

ISSN 0386-5878  
土木研究所資料第 4417 号

令和 3 年度

土木研究所講演会  
講演集

令和 3 年 10 月 20 日

国立研究開発法人土木研究所

Copyright © (2021) 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、国立研究開発法人土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、国立研究開発法人土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。

# 令和3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、「令和3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。



## 目次

### ◆土研が取り組む DX（現場の安全性や効率性を向上させる研究開発）

- 10:05～10:25 建設現場の自律施工と施工データを活用した品質管理の推進  
～RT、ICT等による建設現場の働き方の革新を目指して～  
つくば中央研究所 技術推進本部長 前田 陽一・・・11
- 10:25～10:45 土砂災害の緊急対応における CIM 活用の効果  
つくば中央研究所 土砂管理研究グループ  
地すべりチーム上席研究員 杉本 宏之・・・5
- 10:45～11:05 環境 DNA による河川環境調査の最前線  
つくば中央研究所 水環境研究グループ長 松木 洋忠・・・11

### ◆土研が取り組む DX（仕事のプロセスや働き方を変革する研究開発）

- 13:30～13:50 土工の特徴を踏まえた情報化における留意点  
～ICT 土工から土工 DX へ～  
つくば中央研究所 地質・地盤研究グループ長 宮武 裕昭・・・15
- 13:50～14:10 激甚化する災害に対する橋の守り方と 3 次元デジタル計測技術の活用  
～リスクマネジメントによる想定外の克服を目指して～  
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 星隈 順一・・・17
- 14:10～14:30 一般的な気象データを用いた吹雪視程推定技術の開発とウェブサイト  
「吹雪の視界情報」による視程予測情報提供  
寒地土木研究所 寒地道路研究グループ長 松澤 勝・・・23
- 14:30～14:50 衛星リモートセンシングと数値シミュレーションの同化による水災害現象の  
解明と予測  
水災害・リスクマネジメント国際センター  
水災害研究グループ長 伊藤 弘之・・・29

### ◆新たな社会ニーズへの取り組み

- 15:10～15:30 下水・コンクリート廃材から資源・エネルギーを取り出す  
先端材料資源研究センター  
材料資源研究グループ長 西崎 到・・・35
- 15:30～15:50 構造物の洪水応答から導き出される点検・評価・対策研究の方向  
つくば中央研究所 水工研究グループ長 諏訪 義雄・・・41
- 15:50～16:10 トンネル覆工への新たな技術導入の取り組み  
つくば中央研究所 道路技術研究グループ長 久保 和幸・・・47



[ 土研が取り組む DX（現場の安全性や効率性を向上させる研究開発） ]

建設現場の自律施工と施工データを活用した品質管理の推進  
～RT、ICT 等による建設現場の働き方の革新を目指して～

土砂災害の緊急対応における CIM 活用の効果

環境 DNA による河川環境調査の最前線





# 建設現場の自律施工と施工データを活用した品質管理の推進 ～RT、ICT等による建設現場の働き方の革新を目指して～

技術推進本部 本部長 前田 陽一

## 1. はじめに

近年我が国が直面している人口減少・少子高齢化の影響を受け、建設業界では就業者の高齢化が急速に進行している。建設業ハンドブック2020<sup>1)</sup>によると、建設業就業者における55歳以上の割合は、2000年は24.8%であったのに対し2019年は35.3%と約10%上昇しており、一方29歳以下の割合は、2000年は20.5%であったのに対し2019年は11.6%とこちらは約9%低下している(図1)。また、2020年における年齢階層別建設業就業者数によると<sup>2)</sup>、高年齢者が最も就業者数が多く、年齢階層が低下する毎に減っている逆ピラミッド型となっており(図2)、近い将来に100万人以上の熟練技能者が一挙にリタイアすることが推測される。このことは、社会資本整備の担い手が今後大幅に不足する可能性を示しており、安定的で安全な社会資本整備が滞ることが懸念される。

この問題を解決するためには、建設産業において生産性を飛躍的に向上させることや、中長期的な担い手の確保のための魅力ある建設業の構築が必要である。国土交通省ではこの課題に対し、インフラ分野のデジタル化・スマート化を目的としたインフラ分野のDXを推進している。また一方、(国研)土木研究所技術推進本部においては、ICTを活用した次世代建設システムとして、「建設自律施工」や「施工データを活用した品質管理」について研究を進めている。

本稿では、この二つの取組について紹介する。

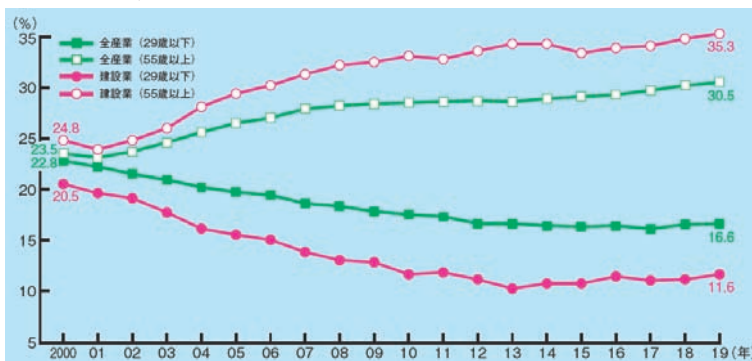


図1 建設業就業者<sup>1)</sup>(2020)

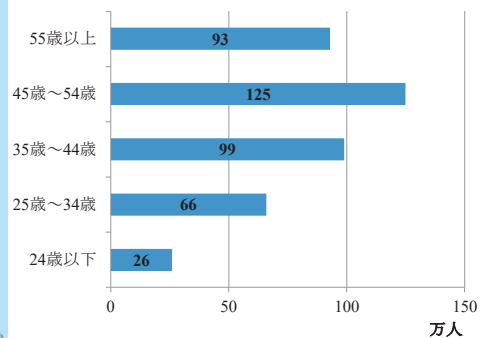


図2 年齢階層別建設業就業者<sup>2)</sup>(2020)

## 2. 建設自律施工

### 2.1 建設自律施工の現状

建設業界では、ロボット、センサ、ヒューマンインターフェース、AIなど我が国が強みを持つ最先端の基盤技術を活用し、建設生産性の大幅な向上と魅力ある建設業の構築を実現することが進められている。具体的には、これらの技術を用いて建設施工の一部あるいは全体を自動化し、非熟練技能者が熟練技能者並みの生産能力の発揮を実現することや、より少人数で建設施工を行うことで一人当たりの生産能力を上昇させるということである。そして最終的には「建設施工現場に必要な人員が最低限または無人となり、遠隔地などから指令を発信するだけで施工が自動で行われる状態」が将来的な目標となる(図3にイメージ図を示す<sup>3)</sup>)。



図3 建設施工の将来イメージ<sup>3)</sup>

この建設施工自動化は近年研究が進められてきており、施工会社や建設機械メーカーなどが建設機械の自動運転等で試行を行っている<sup>4)~7)</sup>。しかし、建設施工は単独の建設機械による作業だけではなく、複数の機械の協調作業や全体の施工計画、施工後の検査などで構成されており<sup>8)</sup>、図3に示した将来目標を実現するためには、研究機関・大学・民間企業の研究をさらに加速させることが必要である。

## 2. 2 建設自律施工研究における課題

2020年3月に(一社)日本建設業連合会から「建設業のためのロボットに関する調査報告書<sup>8)</sup>」が公表された。この報告書では、「建設業界へのロボット実用化に向けた課題」をまとめている。これらの課題は、建設自律施工技術を研究・開発し、社会実装していく上でも共通の課題となるものである。要約すると以下となる。

- ① 多種多様な建設現場環境や作業内容に対応できる柔軟な建設ロボットの開発  
 多種多様な建設現場環境や作業内容でも利用可能な作業性を有した、全天候型ロボット技術の確立が求められる。
- ② 自動化を念頭においた法令・規制の整備

産業用ロボットを参考に、建設業界においても人間とロボットの協働に向けた法整備を進めていく必要がある。

- ③ 協調領域の明確化と技術の標準化による研究開発体制の整備、それによる開発コスト削減

建設業界は、個社による技術開発が目立つため、研究の重複が起こっており費用対効果を得ることが難しくなっている。協調領域を明確にして、同業者による共同研究を含めた産学官連携による技術開発体制を整備し、技術の標準化・共通化による開発・運用コストの削減が必要である。

## 2. 3 土木研究所技術推進本部における取組

土木研究所技術推進本部では、特に上記の③を解決することで自律施工の研究を大幅に加速させることが可能となると考え、まずこれまで自律施工の研究を行っている企業などにヒアリングをし、上記③を図4のようにまとめた。概説すると、以下の通りである。

- ・ 従来の枠組みでは、民間企業が自律施工技術の開発を進める場合、多くのケースで施工会社と建設機械メーカーが1対1の開発グループを形成することになる。
- ・ このような開発グループが複数存在し、秘密保持などの制約のために、互いに連携・協働することが困難となっており、研究開発投資の重複が起こっている。
- ・ また、メーカーが異なると建設機械の相互連携が難しく、特定のメーカーの建設機械しか使えない自律施工技術となりがちである。

以上を踏まえ、土木研究所技術推進本部では、研究機関・大学・民間企業などにおける研究開発を加速するために、以下の取組を行っている。

### 1) 協調領域の設定

図5に示すように、自律施工等のソフトウェアと建設機械との間でやり取りする信号の統一化されたルールを協調領域として設定することを考えている。今後油圧ショベルの協調領域原案(データリスト)を提示し、その原案を基に建設機械メーカー等の関係者と意見交換を行い、成案に向けてすり合わせを実施する。そして順次、他の機種についても同様に進めていく予定である。また、この

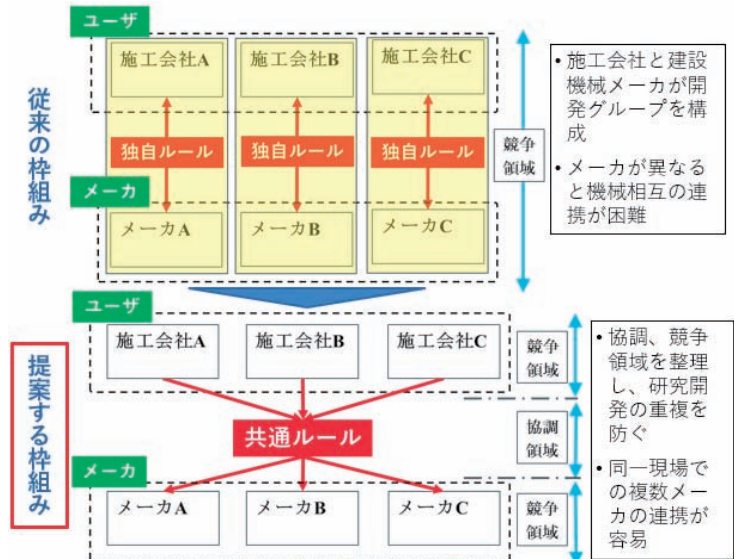


図4 協調領域明確化の必要性

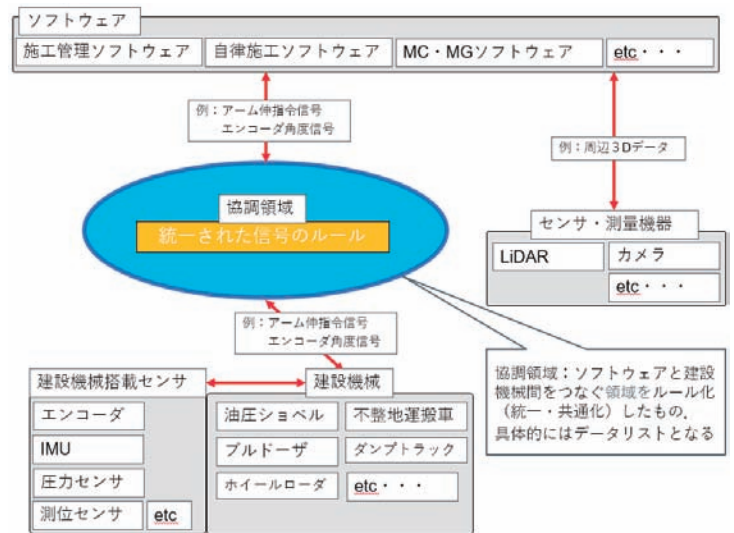
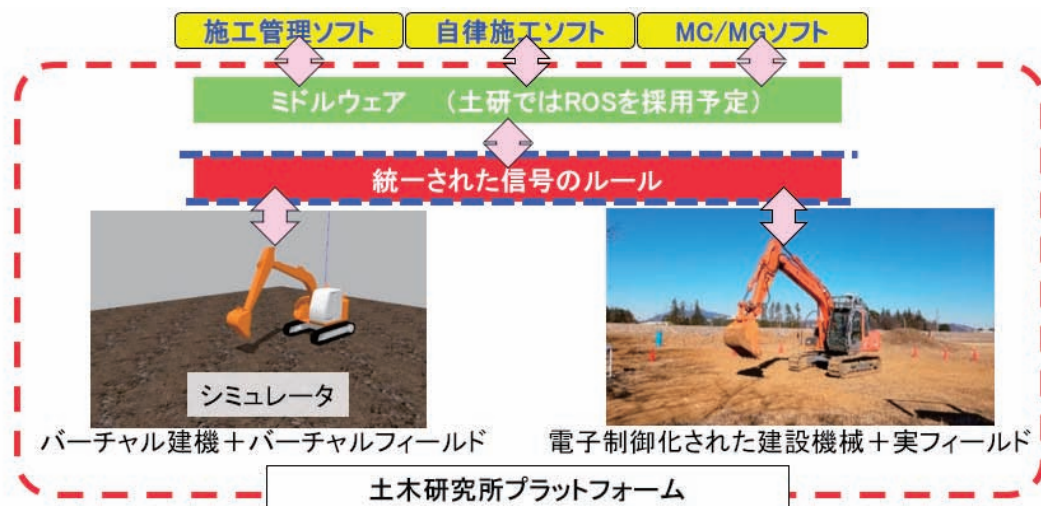


図5 協調領域の設定



- 実フィールド実験とシミュレータ実験を並行で行うことにより、研究開発が効率化
- ミドルウェアとしてROSを採用することで、プログラム開発が効率化  
(ROS: ロボット用ミドルウェアとして広く使用されており、ライブラリなども豊富)
- 本プラットフォームをオープン化することで、民間企業・大学など様々な機関が研究開発に参入可能。それにより研究開発が加速される

図 6 自律施工技術基盤（プラットフォーム）概要

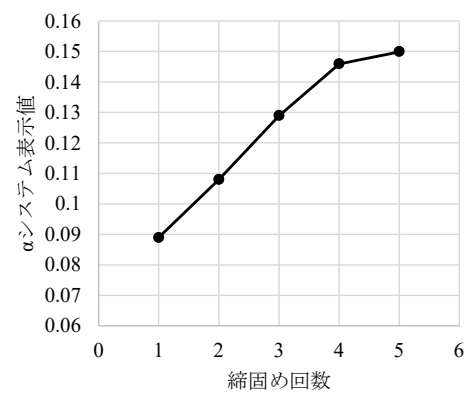
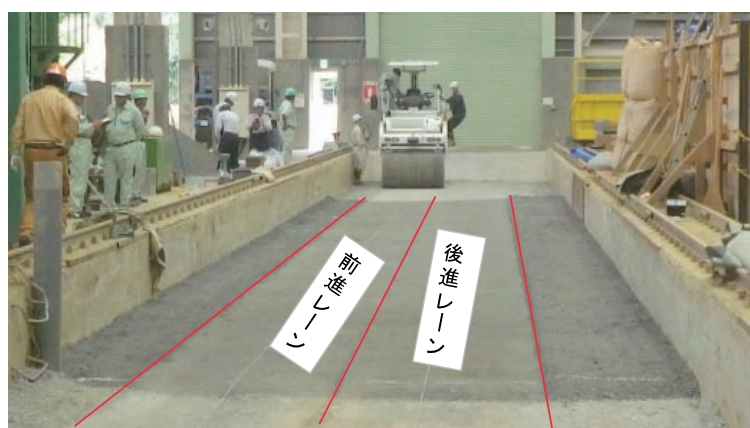


図 7 加速度応答システム検証実験状況と結果例

協調領域については、ISO等の規格化を見据えて取り組みを進める。

2) 自律施工技術基盤（プラットフォーム）の整備

図6に示すように、⑦協調領域（統一された信号のルール）と④バーチャル建機とバーチャルフィールドと⑧電子化された建設機械と実フィールドと⑤ミドルウェア（施工管理ソフト等との接続部分）からなるプラットフォームを整備する。このプラットフォームの実フィールドとして土工フィールドを活用する。このプラットフォームは、意欲はあるが、自ら研究・開発用のプラットフォームを整備することが難しい民間企業や大学にも、共同研究などの枠組みにより活用してもらうことで、研究・開発を加速させ、革新的な自律施工技術が実現することを期待している。また、土木研究所では、プラットフォームや土工フィールドを活用し、技術の検証・評価や技術競技会などを行っていく予定である。

3. 施工データを活用した品質管理

近年、測位機器やセンサ類、および通信機器の著しい発展により、施工中の建設機械や周辺機器から様々なデータを収集することが可能となっている。これらのデータの多くは、現状ではあまり有効に活用されていないが、今後活用されることにより、建設施工の生産性向上に有効である可能性がある。

建設機械から収集される施工データを活用し、品質管理を効率的に行なう事例としては、参考文献①「施工履歴データによる土工の出来形管理要領（案）」や、参考文献②「TS・GNSSを用いた盛土の締固め管理要領」などが既に国土交通省より策定されている。土木研究所技術推進本部においても、振動ローラの振動輪に装着した加速度計の信号を解析することで締固めを行いながら地盤の剛性を計測する「加速度応答システム」に着目し、本システムが路盤工締固め品質管理基準値である密度と相関性があることを研究にて明らかにしてきた<sup>10)</sup>（図 7）。この研究成果を用い、国土交通省では「加速度応答法を用いた路盤の締固め管理要領」の策定にむけて取り組んでいる。

土木研究所技術推進本部においては、本研究をさらに進め、様々な工種における施工データの取得方法やその活用方法について研究を行っていく予定である。

#### 4. おわりに

国土交通省では、これまでの i-Construction の取り組みをふまえ、さらなる社会資本の変革と働き方の変革による安全・安心な社会の実現のために「インフラ分野における DX」を推進している。（国研）土木研究所も、国土交通省などと連携して本施策の推進に取り組んでいきたい。

#### 【参考文献】

- 1) 日本建設業連合会：建設業ハンドブック 2020.
- 2) 総務省労働局：労働力調査年報 2020
- 3) 国土交通省：ロボット・AI 技術,  
[https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei\\_constplan\\_tk\\_000028.html](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei_constplan_tk_000028.html), 2020/8/13 閲覧.
- 4) TOPCON：ドーザシステム, <https://www.topcon.co.jp/positioning/products/product/mc/dozer-system.html>, 2021/8/10 閲覧.
- 5) 鹿島建設：クラウドアクセラ, [https://www.kajima.co.jp/tech/c\\_ict/automation/index.html#body\\_01](https://www.kajima.co.jp/tech/c_ict/automation/index.html#body_01), 2021/8/10 閲覧.
- 6) 大成建設：協調運転制御システム, [https://www.taisei.co.jp/about\\_us/wn/2021/210209\\_5072.html](https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2021/210209_5072.html), 2021/8/10 閲覧.
- 7) 大林組：バックホウ自律運転システム, [https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20190718\\_1.html](https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20190718_1.html), 2021/8/10 閲覧.
- 8) 日本建設業連合会土木情報技術部会：建設業のためのロボットに関する調査報告書，2020.
- 9) 山内元貴，橋本毅，山田充，新田恭士，油田信一：建設機械施工における標準プラットフォームの提案—建設機械制御のロボット用ミドルウェアの導入—，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020 in Kanazawa, 2P1-A08, 2020.
- 10) 橋本毅：加速度応答を活用した振動式締固め機械による路盤工品質管理の検討，地盤工学会誌，Vol.68, No.12, pp.19-22, 2020.

# 土砂災害の緊急対応における CIM 活用の効果

土砂管理研究グループ 地すべりチーム 上席研究員 杉本 宏之

## 1. はじめに

土砂災害は豪雨や融雪、地震等によって全国各地で毎年発生しており、今年も既に多くの土砂災害が発生している。令和3年8月末時点で848件の土砂災害が発生し、その内の68件が地すべりである<sup>1)</sup>。地すべりは、地下水等の影響によって斜面がゆっくりと移動する現象で規模や被害が大きくなることが多い。また、地すべり土塊が一旦動き出すとその動きを止めるのは困難であり、避難や緊急対応が長期化することも少なくない。地すべり災害が発生した場合、まず、最優先で行われるのが地すべりの発生状況や被災状況についての現地調査であり、それに基づいて警戒避難体制が検討・整備される。また、地すべりの動きの抑制、被害の拡大を防ぐための応急対策工事についても並行して検討・実施される。これらは、国や自治体等が対応するが、対応策の検討が技術的に高度になる場合は、要請に基づいて土木研究所から土砂災害専門家を派遣することもある。

地すべり災害は、動き続けている斜面に対して現在進行型での対応が求められることが多く、災害発生時の現地調査や警戒避難体制の構築、応急対策工事等の実施にあたっては、迅速化、安全性が強く求められることから、新技术を積極的に活用して対応の高度化を図っていくことが重要である。そのため、土砂管理研究グループでは BIM/CIM と Web 会議ツールを連携させたリモート技術支援など、DX に向けた取組を進めている。昨年度の本講演会では BIM/CIM の活用事例の紹介を行ったが、今年度はそれを一歩進めて BIM/CIM 等を災害対応に活用する効果について紹介する。

## 2. 地すべり CIM の概要

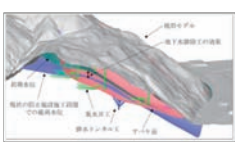
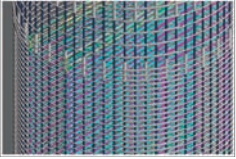

### 2. 1 地すべり分野における BIM/CIM

まず、地すべり分野における BIM/CIM に関するガイドライン等の整備状況について概要を紹介する。地すべり分野では、令和元年5月に「CIM 導入ガイドライン (案) 第9編 地すべり編」<sup>2)</sup>が公表され、「地すべり CIM」として本格的な導入が始まった。ガイドラインでは、地すべり対策の技術指針である「地すべり防止技術指針」<sup>3)</sup>に沿って、地すべり対策事業の調査・機構解析から効果評価・維持管理の各段階において地すべり機構解析の BIM/CIM モデルや地すべり防止施設の BIM/CIM モデルを作成・活用することが示された。

一方、地すべり災害への対応においても、地すべり災害の全体像の的確な把握等に BIM/CIM の活用が効果的と考えられたが、迅速性が強く求められる災害対応時に、詳細な BIM/CIM モデルを作成・活用することは難しく、通常の地すべり対策事業とは異なる BIM/CIM モデルが必要と考えられた。そのため、土木研究所では、地すべり災害対応における BIM/CIM の活用手法について検討を行い、「地すべり災害対応の CIM モデルに関する技術資料 (案)」として令和2年5月に公表し、令和2年7月豪雨災害などで発生した地すべり災害における技術支援、コロナ禍における地すべり災害へのリモート技術支援等に本手法を活用してきた。これらの活用実績をもとに BIM/CIM モデルの作成手法を改良し、「地すべり災害対応の BIM/CIM モデルに関する技術資料」<sup>4)</sup>として令和3年4月に公表した。その内容は、令和3年3月の「CIM 導入ガイドライン

(案) 第9編 地すべり編」から「BIM/CIM 活用ガイドライン (案) 第3編 砂防及び地すべり対策編」<sup>5)</sup>への改訂の際に反映されており、新たに地すべり災害対応の BIM/CIM モデルがガイドラインに追加された。地すべり分野では、従来からあった地すべり機構解析の BIM/CIM モデルや地すべり防止施設の BIM/CIM モデルに、今年度から地すべり災害対応の BIM/CIM モデルを加えて、地すべり分野で活用される BIM/CIM モデルの総称を「地すべり CIM」としている (表 1)。

表 1 地すべり分野の BIM/CIM モデル

地すべり CIM (地すべり分野で活用される BIM/CIM モデルの総称)		
		
地すべり機構解析の BIM/CIM モデル	地すべり防止施設の BIM/CIM モデル	地すべり災害対応の BIM/CIM モデル
地すべり機構解析に必要な調査等の結果を基に作成したモデル	地すべり防止施設を構造物モデルとしてモデル化するもの	地すべり災害対応を検討するために作成するモデル

## 2. 2 地すべり災害対応の BIM/CIM モデル

地すべり災害が発生した場合は、緊急的な対応として、現地調査を行った上で警戒避難対策や応急対策工事等の検討が行われる。その際には、地すべり周辺の斜面地形や地すべりによる変状発生状況、保全対象の位置等の 3 次元的な関係をふまえ、地すべり災害の全体像を的確に把握した上で検討を行うことが重要である。しかし、大規模な地すべり災害では、現地状況の情報の不足や、逆に情報過多によって収集・整理が追いつかないなどの理由で、地すべり災害の全体像の把握が難しい。また、災害時の対応は、国・都道府県・市町村の土木部局や防災部局、民間の調査会社、建設会社等の多数の関係機関が連携する必要があることから、地すべり災害の状況について十分に情報伝達・情報共有することが重要であるが、それらを地形図や写真だけで発災直後に迅速に行うことは難しい。このような、「全体像把握が難しい」、「情報伝達・情報共有が難しい」という災害対応の現場での課題を解決するため、「地すべり災害対応の BIM/CIM モデルに関する技術資料」<sup>4)</sup>では、UAV で撮影した災害後の空中写真を基にカラー点群データを作成し、それに地図等のデータを組み合わせた地すべり災害対応 BIM/CIM モデルを作成し、「バーチャル現場」として活用することを提案している。

地すべり災害対応の BIM/CIM モデルは、迅速性を優先するために、地すべり災害全体の概略的な精度の地形データと地すべり地も含めた周辺の基盤地図情報等のオープンデータなどを組み合わせたものとしている(図 1 の①、②)。必要に応じて、現地踏査において確認された主要な変状発生箇所にて取得した詳細な点群データや緊急時の調査結果等のデータ、警戒避難対策・応急対策工事の検討結果等のデータを組み合わせることも有効と考えられる(図 1 の③～⑤)。発災直後に用いる地すべり災害対応の BIM/CIM モデル作成手順は以下の 4 ステップで、1日程度で作成できる(表 2)。

- ①地すべり全体を含めた周辺の地形や保全対象を対象範囲として UAV による空中写真撮影を行う。
- ②空中写真から SfM 解析ソフトによってカラー点群データを作成する。
- ③基盤地図情報等のオープンデータをダウンロードする。
- ④GIS/CAD 等により、カラー点群データとオープンデータ等を重ね合わせる。

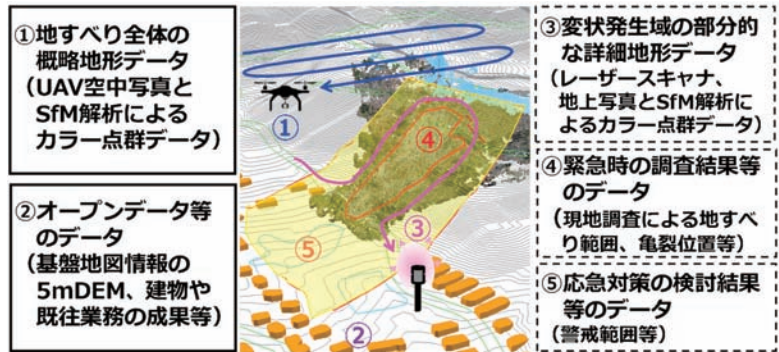


図 1 地すべり災害対応の BIM/CIM モデルの構成

表 2 地すべり災害対応の BIM/CIM モデルの作成手順

作成手順	作業イメージ	必要な機材
ステップ① UAVによる 空中写真撮影		点検等で用いる 一般的なUAV
ステップ② SfMによる 点群データ作成		点群作成に用いる SfMソフト
ステップ③ オープンデータの ダウンロード		解析やモデル作成等 に用いるPC
ステップ④ GIS/CADによる データ重ね合わせ		モデルの作成 表示に用いる GIS/CAD等ソフト

### 3. 地すべり災害対応時の BIM/CIM の活用事例 (国道 19 号長野市篠ノ井小松原地区)

#### 3. 1 技術支援の概要

7月6日に長野県長野市篠ノ井小松原地区においての国道19号付近で地すべりが発生し、その影響で国道19号は通行止めとなった(写真1)。土木研究所・国土技術政策総合研究所は、長野国道事務所からの依頼を受けて各分野の専門家からなる対応チームによる技術支援を実施した。筆者は地すべり分野の専門家として、早期の片側交互通行への移行を支援した。また、地すべり対策を担当する長野県からの依頼を受け、地すべりに対する応急対策及び復旧計画の立案等についての技術支援を行い、早期の対策着手を支援した。



写真1 小松原地区で発生した地すべり

#### 3. 2 発災直後の技術支援

7月6日に地すべりが発生して国道19号が通行止めとなったことで技術支援の依頼があり、翌日の7日に現地調査を行うこととなった。現地状況の早期把握のため、6日の午前中に長野国道事務所職員が UAV で撮影した動画の提供を受け、土木研究所において SfM 処理を行ってカラー点群データを作成した。また、基盤地図情報の 5mDEM から作成した地形解析図(傾斜、累積流量等)や地質図 Navi (産業技術総合研究所)の地質情報を CIM モデルとして統合した。カラー点群データにより地すべりの状況の把握を行うとともに、地形や地質の情報とあわせて地すべり発生機構について事前分析を行い、今後生じうる土砂移動の予測とそれによるリスクの洗い出し、それぞれのリスクに対する対策素案を検討し、翌日7月7日の現地調査を行った。図2に事前分析のイメージを示す。カラー点群データから判読した地すべりの状況については、地すべりの滑落崖と側方崖が明瞭で、地すべり上部の範囲は明らかであるが、末端土砂の流出状況と溪流の河道閉塞状況、地すべりとトンネルとの位置関係や影響が不明であったので、現地で優先して確認すべき事項と考えた。また、地すべり発生機構については、地質が凝灰岩であること、地質構造線の近傍であること、地形的に水を集めやすい状況であることなどから、地質や地下水が重要な要因であると推定した。今後生じうる土砂移動の予測とそれによるリスクについては、地すべり本体の更なる移動・滑落、末端土砂の小規模な崩壊・流出、溪流の河道閉塞が主なリスクとして考えられ、それぞれについて監視体制の整備、応急対策を講じることが必要と考えた。

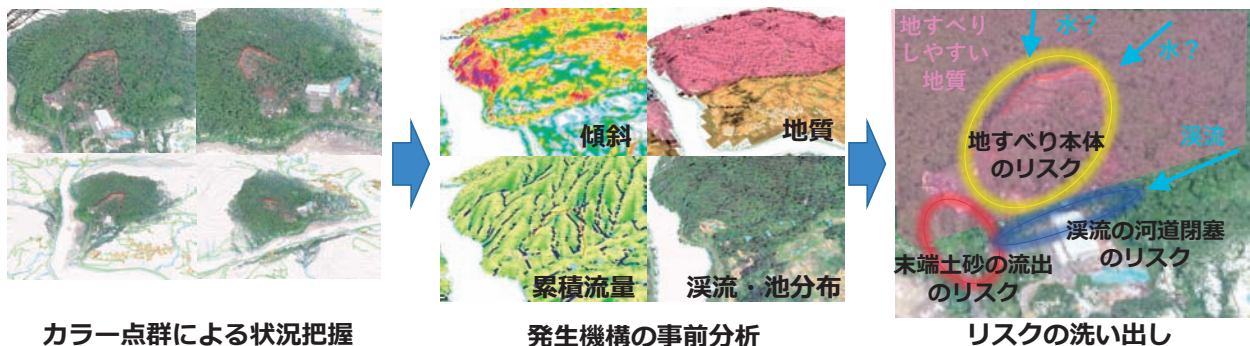


図2 事前分析のイメージ(7月6日、地すべり発災当日)

7月7日の現地調査では、UAV 写真・動画や点群データだけからは分からない地すべり土塊の地質や土質の状況、湧水や河川・溪流の状況、樹冠等による不可視部分の状況の確認を行い、事前に分析した土砂移動の予測やリスクの洗い出しの精度を高めた。また、国道管理者である長野国道事務所や地すべり本体の対策を担当する長野県砂防部局から対応状況等を聞き取り、これらを総合して、技術支援として助言する対策案をまとめた。

今回は、道路管理者や砂防部局が連携して対応に当たることが必要であり、また複数のコンサルタント

トが調査・計画立案に関わるため、地すべり現象や対策方針について共通理解を持つことが重要であると考へた。そのため、現地調査結果及び対策方針案を長野国道事務所や長野県に説明する会議では、BIM/CIM モデルをプロジェクターで大きくスクリーンに映しながら、図 2 に示したような地すべり発生機構や今後生じうる土砂移動、それによるリスクの位置や規模、地すべりに対する対策案について説明を行った。その際には、BIM/CIM モデルを動かして地形の形状が分かりやすいようにするとともに、点群データや地形情報、地質情報等のレイヤー表示を切り替えて必要な情報を見せながら、分かりやすい説明となるよう努めた。また、説明している位置を BIM/CIM モデル上で明示するようにし、間違いがないように留意した。



図 3 現地調査状況 (7月7日)

### 3. 3 継続的な技術支援

その後、7月9日に長野国道事務所から、国道の早期の通行に向けての監視体制や応急対策の案について確認の依頼があり、急遽 Web 会議によるリモート技術支援を行った。その際も、意思疎通に齟齬が生じないように、BIM/CIM モデルを活用した。その結果を踏まえ、長野国道事務所は開通に向けた対策を進め、7月13日に国道19号長野市篠ノ井小松原地区地すべり対策検討委員会を開催した。土木研究所・国土技術政策総合研究所の各分野の専門家も引き続き委員として Web 会議で参加した。対策について委員会として確認・助言を行い、それを踏まえて7月14日に全面通行止めから片側交互通行(6:00~21:00)へ移行した。

地すべり対策については、同時に長野県の砂防部局で対応が進められ、応急対策と対策計画立案のための調査が進められた。調査が進捗するとともに多くの情報が得られ、それらを踏まえた計画の追加や修正が必要となることから、地すべりチームでは7月12日、15日と継続的にリモート技術支援を行った。そして、発災から約2週間後の7月21日には、横ボーリング工、集水井工、鋼管杭工等の地すべり対策事業の実施が決定した(災害関連緊急地すべり対策事業として採択)。

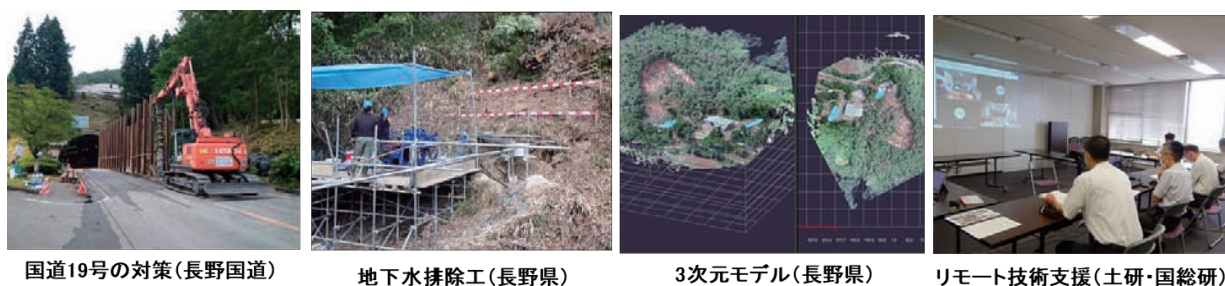


図 4 継続的な技術支援に関する対応状況

その後も、国道の全面開放及び地すべりの恒久対策に向けて、現地状況の変化や調査の進捗に応じて、リモートを中心に継続的に技術支援を行っている。従来の主流であった対面での打ち合わせは人の移動が伴うために、ほぼ1日がかりの仕事となり、移動に伴う時間的・金銭的成本や日程調整の難しさから、このように臨機応変かつ継続的に技術支援を行うことは難しかった。しかし、コロナ禍をきっかけとして普及した Web 会議ツールを活用したリモート技術支援の場合は、1~2時間の会議を日程調整し、臨機応変に対応することが可能である。地すべりのように現在進行型での対応が求められることが多い場合には、特に有効な方法であると考えられる。



#### 4. 地すべり災害対応時の BIM/CIM の活用効果

昨年から地すべりチームで災害対応時に BIM/CIM を活用した事例をふまえ、地すべり災害対応時に BIM/CIM を活用する効果を整理すると、主なものとして 3 点が挙げられる。

##### (1) 地すべり災害の全体像の迅速な把握

地すべり災害の対応においては、まずは全体像の迅速な把握が重要である。全体像の把握が、今後の土砂移動の予測とリスク分析、対策の検討につながる。従来は、発生直後には危険なために立ち入れない場所も多く、地すべりの規模が大きい場合等には全体像の把握、今後の土砂移動の予測とリスク分析に数日かかり、対策の全容がなかなか定まらないということもあった。

現在は、災害対応に BIM/CIM が活用される事例も増えてきている。地すべり災害対応の BIM/CIM モデルによって、地すべり周辺の斜面地形や地すべりによる変状発生状況、保全対象の位置等の 3 次元的な関係をふまえ、地すべり災害の全体像を的確に把握する (図 5)。それによって、災害対応として実施すべきことの全容が早期に決まり、優先順位をつけながら迅速に対応することができるようになる。今回事例として説明したように、1 日も早い開放が望まれる道路における地すべり災害では、特に効果が大きいと考えられる。

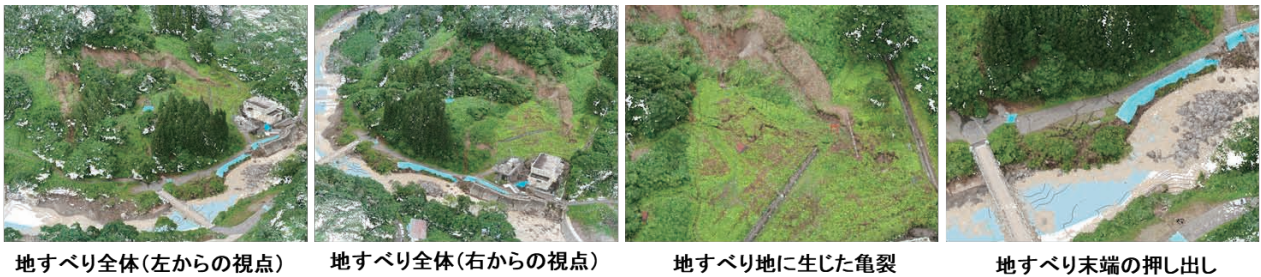


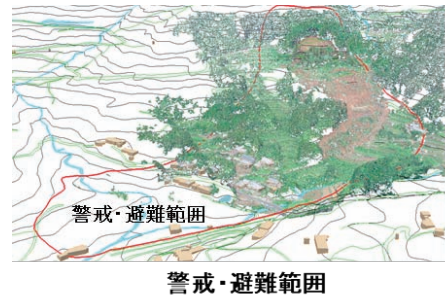
図 5 地すべり全体像の把握のために BIM/CIM モデルを様々な視点から見た例

##### (2) 空間分析を基にした機構解析・対策検討

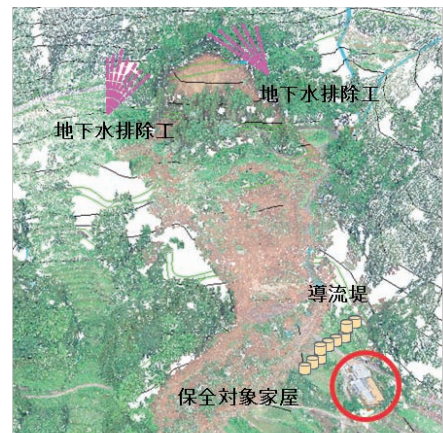
地すべり災害への緊急対応として、ソフト対策として警戒避難体制の整備、ハード対策として応急対策工事が行われる。警戒避難体制の整備において、警戒または避難が必要な範囲を検討する際には、地形や地質の情報を基に地すべり発生機構についての概略の検討を行った上で、地すべり範囲、動きの方向、今後生じる土砂移動の予測、保全対象の位置等の 3 次元的位置関係を確認することが重要である (図 6 上)。応急対策工事の検討では、地すべり発生機構についての概略の検討をふまえ、今後生じる土砂移動の予測とそれによるリスクの洗い出し、それぞれのリスクに対する対策について応急対策工の配置計画や施工計画の検討が行われる。

地すべり発生機構の検討は、災害発生直後の調査データが限られる状況では限られたものとなるが、カラー点群、地形解析図 (傾斜、累積流量等)、地質図を重ね合わせることで、分析が容易になった。災害発生後の時間の経過に伴って調査データが増えることで、より精度を高めることもできる。

施工計画の検討においては、カラー点群データをバーチャル現場として使い、土砂の堆積や現地の地形、構造物・道路・河川・樹木の配置等の現地状況を詳しく確認した上で計画を立案することが有効である (図 6 下)。



警戒・避難範囲



応急対策工事の配置検討

図 6 応急対策の検討例

### (3) 現地状況・対策方針等の共有

災害時の対応は、国・都道府県・市町村の土木部局や防災部局、民間の調査会社、建設会社等の多数の関係機関が連携する必要があることから、地すべり災害の状況について十分に情報伝達・情報共有することが重要である。BIM/CIM を活用することで、状況認識の共通化、判断の迅速化、誤解による間違い防止等の効果が期待される。

Web 会議ツールの普及により、リモートでの支援や協議が一般化してきた。Web 会議ツールは移動や日程調整のコストが削減できる点はメリットであるが、コミュニケーションにおける情報量が低下する点はデメリットであると考えられる。これをカバーする方法の一つとして、カラー点群データを含む BIM/CIM モデルを併用することが有効と考えられる(図 7 上)。

また、BIM/CIM モデルの活用はリモートだけでなく、対面でのコミュニケーションにおいても有効である。カラー点群データによって「バーチャル現場」を表示しながらの説明は、地図等を用いた説明よりも直感的で分かりやすい。関係者の会議や住民説明会やマスコミ記者会見で活用することで、地すべり災害の状況等についての理解の向上、コミュニケーションの迅速化等が期待される(図 7 下)。



BIM/CIMや現地撮影動画による遠隔技術支援



CIMモデルを用いたマスコミ記者会見

図 7 BIM/CIM モデルを活用した  
コミュニケーションの例

## 5. おわりに

本稿では、土砂災害の緊急対応における BIM/CIM と Web 会議ツールを連携させたリモート技術支援など、DX に向けた取組とその効果について報告した。地すべり災害対応の BIM/CIM モデルの活用を検討いただき、業務の効率化・迅速化など DX に向けた取組に役立てば幸いである。最後になりましたが、BIM/CIM 作成・活用にご協力いただいた関係各位に、この場を借りて感謝申し上げます。

### 【参考文献】

- 1) 国土交通省：令和 3 年全国の土砂災害発生状況(8 月 31 日時点)、<https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/r3dosha/20210831jiten.pdf>、2021.9(参照日：2021 年 9 月 1 日)
- 2) 国土交通省：CIM 導入ガイドライン(案)第 9 編地すべり編、<https://www.mlit.go.jp/common/001289037.pdf>、2019.
- 3) 国土交通省砂防部・独立行政法人土木研究所：地すべり防止技術指針及び同解説、P145、2008.
- 4) 国立研究開発法人土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム：地すべり災害対応の BIM/CIM モデルに関する技術資料、土木研究所資料 第 4412 号、[https://www.pwri.go.jp/team/landslide/karriasya/cim/cim\\_model.pdf](https://www.pwri.go.jp/team/landslide/karriasya/cim/cim_model.pdf)、2021.
- 5) 国土交通省：BIM/CIM 活用ガイドライン(案)第 3 編 砂防及び地すべり対策編、<https://www.mlit.go.jp/tec/content/001395763.pdf>、2021.

# 環境 DNA による河川環境調査の最前線

水環境研究グループ グループ長 松木 洋忠

## 1. はじめに

河川や湖沼の環境中に存在する生物の組織片から DNA を取り出し、その持ち主の情報を得る環境 DNA 調査技術は、これまでの生物を直接捕らえて生物情報を得てきた調査法に代わる新しい技術として期待されている。一方、この新しい技術を国の施策として取り込んでいくための標準化や、国土交通省が 30 年以上積み上げてきた河川水辺の国勢調査の情報の継続性など、整理すべき事項は多い。土木研究所では、実装可能な技術とすべく、5 年間にわたって現場の体制を踏まえた様々な課題解決に取り組んでおり、令和 2 年度より国土交通省および関係機関とともに大規模調査を実施しているところである。本講演では、その最前線を紹介するとともに、今後の河川行政にどのようにこの新技術が貢献できるのか、その展望を紹介する。

## 2. 河川水辺の国勢調査への環境 DNA 実装に向けて

### 2. 1 意外と身近な環境 DNA

環境 DNA 調査で分析の対象としているのは、湖沼や河川の水中に浮遊している生物の組織片で、魚であれば粘膜や鱗などがこれにあたる。多くは目視では確認できないほど小さく、それから抽出される DNA の量も極わずかである。微量な DNA 中の必要な情報を示す DNA 配列を PCR 装置で増やし、これをあらかじめ登録されている DNA 配列と突き合わせることにより、生物の存在やタイプを調べるものである。

PCR の用語で分かるとおり、環境 DNA 分析と同様の技術はコロナウィルスのチェックにも使われている。猛威を振るっているウィルス対策では、厚生労働省の発表資料によると、昨年度の 9 月 1 日以降 1 年間で 19,552,683 名、令和 3 年 8 月最後の週は 1 日あたり 128,557 名（つくば市人口の半数に相当）が新型コロナウイルスの PCR 検査を受けている<sup>1)</sup>。厚生労働省の統計に含まれない PCR 検査機関もあることから、実際の検査数ははるかに多いと考えられる。感染が確認された症例の一部は、コロナウィルスのタイプ（デルタ株など）まで判定される。下水中に含まれるコロナウィルスの存在を調べ、集水域に新型コロナの感染者がいないか調べる技術も研究されている。

環境 DNA 技術は、我々にとって実に身近なところで実用化されているのである。

### 2. 2 河川水辺の国勢調査と環境 DNA

平成 2 年度から始まった河川水辺の国勢調査では、現在全国 109 の一級水系の河川およびダムの直轄管理区間を中心に、「魚介類」「底生動物」「植物」「鳥類」「両生類・爬虫類・哺乳類」「陸上昆虫類等」6 項目の生物調査と、「河川の瀬・淵や水際部の状況等」、「河川空間の利用者など」を実施している。このうち、魚介類調査では、各河川で設定した複数の調査区間を対象に、春から秋にかけて 2 回以上実施されている。調査はタモ網や定置網などを使った直接採捕により行われ、採取された魚の種同定を行い、魚類リストを作成している。採捕や同定といった現地で行う作業のほとんどが人の技能に依存しており、調査の精度は調査担当者の技量次第となっている。

環境 DNA 調査では、現地作業は「水を汲む」ことだけで特殊な技能を要さない。分析に係る直接経費は、現在 30,000 円程度（分析受託会社の価格）で、水サンプルを送ればそのサンプル中に含まれていた組織片の DNA 配列情報と一致もしくは近い生物のリストが戻ってくる。ただし、このリストは生物学的観点からの精査が必要で、考察・評価できる専門家の人件費は必要となる。

環境 DNA 調査技術を河川水辺の国勢調査の現地調査に置き換えたとして。調査地区が 10 地区、2 季の調査と仮定した場合、現地調査にのべ 70.8 人を要するのに対し、環境 DNA の場合現地調査では 8 名で実施可能である。環境 DNA データ精査に手間がかかることを考慮しても、1 地区 2 地点の採水で現調査方法の 66~70%、5 地点の採水で 80~92%の価格となると推定される（令和 3 年度労務単価を適用）。また、魚を採捕しない環境 DNA 調査では、特別採捕許可申請や漁業組合との事前調整が不要なことも時に大きなメリットとなろう。また、環境 DNA により、個体への損傷や生息地のかく乱を与えずに在情報を得ることができることは、希少種など個体数が少ない種を対象とした際の換えがたい利点となる。

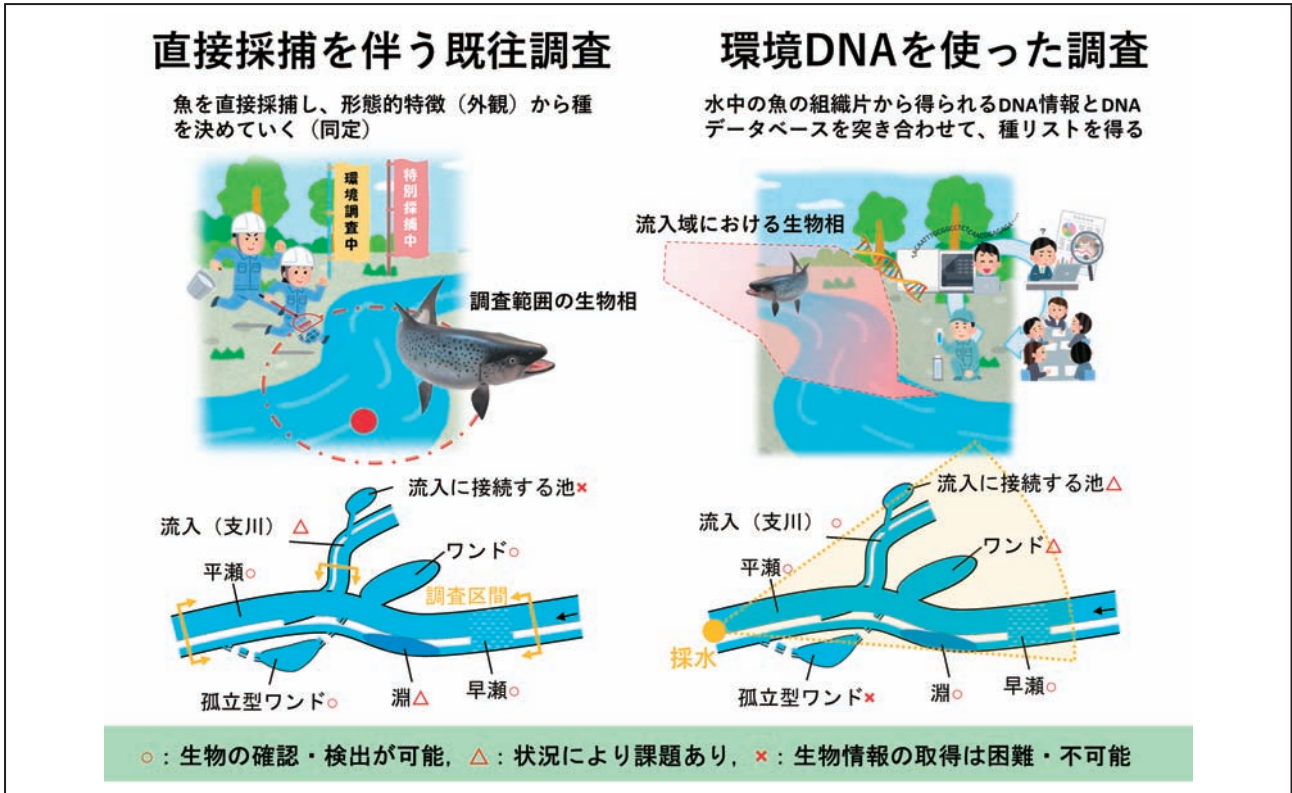


図-1 既往調査と環境DNA調査の違い

一方で、河川水辺の国勢調査のように30年以上の長きにわたり、綿々と積み重ねてきたデータとの連続性を考えると、どのように導入していくのか議論していくことが重要であろう。受注者や実務担当者が異なっても同じ調査結果が得られるような調査の標準化や仕組みも必要である。これらの取り組みにおいては、河川水辺の国勢調査の調査地域の特性や実施体制や、それぞれの調査手法の特性や違いを踏まえたうえで、検討していく必要があるのはいうまでもない（図-1）。

### 2. 3 調査の標準化に向けた取り組み ～河川水辺の国勢調査 テーマ調査

河川水辺の国勢調査とは、「河川環境の整備と保全を適切に推進する上で解明・解決が必要な課題に関する基礎情報を収集整備するための調査（河川版）」、「生物に配慮した適切なダム管理を推進するために、状況把握、解明・解決が必要な全国的な課題について詳細に把握するための調査（ダム湖版）」である。そしてマニュアルには、調査を実施するための手法として「テーマ調査」の枠組みが定められている。河川水辺の国勢調査に環境DNAを実装するために、このテーマ調査の枠組みが、30年以上続く河川水辺の国勢調査の歴史上始めて活用されることとなった。

実は、河川水辺の国勢調査の際に環境DNA分析を行う事例は、少なくとも平成28年には実施例があり、その率は年々増えていた。令和元年に受注者側からの技術提案事項として実施されていたこれらの事例を収集・分析したところ、環境DNAにより得られる生物リストは直接採捕によって得られる生物相と相関があることが示された。これを踏まえ令和2年には、国土交通省地方整備局の協力を得ながら、河川水辺の国勢調査魚類調査を実施する河川・ダムから水国調査地点および近傍の水質調査地点等から計500以上のサンプルの提供を受け、土研で分析を行った。令和3年度は、調査対象ダム・河川

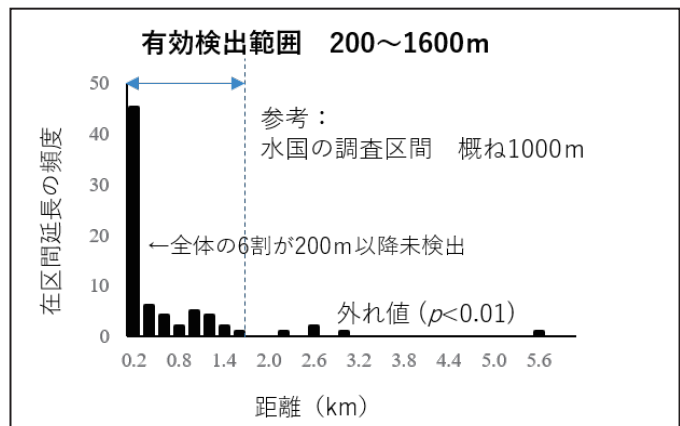


図-2 環境DNA含有物質の流下距離

の数を地域に偏りが無いように選定し、半数近い地点では、河川水辺の国勢調査の発注業務として分析まで一連の流れを実施している。また、引き続き土研あてに水の送付もお願いしており、1500 地点分のサンプルが続々と集まっているところである。

こうしたサンプルの分析・解析により、河川水辺の国勢調査への環境 DNA 実装に向けた重要な知見が得られつつある。例えば、中部地方整備局三重河川国道事務所の協力を得ながら実施した 200m 間隔の調査では、環境 DNA で得られる生物情報は、発生源の供給量に影響を受けるものの、概ね 200~1600m の範囲であるとともに、全体の 6 割が 200m 未満で未検出となることが示された<sup>2)</sup>。また、同一調査地区内の分析サンプル数を増やすことで、直接採捕による魚類リストとの一致率は高まるが、地点数の高まりとともに検出率の増加率は減少する。

例えば雲津川の場合、汽水域(図-3 中地区1)を除き、5 地点程度で 90%以上の検出率を得ることができると考えられた(図-3)<sup>3)</sup>。また、各地区 1 サンプルの環境 DNA 分析を行った際の検出率を、6 河川 3 ダムのべ 79 地区で比較したところ、感潮域およびダム湖は、非感潮域河川に比べ、検出率が有意に低い結果を得た(図-4)。検出率には、水中に浮遊する生物の組織片の捕捉効率のほか、分析に影響を与える物質など様々な要素が関わっている。どのような現象がこうした結果につながっているのか、広域な検討が必要である。このうち、分析に影響を与える水質項目については本テーマ調査を通じて明らかとなりつつある<sup>4)</sup>。

こうした研究成果は、学会や土木研究所のセミナー等を通じて公表・共有するとともに、国土交通省内に向けては情報共有の場が予定されている。さらに令和 3 年度、環境 DNA 調査用のサンプリングを行う河川・ダムを対象に、河川管理者および受注者との打ち合わせを実施し、現地の状況を踏まえながら採水地点のあり方などについて議論を行っている。この打ち合わせは、テーマ調査の統一を図るとともに、将来的な環境 DNA マニュアルの策定のための課題等を抽出する場ともなっている。

### 3. 将来を見据えた他組織との連携

#### 3. 1 調査実務者の視点を取り入れる共同研究

河川水辺の国勢調査に限らず、国土交通省が行う生物調査は、コンサルタント会社等がこれを実施している。環境 DNA 調査技術の標準化に当たっては、彼ら調査の実務を担う者の視点も重要である。

そこで、土木研究所では、平成 30 年から 3 か年にわたり、民間コンサルタント会社 4 社との共同研究を実施した。本共同研究では、各社がそれぞれの課題に対して環境 DNA を活用しながら、得られた成果や課題、解決方法などを議論していった。この共同研究の成果は、報告会や土木研究所河川生態チームの HP で広く公表している。さらに、この共同研究の中では、業務報告書に環境 DNA 調査の詳細を記録するための統一様式を作成している。これにより、調査内容の記載や提出するデータを統一することが可能となった。本様式は令和 3 年度の河川水辺の国勢調査テーマ調査で実装されている。

さらに現在、この共同研究の後継となる新しい共同研究の立ち上げを準備中である。令和 3 年度より始まるこの共同研究では、「河川水辺の国勢調査の標準化」と「環境 DNA を活用した調査の高度化」を目指しており、共同研究の枠組みも土研-民間コンサルタントに、他分野の公的研究機関とも連携しながら進めていくことを予定している。

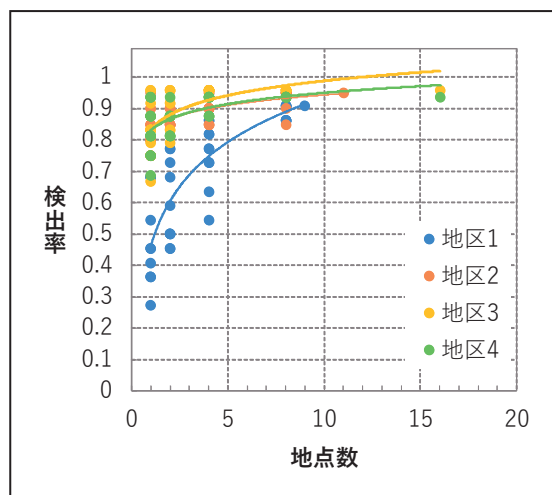


図-3 サンプリング地点数と検出率

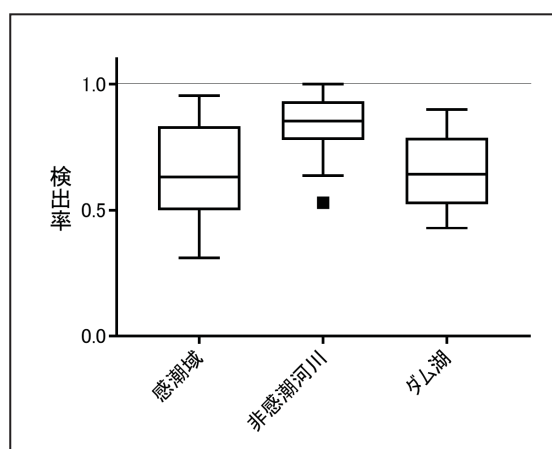


図-4 調査地区と検出率

### 3. 2 環境 DNA 調査結果の相互活用を視野に入れた他省庁との連携

河川だけでなく、水田地域、港湾、海域などあらゆる水域においても、それぞれ生物調査が行われている。管轄する組織や実施母体が異なるこれらの調査は、同じ生物種を対象としながらも、調査方法や調査密度が異なるため、同列で評価することが難しい実情がある。一方、環境 DNA を使った調査結果は、「水から得られる生物情報」として同じような情報を得られるとともに、分析生データを保管しておくことで先々改めて分析を行うことなども可能である。

環境 DNA を使った調査結果を相互利用することができれば、それぞれの組織が、それぞれの目的に沿った環境情報を取り出すことも可能である。そのためには、環境 DNA 分析データを同じ形式で保存・蓄積する仕組みが必要である。現在、国土交通省、環境省、農林水産省、水産庁およびここにつながる公的機関が、非公式ながらも環境 DNA を使った調査方法や今後のデータベースの在り方などについて議論を行っている。

### 4. おわりに

環境 DNA は、自然界に存在する DNA 情報を取り出す比較的新しい技術であるが、応用分野が広く急速に技術開発が進んでいる。これを水域の面的なモニタリング技術として一般化することで、河川内の環境調査のみならず、流域や沿岸域などより広い生物界の多様性評価にも広げることができる。また、資料やデータを統一的に保管することによって、現在の環境情報を将来の研究課題の基礎データとして蓄積する意味もある。環境 DNA の研究推進により、河川環境調査に実装するとともに、生態系研究の発展にも寄与していく。

#### 【参考文献】

- 1) 厚生労働省 HP <https://www.mhlw.go.jp/stf/covid-19/open-data.html>
- 2) 北川哲郎、村岡敬子、天野聡、岡本裕司、中村圭吾：河道内で検出された海産魚類を指標とした環境 DNA 含有物質の有効検出範囲の推定、河川技術論文集、土木学会、第 27 巻、2021.6
- 3) 篠原隆佑、村岡敬子、菅野一輝、北川哲郎、天羽淳、堀江隆生、中村圭吾：環境 DNA を用いた魚類相調査における最適な地点設定の検討、応用生態工学会第 24 回札幌大会要旨集、応用生態工学会、2021.9
- 4) 菅野一輝、北川哲郎、村岡敬子、篠原隆二、天羽淳：環境 DNA メタバーコーディングに影響を与える水質条件の検討、応用生態工学会 第 24 回札幌大会要旨集、応用生態工学会、2021.9

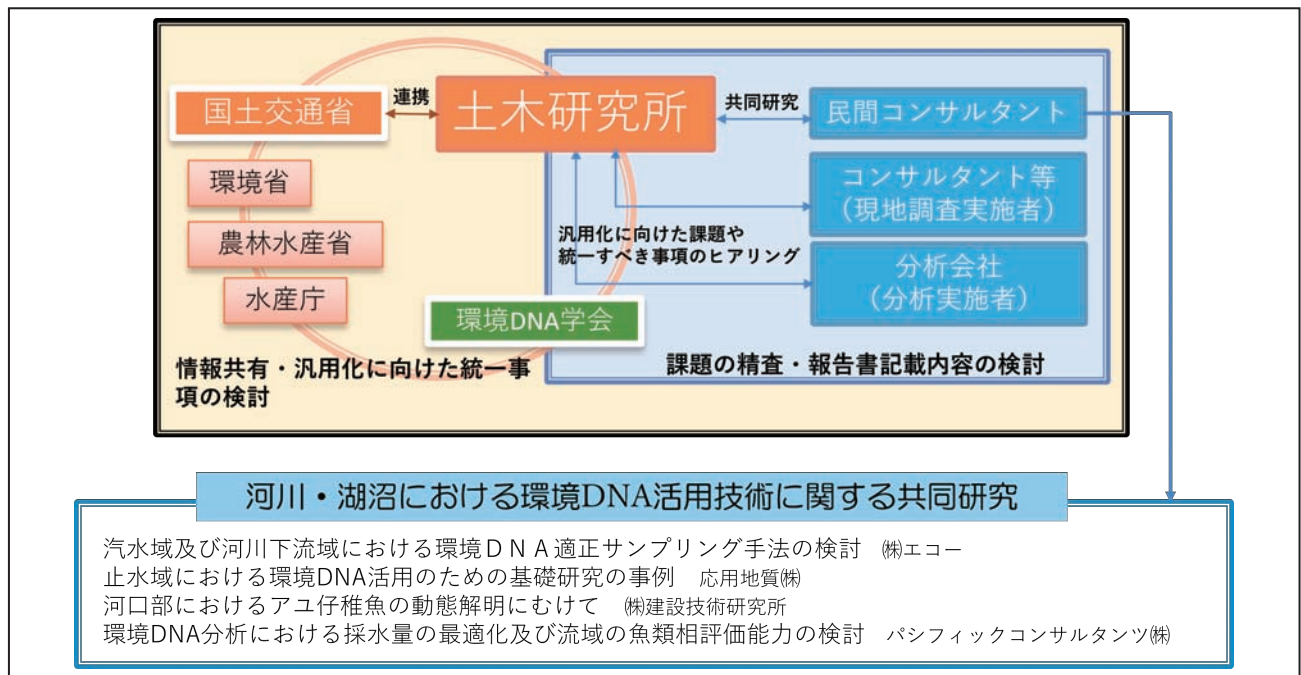


図-5 環境 DNA に係る土木研究所および他機関との連携

[ 土研が取り組む DX（仕事のプロセスや働き方を変革する研究開発） ]

土工の特徴を踏まえた情報化における留意点  
～ICT 土工から土工 DX へ～

激甚化する災害に対する橋の守り方と 3 次元デジタル計測技術の活用  
～リスクマネジメントによる想定外の克服を目指して～

一般的な気象データを用いた吹雪視程推定技術の開発と  
ウェブサイト「吹雪の視界情報」による視程予測情報提供

衛星リモートセンシングと数値シミュレーションの  
同化による水災害現象の解明と予測





# 土工の特徴を踏まえた情報化における留意点 ～ICT 土工から土工 DX へ～

地質・地盤研究グループ グループ長 宮武 裕昭

## 1. はじめに

国土交通省は、2016 年を『生産性革命元年』と位置づけ、総力を挙げて生産性向上に向けた取組を行っていくこととしている。社会のベースに関する取組、新技術導入などの未来型取組と並ぶ建設産業の生産性を高める産業別取組の根幹として i-Construction の本格導入を位置付けている。また、i-Construction の 3 つのトップランナー施策の一つとして、ICT 土工の全面的展開が位置付けられており<sup>1)</sup>、令和元年度の直轄工事の土工関連工事において、81%に ICT が導入されているなど、その進捗は著しいものがある。<sup>2)</sup>

ICT 土工の全面展開を支える基準類の整備については、令和 3 年末の時点ですでに土工および関連工種において、出来形管理基準などが整備済みであり、さらに業界のニーズを踏まえて追加されているところである。

しかしながら、これらの基準類はあくまでも出来形管理にとどまっており、土工の品質、あるいは性能には直接言及できていない。

今般、「データとデジタル技術を活用して、変革を起こす」というデジタルトランスフォーメーションに向けた取り組みが進められているが、これまで進められてきた ICT 土工からさらに飛躍的な効果を生む、土工 DX へと発展させるためには土工の特徴を踏まえた情報化に取り組む必要がある。本稿では、土工の特徴をとらえた情報化により、生産性の変革を起こすための視点について紹介する。

## 2. 土工 DX を進めるうえでの留意すべき土工の特徴

ICT による効率性の向上は、計画、調査、設計、施工、維持管理、更新という建設事業のフェーズの間をまたぐようなデータのやり取りが行われることで飛躍的に発揮されると考えられる。一般的には、事業の後段階で行われる意思決定を事業の初期段階に前倒して行うことで事業全体の効率を高めるという「フロントローディング」、調査計画段階で事業の後段階の状態を予測し、その予測と実態を比較検証することで様々な問題を改善する「PDCA」が代表的なアプローチである。

図 1 は、一般的な盛土工事について、計画、設計、施工、維持管理のフェーズの進行と各フェーズで行われる調査、設計に用いられる諸定数の意味合いを概略に整理したものである。前段階である詳細設計までは、例えば基礎地盤などは用地買収が進む詳細設計段階まではジャストポイントでのボーリングなどは望めないし、盛土材料に至っては、施工段階まで確定しない場合も多い。全体工程の前段階では一般的な土質分類に基づく仮定値を用いて設計を進め、事業の進捗に伴ってジャストポイントでのボーリング実施といった追加の調査によりデータを追加、更新していくという進め方になる。このような土工の事業の特性は、デジタル化による効率性向上の代表的な概念であるフロントローディングと相性が悪い。この追加、更新についても、単に古いデータを新しいデータで置き換えるという形にはならない場合がある。例えば土の強度等に関連する一般的な物理定数として、粘着力  $c$  とせん断抵抗角  $\phi$  がある。 $c$  と  $\phi$  は三軸圧縮試験のよ

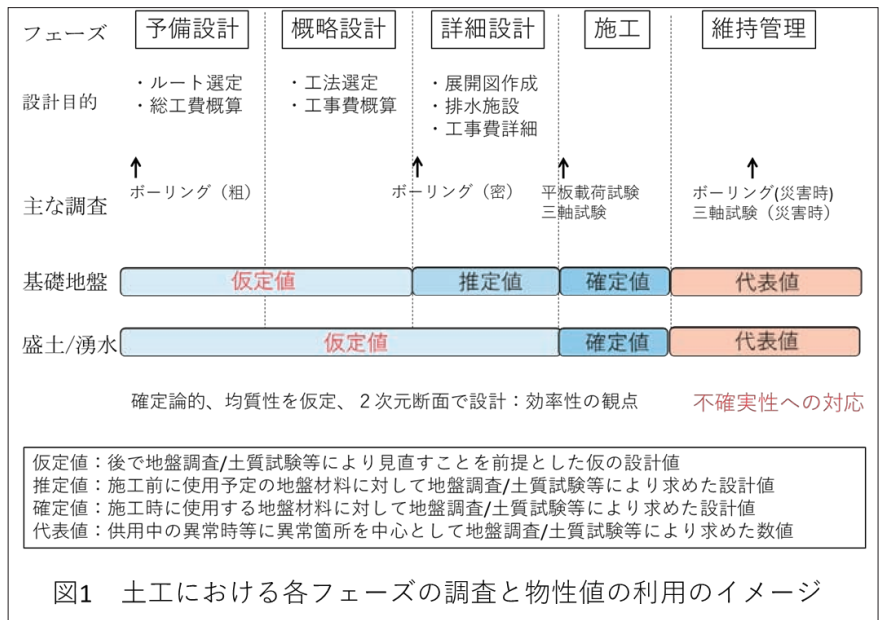


図 1 は、一般的な盛土工事について、計画、設計、施工、維持管理のフェーズの進行と各フェーズで行われる調査、設計に用いられる諸定数の意味合いを概略に整理したものである。前段階である詳細設計までは、例えば基礎地盤などは用地買収が進む詳細設計段階まではジャストポイントでのボーリングなどは望めないし、盛土材料に至っては、施工段階まで確定しない場合も多い。全体工程の前段階では一般的な土質分類に基づく仮定値を用いて設計を進め、事業の進捗に伴ってジャストポイントでのボーリング実施といった追加の調査によりデータを追加、更新していくという進め方になる。このような土工の事業の特性は、デジタル化による効率性向上の代表的な概念であるフロントローディングと相性が悪い。この追加、更新についても、単に古いデータを新しいデータで置き換えるという形にはならない場合がある。例えば土の強度等に関連する一般的な物理定数として、粘着力  $c$  とせん断抵抗角  $\phi$  がある。 $c$  と  $\phi$  は三軸圧縮試験のよ

うな土質試験から求める場合、標準貫入試験の N 値から求める場合、サウンディングにより求める場合、土質分類による仮定値を用いる場合などがあるが、N 値やサウンディングからの推定値は、土質試験による方法に比べ、精度は低いものの連続性の把握には適しているなど、用途に応じてどの方法による値を採択すべきかが異なる。デジタル化は座標と紐づけて整理する機会が多いが、同一座標の同一指標に異なる適正值が並行して存在するようなデータの整理が必要となる。

土工のもう一つの特徴として、不確実性が支配的であるという点が挙げられる。つまり“よくわからない”ことが多いという点である。不確実性には、いわゆる測定誤差のように、その不確実性の存在が認識されているものと、例えば地中深くに埋没している脆弱層のように存在が認識すらされない不確実性がある。データに不確実性が存在することが認識できれば、記録、伝達し、その不確実性を回避する、あるいは安全余裕をとるなど対応は可能である。しかし後者のような認識論的不確実性と呼ばれる不確実性は、記録・保存・伝達することすら困難である。地盤は、自然由来のものであるため、このような認識論的不確実性が数多く潜在し、事業の進捗とともに顕在化してくるというのが土工の特徴である。

従来、土工はこうした不確実性を段階的に低減させることを原則としてきた。<sup>3)</sup>しかし、行き過ぎたフロントローディングや過度に厳密な予測はこうしたこうした不確実性への対応の幅を狭める場合がある。不確実性は解消すべきものという固定観念から離れ、事業の効率化のために適切に「取り扱う(manage)」という考え方が必要である。

土木研究所では、令和二年三月に「土木事業における地質・地盤リスクマネジメントのガイドライン」<sup>4)</sup>

をとりまとめた。このガイドラインでは、ISO31000 リスクマネジメントの考え方を取り入れ、認識論的不確実性までを含めた不確実性の適切な取扱いについての基本的考え方を整理している。図 2 は同ガイドラインで示した不確実性が支配的な地質・地盤リスク(≒不確実性)に関する情報の引継ぎのイメージであるが、前段階で確定した情報を伝えるよりもはるかに多くの情報引継ぎが必要となると考えられる。

土工 DX の実現には、こうした土工に関する情報の特性を十分理解していく必要がある。

### 3. おわりに

これまで進められてきた ICT 土工を、さらに変革と言えるレベルの生産性向上である土工 DX につなげるための留意点について述べた。土木研究所地質・地盤研究グループでは、これまでの ICT 土工への取組みの効果を、さらに向上させる土工 DX へと発展させるため、土工の計画から維持管理・更新に至る各フェーズにおける手法の高度化に加え、ライフサイクルを通じた不確実性の適切な取扱いに関する考え方の実装に取り組んでいく予定である。

#### 【参考文献】

- 1)国土交通省技術調査課 林利行：「i-Construction 委員会報告書 ～建設現場の生産性革命～」積算資料 2016 年 7 月号
- 2)国土交通省 ICT 導入協議会第 13 回資料(2021.7.14)
- 3)日本道路協会：道路土工構造物技術基準・同解説(2017.3)
- 4)土木研究所、国土交通省技術調査課ほか：「土木事業における地質・地盤リスクマネジメントのガイドライン」(2020.3)

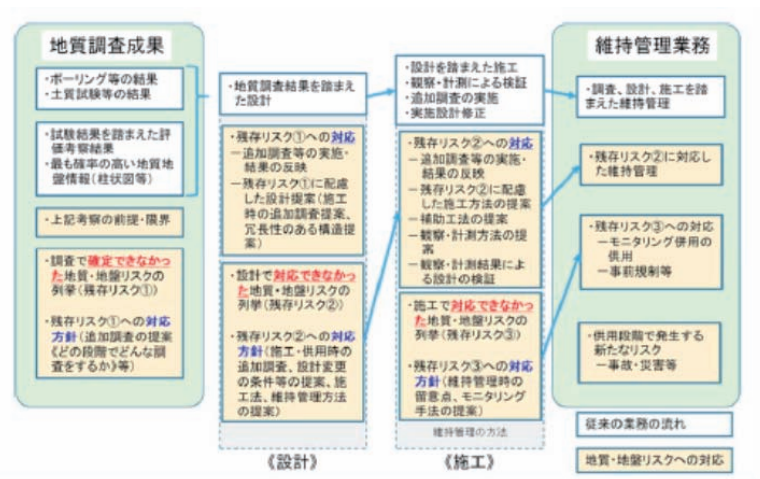


図2 地質・地盤リスクに関する情報の引継ぎのイメージ

# 激甚化する災害に対する橋の守り方と3次元デジタル計測技術の活用 ～リスクマネジメントによる想定外の克服を目指して～

橋梁構造研究グループ グループ長 星 限 順一

## 1. はじめに

平成23年東北地方太平洋沖地震では、津波の影響によって沿岸部に立地していた橋が流失し、重要な幹線道路が至る箇所で途絶する甚大な被災が生じた。橋の計画・設計という観点からこの震災から得た教訓の一つとして、地震のような自然由来の事象はその作用要因自体のばらつきが他の作用要因のばらつきと比較して極めて大きく、想定する作用に対して橋がどういう状況になるのかを設計上設定したとしても、その想定を超える作用が生じ得ることを常に考えておく必要があるという点である。このような教訓を踏まえると、橋の計画・設計においては、想定を超える作用が生じたとしても、橋の機能喪失が生じにくい構造として計画するとともに、仮に機能喪失が生じたとしても機能回復がしやすい構造としておくことが、激甚化する災害に対する新しい橋の守り方であると考えている<sup>1),2)</sup>。

土木研究所橋梁構造研究グループでは、このような背景から、耐震設計での想定を超える作用が生じる状況に対して、橋の損傷シナリオを設定し、その損傷シナリオが実現する信頼性を確保することを基本とした新しい設計概念に関する研究を進めてきた(図-1)。具体的には、従来の耐震設計思想である「耐える」や「粘る」という考え方に加え、想定を超える作用に対しては「落橋しにくく壊す」、「復旧しやすく壊す」ことの両立を目指した「シナリオデザイン設計」という新しい設計手法を耐震設計の中に採り入れていくための技術開発を実施してきたところである。

このような研究を進める中、令和2年12月に「防災・減災、国土強靱化のための5か年加速化対策」が閣議決定され、国土交通省の施策として、発災後1日以内での緊急車両の通行、1週間以内の一般車両の通行を可能にすることが目標として示されたところである。発災後1日以内で緊急車両が通行できるようにするためには、これまで実施してきている既設橋の耐震補強のような構造的な対策とともに、大地震後に同時多発的に必要となる橋の状態把握を、限られたリソースの中で短時間にかつ効率的に実施するための技術も整備しておく必要がある。橋の状態把握をする方法としては、これまでも橋に設置したセンサー等によるモニタリング技術の活用<sup>3)</sup>が検討されているが、最近ではUAVを活用した3次元デジタル計測技術を橋の点検支援に活用する検討<sup>4)</sup>も進められており、大地震後という状況下においても、緊急車両の通行が可能な状態であるかどうかを診断するために必要な情報を得るための支援ツールとしての活用も期待できる。

そこで本報では、これまでに土木研究所で実施してきたシナリオデザイン設計に関する研究成果を概説するとともに、断層変位の影響が想定される橋の設計にその考え方が導入された事例を報告する。さらに、大地震直後の橋の緊急点検という状況を想定し、現地での限られたリソースの中で橋の状態把握を迅速かつ効率的に行うことができるようにする観点から、近年技術開発の進展がめざましい3次元デジタル計測技術がどのように活用できるかについて、そのユースケースの展望について述べる。

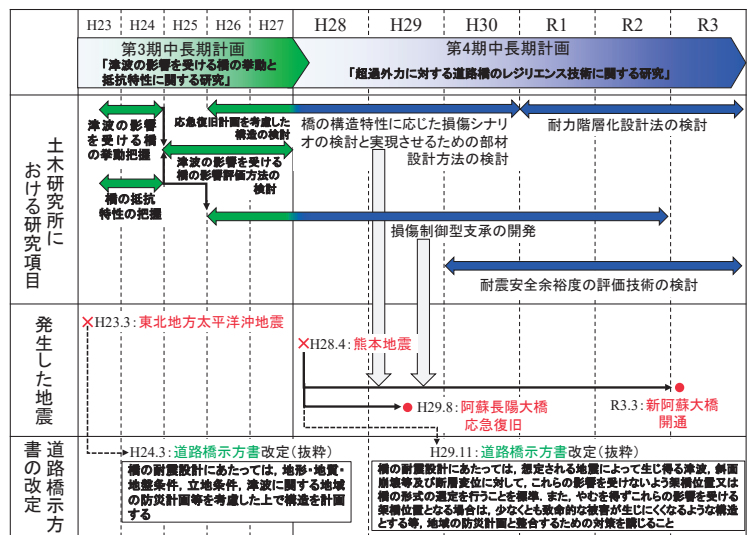


図-1 想定を超える作用に対する橋のレジリエンス強化に関する研究ロードマップと成果の反映

## 2. 震災経験に基づく想定外の作用に対する橋の構造設計の考え方

道路橋の耐荷性能の照査に用いる設計地震動は、過去の地震被害の経験や調査研究を基に地震動特性等のばらつきの影響を考慮して設定されている。逆に言えば、ばらつきがあるからこそ、設計地震動を上回る地震動が今後将来発生する可能性はゼロではない。また、地震の影響には地震動以外にも津波、

斜面変状、断層変位等も橋に作用を与える要因となるが、これらの作用はそのソースモデルが地震動よりもさらに定量化が困難であり、不確実性も大きい。したがって、仮に設計用の値を設定したとしても、その想定を超える作用が生じることに対する検討は常に必要となる。このような観点から、現行の道路橋示方書においては、津波、斜面変状、断層変位の影響を受けないように架橋位置又は橋の形式の選定を行うことが標準として規定されている。

しかしながら、道路は線的な施設であることから、地形条件等との関係からやむを得ずこれらの影響を受ける位置に橋を架橋せざるを得ない場合も想定される。このような場合には、想定外の作用を定量化することに主眼を置くのではなく、想定を超える作用が生じたとしても、橋の機能喪失が生じにくくなるようにするためにはどのような壊し方となるようにすればよいか、そのためにはどのような橋の構造形式がよいか、さらには、仮に機能喪失が生じたとしても機能回復をしやすくするためには橋の構造側でどのような準備しておくのがいいのか、という基本コンセプトについて想像力を働かせながら検討し、その結果を橋の構造計画や設計に反映することが重要となる。

写真-1は、平成28年熊本地震で発生した斜面崩落により橋台が沈下する被害が生じたPCラーメン橋である。本橋は、橋台の沈下に伴って支承部が破壊し、上部構造との接続機能が喪失したが、張り出し架設工法で施工されていた橋であったことから、橋は自立した状態で留まり崩落という事態には至らなかったり。また、写真-2は、平成23年東北地方太平洋沖地震による津波の影響によって機能が喪失した橋の被災例である。写真-2(a)に示すように支承部が破壊して上部構造が流欠した橋もあれば、写真-2(b)に示すように、結果的に橋脚の倒壊も伴った橋もある。いずれの橋も機能喪失に至ってしまっている点では同じであるが、橋の機能回復の観点からは、下部構造が再利用できる状態である方がまだベターという見方もできる<sup>5)</sup>。

これらの事例から学ぶべき点は、支承部が弱点となったからと言って、その弱点を補強することが必ずしも有効打となるわけではないという点である。想定を超える作用を考える場合、最弱点の部材を補強すれば、別の部材に最弱点が移るわけであり、その部材が破壊すると橋全体としてどのような状態となるのか、その状態は橋全体として構造安全性や復旧のしやすさという観点からより望ましい状態へと変化させることができるのか等、常に部材の破壊によって生じる橋全体としての最終的な状態をよく吟味しながら検討する、いわゆる破壊のマネジメントが重要である。言い方を変えれば、想定外の作用に対して橋をどのように壊していくのかのシナリオによって、橋の構造に潜在しているリダンダンシーをうまく発揮させることができたり、機能回復までの期間を長期化させないための対策に活用したりすることができるのである。想定外の作用に対しては、このような着眼点から橋の構造計画段階から戦略を練ることが求められる。

### 3. シナリオデザイン設計法の研究開発と断層変位の影響を受ける新阿蘇大橋の設計への反映

#### 3. 1 シナリオデザイン設計法に関する研究成果の概要

作用としての上限という概念がなく、不確実性も高い地震の影響に対する設計において想定外の作用に工学的に対応していくためには、想定外の作用で「壊れてしまった」ではなく、「想定通りに上手く壊れた」となるように破壊を制御する設計思想を採り入れていく必要がある。ここでポイントとなるのが「上手く壊す」設計技術であり、そのためには、まず橋が崩壊に至るまでの壊し方をシナリオとして描くことが求められる。その上で、設定したシナリオに基づき、破壊させる部材と破壊させない部材を明確化し、その両者の部材間で耐荷力の階層化を図ることになる。土木研究所橋梁構造研究グループでは、このような崩壊に至るまでの壊し方をシナリオとして設定した上で地震の影響に対する橋の設計を



写真-1 斜面変状に伴って機能喪失した橋



(a) 上部構造が流欠して機能喪失した橋



(b) 下部構造の倒壊も伴って機能喪失した橋  
写真-2 津波の影響により機能喪失した橋

行っていくアプローチを「シナリオデザイン設計法」として提案した<sup>6)</sup>。

橋が崩落に至るまでの壊し方には、その橋の構造特性等に応じて様々なシナリオが考えられる。その中で、写真-1や写真-2のような事例を基に、ここでは破壊が他の部材よりも先に生じるように制御された支承(以下、「損傷制御型支承」という。)の導入により橋全体として上手い壊し方としていく戦略の橋を取り上げ、その設計における部材間での耐荷力の階層化について検討した例を紹介する。

従来の支承部の耐震設計では、設計で想定する力を上回る耐荷力を有するように支承部を構成する各部材の諸元等が設定される。損傷制御型支承の設計では、設計で想定する荷重に対して支承の耐荷力を確保することは当然であるが、その耐荷力が想定を上回る地震力に対しても破壊させない部材の耐荷力を超過しないように設計することが重要となる。その際、破壊させる部材、破壊させない部材ともに材料強度や耐荷力評価手法のばらつきによって設計上の耐荷力と実際の耐荷力には差が生じてくる。そのため、図-2に示すように、損傷シナリオの信頼性を確保する観点から、これらのばらつきに応じて部材間で確保すべき耐荷力の差が決まってくる。

そこで、道路橋で広く使われている鋼製支承や積層ゴム支承を対象として、破壊させる部材と破壊させない部材の間どの程度の耐荷力の差を確保すべきかを定量的に明らかにすることを目的として一連の載荷試験等を行い、その根拠となるデータの取得を行った<sup>6)~9)</sup>。例えば、写真-3は、RC橋脚に設置された損傷制御型支承に対する載荷検証実験の様子を示したものである<sup>9)</sup>。この実験では、上部構造から伝達されてくる力の漸増に対して最終的にRC橋脚が塑性化して損傷が進展していくのではなく、損傷制御型支承を構成している指定の部材が所定の荷重で先に破壊し、RC橋脚には損傷が生じないように耐荷力の階層化を図った試験体により検証を行った。その結果、損傷制御型支承で破壊させる部材の耐荷力のばらつきを考慮することで、設計で想定していた破壊形態を実現できることを確認した。また、支承の下査取付けボルトに用いられている六角ボルトを破壊させる部材として選定するケースを想定し、六角ボルトのせん断耐荷力のばらつき特性に関する試験も実施した。強度区分4.8~12.9、ボルト径M16~M30の六角ボルトを対象としてせん断耐荷力の試験値データを蓄積し、現行の道路橋示方書の規定による設計値との比較により検証した。その結果、実際のせん断耐荷力は平均的に設計値の1.08倍、標準偏差は0.06であることがわかった。部材間で確保すべき耐荷力の差は、破壊させる部材と破壊させない部材それぞれの耐荷力特性のばらつきに関するこのような統計データに基づき、破壊させる部材の耐荷力が破壊させない部材の耐荷力を超過する確率水準に応じて設定することができる。

### 3. 2 新阿蘇大橋の設計における研究成果の活用

平成28年熊本地震により崩落した阿蘇大橋の復旧は、周辺の地形・地質条件を踏まえてルート及び構造について検討された結果、元の橋から黒川の約600m下流の位置に新しい橋(以下「新阿蘇大橋」という。)を架設することにより実施された。新阿蘇大橋の建設地点周辺は、周辺に活断層の存在が推定されていること、また柱状節理が発達した急崖な斜面地形であること等、大地震によって地盤変状のリスクがある地形・地質条件にある。そのため、橋の建設にあたっては、地盤変状が橋の性能に及ぼす影響を可能な限り小さくしていく観点から、ルート設定の段階並びに橋の構造計画、設計及び施工の各段階で、図-3に示すような様々な技術的な創意工夫が採り入れられた<sup>10)</sup>。それら創意工夫の一つとして、土木研究所で研究開発を進めてきたシナリオデザイン設計の考え方や損傷制御型支承が導入されたので、その具体例を紹介する。

新阿蘇大橋の耐震設計は、道路橋示方書に基づいてレベル1地震動及びレベル2地震動のそれぞれに対

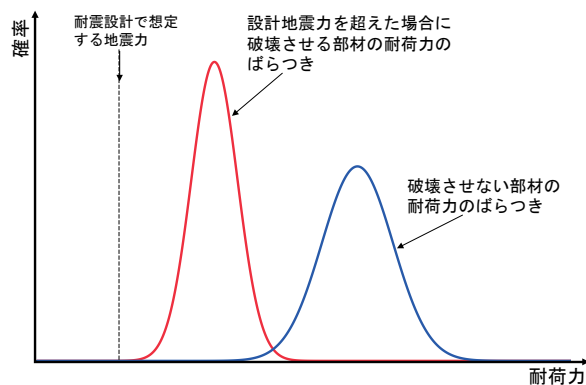


図-2 部材間での耐荷力の階層化

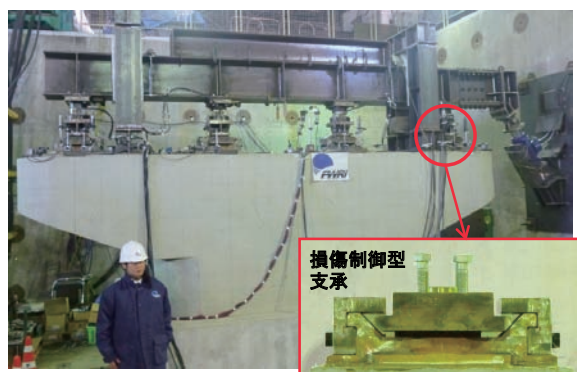


写真-3 損傷制御型支承の検証実験

して求められる性能を確保した上で、断層変位が橋に及ぼす影響を最小化できるようにするとともに、橋に機能的な損傷が生じてでもできる限り早期に復旧できることが目標とされている。ここで、地盤に生じる断層変位に対しては、想定外の断層変位が生じるような状況が生じたとしても橋としては致命的でなく、その機能回復もしやすくなるように橋の破壊形態を制御できるように設計する方針となっている。また、橋の構造形式の選定にあたっては、断層変位の影響が避けられない断層交差部と、その前後区間となる渡河部、右岸側高架部の3区間に分割して構造形式が選定され、断層変位に伴う損傷シナリオが次のように設定されている。

まず、深いV字谷となっている渡河部の橋では、渡河部の右岸側に設置する下部構造に断層変位の影響を受けて変状が生じることを想定しておく必要がある。そこで、写真-1で示した被災例も踏まえ、橋台の鉛直支持が無い状況でも自立可能な片持ち架設工法のPCラーメン構造を選定した上で、右岸側の桁端部を支持する下部構造に不測の変位が生じたとしても、上下部接続部を先に破壊させることにより断層変位の伝達を絶ち、渡河部の構造本体に及ぶ影響を小さく抑えるという損傷シナリオが設定された。

断層交差部の橋は、推定活断層の幅から下部構造の離隔を確保するとともに、断層変位による橋への影響を小さくするためにできるだけ径間長を長くした単純箱桁橋が選定された。その上で、図-3に示すように、断層変位により地盤にずれが生じた際には上下部接続部を先に破壊させ、一方で上部構造を支える橋脚は桁を直接支持する役割となる橋座面とともに自立した状態を保持させることにより、断層変位の影響を受け流す損傷シナリオが設定された。

このように、これらの区間の橋における断層変位に対する損傷シナリオでは、上下部接続部となる支承部について他の部材よりも破壊を先行させることになる。そこで、上下部接続部の設計においては、土木研究所において研究を実施した損傷制御型支承の検討成果が活用された<sup>7),8)</sup>。損傷制御型支承を導入する上で重要なのは、破壊を先行させる部材の耐荷力がその他の破壊させない部材の耐荷力よりも小さくなっていることである。その際、どの部材の耐荷力にも材料特性や破壊モードに応じたばらつきがあるため、そのばらつきを考慮した上で、一定の信頼性水準をもって部材間の耐荷力に階層化を図っておく必要がある。新阿蘇大橋に導入された損傷制御型支承では、支承部の破壊によって桁端部間の掛け違い部に生じる段差を小さくする観点から、支承部を構成する部材の中から下杓取付けボルトが破壊をさせる部材として選定され、前述した土木研究所における試験データ<sup>8)</sup>等を基に、破壊させない部材の設計水平力は破壊を先行させる部材の設計水平力の1.3倍として設計された<sup>9)</sup>。

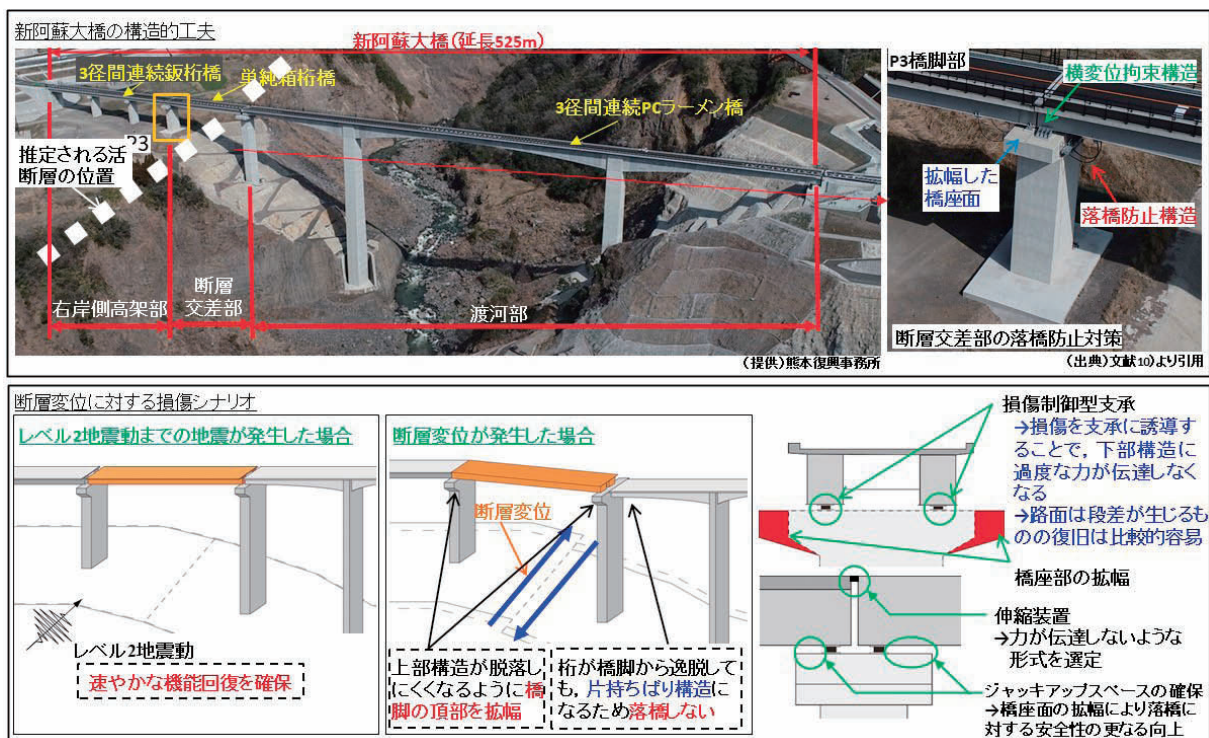
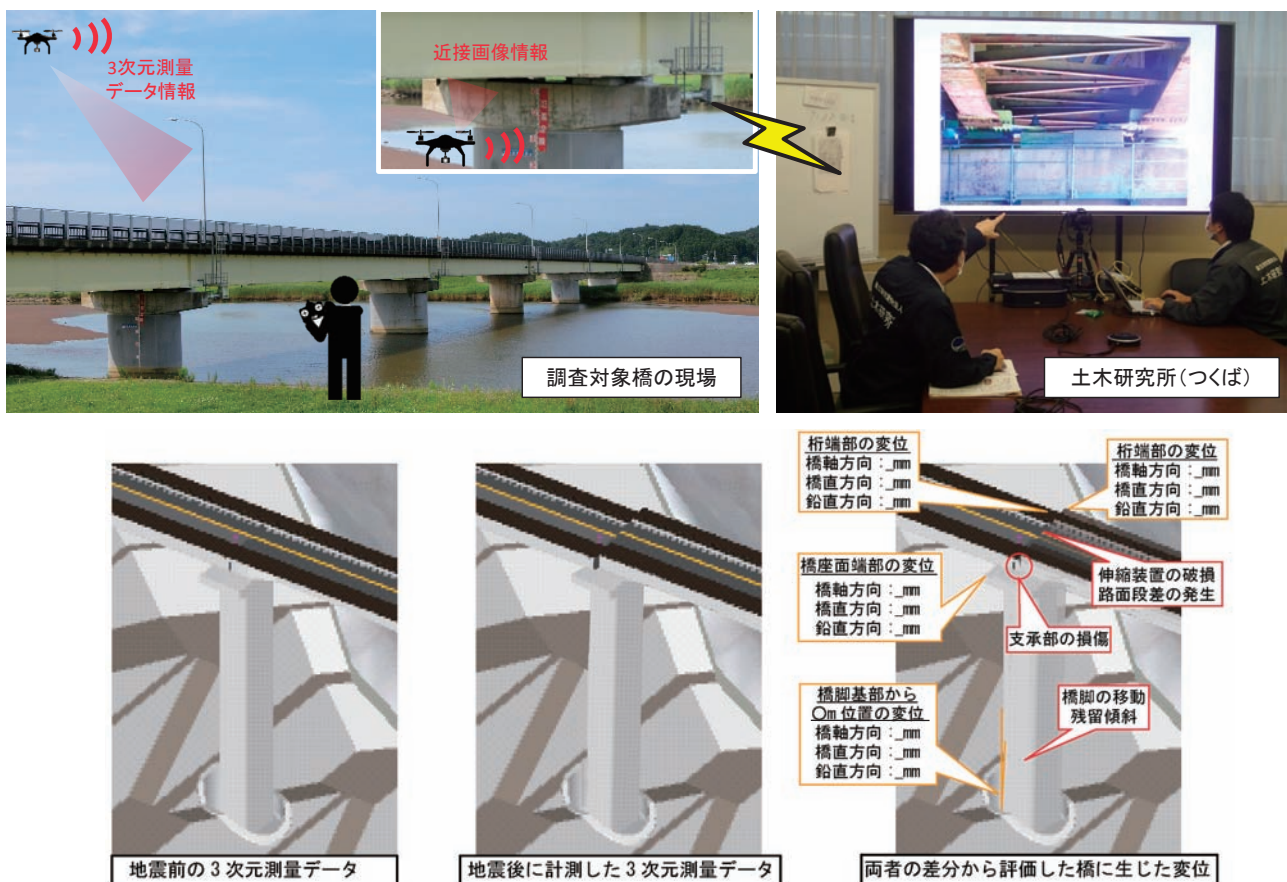


図-3 新阿蘇大橋における断層変位に対する損傷シナリオと構造設計での配慮

このように、想定外の作用に対して、落橋に至りにくく、復旧もしやすくなる損傷シナリオを設定し、その損傷シナリオとなる信頼性が高まるように橋を構成する各部材間での耐力の階層化を図りながら設計を行っていくという新しい考え方は、今後さらに研究開発の更なる進展により橋の耐震設計に応用されていくことが期待される。

#### 4. 大地震に対する橋のレジリエンス強化と3次元デジタル技術の活用の展望

大地震に対して橋のレジリエンス強化を図っていくためには、地震後に同時多発的に必要となる緊急点検による橋の状態把握を短時間で行うことがまず求められる。橋の点検は、これを適切に行うために必要な知識と技能を有する者が実施しなければならないが、大地震という突発的な有事において、被災した現地において速やかにそのような技術者を多数確保することが困難なこともあり得る。デジタル技術が進展してきているこれからの時代においては、現地ではない別の場所にいる知識と技能を有する者が大地震後の橋の状態把握や応急復旧のために必要な措置の判断をサイバー空間上でも実施できるように、橋の供用性に影響を及ぼすような被災が生じているかどうかのスクリーニングに活用できるようにする等、ニーズに応じた技術開発を進めておく必要がある。その一つとして、地震後にUAVにより橋の3次元測量を行えば、地震前のデータとの差分によって橋がどういう状態となっているのかを速やかに見える化できるようにシステム構築をしておくことが有用ではないかと考えられる。その実現のためには、比較対象となる地震前の橋の3次元測量データが得られてなければならない。一方で、昨今の橋の建設においてはBIM/CIMが活用されるケースが増えてきており、既設橋においても点検データの管理等において3次元モデルが作成されている趨勢にもある。そこで、このようにして構築される既存の3次元モデルを地震後の橋の状態把握にも活用できるようにデータを整備しておくのが効率的ではないかと考えている。



(提供) 国土技術政策総合研究所熊本地震復旧対策研究室から提供を受けた資料に加筆  
 図-4 UAVによる3次元データの取得と地震による橋の状態把握への活用イメージ

図-4は、地震後における活用のイメージを図示したものである。現場で UAV により計測された橋の3次元データは画像情報と共に道路管理者の災害対策本部に伝送され、当該橋の BIM/CIM データや3次元モデル等に格納されている位置座標情報と照合することにより、地震によって変位が生じた箇所を自動表示する。そして、画像情報と3次元データに基づいて得られる情報に基づき、橋の供用性に関する判断が的確かつ迅速にできるように支援するツールとする。応急復旧の措置が必要な場合には、UAV から送信されてくる画像情報と3次元データを工事施工業者に伝送し、復旧工事に必要な人材や資機材の手配を効率的にオペレーションできるようにしていく。また、画像情報と3次元データに基づく情報だけでは判断が困難な場合には、点検に必要な知識と技能を有する者を現地に派遣するオペレーションとし、高度な技術力を要するような事案については国土技術政策総合研究所や国立研究開発法人土木研究所でもこれらの情報をリアルタイムで共有し、リモートにより技術支援活動が行えるようにする。このようにすることで、地震後の橋の供用性に関する判断をデータの根拠に基づいて速やかにできるようにするとともに、応急復旧が必要な場合でも規制解除がいつなのかの目安を道路管理者が速やかに提示するための支援にも活用されることが期待される。デジタル技術の進展を、大地震後の橋の調査や応急復旧のための措置に係る業務プロセスの改善とスピード感の向上に変換し、レジリエンスの強化につなげていきたい。

## 5. おわりに

本報では、平成23年東北地方太平洋沖地震で得た教訓を踏まえ、これまでに土木研究所で研究開発を進めてきた想定を超える作用に対する新しい橋の耐震設計の考え方を紹介した。その成果は、平成28年熊本地震で崩落した阿蘇大橋の復旧において採り入れられ、阿蘇地域の早期復興にも大きく貢献することになった。自然由来の荷重を相手にする耐震設計では、震災経験の蓄積に伴い設計技術の向上や新しい技術開発がなされてきたところであるが、これから将来において発生するかもしれない想定外の大地震に対しては、「想定どおり、復旧しやすいように上手く壊れた」と言えるようにするための技術開発を促していきたい。併せて、大地震発生から橋の応急復旧までの業務プロセス改善とスピード感の向上を図り、橋のレジリエンス強化につなげていくため、別の目的で作成されている橋の3次元モデル等を上手く活用できるようにしていきたいと考えている。

### 【参考文献】

- 1) 星隈順一：近年の道路橋の震災経験から学ぶ構造リダンダンシーと機能回復力の向上を目指して、プレストレストコンクリート、Vol.61、No.2、pp.90-95、2019。
- 2) 星隈順一、大住道生：東北地方太平洋沖地震における橋梁の震災経験とその後の研究の進展、第21回 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集、2018。
- 3) モニタリングシステム技術研究組合：土木構造物のためのモニタリングシステム活用ガイドライン(案)、2019.12。
- 4) 二宮建、榎本真美、下川光治、服部達也、新田恭士：橋梁3次元データを活用する橋梁点検手法の提案とプロトタイプを用いた効果検証の報告、土木学会論文集F4(建設マネジメント)、Vol.76、No.2、I\_32-I\_46、2020。
- 5) 大住道生、西弘明、中尾尚史：超過作用に対する橋の損傷シナリオをデザインする新たな考え方、土木技術資料、Vol.60、No.4、pp.12-15、2018。
- 6) 大住道生、中尾尚史、石崎覚史、庄司学：破壊尤度の制御による道路橋の崩壊シナリオデザイン設計法の提案、土木学会論文集A1(構造・地震工学)、Vol.77、No.4(地震工学論文集第40巻)、I\_360-I\_372、2021。
- 7) 森屋圭浩、中尾尚史、星隈順一：津波の影響を受ける橋に適用する損傷制御型支承の検討、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.265-270、2015。
- 8) 国立研究開発法人土木研究所：損傷制御型支承の開発に関する基礎的研究、研究成果報告書、2020。  
<https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-program/2019/pdf/pro-4-2.pdf>
- 9) 中尾尚史、森屋圭浩、大住道生、星隈順一：津波を受ける橋の機能回復力向上のための技術開発、土木技術資料、Vol.59、No.6、pp.40-43、2017。
- 10) 星隈順一、今村隆浩、宮原史、西田秀明：新阿蘇大橋の性能に及ぼす地盤変状の影響を小さくするための構造的な配慮と工夫、土木学会論文集A1(構造・地震工学)、Vol.77、No.2、pp.339-355、2021。



# 一般的な気象データを用いた吹雪視程推定技術の開発とウェブサイト「吹雪の視界情報」による視程予測情報提供

寒地道路研究グループ グループ長 松澤 勝

## 1. はじめに

積雪寒冷地の冬期道路では、吹雪による視程障害や吹きだまりによる交通障害がしばしば発生し、社会的に影響を与えている。このため、防雪柵や防雪林などの吹雪対策施設の整備が進められてきた。ところが、近年急激に発達した低気圧の影響により、極端な暴風雪による吹雪災害が発生するようになってきた。平成 25 年 3 月に北海道を襲った暴風雪では、多数の道路が長期間にわたり通行止めになり、さらに 9 名の方が亡くなる等、大きな被害が発生した。また、令和 3 年 1 月には宮城県内の東北自動車道において、吹雪による視界不良により多重衝突事故が発生し 130 台以上が巻き込まれた。これまで、防雪柵などのハード対策によって吹雪災害や吹雪時の視界不良事故の軽減に効果を上げてきているが、これらの整備には多くの費用と時間が必要となる他、極端な暴風雪への対応には限界がある。したがって、ドライバーが吹雪に巻き込まれないように、吹雪の現況及び予測情報を提供し、吹雪時におけるドライバーの行動判断を支援するソフト対策も重要である。

ところで、吹雪時の視程は、一般的な気象値ではないため、観測データの蓄積もなく、広域の観測網も存在しない。一方、寒地道路研究グループでは、過去の研究において、気象条件から吹雪時の視程を推定する手法を明らかにした<sup>1)</sup>。この手法を活用して、平成 25 年 2 月よりインターネットサイト「吹雪の視界情報」において、北海道内の吹雪時の視界（視程）の予測情報の提供を開始した。その後、吹雪視程推定技術の改良を重ね、継続的に吹雪予測情報提供に取り組むほか、SNS での発信にも取り組むことで、サイトの認知度が向上しドライバーの吹雪回避に効果を上げている。本報では、上記で述べた一般的な気象データを用いた吹雪視程推定技術と、その技術を活用したウェブサイト「吹雪の視界情報」による吹雪視程予測の情報提供の取組について報告する。なお、対象物を視認できる最大距離を意味する気象用語としては「視程」が正しいが、「吹雪の視界情報」は一般ドライバー向けに情報提供するため、「視界」という用語を用いた。そのため、本論文でも視界を視程と同義として扱う。

## 2. 吹雪視界予測情報の提供

### 2. 1 「吹雪の視界情報」サイトの概要

土木研究所寒地土木研究所では平成 25 年 2 月よりウェブサイト「吹雪の視界情報（北海道版）」（以下、「吹雪の視界情報」という）において、北海道内の視界の現況と予測情報を提供している（図-1）。

「吹雪の視界情報」の主要コンテンツ（サービス）は①視界情報、②吹雪の投稿情報、③吹雪の視界情報メール配信、および④Twitter である。

図-1 の赤枠で示される①視界情報の画面では、吹雪の視界を、「著しい視程障害(視程 100m 未満)」、「かなり不良(視程 100~200m)」、「不良(視程 100~500m)」、「やや不良(視程 500~1000m)」、「良好(視程 1000m 以上)」の 5 ランクに区分し、エリアごとに色分け表示している。エリアは、北海道の旧市町村単位（札幌市のみ区単位）の 221 エリアである。それぞれのエリア

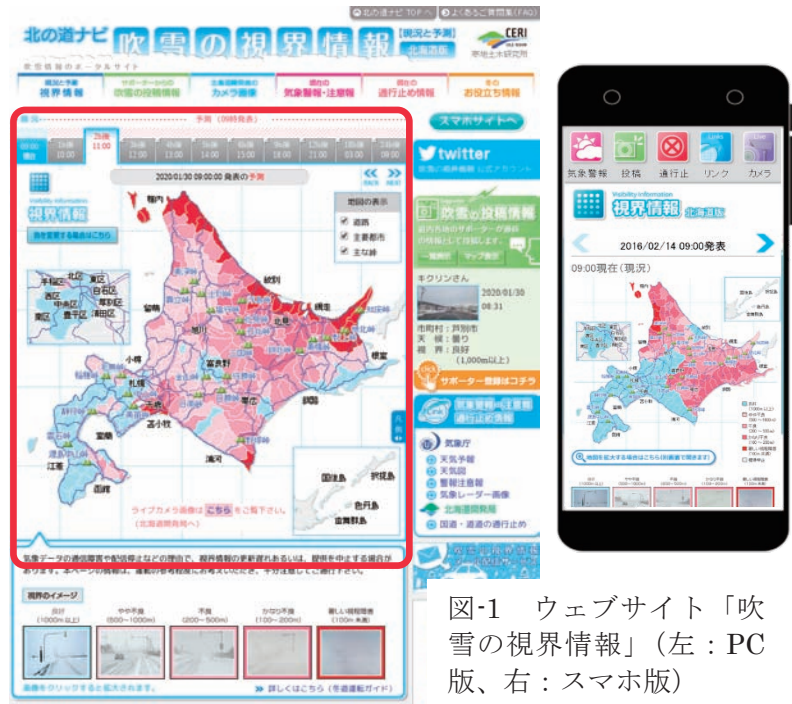


図-1 ウェブサイト「吹雪の視界情報」(左：PC版、右：スマホ版)

を対象に、現況および1、2、3、4、5、6、9、12、18、24時間先の予測情報を提供した。予測値の更新は深夜を除く3時間毎（6、9、12、15、18、21時）、現況値は30分毎である。なお、スマホ版サイトも構築し、外出先での利用を容易にしている(図-1右)。

なお、本予測情報の提供に当たっては、気象庁の許可を受けている（予報業務許可事業者第183号）。

## 2.2 メール配信サービス

「吹雪の視界情報」は、利用者が能動的にアクセスするプル型の情報提供である。加えて「メール配信サービス」によるプッシュ型の情報提供も行っている。事前に登録された条件に応じて、視界不良が予測される際に、自動でメール通知するものである(図-2)。

配信条件の選択肢は以下の通りである。

- ・地域：気象庁一次細分区域の46エリア
- ・視程：100m未滿、200m未滿、500m未滿
- ・予測時間：3時間先まで、6時間先まで



図-2 メール配信サービス

## 2.3 吹雪予測情報の作成の流れ

図-3は、本システムにおける、吹雪予測情報作成のプロセスである。

気象庁からは、様々な気象データ（現況および予測）が配信されている。例えば、メソ数値予報モデルGPV（MSM）データとして、風速と気温などが3時間毎に5kmメッシュの現況値と39時間先までの予測値（9時と21時は51時間先までの予測値）が配信される。また降水短時間予報GPVデータとして、30分毎に1kmメッシュの降水強度の現況値と6時間先までの予測値が配信される。

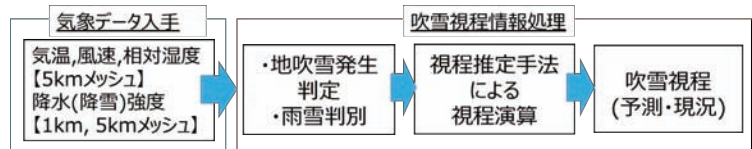


図-3 吹雪予測情報処理プロセス

そこで、気象庁から配信される気温、相対湿度、風速と降水強度を入力値として、後述する地吹雪発生判別と雨雪判別、および視程推定手法を適用して視程演算を行うことで、吹雪視程情報を作成している。この際、入力する気象データとして予測値を用いることで、吹雪視程の予測値が得られる。

本報では地吹雪発生判別と雨雪判別手法、および視程推定手法をまとめて吹雪視程推定技術と呼ぶこととする。

## 2.4 SNSによる発信

「メール配信サービス」ではプッシュ型の情報提供も行っているが、既に「吹雪の視界情報」のサイトの存在を知っていて、「メール配信サービス」へ登録した利用者に限定される。そこで、インターネットを利用している幅広い層を対象に、令和元年度からTwitterによる発信を開始し、24時間先までの予測情報をプッシュ型で提供した(図-4)。ツイートは、北海道広域に著しい視界不良が予測された際に行い、24時間先までの予測結果の中から最も視界不良の範囲が広く予測された時刻の画像を添付した。本文には時刻情報を省いた地域情報を記載し、「吹雪の視界情報」サイトへ誘導している。

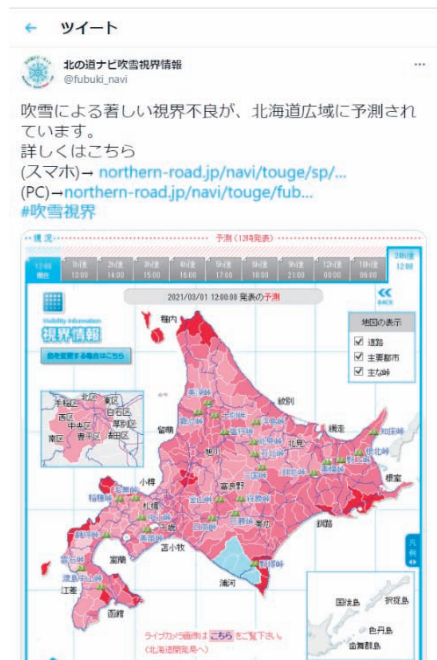


図-4 Twitterによる発信

3章以降では、「吹雪の視界情報」での吹雪視程推定技術と、吹雪情報提供の効果について説明する。

### 3. 吹雪視程推定技術

#### 3. 1 気象条件からの視程推定手法

吹雪時の視程  $Vis(m)$  と飛雪流量  $q(gm^{-2}s^{-1})$  (単位断面積を単位時間を通して吹雪粒子の質量) には強い相関関係がある。図-5 は、武知ら<sup>2)</sup>による被験者実験データと既往研究を整理したものである。図の赤線で示される式(1)の関係式が導かれる。飛雪流量  $q$  は飛雪空間密度  $N(gm^{-3})$  (単位空間に存在する吹雪粒子の質量) と風速  $V(ms^{-1})$  の積  $q=N \cdot V$  で表される。また、吹雪の浮遊層 (吹雪粒子が風によって浮遊する領域で、概ね高さ 10cm 以上) では乱流拡散モデルが適用可能である。そのため拡散方程式を解くことで飛雪空間密度の鉛直分布を示す式(2)が得られる。則ち式(2)の変数に適当な値を与えて、任意の高さ  $z$  の飛雪空間密度  $N(z)$  を求め、その値に高さ  $z$  の風速  $V(z)$  を乗じることで  $q(z)$  が算出できる。得られた  $q(z)$  を式(1)に与えることで視程  $Vis$  が求められる。

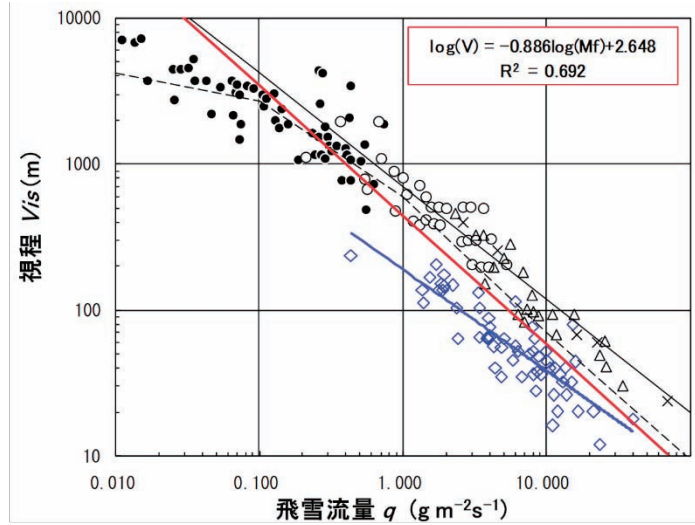


図-5 視程と飛雪流量<sup>2)</sup>

$$Vis = 10^{-0.886 \cdot \log(q) + 2.648} \quad \dots(1)$$

$$N(z) = \frac{P}{w_f} + \left( N_t - \frac{P}{w_f} \right) \left( \frac{z}{z_t} \right)^{\frac{w_b}{ku^*}} \quad \dots(2)$$

ここで、 $P$ : 降水フラックス( $gm^{-2}s^{-1}$ )、 $N_t$ : 基準高さ  $z_t$  の飛雪空間密度( $gm^{-3}$ )、 $w_f$ : 降雪粒子の落下速度( $ms^{-1}$ )、 $w_b$ : 浮遊する吹雪粒子の落下速度( $ms^{-1}$ )、 $k$ : カルマン定数(=0.4)、 $u^*$ : 摩擦速度( $ms^{-1}$ )である。なお  $P$  と時間降水量  $P_h(mmh^{-1})$  との間には、 $P=0.278P_h$  の関係がある。

これらの変数のうち、一般的な気象データは、時間降水量だけである。それ以外の値に関しては、既往研究<sup>3)</sup>に基づき、以下の値と関係式を採用している。ここで  $V_{10}$  は高さ 10m の風速である。

すなわち、風速と時間降水量から、これらの変数を求めて、式(1)や式(2)に与えることで、 $z$  の視程を推定することができる。なお「吹雪の視界情報」においては、積雪深  $H(m)$  を考慮し  $z=1.2-H(m)$  の視程を計算する。(ただし  $z<0.4m$  の場合は  $z=0.4m$  とする)

$$w_f = 1.2 (ms^{-1}), \quad w_b = 0.21 (ms^{-1}), \quad z_t = 0.15 (m), \quad u^* = 0.036 V_{10} (ms^{-1})$$

$$N_t = 0.116 \exp(0.309 V_{10}) (gm^{-3}) \quad (\text{降水量} \geq 0.4 \text{ mmh}^{-1})$$

$$N_t = 0.021 \exp(0.401 V_{10}) (gm^{-3}) \quad (\text{降水量} < 0.4 \text{ mmh}^{-1})$$

#### 3. 2 吹雪の発生判別フロー

ところで、この視程推定手法は、北海道の厳冬期を想定して開発されたものである。このため、雪面が濡れたり再凍結したりすると、風が強くても吹雪が発生しなかったり、視程の演算値が小さくなる。そこで、地吹雪発生の条件を考慮する必要がある。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 (雨雪判別) する必要がある。そこで、これらの地吹雪の発生と雨雪判別の処理を行うフローを開発した (図-6)。なお、毎冬の吹雪観測や気象観測データの解析に基づき、フローは改良を重ねている。図-6 に示すフローは「吹雪の視界情報」の平成 30 年度冬期の吹雪情報提供に用いられたフローである。

図-6 において  $P_h$ : 時間降水量 ( $mmh^{-1}$ )、 $t$ : 降雪終了後の経過時間 (h)、 $T$ : 現況の気温 ( $^{\circ}C$ )、 $T_{max}$ : 降雪終了後の最高気温 ( $^{\circ}C$ ) である。また、図-6 の  $D1$ 、 $D2$  に該当する地吹雪発生判別式、および、 $SR$  に該当する雨雪判別式<sup>4)</sup>を以下に示す。式(3)、式(4)は観測データを判別分析して得られたものである。

$$D1 = -0.59V_{10} + 0.2T - 0.08SF + 4.77 \quad \dots(3)$$

$$D2 = -1.18V_{10} + 0.16T + 0.09t + 0.03U_{sum} + 4.93 \quad \dots(4)$$

$$SR = -\phi - 11.1(T - 9.75)$$

・・・(5)

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 $\times 10^{-3}$

$\phi$  : 相対湿度(%)

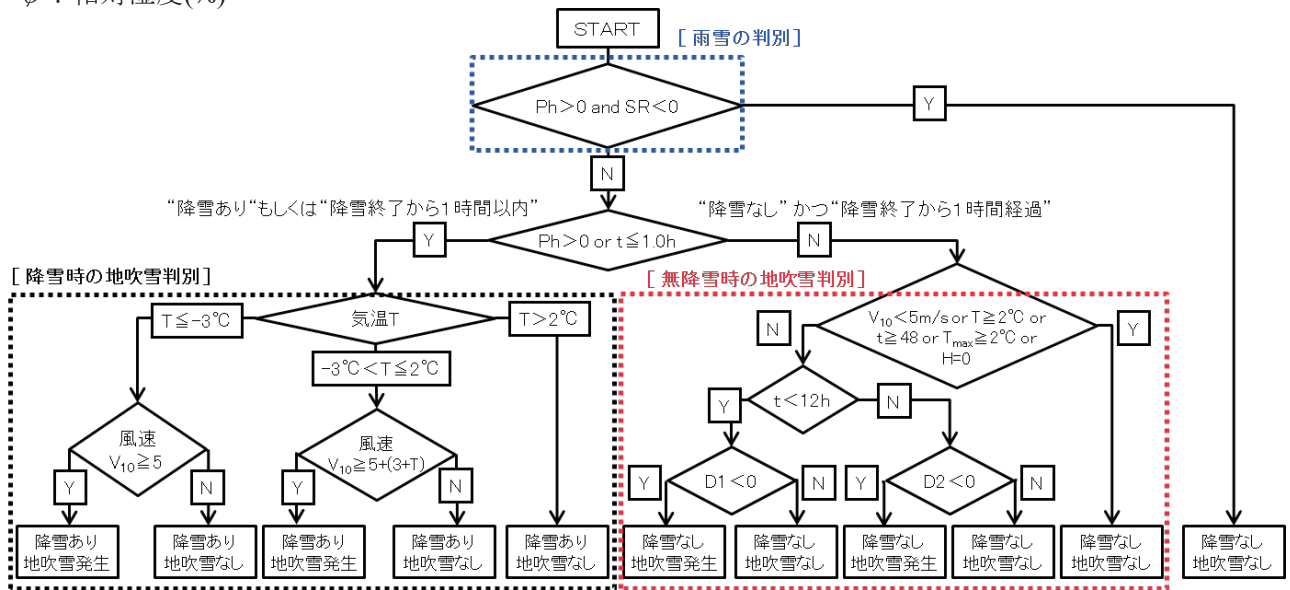


図-6 吹雪の発生判別フロー

### 3. 3 視程推定手法の演算の精度

表-1 に示す 5×5 分割表を用いて視程推定手法の精度検証を行った。北海道内 4 箇所（石狩市、初山別村、猿払村、弟子屈町）で平成 28～30 年度の 3 冬期に観測した気温、風速、及び、当該箇所の解析雨量データ等を入力値として用いた。前述の視程推定手法と吹雪の発生判別フローを用いた視程推定値と、視程計で現地計測した視程を比較した結果、完全適中率は 82% だった（図-7）。

表-1 適中率評価のための分割表

		推定した吹雪時の視程					合計	
		1 100m未満	2 100m以上 200m未満	3 200m以上 500m未満	4 500m以上 1000m未満	5 1000m以上		
現 地 で の 観 測 に よ る 視 程	1	100m未満	n11	n12	n13	n14	n15	
	2	100m以上200m未満	n21	n22	n23	n24	n25	
	3	200m以上500m未満	n31	n32	n33	n34	n35	
	4	500m以上1000m未満	n41	n42	n43	n44	n45	
	5	1000m以上	n51	n52	n53	n54	n55	
合計								SUM(n)

- 見逃し 見逃し率 = (n13+n14+n15+n24+n25+n35)/n
- 1ランク見逃し 1ランク見逃し率 = (n12+n23+n34+n45)/n
- 完全適中 完全適中率 = (n11+n22+n33+n44+n55)/n
- 1ランク空振り 1ランク空振り率 = (n21+n32+n43+n54)/n
- 空振り 空振り率 = (n31+n41+n42+n51+n52+n53)/n

視程5ランクの推定精度(適中率)【北海道(石狩・初山別・猿払・弟子屈)】

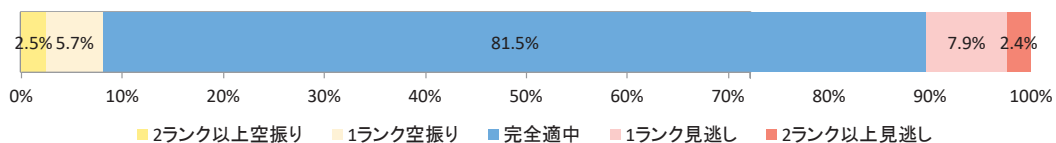


図-7 視程推定値の適中率（北海道）

## 4 情報提供の効果

### 4.1 アクセス数の推移

図-8は平成24年度冬期から令和2年度冬期までのウェブサイト「吹雪の視界情報」のPC版、スマホ版(SP版)、両者全体での日平均アクセス数である。令和元年は極端な暖冬だったが、全体として増加傾向にある。また、令和2年度はスマホ版のアクセス数が急増していることがわかる。また、図-9は、令和2年度の「吹雪の視界情報」への日別アクセス数の推移である。日本海側を中心に数年に一度の猛吹雪になった2月16日に最大約28,000アクセスを記録した。

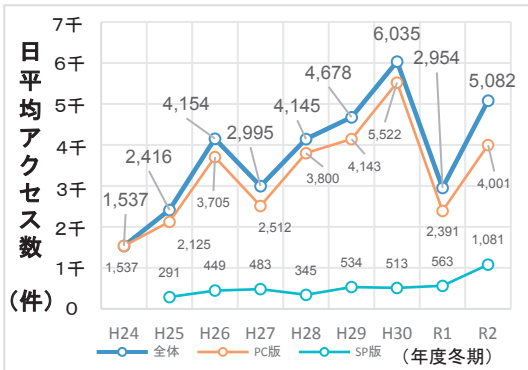


図-8 日平均アクセス数の推移



図-9 令和2年度の日別アクセス数の推移

### 4.2 Twitterによる情報発信

図-10は、令和2年度のTwitterのアクセス数とフォロワー数の推移である。令和2年度は、北海道広域に著しい視界不良が予測された際に、計9回の発信(ツイート)を行った。その結果、日最大63,000件のアクセス数があった。また、フォロワー数もTwitterを開始した令和元年度(758名)の2.8倍にあたる2,108名に達した。さらに、ツイート後にTwitter経由による「吹雪の視界情報」のアクセス数が増加することも確認されている(図-11)。

なおフォロワーには、北海道開発局、NEXCO 東日本など道路管理者に加え、全道をエリアとする放送局、地域FM局、沿岸バス、北海道拓殖バスなどの公共交通機関など幅広い利用者が登録されている。

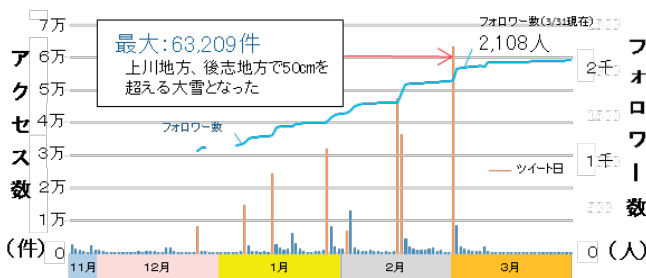


図-10 令和2年度のTwitterの日アクセス数とフォロワー数の推移

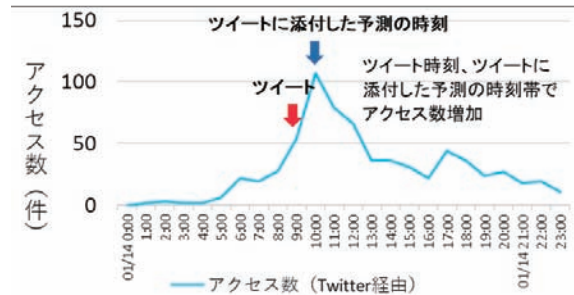


図-11 Twitter経由の「吹雪の視界情報」サイトのアクセス数(令和3年1月14日)

### 4.3 アンケート結果

「吹雪視界情報」の効果을把握するため、「吹雪の視界情報」サイトの利用者を対象に、平成31年3~4月にWeb方式でアンケート調査を実施した。952名からの回答が得られた。

図-12は、「視界不良(200m未満)が予測された際に、行動や予定の変更を検討したことがあるか?」という問いに対する回答である。図より73%の利用者が「行動や予定を変更する、または変更する機会が多い」と回答しており、吹雪の回避に活用されていることが判る。また、図-13は「視界不良の発生が予測される場合に、行動や予定を変更するうえで参考にする情報は何か?」という問いに複数回答で選んでもらった結果である。図より、「吹雪の視界情報」のウェブサイトやメール配信サービスは、天気予報や気象警報・注意報と同程度に参考にされていることがわかる。

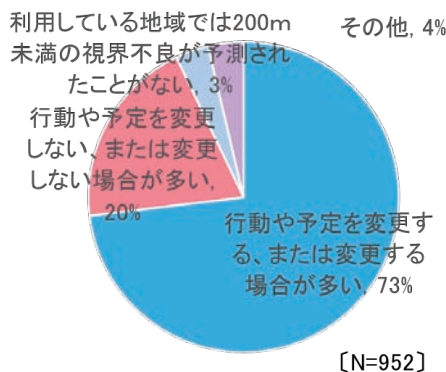


図-12 「視界不良（200m未満）が予測された際に、行動や予定の変更を検討したことがあるか」に対する回答結果

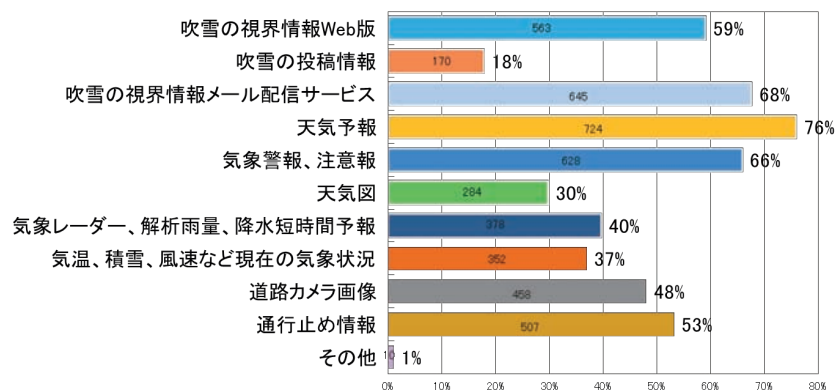


図-13 吹雪時の交通行動の変更の際に参考にする情報

また、自由回答で、「吹雪の視界情報」に対する意見を記述してもらった。以下に代表的な意見を示す。

- ✓ 視程障害に関する情報は、他では得ることができない貴重な情報なので、今後とも精度をより高めて、情報提供を今後もお願いいたします。
- ✓ とても参考になり、いつも利用しています。テレビの天気予報よりも当たるし、たよりにしています。来年もよろしくお願いたします
- ✓ 吹き溜まりや地吹雪によるホワイトアウトになりやすい場所、過去に発生したピンポイントの情報。過去の情報提供があれば、事前に自分の判断で路線を変更する等の対応ができる。

## 5 今後の展望

現在、吹雪視界予測の本州展開に向けて、3章で示した視程推定技術の改良に取り組んでいる。青森県五所川原市や青森市で数箇年にわたり吹雪観測を行い、各種パラメータの調整を行うなど、視程推定技術の改良を行った。その結果、視程推定値の完全適中率は78%に達している（図-14）。令和3年度は、改良した視程推定技術を活用して、青森県を対象に、吹雪視界予測情報の提供を開始する予定である（図-15）。

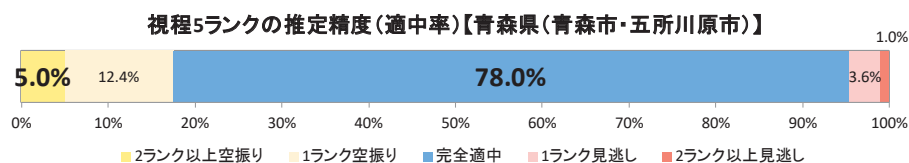


図-14 改良した視程推定技術による視程推定値の適中率（青森県）



図-15 青森県での視界予測情報提供イメージ

## 6 おわりに

「吹雪の視界情報」は、平成25年2月に開設以降、継続して情報提供を行ってきた。その間、新聞・テレビ等でも多数扱われ、北海道内では広く認知されるようになってきた。利用者も年々増加し、まさしく「継続は力」である。吹雪災害は、地域と季節が限定されるニッチな研究対象であるが、土木研究所の研究理念にある「地域から信頼される研究」を念頭に、引き続き吹雪災害の軽減に向けて研究開発に努めてまいりたい。

### 【参考文献】

- 1) 松沢勝、竹内政夫：気象条件から視程を推定する手法の研究、雪氷、64、p.77-85、2002。
- 2) 武知洋太、松澤勝、中村浩：吹雪時に人間が感じる視程と視程計や吹雪計による計測値との関係、北海道の雪氷、Vol.28、pp.17-20、2009。
- 3) 松澤勝：吹雪時の視程推定手法の改良に関する研究、雪氷、69、p.79-92、2007。
- 4) 気象庁予報部：平成21年度数値予報研修テキスト、116pp、平成21年11月。

# 衛星リモートセンシングと数値シミュレーションの同化による水災害現象の解明と予測

水災害研究グループ グループ長 伊藤 弘之

## 1. はじめに

本年 2021 年は、日本のみならず欧州、インド、中国等で激甚な洪水が発生し、その一方でアメリカ南西部やアフリカ南部等では深刻な干魃状態が発生している。極端降雨現象による災害の発生は近年常態化してきており、温暖化による気候変化が顕在化していることは明らかである。

水災害現象の解明・予測については、降雨を含む気象現象を取り扱う気象学と、降雨が地上で流出・氾濫等する現象を扱う水文学・水理学がそれぞれ発展してきたが、水災害現象の予測を高度化し効果的な対策の検討に資するためには、大気から陸面にかけての水(水蒸気、水、氷等)やエネルギー(放射、熱等)の移動・循環について、総合的な視点からモデル化や観測の高度化を進めることが重要である。

大気から陸面までのモデル化については、特に気候変化研究分野において 1990 年頃から気象・水文学に基づく全球気候モデル(GCM)の開発や温暖化効果ガスの排出シナリオに基づく将来予測等が目覚ましく進展してきた。一方で観測データについては、我が国や欧米等先進国では稠密な気象観測網が整備されているものの、途上国等では観測データが乏しく、地球規模では空白地帯が生じているのが現状である。また気象に比べ流域の土壌水分や土壌温度、植生状態等陸面条件に関わる観測データは乏しい。

このような状況において、人工衛星観測は、広域の観測が可能、異なる周波数や偏波の電磁波を計測することで、人間の目で見ることができない情報を知ることができるといったメリットを有している。さらに、大気・陸面における詳細な水・エネルギー等の循環現象を表現した解析モデルと組み合わせることにより、直接見ることが困難な現象の把握が可能となり、水災害現象予測の高度化に寄与すると期待される。本講演では、人工衛星による観測技術と大気・水循環のシミュレーションによる、水災害の解明・予測の研究事例について紹介する。

## 2. 衛星リモートセンシングについて

衛星リモートセンシングは人工衛星に搭載された「光学センサ」、「能動型マイクロ波センサ」、「受動型マイクロ波センサ」により、物質から反射・放射された太陽光やマイクロ波を計測するものである。「能動型センサ」は自信が発射したマイクロ波の反射波を、また「受動型センサ」は物質自体が放出するマイクロ波を計測する。物質はその種類と状態によって異なるマイクロ波特性を有するため、高精度で計測されたマイクロ波から物質とその状態を逆に推定することができる。特に気象や水文学に関する観測においては、大気透過率が概して高く、水の状態(液体・固体等)に対して吸収・射出・散乱等が大きく変化する波長 1cm~数十 cm のマイクロ波を使用することが多い<sup>1)</sup>。代表的な「受動型センサ」である AMSR2(極軌道衛星である水循環変動観測衛星「しずく」に搭載)では、1日2回の頻度で1回に約 1,450km の幅を、多周波(6.925, 7.3, 10.65, 18.7, 23.8, 36.5, 89.0GHz)、多偏波(垂直, 水平)で成分毎のマイクロ波を観測することができる<sup>2)</sup>。一方で、AMSR2 の空間解像度は低周波で 35km×62km 程度と低いため、観測範囲の地表や大気中の物質特性の総和が観測されたため、物質の放射等特性を利用し、土壌水分量、植生量、水、降雨・雪等の物質と状態量を分離・推定する必要がある。

### 2.1 衛星観測の基本原則

大気や土壌等媒質中の放射(電磁波)は、媒質による吸収・散乱による消散(減衰)、熱放射等により変化するが、それらは媒質中の物質や波長・偏波に対しても固有の特性を有する。例えば、植物は可視部分(0.4~0.7 $\mu$ m)での反射率が非常に低い反面、近赤外(0.7~2.5 $\mu$ m)では高い。この性質を利用した

指標 Normalized difference vegetation index:NDVI ( $= (IR-R)/(IR+R)$  : R 可視域赤の反射率、IR : 近赤外域の反射率) と植物種毎に設定されるパラメータから、植生量の指標となる葉面積指数 (LAI : 単位地表面積当たりの片側葉面積の割合) を推定することができる。また、大気が乾燥した状態で、「滑らか」で適度に湿った土壌表面からのマイクロ波の放射輝度温度  $T_{se}$  は地表面温度  $T_g$  を使って、 $T_{se}=T_g(1-\Gamma_p)$  となる (図-1 参照)。反射率  $\Gamma_p$  は QH モデル<sup>3)</sup>によると、式(1)の通り土壌の混合誘電率  $\epsilon_r$  と観測角  $\theta$  及び波長より決まる。土壌水分が存在する場合の混合誘電率  $\epsilon_r$  は、Dobson 等<sup>4)</sup>の式(2)より土壌特性と水分量から決まる。このため、衛星で観測するマイクロ波輝度温度から土壌水分量が推定できる。

$$\Gamma_p = \{ QR_h + (1-Q)R_v \}^{-h} \quad R_h = \left| \frac{\cos\theta - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta}} \right|^2 \quad R_v = \left| \frac{\epsilon_r \cos\theta - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta}}{\epsilon_r \cos\theta + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta}} \right|^2 \quad (1)$$

$R_h, R_v$  : 水平(垂直)偏波の反射係数, Q: 地表面粗度と波長による係数、h: 地表面粗度と入射角の関数。

$$\epsilon_r = \left[ 1 + (1 - \omega_s)(\epsilon_s^\alpha - 1) + \omega^\beta \epsilon_{fw}^\alpha - \omega \right]^{1/\alpha} \quad (2)$$

ここで、 $\omega_s$ : 土壌空隙率、 $\omega$ : 体積土壌水分、 $\epsilon_s$ : 乾燥土壌の誘電率、 $\epsilon_{fw}$ : 自由水の誘電率、 $\omega_s$ : 土壌空隙率、 $\omega$ : 体積土壌水分、 $\epsilon_s$ : 乾燥土壌の誘電率、 $\epsilon_{fw}$ : 自由水の誘電率、 $\alpha$ : 0.65、 $\beta$ : 土壌特性による係数 ( $= 1.09 - 0.0011 \times \text{sand} + 0.0018 \times \text{clay}$ , sand, clay : 砂, 粘土の割合(%)) である。

## 2.2 マイクロ波放射伝達モデル

観測エリア内で、大気中や地上の水、植生の有無等条件が複雑になると、大気中や陸面の諸条件に応じたマイクロ波の波長や偏波毎の放射輝度温度を算定するモデル (RTM) が必要となる (図-1 参照)<sup>5)</sup>。代表的な RTM として、地表面における放射率を Advanced Integral Equation Method (AIEM) で計算したモデルがある。これは、地表面からの表面散乱における地表面粗度の扱いを精緻化し、高い精度で放射率を計算できるモデルである。また地表面の粗度が大きい場合に影になり見えない部分の効果を考慮するために Shadowing の効果を組み込み、観測データへの適合性を改善している<sup>6)</sup>。さらに、乾燥土壌ではマイクロ波の土壌層への侵入深さが増加し、深部を観測する低周波数帯の輝度温度が相対的に低下することを考慮し、土層での放射伝達過程を取り込んだモデルが土層中での放射伝達に適用されている。

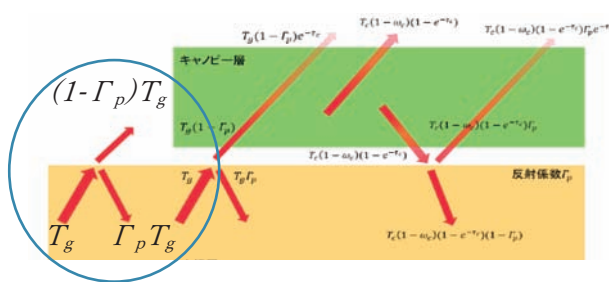


図-1 土壌表面とキャノピ (植生層) からの放射

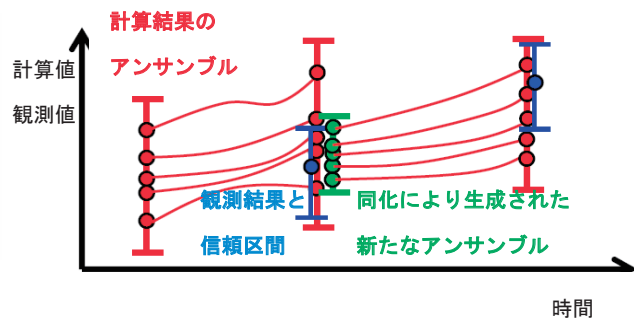


図-2 アンサンブルカルマンフィルターの概要

## 3. データ同化について

データ同化とは、観測データを数値シミュレーションに反映する手法で、シミュレーションモデルの状態量やパラメータを微修正することにより、シミュレーションの結果を統計的に最適化することがで



きる<sup>7)</sup>。特に4次元データ同化は、3次元空間内で時間発展するシミュレーションモデルの状態を高精度に推定する方法で、非定常モデルにおいて過去の観測データも活用できる。同化手法としては、評価関数  $J$  の最小化問題を解くために、アンサンブルカルマンフィルター(EnKF)を使用する。EnKFでは状態変数の分布空間を有限個のアンサンブルメンバで表現することにより(図-2参照)、対象とする非線形モデルを線形化せずに、またメンバの個数を適切に設定することにより計算量を縮減することができる。

また、観測は様々な作用により形成される実現象に直接アプローチできる一方で、観測項目や観測時刻、観測地点が制約される。数値シミュレーションでは、全ての現象を組み込むことはできないものの、モデルメカニズムの範囲で各状態量は整合的な値となるとともに、計算資源の許す範囲で時間・空間解像度は任意であり予測も可能である。同化には異なるアプローチを相互補完する機能もある。

## 4. 大気および陸面の数値解析モデル

### 4.1 気象モデル(WRF: Weather Research and Forecasting Model)

WRFは米国大気研究センター(NCAR)と米国環境予測センター(NCEP)を中心とする共同プロジェクトによって開発された天気予報と学術研究の両方に対応したモデルである。完全圧縮の非静力学モデルであり、運動方程式、連続式、状態方程式、熱の保存式、水蒸気・雲水・雨水・雪・氷・雹等の混合比の保存式からなる。豪雨を予測する場合には、現象スケールが数km以下と小さいため、利用できる計算機の限界から計算領域を設定し、太陽の放射強制力の他に境界条件を設定して計算する必要がある。さらに、境界条件は予測時刻まで必要であり、他のGCMやMSMの予測計算結果を使用せざるを得ない。なお、気象現象のような複雑な系においては、初期値の鋭敏性が高く、時間とともに不確実性が拡大するため、予測計算の過程において観測されたデータを同化することとしている。水災害研究グループでは、三好等による局所アンサンブル変換カルマンフィルターを結合したWRF-LETKFを使用している<sup>8)</sup>。

### 4.2 陸面モデル

Simple Biosphere Model2(SiB2)<sup>9)</sup>は、大気と陸面の間でのエネルギー、水の質量と運動量の伝達を計算するために開発されたモデルで、大気と陸面との鉛直方向の水や放射・熱等フローのプロセスを物理的・植生生物学的に表現する。このモデルは、大気、植生(キャノピ、蒸発散、光合成)、陸域(地表、根茎層、下層)の領域において、放射・熱によるエネルギー、水(水蒸気、水、雪等)、大気、CO<sub>2</sub>の移動や相変化が計算される。また、植生による蒸発散や光合成の効果も考慮されており、衛星観測と植生種毎に決まる定数から植生量(LAI)や光合成等に関わる諸定数が設定される。SiB2は図-3に示す通り、地盤内の水の移動をモデル化したHydro-SiB<sup>10)</sup>さらに分布型流出モデルに拡張したWEB-DHM<sup>10)</sup>、Hydro-SiBに植生の生長をモデル化したEcoHydro-SiB<sup>11)</sup>、陸域での流出・氾濫現象を表現するためRRIモデルと結合させたWEB-RRI<sup>12)</sup>等機能の拡張や改良が行われている。

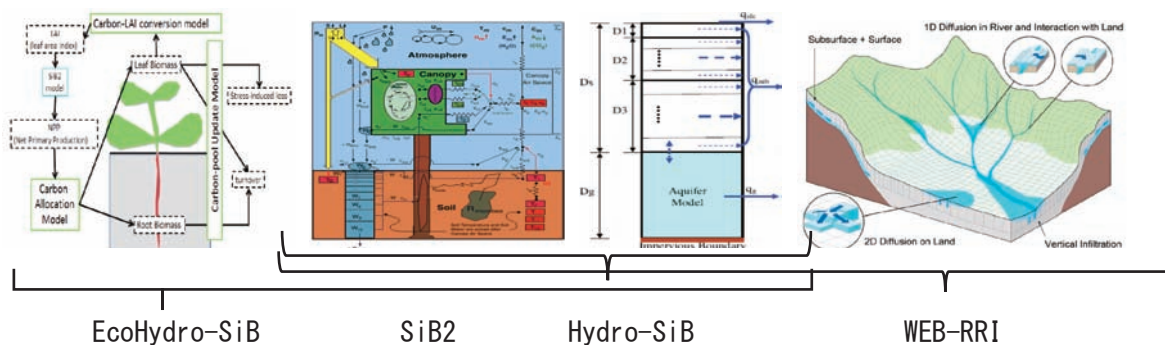


図-3 陸面モデルのシリーズ

## 5. 衛星マイクロ波観測と数値シミュレーションの同化による水災害対策研究の取り組み

### 5.1 洪水予測の精度向上の取り組み

これまで、水災害の原因となる豪雨予測に取り組んできた。一例として、2015年9月の関東・東北豪雨の再現計算をWRF-LETKFを活用して行った事例を紹介する<sup>13)</sup>。当該豪雨では、9月7日から11日にかけて低気圧に流れ込む南寄りの風、台風第17号からの南東風により線状降水帯が発生した。この豪雨を計算するため、15kmメッシュの外側領域（北緯24～42度、東経125～155度）に、3kmメッシュの内側領域（北緯34～38.5度、東経137～142.5度）を設定し、初期値と境界条件は気象庁GSMの結果を入力した。雲物理スキームとしては外側領域にWSM3class、内側領域にLinを適用した。また、アンサンブル数は33個とし、米国NCEPにより収集されたラジオゾンデや航空機観測による（風、気圧、気温、比湿）、衛星追尾風及びGPS可降水量を、9時間の気象計算の後半6時間に同化し、初期値を作成した。6時間毎に作成した初期値から10日6時までの予測を行った。鬼怒川流域平均雨量の観測値と予測値を図-4に示すが、特に9～10日の大雨に対して、8日6時時点までは再現しておらず、8日12時以降は降雨を再現しているものの、降雨量は2/3程度の過小な結果となっている（図-4参照）。

豪雨が発生する位置と強度をより正確に予測するためには、豪雨をもたらす雲の位置を把握し、初期条件の改良やデータ同化活用することにより、水蒸気から雲の形成、降雨に至る積雲過程の表現を向上させる必要がある。ただし、水滴、氷晶等から構成される雲はマイクロ波で観測できるものの、陸面からの射出が強いため陸上の雲を正確に捉えることは容易でない。例えば、瀬戸等<sup>14)</sup>はWRFとSiB2を使用し計算された大気・陸面データからRTMでマイクロ波輝度温度を求め、衛星観測輝度温度を同化することにより、雲水量分布を推定している（図-5参照）。このような方法で得られた雲データをWRF-LETKFに取り込むことにより、豪雨の予測精度の向上を図る。

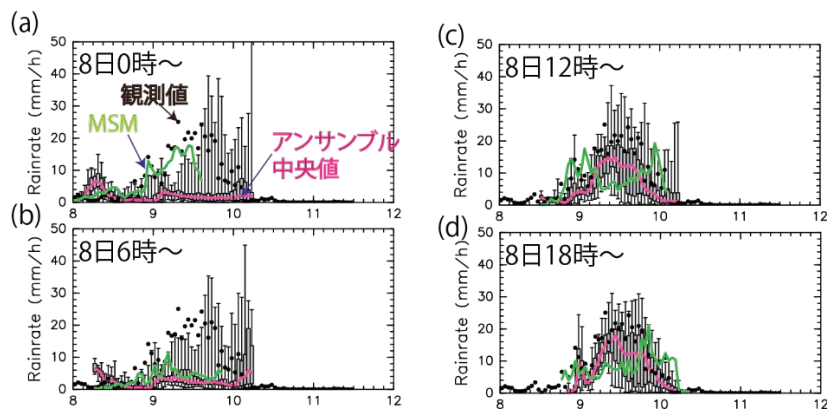


図-4 関東・東北豪雨における鬼怒川流域平均雨量（9月8～12日）の再現計算結果と観測値の比較

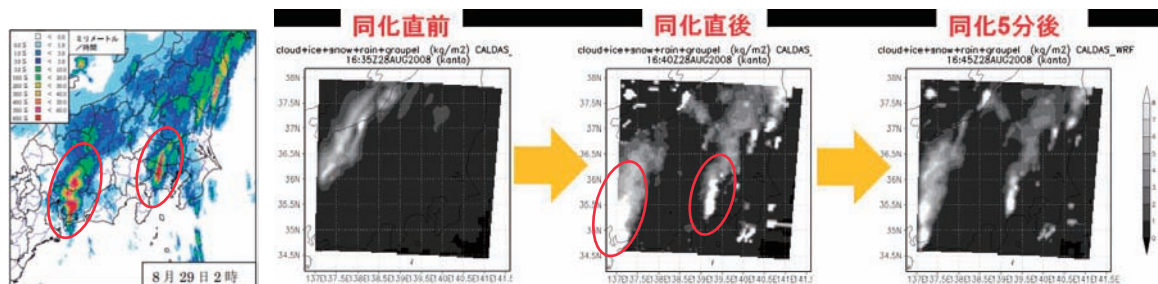


図-5 2008年8月29日2時（日本間）の解析雨量と同化直前・直後・5分後における5種類の雲微物理粒子（水、雨、雪、氷、霰）の鉛直積算値の合計の分布

## 5.2 渇水の監視・予測システム

EcoHydro-SiB と RTM を結合し、衛星で観測されたマイクロ波輝度温度を同化するシステム (CLVDAS) をブラジル北東域のセアラ州に適用し、穀物生育量を推定するシステム構築を行った<sup>15)</sup>。衛星データには AMSR-E と AMSR2 を使用した。CLVDAS では、気象データが EcoHydro-SiB に入力され、計算された陸面の状態量が計算されると、RTM に入力され、マイクロ波輝度温度が計算される。計算されたマイクロ波輝度温度と衛星マイクロ波輝度温度(25km 解像度)との差が最小となるよう同化されることにより、表層土壌水分量・根茎層土壌水分量・蒸発散量・葉面積指数(LAI)が推定される。同化に当たっては、計算時間内の 6.9GHz, 10.7GHz, 18.7GHz の水平・垂直偏波成分の二乗誤差を評価関数としている。また、3ヶ月期季節予測を与えることにより、気象予測に応じた生育状況の予測も可能である。

対象地域で栽培されているフェジヨン豆等の穀物のほとんどは1月～4月に生育し、5月～9月に収穫されるが、実際にデータの利用できる2003年～2017年の4月の平均LAIと収穫量に良好な相関が確認できている。このため、正規化された日単位のLAI(=(LAI- $\mu$ )/ $\sigma$  :  $\mu$ ,  $\sigma$ は上記期間を対象に算定)を指標とし、特に4月期のLAIが収穫量に相当すると見なすことができる。

植生(穀物)の生長量(LAI)と降雨や土壌水分量、水ストレスの変化に関するシミュレーション結果を図-6に示した。作物の生育に重要な根茎層土壌水分量が把握でき、「降水→土壌への浸透→根茎からの吸収→作物の生育」のプロセスが時間遅れとともに再現されている。灌漑が可能なエリアでは、4月期のLAIの最大化を目的に根茎層の土壌水分量を監視・予測しながら、効果的な水供給量やタイミングについて検討することが、また天水エリアでは降雨予測から生育期間における十分な降水が確保できないと予測された場合の「栽培エリアを縮小する」といった意思決定等を支援することが期待される。

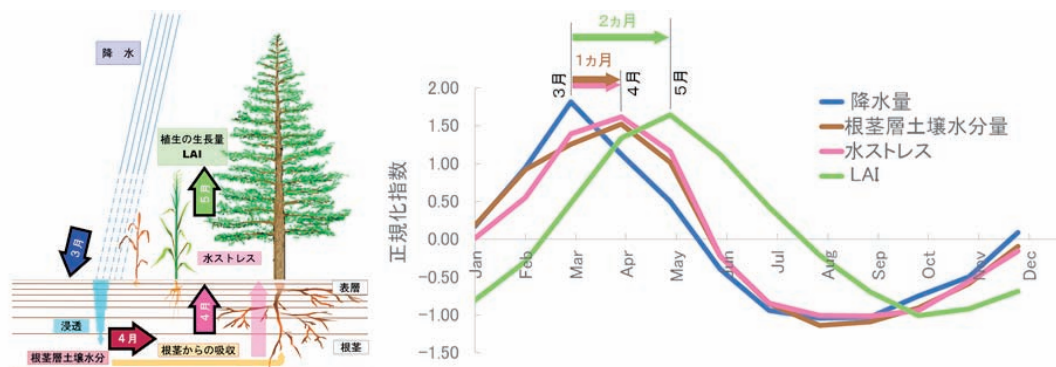


図-6 植生(穀物)の生長量(LAI)と降雨・土壌水分量・水ストレスの正規化指数の季節変化(ブラジル北東域セアラ州の空間平均, 2005-07年の月平均):降水→土壌への浸透→根茎からの吸収→作物の生育のプロセスがピーク時間遅れとともに再現されている。

## 6. おわりに

本講演では、水災害現象を広域かつ多様な視点から観測することが可能な衛星リモートセンシングを取り上げ、気象・水文に関わる数値シミュレーションとの組み合わせることにより、水災害予測の高度化を目的とした研究事例を紹介した。今後さらに、合成開口レーダ(SAR)データによる衛星観測の空間解像度の高度化、シミュレーションの解像度や表現性能の向上等を図り、水災害の予測精度向上に取り組んでいくこととしている。

## 【参考文献】

- 1) JAXA ホームページ: 衛星画像ギャラリー〜グローバルな水循環過程を解明するためにリモートセンシングによる陸域水文量観測 <https://www.eorc.jaxa.jp/imgdata/gallery/eenvironment/sr0109.html>.
- 2) JAXA ホームページ: しずく (GCOM-W) <https://www.satnavi.jaxa.jp/ja/project/gcom-w/index.html>.
- 3) Wang, J. R. and B. J. Choudhury, 1981: Remote sensing of soil moisture content, over bare field at 1.4 GHz frequency, *J. Geography. Res.*, 86, 5277-5282.
- 4) Dobson, M., F. Ulaby, M. Hallikainen, and M. El-Rayes, 1985: Microwave dielectric behavior of wet soil-part II, dielectric mixing models. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, GE-23, 35-46.
- 5) 藤井 秀幸, 2005: 包括的な地上観測に基づく植生域地表面のマイクロ波放射伝達モデルの開発, 東京大学博士号論文.
- 6) Kuria, D. N., Koike, T., Lu, H., Tsutsui, H. and Graf, T.: Field-Supported Verification and Improvement of a Passive Microwave Surface Emission Model for Rough, Bare, and Wet Soil Surfaces by Incorporating Shadowing Effects, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 45(5), pp.1207-1216, 2007.
- 7) 淡路 敏之, 池田 元美, 石川 洋一, 蒲地 政文 (2009): データ同化-観測・実験とモデルを融合するイノベーション-. 京都大学学術出版会, 284pp
- 8) Miyoshi, T. and M. Kunii, 2012: The Local Ensemble Transform Kalman Filter with the Weather Research and Forecasting Model: Experiments with Real Observations. *Pure and Appl. Geophys.*, 169, 321-333.
- 9) Sellers, P. J., S. Los, C. Tucker, C. Justice, D. Dazlich, G. Collatz, D. Randall 1996a: A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMS, part II: the generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data. *J. Climate.*, 9, 706-737.
- 10) Wang, L., Koike, T., Yang, K., Jackson, T. J., Bindlish, R., and Yang, D.: Development of a distributed biosphere hydrological model and its evaluation with the Southern Great Plains Experiments (SGP97 and SGP99), *Journal of Geophysical Research*, Vol. 114, D08107, 2009.
- 11) 澤田洋平・小池俊雄 (2013): 分布型水循環-植生動態結合モデルの開発, *土木学会論文集B1(水工学)*. 69, No. 4, I\_493-I\_498.
- 12) Mohamed Rasmy, Takahiro Sayama, Toshio Koike (2019): Development of water and energy Budget-based Rainfall-Runoff-Inundation model (WEB-RR1) and its verification in the Kalu and Mundeni River Basins, Sri Lanka, *Journal of Hydrology*, Volume 579, December 2019, 124163, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169419308984>.
- 13) 牛山朋来 (2016): WRF-LETKF を用いたアンサンブル洪水予測の開発, 鬼怒川事例への適用, 第9回気象庁数値モデル研究会・第45回メソ気象研究会・第2回観測システム・予測可能性研究連絡会.
- 14) 瀬戸里枝・小池俊雄・Mohamed RASMY (2014): WRF を結合した陸面・雲の衛星データ同化システムの開発と関東域への適用, *土木学会論文集 B1(水工学)* Vol. 70, No. 4, I\_535-I\_540.
- 15) 筒井 浩行・澤田 洋平・小池 俊雄 (2018) ブラジル北東域における 2005 年歴史的渇水の植生動態-陸面結合データ同化によるモニタリング, *土木学会論文集 B1(水工学)* Vol. 74, No. 5, p. I\_1417-I\_1422.

〔 新たな社会ニーズへの取り組み 〕

下水・コンクリート廃材から資源・エネルギーを取り出す

構造物の洪水応答から導き出される  
点検・評価・対策研究の方向

トンネル覆工への新たな技術導入の取り組み



# 下水・コンクリート廃材から資源・エネルギーを取り出す

材料資源研究グループ グループ長 西崎 到

## 1. はじめに

持続可能な社会基盤の形成には、そのために必要な資材・資源の調達から、廃棄物・副産物の活用等、社会基盤形成に係る物質循環を最適なものとする必要がある。必要な資源としてのエネルギーを持続可能なものとする点で、カーボンニュートラルも同様の視点にある。下水道や建設分野は、大量な資材・資源を長期にわたり定期的な要し、多量の廃棄物を発生している（図-1）。このためエネルギーのみならず、排出される廃棄物・副産物を適切に利活用することが必要である。

社会活動から排出される水の循環・再利用は物質循環を考える上で重要である。都市における汚水の排除・処理・再利用は下水処理施設によって行われている。下水処理施設に流入する汚水の処理や処理により発生する残渣（下水汚泥）の処理には相当のエネルギー・費用がかけられているが、資源として利用可能なものがあるだけでなく、そこから再生可能エネルギーを取り出すことも可能である。これらの取り組みは既に多くの地方公共団体で進められているが、エネルギー生産のための技術や、地域の状況に即した的確な利用方法が確立されれば、試算によれば污水处理にかかるエネルギーをゼロにすることさえ可能と考えられている。本講演では、土木研究所で行っている、下水処理施設における下水道資源や地域バイオマスのより効果的な活用方法開発への取り組みを報告する。

また、建設分野で発生する廃棄物の建設分野での再利用（建設リサイクル）については、多くの資材で95%以上が再利用されているなど積極的に進められているが、建設リサイクル推進計画2020（R2.9 国交省）では、さらに質を重視したリサイクルの方針が示されている。建設分野からの排出量の多いものとしては、コンクリート塊、アスファルト・コンクリート塊、建設発生土などがあり（表-1）、土木研究所ではそれぞれの再利用促進に関する研究に取り組んでいる。本講演では、特に近年の良質な骨材資源が枯渇しつつある背景から、コンクリート塊の再利用の促進に関する取り組みについて報告する。

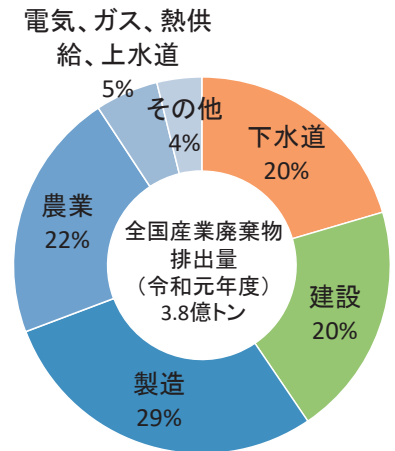


図-1 産業廃棄物の業種別排出内訳

（環境省 産業廃棄物排出・処理状況調査報告書 R1 年度速報値より）

表-1 主な建設発生材と発生量

（H30,建設リサイクル推進計画2020より）

建設発生材	年間発生量
アスコン塊	2,128 万t
コンクリート塊	4,019 万t
建設発生土	29,000 万m <sup>3</sup>
建設混合廃棄物	228 万t
廃プラスチック	60 万t
建設汚泥	623 万t

## 2. 下水道システムから取り出せる資源・エネルギー

### 2.1 下水処理場の概略と消費エネルギー削減の可能性

図-2に下水処理場における下水・汚泥処理の主な工程を示した。家庭污水や工場排水などとして下水処理場に流れ着いた流入下水は、最初沈殿池、エアレーションタンク、最終沈殿池などで下水中の有機物等が処理され、下水処理水として放流される。下水処理の工程で発生する下水汚泥は、濃縮、脱水等の工程を経

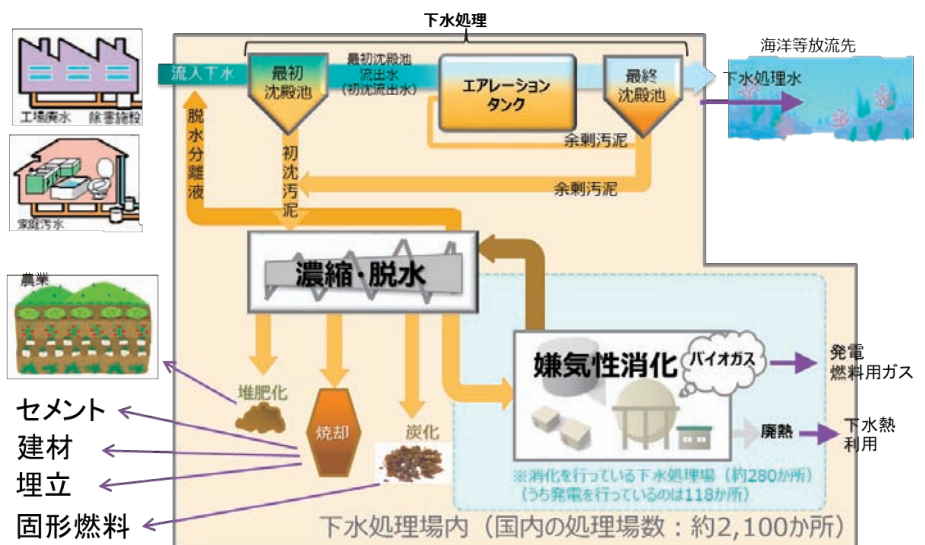


図-2 下水処理場における下水・汚泥処理の主な工程

たのちに半分程度が焼却処理される。これらの工程では多くのエネルギーが費やされているのが現状である。全国の下水処理場での年間電力使用量は64億kWh/年(H27年度)であり、カーボンニュートラルの推進の観点のみならず、

表－2 下水汚泥等のエネルギーポテンシャル (国土交通省ウェブサイトより)

ポテンシャルの区分	賦存量	国内の利用状況
下水汚泥	下水汚泥発生量:約230万トン/年(乾燥ベース) 発電可能量:40億kWh/年 (約110万世帯の年間電力消費量に相当)	エネルギー利用率:約24% バイオガス発電:118か所 (R1年度末)
下水熱	下水処理量:約155億m <sup>3</sup> /年 商業・工業地域での利用により、約90万世帯の 年間冷暖房熱源に相当	下水熱利用:32か所 (R2.8時点)

自治体・住民のコスト負担の点からも、使用エネルギーの削減が求められている。

一方、下水汚泥には大量の有機物が含まれている。これを元に、堆肥化による肥料としての利用や炭化物の燃料としての利用の他、嫌気性消化を行ってカーボンニュートラルのバイオガスを取り出し、発電や加温などのエネルギー源としての利用が進められている。下水処理場では再生可能エネルギーが創出されるが、現時点で嫌気性消化が行われているのは、全国の下水処理場(約2,100か所)のうち約280か所である。得られたバイオガスは、主に燃焼による消化槽の加温や焼却炉等の燃料としての利用と、発電を行う場合があるが、バイオガス発電を備えた下水処理場は118か所と必ずしも多くはない。下水汚泥がエネルギー利用された割合は令和元年度で約24%であり、肥料としての利用率(約10%)を加えても、3分の2がバイオマス資源としては利用されていないのが現状である。

しかし、下水汚泥等のバイオマス資源としてのエネルギーポテンシャルはかなり高いと考えられる(表－2)。全国の処理場から発生する汚泥を用いて発電が行われたと仮定した場合の発電可能量は、40億kWh/年であり、現在の下水処理場における年間電力使用量の3分の2程度に迫っている。下水処理場は地域性が高い施設であり、規模や季節変動による影響は場所によってまちまちであり、実際には全国すべての下水処理場に嫌気性消化やバイオガス発電施設を設置することは現実的ではないかもしれないが、一方で、バイオガス発生量の増加方法や地域発生資源を取込んだ処理プロセスの導入などでは、技術的な改良の余地があると考えている。下水処理場において、生ゴミや刈草等の他のバイオマスを受け入れて、有効利用している取組も一部で見られている。創出するエネルギーの増産手法や地域に即した処理技術を下水処理場に導入することにより、将来は下水処理場に必要なエネルギーのすべてを、下水汚泥等の下水道資源からまかなうことができる可能性も秘めている。

## 2. 2 下水処理場における地域に即した資源活用・エネルギー増産技術の概要

下水処理場におけるエネルギー消費量削減のためには、エネルギーの創出とエネルギー消費量削減の向上の2つのアプローチがある。エネルギー創出技術の中核は、下水汚泥を使用した嫌気性消化によるバイオガスの生産と、これを用いたバイオガス発電である。エネルギー発生量の増産の一手法として土木研究所が取り組んでいるものに、「下水道資源を活用した藻類培養とそのエネルギー化技術」が挙げられる。

もう一つのアプローチである下水処理場でのエネルギー消費量の削減については、特に多くのエネルギーを消費している、エアレーションタンクにおけるばっ気処理と、汚泥焼却工程において、個々での省エネルギー化が重要となる。それぞれで省エネルギーに関する取り組みが進められているが、土木研究所では汚泥焼却の工程への地域発生材活用によるエネルギー消費削減技術に取り組んでいる。

主たる手法としては、河川事業や地域の家庭等から排出される、「草本系バイオマス(刈草や伐木、剪定枝、水草など)を、汚泥焼却時の補助燃料として利用する技術」である。また、同じく草本系バイオマスを、汚泥と混合して脱水を促進させるための「脱水助剤として利用する技術」も進めている。これらは既に、第4期中長期計画で実施設を用いた各種技術の検証実験を進めているところなので、次節以降に紹介する。

## 2. 3 草本系バイオマスの下水汚泥処理への活用による省エネルギー技術

### (1) 下水汚泥焼却の補助燃料としての活用技術

刈草や伐木、剪定枝などは、主要な地域発生バイオマスであり、多くの自治体などの事業者では一般廃棄物としてエネルギーとコストをかけて、主に焼却処分している。一方で下水汚泥も焼却処分を行っている部分があるので、剪定枝等を下水汚泥焼却の補助燃料として活用できれば、エネルギーの面でもコスト面でも削減が期待できるだけでなく、下水処理施設の社会の静脈の一つとしてより有効・機能的



な活用が期待できる。

汚泥焼却時の補助燃料とする際の主要な技術的な課題としては、①システムとしての実現性（エネルギー収支やコストの面で有効であるか）と、②下水処理場の一般的な実施に適用できるか、の2つが挙げられる。①システムとしての実現性については、一般的な規模の汚泥焼却炉を想定して、近隣地域での草木系バイオマスの発生量やエネルギー収支、温室効果ガス排出量削減量、コストなどについての算定を行った。エネルギー収支の結果の例を図-3に示す。エネルギー収支の検討の結果、バイオマスを破砕する工程で電力を必要とするが、通常補助燃料として用いる重油の使用量が削減されるため、草木系バイオマス導入によって消費エネルギーが15%削減されるとの結果となった。

システムとしての実現性が良好な結果であったので、現在は実際の下水処理施設による、草木系バイオマスの搬送試験等を実施しているところであり、閉塞などの重大な支障が生じないことが確認できている。

### (2) 下水汚泥の脱水助剤としての活用技術

刈草や剪定枝、水草などの草木系バイオマスは、汚泥よりも水分が少ない固形物（繊維分）であり、また中空構造を有するものがある。このような草木系バイオマスを下水汚泥と混合すると、汚泥中の水分の通り道（みずみち）として機能することから、下水汚泥の効率的な脱水に効果があると考えられている。土木研究所ではこのようなメカニズムについて確認するとともに、汚泥脱水に効果のある添加率等について実験的検討を行った。効果の期待できる条件を明らかにできたので、結果を元に実際の下水処理施設において、その地域の草木系バイオマス等を用いた検証試験を実施した（図-4）。検証試験では脱水助剤としてのバイオマスの前処理方法、下水汚泥との最適な混合割合や実際の脱水施設での下水汚泥脱水効果などを検討した。実験の結果、刈草を10%程度脱水助剤として混合した場合で、下水汚泥の脱水に用いる凝集剤の消費量を13%程度削減しても、削減しない場合と同等の脱水効果が得られることが検証された（表-3）。

### (3) 今後の展開について

刈草や伐木、剪定枝、水草などの草木系バイオマスは、下水処理施設では本来は取り扱いを想定していなかった資源であるが、焼却補助燃料、汚泥脱水助剤としての利用については、エネルギーやコスト面での効果とともに、脱水については、技術的には大きな懸念事項は見られないことが分かった。今後は焼却工程で発生する灰の成分の変化による影響について、更なる検討を進める予定である。実用化に向けたステップとしては、今後、実際の下水処理施設での本格的な検証を行い、スケールアップや実際の施設の条件で生じうる課題の確認と、その解決に取り組むこととした。また、草木系バイオマスは、処理したい種類や発生量、季節的変動などは地域によってさまざまであり、それによって最適な活用手法は異なる。様々な地域の実状に合わせた検討を行い、草木系バイオマスの最適な活用方法の提案を目指す所存である。

## 2. 4 下水道資源を活用した藻類培養とそのエネルギー化技術

### (1) 技術の概要

下水処理の過程では、沈殿池（特に最終沈殿池）などに自然に藻類が発生することがある。これは下水中の栄養塩によって、外部から侵入したり流入下水に混入していたりした藻類が増殖したと考えられる。下水処理の機能の面では「邪魔なもの」であるが、藻類は温室効果の原因となる二酸化炭素を取込んだ有機資源であるので、むしろこれを積極的に利用しようというのが本技術である。下水中の栄養塩を元に藻類を培養・成長させ、培養した藻類を汚泥とともに嫌気性消化することで、再生可能エネルギー

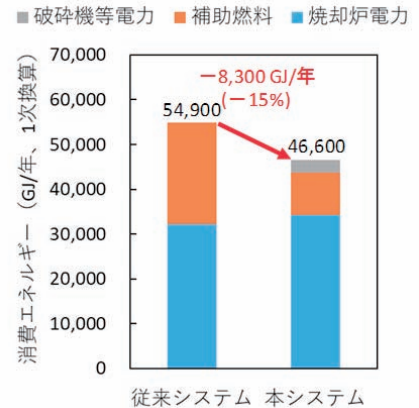


図-3 補助燃料利用によるエネルギー削減効果の試算結果



図-4 脱水助剤（刈草）を混合した脱水ケーキ

表-3 脱水時におけるバイオマス混合の有無と、汚泥ケーキ発生量の比較

凝集剤添加率	バイオマス混合脱水	通常脱水（バイオマス無添加）
1.1%	0.75 t/h	0.85 t/h
0.96%	0.74 t/h	0.85 t/h

一であるバイオガス発生量を増加させることを目指した技術開発（図-5）に取り組んだ。主な技術的な課題・検討項目は、①下水道資源を利用した藻類培養の効率化と培養藻類の回収、濃縮技術、②培養藻類と下水汚泥の混合物の嫌気性消化技術の確立、③本技術の導入によるエネルギーや温室効果ガス排出の削減効果の評価の3点である。

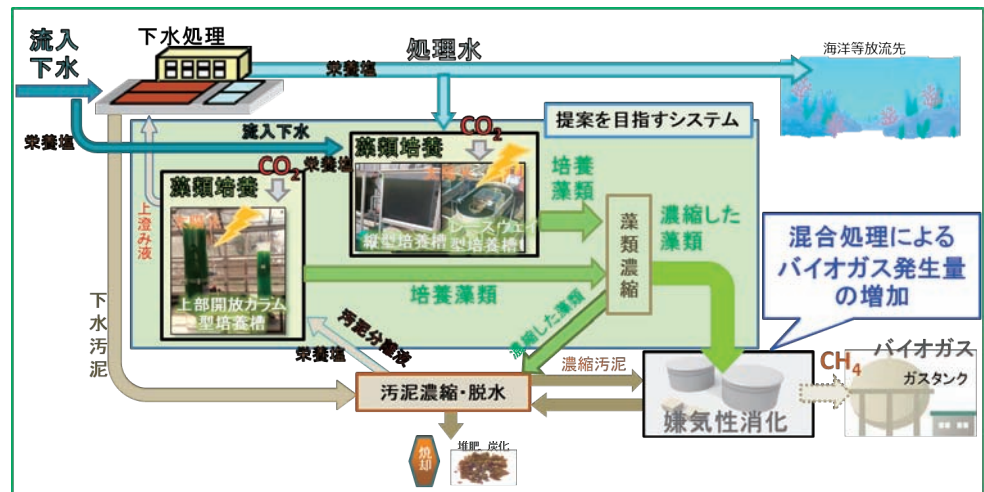


図-5 下水処理場における藻類培養・汚泥との混合物の嫌気性消化によるバイオガス発生量の増加技術のイメージ

### (2) 下水道資源を利用した藻類培養の効率化と培養藻類の回収、濃縮技術

藻類の培養には太陽光が必要である。水質が濁っていると太陽光が水中まで十分に侵入せずに藻類が育たず、また、水質の濁度が低い場合には栄養塩の濃度も十分ではないため、藻類培養が進みにくい。このため、太陽光と栄養塩濃度を最適にする、効率的な藻類培養のための条件の検討を行った。従来の培養は放流直前の透明度の高い下水処理水による培養が中心であったが、土木研究所の研究では、より栄養塩濃度や濁度の高い、流入下水や下水汚泥分離液を混入した液において、攪拌方法や希釈方法の改良により効率的に藻類を培養する技術を開発した。また、培養装置にも様々なものがあるので、それぞれの培養方式の特徴を明らかにし、下水処理場内の各処理段階で得られる水質の特性、藻類培養に利用できるスペースなど、地域の下水処理場の条件に適合した培養方法の提案を目指した研究を行った（図-6）。



図-6 下水処理水による藻類培養実験の例

### (3) 培養藻類と下水汚泥の混合物の嫌気性消化技術

下水汚泥と藻類の混合物の嫌気性消化特性を検討し、藻類培養に流入下水や汚泥分離液を利用した場合には、バイオガス化しやすい脂質や炭水化物が多く含む藻類を培養できることを明らかにした。

### (4) 本技術の導入によるエネルギーや温室効果ガス排出の削減効果の評価

本技術を下水処理場に導入した時のエネルギー削減効果や温室効果ガス排出抑制効果の評価方法について、現在、算出する下水処理場の各種条件に応じた算出手法をするための検討を実施しているところである。下水処理場での藻類培養技術導入によるバイオガス発生量の増加技術は、一定のエネルギー消費量と温室効果ガス排出量削減効果が期待できるものと考えている。

### (5) 今後の展開について

下水処理施設への藻類培養導入によるバイオガス発生量の増加技術の開発段階は、各要素技術についてはほぼ開発が完了したと言える状態である。今後のこの技術の実用化に向けた主な課題としては、具体的な下水処理施設を想定した導入検討による、最適な技術選定手法の確立が挙げられる。本技術の留意点としては、藻類培養に一定程度の面積を必要とする場合があることがあげられる。また、現有の下水処理施設によって、発生する藻類の種類や季節変動がまちまちであるので、その地域特性に合った培養方法を選択する必要がある。技術導入にあたっての、エネルギー削減や二酸化炭素排出量削減効果、さらにはコスト的な評価も、技術導入の前に行う必要があり、計画を進めているところである。これらの検討に、具体的な下水処理施設との連携も見据えて取り組んでいく所存である。

## 3. コンクリート塊の再利用技術

### 3.1 コンクリート塊再利用の必要性

コンクリート塊の再利用率は99.3%（平成30年度）<sup>1)</sup>と、既に高い水準であるが、そのほとんどは再

生クラッシュランとして道路路盤材に利用されている。しかし道路網の整備も成熟してきており、新規の道路建設は今後必ずしも多くは見込めないことから、路盤材以外の用途の開発が重要となっている。一方、コンクリート用骨材の国内の需要量は、年々減少しつつあるが、特に良質な骨材が減少しつつある。また世界的には、コンクリート用の細骨材（砂）の不足が深刻化しつつある。

このような背景から、土木研究所では、コンクリート塊から取り出した再生骨材を、再度コンクリート用骨材として利用する技術について検討している。

### 3. 2 コンクリート用骨材としての再利用に関する研究

表-4に国内で制定されたコンクリート用骨材の規格の変遷を示す。このように再生骨材や様々な分野から排出された副産物骨材の規格については整備されつつあるが、その利用はあまり進んでいないのが現状である。主な要因としては、①再生骨材を用いた場合のコンクリートの耐久性、特にアルカリシリカ反応や乾燥収縮、凍結防止剤散布環境下での凍害などへの影響が明確ではないこと、②細骨材として利用する際には、副産物骨材の種類によっては密度が大きい、粒度が偏っている、コンクリートに用いた際にブリーディングが多くなる等の理由で、混合利用する必要があるが、複数の副産物骨材を混合利用する場合の技術的知見が十分ではないこと、などが挙げられる。しかし、再生骨材等の副産物骨材の利用促進は資源の有効利用・骨材資源枯渇への対応としてだけでなく、二酸化炭素排出量削減などに寄与できる可能性もある。このため、土木研究所では、上記の①再生骨材コンクリートの利用上の制約について、東北地方整備局および宮城大学との共同研究により解決に取り組んだ。その成果は「プレキャストコンクリートへの再生粗骨材 M の有効利用に係るガイドライン（案）」<sup>2)</sup>（以下、本ガイドラインと記す。）として取りまとめた。次節に成果の概略を述べる。なお、副産物骨材の細骨材としての有効利用については、土木研究所では令和4年度から始まる第5期中長期計画において、本格的な検討に着手する計画である。現時点での概略について3.4に示す。

表-4 国内で制定された骨材規格の変遷

1931	土木学会 標準示方書(砂利・砂)
1961	砕石JIS
1977	高炉スラグ粗骨材JIS
1978	JIS A 5308レミコン 附属書1(天然骨材)
1980	砕砂JIS
1981	高炉スラグ細骨材JIS
1992	フェロニッケル細骨材JIS
1997	銅スラグ細骨材JIS
2003	電気炉酸化スラグ粗・細骨材JIS
2006	熔融スラグ粗・細骨材JIS
2005~7	再生粗・細骨材JIS
2020	火山ガラス微粉末JIS

### 3. 3 「プレキャストコンクリートへの再生粗骨材 M の有効利用に係るガイドライン(案)」の概要

普通骨材を使用した場合と同等な品質のプレキャストコンクリート製品ができる条件を検討した。この結果、設計基準強度 30N/mm<sup>2</sup>以下の製品を対象に、粗骨材のみに再生骨材 M（耐凍害品）を使用し、製品寸法は 2m 以下を目安とすればよいとの結果を得た。また、アルカリシリカ反応抑制手法についても選定し、本ガイドラインに反映した。さらに、再生粗骨材を用いたコンクリートの、フレッシュ性状や強度、耐久性について総合的に検討した。例えば中性化抵抗性については、強度が同じ普通コンクリートと同程度であること、塩分環境下での凍結融解抵抗性（スケール劣化抵抗性）については、耐凍害品の再生粗骨材を使用した場合は、普通コンクリートと同程度であることを確認した。

また、積雪寒冷地（凍結防止剤散布地域）に 10 年間暴露されていた製品の調査を実施し（図-7）、再生骨材に起因する劣化が生じないことを確認した。

本ガイドラインは既に、本省技術調査課から各地整等に参考送付されている他、土木研究所のホームページからも入手可能な



国道 46 号（岩手県雫石町）

国道 45 号（青森県八戸市）

国道 13 号（山形県米沢市）

図-7 凍結防止剤散布地域での暴露試験による耐久性評価の例

ので、コンクリート塊の粗骨材の再生利用の促進に貢献できればと考えている。

### 3. 4 コンクリート塊の細骨材としての再利用への取り組み

コンクリート塊の骨材としての再生利用のさらに拡げる策の一つとして、再生細骨材の適用についての検討を今後進める計画である。再生細骨材は再生粗骨材を作る際に発生すること、良質な砂資源の枯渇が進行していることなど、社会的な背景を考慮してもその必要性は高いと考えられる。再生細骨材としての利用を進めるにあたっての主な課題としては、混合利用する場合の技術的知見が十分ではないことが挙げられる。持続的に利用可能な骨材資源として、再生細骨材をはじめとした様々な副産物骨材をうまく利用する手法の確立が必要である。

また混合利用したものが、さらに繰り返し利用される場合に、何ほどの程度混合されているか、製作時の記録がなくても判別できる技術（あるいは判別しなくても材料設計できる技術）も併せて必要となる。

再生細骨材の利用にあたっては、再生粗骨材の様にコンクリートの耐凍害性等への影響が十分に解明されていないのが現状である。複数のコンクリート解体材から製造した再生粗骨材と再生細骨材を使用したコンクリートの凍結融解試験を実施した例を図-8に示す。再生細骨材を使用した場合の耐凍害性への影響は、再生粗骨材の場合よりも小さい可能性が示唆されている。今後、普通骨材との混合使用も含めて検討し、耐久性を十分に確保できる、再生細骨材の有効利用方法の提案を目指して検討を継続し、持続可能な我が国の骨材資源の確保に貢献したいと考えている。

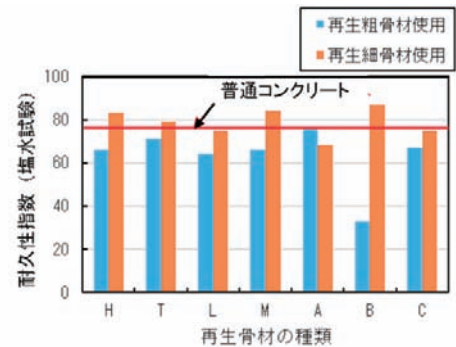


図-8 再生粗骨材と再生細骨材の利用がコンクリートの耐凍害性に与える影響

### 4. おわりに

持続的な社会活動の維持や社会資本の整備には、必要なエネルギーや資源、および排出される廃棄物や二酸化炭素等の環境負荷物質の収支・循環を持続可能なものとする必要がある。本講演では、建設分野から排出される主要な廃棄物・副産物である、下水道資源とコンクリート塊について、使用エネルギーの削減や新たなエネルギーの創出、副産物の有効な再生利用技術に関して、土木研究所が行っている技術的な課題解決の取り組み事例を報告した。国土交通省においてもグリーン社会の実現に向けた「国土交通グリーンチャレンジ」の取り組みなどを進めているところでもあり、この分野へのニーズがさらに高まると考えられることから、今後、研究開発成果の実用化に向け、さらなる研究開発を関係機関との連携を得て進めることで、技術の実装に取り組む所存である。

#### 【参考文献】

- 1) 建設リサイクル推進計画 2020 ～「質」を重視するリサイクルへ～、国土交通省、R2.9
- 2) 凍結防止剤散布地域における再生骨材コンクリートの有効利用技術の開発に関する共同研究報告書～プレキャストコンクリートへの再生粗骨材 M の有効利用に係わるガイドライン (案)～、共同研究報告書第 543 号、(国研) 土木研究所、東北地整東北技術事務所、宮城大学、R3.6

# 構造物の洪水応答から導き出される点検・評価・対策研究の方向

水工研究グループ グループ長 諏訪 義雄

## 1. はじめに

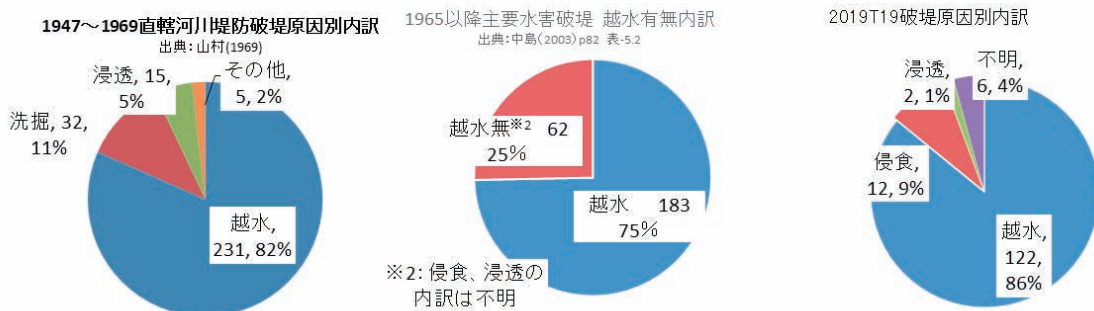
現地の被災実態調査、水理実験等から明らかになった河川構造物の洪水応答<sup>1)</sup>とそこから導き出される河川内構造物の点検・評価・対策研究の今後の方向について述べる。本原稿でいう洪水応答とは、洪水流と構造物、構造物と周辺の地形変化、洪水流と構造物周辺地形変化間の相互作用を言う。2. で構造物の洪水応答例を紹介し、3. で洪水応答の知見を構造物の点検・評価、対策等洪水応答対応に反映する方向性を述べ、4. で総括する。

## 2. 構造物の洪水応答例

### 2. 1 堤防・護岸の洪水応答例

既往研究等の大規模洪水における堤防破堤の要因分析結果を見ると、時代によらず越流破堤が圧倒的に多い<sup>1)</sup>。破堤全体の3/4以上を占める(図1)。次に目立つのは侵食(洗堀)破堤である。1年間の直轄河川の堤防被災実態を調べたところ、侵食(洗堀)被災は主としてセグメント1で起こりやすく、セグメント2-1、2-2となるに従い侵食被災が堤防被災に占める割合が減少する。これは、洪水時の流速が大きく、砂州が発生しやすい河川で侵食が起きやすく侵食量が大きいためである。セグメント2の河川になると、洪水時の低水路流速が高水敷や河岸の耐力と同程度になり、1洪水による侵食量が河岸高の5倍程度に収まる場合が多い。

### 破堤原因内訳(越水とそれ以外)



**破堤原因の3/4以上は越流(設計超過外力による)  
⇒設計超過外力対応も重要**

図-1 既往研究等主要洪水破堤事例の原因内訳

堤防を侵食から守る構造物として、護岸(含根固め工)がある。護岸の被災実態を分析すると、大規模洪水と中小洪水で様相が全く異なる<sup>1)</sup>。セグメント1・河道断面積の急拡大部等流速が大きくなる河川の大規模洪水では、護岸の天端・法肩より高い場所の土羽が侵食される被災が発生する。一方、中小洪水では護岸被災の37%は基礎からの破壊、39%は設置範囲の不足による上下流端からの破壊である。基礎からの破壊のうち約半数の47%が河床低下傾向にある河川である。実物大及び縮小水理実験結果から、護岸基礎底面よりも前面の河床高が低下すると、護岸背面の土砂が吸出されて空洞化する、あるいは護岸が沈下破壊する<sup>1)</sup>。その破壊速度は前面河床高と基礎底面高の差が大きくなるほど速くなる。前面河床高と護岸基礎の差が裏込め砕石の粒径と同程度であっても背面土砂の吸出し・空洞化は起きる。しかも吸出し量が小さいと空洞化したままになり、降雨後に陥没が生じる場合がある。これは治水上問題であるばかりでなく、河川利用者が空洞陥没に巻き込まれる危険を内包している。上下流端からの護岸破壊は、十分な延長範囲に設置されていれば、生じないものであるが、整備途中では設計・計画どおりの延長を確保できずない場合もある。その際には、連節ブロックや蛇籠等によるすりつけ護岸を設置することが有効である。ただし、セグメント1等流速が大きい場所ではすりつけ護岸が流体力によってめく

れ上がる被害が生じる場合がある。

護岸の洗堀対策として根固め工がある。根固め工は前面の洗堀・河床低下が生じると、ブロックが沈下・変形し護岸前面の根固めブロックが変形しないことで護岸基礎の安定を保つ構造物である<sup>1)</sup>。流速によって移動しない重量を有するブロック根固め工であれば、最前面ブロックが河床材料安息角で最大洗堀深まで沈下変形し、流れに対して安定な角度を持つ斜面を形成するように背後のブロックが沈下変形して安定する。洗堀深に対して斜面を安定化させるために必要となる根固めブロックの数（敷設厚×幅）・敷設幅を有していない根固め工は、護岸基礎前面の河床高を維持する機能を果たすことができない。また、根固めブロックが流れに対して十分な重量を有していないと、根固めブロックが最前面や上下流端部から順次流失して、護岸の基礎前面河床高を維持する機能を失う。

## 2. 2 橋梁の洪水応答例

橋梁や堰等の横断構造物は、洪水流下を阻害するため極力少なくする、設ける場合には洪水流下を妨げない諸元・構造とすること（構造令を満足すること）で設置が河川管理者によって許可される。構造令<sup>2)</sup>で規定される諸元の代表的なものは、桁下高（＝桁下面－計画高水位）と径間長である。しかし、構造令は昭和50年10月に施行されたため、それ以前から存在する構造物には適用されていない場合もある（いわゆる既存不適格）。いわゆる既存不適格構造物は、更新や大規模な改造の際に構造令を満足するように改善されることが原則であるものの、更新や大規模改造の実施時期については設置者の財政状況等に左右される社会的制約を受けざるを得ない。整備途上の河川においては、洪水流下を阻害する度合いが大きい構造物ほど一般被害発生の原因となりやすい。整備水準を上回る超過洪水時には、設計の前提条件が満足されなくなるので被災や不具合が発生しやすい。被災を受けた後に被災原因や復旧方法を検討するが、その際に構造令を超えて、整備水準超過洪水時に不具合を生じにくい・被災を小さくすることに貢献するような工夫を講じることが望ましい。

橋梁の洪水応答も、堤防・護岸と同様、大洪水と中小洪水で異なる。大洪水時に典型的に見られる洪水応答の1つは流木閉塞である。水理実験結果<sup>3)</sup>によれば、流木長/径間長 $>1$ で急激に閉塞しやすくなる・流木長/径間長 $>0.5$ で閉塞が始まる。桁下余裕高については、0で閉塞しやすい（集積率＝（集積した+集積しかけた）本数/橋脚に接触した本数が約30～67%）のは当然として、桁下余裕高1mでも集積率19～31%の閉塞リスクが、桁下余裕高3mでも3.5～12%の閉塞のリスクがある。

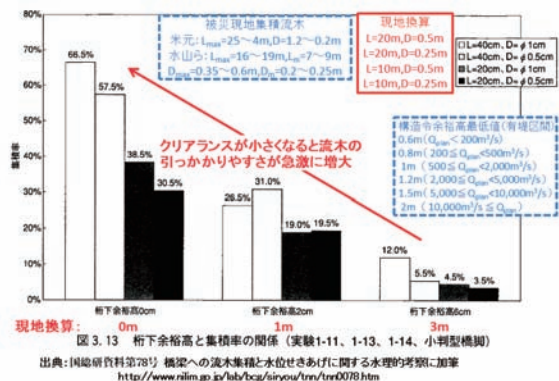
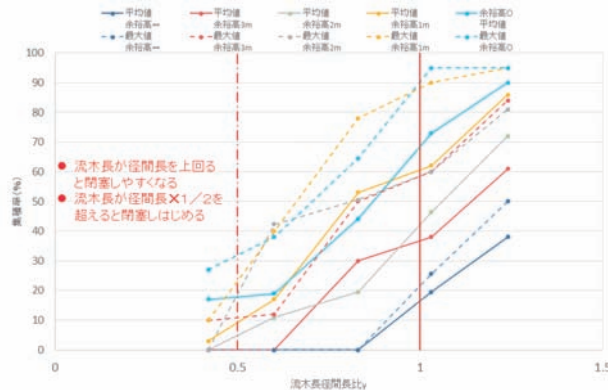


図-2 左：流木長・径間長比 $\gamma$ と流木集積率(%) 右：桁下余裕高と流木集積率(%)<sup>3)</sup>

構造令<sup>2)</sup>では第63条において径間長最小値を $L=20+0.005Q$  (m)としている。この式の20mとはS32諫早水害とS33狩野川台風における閉塞事例調査から見出された最小スパンであるが、現地の流木長平均値 $7\sim 9m$ <sup>4)</sup>を念頭に置いてみると水理実験結果とも整合していることがわかる。桁下余裕高の最小値は構造令では堤防の余裕高として、例えば $500\sim 2,000m^3/s$ で1m以上、 $5,000\sim 10,000m^3/s$ で1.5m以上等と計画流量規模別に定められている。水理実験結果を見ると、構造令の最小桁下余裕高が概ね妥当なものであることが理解できる。

構造令<sup>2)</sup>を満足していれば計画高水位以下の洪水で橋桁が冠水することはない。しかし、構造令の施行前から存在している橋梁の中には桁下高が計画高水位以下の橋、桁下高が余裕高を満足しない橋もあり、鉄橋では財政的制約・縦断勾配制約等から架け替えが行われる機会が少ないためローカル線になる

ほど目につく。典型的な大洪水に対する橋の洪水応答は、倒壊流失（図-3）<sup>1)</sup>、袖部溢水→新流路形成<sup>5)</sup>、侵食→橋台・桁沈下<sup>6)</sup>であり、堀込河道では溢水→橋台背後の洗堀・侵食が起こる場合もある<sup>2)</sup>。構造ではなく、通行機能確保面のレジリエンシーという観点からは、倒壊流失や橋台・桁沈下した場合は新たな橋梁を架ける必要があり長期間を要するのが一般的である一方、新流路形成や橋台背後侵食だけで収まった場合には橋梁へのアプローチ・取り付け部を復旧すればよいので新橋梁架橋に比較して迅速である。河川管理の視点からは新流路形成は防止すべき事態と考えるので、復旧・復興まで含めたときには応答結果の評価は1つに収束するとは限らない。なお、図-3の橋脚・桁倒壊は無筋コンクリート橋脚で曲げ引張り応力度に対する耐力が小さいため生じるので、鉄筋コンクリートで作られていることが一般的な道路橋にはあてはまらない。

冒頭述べたように橋梁は洪水流下を阻害する。この阻害を水理的には堰上げとして評価し、構造令では計画洪水の流下時の前後を含む橋梁区間の阻害（堰上げ）を含めた水位が計画高水位以下にすることを求める。また、洪水流下に伴う侵食・洗堀等諸現象に対して護岸で保護する、根入れを確保する等安全な構造とするよう求める。従って構造令を満足していれば、計画以下の洪水による障害は理論的には生じない。気候変動により雨量や洪水流量の増大が懸念される中では、設計・計画を上回る「超過洪水」の発生頻度が増すと考えられる。計画・橋梁設計の前提となっている流量を上回る「設計超過洪水」が流下すると、桁の冠水によるオリフィス流れへの変化、桁下高の減少により流木閉塞しやすくなるため、洪水の流下阻害を助長する要因が急激に増える。また山間地や谷底平野の橋梁部で低地が狭まる地形になっていると氾濫を伴う大洪水時には流路幅の急縮によっても橋梁上流側の堰上げが助長される。このような流路の急縮部では掃流力の縦断的な急増による橋梁架橋部での河床低下が起こりやすい。河床低下が起こると橋脚のフーチングが露出しやすくなる。フーチングの流下方向幅が橋脚よりも大きい場合には流れ・流砂との相互作用が急変し、フーチング周辺の洗堀が大きくなる可能性がある。河床低下と局所洗堀増大が重なることで橋脚と桁の沈下被災が起こりやすくなる。経年的な河床低下が生じている河川で橋脚フーチング基礎が露出した場合には、中小洪水時に同様にフーチング周辺の局所洗堀が増大して橋脚・桁の沈下被災が起こる場合がある。



図-3 鉄橋倒壊事例<sup>1)</sup>

### 3. 洪水応答を踏まえた点検・評価・対策研究の方向

#### 3.1 洪水応答対応の概要

本原稿では、洪水応答への対応を、点検・評価、維持修繕・強化、更新、立入制限・通行止め・避難支援、改修計画変更、減災対策・超過洪水対策に分けて考える。各対応は完全に相互独立するものではなく、重複・相互に影響しあうものも多い。このうち、点検・評価と維持修繕が予防保全に相当すると考えがちであるが、洪水応答への対応に関しては一般的な老朽化対策（材料経年劣化による耐力低下を事前に把握して耐力低下速度を低減する対策を予防保全として実施することが長寿命化になる）と同じに扱うことができないケースが多い。

2.洪水応答事例で示したとおり、洪水応答特に構造物の破壊が材料経年劣化ではなく設計超過外力の作用、自然公物である河道が設計で想定していない状態に変化すること、設計時にわかっていない応答により破壊することが支配的なためである。一般被害への拡大が問題となる洪水応答では、これら要因が支配的であることがより明瞭となる。

これは、「狭義の予防保全」（＝（例えば塗装等の）修繕行為を適切なタイミングで行うことで長寿命

化する)で対応できる局面は限定的で、維持行為では捻出が難しいまとまった費用が必要な強化や河道の修正等「広義の予防保全」、更新・改築等の「事後保全」が主体かつ重要な役割を果たすことを示す。また、「狭義の予防保全」・「広義の予防保全」いずれにおいても、機能喪失をもたらす要因は一般的にイメージされる材料劣化ではなく、自然公物である河川の状態変化である。構造物の破壊や機能劣化をもたらすメカニズムも含む“構造物の洪水応答”を本質的に理解することが点検・評価や対策の内容を充実させる。

さらに、破堤による外水氾濫等一般被害をもたらす洪水応答は、施設的设计超過状態で生じることが多く、施設设计外力内の機能確保対策に注力する対応だけでは、设计超過状態の洪水応答の結果である一般被害の拡大軽減(減災)への寄与が限定的なものにとどまる。一般被害の拡大抑止まで洪水応答の知見反映を波及させるためには、既存の設計に囚われず、设计超過外力まで広げて洪水応答を力学的に理解し、対応を検討する視野を持つことが重要である。

洪水応答の力学的理解のためには、水理学・河川工学の既往知見、水理実験や数値計算が重要な役割を果たす。このうち、水理実験や数値計算は、支配的と考えられる要因をモデル化して外力や境界条件を入力・設定して基本的な応答を見る手段である。応答に影響を及ぼす要因を抽出し損ねて計算や実験をすれば、見落とす応答が出てくる。また、実験施設や計算機、現地データ等の制約から外力や境界条件の入力を単純化せざるを得ない場合もある。

水理実験や数値計算等応答検討手段の進歩のためには、またある河川で起こった被災の教訓を他の河川に反映するためには、現実に河道で起こる洪水応答を考察することが重要である。この応答考察は、医療における臨床に喩えることができる。人材不足が叫ばれている中、河道や河川構造物の洪水応答の考察においても人材不足問題がある。

河川技術は経験工学に基づき現場が支えられ、技術発展してきた。現在は、そこに学術的知見による経験工学の裏付けや高度化する段階になっている。現地河川の構造物や河道で起きる洪水応答の知見蓄積は新技術開発、点検・評価、対策等洪水応答対応を整理する上で基盤になるとともに要となるものである。洪水応答に関する知見の積み上げ・整理は、単純なデータベース整備ではない。また、応答の考察は、マニュアルに基づいて行う・資格保持者や特定の部署が独占的に行うべきではなく、現場技術者、コンサルタント等技術者、現場支援を担うつくばの技術者、学の研究者各々が実施することで応答知見が多角的になり深まると同時に、研究や技術開発の方向・結果が社会実装されやすくなる。

以下、洪水応答の知見反映の方向について、設計外力以下と設計超過外力に分けて述べる。

### 3. 2 設計外力以下の洪水応答対応

自然公物である河川の状態変化把握が施設機能の延命上有用な洪水応答の代表例は、橋脚・桁の沈下である。この沈下をもたらす要因はボクシングに喩えるとジャブ・ボディブローにあたる中小洪水で生じる平均河床高や最深河床高の経年的な低下・河床縦断形の変化と、ストレート・アッパー・フック等KOパンチにあたる規模の大きな洪水中に生じる局所洗堀に分けることができる。KOパンチにあたる洪水中局所洗堀は、橋脚等構造物周りの流れ・流砂と河床変動の相互作用によって生じることから、例えば橋脚の基礎フーチングが露出すると流れに対する構造物形状が拡大することによって応答モードが急変(洗堀が急速に進行)する可能性がある。応答モードの急変は、この他に、洗堀進行により土層が礫から砂に細粒化する、橋脚基礎周りを保護する護床工の流失、橋脚基礎が砂礫ではなく土丹等軟岩層である場合に洗堀・侵食の進行に伴い軟岩強度が急変する場合、洪水規模が変化して橋梁架橋区間で流れ急縮が生じる場合にも起こりうる。ここに例示したもの以外にもあるかもしれない。これらモードの急変をもたらす要因を「洪水応答」という観点で把握・理解すれば、橋脚・桁の沈下の予兆現象を抽出し、それらを発見するための点検方法を整理あるいは必要に応じて技術開発することが充実する。また、予防的な強化を施すタイミングを的確に判断できる点検結果評価法を整理するとともに、強化工法の整理や更新と強化の使い分け方法、対応が間に合わない場合の一般被害回避方法(通行止め基準・目安の設定、センサー連動通行止め装置の開発等)整備を充実できると考えられる。

河道地形の把握は、定期縦横断測量から縦断図・断面図を起こして、測量断面間は空中写真を見ながら内挿近似して把握していた。近年は、LP(地上)、グリーンレーザー(浅い水中・地上)、ナローマルチビーム(水中)、サイドスキャンソナー(水中)等3次元地形データの取得技術が進歩している。

河川工学の既往知見として、KOパンチにあたる河床洗堀の代表的な要因には、湾曲部の2次流による外岸洗堀、砂州水衝部における流水集中による局所洗堀、流路幅急縮による縦断的河床低下による洗



堀、橋脚等構造物まわりの洗堀がある。また、洪水時に流砂が流れる際には水理条件によって河床波と呼ばれる凹凸地形が移動することで河床高が変化する。これらによる洗堀量・河床変動量は、土砂水理学の解析に基づく数式、水理実験や現地データから無次元量で整理した図から評価できる。また大きな河道改修を行う場合には移動床水理実験を行い洗堀の影響を推定する。私の経験上、湾曲による洗堀や砂州形成による洗堀は、移動床水理実験結果を見ることで視覚的に直感的な理解が深まる。河道内で取得された3次元データを上手に可視化した図は、移動床水理実験結果のような典型的な洗堀を視覚的に把握できる。今後は、洗堀の把握に関しては3次元地形データを活用していく時代になるだろう。



図-4 橋脚・桁の沈下事例 6)

一方、ジャブ・ボディブローにあたる河床縦断形の変化や平均河床高の経年的な低下は、1時点の河道3次元データを見ても把握することは困難である。平均河床高・最新河床高縦断形の経年変化図を作成することで把握と要因推定が容易になる。

構造物は固定して設置されるので、河床低下や洗堀が生じると構造物と河床の相対的な形が変化する応答として現れる。構造物と河床の相対的關係の変化（応答の結果）を洪水流・流砂に対する河床・河道・構造物の応答知識と突き合わせることで、そこで起きつつある河道変化を類推できる場合もある。言い換えれば、構造物や河道・河床の洪水応答知見が、取得した3次元データから読み取る構造物リスクの予兆、洪水リスク増加の予兆発見を早めることができる可能性がある。

水工研究グループが進めてきた・進めているダム洪水放流設備増強技術やダム下流への土砂還元技術の開発、洪水時流量観測の無人化・リアルタイム化、流域・河道特性を考慮した土砂移動の監視・推定技術の開発は、土砂供給の制御を通じた河道応答への働きかけ、ジャブ・ボディブロー（経年的な平均河床高・最新河床高の低下、河床縦断形の変化）の影響を緩和して施設の長寿命化への寄与につなげることができるだろう。モニタリング技術の高度化は構造物機能喪失につながる予兆の発見・監視、通行止め等と連動するリアルタイムの危機管理システムへの応用につながる可能性がある。

### 3. 3 設計超過外力の洪水応答対応

更新・改築は「事後保全」、強化や河道設計変更は「狭義の予防保全」（小さな費用の維持行為を行うことで施設を延命）から外れる「広義の予防保全」である。立入制限・通行止め・避難支援は施設が機

能を失った場合・その可能性が高まった場合に応急的に実施する一般被害予防措置であり、「減災対策」でもあるし「広義の予防保全」に分類することも可能である。減災対策・超過洪水対策は、文字通り「減災対策」である。

既存不適格構造物については、治水上・河川管理上問題がある場合が一般的であり、設計超過外力に遭遇する頻度が高い。河川管理上の問題が看過できない構造物については、改築して問題を解消する改築事業制度があるが、全ての既存不適格構造物をカバーできるわけではない。整備途上にある河川では河川整備計画に定められた順序で整備が行われていくが、その途中で大洪水が発生すると、既存不適格構造物で、設計で考慮しない洪水応答が表れやすい。構造物は長持ちすることがよいと考えがちだが、更新できる機会に構造令を満足する橋梁に架け替える、事前に構造令を満足する改築設計を準備しておき、洪水で被災した際に災害復旧として速やかに架け替えてしまう、つまり賢く事後保全につなげることが、地域・河川管理者双方にとってよくなる。既存不適格構造物が整備水準超過洪水時に一般被害を拡大する可能性が高い場合には、事前の危機管理対策として、設計超過状態で流失するように弱めることも対応となりうる。減災対応は、対策方向の視野を広げることも重要である。

設計超過状態における構造物の洪水応答及び波及して起きる可能性がある一般被害発生への応答を想定・理解し、一般被害の拡大を抑制するように構造物及び河道等周辺地形の洪水応答を誘導する工夫ができれば、さらによい。耐震設計が先進的であるが、性能設計的な考え方で「設計」の中に超過外力作用時の応答制御を組み込むことで構造物の破壊や変形の制御を目指す設計研究の方向がある。施設能力超過洪水に対して、治水施設の設計外力を大きくしてシームレスに考え、耐震設計と同様に性能設計的に洪水応答を制御すればよいのではないかと考えがちだが、洪水応答に対して「設計」として組み込むことは難しい。

我が国の法制度では国家賠償法において河川も公の営造物とされており、河川管理者に瑕疵があった場合には水害一般被害に対する損害賠償責任が発生する。治水事業の受益地域に資産が集中する河川ほど洪水被害は大きく、瑕疵があった場合の損害賠償額が大きくなる。注目を集める設計超過洪水被害に比べて少ないとはいえ、設計外力内の洪水応答に伴う一般被害発生は河川管理者にとっては重大な問題である。現行の設計外力内が河川管理者の責任が負える範囲なのであり、河川管理者は設計外力内の治水施設能力の信頼性向上に注力することを最優先せざるを得ない。

#### 4. おわりに

施設や河道の洪水応答を理解することは、施設の洪水に対する予防保全を図る上で必要な点検・評価、対策検討に役立てることができる。さらに、事後保全（強化、更新、改修計画変更）を賢く行うための検討、減災・設計超過洪水対策（立入制限・通行止め・避難支援）検討に役立てることができる可能性を秘めている。

洪水応答理解（臨床行為）において、3次元データの取得・活用、VR、シミュレーション結果の直感的理解を促進するプレゼンテーションツール等が触媒の役割を果たす可能性がある。DXは手段の導入にとどまるのではなくX（トランスフォーメーション）が重要だと聞く。河川と構造物の洪水応答分野のトランスフォーメーションとは、素人でも機械的に判断できるしくみを整備することではなく、自分の頭で洪水応答を理解・考察できる技術者を、つくばだけでなく現場・コンサル・学・地域にも増やし、立場・分野を超えて地域を改善するための洪水応答対応の提案が活発になされる状態をつくることではないかと考えている。

#### 【参考文献】

- 1) 諏訪義雄：河川構造物と堤内地の洪水応答特性と減災への反映，中央大学博士論文，2021.3
- 2) 財団法人国土技術研究センター編：改訂 解説・河川管理施設等構造令，社団法人日本河川協会・技法堂出版，平成12年
- 3) 坂野章：橋梁への流木集積と水位せきあげに関する水理的考察，国総研資料第78号，2003.3
- 4) 水山他：流木の運動・堆積機構と対策工に関する研究，土木研究所報告第183号，p.71-p.156，1991.3
- 5) 国総研・土研・建研：令和元年（2019年）房総半島台風および東日本台風による土木施設・建築物等災害調査報告，国総研資料第1111号，土木研究所資料第4400号，建築研究所資料第199号，2020.5
- 6) 国総研・土研：平成28年（2016年）台風10号等に伴う豪雨による北海道地方被災橋梁等調査報告，国総研資料第1069号，土木研究所資料第4384号，2019.3

# トンネル覆工への新たな技術導入の取り組み

道路技術研究グループ グループ長 久保 和幸

## 1. はじめに

昭和の終わりごろから主流となった NATM において、山岳トンネルの安定性は主として地山と支保工により担保されるという設計思想となっている。このため、地山を正確に評価する必要があるが、従来は経験や実績に依ることがほとんどで、新たな技術の導入が困難であった。

近年、社会インフラの老朽化が課題として顕在化しており、既設トンネルについても覆工の更新など大規模な修繕が必要となってきている。一方で、こうしたトンネルの大規模修繕には相当の時間を要し、既設トンネルの更新のために幹線道路を長期間通行止めとすることは現実的ではない。そこで、活線、すなわち交通は通しながら既設トンネルの覆工を更新する技術が開発されてきているが、前述のとおり過去の経験や実績が存在しない新技術については、その採用もなかなか進んでおらず、そのことが民間企業における技術開発意欲を低下させるという悪循環に陥りつつある。

本発表では、これまでのトンネル技術の変遷を振り返ることで、そもそもトンネルに求められる性能とは何かを整理し、トンネル覆工について新たな技術を導入するための環境整備などの取り組みについて報告するものである。

## 2. トンネル設計の基本的な考え方

### 2.1 トンネルとは

世界最古のトンネルは B.C. 2170 年に築造されたユーフラテス河底トンネルである、というのが定説である<sup>1)</sup>。以降、道路や鉄道を迂回させることなく安全で最短距離で移動するためにトンネル技術は主に施工時の安全性の向上と長大化を目的に発展してきた。

トンネルは橋梁や舗装のように車両等による繰返し荷重を受けるわけではなく、その設計思想上、経年的に劣化していくことは加味されていない。したがって、トンネルの構造設計において「設計期間」は存在しない。図-1 に概念図を示すが、トンネルの設計において考慮すべき項目として地山の安定性があり、これは施工時に地山の応力が解放されることで最も不安定になる。したがって施工時に十分な安定性が確認できれば、すなわち施工さえ安定的にできれば、その後の長期供用性もある程度担保されていると考えられる。「掘ればいい」となれば究極の性能規定となるが、トンネル事業がグローバル化するにつれ、各国ごとにトンネル技術がばらつくことに歯止めをかける目的もあったと推察されるが、国際的なトンネルの定義は、経済開発協力機構 (OECD) が 1970 年に開催したトンネル会議において「計画された位置に所定の断面寸法をもって設けられた地下の構造物で、施工法は問わないが、仕上り断面積は  $2\text{ m}^2$  以上のもの」とされた。

トンネルの概念図を図-2 に示す。現在主流となっている NATM においては、地山が保有する支持力を活用するとされており、ロックボルトや吹付けコンクリート、鋼アーチ支保工により掘削時における地山の応力開放で発生する荷重に対抗するとともに、地山の自立を補助するという考え方が取られている。

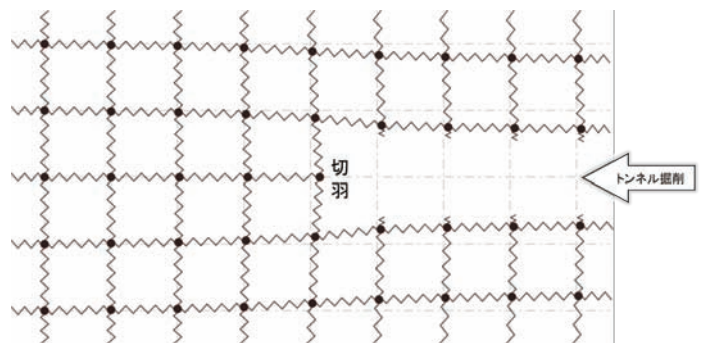


図-1 トンネル掘削時の地山の挙動イメージ

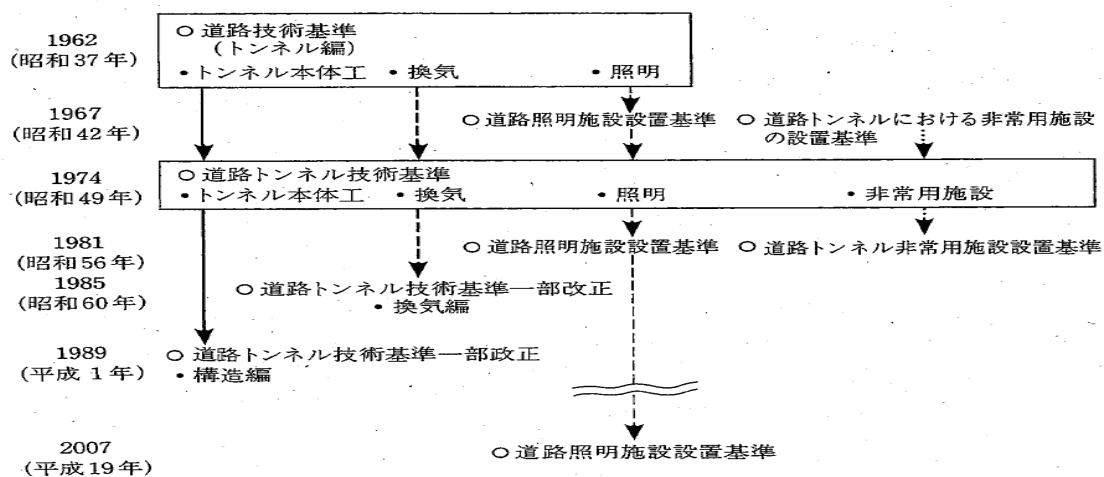


図-2 トンネルの構造の例

覆工はトンネルの最終的な安定性を確保するために構築されるが、NATMにおいては地山からの荷重は原則として分担しないこととなっている。地山が悪い場合はインバートも覆工の一部として構築され、トンネル断面全周をコンクリートで覆うことによりトンネルの安定性を確保している。

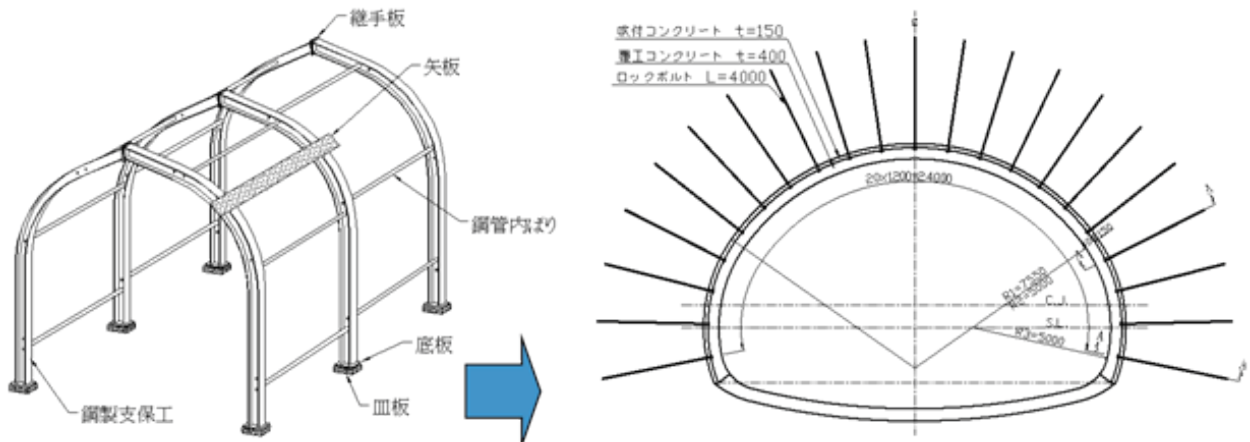
## 2. 2 道路トンネルに関する技術図書の変遷

我が国において換気照明等の各種設備を備えた本格的な道路トンネルが完成したのは昭和 30 年代からであり、その歴史は意外と新しい。明治以降のわが国のトンネル技術の進歩は主に鉄道分野から始まり、明治 13~17 年に我が国で初めてダイナマイトや削岩機、圧縮空気を使用して頂設坑道式で掘削された柳ヶ瀬トンネルは鉄道トンネルであり、その後、世界的難工事として有名な延長 8km 弱の丹那トンネルが大正から昭和に掛けて施工されている。図一3 に道路トンネル技術基準の変遷を示す<sup>2)</sup>。我が国における最初の道路トンネルに関する技術基準は昭和 37 年 3 月に通達された「道路技術基準（トンネル編）」であり、道路トンネルの調査、設計、施工、換気、照明について一般的な標準を示したものである。図一3 を見てわかるとおり、トンネル技術はトンネル本体のほか、換気施設、照明施設及び非常用施設を対象としており、非常に広範な技術力が必要となる。



図一3 道路トンネル技術基準の変遷<sup>2)</sup>

図一3 の技術基準の変遷の中での大きな変化点として平成元年 5 月に建設省都市局長・道路局長より通達された「道路トンネル技術基準」ならびにその解説書として(社)日本道路協会から発刊された「道路トンネル技術基準（構造編）・同解説」が挙げられる。この技術基準は昭和 50 年頃から我が国で採用され始めた NATM を標準工法として位置付け、その後のトンネル施工効率や安全性の飛躍的な向上、長大トンネルの実現に大きく貢献した。図一4 に従来主流であった矢板工法と平成元年の技術基準以降標準工法となった NATM の概念図を示す。矢板工法においてはトンネルの掘削後、地山からの応力を



図一4 矢板工法 (左)<sup>3)</sup>と NATM (右) の概念図

鋼製支保工と矢板で支持した後、覆工により最終的に必要となる支持力を発揮できるように設計されている。このように矢板工法では覆工は地山の荷重を支える重要な構造物として位置付けられており、支保工は掘削してから覆工するまでの土圧を支持するための仮構造物という位置付けであった。一方、NATMにおいては支保工である吹付けコンクリートとロックボルト、鋼アーチ支保工により地山が保有する支持力を活用し地山と一体となって支持することを設計の基本としており、特殊な場合を除いて覆工には外力が作用しないことを想定している。表一1 に矢板工法と NATM の比較を示す。この表を見ても分かるとおり、

覆工の果たすべき役割は施工方法により異なる。矢板工法の場合は、覆工に地山の支持を期待しているため、かつての技術基準

表一1 矢板工法と NATM

矢板工法	NATM
1980年代までの標準的な山岳トンネル工法 鋼アーチ支保工等と矢板により地山を支持 地山からの荷重に対して支保工で対抗 覆工には外力が作用する	1980年代以降の標準的な山岳工法 吹付けとロックボルト等により地山を支持 地山が保有している支持力を活用 原則として覆工には外力が作用しない

においては地山の良し悪しに応じて覆工の設計方法が示されていた。一方、NATMの場合は、外力が作用しないという前提のため、地山の状態に応じた覆工の設計法が存在せず、これまでの経験に基づき定められた設計巻厚 30cm の無筋コンクリートが採用されることが多い。覆工に求められる機能はさまざまであり、例えば土木学会トンネル工学委員会での議論では、道路トンネルが果たしうる役割・機能として以下を挙げている。

- ・内空断面の保持機能：必要な内空断面を確保
- ・防水機能：高い防水性を確保し、つらら、結氷、路面凍結の防止など
- ・耐火機能：火災中の高温による地山や支保の著しい損傷の防止
- ・保守管理機能：覆工表面を目視観察しやすくすることで変状の兆候を早期に発見
- ・内装機能：側壁の輝度を高く保つことでトンネル内の視認性向上など
- ・トンネル内設備の保持機能：照明設備などの取り付け性を確保

これら多様な要求機能に対して 30cm の無筋コンクリートで構築された覆工は良好な性能を示してきたが、それぞれの機能に対する具体的な設計法が存在しないため、30cm の無筋コンクリート以外の覆工の採用を妨げてきた。それでもトンネルの新設時には大きな問題とはならなかったが、地山荷重によるトンネル本体の変形やトンネル本体等の部材の劣化によりトンネルの内空断面が変形すると覆工などを修繕しなければならない。その際、地山の影響でトンネルの内空断面に不具合が生じていた場合、標準となる 30cm の無筋コンクリートに置き換えても設計時の内空断面が実現できない。そこで、鉄筋入りにすることでコンクリートの厚さを薄くしようと技術開発が行われるが、そもそも根拠となる定量的なしきい値が無い場合、どの程度の補強をしたらどの程度薄くできるかの判断ができないのが現状である。

そこで土木研究所トンネルチームでは、外力に対する覆工構造全体の耐荷力の評価手法の確立を目指して調査研究を進めてきている。次節では、こうしたトンネルチームでの研究成果について紹介する。

### 3. 新たなトンネル覆工技術の開発・普及に向けて

#### 3.1 研究の概要

写真一1 に土木研究所で保有する覆工載荷実験装置を示す。本施設は合理的で耐久性の高い、かつ経済的に優れたトンネル構造、維持管理手法の研究を行うため、実物大によるトンネル支保工・覆工・変状対策工の力学的特性の把握を行うことを目的に整備され、半径約 10m、高さ約 1m の半円形の覆工供試体に対して外周 17 箇所から油圧ジャッキを用いて 1 ジャッキ当たり 2,000kN の載荷が可能である。

この実験施設を用いて、実大のトンネル覆工



写真一1 覆工載荷実験装置

に荷重を行い、計測されるひずみ等が理論的に構築された数値解析モデルにより算出されたひずみ等との程度一致するかを確認し、提案する数値解析モデルの妥当性を検証する<sup>3)</sup>。

今回検討に用いたのは17か所の荷重位置に合わせて覆工を17個のファイバー要素として再現したモデルである。ファイバー要素とは、材料非線形性を考慮した梁要素であり、平面保持、要素半区間の曲率を一定と仮定している。また、断面をセルに分割し、各セルに応力-ひずみ関係を定義し、要素の伸縮量と材端のたわみ角からセルごとに軸方向ひずみを算出し、対応した応力および断面力を算出するモデルであり、軸力と曲げの連成を考慮することができる。図-5に解析モデルの概要を示す。

#### 4. 2 検討結果

図-6に、今回の検討で用いた荷重形式を示す。荷重形式Aは、曲げモーメントと軸圧縮力が発生し、天端および両肩部付近で曲げ圧縮破壊が生じるパターンを再現している。荷重形式Bは、曲げモーメントが卓越し天端から肩部付近で曲げ引張破壊が生じるパターンを再現している。荷重形式Cは、軸圧縮力が卓越し、全断面圧縮破壊が生じるパターンを再現している。



図-5 解析モデルの概念図

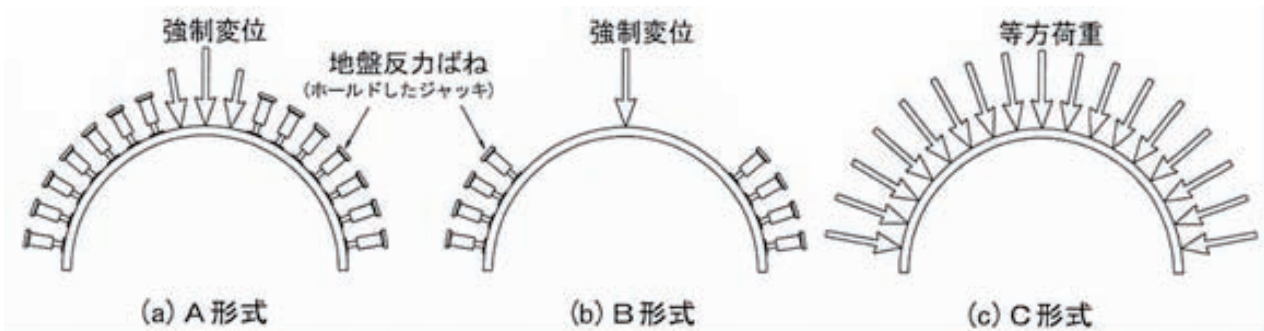


図-6 実験・解析に用いた荷重形式

図-7に荷重形式Aのケースで得られた、実大荷重試験により計測された実測ひずみとモデル解析より算出されたひずみの比較結果を示す。実大実験では天端内空側、肩部地山側の順に引張ひび割れが発生し、その後、天端地山側、肩部内空側の順に圧縮破壊が確認されている。図-7のひずみを見ると、数値解析モデルは実大試験で計測されたひずみをよく再現しており、圧縮破壊の発生位置も特定できていることが分かる。また、肩部内空側に圧縮破壊が生じた時点でジャッキ部で計測されている総圧縮荷重は約2400kNに達していたが、解析結果においても約2300kNの荷重荷重が算出されており、構造全体の耐荷力も精度よく再現されていた。

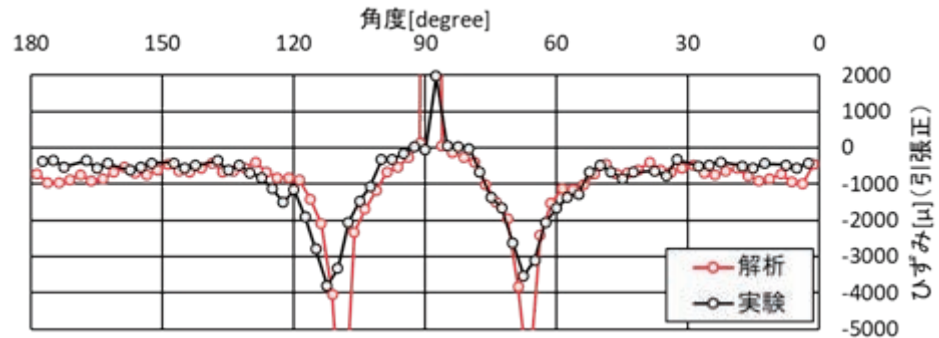


図-7 実大試験と数値解析より得られたひずみ分布 (内空側)

今回の実験・解析結果より、今回提案した数値解析モデルにより構造全体の耐荷力をはじめ、ひび割れや曲げ圧縮破壊、曲げ引張破壊全断面圧縮破壊といった破壊過程を再現できることが確認できた。このモデルだけで任意の厚さや材料を用いた覆工の妥当性を検証できるわけではないが、力学的挙動の観点から多様な覆工の評価ができることにより、新しい形式の覆工を採用する際の一指標として期待さ

れる。

#### 4. おわりに

トンネル技術は経験と実績に負うところが大きいですが、その一因として地山の特性を完全には把握できないことが挙げられる。国土交通省では、平成 28 年 11 月 8 日に発生した福岡市地下鉄七隈線延伸工事現場での道路陥没事故を受け、地質・地盤リスクを適切に評価し対応するための基本的な考え方等を土木研究所等と連携してとりまとめ、「土木事業における地質・地盤リスクマネジメントのガイドライン」としてとりまとめた<sup>5)</sup>。これを契機にトンネル分野でも、地山の不確実性を理解した上でトンネルに求められる性能とは何か、という議論が続けられている。今回ご紹介した土木研究所の研究内容もこの流れに沿ったものであり、要求性能に応じた様々な技術開発が行われる環境整備の一つとして貢献できれば幸いである。

#### 【参考文献】

- 1)土木学会トンネル工学委員会：山岳トンネル覆工の現状と対策、2002年9月
- 2)角湯克典：道路トンネル技術基準の変遷～矢板工法から NATM へ、支保工と覆工の設計の考え方の変遷～、道路、No.846, pp80-84, 2011年9月
- 3)土木学会トンネル工学委員会：トンネル標準示方書（山岳トンネル編）、2016年8月
- 4)菊地、日下：ファイバー要素を用いた山岳トンネル覆工の耐荷力に関する数値解析的検討、トンネル工学研究発表会、2021年11月(予定)
- 5)国土交通省大臣官房技術調査課、国立研究開発法人土木研究所ほか：土木事業における地質・地盤リスクマネジメントのガイドライン、2020年3月





---

土木研究所資料  
TECHNICAL NOTE of PWRI  
No.4417 October 2021

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