体の長さの10%を超える動きのあった地すべり事例においては、地すべりの舌部（地すべり堆積域末端）から地すべり冠頂部を見通した角度の最小値は、「平野」が約6°、「谷」が約8°、「斜面」が約10°であった。これらは、移送堆積域の各地形における地すべり移動土塊の最大到達地点を示すものであり、応急緊急時において最大到達範囲を予測する上での参考になるものと考えている。

3.4 道路のり面等における災害防止・減災のための技術

(1) 劣化過程を考慮した大規模岩盤斜面の評価・管理手法

大規模岩盤斜面における崩壊に対する評価の精度は依然低く、それに基づく管理手法も万全ではない。高い精度で大規模岩盤斜面の危険性を評価し管理するには、劣化過程を考慮した岩盤・斜面の長期的な管理が求められる。

本技術の研究にあたり、オーバーハングした崩落の発生形態をもつ岩盤斜面を対象として、遠心力模型実験、FEM解析、極限平衡法による解析、凍結融解の室内岩石試験等を実施し（図-10）、岩盤強度の劣化過程や岩盤内の引張破壊による亀裂進展の過程を明らかにした。また、凍結融解に伴う岩盤強度低下の近似と、極限平衡法による岩盤斜面の安全率計算から、岩盤斜面の長期的な安全率変化を安定性曲線として示し、凍結融解による劣化を考慮した岩盤斜面の安定性評価方法を提案した⁷⁾。これにより将来における岩盤斜面の安定性の予測と、計画的な岩盤斜面を評価・管理を可能になると期待される。

(2) 規模の大きな落石に対応する斜面対策工の性能照査技術

落石を確実に捕捉し、被害を防止するには、当該箇所で起りうる落石に対して十分な性能を有した対策施設の整備が求められる。一方で、斜面対策工の一つとして採用事例が増加している高エネルギー吸収型を含む落石防護工の性能評価には統一的な指標がなく、開発者独自の実験や解析により行われていることから、それらに求められる機能を明確化するとともに、性能照査技術を確立することが必要である。

本技術の研究にあたり、落石防護工の要求性能について、海外基準や他の構造物の要求性能等を参考に、その考え方の提案を行った。従来型ポケット式落石防護網に関して、従来設計法に関する実験的・解析的検討により簡易式の適用範囲等を整理した。また、落石防護工の落石作用に対する

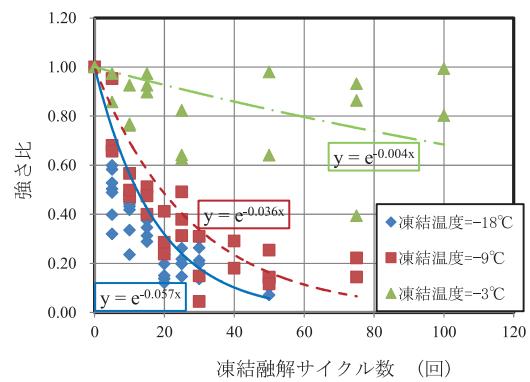


図-10 凍結融解サイクル数と強度比

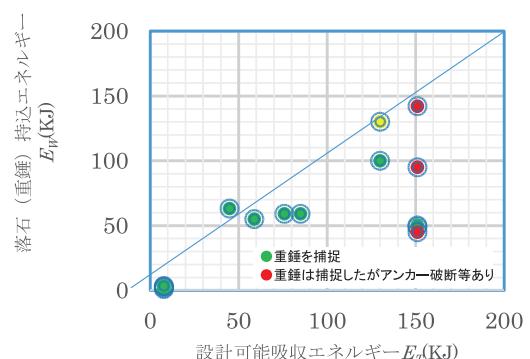


図-11 実規模実験における落石エネルギーと可能吸収エネルギー

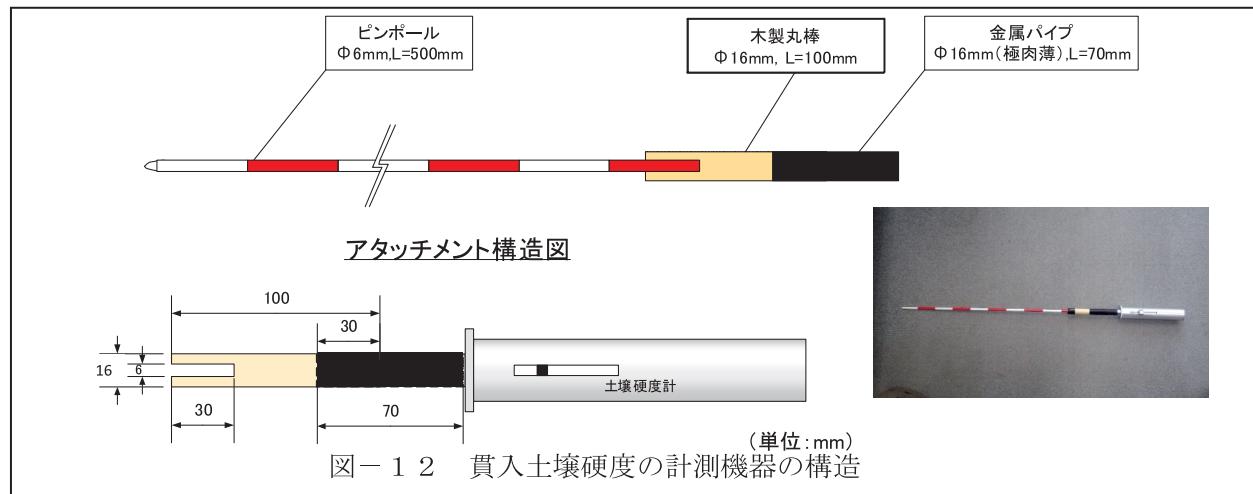
る部材・要素レベルおよび構造全体系の性能検証法について、実規模実験や数値解析結果等を踏まえた検討（図-11）により提案を行った。

これら提案した要求性能、性能評価法の活用により、落石防護柵の技術開発が促進し、かつ、確実な落石対策が講じられることが期待される。

（3）道路のり面斜面対策におけるアセットマネジメント技術

道路のり面の崩壊等による災害を確実に防止していくには、施設の適切な維持・更新が重要である。一方で、社会基盤の整備の進捗にともない、膨大な施設の管理が求められる中、アセットマネジメントの考え方を導入して、中長期的な展望を踏まえた上での効率的かつ効果的な防災対策を行い、斜面災害の減災を図ることが必要である。

本技術の研究にあたっては、まず直轄および自治体の道路斜面災害計617事例を収集し、道路のり面・斜面防災のあり方に関する施策検討の基盤となる災害データベースを構築した。収集した災害事例を順次分析し、分析の結果明らかとなった災害弱点箇所の抽出の視点および防災上の留意点をとりまとめた。これらについては、実務への応用に向け「災害事例から見た道路斜面防災・アセット管理上の留意点の手引き（案）」としてとりまとめている。さらに、特に老朽化によって災害を生じやすいと考えられる吹付のり面について、調査・設計・施工段階における確認事項、維持管理段階での点検および調査の考え方、健全度の判定の考え方および各段階での対応の考え方を「吹付のり面のアセットマネジメントの手引書（案）」およびのり面被覆構造物の背面地山の風化・土砂化を評価するための調査手法のマニュアルとして「貫入土壤計測手法（案）」（図-12）として取りまとめた。



3.5 大規模土砂災害に対する応急復旧技術に関する技術

（1）大規模土砂災害等に対する迅速かつ安全な機械施工を実現する技術

土砂災害が発生した箇所や地震や火山活動の発生が予見される状況下の応急対策・復旧工事の施工には危険をともなう場合がある。このため、過去には天然ダムの形成箇所や火山活動のために設定された警戒区域内での工事では、建設機械の遠隔操作による無人化施工が適用してきた。

一方で、無人化施工は一般に通常の有人施工と作業効率が低減するため、迅速な応急対策・復旧を実現するにはオペレータの作業を容易にし効率改善を図る技術が必要である。

本技術の研究にあたっては、ヒューマンインターフェースを活用した無人化施工技術における施工効率の改善およびシステムの提案、を目指すものとした。

まず、実機を用いた標準実験モデルを策定することにより、効率の低減の程度を定量化し、無人化施工における作業効率が、通常施工に比べ約43%低減する（2、3倍時間がかかる）ことを明らかにした。さらにインターフ



図-13 無人化施工のために新たに提案した操作用のモニター

エースや視覚情報量を搭乗時に近づけることにより（図-13）、無人化施工時の作業効率を改善できることを明らかにした。

（2）大規模な土砂災害に対応した新しい災害応急復旧技術

近年、豪雨や地震による道路盛土等の道路土工構造物の災害が大規模化し、交通機能が遮断され、復旧までに時間を要することで物流に支障を来すことや集落の孤立等の社会的影響が拡大する場合がある。被災によって遮断された交通機能は早期に回復することが求められ、復旧には被災現場の状況に応じて交通機能を効率よく且つ迅速に回復できる工法の選定が必要とされる。

本研究では大型土のうを用いた応急復旧に着目し、本復旧への適用性について検討することとした。大型土のうを用いた応急復旧は、施工性に優れる一方で、大規模な復旧（高盛土）においては構造物の安定性について未解明であった。このため、大型土のうを用いた応急復旧の変形挙動や安定性等を把握するため、動的遠心載荷模型実験より、その安定性を確認した。また、大型土のうと補強土を組み合わせた構造（図-14）により大型土のうを残置させてそのまま本復旧へ適用できるか検証するため、実際に現場で災害復旧を経験した道路管理者及び復旧作業者（施工業者）を対象にヒアリングを実施し、実現場の施工条件を考慮した動的遠心載荷模型実験を実施した。その結果、排水の有無、大型土のうの配置形態、のり面形状等の違いにより変形挙動の変化が見られたものの、大型土のうによる本復旧の有効性が確認された。これらの研究成果を基に、「大型土のうを用いた災害復旧対策工法施工の手引き（案）」を作成した。

4. おわりに

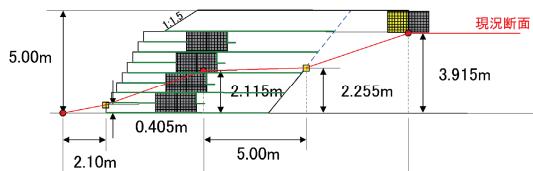
豪雨、地震および火山活動の高まりによって、発生頻度も少なくこれまで十分に対応されてこなかったような事例への対応が求められる機会が、今後増加していくことが想定される。また、既に防災を目的に講じられてきた道路のり面等の対策施設も適切な点検や維持・更新が図られなければ、岩盤崩落、落石、斜面崩壊による災害を招くおそれがある。

今年4月に発生した熊本地震によって発生した土砂災害における国道57号や阿蘇大橋の被災のように、社会基盤の高度利用の進歩によって、被災箇所の復旧が滞れば社会・経済活動に大きな影響がもたらされる可能性があるため、安全を確保したうえでの迅速な応急復旧工事の実施がより一層求められる。

今回、開発・提案した技術が、これまで対策や応急復旧工事が困難だった大規模土砂災害等の早期対策の一助となることが期待される。

【参考文献】

- 1) 田村圭司ら：深層崩壊の発生する恐れのある渓流抽出マニュアル（案）、土木研究所資料、第4155号、2008.11
- 2) 木下篤彦ら：深層崩壊の発生する恐れのある斜面抽出技術手法及びリスク評価手法に関する研究、土木研究所資料、第4333号、pp.3-4、2016.3
- 3) 石塚忠明ら：深層崩壊に起因する土石流の流下・氾濫計算マニュアル（案）、土木研究所資料、第4240号、2012.9
- 4) 大坂剛ら：桜島における土石流荷重計による単位体積重量測定、砂防学会誌、Vol.65、No.6、pp.46-50、2013.3
- 5) 高橋佑弥ら：平成26年8月口永良部島で発生した火碎流の到達範囲に関する基礎的研究、平成28年度砂防学会研究発表会概要集B、pp.392-393、2016.5
- 6) 泉山寛明ら：蒸発熱発生を考慮した火碎物による融雪量シミュレーション、平成28年度砂防学会研究発表会概要集B、pp.406-407、2016.5
- 7) 日下部佑基ら：凍結融解による岩石の強度劣化予測法、寒地土木研究所月報、No.745、pp.2-10、2015.6



限界状態に挑む ～耐震性能を基盤としたインフラ・システムの耐震技術の開発～

橋梁構造研究グループ 大住 道生

1. はじめに

わが国では、東海・東南海・南海地震、首都直下地震等、人口及び資産が集中する地域において大規模地震発生の切迫性が指摘され、これらの地震による被害の防除・軽減は喫緊の課題とされている。今後、多くの社会資本ストックが維持更新の時期を迎えるに当たり、耐震対策についても構造物の重要性や管理水準に応じて適切かつ合理的に実施することが求められている。さらに、わが国の観測史上最大の地震となった平成23年の東日本大震災では、大規模な津波や首都圏を含む広域的な液状化により激甚な被害が発生し、今後の大規模地震対策として、早急な対応が求められたところである。

本プロジェクト研究では、個々の構造物としてのみではなく、道路のような種々の構造物から構成されるインフラ・システムとしての地震時における機能を適切に確保するための技術開発を目的としたものである。構造物の重要性や管理水準に応じて適切な耐震対策を実施できるようするために、橋梁、盛土、トンネル、ダム等の構造物を対象に、耐震性能を基盤とした耐震設計法・耐震補強法の開発を行うことを研究の範囲とし、「構造物の地震時挙動の解明」、「多様な耐震性能に基づく限界状態の提示」、「耐震性能の検証法と耐震設計法の開発」を本研究の達成目標とした。さらに、東日本大震災を踏まえ、大規模な津波に対する道路橋の耐震対策や液状化判定法の高度化のための技術開発を追加して実施してきた。

本稿では、本プロジェクト研究の成果の中から橋梁、盛土、トンネルのインフラ・システムの地震時の被害を軽減し、その機能を確保することを目的として研究開発を進めた「構造物の限界状態の設定法」、「耐震性能を基盤とした耐震設計法・耐震補強法」の中から現場で活用いただきたい技術成果について紹介する。

2. 構造物の限界状態の設定法

2. 1 道路橋橋脚の限界状態

RC橋脚の地震時限界状態の評価手法の推定精度の向上を図ることを目的として、まず耐震性能の観点から限界状態を定義するとともに、土木研究所等における曲げ破壊型のRC橋脚に対する既往の正負交番繰返載荷実験の結果に基づき、限界状態に達する時の水平変位を推定する手法の提案を行った。正負交番荷重を受けるRC橋脚の限界状態の評価として、図-1に示す軸方向鉄筋のはらみ出し現象に着目し、限界状態に達する時のRC橋脚の水平変位の新たな評価式を提案し、実験結果との比較によりその推定精度の検証を行った¹⁾。

その結果、図-2に示すように、提案した新しい評価式は、従来の手法よりもRC橋脚の塑性変形能を精度良く推定できることを明らかにした。

2. 2 道路橋基礎の限界状態

橋梁基礎の地震時挙動の推定手法に基づく限界状態や、照査項目、照査値等をとりまとめて設計法として開発することを目的として、写真-1に示す既製RC杭基礎模型を用いた正負交番載荷試験を行った²⁾。

その結果、図-3に示すように杭基礎の損傷の進展特性、最終的な破壊性状を明らかにし、既製RC杭基礎としての地震時限界状態を確認した。

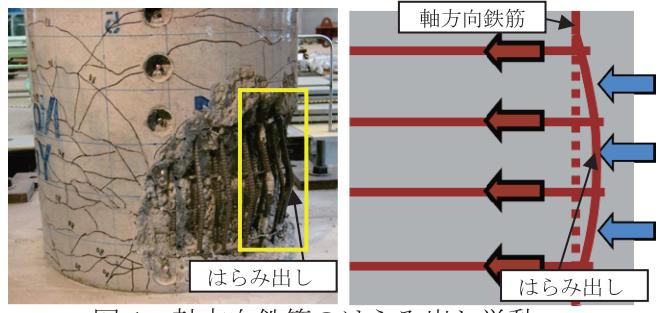


図-1 軸方向鉄筋のはらみ出し挙動

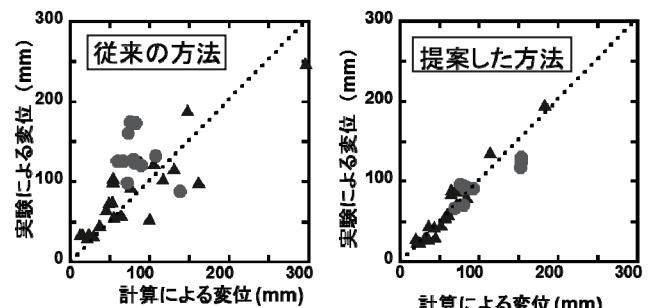


図-2 限界状態に達する時の変位の計算値と実験値との比較

2. 3 山岳トンネルにおける限界状態

道路トンネルは道路ネットワークの一部を構成する構造物であり、地震時における要求性能も他の構造物と同様の耐震性能を要求される。しかしながら、山岳トンネルはこれまで地震被害に関する事例が乏しく、具体的な検討が行われた事例もほとんど無いのが現状である。そこで、要求される耐震性能や、それに対応した限界状態等に関する検討として、道路橋示方書³⁾等に記載される耐震性能に関する記述を参考に、山岳トンネルの耐震対策を検討する上で要求されると考えられる耐震性能を仮定し、それに応じた限界状態を整理した。

表-1は、山岳トンネルにおいて要求されると考えられる耐震性能を仮定し、それに応じた限界状態の考え方を提案したものである。トンネルにおける構造物としての機能は、利用者が安全にトンネル内を通行できることであり、大別するとトンネルの構造安定性の確保と、利用者の安全性の確保の2項目が求められる⁴⁾。そのため、供用性と修復性について着目し、想定される地震に対してトンネルの重要度を踏まえた限界状態として提案した。

3. 構造物の耐震性能の検証法と耐震設計法の開発

3. 1 耐震補強における性能目標の応じた道路橋の補強方法の提案

耐震補強で目標とする性能に応じた橋の塑性化を考慮する部材の組合せと各部材の限界状態の設定の考え方、部材特性を踏まえた補強対策案の検討を行い、既設橋の耐震性能の評価事例と耐震補強の検討事例をまとめた。

耐震補強における橋の耐震性能の観点としては、表-2に示すように、耐震性能2を新設橋と同様に損傷を限定的なものに留めるためには基礎の補強が必要となるが、図-4に示すように基礎のもつ抵抗特性を評価し、限界状態を設定することで、基礎の補強が不要となり、橋全体として合理的な耐震補強が可能であることを示した。

表-2を踏まえ、既設橋脚の耐震性能評価法と耐震補強法の開発の1つとして、丸鋼鉄筋が用いられた単柱式RC橋脚供試体のRC巻立て補強鉄筋をアンボンドとした正負交番載荷試験を実施した(写真-2)⁵⁾。その結果、

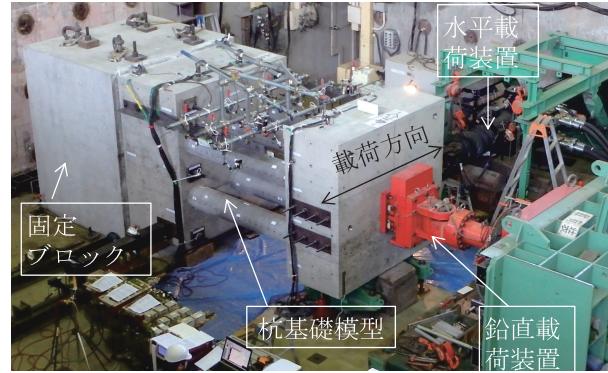


写真-1 供試体の設置状況

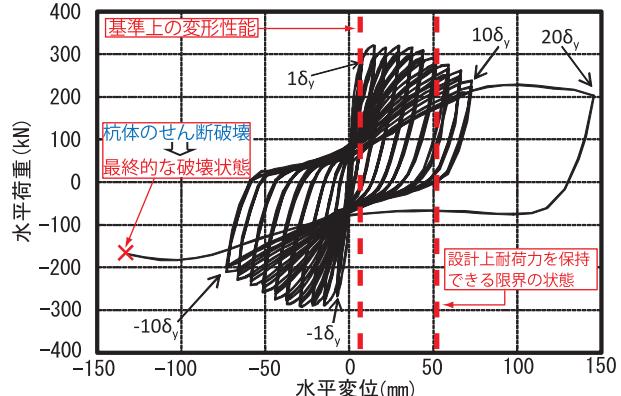


図-3 水平荷重-水平変位関係

表-1 トンネルにおける耐震性能と対応する限界状態の例

耐震性能	想定する耐震性能		限界状態
	耐震性能	概要	
耐震性能1	地震によってトンネルとしての健全性を損なわない性能	地震後も変状がないか、あっても地震前とほぼ同じ機能を有し、補修・補強を必要としないか軽微な修復で済むこと	地震によって覆工コンクリートの応力が弾性挙動範囲内であるか、軽微な引張ひび割れが発生する程度にとどまる
耐震性能2	地震による損傷が限定的なものにとどまり、トンネルとしての機能の回復が速やかに行き得る性能	地震により変状が発生し、対策を行わなければ将来、通行者・通行車両に対して危険を与える可能性があるものの、地震後もトンネルとしての機能を速やかに回復することができ、比較的容易な対策による補修・補強ですむこと	地震によって覆工コンクリートが圧縮限界に達して破壊に至るのが局所的なものであり、構造全体の耐力としては余裕を残した状態
耐震性能3	地震による損傷がトンネルとして致命的となるず、構造全体が崩壊しない性能	地震により変状が発生し、早晚、通行者・通行車両に対して危険を与える可能性があり、トンネルとしての機能を回復するためにには大規模な補修・補強等抜本的な対策が必要となるものの、トンネル構造としては崩壊していないこと	地震によって覆工コンクリートに圧縮破壊が複数個所生じたとしても、構造全体が崩壊せず、トンネル空間は保持されている状態

表-2 耐震補強における道路橋の耐震性能

橋の耐震性能	安全性	供用性	修復性
耐震性能1	落橋に対する安全性を確保する	地震前と同じ橋としての機能を確保する	左記の橋の機能回復措置が基本的に不要
耐震性能2	落橋に対する安全性を確保する	避難路や救助・救急・医療・消火活動及び緊急物資の輸送路としての機能を確保する	左記の橋の機能回復を速やかに行うことができる
耐震性能3	落橋に対する安全性を確保する		

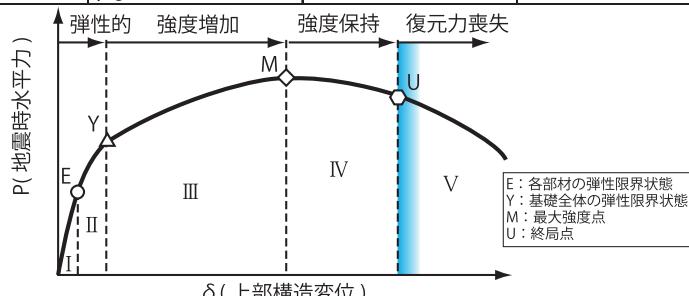


図-4 基礎に塑性化を考慮する場合の限界状態の考え方の例

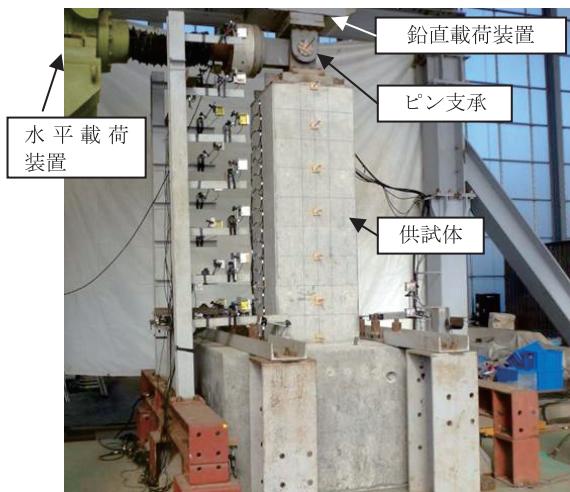


写真-2 セットアップ状況

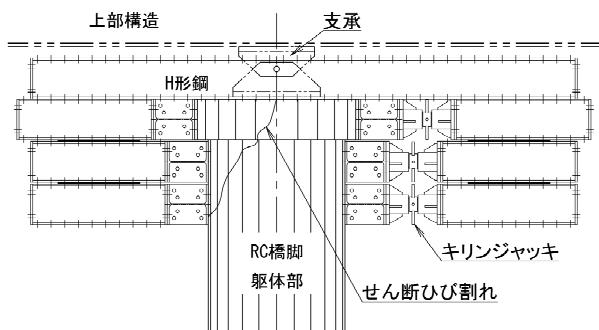


図-6 応急復旧工法の概要図

図-5 に示すように、軸方向鉄筋比が大きくなつても変形能が確保されていることから、補強鉄筋をアンボンドとした効果が得られていることを明らかにした。

また、地震時の被災事例が多く、交通機能への影響が大きいRC橋脚や橋台の橋座部のせん断破壊に対する応急復旧工法を提案するとともに、提案した橋座部の応急復旧工法の効果を検証するため、実大供試体を用いた実験を行った(図-6)⁶⁾。その結果、図-7に示すように、変位は進展しても、橋脚部にせん断破壊が生じた水平荷重以降も耐力の向上が確認され、H形鋼を補強部材とした応急復旧工法は、当初のせん断耐力の相当分は回復させることが可能であることを明らかにした。

3. 2 山岳トンネルに要求される耐震性能に応じた耐震対策の選定手法

新設および既設の山岳トンネルにおいて要求される耐震性能ごとの耐震対策の選定手法の提案するために、図-8に示すような耐震対策を選定するためのフローの考え方を整理した。そして、対策工を実施した山岳トンネルの模型実験^{7), 8)}および数値解析の結果から、対策工の効果を把握し、要求される耐震性能ごとの耐震対策の選定手法の考え方を提案した。

3. 3 地盤変状を受ける道路橋の判定手法

傾斜地等に立地する道路橋を対象として、地震による大きな地盤変状で下部構造自体が大きく移動する事象に対して、構造物の耐震安全性を高めるための方策を提示することを目的とした。地震時に道路橋に影響を及ぼすような変状を起こしやすい地盤条件の判定手法や大きな地盤変状が構造物の安全性

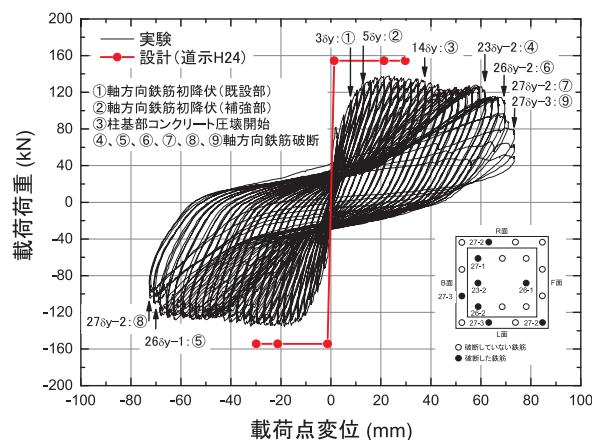


図-5 載荷点変位 (mm)

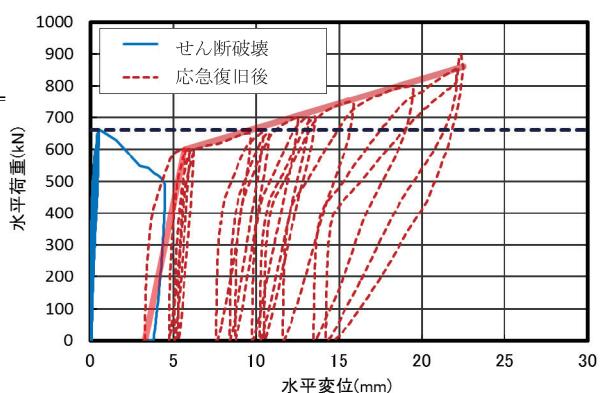


図-7 水平荷重-水平変位の関係

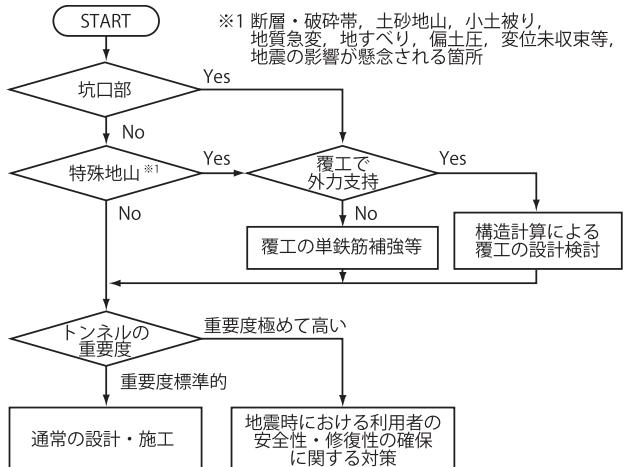


図-8 新設の山岳トンネルにおける耐震対策の考え方の一例

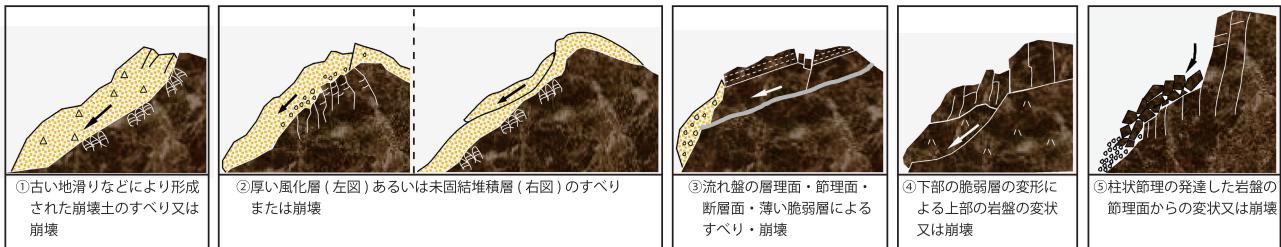


図-9 地震時の斜面地盤の主な変状パターン

に及ぼす影響を検討した。

地震による斜面変状事例(42事例)の収集・分析に基づき、図-9に示す5つの変状パターンに整理するとともに⁹⁾、流れ盤の岩盤地すべり事例の数値解析に基づく応力状態の評価手法も検討した。これらの成果を基に、「地盤変状の影響を受ける道路橋の耐震安全対策ガイドライン(案)」として取りまとめた。

3. 4 道路盛土の耐震補強方法

一般に、図-10に示したようにふとん籠によるのり尻補工は、地震時の抑え効果とともに排水効果を期待して行うものである。過去に行ってきました実験においては透水性の高い良質な砂質土を用い、盛土の耐震補強対策としての適用性を確認してきた。一方で、細粒分含有率の高い粘性土に関しては、透水性が低く保水性が高いことから、盛土内の短期的な排水効果が期待できないため、粘性土に関するふとん籠によるのり尻補強工が適用可能か検討した。

その結果、ふとん籠によるのり尻補強工の設計においては、擁壁工指針のもたれ式擁壁に準拠して、ふとん籠の大きさを設定するとともに、中詰め材のかさ密度に配慮が必要であること、また、一体構造にするとともに打込み杭を用いることで耐震性向上を図ることが望ましいこと等の考え方を示した。

4. 東日本大震災で被害を受けた構造物の対策方法

4. 1 液状化判定法の高精度化

東北地方太平洋沖地震により発生した広域的かつ多大な液状化被害は、社会に大きな影響を与えた。次なる大地震による液状化被害の軽減に向け、社会資本の液状化対策を進めていくことが喫緊の課題となっている。本研究は、我が国における多様な土質、地質構造を有する地盤を対象に、液状化に対する各種構造物の耐震性能をより合理的に評価し、危険性の高い構造物の的確な抽出に寄与すべく、液状化判定法の高精度化を図ることを目的として実施した。

地盤の液状化の発生および評価に及ぼす要因として、地質情報と地形区分等、細粒分含有率、乾燥密度、せん断剛性等の関係を分析するとともに、液状化の発生に及ぼす各種要因(地震動の継続時間等)の検討を行い、細粒分を含む砂の新たな液状化強度評価式を提案した。図-11に示すように、従来の評価手法に比べて評価精度が向上することを明らかにした¹⁰⁾。また、火山灰質土の液状化特性に関する地盤調査・解析、地盤データの質と量による地質構造の把握精度の検証を行った¹¹⁾。さらに、強震記録・遠心実験に基づく砂の年代効果の影響を把握するとともに、地中のせん断応力分布の推定方法を提案した。

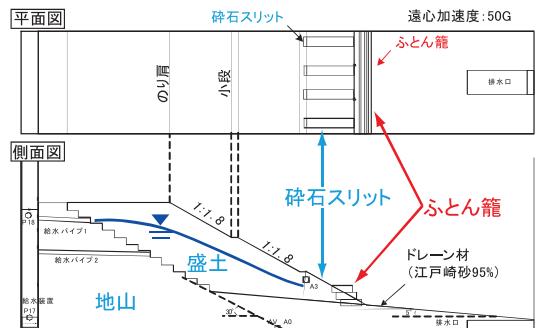


図-10 ふとん籠十碎石スリットを用いた対策工の例

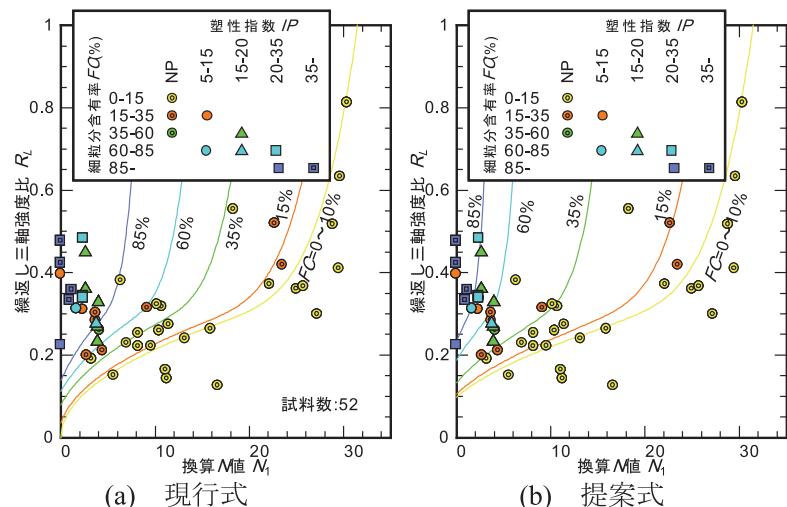


図-11 細粒分を含む砂に関する新たな液状化強度評価式

さらに、液状化判定のための地質構造推定における留意点のまとめ、液状化特性把握手法として図-12 の振動コーンの適用性の検証¹²⁾を行った。

4. 2 津波に対する道路橋の対策

東北地方太平洋沖地震では、津波による橋梁の被害が多数発生した。被害の中には上部構造が流出し、さらにその橋の架橋条件によっては応急的な措置による迂回路の仮設も難しく、緊急輸送路としての機能が速やかに回復させることができ難しかった事例もあった。今後発生が予想されている、東海・東南海・南海地震においても、大規模な津波が襲来する可能性が指摘されており、大規模災害発生時においても、避難路・緊急輸送道路として道路ネットワークの機能を早期に確保することが喫緊の課題となっている。本研究では、津波の影響を受ける橋の挙動に着目し、東日本大震災の被災経験を基に、津波による上部構造の流出メカニズムの解明をするとともに、津波に対する橋の抵抗特性の評価手法および主として既設橋を対象とした津波作用の軽減対策の開発を行った。

まず始めに、津波による上部構造の挙動を把握するために、長さ 30m の大型水路を用いた水路実験を行った(実物の 1/20 スケールで模型を作成(写真-3))。その結果、床版張出部が存在する 2 主桁断面や 4 主桁断面では、津波作用側の耳桁支点部に上向きの力、反対の支点部で下向きの力が作用し、津波作用側の床版が持ち上がるよう回転するような挙動をしていることを明らかにした(図-13)¹³⁾。

上記の知見を踏まえ、津波による力を軽減させることを目的としたフェアリングを設置した時の、支承反力や上部構造の挙動に与える影響と挙動メカニズムについて実験および解析により検討を行った(写真-4)¹⁴⁾。その結果、図-14 に示すように、半円フェアリングを設置すると鉛直反力を約 33% 小さくできることを明らかにした。

5.まとめ

本稿では、本プロジェクト研究の成果の中から「構造物の限界状態の設定法」、「耐震性能を基盤とした耐震設計法・耐震補強法」の中から現場で活用いただきたい技術成果について紹介した。これら得られた知見は、平成 24 年度に改定された道路橋示方書³⁾や各種便覧等(例えば 4)、15)、16)に提案し、反映されている。また得られた成果を、土木研究所資料(例えば 17)-19)等にまとめている。今後は、本プロジェクト研究で提案した性能を

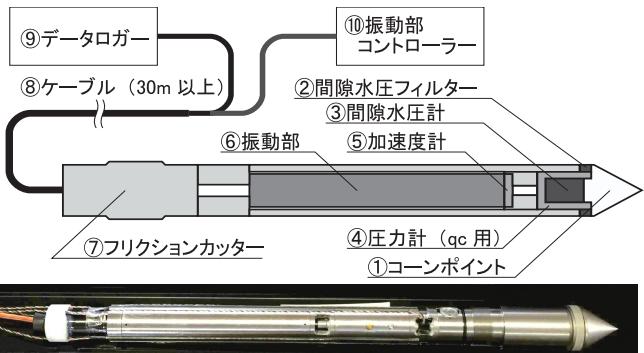


図-12 振動コーンの構成図

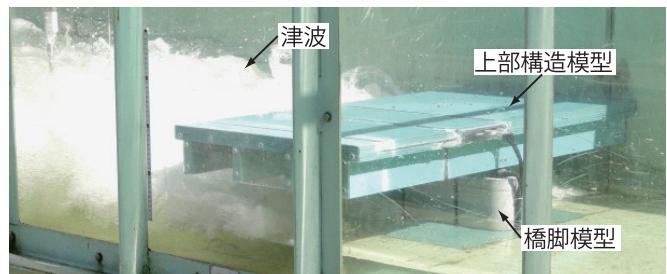


写真-3 津波が作用する直前の映像

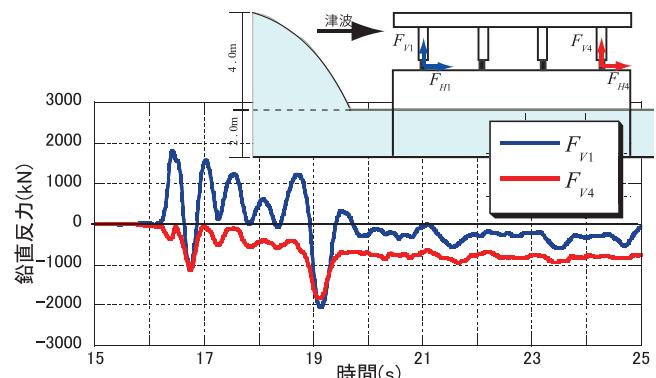


図-13 鉛直反力の計測結果(4 主桁断面)



写真-4 半円フェアリングを設置した模型

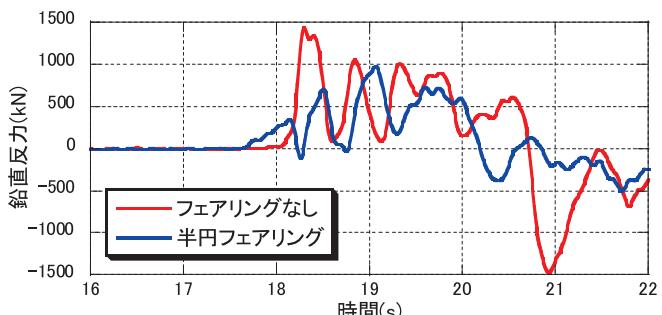


図-14 鉛直反力の計測波形(津波作用側)

基盤とした構造物の耐震性能評価技術をベースに、次期プロジェクト研究では、引き続き、橋、土工構造物、液状化等を対象に、被害最小化及び早期復旧に着目した耐震技術の開発につなげていく予定である。

地震時の被害軽減対策にあたり、本稿で紹介した内容が一助となれば幸いである。

【研究成果】

- 1) 星隈順一、堺淳一、小森暢行、坂柳皓文：鉄筋コンクリート橋脚の地震時限界状態の評価手法に関する研究、土木研究所資料、4262号、2013
- 2) 岡田太賀雄、鬼木浩二、河野哲也、星隈順一：既製RC杭基礎模型を用いた正負交番載荷試験、第18回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp.27-34、2015
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書（V耐震設計編）・同解説、丸善出版、2012
- 4) 日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧【本体工編】、丸善出版（株）、2015
- 5) 澤松俊寿、岡田慎哉、角間恒、西弘明：軸方向鉄筋比の小さい鉄筋コンクリート橋脚の水平方向の抵抗特性に関する実験的検討、構造工学論文集、Vol.60A、pp.144-154、2014
- 6) 榎本武雄、篠原聖二、星隈順一：RC橋脚の橋座部周辺で生じたせん断破壊に対する応急復旧工法に関する実験的研究、第17回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp.269-276、2014
- 7) 日下敦、河田皓介、砂金伸治：内巻き補強した山岳トンネル覆工の耐荷力に関する二次元載荷実験、トンネル工学報告集、第25巻、No.I-6、pp.1-6、2015
- 8) 河田皓介、砂金伸治、日下敦、真下英人：変状対策工を適用した山岳トンネルの耐震性に関する実験的考察、トンネル工学報告集、第23巻、pp.277-284、2013
- 9) 浅井健一、日外勝仁、佐々木靖人：地震時に構造物基礎の安全性に影響を及ぼすような斜面地盤変状のパターン、地盤工学会関東支部発表会、2012
- 10) 谷本俊輔、川口剛、佐々木哲也：鉛直アレー記録に基づく埋立地盤の液状化発生深度の評価、日本地震工学会論文集、2015
- 11) 江川拓也、山梨高裕、富澤幸一：火山灰質土の液状化特性に関する検討－北海道における調査事例報告－、日本地震工学会論文集、2016
- 12) 阿南修司：ボーリングによる液状化層判定精度について、平成26年度日本応用地質学会研究発表会、2014
- 13) 中尾尚史、張広鋒、炭村透、星隈順一：上部構造の断面特性が津波によって橋に生じる作用に及ぼす影響、土木学会論文集A1（構造・地震工学）、Vol.69、No.4（地震工学論文集第32巻）、I_42-I_54、2013
- 14) 中尾尚史、張広鋒、炭村透、星隈順一：フェアリングを設置した橋梁上部構造の津波の作用による挙動メカニズム、土木学会論文集A1（構造・地震工学）、Vol.70、No.4（地震工学論文集第33巻）、pp.110-120、2014
- 15) 日本道路協会：斜面上の深基礎基礎設計施工便覧、丸善出版、2012
- 16) 道路ストックの総点検 点検要領～道路のり面工・土工構造物編～（平成25年2月国土交通省通達）、2013
- 17) 玉越隆史、白戸真大、星隈順一、堺淳一：既設橋の耐震補強設計に関する技術資料、土木研究所資料、第4244号、2012
- 18) 七澤利明、西田秀明、河野哲也、木村真也、遠藤繁人：柱状態基礎の要求性能及び安定照査法に関する研究、土木研究所資料、第4273号、2013
- 19) 佐々木哲也、石原雅規、谷本俊輔、増山博之：東北地方太平洋沖地震における液状化を踏まえた液状化判定法の検討、土木研究所資料、第4280号、2014

激甚化する水災害の防止・軽減に向けて

技術推進本部長 田村 敬一

1. はじめに

近年、局地的豪雨等により国内外において水災害が頻繁に発生し、その原因として地球温暖化の影響が懸念されている。IPCC 第四次報告書によれば、水災害を引き起こす強い雨が降る頻度の上昇、台風の凶暴化及びそれに伴う高潮の激甚化等が予測されている。そのため、地球温暖化による気候変化が水災害に及ぼす影響について把握するとともに、短時間急激増水（Flash Flood）に対応できる洪水予測技術の開発が求められている。

また、洪水災害を防御するためには、河川堤防の治水安全性を確保することが重要であるが、長大な構造物である河川堤防について迅速かつ効率的に対策を進めるには、河川堤防をシステムとして捉え、浸透安全性及び液状化を含む耐震性を評価する技術の開発、並びに、より低コストで、効果的な対策の技術開発が必要である。先の東日本大震災による被災経験を踏まえ、今後の河川管理においては、洪水や高潮だけでなく津波を計画的防御の対象として新たに考慮し、河川津波による流れ等に起因する災害の対策を行うことも重要である。

さらに、計画規模や施設能力を超える大規模な水災害が発生した場合の被害をできるだけ軽減することが重要であり、洪水氾濫時の被害を軽減するための対策技術、水災害からの迅速な復興支援のための技術開発等が求められている。

以上のような背景を踏まえ、①地球温暖化が洪水・渴水流出特性に与える影響の予測及び短時間急激増水に対応できる洪水予測技術の開発、②堤防をシステムとして捉えた浸透・侵食の安全性及び耐震性を評価する技術並びに効果的・効率的な堤防強化対策技術の開発、③途上国における水災害リスク軽減支援技術の開発、の3点を達成目標とするプロジェクト研究「気候変化等により激甚化する水災害を防止、軽減するための技術開発（平成23～27年度）」を実施した。以下では、本プロジェクト研究の概要を紹介する。

2. 気候変動評価のための比較 SPI の開発

2. 1 はじめに

気象学的な乾湿の指標として広く利用されている指標の一つとして SPI（Standardized Precipitation Index）がある。しかし、同一地点の現在と将来の気候状態を比較する場合、両者に大きな降水量の変化があっても、個別に計算された従来の SPI による両者の比較では差が非常にわかりにくい。そこで、両者の気候状態の差を容易に比較できる比較 SPI “comparative SPI (cSPI)” を開発した¹⁾ので紹介する。

2. 2 比較 SPI の計算方法

現在気候実験の降水量データからガンマ分布関数を求め、標準正規分布に変換し、従来の SPI を求める。次に、上記関数に将来気候実験の降水量データを入力して、現在気候実験を基準とした将来気候の比較 SPI を求める。

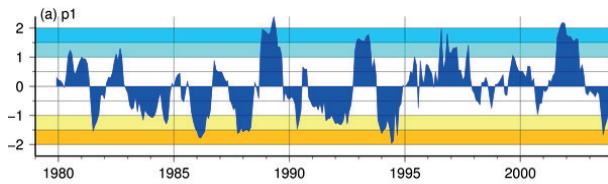


図-1 現在気候実験 12ヶ月規模の SPI

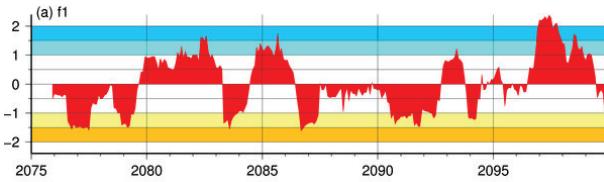


図-2 将来気候実験 12ヶ月規模の SPI

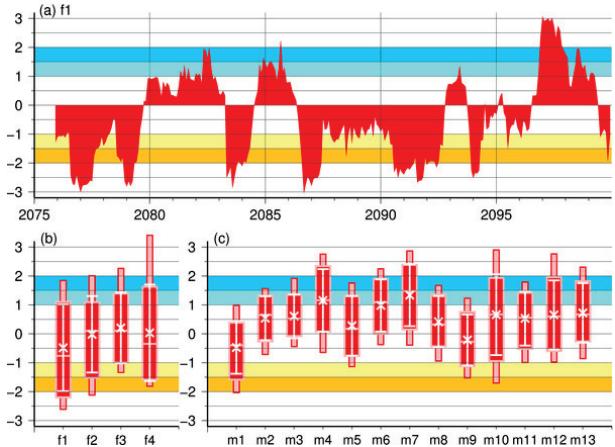


図-3 現在気候実験を基準とした将来気候実験の 12ヶ月規模の比較 SPI（新たな指標）

2. 3 従来方法と新たな方法との比較

対象流域は、フィリピン国パンパンが川流域のアンガトダム上流とし、水平解像度 20km の超高解像度大気気候モデル MRI-AGCM3.2S 及び CMIP5 のうち高解像度な 13 モデルの現在気候実験(1979～2003 年)と RCP8.5 シナリオを元にした将来気候実験 (2075～2099 年)を用いた。

12ヶ月規模の現在気候実験の SPI 時系列を図-1、将来気候実験の SPI 時系列を図-2 に示す。SPI や比較 SPI の値が +1 以上であれば気象学的洪水、-1 以下であれば気象学的渇水を示す。この将来気候実験では降水量が減少し年々変動が増加を示しているのだが、両図の比較からは平均値の減少などは判読できず、その中央値は 0 で年々変動を示す標準偏差の幅は ±1 に収まる（図省略）。図-1 の現在気候実験を基準として図-2 と同じ将来気候実験について求めた比較 SPI 時系列を図-3(a)に示す。降水の減少に伴って気象学的渇水の頻度・強度とも強まることが分かる。下段の箱ひげ図の×は平均値、エラーバーは標準偏差の幅、箱の横線は下から 6.68、15.87、50、84.13、93.32 パーセンタイル値で、中央値から -1.5σ 、 -1σ 、0、 1σ 、 1.5σ に相当する。図-3(b)は MRI-AGCM3.2S による将来の海面水温の違い、図-3(c)は CMIP5 モデルの違いによる不確実性を示す。図-3(a)の時系列は図-3(b)の左端の実験に対応する。MRI-AGCM3.2S の 4 種の海面水温を用いた将来気候実験では平均値は現在気候実験とほぼ変わらないものの、年々変動の増加のために気象学的渇水や洪水が増える可能性が示された。また、CMIP5 では平均すると年々変動の幅はほぼ変化せず、将来の平均状態が湿潤側にシフトする可能性が高いことを示している。以上のように比較 SPI を利用することで気候変動に伴う気象学的渇水・洪水の変化をわかりやすく表現することが可能となった。

3. アンサンブル洪水予測システムによる流量予測

3. 1 はじめに

近年、局地的豪雨の発生に伴う洪水被害が国内外で頻発し、特に、発展途上国のように、気象水文情報の乏しい地域で、短時間急激増水が発生すると多数の死者を伴う甚大な被害が発生している。このような洪水被害を軽減するために、限られた時間で降雨の時空間分布を予測・把握し、その情報をもとに河川の流出や氾濫形態までを一体的に予測することが求められている。数時間先の予測に対して、既存の流量予測に比べ精度の高い情報を提供できると考えられるアンサンブル洪水予測システムを開発したので紹介する。

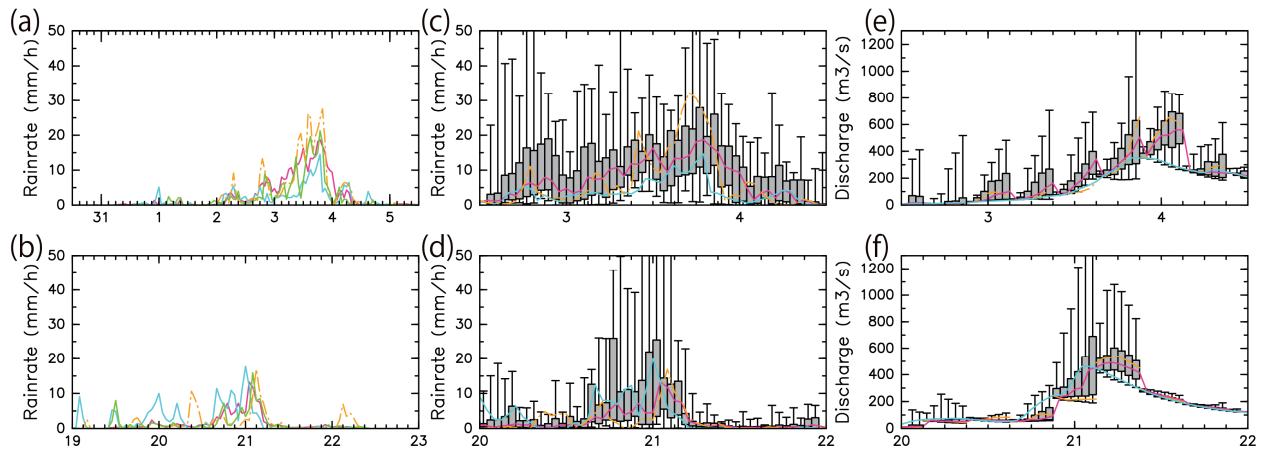


図-4 台風第 12 号(a)と台風第 15 号(b)による雨量の時系列 (ハイエトグラフ) (mm/h)

各線は、決定論的予報（オレンジ）、MSM オリジナル（緑）、アンサンブルメディアン（ピンク）、レーダー観測（水色）である。なお予報値は 6 時間予報値である。横軸の数字は日付（UTC）を表す。(c)、(d)は同様にアンサンブル予報の情報を含めた雨量の時系列（ハイエトグラフ）である。影をつけたボックスは 25%～75% の分布、縦棒はすべてのアンサンブルメンバーの範囲、ピンク折れ線はアンサンブルメディアン、オレンジと水色は(a)、(b)と同じく決定論的予報とレーダー観測値である。(e)、(f)は流量予測値（ハイドログラフ）である。凡例は(c)、(d)と同様である。

3. 2 アンサンブル洪水予測システム

領域モデル WRF とアンサンブルカルマンフィルタ LEKTF を用いて領域アンサンブル予報を行い、得られた予報雨量を降雨流出氾濫モデル（RRI モデル）に入力し、流出計算を行うものである。

3. 3 適用結果

京都府日吉ダム流域（流域面積 320km²）を対象に 2011 年台風第 12 号（8/31～9/6）及び第 15 号（9/19～9/23）による関西地域の降水予報を行った^{2),3)}。図-4(a)、(b)に日吉ダムの流域平均雨量の時系列（ハイエトグラフ）を示す。図-4(a)の場合、いずれの降水予報値もレーダー観測結果と傾向は一致しているが、過大評価である。特に決定論的予報は過大評価の傾向が著しい。21 アンサンブルメンバーの予報結果を含めた予測降水量を四分位偏差で表示したハイエトグラフを図-4(c)、(d)に示す。図-4(c)では、アンサンブル予測のメディアンがほぼすべての期間で観測地に対して過大評価であるが、多くの観測値がアンサンブル予測の 25%～75% 分位に含まれていた。図-4(d)では、すべての観測値がアンサンブル予報の 25%～75% 分位に含まれていた。6 時間毎に得られる予報雨量とレーダー観測雨量により計算したハイドログラフを図-4(e)、(f)に示す。決定論的雨量予報による流出予測は観測値から大幅に外れた予測流量をしばしば示すが、アンサンブル予報による流出予測流量は観測値により近い値を示し、観測値は 25%～75% 分位に含まれている。

このように、アンサンブル予測をすることにより、従来の決定論的手法と比較し、予測精度が向上することが確認できた。

4. 堤防システムの浸透安全性・耐震性評価技術に関する研究

4. 1 堤防及び構造物周辺堤防の被災メカニズムの解明

河川堤防は防災上重要な構造物であり、長大であることから、浸透安全性・耐震性の効率的・効果的な向上が求められている。本研究は、堤防を構成する土堤、構造物周辺堤防、基礎地盤について、

一連のシステムとして、浸透安全性・耐震性を評価する技術を提案することを目的としている。本研究では、以下のとおり堤防の浸透安全性及び耐震性、構造物周辺堤防の浸透安全性の3つの課題を取り組んだ。

河川水位の上昇や降雨によって、河川堤防の川裏側ののり尻に小規模な崩壊が発生した後、徐々にのり面上部に破壊が進行する場合がある。このような進行性破壊は、現状の堤防の浸透安全性検討の中で直接的に検討されていない。そこで、進行性破壊の発生メカニズムを模型実験や浸透流解析により解明するとともに、材料規定とのり尻付近の間隙水圧分布を考慮した円弧すべり法による評価方法を提案した。

2011年東北地方太平洋沖地震では、堤体自体が液状化することによる変状が数多く発生した。圧密沈下によって堤体の飽和領域が増えるだけでなく、密度が低下することも大きな変状に繋がる可能性があることを遠心模型実験により示した。また、図-5に示すように、堤体の液状化及び基礎地盤の液状化による堤防の沈下量をより高い精度で計算することができる方法を提案した。この方法は、河川構造物の耐震性能照査指針Ⅱ. 堤防編（国土交通省水管理・国土保全局治水課、2016.3）の改定に反映された。

2011年東北地方太平洋沖地震及びその後の出水による樋門周辺堤防の被災事例について、東北地盤と共に、開削調査を実施し、その被災メカニズムを分析した。本事例に係る模型実験や浸透流解析の結果等も踏まえ、函体底面の空洞や遮水矢板の止水性を考慮した樋門周辺堤防の浸透安全性評価方法を提案した。

4. 2 堤防基礎地盤の複雑性を考慮した合理的調査手法の提案

河川堤防は連続的な土構造物であり、その安全性評価にあたっても連続的な、切れ目のない空間情報に基づいて評価する必要がある。従来のボーリング調査は空間密度が低く、堤防システムの不均質構造の把握が困難であった。これに対し本研究で開発と適用を推進してきた河川堤防統合物理探査技術⁴⁾では、数m程度の異常構造も把握できることがわかつてき。さらに空間領域だけでなく、時間領域での堤防内部物性構造の変化を4次元的に可視化する技術を開発した。これにより堤体内の不飽和透水特性の空間分布を詳細に推定する原位置試験法の実現が可能となった（図-6）。今後は室内試験等と組み合わせ、不飽和・現場飽和透水特性の時空間変化の合理的推定法と、それに基づいた浸透安全性の空間的評価技術の開発を推進する予定である。

4. 3 地形と堤防の平均動水勾配及び被災履歴を用いた堤防基礎地盤浸透安全性評価手法の開発

国土交通省による全国の直轄河川堤防の点検結果から、安全性の不足する箇所がかなり存在することがわかり、対策の実施に当たっては優先順位を行うことが課題である。そこでこれまで実施してきた河川堤防の浸透に関する概略評価方法⁵⁾をベースに、地形と堤防の平均動水勾配及び被災履歴を用いた、河川堤防基礎地盤の浸透安全性概略評価手法を開発した。

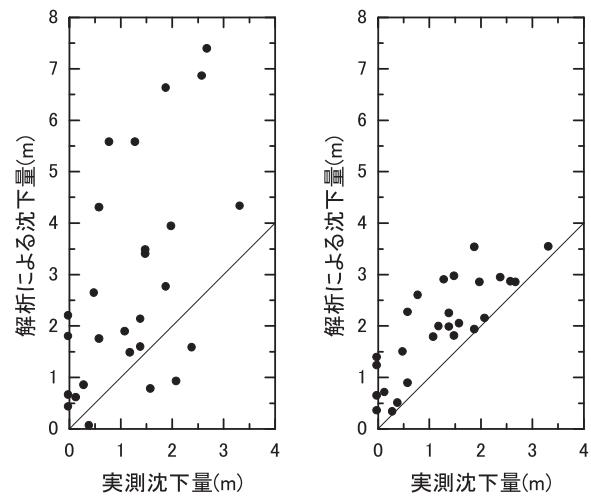


図-5 地震による堤防の実測沈下量と解析沈下量の関係（左：従前の方法、右：提案の方法）

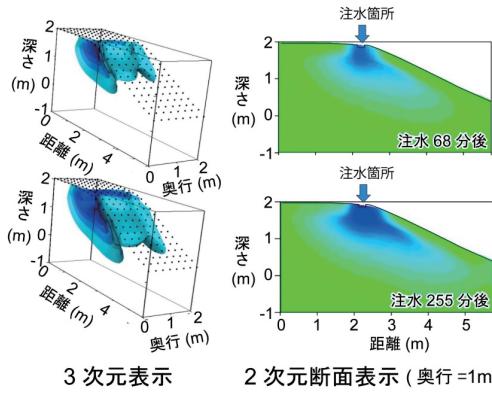


図-6 堤体内降雨浸透過程の経時変化 3D モニタリング例

今回開発した方法では、面的に存在する情報は任意の場所でデータを取得することで、調査の精度を向上させた。地質（土質）情報については、地形と表層地質（基礎地盤土質）との関係がある程度認められる⁶⁾ことから、地形種の区分により代用した。計画高水位時における堤防の平均動水勾配は、航空レーザーデータの利用によって任意の地点に関してデータを取得する。高水位継続時間は、近接した区間では大きな違いはないと考えられるため、堤防の弱点箇所抽出において重要視せず、考慮しないこととした。被災履歴については、地形と基盤漏水被災履歴との関係を分析し、単一の河川において地形種ごとの相対的な被災のしやすさを「被災度」⁷⁾として指標化し、安全性評価の検討に用いた。ある河川において被災度が1より大きいほど被災しやすく、被災度が0の地形種は被災履歴がないことを示す。

図-7は、米代川下流部及び天竜川下流部の沿川の、100m毎の地点について、平均動水勾配と地形種別に与えられる被災度によってプロットしたものである。あわせてその地点の被災履歴の有無をシンボルで示した。被災履歴を包括するように判別線を赤点線で図示したところ、被災しやすい地形種ほど、低い動水勾配で被災が発生していることが判った。このことから判別線からの距離が河川堤防基礎地盤の浸透安全性評価指標として有効であると考えられる。これらの結果をふまえ、「地形を用いた河川堤防基礎地盤の浸透安全性調査・評価方法」をとりまとめる予定である。

5. 河川堤防の浸透・地震複合対策技術の開発

直轄管理区間の堤防では、各種指針に基づいて浸透安全性・耐震性の照査が実施されており、安全性の不足する区間が相当程度存在する。また、2011年東北地方太平洋沖地震では、堤体の液状化により大きく変状する事例が多く確認された。そこで、堤防の質的向上に迅速かつ効率的に対応するため、浸透対策のコストダウンや堤体の液状化を含む効果的な地震対策、洪水と地震の対策を両立させる複合対策について提案することを目的とし、堤防の浸透対策実施箇所の継続モニタリング、洪水時の盤膨れ対策の一環である堤内基盤排水対策と基礎地盤及び堤体の液状化対策について模型実験や数値解析等を実施した。

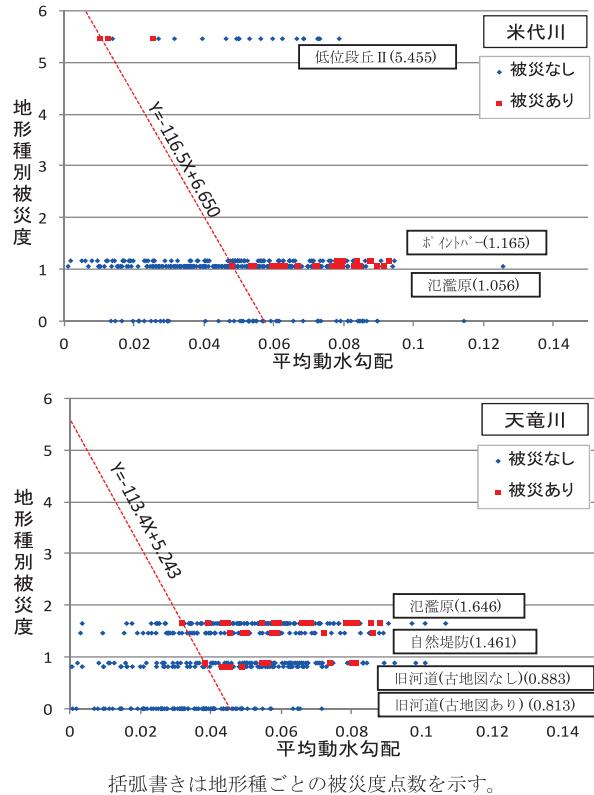


図-7 米代川（上）と天竜川（下）の堤防基礎地盤漏水被災と評価指標との関係

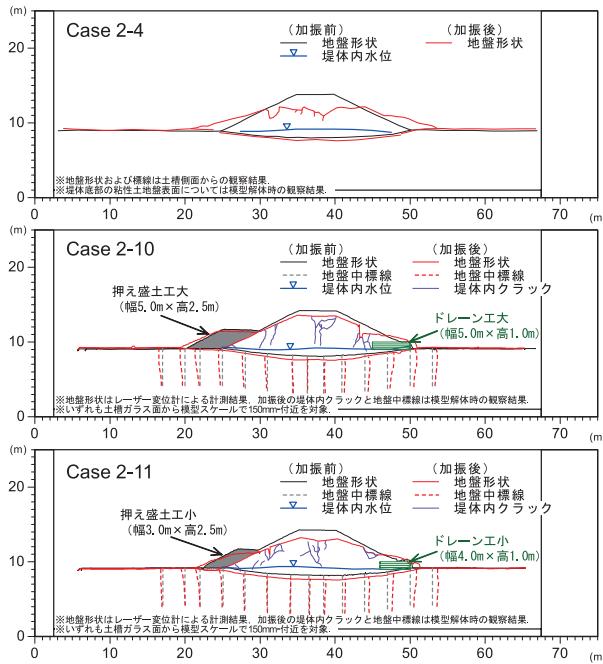


図-8 堤体液状化対策に関する遠心模型実験の結果

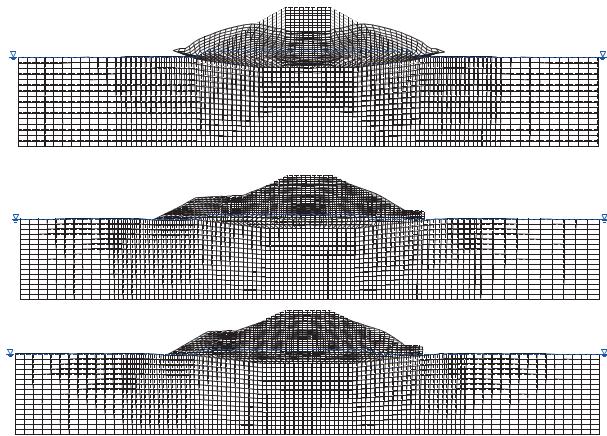


図-9 堤体液状化対策に関する遠心模型実験の解析例（上から Case2-4、2-10、2-11）

浸透対策（ドレーン工と川表遮水シートを併用した対策実施箇所及びドレーン工の対策実施箇所）の現地モニタリングの結果、短時間集中豪雨に対する対策効果を確認することができた。

川裏側のり尻付近において基礎地盤の透水層

の圧力を穏やかに抜くことにより盤膨れを抑制する堤内基盤排水対策の効果や適用限界を模型実験等により確認し、その成果をマニュアルとして取りまとめた。ただし、本対策を実施することにより、堤体近傍に水を集めることになるため、本対策の採否及び設計・施工は慎重に行われる必要がある。

液状化対策については、対策工法自体が確立されていない堤体の液状化対策に関する模型実験を実施し、図-8 に示すようにその効果を確認した。その上で、基礎地盤の液状化対策も含め、設計で広く使われている地盤変形解析の対策済み堤防への適用性を確認した（図-9）。これらの成果を踏まえ、「河川堤防の液状化対策工法設計施工マニュアル（案）」の改定版となる「河川堤防の液状化対策の手引き」をとりまとめた。

6. 河川津波に対する河川堤防等の被災軽減に関する研究

6. 1 研究概要

東日本大震災による津波は、海岸部のみならず、河川を遡上・流下する津波（河川津波）となって、河川堤防等の河川管理施設や沿川流域に甚大な被害をもたらした。写真-1 に河川津波による堤防の被害状況を示す。このため、今後の河川管理においては、これまでの洪水や高潮だけではなく、津波についても計画的防御の対象として位置づける必要性が指摘される⁸⁾とともに、津波に対応した堰・水門等の設計や操作のあり方等について基本的な考え方⁹⁾が示された。そこで本研究では、河川津波を設計外力とした場合の河川堤防等の効果的・効率的な対応策について水理的に検討することを目的とした。

6. 2 主な研究成果

河川津波の影響について水理模型実験等により検討した。主な研究成果を以下に示す。

①河川工作物の設計手法について



写真-1 河川津波による堤防の被害状況

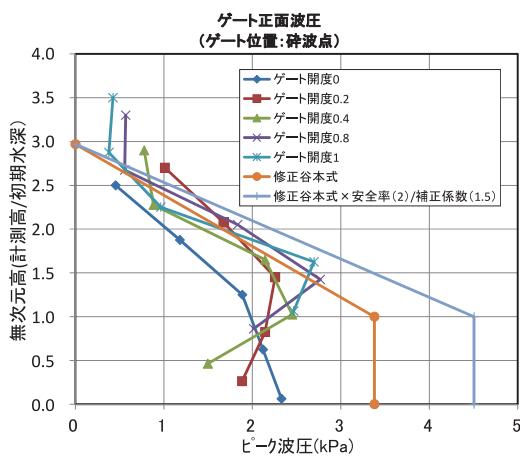


図-10 実験結果と修正谷本式

より群体中央に比べ端部に作用する力が大きいこと、津波作用時（非定常）には、定常流と比較して特に揚力が卓越することを確認した。また、護岸の端部処理として対揚力の高いブロックの形状や重量の選定等によって被害軽減効果が発揮されるものと考えられる。

7. 水災害からの復興までを考慮したリスク軽減手法に関する研究

災害による被害を最小化するためには、あらかじめ起こうとする災害を設定し、発災から復旧復興段階までの時系列に応じて発生しうる事象を定量的に把握した上で、必要な事前対策を検討しておく必要がある。しかし、途上国では地域の自然環境・社会環境に関するデータの蓄積が不十分であるため、このような科学的な根拠のある事前対策の検討が難しい。このような現状に対して、本研究では、①現状把握、②リスクアセスメント、③地域インパクト解析、④地域での対応戦略の策定、⑤危機管理計画の作成、⑥危機管理計画の共有という6つのステップにより、科学的な根拠に基づきコミュニティ自らが主体的に洪水に対する危機管理計画を作成する方法を提案した。これらの6つのステップは、事業継続マネジメントシステムに関するISO22301 (JIS Q22301) を参考にしており、コミュニティメンバーがリスクアセスメント結果に基づき洪水による地域への影響を理解した上で、地域機能を継続させるために取るべき対応を議論できるようにすることを目指している。

さらに、アジアの洪水常襲地帯の一つであるフィリピン共和国ルソン島のパンパンガ川流域に位置するブラカン州カルンピット市の洪水常襲地帯のコミュニティを対象とした実践活動を行い、提案手法の検証を行った（図-12）。洪水リスクアセスメントにおいては、ICHARMで開発された降雨流

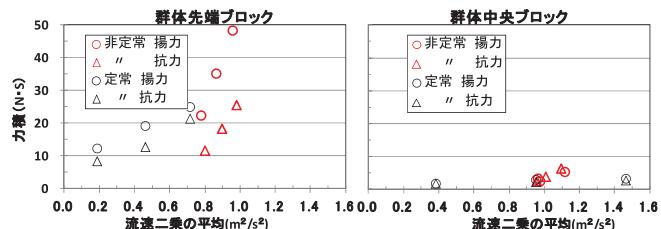


図-11 護岸ブロックへの作用力

実験より直線河道部に設置された堰のゲートが全閉の時に正面から津波を受ける最も単純な条件での最大波圧は、ソリトン分裂の影響を考慮している修正谷本式の適合性が高いことを確認した。実験結果と修正谷本式の計算結果を図-10に示す。また、河道平面形状（湾曲度等）や断面形状、ゲート開度が異なる条件では、最大波圧だけでなく波圧の分布形状が異なることを留意する必要があることを確認した。また、本成果は河川工作物である堰・水門ゲートの設計の基本となる「ダム・堰施設技術基準（案）」の改訂に向けた検討委員会等に反映された。

②護岸ブロックの設計・対策手法について

河川津波遇上時に護岸ブロックに作用する揚力・抗力について検討した。実験結果を図-11に示す。実験

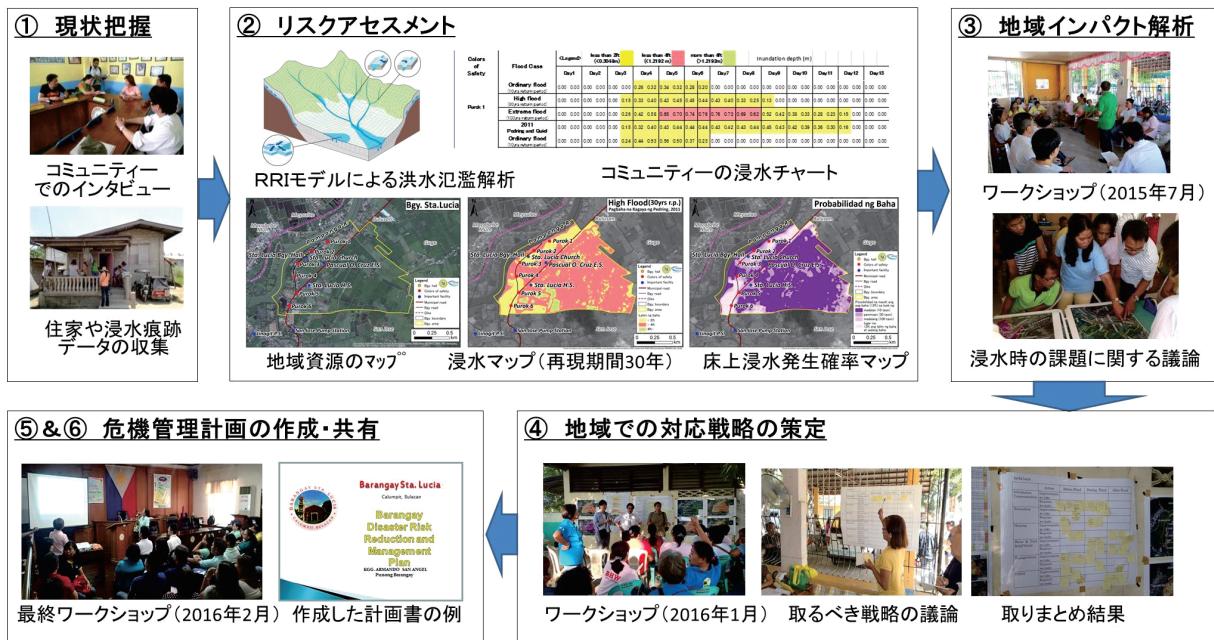


図-12 コミュニティーレベルでの危機管理計画作成の流れ

出氾濫モデル（RRI モデル）を用いた洪水氾濫解析を行い、コミュニティーごとの地域資源マップ、再現期間別の浸水マップ、床上浸水発生確率マップ等の被害確率マップ、時系列の浸水状況を示した浸水チャートの作成を行った。また、市内の特に脆弱な 2 つのコミュニティーでは、コミュニティーの災害対応関係者によるワークショップにおいて浸水パターンに応じた地域での課題や取るべき対応戦略についての議論を行い、コミュニティー独自の危機管理計画書の取りまとめも行った。最終的には、市内の全てのコミュニティーの関係者を招いたワークショップを開催し、これらの一連の活動についての成果の共有を図るとともに、対象地域だけではなく広く本手法を他地域や他流域に根付かせるためのマニュアルの作成等も実施した。

8. おわりに

- 本プロジェクト研究より得られた主な結論は以下のとおりである。
- ・気候状態を比較する場合、両者の気候状態の差を容易に比較できる新しい SPI “comparative SPI (cSPI)” を開発した。
 - ・従来の決定論的雨量予報より降水予報精度の高いと考えられるアンサンブル洪水予測システムを開発した。
 - ・堤防の浸透安全性及び耐震性、構造物周辺堤防の浸透安全性に関して、被災事例の分析や模型実験、数値解析等により被災メカニズムを解明した上で、評価方法を提案した。耐震性に関する成果の一部は既に基準に反映され、直轄河川や補助河川で利用されている。
 - ・全国 34 堤防区間で統合物理探査適用研究を実施し、従来のボーリング調査やサウンディング調査では捉えることが困難な局所的不均質構造を的確に捉えることができたとともに、不飽和浸透特性の空間分布をより的確に把握評価可能であることを確認した。
 - ・洪水時の盤膨れ対策の一種である堤内基盤排水対策のマニュアルを作成するとともに、基礎地盤及び堤体の液状化対策の設計・施工・維持管理についてとりまとめた「河川堤防の液状化対策の手引」

き」を作成した。本手引きは、直轄河川や補助河川の堤防の液状化対策で利用されている。

- ・河川工作物に対する河川津波の影響について、水理模型実験等により検討した。堰のゲートに対する津波波圧の算定式として修正谷本式の適合性が高いことを確認し、その成果は「ダム・堰施設技術基準（案）」の改訂に向けた検討委員会等に反映された。また、護岸ブロックに対する作用力についても検討し、端部処理等の被害軽減対策を提案した。
- ・洪水氾濫解析とリスクアセスメントに基づき、地域のコミュニティー自らが主体的に洪水危機管理計画を作成する方法を提案した。アジアの洪水常襲地帯での計画作成に関する実践活動を行った結果、提案した手法の妥当性が検証された。

【参考文献】

- 1) Hasegawa, A., M. Gusyev, T. Ushiyama, J. Magome, and Y. Iwami: Drought assessment in the Pampanga River basin, the Philippines – Part 2: A comparative SPI approach for quantifying climate change hazards, MODSIM2015, 21st International Congress on Modeling and Simulation, pp.2388-2394, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, ISBN:978-0-9872143-5-5, <http://www.mssanz.org.au/modsim2015/L13/hasegawa.pdf>, 2015.12
- 2) 牛山朋來、佐山敬洋、藤岡奨、建部祐哉、深見和彦、三好建正：アンサンブルカルマンフィルターを用いた2011年台風12号・15号の降雨流出予測実験、河川技術論文集第19巻、pp.319-324、2013.6
- 3) 牛山朋來、佐山敬洋、岩見洋一、三好建正：2011年台風12号・15号を対象としたアンサンブル降雨流出予測実験、河川技術論文集第20巻、pp.455-460、2014.6
- 4) 土木研究所、物理探査学会：河川堤防の統合物理探査－安全性評価への適用の手引き－、120p.、2013.3
- 5) 国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き、192p.、2002
- 6) 品川俊介、佐々木靖人、日外勝仁：平野の河川周辺における地形と表層地質との対応関係、平成26年度研究発表会講演論文集、日本応用地質学会、pp.87-88、2014
- 7) 品川俊介：河川堤防周辺の地形と堤防被災との関係－河川堤防の概略点検結果から分かること－、土木技術資料、Vol.50、No.12、pp.43-44、2008
- 8) 河川津波対策検討会：河川への遡上津波対策に関する緊急提言（案）、2011.8
- 9) 東北地方太平洋沖地震を踏まえた河口堰・水門等技術検討委員会：東日本大震災を踏まえた堰・水門等の設計、操作のあり方について、2011.9

暴風雪災害から身を守るために ～雪氷災害の減災技術に関する研究～

寒地道路研究グループ 三木 雅之

1. はじめに

国民が将来にわたり安全で豊かで質の高い生活を送ることができるよう、様々な自然災害から人々の生命と財産を守る必要がある。自然災害による死者・行方不明者数は、大きな地震災害を除くと、風水害、雪害によるものが大きな割合を占めている。平成18年豪雪では152名が、さらに平成22~26年度冬期まで5冬期続けて毎年100名前後の方が亡くなっている。近年、冬期間においては、局地的な多量降雪や著しい暴風雪、暖気の流入による異常高温の発生など気象変化が激しくなる中、雪氷災害の激甚化や発生形態の変化が生じている。豪雪や暴風雪等による国民生活や経済社会活動への影響を緩和するため、雪氷災害対策強化のための研究が必要である。

土木研究所では第3期中長期計画においてプロジェクト研究「雪氷災害の減災技術に関する研究」を取り組んだ。近年の気候変動などにもより激甚化する多量降雪、吹雪、気温の変動による湿雪雪崩などの災害に対応するため、気象変動による積雪寒冷地の雪氷環境の変化を明らかにするとともに、吹雪による視程障害の予測及び危険度評価等の対策技術に関する研究、及び冬期の降雨時における雪崩対策技術に関する研究に取り組むこととし、以下の達成目標を設定した。

- (1) 気候変動に伴う冬期気象の変化・特徴の解明
- (2) 吹雪・視程障害の予測及び危険度評価等の対策技術の開発
- (3) 冬期の降雨等に伴う雪崩災害の危険度評価技術の開発

また、これらの目標を達成するため、以下に示す個別研究課題を設定した。

- ① 気象変動の影響による雪氷環境の変化に関する研究
- ② 暴風雪による吹雪視程障害予測技術の開発に関する研究
- ③ 路線を通した連続的な吹雪の危険度評価技術に関する研究
- ④ 冬期の降雨等に伴う雪崩災害の危険度評価技術に関する研究

本報では、個別研究課題①~③の代表的な成果を説明する。

2. 研究の成果

2. 1 気候変動の影響による雪氷環境の変化に関する研究

近年、冬期に局地的な多量降雪や暴風雪、異常高温による大規模な雪氷災害の発生が見られており、将来に亘って雪氷災害の激甚化や発生形態の変化が懸念される。そこで本研究では、変動が増大する雪氷気候値や雪氷災害の変化・特徴を解明し、将来の雪氷災害対策の計画、設計等に資するハザードマップの提示に向けた解析・検討を行った。

(1) 近年の雪氷環境の変化傾向の解明

図-1は、新潟以北のアメダス141カ所を対象に1983~2008年度冬期のデータを用いて、冬期の累積降雪量と、最大積雪深の変化傾向を分析した結果である。図より、累積降雪量は対象地域の大部分で減少傾向にあった。その反面、最大積雪深は、北海道東部、東北地方山間部で増加傾向にあった。一般的に短時間の多量降雪は急激な積雪深増加をもたらす。累積降雪量が減っている一方で、最大積雪深が増えていくのは、一度に降る雪の量が多くなっていることを示唆する。

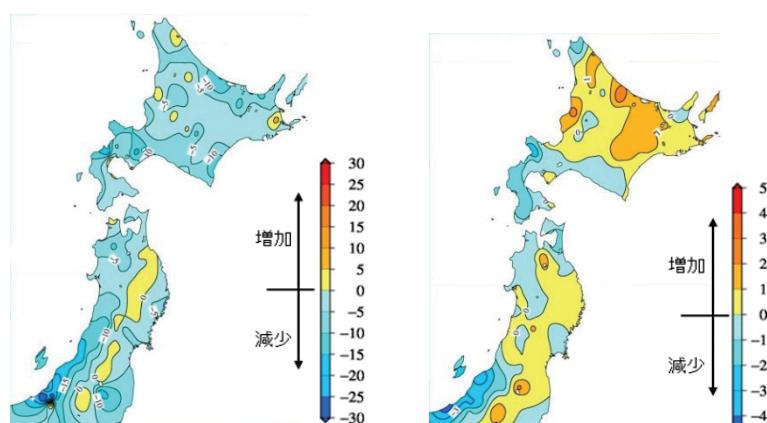
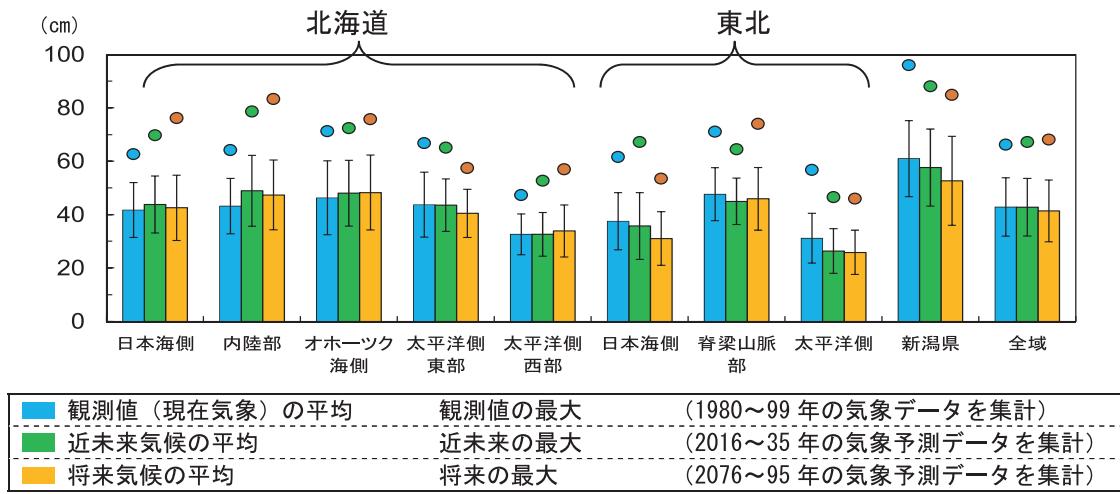


図-1 近年の累積降雪量(左)と最大積雪深(右)の変化傾向(単位cm/年)

(2) 将来の雪氷気候値の分布図の作成

新潟以北を対象として、気候モデル（気象研究所 NHRM 解像度 5km）の将来気候予測値を用いて、将来(2076～2015 年)と近未来(2016～2035 年)の雪氷気候値を推定した。

図－2 は、24 時間最大降雪量の将来予測である。図より 24 時間最大降雪量の平均値は、北海道では変化が無く、東北や新潟で減少傾向にある。一方、各対象期間内の最大値は、北海道の日本海側や内陸部、オホーツク海側、太平洋側西部、東北の山間部で増加傾向にあった。



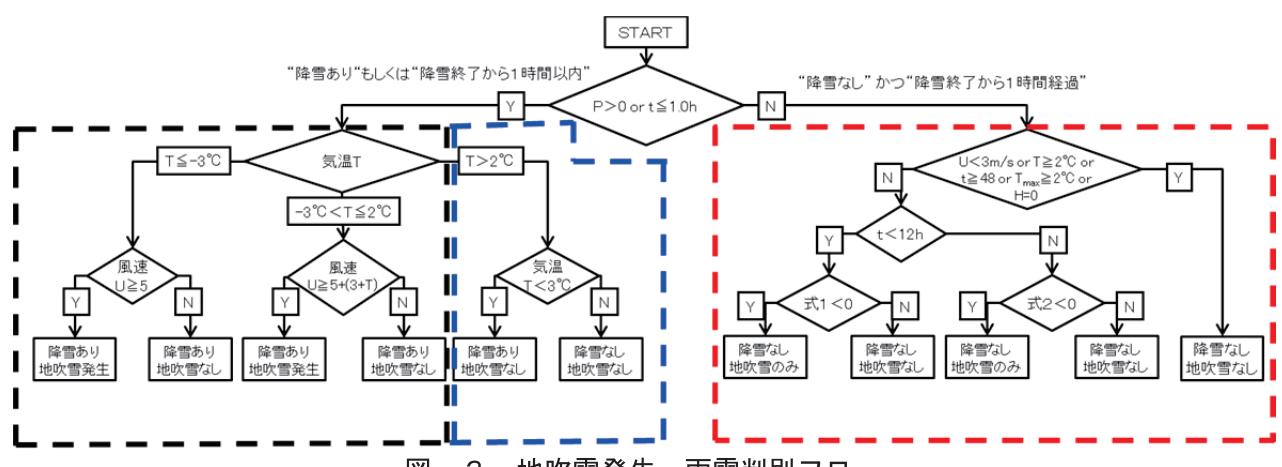
図－2 24 時間最大降雪量の予測

2. 2 暴風雪による吹雪視程障害予測技術の開発に関する研究

(1) 吹雪視程障害の予測技術の開発

当研究所では、これまでの研究において気象データ（降雪強度、風速、気温）から吹雪時の視程を推定する手法を開発した。気象庁から配信される気温、風速、降水量の予測値を、この視程推定手法に与えることで視程の予測値を作成することができる。

ところで、この視程推定手法は、北海道の厳冬期に開発されたものである。このため、雪面が硬かつたり濡れたりしていると風が強くても吹雪が発生しない場合がある。そこで、現地観測を行って地吹雪発生の判定条件を解析した。また、気象庁からは降雪強度ではなく、降水強度が配信されるため、降雨と降雪を判別する必要がある。これらの地吹雪の発生と雨雪の判別処理を行うフローを開発した（図－3）。観測した気象データを入力値として計算を行った視程演算値と視程計で実測した視程とを比較し精度検証を行った結果、吹雪視程演算の完全適中率は 84% 以上であった。



図－3 地吹雪発生・雨雪判別フロー

図-3で

P : 降水量 (mm/h),

t : 降雪終了後の経過時間 (h),

T : 現況の気温 (°C),

T_{\max} : 降雪終了後の最高気温 (°C) である。

また、図-3の式(1)、式(2)の判別式 D を以下に示す。

$$D = -0.59U + 0.2T - 0.08SF + 4.77 \quad \cdots (1)$$

$$D = -1.18U + 0.16T + 0.09t + 0.03U_{sum} + 4.93 \quad \cdots (2)$$

ここで SF : 降雪終了直前の降雪量の積算値 (cm)、

U_{sum} : 降雪終了後の毎時風速の4乗の積算値 $\times 10^{-3}$ (m^4/s^4) である。

なお、これらの判別式は、北海道内3カ所で取得した気象データと動画映像を基に、無降雪時の地吹雪発生有無について判別分析を実施して得られたものである。得られた2つの判別式の地吹雪有無の適中率は92.3%である。

図-3のフローによる処理を行った後、視程推定手法を用いて演算することで視程情報が得られる(図-4)。

(2) 吹雪視程障害予測に関する情報提供技術の開発

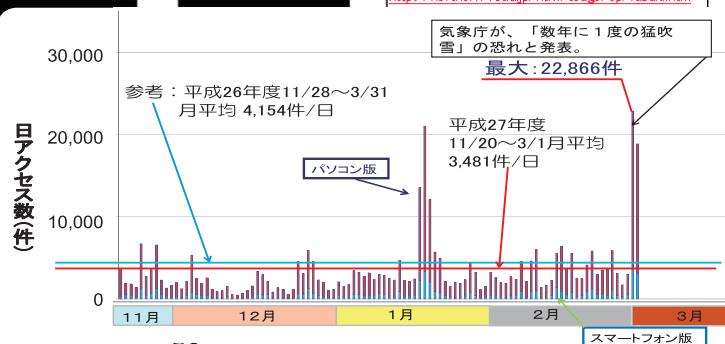
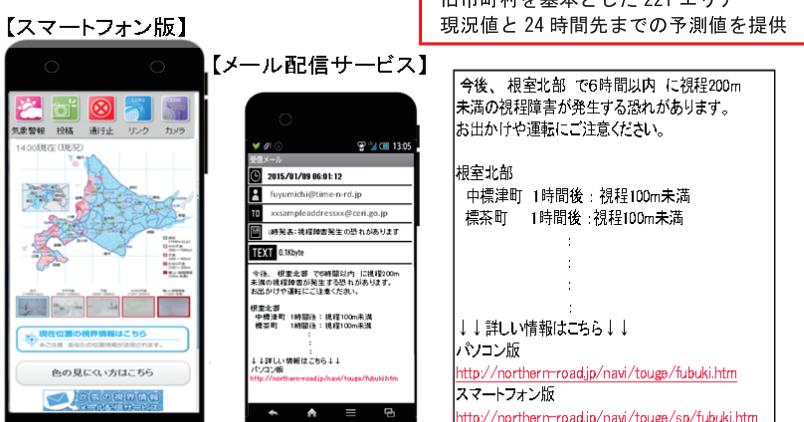
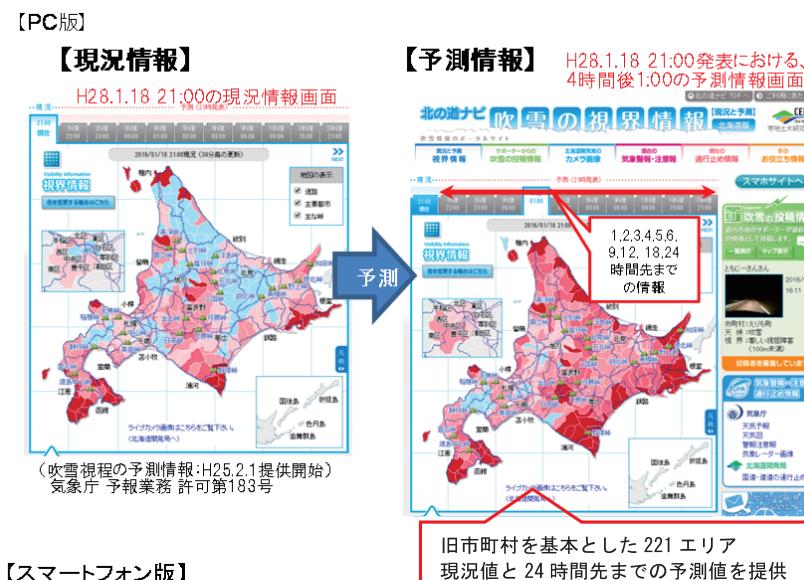
暴風雪時におけるドライバーの行動判断を支援するため、平成25年2月から「吹雪の視界情報ポータルサイト」を開設し、コンテンツの一つとして、吹雪の視界予測の情報提供を開始した。この「吹雪の視界情報ポータルサイト」は、①吹雪の視界情報、②吹雪の投稿情報、③冬期道路の距離と時間検索、④気象警報・注意報、⑤道路通行止め情報等を集約したものである。

吹雪視程予測に関して、提供しているエリア区分については、北海道の市町村単位を基本とした221エリアである。提供情報は現況と予測であり、予測は1~6時間先までは1時間ごと、それ以降は9、12、18、24時間先の情報となっている。平成25年度からは年々増加の傾向にある移動中の利用者に対し利便性の向上を図るために、スマートフォン版のサイトでの情報提供と、メール配信サービスを開始した。

平成27年度のホームペー



図-4 吹雪視程情報処理プロセス



ページの日平均アクセス数は約3,000件を記録し、気象庁が「数年に一度の猛吹雪のおそれ」と発表した平成28年2月29日には、23,000件近いアクセスがあり(図-6)、利用者が「吹雪の視界情報」を行動判断に活用していることが伺える。また、平成26年2月の暴風雪では、吹雪視程予測情報が吹雪時の道路管理体制の判断にも活用され、社会的混乱の予防に貢献した。

図-6 アクセス件数(2015年11月～2016年3月)

(3) アンケート結果

「吹雪の視界情報」の効果を把握するため、平成27年4月から、ホームページ上でアンケート調査を実施した。図-7は、「吹雪の視界情報」に関するアンケートの回答者の属性である。30歳代から50歳代までが、81%を占めている。図-8は、「吹雪の視界情報」の利用目的を尋ねた結果である。第一の利用目的では仕事や通勤が多いが、第二の利用目的を含めると外出を伴う所用やドライブ・旅行の割合も高くなっている。

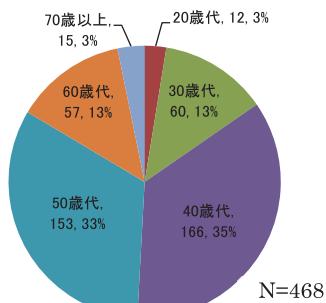


図-7 回答者の属性

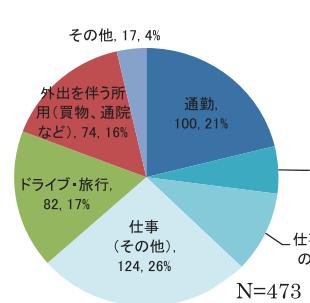


図-8 「吹雪の視界情報」の利用目的(左:第一の目的、右:第二の目的)

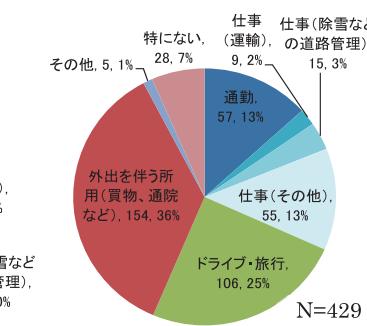


図-9は、パソコンサイトの満足度を尋ねた結果である。86%以上が満足(「非常に満足」、「満足」、「やや満足」の総和)と回答した。

図-10は「吹雪の視界情報」で視界不良(200m未満)が予測された際に、行動や予定の変更を考慮することが多いか尋ねた結果である。「行動や予定を変更する。または変更をする場合が多い」の回答者が79%(354名)と多かった。また、これらのうち出発時刻を変更した方が60%(211名)、外出や移動を取りやめた方が59%(209名)であった。このことから、「吹雪の視界情報」を利用して吹雪を回避する行動変化を起こしていることが明らかになった。

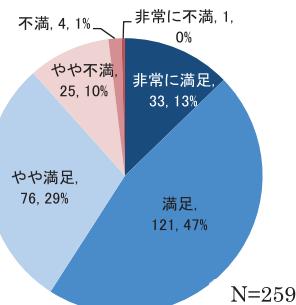


図-9 満足度(PC)

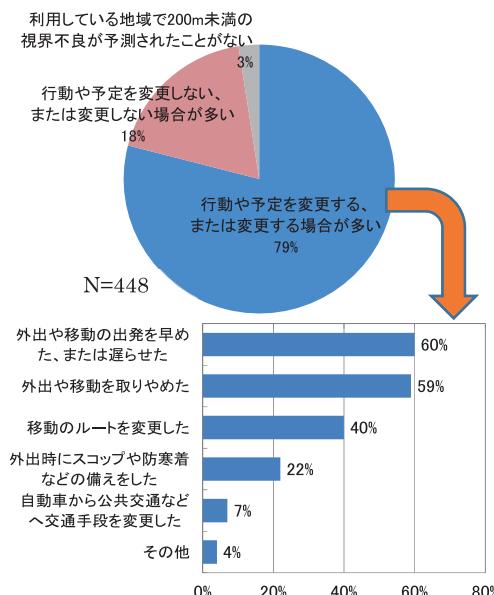


図-10 行動の変更の有無と内容

2.3 路線を通した連続的な吹雪の危険度評価技術に関する研究

暴風雪による被害を緩和し、安全な冬期道路交通を確保するため、道路防雪林や防雪柵などの吹雪対策施設の整備が進められている。効果的かつ効率的に吹雪対策施設を整備するためには、吹雪危険度の評価が必要である。そこで、本研究では、路線を通した吹雪危険度を定量的に評価する技術開発に取り



図-11 移動気象観測車

組んだ。

(1) 吹雪に対する危険要因の定量的な影響度の解明

吹雪視程障害の危険要因に想定される気象条件や道路構造など沿道環境の諸条件(主風向、風上の吹走距離、盛土や切土等の道路構造と切盛境、橋梁などの立体交差部、防雪柵や道路防雪林などの吹雪対策施設の有無)に着目し、北海道内の国道5区間において吹雪時に移動気象観測車(図-11)による調査(視程、風向風速、走行速度やブレーキ踏力、ハンドル操舵角、運転危険度評価等)を実施した。それらの結果を活用して、視程障害発生状況や運転危険度の変化に着目し数量化I類による多変量解析を実施した。これにより、高い盛土や低い切土で視程障害発生割合が高いこと、風上側平坦地が長いほど視程障害発生割合や運転危険度が高いこと、防護柵がある場合視程障害発生割合や運転危険度が高いことなど、吹雪の危険要因となる沿道環境条件やその影響度を定量的に解明した(表-1)。

(2) 道路吹雪対策マニュアルの改良案の提示

前述の解析結果を基に、道路吹雪対策マニュアルの吹雪危険度の評価項目・評点を改良した案を提示した。主な改良点として、視程障害の評価項目に風上平坦地、防護柵の有無を追加した(表-2)ほか、風上樹林帯・家屋の幅を修正した。

表-1 多変量解析結果

目的変数	説明変数 (カテゴリー数と内容)	カテゴリ スコア	レンジ
視程障害発生割合(%)	道路構造 (切土・盛土 の高さ) 0: 切土 5.0m以上 1: 切土 0~5.0m 2: 盛土 0~1.0m 3: 盛土 1.0~3.0m 4: 盛土 3.0~5.0m 5: 盛土 5.0m以上	-0.101 0.393 -0.462 -0.197 1.488 0.723	1.950
※視程障害発生割合(%) = 平均視程200m未満の観測回数 全観測回数	風上平坦地 の長さ 0: なし 1: 10~100m 2: 100~300m 3: 300m以上	-0.547 0.087 1.305 1.184	1.681
樹林帯 の幅	0: なし 1: 断続的 2: 10~30m 3: 30~50m 4: 50~100m 5: 100~200m 6: 200~300m 7: 300m以上	0.120 -0.245 -0.166 -0.052 -0.386 -0.790 -1.189 -1.471	1.591
家屋市街地 の幅	0: なし 1: 断続的 2: 10~30m 3: 30~50m 4: 50~100m 5: 100~200m 6: 200~300m 7: 300m以上	-0.294 0.933 1.776 4.412 1.760 0.206 -0.363 -1.677	6.090
防護柵 の有無	0: なし 1: あり	-0.375 1.157	1.532
定数項		2.761	

表-2 吹雪危険度評価の修正案(例)

(現行)

項目	基準値	評点
地形の急変箇所 (切盛境、沢筋など)	小規模または部分的 大規模または連続的	2 3
盛土のり勾配	1: 2未満	3
カーブ区間 (曲率半径)	あり 200m未満 100m未満	1 2 3
トンネル坑口、 橋梁端部、立体交差部	あり	3

(改良案)

項目	基準値	評点
風上側平坦地の長さ	平坦地あり 100m以上 300m以上	2 4 6
切盛境及び沢筋等の地形急 変箇所、トンネル坑口、橋 梁端部、立体交差部	あり	2
防護柵	あり	2
カーブ区間、交差点 (曲率半径)	あり 200m未満(カーブ)	1 2

3. おわりに

各個別課題とも着実に研究成果があがり、設定した達成目標を達成することができた。

研究期間中にも多くの相談や問い合わせがあったことから、本研究に対する道路管理者のニーズは高く、適切な研究目標設定がなされていたと考えている。学会、講習会、WEB、技術相談などを通じ研究成果の発信に努めた結果、研究年次の途中においても開発した吹雪視程予測情報が吹雪時の道路管理体制の判断に活用されたほか、雪氷気候値の分布図が国や自治体のHPでハザードマップとして公開された。また、テレビ、新聞、ラジオ、WEB等で数多く取り上げられた。

今後は研究成果の実用化と早期普及に向けた取組として、基準・マニュアル等への成果反映、講演会、講習会等の開催、現場への技術指導や助言活動、テレビ・新聞・WEB等を通じた成果の情報発信などに取り組む予定である。また、平成28年度に開始した第4期中長期研究計画では、第3期に得られた成果を発展させる研究にも取り組んでいるところである。

新情報技術を活用し水災害の被害軽減に挑む ～水災害軽減に資する洪水予測モデル及び 人工衛星を活用した氾濫水理量推定技術の提案～

水災害研究グループ長 三宅 且仁

1. はじめに

2011 年のタイ・チャオプラヤ川の洪水、2013 年の台風ハイянによるフィリピンの高潮被害、2015 年の鬼怒川洪水など、近年、世界的に水災害が多発している。こうした水災害を防止・軽減するため、国際的協調のもと重要な取組みが進められている。2015 年 3 月には国連防災世界会議が日本で開催され、「仙台防災枠組」が採択された。同年 9 月には、国連持続可能な開発サミットがニューヨークで開催され、防災への対応を含む「持続可能な開発のための 2030 アジェンダ」が採択された。更に、同年 12 月にパリで開催された国連気候変動枠組条約第 21 回締約国会議(COP21)において、地球温暖化への対応について「パリ協定」が採択された。

土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター（ICHARM）は、ユネスコカテゴリー II センターとして、また、国際洪水イニシアチブ（IFI）の事務局として、国際的な防災に関する取組みに貢献するため、現場での実践を念頭においていた技術研究開発及びこれらの技術を活用できる人材開発に取り組んできた。ここでは、平成 23-27 年度にかけて実施したプロジェクト研究総括課題「防災・災害情報の効率的活用技術に関する研究」における主要な成果として、洪水予測モデルの開発及び人工衛星を活用した氾濫水理量推定技術の概要について紹介する。

極端な降水現象が顕在化してきている現在、水災害を軽減するためには、施設整備はもとより、土地利用政策、洪水予測情報の迅速な伝達共有といったソフト施策を総合的に推進する必要がある。特に、洪水予測システムの構築は、被害軽減活動のためのリードタイムを確保する上で重要である。また、観測が不十分な地域など途上国の有する課題を念頭に容易に構築できる洪水氾濫のシミュレーションモデルを提供するとともに、広域な氾濫水の挙動を人工衛星等のリモセン技術を駆使し、リアルタイムにモニタリングし、モデルの検証などに幅広く活用していく技術が有用である。以下、総合洪水解析システム（IFAS）の機能強化及びインダス川への適用、並びに人工衛星から氾濫水理量を推定する技術の開発及びジャムナ・メコン川に適用した例を紹介する。これらは、水災害解析の要素技術である。

2. 総合洪水解析システム（IFAS）の開発及び機能強化

2. 1 IFAS の概要

ICHARM では、雨量、河川流量等の地上水文情報が十分に観測されていない河川流域においても、効率的に洪水予警報システムが構築できる、総合洪水解析システム（IFAS : Integrated Flood Analysis System）¹⁾の改良・機能拡張を継続して行っている。現在、IFAS ver. 2.0 を ICHARM ウェブサイトにおいて無償で公開している(<http://www.icharm.pwri.go.jp/research/ifas/index.html>)。IFAS は、洪水予警報システムの構築のほか、統合的水資源管理（IWRM）の解析や、水文流出過程の学習用（研修）ツールとしても活用されている。

図-1 に IFAS の概要を示す。GIS とグラフィカルユーザーインターフェース（GUI）機能を備えており、流出モデルの作成、パラメータ設定、降雨の入力、流出計算、結果のグラフィック表示まで、一連の作業が実施できる。流出モデル作成には、インターネット上に公開され、誰でも無償でダウンロードできる、標高、土地利用等のグローバルデータが活用できる。流出計算の入力降雨には、地上観測雨量、レーダ観測雨量のほか、JAXA 等が開発・公開している GSMap などの人工衛星観測雨量プロダクトを活用することもできる。これにより、海外の発展途上国のように、雨量の地上観測網が不十分な流域等でも、人工衛星観測雨量を用いた洪水予警報が可能になる。一方、人工衛星観測雨量は、地上観測雨量と比べて観測精度が劣る。そこで、IFAS 上で動作する人工衛星観測雨量補正機能²⁾を導入している。ICHARM では、JAXA 等と共同で人工衛星観測雨量のリアルタイム補正機能の開発を継続して行っている。

IFAS のモデル構造を図-2 に示す。土研分布型流出解析モデルをベースとしており、表層、帯水層を表現し、主として短期間の洪水予警報に活用される 2 段タンクモデルと、表層、不飽和層、帯水層を表現し、長期流出も含めて計算できる 3 段タンクモデルを選択できる。

平成 25 年度までに、新たに、Degree-Day 法、熱収支法を用いた融雪量計算機能や、Hamon 法、FAO Penman-Monteith 法により蒸発散量を計算できる機能を導入した。これらの機能は、検証を行っているところであり、HP 上ではまだ公開されていないが、これまで主に対象としてきたアジア・モンスーン地帯だけでなく、上流の高山地帯等からの融雪の影響が無視できないような広域河川や、蒸発散の影響を考慮した長期流出計算など、様々な気候区分や多様な用途への活用の幅が拡がるものと考えられる。

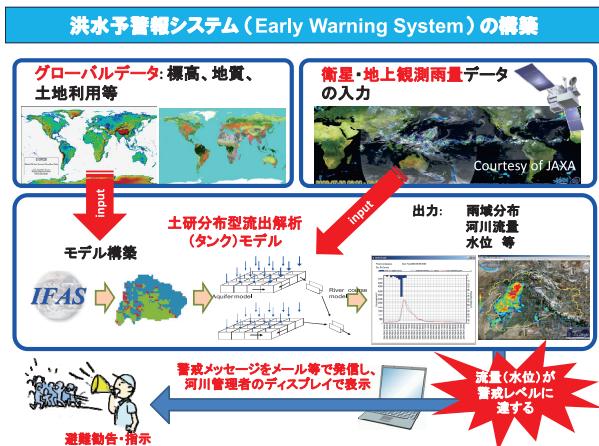


図 1 IFAS の概要

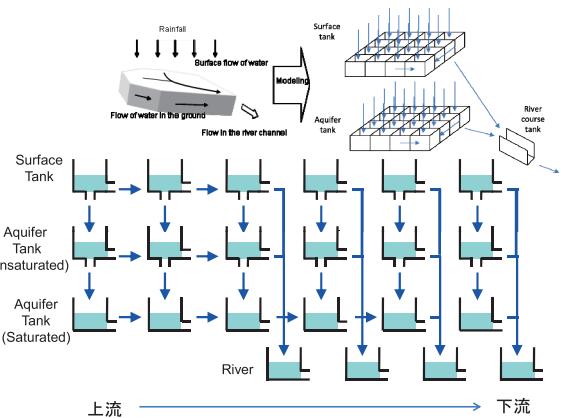


図 2 モデル構造(土研分布型流出解析モデル：3段タンク)

2. 2 IFAS の機能強化と活用

(1) 洪水予警報システムとしての活用

IFAS をベースとした洪水予警報システムは、ADB、UNESCO 等のプロジェクトを通じて、主としてアジアの複数河川流域において導入されている。平成 25 年度にはインドネシア・ソロ川流域 ($16,100 \text{ km}^2$)、平成 26 年度には、パキスタン・インダス川本川上流域 ($400,000 \text{ km}^2$)、フィリピン・カガヤン川流域 ($27,280 \text{ km}^2$) に導入され、平成 27 年度にはマレーシア・ケランタン川流域 ($11,900 \text{ km}^2$)、ベトナム・タイビン川流域 ($27,200 \text{ km}^2$) でも開発された。現在はさらに、UNESCO パキスタンプロジェクトの一環として、インダス川東部支川への導入が進められている。

これらのうち、インダス川上流域で構築されたシステム (Indus-IFAS) について紹介する。インダス川は、中国、インド、アフガニスタン、パキスタンの 4ヶ国を流下する国際河川であり、標高約 $7,000\text{m}$ 級の高山地帯から、アラビア海までを流下し、多様な気象、地形特性を含んでいる。IFAS は山地域から河川への流出を主な解析対象としており、山地域におけるリアルタイム洪水予測に適しているものの、河川の低平地における氾濫を計算することはできない。そこで、降雨流出・洪水氾濫を一体的に解析することができる降雨流出氾濫モデル (RRI)³⁾ を、中下流部に連結し、インダス川上流の山地域から下流の低平地の氾濫までを一体的に解析する流出解析モデルを構築した(図 3)。この場合 IFAS で計算された流量を RRI の境界条件として与え、一体化を図っている。

インダス川流域では地上観測雨量計による降雨観測網がまだ不十分である。そのため、入力情報として降雨量を用いるだけで、洪水予警報に必要とされる精度の流出予測を行うことが困難である。そこで、Indus-IFAS においては、ユーザーが自由にダムの放流量を与える機能を用いて、観測河川流量やダム地点の放流量を境界条件として与え、下流側の河川流量を計算することができる。上流で観測された河川流量を用いて、その地点より下流における流出解析を順次行うことで、可能な限り計算精度を向上させる工夫を行った。図-4 にインダス中流域 Chashma 地点の計算流量の良好な再現結果を示す。

一方で、洪水予測のためのリードタイムの延長や、ダム地点等の流入量予測精度を向上し、より効果的なダム等の運用に資するためにも、融雪量を考慮することが重要である。現在、融雪量計算機能の Indus-IFAS への導入を進めており、インダス川流域における、洪水対応能力の向上に貢献するものと思われる。融雪計算機能を用いて、インダス川上流域の Partab Bridge 地点における、河川流量計算結果を図-5 に示す。青色は融雪を考慮しない場合の計算結果であり、緑色は Degree-Day 法 (気温を考慮) により、融雪量を計算したものである。河川の流量観測、降雨量の観測精度に課題もあり、融雪量を考

慮した場合でも、ピーク付近については過小評価しているが、融雪を考慮しない場合に比べて、出水初期の再現性が向上している。

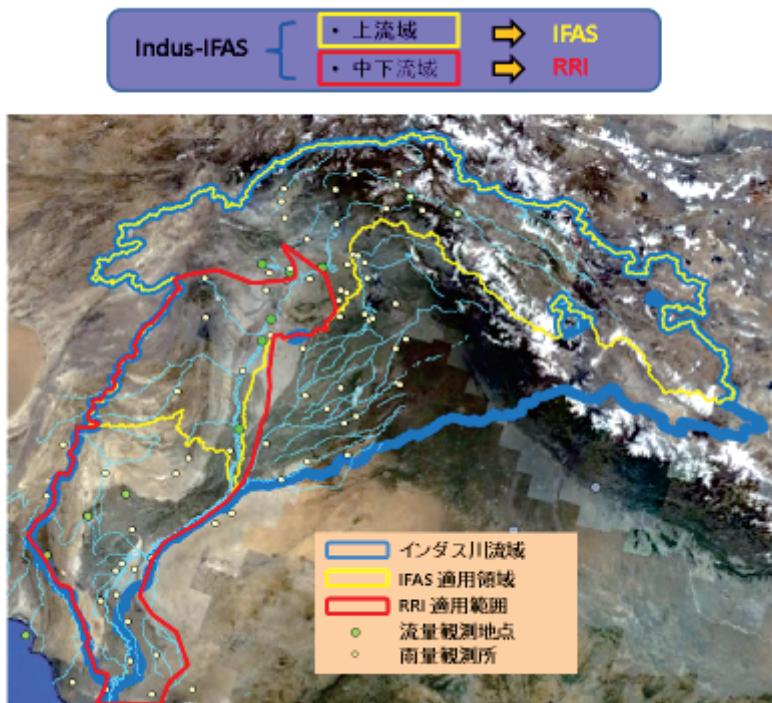


図-3 Indus-IFAS モデルの計算領域

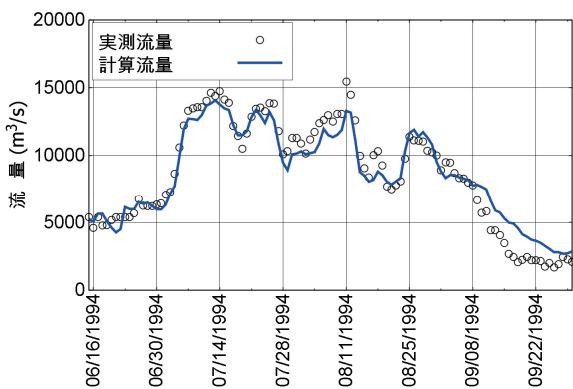


図-4 洪水波形の再現結果
(CHASHMA地点)

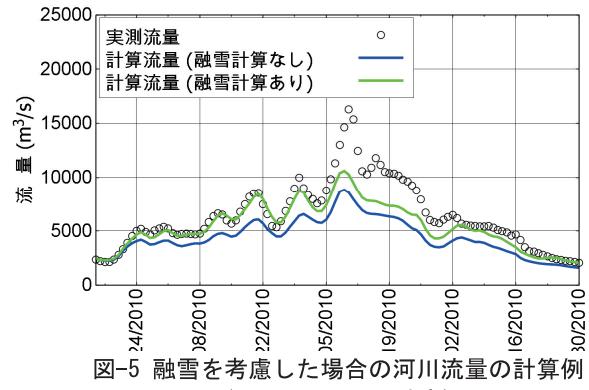


図-5 融雪を考慮した場合の河川流量の計算例
(Pertab Bridge 地点)

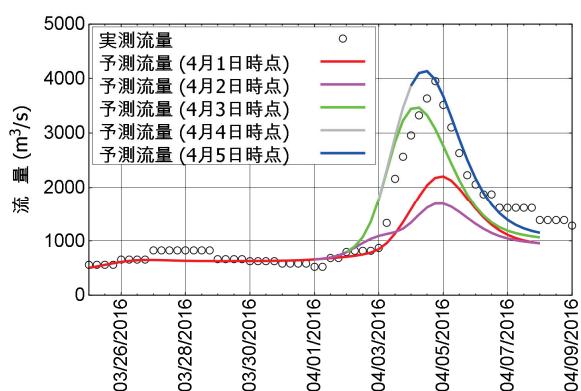


図-6 リアルタイム予測を想定した計算結果
(Kabul 地点)

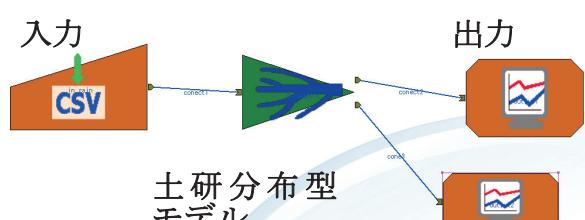
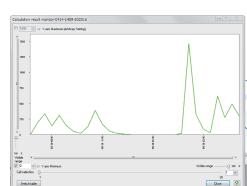


図-7 CommonMP 上で動作する土研モデル



また、2016年4月の洪水を対象に、Kabul 地点において、リアルタイムの洪水予警報を想定した検証を行った。その時点までに得られた実測雨量と Indu-IFAS において入力できる予測雨量 (NCEP-GFS) を用いて、1週間先までの流量予測を行った (図-6)。この計算では上流の河川流量を境界条件として入力していない。4月4日に約 4,000m³/s の洪水ピークが観測されたが、4月3日時点の予測で、ほぼ同等のピーク流量が予測されている。開発したシステムは、リアルタイムの洪水予警報の現場において、有益な情報を提供すると考えられる。

(2) 統合的水資源管理の解析のための活用

IFAS により統合的水資源管理の解析ができるよう、水利用のための取水や、ダムからの利水補給を再現できる機能を導入した。また、IFAS で作成したモデルを CommonMP 上で動かすための要素モデルを開発した (図-7)。今後、動作確認等を行った後に、一般公開を行う予定である。

(3) 研修用ツールとしての活用

IFAS は流出モデルの構築が容易であり、計算結果の表示まで PC 上で簡単に実施できることから、アジア各国の河川技術者を対象とした研修にも活用されている。こうした研修の受講者は、平成 27 年度までに 50 カ国、1,000 人を越えた (図-8)。これまで主にアジア国内の技術者が対象であったが、最近では、アフリカのフラッシュフラッド対策や、国内技術者を対象とした研修も行われている。



図-8 IFAS 研修の実施状況
(左 : 2015 年の ASEAN 技術者を対象とした研修、
右 : 2016 年のパキスタン・アフガニスタン技術者を対象とした研修)

2. 3 IFAS の今後の展望

洪水予警報システムを継続的に活用していくためには、現地状況の変化にあわせてカスタマイズしながら活用していくことが重要であり、利用しやすいインターフェースの開発と、利用者の能力開発をあわせて進めることが重要である。さらに、利用できるグローバルデータのフォーマットやダウンロード先サイトの変更への対応体制を確保することが、継続的な普及を推進する上の課題である。

今後、国内外の様々な流域において適用を拡大していくためには、導入後の利用状況をモニタリングしつつ、地域特性に応じた開発の更なるニーズを把握していくことが重要である。

3. 人工衛星から氾濫水理量を推定する技術

3. 1 手法の概要とジャムナ川への適用

本技術は MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer) から得られる反射率データを用いて氾濫域を推定するものである。これまで、NDWI、LSWI など、複数の周波数帯の反射率データを駆使して水域を検出する手法が提案されてきた。これらの技術は、各ピクセルにおける反射率を直接使用する方法で、ある閾値を設けた上で、その値を境に水域と陸域を判別する。適切な閾値を設定できる場合は水域を良好に検出できるものの、そのためには思考錯誤を重ねる必要があり、設定した閾値の客觀性を説明することが難しい場合もある。一方、本技術は Gradient Based Method と呼ばれる手法に着目し、こ

れを修正する Modified Gradient Based Method を提案する。GBM は画像解析手法の一つであり、データの空間的な勾配に着目する手法である。また、本技術は MODIS の band1 (可視域赤) と Band2 (近赤外域) の差の勾配に着目した。band1 と band2 は日データとして公開されており、空間解像度は 250m である。他の周波数帯は 8 日毎のデータとなる 8-day composite データであり、その空間解像度は 500 m である。より詳細な時空間解像度データを使用することも、本手法の大きな利点の一つである。以下、手法の概略を説明するが、さらに詳細な説明は Biswas *et al*⁴⁾を参照されたい。式(1)は反射率の差の勾配を表したものであり、この絶対値は式(2)で表わされる。

$$\bar{G}(x, y) = \left(\frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial y} j \right) f(x, y) \quad (1)$$

ここで、 $\bar{G}(x, y)$ は反射率の差の勾配、 $f(x, y)$ は反射率の差である。

$$M(x, y) = \sqrt{\left(\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \right)^2} \quad (2)$$

ここで、 $M(x, y)$ は $\bar{G}(x, y)$ の絶対値である。

図-9 は、式(2)をジャムナ川に適用して算出された勾配の空間分布である。水域と陸域の境界がはっきりと強調されることが確認できる。両者を分ける上で、勾配に着目する本手法が有効であることが示されたが、図-9 からどちらが水域か判別することは難しい。そこで、勾配のみならず、反射率そのものを反映した情報とするために、Weighted average を導入した。式(3)は式(1)に Weighted average を導入したものであり、式(4)は絶対値を表す。

$$\bar{G}'(x, y) = \left\{ \left(\frac{\partial}{\partial x} + W \right) i + \left(\frac{\partial}{\partial y} + W \right) j \right\} f(x, y) \quad (3)$$

ここで、 $\bar{G}'(x, y)$ は Weighted average を導入した反射率の差の勾配であり、 W は Weighted average である。

$$M'(x, y) = \sqrt{\left(\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} + [W] f(x, y) \right)^2 + \left(\frac{\partial f(x, y)}{\partial y} + [W] f(x, y) \right)^2} \quad (4)$$

ここで、 $M'(x, y)$ は $\bar{G}'(x, y)$ の絶対値である。

図-10 は、図-9 と同地点に式(4)を適用したものであり、水域と陸域の境界を強調しながら、両者の土地被服そのものも判別できる。図-2 の作成にあたり、既存の手法で必須であった閾値を用いていないことが大きな特徴である。図-11 は同様に式(4)を適用した結果で、土木研究所が現地観測を実施したエリアに適用したものである。図-12、図-13 は図-11 における Point1、Point2 の現地の写真である。Point1において水域と陸域の境界が存在する状況が再現されており、Point2 においても、手前に水域があり、その少し奥に陸域があり、さらに奥には再び水域が現れる状況がよく再現されている。

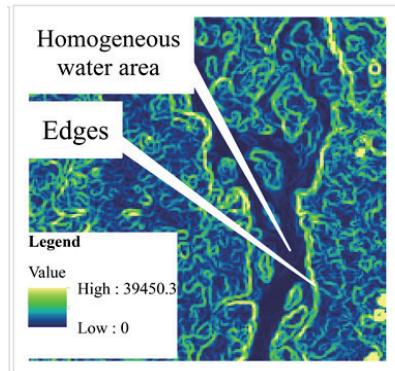


図-9 式(2)で算出した勾配の分布

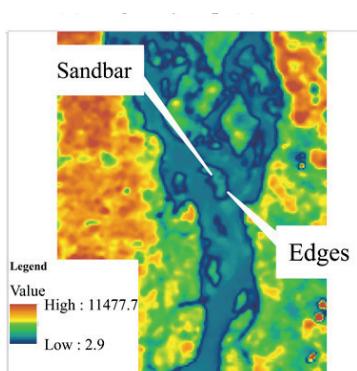


図-10 Weighted average を導入した勾配の分布

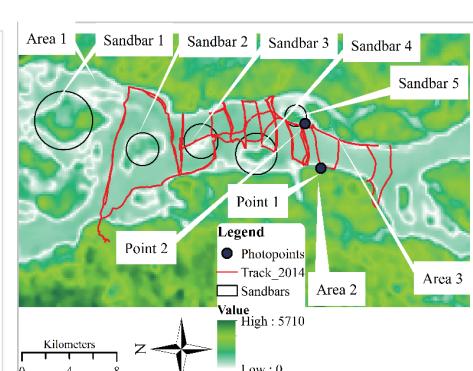


図-11 Weighted average を導入した勾配の分布（観測実施箇所）

今回示した地域は浮遊砂が卓越した網状河川であり、砂州の形態が頻繁に変化する。河岸浸食も激しく、現地の河道管理を困難なものにしている要因であるが、今回紹介する技術を河道の平面形状のモニタリングに適用することで、現地の河道管理に貢献すると期待できる。



3. 2 メコン川下流域への適用

前節で紹介した技術を、メコン川下流域に適用して氾濫域の検出を試みる。さらに、氾濫域の情報と標高データを組み合わせて氾濫域内の水位分布を推定し、氾濫原上の流速場を推定する。図-14 はメコン川下流域における氾濫域の推定結果であり、センターは流速を表す（流速の推定については後述）。一方、図-15 は ICHARM で開発した降雨流出氾濫モデル (RRI モデル)³⁾を適用して計算された氾濫域である。なお、RRI モデルをメコン川下流域に適用した計算の詳細は工藤ら⁵⁾を参照されたい。

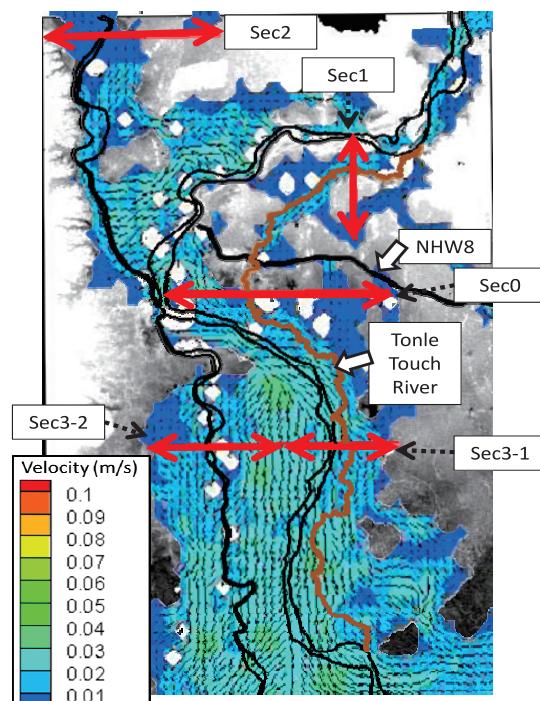
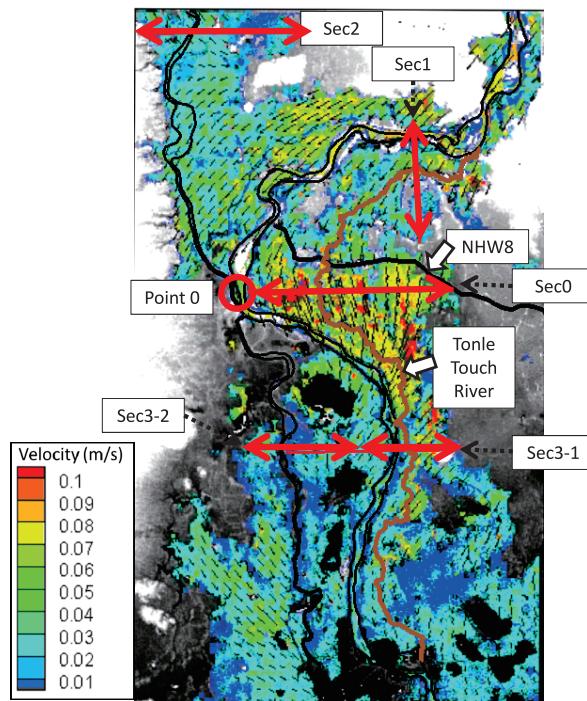


図-14 と図-15 を比較すると、特に下流側において MODIS からの氾濫域が小さく RRI モデルからの氾濫域が大きい傾向があるものの、全体としては同様の傾向を示すと評価できる。メコン川下流域のような広範囲において氾濫域を直接計測することは非常に困難であるが、今回示したように、異なる 2 つのアプローチから推定した結果を比較することで定量的な分析に近づく。さらに、MODIS から推定された氾濫域と、STRM から得られる標高データを用いて、氾濫原の水位分布を推定する。具体的な手順としては、初めに、氾濫域と陸域の境界における標高をその地点の水位とし、境界に沿った線状の水位分布を得た上で、それを空間内挿することで氾濫域内の面的な水位分布を得た。さらに、流速場を推定するために、水位分布から求めた水面勾配分布、水位と SRTM (Shuttle Radar Topography Mission: スペースシャトルに搭載された合成開口レーダ画像を基に作成された標高データ) から求めた水深分布を用いて、等価粗度係数を $0.4 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ としたマニング式から流速場を推定した。MODIS からの流速場 (図-14) と RRI モデルからの流速場 (図-15) を比較すると、NHW8 の下流側において MODIS からの流速が大きくなる違いがあるものの、他の地点については概ね同様の傾向を示す。

上記で氾濫原上の流速場を推定した。これを用いて氾濫原上の流量を推定することを試みる。MODIS からの流量は、ピクセル毎の流速と水深の積を、氾濫原上の断面で積分することで算出した。図-14、図-15 に記した Sec0～Sec3-2 における、氾濫原上の流量の比較を図-16 に示す。Sec2 と Sec3-1 は RRI モデルによる氾濫流量と MODIS による氾濫流量が概ね良好に一致する。Sec2 はトンレサップ川周辺の氾濫流量であり、洪水期に流れ方向が逆転する特徴を MODIS と RRI モデルの両者が再現している。その一方で Sec0 に着目した場合、両者が乖離する結果となった。Sec0 はメコン川本川左岸側の氾濫原にあるが、当該箇所は NHW8 や多数のコルマタージュが存在し、氾濫水が複雑な挙動を示すと考えられる地点である。このような箇所における定量的な推定が今後の課題である。

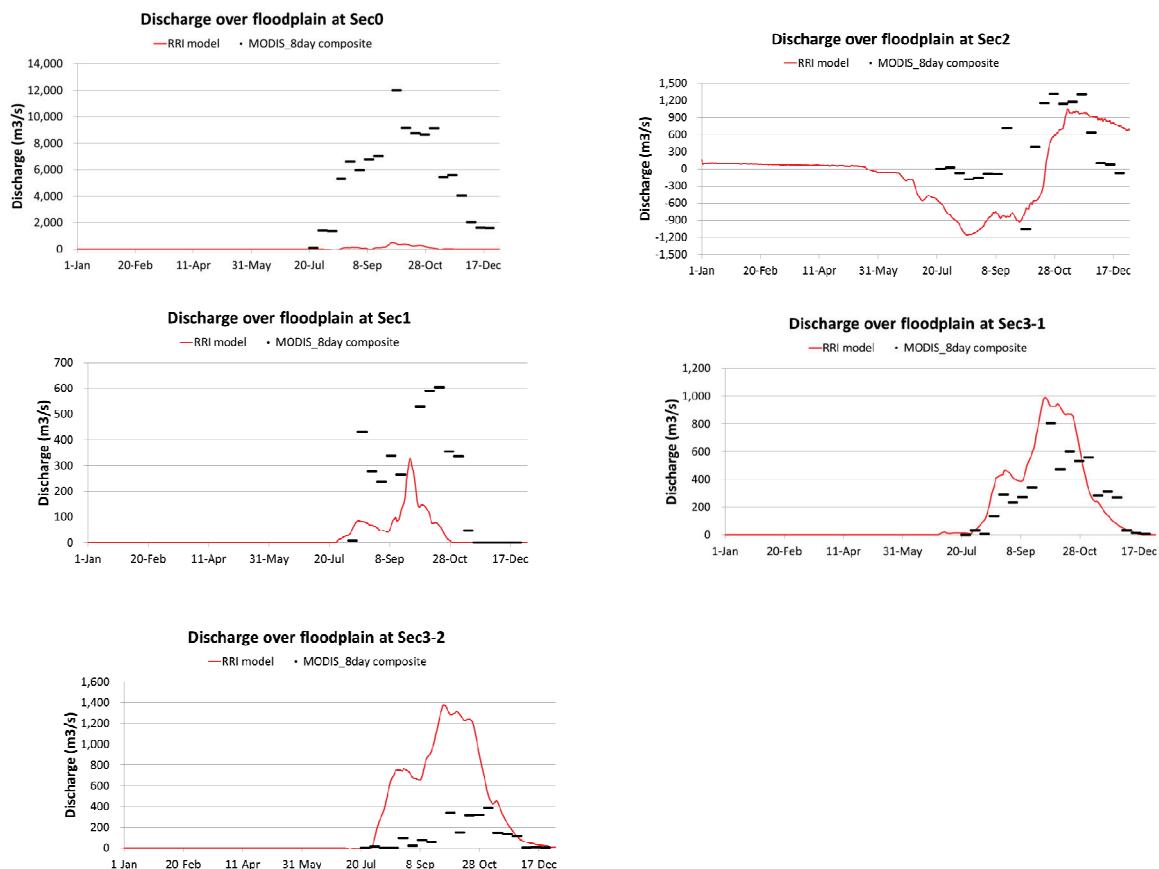


図-16 氾濫原上の流量

4. おわりに

本稿では、総合洪水解析システム（IFAS）及び人工衛星から氾濫水理量を推定する技術の開発及び適用事例について紹介した。

要約すると次のように結論できる。

(1) 雨量、河川流量等の地上水文情報が十分に観測されていない河川流域においても、効率的に洪水予警報システムが構築でき、入力データとして人工衛星観測雨量を活用できる、総合洪水解析システム（IFAS : Integrated Flood Analysis System）の機能強化を図りつつ、ICHARM ウェブサイトにおいて無料で一般公開している。IFAS は、洪水予警報システムや、統合的水資源管理（IWRM）の解析ツールとして有用であるとともに、水文流出過程の学習用（研修）ツールとしても活用されている。新たに、融雪や、蒸発散が計算できる機能の追加や、CommonMP 上で動作する要素モデルの開発を行っており、これらは順次 HP 上で公開していく予定である。これらにより、多様な気候区分や、様々な用途への適用の幅が拡がっていくものと期待される。

(2) MODIS のデータを用いて、Gradient Based Method を応用した技術を適用して水域を検出する新手法を提案した。本手法は、これまで衛星情報から水域を検出する上で必要であった閾値を用いずに良好な精度で推定できる。これをメコン川下流域にも適用し、氾濫域の検出を行った。さらに、MODIS と SRTM データを用いて流速場及び氾濫原上の流量の推定を試み、RRI モデルによる計算結果と比較した。良好に適合する箇所が確認できる一方で、そうでない箇所も指摘された。これらの氾濫原上の水理量は、特に広範囲に及ぶ氾濫原では、直接計測することは困難であるため、モデルのシミュレーションと比較できる本手法は、定量的な推定に大きく貢献すると期待できる。

【参考文献】

- 1) 杉浦友宣, 馬籠純, 川上貴宏, 小澤剛, 深見和彦: 人工衛星観測雨量を利用した洪水予測システム（IFAS）の開発, 国土交通省国土技術研究会報告, pp. 165–170, 2009.
- 2) 白石芳樹, 深見和彦, 猪股広典: 雨域移動情報を活用した衛星降雨データ補正手法の提案-吉野川流域の事例解析-, 水工学論文集, 第 53巻, pp. 385–390, 2009.
- 3) T. Sayama, G. Ozawa, T. Kawakami, S. Nabesaka and K. Fukami, “Rainfall- runoff- inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin,” Hydrological Sciences Journal, pp. 298–312, 2012.
- 4) R. K. BISWAS, A. YOROZUYA and S. EGASHIRA, “Modified Gradient Based Method for Mapping Sandbars in Mega-Sized Braided River Using MODIS Image,” Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol. 72, No. 4, I_931-I_936, 2016.
- 5) 工藤俊, 萬矢敦啓, E. D. P PERERA, 小関博司, 岩見洋一, 中津川誠: メコン川下流域の洪水氾濫に対する観測結果を反映した河道条件の影響分析, 土木学会論文集 B1 (水工学) , Vol. 72, No. 4, I_145-I_150, 2016. 2

[プロジェクト研究成果報告【自然共生】]

河道掘削を環境の再生（保全）に活かす
～その具体的アプローチ（プロセス）の提案～

流域における健全な土砂動態の確保に向けて

水環境をどう改善するか？
～流域スケールにおける水質管理技術の開発～

山・川・海を土砂でつなぐ

北海道の食料生産力を維持向上していくために

河道掘削を環境の再生(保全)に活かす ～その具体的アプローチ(プロセス)の提案

水環境研究グループ 森 吉尚

1. はじめに

近年、河川生態系の保全に関する様々な取り組みが行われているが、生物多様性の損失に歯止めがかかっている状況はない。本プロジェクト研究「河川生態系の保全・再生のための効果的な河道設計・河道管理技術の開発」では、平成23年度から平成27年度までの5年間で、生物多様性の保全に資する基礎的・応用的研究を進め、河道設計・管理に有効な技術の提案を行うことを目的として、①人為的化パラメータが河川生態系に及ぼす影響の解明、②既存の知見を活用しながら河川環境を適切に評価する技術の開発、③河川生態系の保全・再生を図るための効果的な河道設計・河道管理に関する技術開発、について研究を行った。研究を進めるにあたり、以下の達成目標を設定した。

(1) 物理環境変化による河川生態系への影響解明：

人為的改変等による生物に与える影響予測をより適確に行うために必要な現象解明を行う。

(2) 河川環境の評価技術の開発：

①の研究成果も踏まえつつ、生物生息場をより適切に評価するための技術の開発を行う。

(3) 生物生息場を考慮した河道設計・河道管理技術の開発：

生物群集・生態系に配慮したより効果的な河道設計・維持管理技術の開発を行う。

これらの研究の結果、以下のような設計・管理が可能となった。

- ① 主として直轄管理区間について、河川生態系への影響という観点での評価が可能となり、保全すべき箇所、優先的に再生すべき箇所の抽出が可能となる。
- ② 扇状地区間・自然堤防区間については効率的な樹林管理、ワンド・たまりといった氾濫原水域の効率的な再生が可能となる。また、サケ科魚類の産卵場を保全するための河道設計が可能となる。さらに、河川改修時に環境劣化の可能性が高い自然河岸については保全するなどの措置が可能となる。
- ③ 水域では、人為的活動に伴う底質と濁質の変化が底生性生物に及ぼす影響を明らかにした。また、この結果を活用して、汽水域における効率的な環境評価手法および管理が可能となる。

本稿では、本プロジェクト研究で得られた成果の中から、特に現場実務者にとって有用と考えられる「河道掘削における環境配慮プロセスの開発」について紹介する。

2. 成果の紹介

2. 1 河道掘削における環境配慮プロセスの概要

河道掘削および樹林伐開は水位低下に有効な方策として多くの直轄区間で採用されている整備メニューである。近年の河道掘削は、陸域を対象とすることが多く、改変面積が広大となるため陸域の植物そして植物に依存する鳥類や植物と土壤に依存する陸上昆虫に影響を及ぼすことが懸念される。一方、掘削後は掘削面と平常時の水面との比高が減少し、掘削面の冠水頻度や湿潤状態が増加し、近年減少が著しい水辺に依存する生物が再生する可能性が高い。しかし、陸域における河道掘削が生物に及ぼす影響の評価や掘削範囲の設定方法、また、生物の回復の予測した上で河道掘削断面を設定する方法は確立されていない。以上から、本研究では、陸域を対象として環境に対する影響を予測・評価するアプローチを提案した。具体的には、陸域に繁茂する陸上植物を対象として、①河道掘削実施時のフェーズ、②河道掘削終了後のフェーズに分けて、①のフェーズにおいて植物の保全を図るまでの具体的な考え方とプロセスを提案したので、その手法を紹介する。②については現在の中長期プロジェクトにおいて検討中であるため、その概要を紹介する。

2. 2 河道掘削における環境配慮プロセスの概要

(1) 全体の流れ

全体の流れは河川水辺の国勢調査を活用し、植物群落を対象として現況評価を行った上で優先的に保全すべき群落を設定して、これを地図化する(図-1)。次に、これに河道掘削範囲を重ねて河道掘削の影響を評価、必要に応じて河道掘削範囲を調整するという手順を踏む。以下に各手順の概要を示す。

(2) 群落情報の整理－河川水辺の国勢調査の活用

種の分布を評価するための情報としては「河川水辺の国勢調査（以下、水辺の国調）」の活用が有効である。植物に関する水辺の国調としては、①植物調査（植物相調査）、②河川環境基図作成調査の一貫として行われる植生図作成調査、群落組成調査がある。①の調査は、調査が調査地区内に限定され、かつ、調査の間隔が10年と長く、河道掘削時のフェーズにおける植物の分布を評価できない。一方、②河川環境基図調査に伴う植生図作成調査は、5年間隔で国土交通省が管理する区間に對して広範に実施される。また、出現した群落の一部について群落組成調査を行い、各群落の種組成を明らかにしている。このため、群落の空間分布や種組成を把握できるだけでなく、調査を5年間隔で実施するため、河道掘削時における群落の分布を把握できる可能性が高い。ここでは、河川水辺の国勢調査を活用して、群落面積を把握するとともに、群落組成調査の結果を用いて、群落の種組成を推定し、群落の保全上の価値を明確にする手順を示す。

(3) 群落面積の変遷と評価対象種の関連付け

群落面積の変遷は当該河川において増加・減少している群落の実態把握に必須な情報であり、当該河川で減少している群落は保全対象の候補となる。したがって、河川水辺の国勢調査を用いて群落面積の変遷を明確にすることが本手法の第一歩である。次に、植物組成調査の結果を用いて、群落と種の関係を明確にする。植物群落には、種組成やそれらの量的配分、空間配置に一定の規則性があることが知られている。本手法では、各群落の種組成に規則性があることを前提とし、群落組成調査の結果にもとづき一部の群落の群落一種の関連性を、対象河川におけるすべての群落に適用できるものとした（図-2）。群落の保全上の価値を明確にするため、ダムにおける環境影響評価の考え方等を参考とし、

希少な種が含まれている群落、種構成が特殊な群落、外来種が含まれる群落の抽出を行う。なお、ここでの希少な種とは、環境省第4次レッドリスト植物（維管束植物）と県レッドリスト（維管束植物編）の掲載種とした。また、種組成が特殊な群落についてはTWINSPANを用いて選定した。外来種については、特定外来生物の掲載種が含まれているか、外来種が優占しているかどうかに着目した。

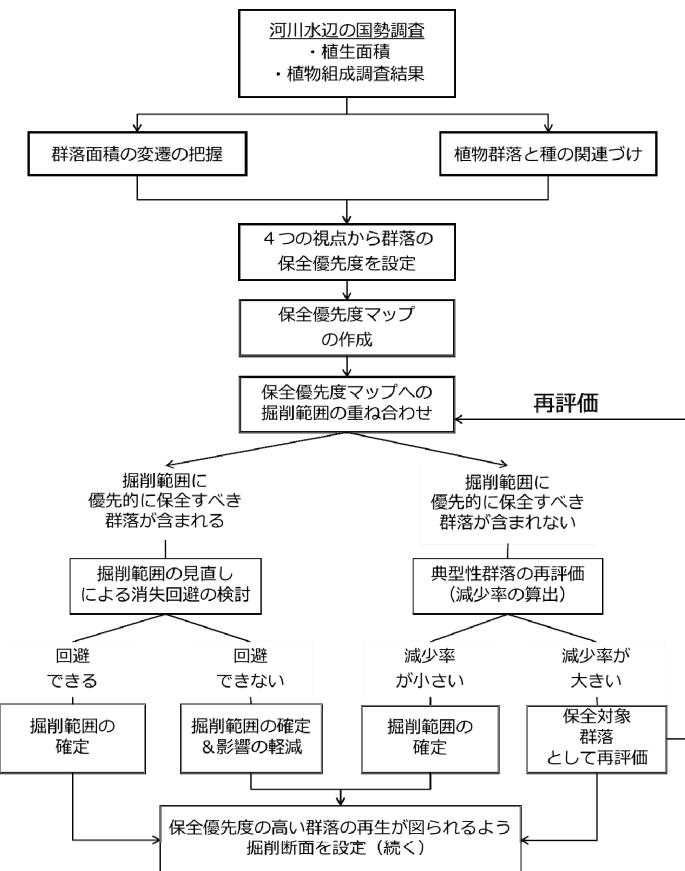


図-1 環境現況評価のフロー

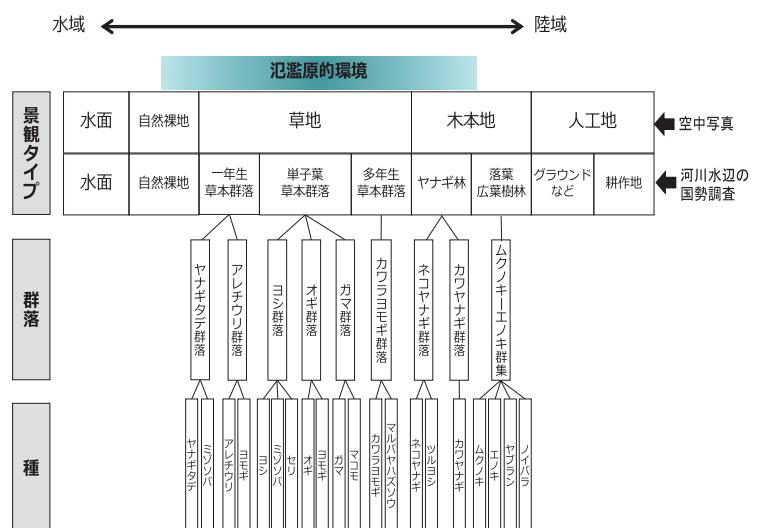


図-2 群落の種組成の推定

表-1 保全優先度の基準の例

評価対象項目	ケーススタディー河川における設定基準	
	保全優先度の最も高い群落（保全優先度A）	保全優先度の高い群落（保全優先度B）
1) 希少性		
a 全国的に減少している種	絶滅法、環境省第4次レッドリスト植物I（維管束植物）の掲載種が優占している群落 絶滅法、環境省第4次レッドリスト植物I（維管束植物）の高ランクの掲載種（絶滅危惧I類）が含まれている群落	環境省第4次レッドリスト植物I（維管束植物）の掲載種が含まれている群落 -
b 地域的に減少している種	県版レッドリスト（維管束植物編）の掲載種が優占している群落 県版レッドリスト（維管束植物編）の高ランクの掲載種（絶滅危惧I類相当）が含まれている群落	県版レッドリスト（維管束植物編）の掲載種が含まれている群落 -
2) 典型性	河川性（水辺性）の種が優占する在来植物群落で基準年から90%減少している群落	河川性（水辺性）の種が優占する在来植物群落で基準年から70%以上減少している群落
3) 特殊性		
・種組成が特殊な群落	TWINSPANにより抽出された種組成の特殊な群落	-
・当該河川で小面積の群落	直轄管理区間における面積の合計が10ha未満の群落	-
4) 外来種	特定外来生物を含まない、かつ、外来種被度の平均が10%未満の群落	特定外来生物を含まない、かつ、外来種被度の平均が50%未満の群落

(4) 保全優先度の設定と地図化

(3)での群落の分析結果を用いて、優先的に保全する群落の設定を行う。本手法では、希少性の観点、生態系の典型性や特殊性の観点から保全を図る群落、外来種の観点から防除対象となる群落を選定する。具体的には、(3)での分析結果を活用し、①全国的に減少している種、地域的に減少している種が含まれる群落（希少性）②河川性（水辺性）の種から構成され、当該河川で面積が減少し、典型性の消失が懸念される群落（典型性）、③種組成が特殊で面積が小さい群落（特殊性）、④特定外来生物を含まない群落

（外来性）の4つの視点を設定し「保全優先度の最も高い群落」、「保全優先度の高い群落」の2つの基準を設け群落を選定する（表-1）。

この基準に基づきケーススタディー河川において保全優先度マップを作成した例を示す（図-3）。「保全優先度の最も高い群落」として選定されたのは、5群落であり、「保全優先度の高い群落」は1群落となった。ただし、対象となつた群落の中で平成20年の調査段階で現存していた群落は3群落に留まり、植物における生物多様性の減少が懸念される結果となった。保全対象群落に選定された基準の内訳を見ると、希少性で選定された場合よりも、典型性の観点から選定され減少率が高い群落、もしくは、特殊性の観点から選定された群落が多かった。

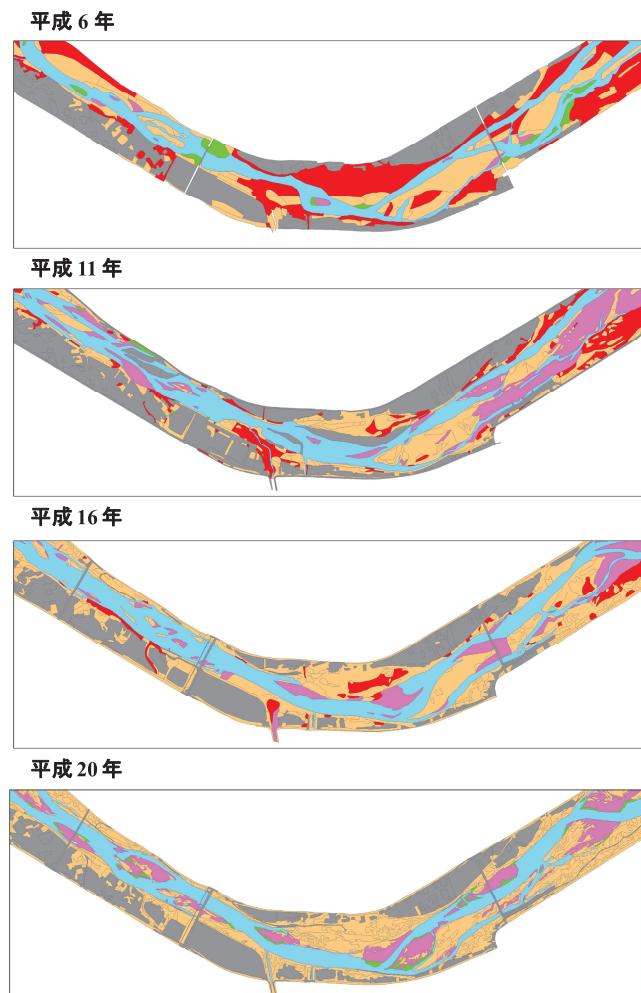


図-3 保全優先度群落の経年変化

(5) 河道掘削範囲の重ね合わせ

保全優先度マップが完成したら、次に河道掘削範囲をこれに重ね合わせる(図-4)。保全優先度の高い群落が掘削範囲と重なる場合には、掘削範囲を調整し影響の回避を目指すが、これができない場合には、移植等の方法も含め影響の軽減を図ることが必要である。また、掘削断面の設定によっては消失する植物の回復が可能となるため、回復する植物を予測し、この結果を折り込んだ掘削計画とすることも可能である。なお、掘削範囲に保全すべき群落が含まれない場合においても、掘削によって減少する群落の中には、典型性の観点から保全すべき群落に選定される場合もある(図-1右側のフロー)。この場合には、掘削範囲の調整等を再度行い、必要に応じて軽減を図ることが必要となる。

2.3 河道掘削断面の設定手法について

河道断面設定手法については、現在、植物の管理、多様性の保全等の観点から、幾つかの植物群落をまとめた群落群(群落クラスター)を予測する手法を開発している。本手法に基づけば、掃流力、比高、水際からの距離を説明変数として群落クラスターの分布の予測が可能となり、結果として、任意の断面に対して種との関連性が高い群落群の分布を予測・評価することが可能となる(図-5上)。本手法はまだ開発途上ではあるが、現段階での予測結果は、概ね観測結果と一致することを示しており、比較的再現性が高いことが検証されている(図-5下)。今後、精度の向上に加えて、実務者が簡易に適用できるような工夫も行い、河道掘削断面の設定に活かして行きたい。

3. おわりに

本プロジェクトでは、河道の陸域環境の現況評価、河道掘削の影響を評価し、掘削範囲を設定する手順を明示した。また、掘削断面の合理的な設定方法についても試案を提示した。今後、更に適用河川の拡大やモデルの検証等を図っていく所存である。

今回は陸域環境のみに着目した提案であったが、水域についても、魚類、イシガイ類を対象として、現況を評価する手法を開発中である。特に、ワンド・たまりについてはイシガイ類の保全に有効な河道掘削方法を検討しており、実際の川づくりにおいて活用されつつある。今後、対象分類群を鳥類、両性・爬虫類、陸上昆虫等に拡大しながら、河川環境を総合的に評価するシステムの拡充を図っていきたいと考えている。

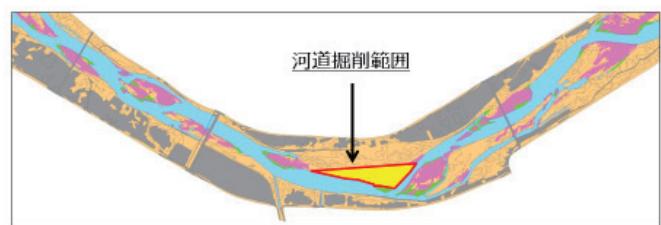


図-4 保全優先度マップへの掘削範囲の重ね合わせ

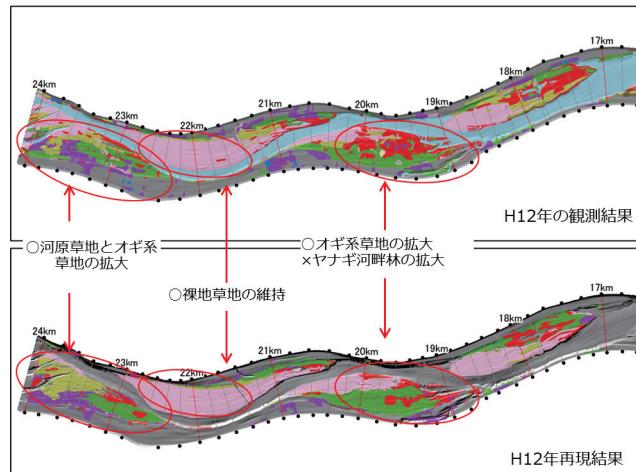
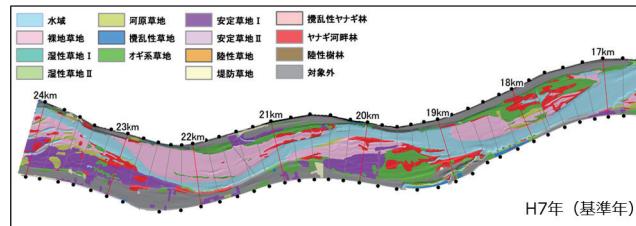
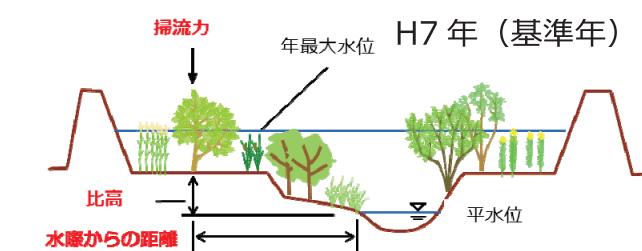


図-5 植生動態モデルの考え方(上)と
予測した例

流域における健全な土砂動態の確保に向けて

水工研究グループ 佐々木 一英

1. はじめに

河川・海岸では、近年、土砂移動の長期的変動に起因する海岸侵食、河床のアーマー化、濁筋の固定化等が進行し、自然環境の劣化や生態系の崩壊が急速に進行している状況が見られる。また、排水路や下流の中小河川、ダムでは、土砂堆積の進行が施設管理上大きな課題となる事例も生じている。図-1.1にこのような土砂の不連続・土壤流出等に起因する問題事例を示す。これらの課題を解決するためには、流域的な視点から土砂移動のバランスを是正する必要があり、河川における土砂移動と土砂環境の関係および土砂環境と生物環境の関係を把握するとともに、良好な土砂環境の制御技術が求められている。そこで、本プロジェクト研究「河川の土砂動態特性の把握と河川環境への影響及び保全技術に関する研究」では、1. 河川の土砂動態特性の解明、2. 土砂供給・土砂流出による河川環境・河川形状への効果及び影響評価技術の提案、3. ダム等河川横断工作物の土砂供給技術の開発、4. 大規模農地での土砂制御技術の提案の4つの達成目標を設定し、研究を実施した。図-1.2に本プロジェクト研究の研究関連図を、以下に本プロジェクト研究において開発した技術を示す。

- ・ダムからの排砂もしくは置土について下流河道にとって必要とされる量と質を決定する方法を提案するため粒径集団の役割を考慮した河床変動モデルを開発した。
- ・粗粒化および土砂供給による河床環境の変化が水生生物（付着藻類、底生動物、魚類）に及ぼす影響について検討するため水生生物への影響を踏まえた河床環境の評価手法を開発した。
- ・治水・環境・維持管理を踏まえた河道計画の新規立案の際の一助とするため、環境への影響評価および維持管理の軽減技術を開発した。
- ・環境影響の低減及び河川の土砂の連続性を確保するために、流水型ダムの放流設備の計画・設計技術を開発した。
- ・農地からの土砂流出に対する排水路の機能保全と水環境を保全するために、農地流域から流出する土砂流出量推測技術を開発した。

また、以下に本プロジェクト研究で開発した5つの技術に関する研究概要と主な成果を示す。なお、詳細な成果全体については、土木研究所の成果報告書等を参照されたい。

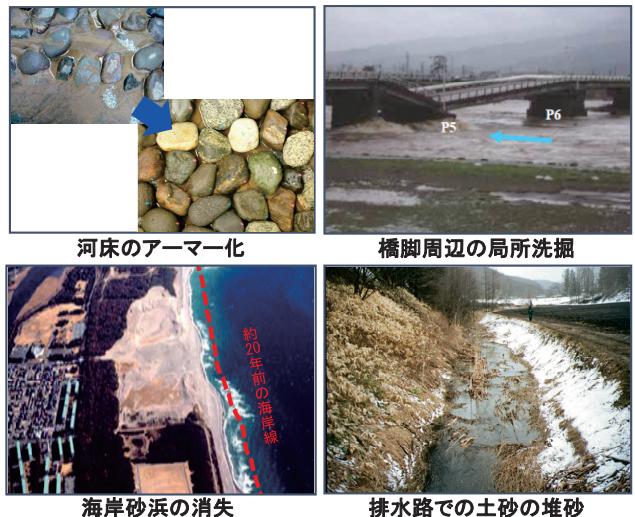


図-1.1 土砂の不連続・土壤流出等に起因する問題事例

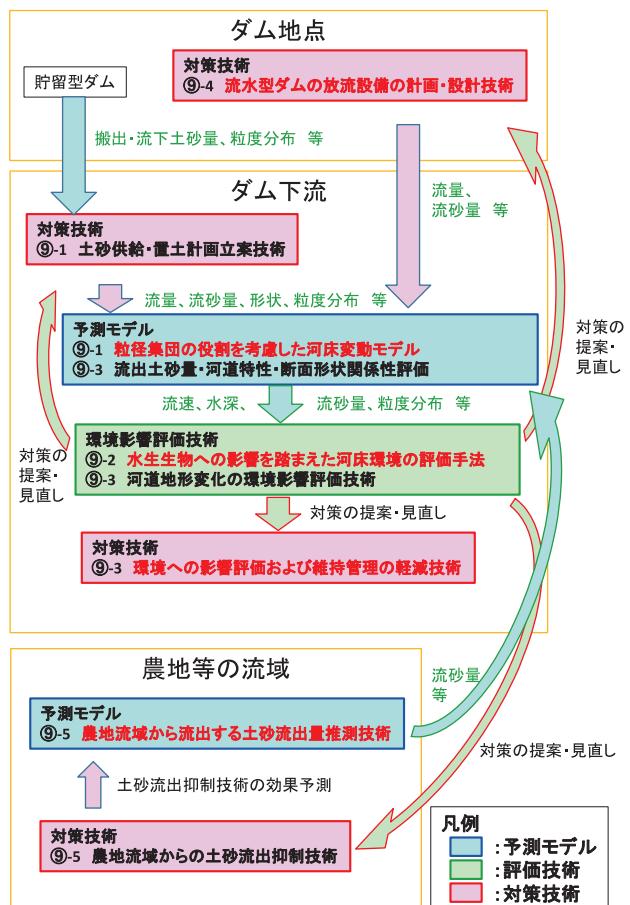


図-1.2 研究関連図

2. 研究課題の概要と主な成果

2. 1 粒径集団の役割を考慮した河床変動モデル

2. 1. 1 研究概要

近年、ダム貯水池の堆砂問題や総合土砂管理の視点からダムからの排砂、置土等の土砂供給が多く実施されてきているが、どの様な粒径の材料がどこまで流下するのかなどが十分に明らかとなっておらず、この土砂供給に対して下流河道にとって必要とされる量と質を決定する方法が求められている。このため、ダム周辺の粒度分布幅の広い多様な河床材料で構成されている河川を対象として、水理実験により河床変動および河床形態に関して個々の粒径集団が持つ役割を明確にするとともに、粒径集団の役割を考慮する河床変動モデルを開発することにより、ダムからの排砂もしくは置土について下流河道にとって必要とされる量と質を決定する方法の提案に資することを目的として実施したものである。

2. 1. 2 主な研究成果

粒径集団の役割を明確にするため、移動床水理実験により、粒径分布の異なる河床材料を用いて、河床形状・流砂量等の相違についての検討を実施した。実験結果に対して、河床変動モデルでの再現計算を実施した結果、従来の混合砂を対象とした流砂量式では、山地河川等の特徴である粒径が広く分布する河床材料の場合は、流砂量を過小に見積もる傾向があることが明らかとなった。そこで、水理実験結果を踏まえ、岩垣式の逆算から求められる移動限界粒径以下の河床材料の粒度分布から求められる平均粒径を計算上の代表粒径として流砂量式等に適用する河床変動モデルを開発し、流砂量の再現性の向上が図られた。

さらに、河床材料の粒度分布幅を示す指標としての対数正規分布型での標準偏差を用いて空隙率変化を推定する簡易式を導き、河床変動モデルに導入するとともに、移動限界粒径の大きさを交換層厚とする方法も導入した結果、河床形状変化の再現性の向上が図られた。

今回開発した河床変動モデルにより、土砂供給の量と質の変化や流量の変化に伴う表層の粒度分布の変化、空隙率の変化などを表現することが可能となり、この開発した河床変動モデルを水生生物等への影響予測・評価等にも活用することが可能と考えられるものである。

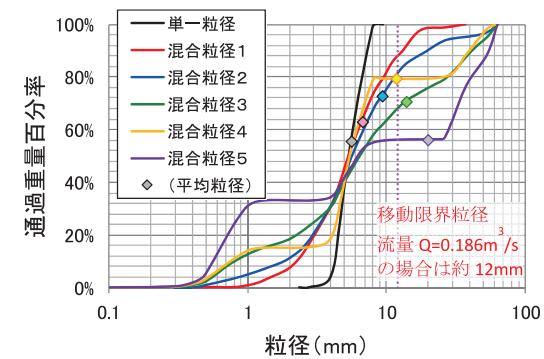


図-2.1 河床材料の粒度分布

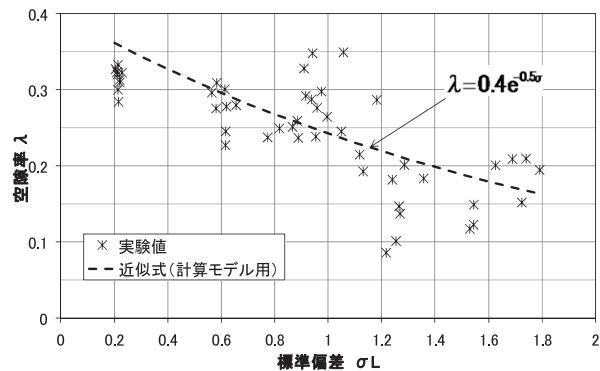


図-2.2 河床材料の標準偏差と空隙率

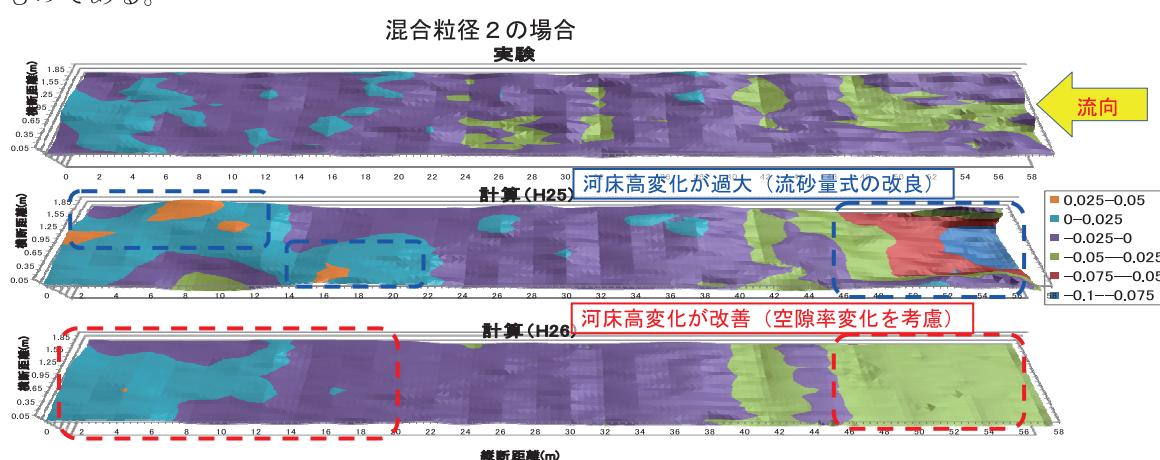


図-2.3 通水前後の河床変動量（初期河床高を基準）

2. 2 水生生物への影響を踏まえた河床環境の評価手法

2. 2. 1 研究概要

ダム下流で見られる粗粒化した河床は、本来供給されるべき土砂が欠乏した状態であるため、ダム下流に棲む水生生物への様々な影響が懸念されている。この河床の粗粒化を緩和し、ダム下流の河床環境の改善を促す方法として、排砂や置土等によるダム下流への人為的な土砂供給が検討されている。ただし、人為的に供給される土砂の動態は、自然状態のものとは異なることもあり、河床に砂が厚く堆積する等、自然状態とは異なる環境に変えてしまう場合もある。このため、水生生物の生息場環境にとって効果的な土砂供給を実施するためには、河床環境の変化に対する水生生物への影響を予測・評価し、土砂供給方法にフィードバックする必要がある。そこで、本研究では、粗粒化した河床および土砂供給により変化した河床の環境が水生生物に及ぼす影響をモデル化や解析により明らかにし、水生生物ごとに評価の指標および手法を提案した。以下に、成果の一例を記載する。

2. 2. 2 主な研究成果

実河川の石を潜水目視で観測し、アユの食み跡の有無と物理環境（石面積、石の河床表面からの高さ〔露出高〕、水深、流速）との関連性を解析した。その結果、アユの食み跡の有無が、露出高や石面積の大きさによってある程度説明可能であることが明らかとなった（図-2.4）。特に、食み跡の有無を説明する最も説明力のある変数として、露出高が選択された。また、石面積と露出高に対するアユの食み跡の有無の確率分布図から、同じ石面積でも露出高の減少により食み跡が見られにくくなることが示された（図-2.5）。このことから、アユの採餌への影響を評価する場合、許容される土砂堆積量を石の露出高をもとに推定することで、アユの生息場環境にとって効果的な土砂供給方法の検討に寄与できる可能性がある。

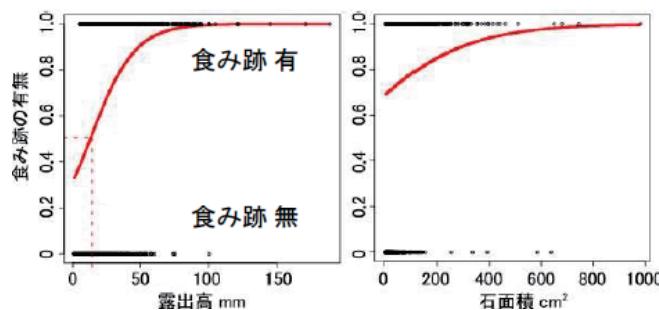


図-2.4 露出高および石面積と食み跡の有無との関係

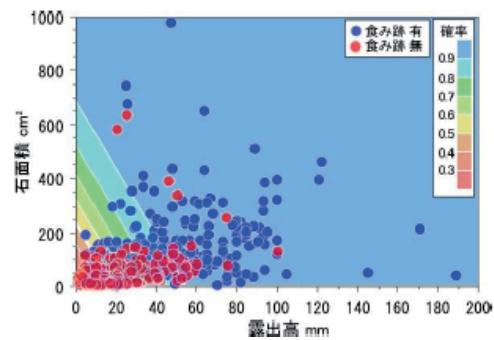


図-2.5 露出高、石面積がアユの食み跡の有無の確率に及ぼす影響

2. 3 中小河川における環境への影響評価および維持管理の軽減技術

2. 3. 1 研究概要

ここでは、新規に河道計画を立案する際の一助とするため、中小河川の現状を調査した後、河道特性や流域からの流出土砂の違いなどから河床地形や生物生息場に及ぼす影響を検討し、河道改修後に環境や維持管理が軽減化に繋がる手法の開発を目的とした検討例について報告する。

2. 3. 2 主な研究成果

調査対象地は、花崗岩を有する三重県、堆積岩や火成岩を有する岐阜県内を流下する中小河川（約100河川）を対象とした。各河川の川幅や降雨量から1年に1時間あたり最大雨量から想定される水深（外挿計算に依る）から、各河川の幅水深比を算出した。ここで、幅水深比は、交番砂州の発生・非発生など、河床形態を判断する1つの指標として用いられることが多い。また、出水により形成される交番砂州は、平水時などの流量で生じる瀬・淵といった形態的イメージとの関係も深い。すなわち、川幅の変化は、洪水時の土砂輸送の結果によって形成される河床形態に影響し、さらに平水時の流量でみられる河道の景観（以下、河道景観という）へとその影響が波及すると考えられる。図-2.6に、調査河川のうち代表的な河川での $BI^{0.2}/H$ と河道の景観を示した。殿川のような幅水深比が小さい川では護岸に根継ぎが見られるなど、河床低下傾向にあり、三滝川のように幅水深比が大きくなると砂州河川へと変化していることがわかる。これらの例をもとに、現れる河道の景観を6種類に整理し、さらに分析を加えて幅水深比とFrの関係で河道の景観を整理した（図-2.7）。例えば、 $BI^{0.2}/H > 7$ の領域のうち、 $F_r < 0.8$



図-2.6 $BI^{0.2}/H$ と河道景観との関係

(写真中の両矢印は設定した川幅を示す)

の領域では、河道景観として、「砂州」が多く見られる。一方、 $BI^{0.2}/H < 7$ になると、 $BI^{0.2}/H > 7$ での分布が少ない「平坦な河床」、「岩盤」、「岩盤一部露出」の河道景観が多くを占めていることが分かる。このような川は、河床低下などが生じやすいえ瀬・淵も少なくなり、河道の維持管理の負担が増え易いばかりか、生物にとっても生産性の乏しい川となりがちであることが分かる。

以上のように、川幅の変化は流出した土砂の移動量などに寄与し、これが河床の地形変化や環境に影響を与える。研究で開発した本指標を用いることで、環境への影響の程度や維持管理の軽減化を図る川づくりの技術支援に役立つことが可能となる。

2.4 流水型ダムの放流設備の計画・設計技術

2.4.1 研究概要

環境面から注目されてきている流水型ダムでは、洪水時には洪水調節機能を満足し、常時には河川の連続性を満足する相反する2つの機能を有する必要がある。本研究では、これらの機能を満足する新形式の放流設備の開発やこれら放流設備の計画・設計技術の提案、さらには、洪水時から常時に移行する際に水位低下に伴う濁水発生機能の解明と対策技術の提案を目的として、水理模型実験や長期（100年間）の堆砂シミュレーション等により検討した主な結果について報告する。

2.4.2 主な研究成果

(1) 土砂および生物の移動の連続性確保のための新形式放流設備

常時は、貯水せずに、土砂を通過させることが可能な流水型ダムに適用する新形式放流設備として、図-2.8示すように、ゲート付き横長の口の形状を有する洪水吐きと掘り込み式減勢工の組み合わせを提案した。常時や洪水末期には土砂が流下して、掘り込み式減勢工が土砂で埋まり、洪水時には水位の上昇に伴う流水の流速増加により掘り込み式減勢工内の土砂が下流にフラッシュされて減勢工が現れ、減勢機能が回復する。ここで、提案している掘り込み式減勢工の規模（掘り込み高さと掘り込み長さ）

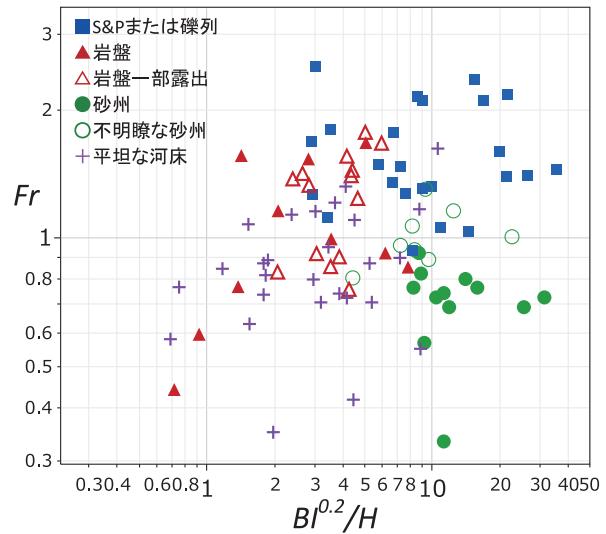


図-2.7 $BI^{0.2}/H$ とフルード数との関係

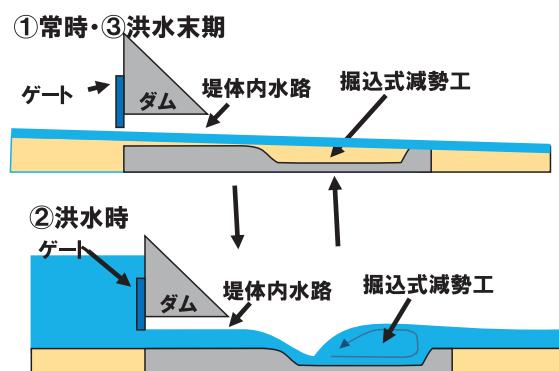


図-2.8 流水型ダム新形式放流設備

については、水平水叩き式減勢工の設計手法により設計できる。水平水叩き式減勢工の設計手法で得られた副ダム高を掘り込み高さに、水平水叩き長を掘り込み長さに設定すれば、設計可能である。また、ゲートについては、既往技術のローラゲートを使用することで対応可能である。なお、常用洪水吐きの幅については、ダムの構造上設置可能な規模を満足する必要がある。

(2) 流水型ダムの放流設備の計画・設計技術の提案

長期の貯水池堆砂シミュレーションの検討結果（図-2.9 参照）より、貯水池内の堆砂量の経年変化からゲート付き流水型ダムの排砂性能がゲートレス流水型ダムのものより優位であることが明らかになった。また、上記の貯水池堆砂シミュレーション結果から得られる通過土砂量を流入条件として、ダム下流（堤体内水路・掘り込み式減勢工・下流河道）を対象とする河床変動シミュレーションにより土砂の堆積状況を計算した結果、洪水時に減勢工内の土砂がフラッシュされ、洪水末期から減勢工内に土砂が堆積していき、減勢工下流まで土砂の堆積がみられ、常時の魚道機能としての可能性が明らかになった（図-2.10 参照）。

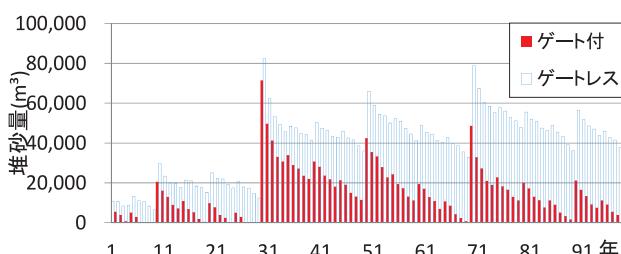


図-2.9 長期の堆砂量シミュレーション結果
(河床勾配 1/80) 流入土砂量が少ないケース

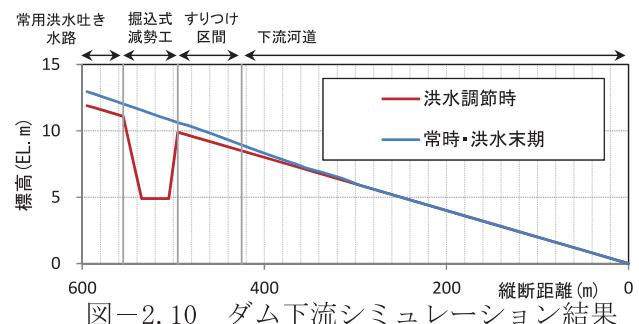


図-2.10 ダム下流シミュレーション結果

2.5 農地流域から流出する土砂流出量推測技術

2.5.1 研究概要

農地流域からの過剰な土砂流出は、農地の生産力低下や排水路の機能低下、下流域の水環境悪化などを引き起こす。農地流域から流出する土砂への対策を効果的に実施するためには、土砂流出量の推測技術を開発する必要がある。これまで農業農村整備事業で使われてきた土壤流亡予測式である USLE (Universal Soil Loss Equation) は経験モデルであり、斜面単位で年間の土壤流亡量が推測可能であるが、斜面から流亡した土砂が流域末端に流達するまでの過程を考慮することができないため、流域から流出する土砂量の予測に利用すると誤差が大きくなる可能性がある。一方、物理則による土砂流出モデルである WEPP (Water Erosion Prediction Project) は、斜面の土壤侵食だけでなく、水路での土砂移動も表現することができるため、流域から流出する土砂の予測に利用可能である。WEPP は海外での適用例は多くみられるが、日本での適用事例は少なく、一般的な土砂流出予測ツールとしては広まっていない。

そこで、本研究では、積雪寒冷地に位置し大規模農地が広がることで土壤流亡・土砂流出の危険性が高いと考えられる北海道を対象として、①実測値を基にした WEPP の適用性検証、②土砂流出抑制対策の WEPP による効果予測を実施した。

2.5.2 主な研究成果

(1) WEPP の概要

WEPP は、アメリカ農務省により主に 1985 年から 1995 年にかけて開発されたモデルで、斜面での侵

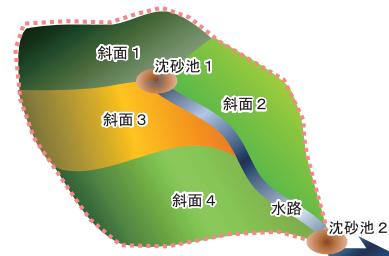


図-2.11 WEPP の流域構成イメージ

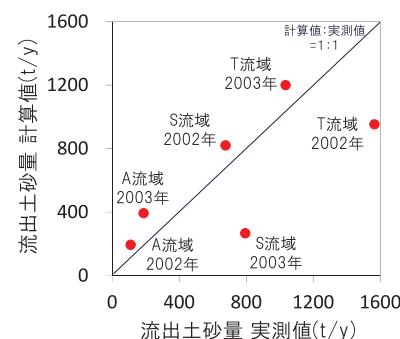


図-2.12 有効透水係数調整後の実測値と計算値の関係

食、水路または河川における侵食・堆積・輸送、貯水池における堆積・輸送という3つの場における過程で構成され、これらを複数配置し、結合することで流域を表現することができる（図-2.11）。WEPPを利用することで、流域のどの部分で侵食が発生しているか、斜面からの流出物が水路や沈砂池においてどのように堆積するか、といった個々の現象を、詳細な物理則に基づいて表現することが可能となる。WEPPを適用するために必要な主な入力データとして、気象・土壤・地形・作物管理などがある。

（2）実測値を基にしたWEPPの適用性検証

複数の流域を対象に、現地で収集した条件を用いてWEPPで土砂流出量を計算したところ、流域末端で観測した流出土砂量の実測値が大きく乖離していた。そこで、感度分析の結果、最も感度の高かった土壤の有効透水係数を調整することで実測値に近似させた（図-2.12）。現状では、国内でWEPPを適用させるには、まずは現地にて土砂量観測を実施し、パラメータの調整をする必要があると考えられる。

（3）土砂流出抑制対策のWEPPによる効果予測

WEPPの利用事例として、WEPP上にて斜面の最下部の土地利用を森林にすることで緩衝林帯の土砂流出抑制効果をシミュレーションした。緩衝林帯の幅は、3~4mで緩衝帯を通過する土砂の大部分が捕捉されるとの報告があることから¹⁾、本研究では余裕をみて5mとした。各流域2年分の対策前後の土砂流出量の計算値は表-2.1のようになり、3流域平均で52%の土砂流出が抑制されるという結果となった。農地率の高いA流域で最も高い効果が得られると予測された。

表-2.1 緩衝林帯設置前後の土砂流出量計算値

		流出 土砂量(t)	削減率 (%)
A流域	対策前	1,800	64
	対策後	650	
T流域	対策前	6,200	50
	対策後	3,100	
S流域	対策前	3,300	42
	対策後	1,900	

3. おわりに

本プロジェクト研究において、河川における土砂移動に起因する問題に対し以上5つの技術を開発した。これらの技術について、今後フォローアップの研究等を実施するとともに、基準・マニュアル等への反映や技術指導、現場での実用化・早期普及を通じて、流域における健全な土砂動態の確保に努めてまいりたい。

【参考文献】

- 1) 高橋和也、鈴木洋一郎：土砂の捕捉に必要な水辺緩衝林帯幅に関する考察、応用地質技術年報 No. 24, pp. 93-98, 2004

水環境をどう改善するか？ ～流域スケールにおける水質管理技術の開発～

水環境研究グループ 森 吉尚

1. はじめに

公共用水域の水質は、「水質汚濁に係る環境基準」における、「人の健康の保護」に係る項目は達成率が次第に高まっているが、有機汚濁等の「生活環境の保全」に係る項目については、特に閉鎖性水域において改善が十分に進んでいない。安全・安心への関心の高まりの中で、科学技術に関する基本政策について（答申原案）（総合科学技術会議、平成 22 年 11 月 17 日）では、社会インフラのグリーン化や、人の健康保護や生態系の保全に向けて、大気、水、土壌における環境汚染物質の有害性やリスクの評価、その管理および対策に関する研究を推進することが位置づけられている。これらの解決にあたっては、栄養塩類をはじめとする汚濁物質による水質障害への対応、病原微生物等によりもたらされる水質リスクへの対応を、流域スケールの視点での物質動態を踏まえ、河川管理者や下水道管理者がその役割の下ですすめていく必要がある。

以上を踏まえ、本プロジェクト研究「流域スケールでみた物質の動態把握と水質管理技術」では、平成 23 年度から平成 27 年度までの 5 年間で、流域スケールでの統合的な水質管理技術の確立を見据え、有機物や栄養塩類を対象とした負荷量原単位把握、汚濁現象の解明・モデル化、病原微生物等を対象とした調査方法開発、実態・挙動の解明、対策手法の提案を、雨天時汚濁負荷、微量金属動態等の、従来十分に考慮してこなかった因子も加えてすすめた。研究を進めるにあたり、以下の達成目標を設定した。

- (1) 各土地利用における物質動態を統合した流域スケールでの水・物質循環モデルの構築
- (2) 流域からの汚濁負荷が閉鎖性水域の水質におよぼす影響の解明と対策手法の提案
- (3) 流域スケールで見た水質リスクの把握と対策技術の提案

本稿では、本プロジェクト研究で得られた成果の中から、特に現場実務者にとって有用な研究成果を抽出し、紹介する。

2. 成果の紹介

2. 1 流域における晴天時・雨天時の栄養塩類流出負荷源および負荷量の推定方法

河川集水域からの栄養塩類の雨天時の流出機構を解明するため、印旛沼流入河川である高崎川において、雨天時の水および硝酸イオンの安定同位体比に着目した負荷源調査を行った。近年、安定同位体比に着目した流域環境評価が盛んに行われているが、安定同位体比を調べることにより、その起源や反応履歴を推定することが可能であるためである。図-1 に、安定同位体比モデルを用い推定した窒素負荷源別の硝酸性窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$) 負荷量の推移を示す。降雨前のサンプリングでは、

水田：森林：畠地が 1 : 5 : 4 程度であったのに対し、降雨初期には、森林由来の $\text{NO}_3\text{-N}$ の割合が増加し、その後、水田由来の割合が増加した。河川流量が平常時に近づくにつれ、畠地由来の割合が増加していた。これらのことから、雨天時の窒素負荷源は時間経過とともに大きく変動していることが明らかとなった。

また、平均流出濃度 (Event Mean Concentration; EMC) に着目した負荷量調査を行った。EMC とは、一降雨イベントにおける総流出負荷量を総流出水量で除した平均濃度であり、実態の流出現象を把握しやすいとの知見がある。流域の土地利用の 70% 以上が市街地である調査地点における窒素・りん等の EMC と、総雨量・時間最大雨量との間には一定の相関が認められた。また、同じ地点における総雨量と総流出水量との

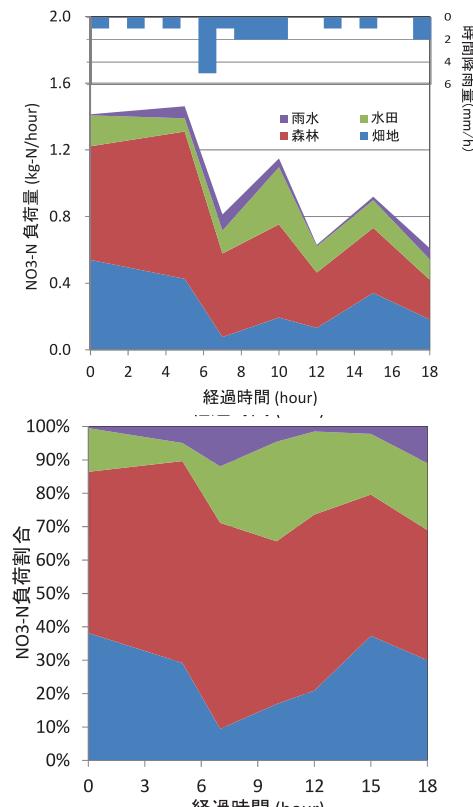


図-1 安定同位体比分析による発生源予測

間にも一定の相関が認められた。それらの近似式を用いて、総雨量から EMC と総流出水量を求め、これらを乗じて 1 降雨での流出負荷量が求められる。これを 1 年分(平成 23~27 年の五か年の雨量データを用い、平均)積算し、雨天時の年間総負荷量とし、降雨の影響のない時間帯の調査結果をもとに、晴天時の年間流出負荷量を求めた。これらの結果のうち、窒素に関して図-2 に示す。この例では、雨天時に含まれない時間の割合、すなわち、晴天時の時間の割合は 88% であった。また、併記している原単位法での算出には、湖沼水質保全計画印旛沼第 6 期の原単位等を用いた。原単位法に比べ、EMC 等による推定値が大きくなつた。原単位法では、市街地からの面源汚濁負荷が 8 割を占めており、市街地の原単位は、総雨量 17 mm 以下、なおかつ、最大時間雨量 4 mm/hr 以下の 3 降雨 7 地点の現地調査によつている。EMC 等による推定値には、総雨量 150 mm 以上、なおかつ、最大時間雨量 20 mm hr 程度の雨天時調査結果も反映されている。調査時の最大時間雨量または平均降雨強度が大きいほど、実測調査から求めた原単位の値が大きくなるとの知見もあることから、この原単位法では雨天時負荷が十分に算定されず、非点源汚濁負荷が低く見積もられている可能性が考えられた。

2. 2 閉鎖性水域における底層環境の改善による水質改善効果

藻類生長に及ぼす栄養塩の影響評価、実湖沼における水質評価について、これまで窒素やりんの研究が数多く行われてきたが、藻類生長に及ぼす鉄やマンガン等の微量金属の影響については、その影響が指摘されてはいたものの、知見は不十分である。本調査では霞ヶ浦に設置した隔離水界において鉄やマンガンを含めた水質の挙動を評価するとともに、それらの微量金属が藻類生長に及ぼす影響について評価した。また、鉄とマンガンが藻類生長に及ぼす影響を定量的に評価することによりモデル式の構築を行つた。さらに、確立したモデル式やパラメータ値を既存モデルに組み込み、モデルに基づく水質予測を行つた。

2013 年 6 月に霞ヶ浦に直径 1.2m、長さ 3m の隔離水界を設置し、7 月～8 月にかけて水面から 0.5m (表層として) と 2.5m (底層として) から適宜採水を行い、水質を調査した。底層では、溶出に伴い総鉄濃度や総マンガン濃度が非常に高く、Chl.a との明確な関連性が見られなかつたが、その要因としてそれら微量金属の濃度が高すぎたためと考えられた。一方、表層では底層での溶存態マンガンの溶出が見られても溶存態マンガン濃度はほとんど増えないとともに、懸濁態濃度と Chl.a の挙動は類似していた。一方、Chl.a の増加に伴い懸濁態鉄濃度が低下していくことから、藻類は懸濁態鉄も生長に利用したと推定された。これらの結果に基づく仮説として、藻類は溶存態マンガンを蓄積し、それをを利用して懸濁態鉄を消費するのではないかと考えた。そこで以下に示す室内で実施した藻類生長試験により仮説の検証を行つた。藻類生長試験には供試藻類として藍藻類 *Microcystis aeruginosa* (NIES-87) を用いた。本試験では鉄の形態 (溶存あるいは懸濁) とマンガン添加の有無が *M. aeruginosa* の生長に及ぼす影響を評

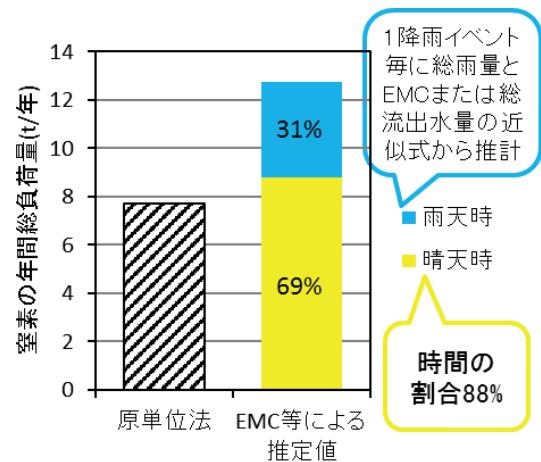


図-2 窒素の年間総負荷量（印旛沼高崎川流域・市街地の例）

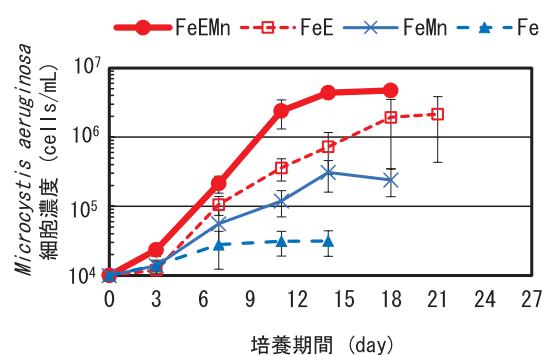


図-3 鉄性状が異なる条件下 (溶存態・懸濁態) でのマンガン添加・無添加の場合の *Microcystis aeruginosa* 生長曲線

価した。鉄として Fe-EDTA ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{EDTA}$ 、溶存態として) と EDTA なしの $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (懸濁態として、以下 Fe) を用意した。培養系は FeEMn (Fe-EDTA および Mn を添加)、FeE (Fe-EDTA 添加、Mn 無添加)、FeMn (Fe および Mn を添加)、Fe (Fe 添加、Mn 無添加) を用意した。結果として Fe-EDTA を添加した系では、マンガン添加あり (FeEMn)、添加無し (FeE) いずれもよく生長したが、最大細胞濃度は FeEMn の方が有意に大きくなつた (図-3)。Fe の系では *M. aeruginosa* はほとんど生長しなかつたが、それは Fe を利用できなかつたためと考えられた。しかし、マンガンを添加した FeMn の系では生長が確認された。

Microcystis aeruginosa がマンガン未添加の CB 培地で生長できたことから、マンガンは *M. aeruginosa* にとって必須栄養素ではないと考えられる。しかしマンガンを添加した系では生長が促進されたことから、マンガンは *M. aeruginosa* の溶存・懸濁態鉄いずれにおいてもその利用性を向上させる作用があると示唆された。よつて、本調査の隔離水界において表層の懸濁態鉄と Chl.a の増減が逆の関係にあつたのは、マンガンを蓄積した藻類の生長に伴う懸濁態鉄の消費が原因であると推定された。これらの結果から、マンガンは鉄の利用性を向上させることによってアオコ形成に寄与する重要な因子になりうることが示唆された。

藍藻 *M. aeruginosa* を供試藻類として鉄とマンガンが生長に及ぼす影響を定量的に評価し、生長モデルを確立した。また栄養塩溶出試験に基づき、好気・嫌気条件下での各種栄養塩の溶出速度を導出した。これらのモデルやパラメータ値を活用して既存の生態系モデル（水層と堆積層で構成された完全混合を仮定した 2 ボックスモデルであり、藻類生長や死滅、栄養塩の循環、藻類や栄養塩の流入出が考慮されている）に組み込み、湖沼での水質予測が可能な生態系モデルを構築した。仮想湖沼を想定したモデルによる計算を実施し、約 3 ヶ月を経過した際の定常状態における Chl.a 濃度を算出した。定常時の Chl.a の値は好気条件よりも嫌気条件のほうが高くなることが示された (図-4)。本モデル計算において藻類生長は窒素制限になつてゐたが、栄養塩溶出試験から本モデルにおいて底泥からの窒素の溶出速度は好気条件のほうが大きい設定となつてゐる。また、定常状態でのりん酸イオン態りんは余剰に残存していた。計算では好気条件では鉄、マンガンは溶出しないが嫌気では溶出することから、嫌気時のほうが Chl.a 濃度が高くなつた要因として鉄、マンガンも寄与していると考えられた。本モデル計算により、窒素、りんのみならず鉄やマンガンなどの微量金属の溶出もまた湖沼における藻類生長促進を引き起すことが示唆された。

2. 3 病原微生物の実態解明や定量技術の開発および水質リスク低減技術の構築

現行の水質指標である大腸菌群では、新興・再興病原微生物（原虫類、ウイルス、薬剤耐性菌）の汚染の実態を十分に把握できないこともあり、測定法の開発を通して公共用水域への各種汚染源の解明、汚染源の特徴に応じた対策手法の構築が望まれている。

汚染の実態解明のため、下水や環境水における新興・再興病原微生物の調査を実施した。結果の内、抗生物質耐性大腸菌に関し河川水試料の例を図-5 に示す。調査対象とした河川水、下水、病院排水の全

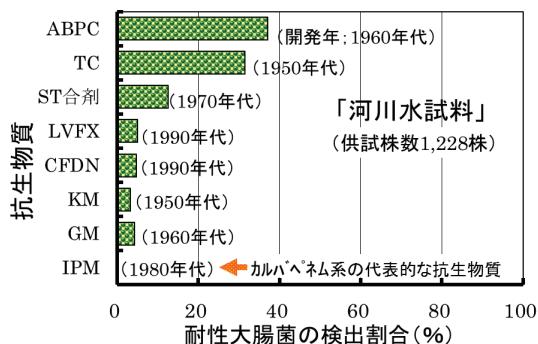


図-5 耐性大腸菌の検出割合と抗生物質の関係

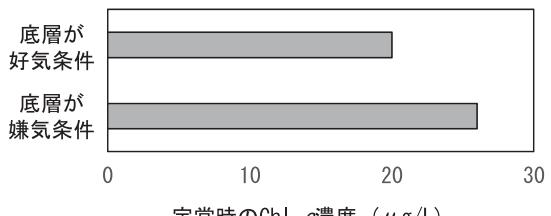


図-4 水質予測モデルに基づく好気・嫌気条件下での定常時の Chl.a 濃度の比較

ての試料でアンピシリン (ABPC) に耐性を示す大腸菌が多く検出された。また、ABPC 耐性大腸菌の 80~96% が多剤耐性大腸菌であることが明らかとなつた。このことは、下水処理場における消毒効果を含めた消長等を把握する上で、ABPC に耐性を有する大腸菌を指標とすることで、多剤耐性菌の効率的な管理に資することができるものと考えられた。一方、イミペネム (IPM) に耐性を示した大腸菌は、現在のところ不検出であった。

ウイルスの極低濃度試料に適した濃縮・定量技術の開発では、試料中の阻害物質や試薬反応量などの影響を明らかにした。それらの影響回避のため、抽出 RNA の逆転写工程や PCR 反応容量に対する供試水量をコントロールする手法の改良などにより、ノロウイルス (NV) の検出濃度の向上方策を提案することができた (図-6)。

適正な流域管理のための非点源負荷の実態と対策技術の構築では、非点源負荷として合流式下水道の降雨時越流水の影響を明らかにするとともに、その対策技術として遮集倍率向上による放流先河川水への NV 負荷の低減効果 (図-7、8) を確認し、負荷削減方策の 1 つとして提案した。また、雨天時活性汚泥法による NV 負荷の削減効果の評価結果から反応タンクの MLSS を高めることで、NV 負荷の削減効果が向上する可能性を明らかにし (図-9)、効果的な負荷削減方策を提案した。

水環境保全システムとしての適切な対策技術の構築として、抗生物質耐性大腸菌を用いて塩素、紫外線による不活化特性を解明した。塩素消毒では C_t 値を比較的高く設定 ($30\sim60 \text{ mg}\cdot\text{min/L}$) した場合、不活化率は $2.5\sim3\log$ 程度であり、残存した大腸菌の内訳として抗生物質耐性大腸菌の割合が上昇し、耐性を有さない大腸菌の割合は減少した。紫外線消毒では、比較的低線量 (10 mJ/cm^2) とした場合でも多剤耐性大腸菌の不活化効果は $5\log$ 程度が得られており (図-10)、抗生物質耐性菌への有効な対策手法の 1 つであると考えられた。

3. おわりに

本プロジェクトでは、栄養塩類負荷源および負荷量の推定、流域からの汚濁負荷が閉鎖性水域の水質に与える影響、新たな病原微生物による水質リスクの実態解明や対策技術等について、研究を進めてきた。今後、これらの技術や手法の熟度をさらに高め、国が実施する関連行政施策の立案や技術基準の策定に普及・反映することを目指すとともに、個々の技術的支援等に活用し、水環境の質を向上させ、地域の水利用や生活環境、水生生態系の保全を目指す。

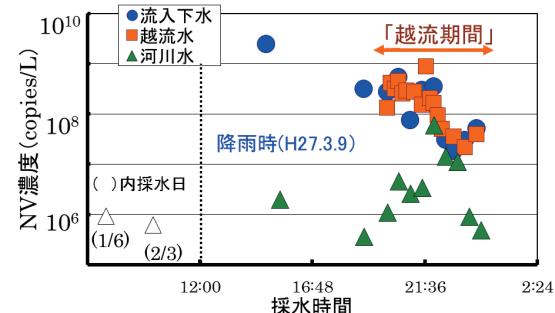


図-7 越流水の放流先への影響評価

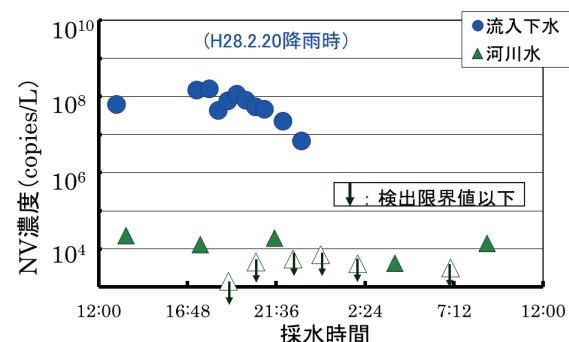


図-8 越流水の放流先への影響評価
(遮集倍率向上)

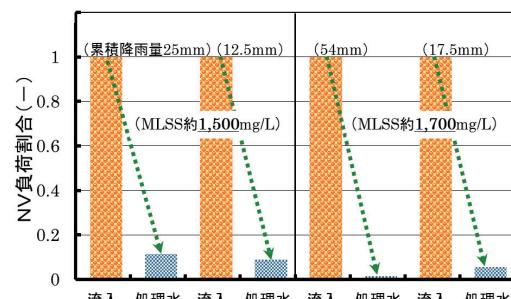


図-9 雨天時活性汚泥処理による
NV 負荷の削減効果

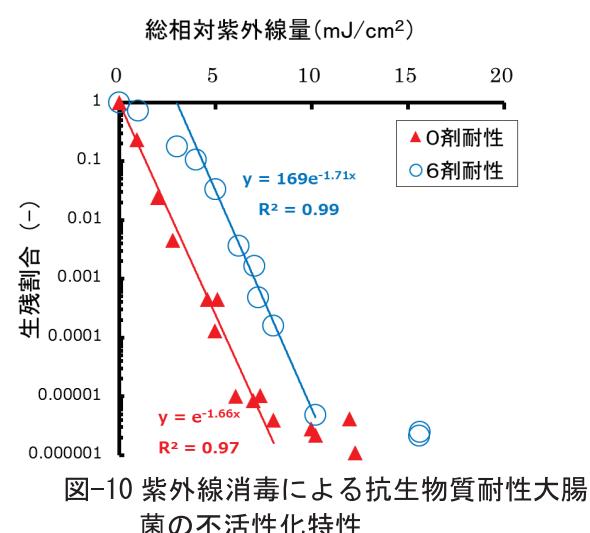


図-10 紫外線消毒による抗生物質耐性大腸
菌の不活性化特性

山・川・海 を土砂でつなぐ

寒地水圏研究グループ 船木 淳悟

1. はじめに

山地から河口部沿岸域までを一連の流砂系とした浮遊土砂の動態を明らかにし、陸域からの流出が沿岸域の水産生物の生息環境に及ぼす影響評価と、河川の影響を考慮した沿岸海域の漁場管理手法について、北海道の一級河川である鶴川・沙流川とその河口沿岸海域をフィールドとして研究を行った。

2. 鶴川河口沿岸地形の変化とその要因

北海道南部の太平洋沿岸に位置する鶴川は、1970年代から1990年代の約20年間で汀線が300m以上も後退し（図-1）、河口部に30ha以上も存在していた、シギやチドリなどの渡り鳥の重要な中継地・餌場となる干潟がほぼ消失した。また、汀線が後退したことにより、河口周辺地域では台風や低気圧通過時に越波による浸水被害が発生するようになった。そこで、過去およそ50年間の河川流量データ、河道掘削量データ、河道横断測量データ、河口の航空写真および近年の養浜データをもとに、河口沿岸地形の変化要因を分析した（図-2）。

鶴川においては、1990年代まで砂利採取を含む河道掘削が実施されている。また、鶴川河口左岸側（東側）には、鶴川漁港が1973年に建設着工され、1980年に供用開始されている。

河口域を含む鶴川沿岸域における、こうした土砂の供給・移動環境の変化を踏まえると、1970年代から1990年代にかけての河口汀線の急速な後退は、河道掘削の影響による海域への土砂供給量の減少と漁港建設に伴う沿岸漂砂の遮断に加えて、この時期に規模の大きい出水が比較的少なかったことが影響していると考えられる。

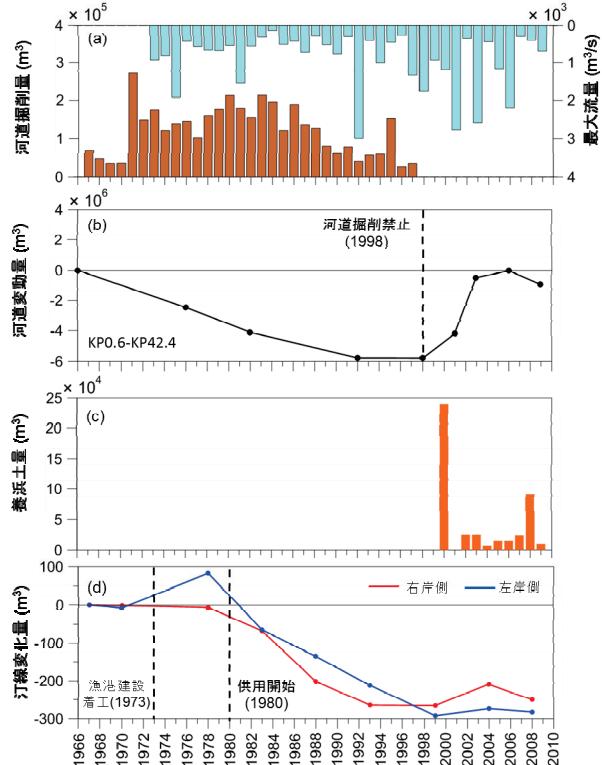


図-2 (a) 年最大流量と河道掘削量、(b) 測量区間全域の地形変化量、(c) 養浜履歴、(d) 河口の平均汀線変化量

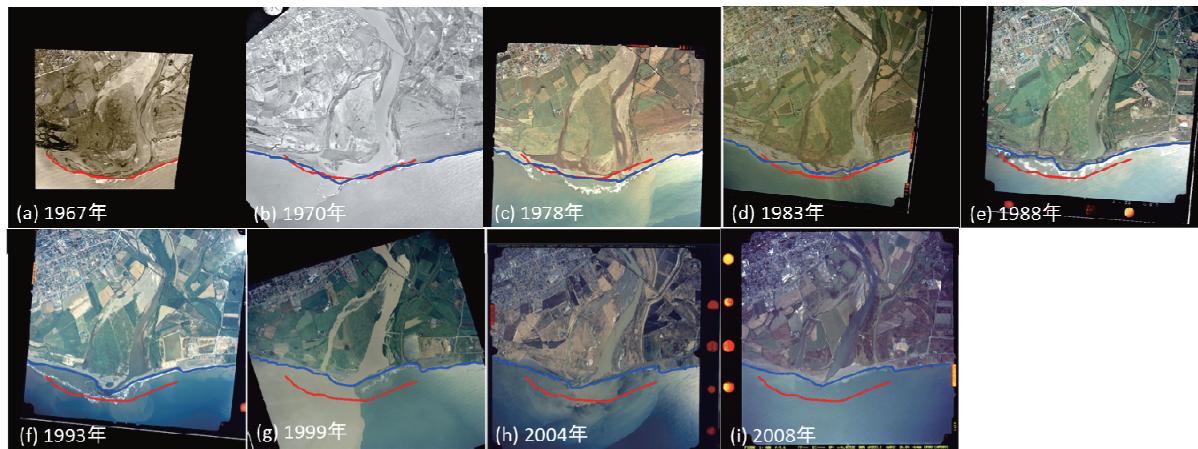


図-1 鶴川河口の航空写真と各年の汀線（1967～2008；赤線は1967年の汀線）

1998年以降の河道掘削（砂利採取）の禁止と2001年、2003年、2006年の大規模な出水、さらに、2000年以降の鵠川漁港東側に堆積した土砂をサンドバイパスする養浜事業の効果により、近年は汀線の大きな後退は生じていない。

3. 山地から沿岸域までの濁質（浮遊土砂）動態の解明

3. 1 濁質生産源推定手法の開発

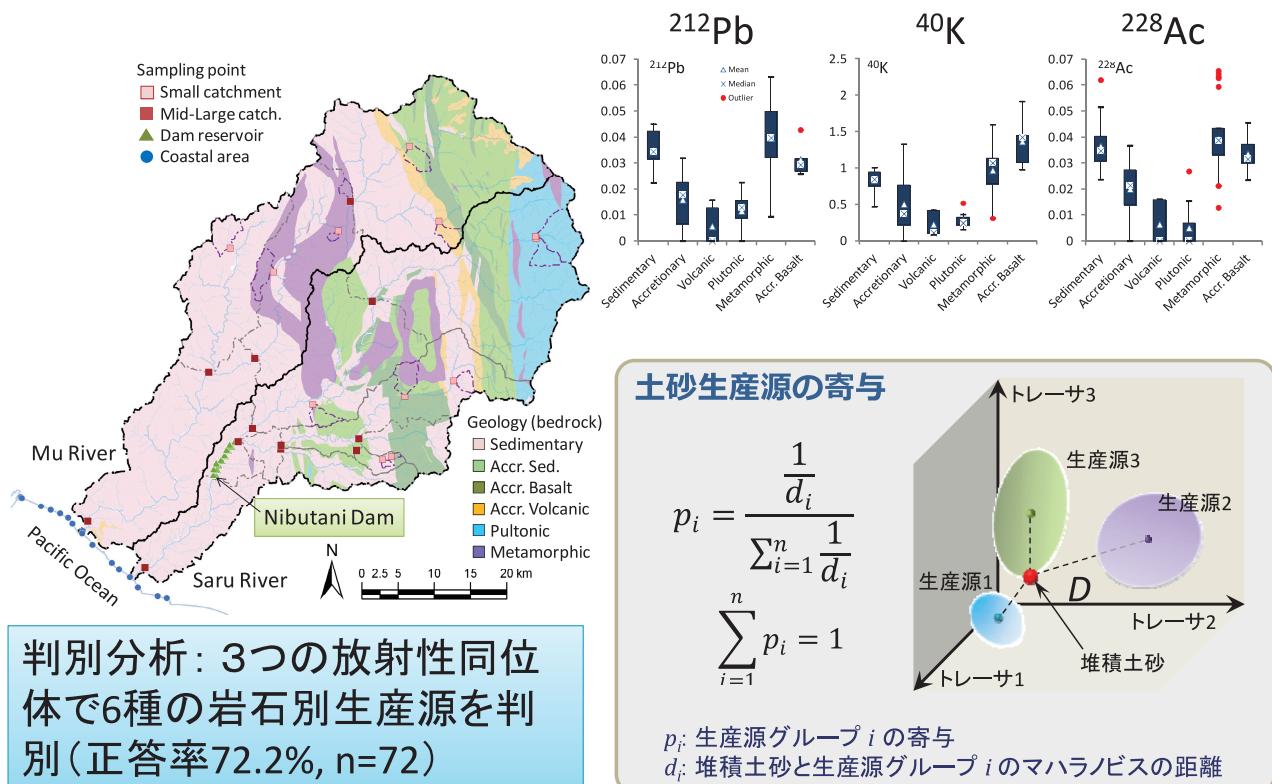


図-3 放射性同位体トレーサによる濁質生産源寄与の推定モデル

流域からの土砂生産は、地形や地質、地すべりや崩壊等の荒廃状況、植生等様々な要素に支配されるが、土砂流出の長期化は、濁水の発生を伴い、ダム貯水池の埋積や下流域の河川生態系や水産資源に影響を及ぼす。このため、こうした土砂を管理し、あるいは対応策、適応策を検討する上で、濁質の生産源を把握することは極めて重要である。本研究では、流域に分布する地質に含まれる放射性同位体に着目し、下流域で採取された浮遊土砂と比較分析することによって、生産源を推定する技術の開発を行った（図-3）。

調査流域は、鵠川河口域沿岸における主要な土砂の供給源として、鵠川と沙流川を選定し、出水中の浮遊土砂サンプルに対し、放射性同位体特性（ ^{212}Pb , ^{228}Ac , ^{40}K ）による生産源推定を行った。浮遊土砂の放射性同位体特性は、 γ 線スペクトロメトリーにより定量評価し、地質（岩種）により区分された6種の土砂生産源（堆積岩、付加体基質、付加体玄武岩、付加体火山岩、深成岩、変成岩）とのマハラノビス距離を計算し、それぞれの寄与率を算出した。この寄与率に土砂濃度と河川

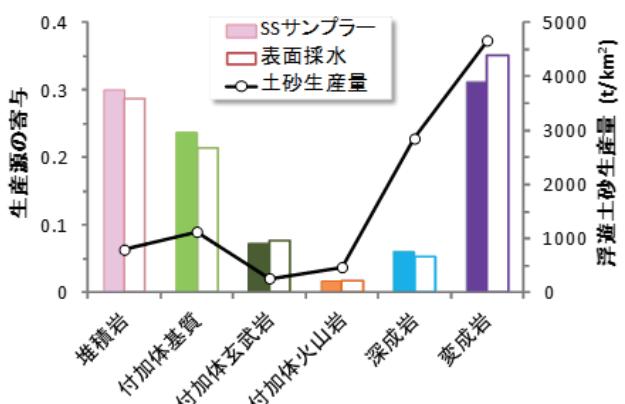


図-4 出水イベント中の濁質に対する生産源グループの寄与と土砂生産量

流量との関係式から求めた土砂量を乗じ、各土砂生産源グループの分布面積で除すことにより土砂生産量を算出した結果、鶴川・沙流川流域の単位面積当たり土砂生産量は変成岩が最も大きいことが判明した（図-4）。

上記の土砂生産源推定手法を用いることにより、支流域スケールでの土砂生産量の推定が可能となり（図-5）、水系の視点での土砂生産源対策や、生産特性に応じた流域土砂管理計画等に大きく寄与する有効な手法となる。

3. 2 河川・海岸土砂の生産源推定

次に、河川や海岸域に分布する土砂に関して生産源との関係を調べた。手法は、前述の放射性同位体をトレーサとして、沙流川の河口上流約21kmに位置する二風谷ダムの堆積土砂と、鶴川・沙流川の河口を含む沿岸堆積土砂に対して、前述の6種の岩種の寄与率を求めた。付加体基質と深成岩の寄与は負の相関が、堆積岩と変成岩の寄与は正の相関が認められた（図-6）。これらのことから、流域から流出する土砂は、粒径に応じて流域内の土砂生産源が異なり、海岸土砂の主要な生産源は鶴川・沙流川流域の上流域であると考えられる。

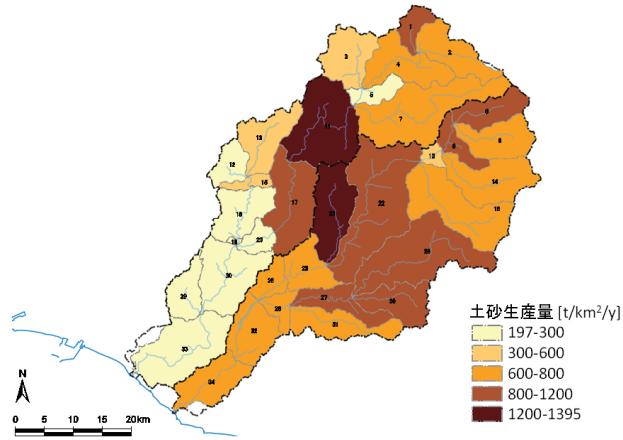


図-5 支流域毎の浮遊土砂生産量

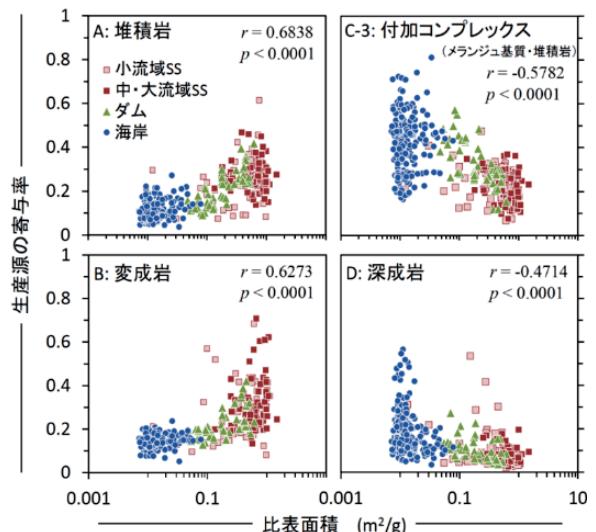


図-6 生産源寄与と比表面積の関係

4. 鶴川沿岸の水産生物と漁場環境

4. 1 ウバガイの生息環境としての底質環境

河口沿岸域における水産生物の生息環境は、陸域からの土砂や栄養塩の供給を直接的に受けることにより相互に密接な関係性がある。ここでは、鶴川河口沿岸域の水産有用種であるウバガイ（ホッキガイ）に着目した。

ウバガイの生息環境を知るために、ウバガイの生息環境と底質環境が有する特徴とを関連付けて解明することが必要である。環境には多種多様な環境要因が含まれることから、ウバガイが生息する環境の特徴を相対的に把握するため、底質調査および水質調査の結果を用いてクラスター解析、環境の類型化を行い（図-8、表-1）、ウバガイ生息環境との比較を行った。ウバガイの生息環境を類型化するため、底質分析項目および水質分析項目の中からウバガイの生息に寄与していると考えられる環境要因（底質：5項目、水質：3項目）を選択し、解析に用いた。底質分析項目の変数には、①COD、②強熱減量、③TP、④鉄、⑤粒度分布（うち粗砂、中砂、細砂、シルト）を解析に用いた。水質分析項目の変数には、海底上の環境に影響を及ぼすと考えられる底層の①DO、②SS、③クロロフィルaを解析に用いた。



図-7 鶴川河口海域における夏季出水の濁水拡散

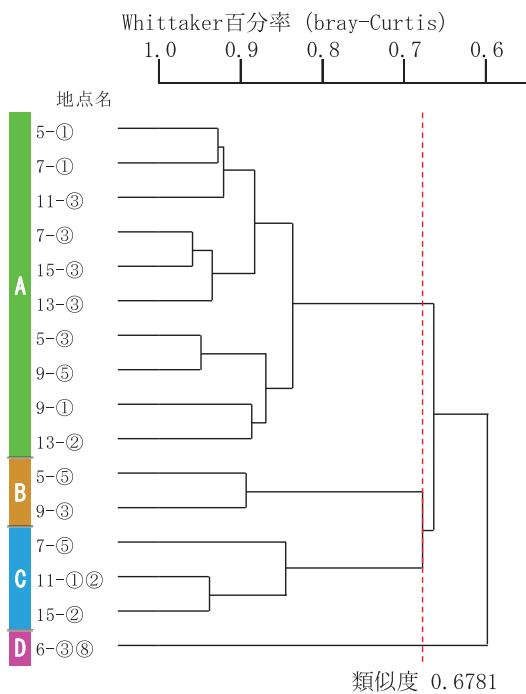


図-8 クラスター分析結果

表-1 各クラスターの特徴

	分析項目	クラスター番号			
		A	B	C	D
水質	DO (mg/L)	6.55	5.90	6.50	6.30
	SS (mg/L)	14.10	77.50	17.33	48.00
	クロロフィルa ($\mu\text{g}/\text{L}$)	3.24	3.40	2.63	6.80
	COD (mg/g-乾泥)	0.84	1.00	0.27	0.40
平均値	強熱減量 (%)	2.28	2.20	1.97	1.70
底質	T-P (mg/g-乾泥)	0.36	0.40	0.23	0.40
粒度	鉄 (mg/g-乾泥)	41.50	31.50	20.00	80.00
分布	粗砂 (%)	0.34	2.08	2.58	6.20
	中砂 (%)	12.18	19.02	51.16	28.48
	細砂 (%)	81.56	68.93	41.23	25.06
	シルト (%)	5.76	7.55	2.22	1.17

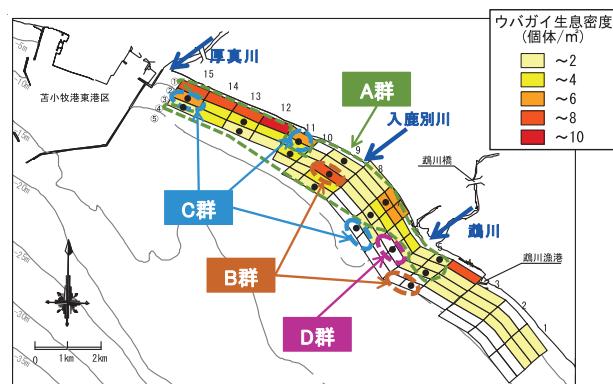


図-9 各クラスターとウバガイ生息密度

クラスター分析結果より大略の環境分布を示した(図-9)。ウバガイ成貝はいずれも大部分がクラスター分析でA群に分類された環境に分布していた。各群の空間分布と特徴と併せて考えると、鶴川河口近傍や沖合等、海水による攪乱が激しいと考えられる地点は比較的粒子の粗い底質環境、沿岸からやや沖合にかけての範囲は、細砂を中心とした粒子の細かい底質環境であることが窺えた。

4. 2 漁場環境の適正管理手法

本研究では、ウバガイ等の二枚貝を主体とする漁場環境の適正管理項目として、上記手法による(1)「底質・水質等の環境因子の評価」とともに、本稿では割愛したが、(2)「濁水の影響」、(3)「基礎生産の算定」を提案した。「濁水の影響」に関しては、河口海域での河川水の拡散範囲と土砂濃度分布から水産生物に対する影響を評価する。また「基礎生産の算定」では、濁水による光環境を考慮した生態系モデルによる基礎生産量の把握などである。

これらの漁場環境の管理においては、前述した陸域からの土砂動態を生産源にまで遡って評価する技術と連携することによって、効率的な漁獲対象区の選定や稚貝放流適正区の選定などに活用することが可能となる。

5. おわりに

本研究では、放射性同位体をトレーサとして陸域における土砂の生産源とその大まかな生産量を推定する手法を開発した。そして陸域から生産・運搬される浮遊土砂と、河口沿岸海域の地形変化や水産生物の漁場環境に及ぼす影響や環境因子との関係性について明らかにした。

土砂の管理を、生産源から河口海域まで含めた水系という概念でとらえ、その中の土砂の動態を把握・評価することが可能となれば、供給される側である河道や河口・沿岸海域における、土砂に関わるさまざまな課題への対応策・適応策を検討する上で、有用な手段となるものと考えている。更に研究を重ね、生産源や生産量の推定精度を高めていくとともに、研究の対象を浮遊土砂から比較的粗粒な砂礫に拡張していく予定である。

北海道の食料生産力を維持向上していくために

寒地農業基盤研究グループ 竹内 英雄

1. はじめに

地球規模の気候変動により、温暖化や海水温の上昇など環境変化が進む中、農産物や水産物といった食料生産の持続性が危惧されている。

農業では、温暖化の影響による積雪深の減少、融雪出水の早期化などが農業生産活動に影響を及ぼすことが予想されている。また、農村地域では農家戸数の減少により労働力が不足し生産性の低下が懸念されている。

漁業では、レジームシフトといわれる大気や海洋等の自然環境の変化に加えて乱獲などによる資源管理対象魚種のスケトウダラの漁獲量が激減する状況となっており、資源の保護育成に向けた取り組みが求められている。

このように、食料生産の現場においてその生産性の維持が危惧される状況を省みて、食料生産の持続性を確保するためこれらの環境変化に適合する各種技術開発を行ってきており、今回はそのうち「積雪寒冷地における気候変動下の農業用水管理に関する研究」と「北方海域の物理環境改変による生物生産性の向上に関する研究」について報告する。

2. 技術開発の成果

2. 1 農業生産の維持

将来的に気候が温暖化すると、気温や降水量、降雪量が変化し、各地の水資源利用量が影響を受ける。北海道のような積雪寒冷地では、融雪水が重要な水資源であることから、温暖化による積雪水量や融雪時期の変化が農業用水の利用に大きな影響を与えると考えられる。

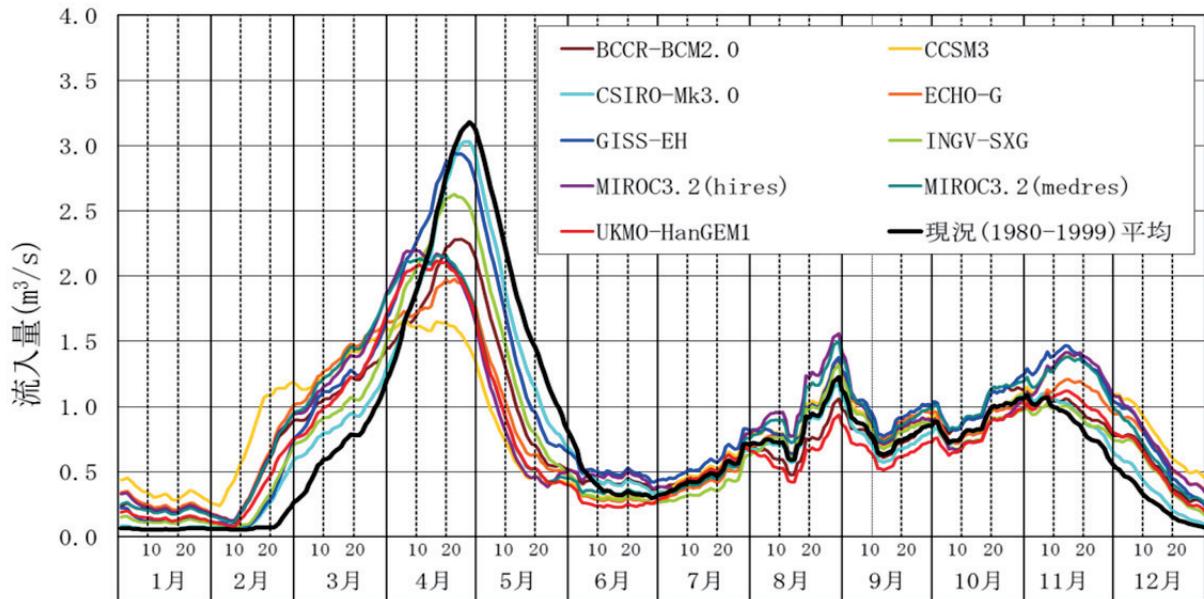


図-1 B ダム地点の日流出量経時変化（2046～2065 年）

気候変動による流出量の変化を 9 種類の気候モデルを用いて 6 地点で推定した。流出解析には、流域の長期流出解析に適している直列 4 段貯留型タンクモデルを用い、近傍アメダスにおける気温・降水量を入力データとし、各地点の流量を再現できるように、降水量の補正倍率やタンクモデルの係数を決定した。このように決定した流出モデルに気候モデルによる 2046 年～2065 年の気温と降水量の将来予測値を入力して、将来の流出特性の変化を現況と比較した事例を図-1 に示す。いずれの地点でも融雪ピーク日は早期化し、灌漑期（5～8 月）の総流出量が減少するとの結果を得た。しかしながら、減少の割合については標高によって異なることが明らかになり、既存の水利用を前提にすると、異なる標高の流域を有する水源施設を柔軟に連携することにより、農業生産への影響を軽減できることが判明した。

また、気候変動による融雪時期の早期化は、灌漑用の水管理にも影響を与えることになる。それゆえ、ダムの貯水開始時期において流域に存在する積雪水量の推定が必要となるが、山間部にあたる集水域で積雪量調査を行っている農業用ダムの事例は少ない。このため、平地の近傍アメダスデータから低コストで簡便な積雪量推定手法を図-2 のモデル式により開発した。

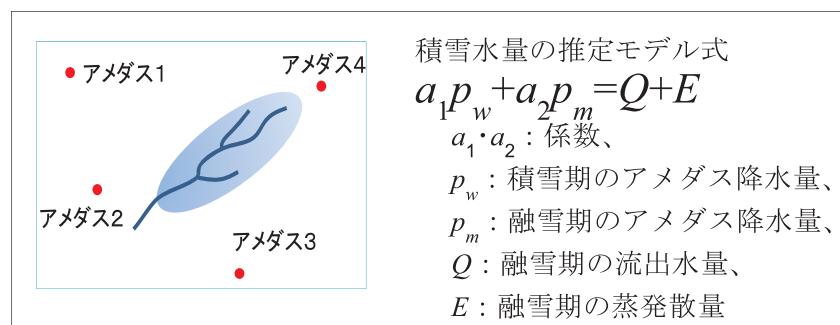


図-2 近傍のアメダスを利用した積雪量監視の考え方

積雪量の推定結果の一例を図-3に示す。観測地と推定値の差が比較的大きい時も見られるが、年々の変化については概ね再現することが可能となった。推定に当たっては、近傍1地点～4地点のアメダスデータを使用しており、データの選択による推定を比較することが必要であることも判明した。

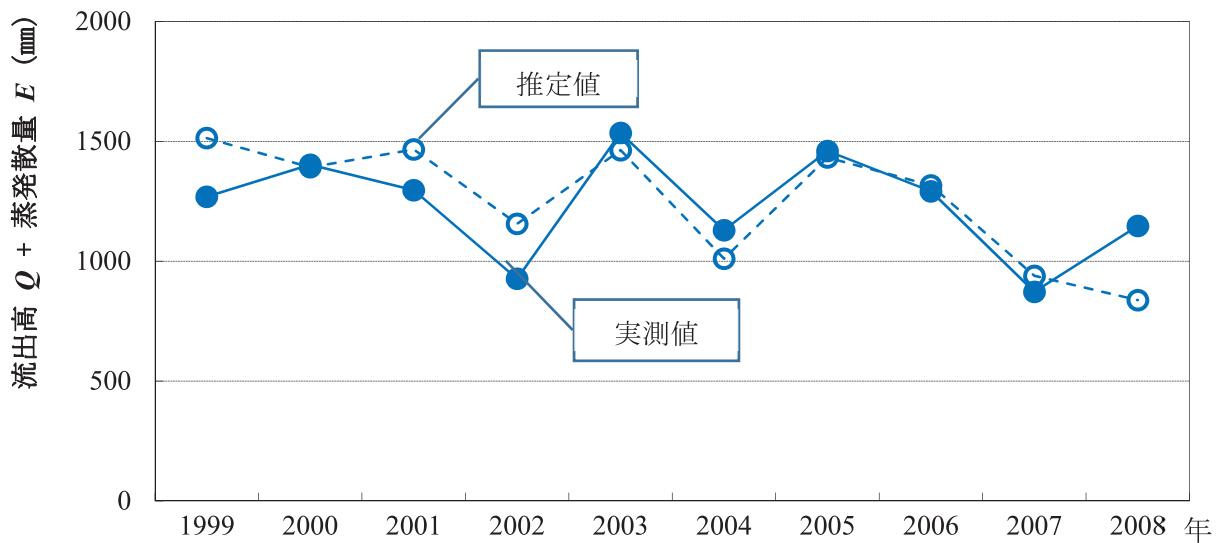


図-3 ダム流域での $Q+E$ の推定値と実測値の検証例

この推定値を水利施設管理者が利用することにより、水源量の管理と適切な配水管理による用水の安定供給が可能となる。

2. 2 水産資源の増強

北海道の主要な水産有用種の1つであるスケトウダラの漁獲量が著しく減少していることが示すように、排他的経済水域における水産資源の生産力を向上させ、水産物の安定供給の確保を図ることが急務となっている。このため、有望な海域において大規模な漁場整備が行われており、北海道近傍においてもその整備が期待されている。

漁場整備として考えられる工法に、海域の肥沃化や資源の減耗原因の解消を目的とした湧昇マウンド礁と保護育成礁がある。前者は、栄養塩が枯渇して基礎生産が抑制されている場合に、底層の栄養塩を供給して基礎生産量を増大させることで、餌料となる動植物プランクトンが増大し、対象魚の増肉と減耗率の低下を図るものである。これには栄養塩が枯渇する時期に湧昇流発生の外力が必要である。後者は、産卵前の親魚や減耗率の大きな幼稚仔魚を漁獲や外敵から保護し、生息環境を整えることで卵仔魚の増加や初期減耗を低下させるものである。これは保護すべき対象魚が分布し、補食生物や違法操業等からの保護効果が期待できることが条件である。

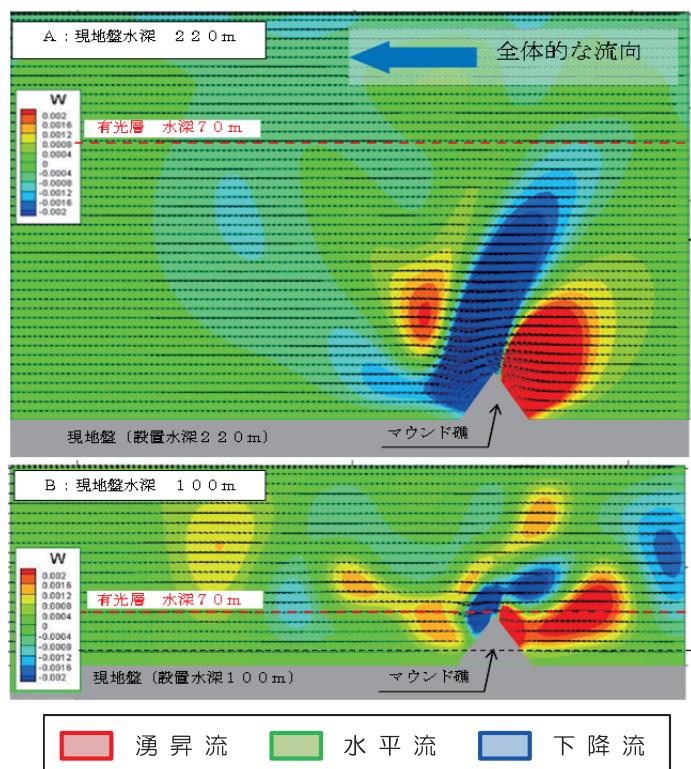


図-4 湧昇マウンド礁による擾乱効果解析
- 91 -

海洋の肥沃化を検証するため、スケトウダラの生育場となっている日本海北部武藏堆周辺において栄養塩を調査した結果、夏季、秋季において水深0～50m付近において硝酸塩が不足する状況が確認された。したがって、この時期に底層の栄養塩を供給できれば基礎生産は増大すると考えられる。この現象を造り出す方法として、大規模なマウンド状の人工礁（湧昇マウンド礁）を海底に設置することによって周辺の流れに擾乱や湧昇流を生じさせ、底層の栄養塩が表層に供給されるというメカニズムである。

湧昇マウンド礁の効果を確認するために、広域のプリミティブモデルと局所的な MEC (Marina environmental Committee) モデルを組み合わせて3次元による解析を行った。

その結果、図-4に示すとおりマウンド礁の設置水深を100mとした場合、有光層以浅の水深40m付近まで湧昇流が確認され、背後側では約500m先まで影響が及んでいるなど、底層の栄養塩を有光層内へ供給することによる基礎生産増大の可能性を確認した。

次に、稚仔魚の初期減耗を抑制し資源の底上げを図るため、同海域における年齢別資源分布状況の推定を行った。資源量分布については地方独立行政法人北海道立総合研究機構中央水産試験場が実施するスケトウダラ計量魚探調査を、年齢構成の推定に当たっては、同調査から得られている体長組成分布を年齢別の正規分布に分解することで各年齢の個体数を算出した。結果を図-5に示す。

年齢別資源分布状況から0歳魚の多い領域内を保護育成エリアとして、コホート解析の前進法により10年後までの波及効果を検証した結果、保護育成した場合の全体に対する効果は尾数換算で6.4%の増加と推定された。

湧昇流による海域の肥沃化及び保護育成礁による資源回復が定量化されることにより、漁場整備に係る整備効果を適正に算出することが可能となるとともに、整備に伴う便益として期待できる波及効果についても提示を行った。

3. おわりに

食料供給力の強化は国としての重要課題であり、その役割を担う農業・水産業の維持・向上を目指すことが求められている。

農業用水の管理については、将来の気候変動による水資源量の不足や変動に対して効率的、効果的な用水管理技術の開発、漁場整備の効果については、武藏堆周辺での基礎生産構造の解明や生産性向上のための技術開発であり、気候変動や社会環境の変化に適合した持続性のある生産システムを構築するための技術開発となっている。

ここで開発された技術が、類似した積雪寒冷地域や海洋域において活用され、我が国の食料生産力の向上・持続に貢献できるものと期待される。

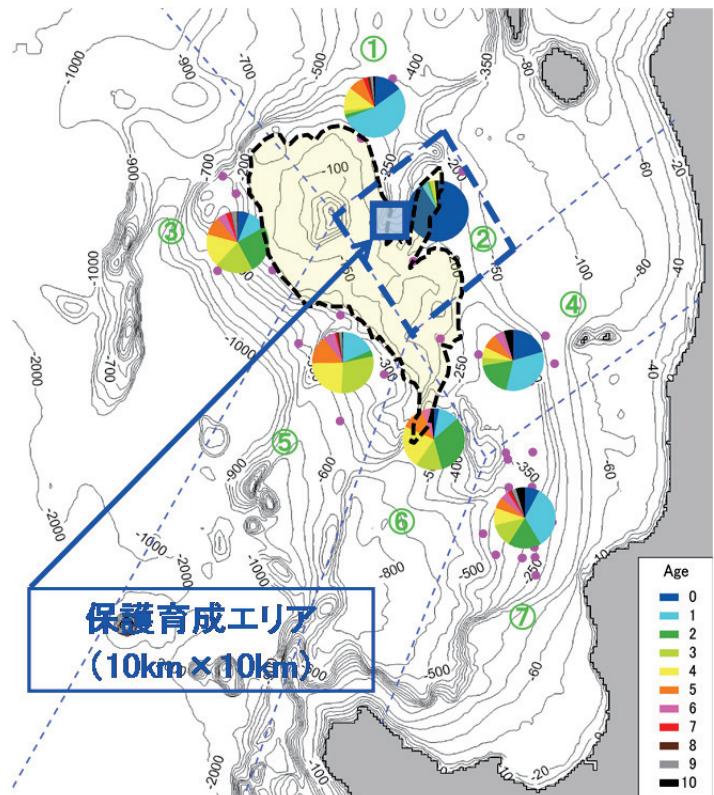


図-5 年齢組成図（尾数ベース）

【参考文献】

- 1) 中村・鵜木・多田・齋藤・臼谷：農業用ダム集水域における積雪水量推定手法、平成 22 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、pp.232-233、2010.8
- 2) 中村・伊藤・酒井・臼谷・吉田：アメダスデータを用いた流域の積雪水量の推定方法、農業農村工学会論文集、83、pp.II_27- II_33、2015.6
- 3) 京都大学防災研究所水資源環境研究センター水文環境システム研究領域：水文解析のための気候変動情報データベース、（オンライン）、
入手先<<http://hes.dpri.kyoto-u.ac.jp/database/index.html>>
- 4) 山本潤・渡辺光弘・林田健志・峰寛明・坂本和佳・西田芳則・田中仁（2011）：日本海北部漁場における表層冷却期の基礎生産構造に関する現地観測、海岸工学論文集、第 67 卷、pp1026-1030.
- 5) 林田健志・山本潤・大橋正臣・河合浩・坂本和佳・村上俊哉・工藤勲（2013）：北方海域に適用する低次生態系モデルのための生物パラメターの取得、土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.69, No.2, pp1126-1131.
- 6) Mellor,G.L.(2004) : USERS GUIDE for A THREE-DIMENSIONAL, PRIMITIVE EQUATION, NUMERICAL OCEAN MODEL,<http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom>
- 7) 日本造船学会、海洋環境研究委員会（2000）：MEC モデルワークショップ（第 1 回）
- 8) 北海道立総合研究機構（2001-2009）：調査速報日本海スケトウダラ資源調査結果.

他

土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of PWRI
No.4345 October 2016

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは
国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754