

AI（人工知能）技術を活用した河川監視の高度化に向けた取り組みについて（中間報告）

平山 岳弥¹

¹近畿地方整備局 河川部 河川計画課（〒540-8586大阪府大阪府中央区大手前1-5-44）

淀川河川事務所管内の各河川では、多様な河川利用形態が見られる一方、一部利用者によるごみの投棄や車両侵入などの迷惑・不法行為が散見されている。巡視や看板などの注意喚起をしているが、これら行為は跡を絶たない状況にあり、河川管理上の負担となっている。

淀川河川事務所では、近年、急速な実用化が進んでいるAI（人工知能）による画像認識技術に着目し、河川管理の負担軽減や迷惑・不法行為の網羅的な把握を目的とし、これら行為の検知・警告及び証拠保全等の自動化に向けた取り組みを試行することとした。本稿は、その初年度の取り組み内容について報告を行うものである。

キーワード AI、河川監視

1. 淀川河川事務所管内の概要

淀川は、その源を滋賀県山間部に発する大小支川を琵琶湖に集め、大阪市から河谷状となって南流し、桂川と木津川を合わせて大阪平野を西南に流れ、途中神崎川及び大川（旧淀川）を分派して大阪湾に注ぐ、幹川流路延長75km、流域面積8,240 km²の一級河川である。

このうち、淀川河川事務所は淀川37.0km、宇治川16.2km、桂川18.6km、木津川37.2km、その他支川9.5kmの計118.5kmを管理している。管内は世界的な観光地である嵐山地区や塔の島地区を擁する他、公園やキャンプ場、サイクリングなど多様な利用形態が見られ、多くの沿川住民や観光客に日頃から親しまれている。



図1-1 淀川管内の河川利用

2. 管内の迷惑・不法行為の実情と課題

淀川河川事務所管内では多様な河川利用形態が見られる一方で、迷惑・不法行為も散見されている。

図2-1は、2017年4月～2020年8月（約3年半）を対象に河川維持管理データベースシステム（Rimadis）から抽出した迷惑・不法行為の件数をグラフ化したものである。

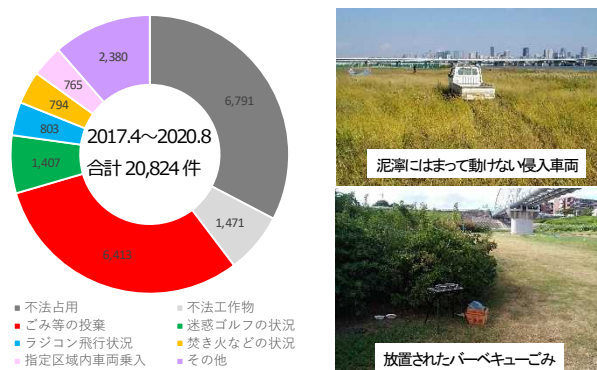


図2-1 2017年4月～2020年8月の迷惑・不法行為件数

約3年半の間に河川パトロール等で確認された迷惑・不法行為は約2万件にも及ぶ。このうち、不法占用・工作物設置（ホームレスや不法耕作等）など、継続監視・指導が必要な案件については毎回の河川パトロールにおいて状況を記録するため件数が必然的に多くなっているが、それ以外ではごみ等の投棄や指定区域内への車両侵入が多い。こうした不法行為は、自由使用を原則とする河川空間の安全な利用を妨げるものである。これまでも

巡視員による声かけ、出張所職員による指導や注意喚起看板の設置、不法投棄防止啓発のため毎年のごみ投棄件数及び発生場所をお知らせするごみマップの作成・周知をしているものの、顕著な改善は見られない。こうした迷惑・不法行為は証拠保全が難しいため行為者の特定にも至らず、抜本的な対応が困難な状況である。

一方で、限られた人員・予算の中で投棄されたごみの収集・処分や車両の侵入対策を講じているところであり、現場の出張所では対応に苦慮している。

3. 本稿で報告する取り組みの内容

(1) AIを活用した河川監視システムの概要

以上の実情と課題をふまえ、迷惑・不法行為の証拠保全や即時通報・現場での警告発報などの自動化を図るため、AI（人工知能）を活用した河川監視システムの構築・現場への実装を試行することとした。これにより、常時監視による迷惑・不法行為の網羅的把握、巡視の目を盗んでの迷惑・不法行為の抑止などによる河川管理行為の省力化を期待するものである。

当該システムは、現地に設置したカメラ画像から得られる画像を元に現場の迷惑・不法行為を分析・検知する「監視映像分析及び検知システム」と、検知した行為に対する現場での警告発報及び河川管理者に通報を行う「警告発報及び即時情報伝達システム」で構成する。各々の検討内容については、4.以降に詳述する。

なお、本取り組みは、初年度（2020年度）に当該システムの構築、次年度（2021年度）に当該システムを用いた実証実験を実施する予定である。本稿では、初年度の取り組み内容及び課題・工夫した点について報告するものである。

(2) 試行対象箇所及び検知対象行為

本取り組みの試行対象箇所及び検知対象とする不法行為は、Rimadisデータに加え、各出張所の担当者から特に問題と捉えている行為についてヒアリングを行い、表3-1のとおりとした。

表3-1 試行対象箇所及び検知対象行為

河川・kp	場所	検知対象行為	理由
淀川 L9.6kp	長柄中	ごみの投棄、 ゴルフ行為	河川公園がありごみの投棄が多い 公園内のゴルフ行為が危険
桂川 R15.8kp	松尾橋	BBQごみの投棄	BBQのごみの投棄が多く、看板設置などもしている
宇治川 R49.6kp	京滋BP	BBQごみの投棄	BBQのごみの投棄は自治体からの 対策も求められている
木津川 L7.4kp	岩田松原	指定区域車両進入、 踏み荒らし	堤防法面にも走行跡が確認されており、 警察に相談した経緯あり

4. 監視映像分析及び検知システムについて

(1) システムに用いるモデルの概要

監視映像分析及び検知システム（以下、検知システム）には、AI（人工知能）技術を活用することとし、物体検出用CNNモデルを用いる。CNN（Convolutional Neural Network）はディープラーニングの一種であり、自動運転や医療診断等の分野で高度な画像解析能力を発揮している。解析手順は下記及び図4-1のとおり。

1. 入力層で認識・検知したい画像を入力
2. 中間層で「フィルタ」を用いて画像の局所的特徴の抽出と、検知の可否を判断
3. 出力層で検知対象を出力
4. 出力結果と正解を比較し、正解を予測できるように「フィルタ」のパラメーターを更新
5. 指定した学習回数分1~4.の処理を繰り返す

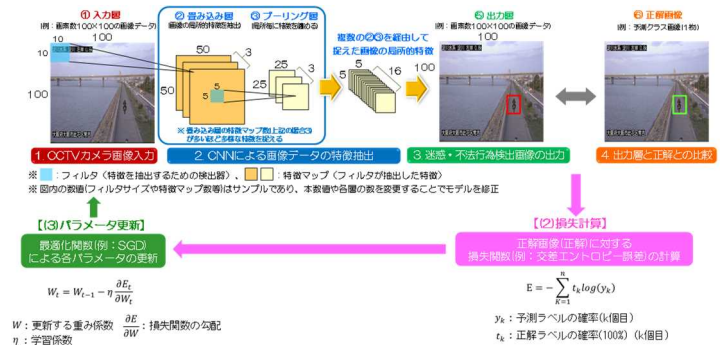


図4-1 CNNモデルの解析手順図

(2) 検知システムの構築

上記のとおり、CNNモデルは画像の入力・検知・出力・正解との比較を繰り返し、検知精度を向上する性質がある。この性質をもって「人工知能」と呼称されているものである。CNNモデルの学習には、WEB公開のフリー画像やRimadis上の写真・画像の中から、車・人・ゴルファー・不法投棄ごみ等の画像を抜粋し、「教師データ」として使用した。（図4-2）

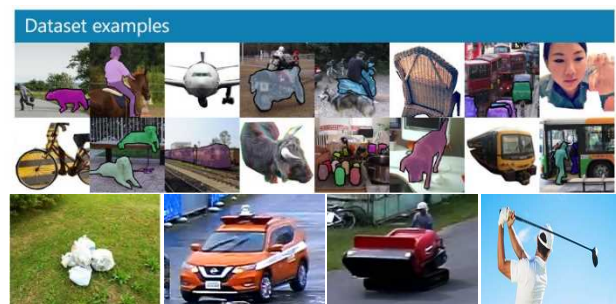


図4-2 使用した教師データの一例

なお、このうち検知する行為の主体であり、かつ多種多様な形状を有する車・二輪車・人については約10万枚の画像データをCNNモデルに繰り返し学習させ、検知精度の向上に努めた。特に、車については一般車両と河川パトロール用車両やハンドガイド式草刈り機を同一に検知しないよう学習させた。その後、試行対象箇所近傍の既設CCTVカメラ映像1週間分を対象に、検知性能の

テストを行った。検知対象行為がCCTVカメラで捉えられなかったものについては現地にてごみの不法投棄等の模擬映像を撮影し、これを対象に検知性能のテストを行った。テスト結果の一例を図4.3に示す。



図4.3 CCTV映像の検知結果

(2) 行為検知の課題と対応

上記テスト結果から、下記のとおり対象行為の検知にあたって課題を把握した。これら課題及び対応方針について、下記に述べる。

a) 誤検知

図4.3において検知システムのCNNモデルは、カメラ画像内の人とごみを検知している。CNNモデルには河川パトロールで撮影したビニール袋や家電製品などをごみとして学習させているが、色や形の似ているものについては誤検知することがある。例えば、図4.4は現地で鞆を持ち犬を散歩させている人と、その背後でゴミ袋を持った人を撮影した画像だが、ゴミ袋を持った人は正検知しているものの、鞆と犬をごみと誤検知している。



図4.4 検知システムの誤検知

このような誤検知は、システムの学習量を増やし、検知性能が習熟することで少なくできると考えられるが、完全に無くすことは困難である。このため、単にごみを持つ人の検知をもってごみの不法投棄と判断するのではなく、実際に不法投棄が行われたことをより精度よく捉えるための検討を行うこととした。

具体的には、不法投棄行為の開始・完了に至るまでの一連の動作を5パターン想定し、これらのいずれかに該当する動作を完了した場合に不法投棄行為と判定することとした。(図4-5)

【不法投棄と判定する基準】

- ①ごみを持った人がごみを放置してその場から5m離れた場合
- ②人が持つごみが人より50~200%と大きな場合(相大ごみ)
- ③深夜・早朝(23時~6時)にごみを持つ人がいた場合
- ④不法投棄が頻発する場所でごみを持つ人がいた場合
- ⑤自動車からごみの積み卸しをしていた場合

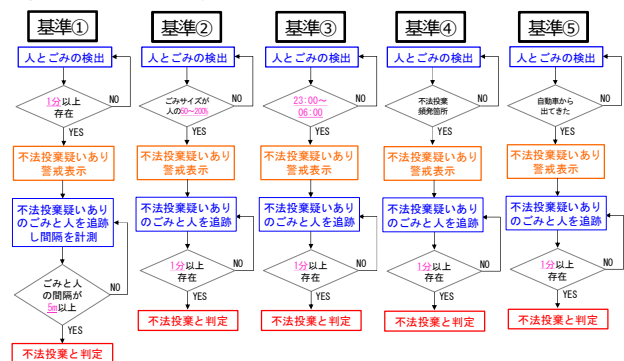


図4.5 不法投棄行為を判定する動作パターン(案)

上記の動作パターンを検知システムに組み込み、ごみの不法投棄が完了したと判定するまでの検知結果を図4.6に示す。このケースは、図4.5に示す判定基準のうち①に該当する動作パターンを現地で模擬的行ったものである。図4.4に示したとおり、単一画像から迷惑・不法行為の判定を行う場合には誤検知が発生しているのに対し、図4.5に示したように時間の概念を導入し、連続した複数の画像によって動作パターンを認識することにより、誤検知を回避して迷惑・不法行為を判定することができた。

なお、これらの動作パターンの想定(ごみを持った人の現地滞在時間やごみと人の離隔など)はあくまで今回仮に定めた参考基準であり、また、動作パターンの数も5パターンと限定的であることから、実証実験等を通じてより詳細かつ適切な判定基準を定めていく必要がある。

今回のシステム構築にあたっては、不法投棄以外にも車両の不法侵入及びゴルフ行為についても同様に判定基準・動作パターンを設け、誤検知防止を図ることとした。

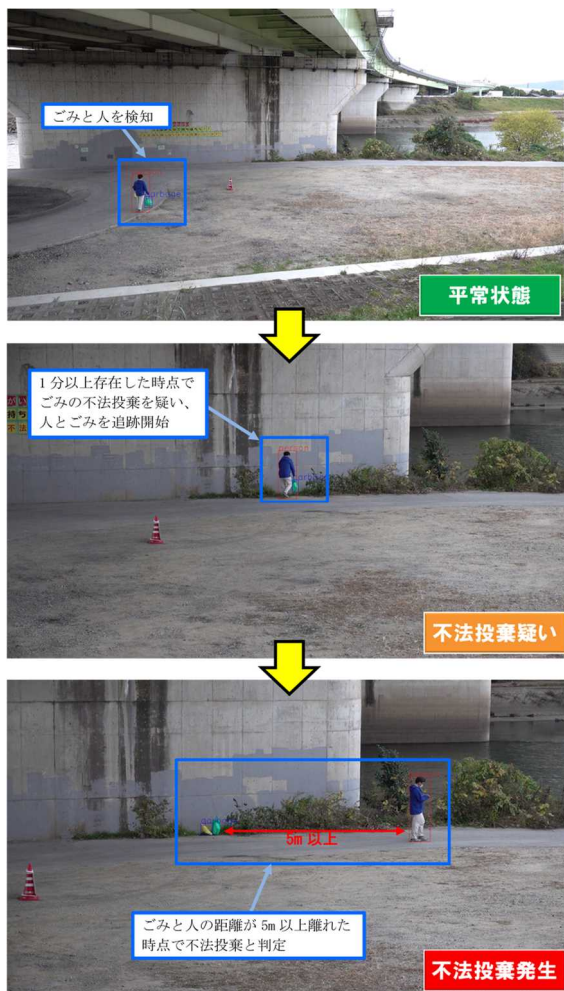


図4-6 動作パターンの検知による不法投棄の判定

b) 夜間の検知精度

CNNモデルは、画面内に表示された画像を認識して検知を行うことから、検知対象がある程度鮮明に写らなければ検知精度が低下する。しかしながら、大型家電や自転車など、大物の不法投棄は夜間に発生することが多くと想定されることから、夜間の検知精度も確保することが必要である。

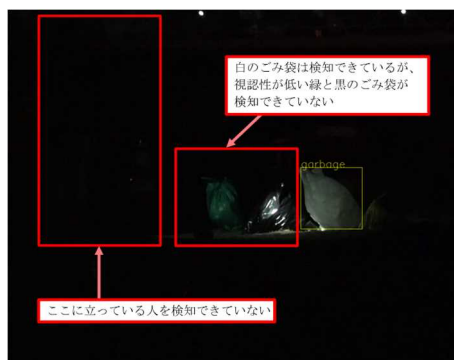


図4-7 夜間における人・ごみの未検知例

図4-7に夜間の検知精度を確認した結果を示す。この写真は、夜間に白・黒・緑色のごみ袋を持った人を撮影したものであるが、CNNモデルは白いごみ袋は検知で

きているものの、人及び黒と緑色のごみ袋については反応が無い。このため、夜間の検知精度向上を図るための検討を行うこととした。

検知精度の向上にあたり、検知対象となる画像の鮮明化を図ることとした。鮮明化のためには、画像鮮明化装置の取付けや夜間監視が可能な赤外線カメラの導入など機械器そのものの改良・取り替えが考えられる。しかしながら、初期投資に数十万円～数百万円/台かかることがデメリットである。これに対し、既存のCCTVカメラ等で撮影した画像を画像処理技術によって鮮明化する手法が存在する。当該手法は、数万円～数十万円のコストでモデル構築が可能であり、CNNモデルによる検知作業の前段に組み込むことによって画像の鮮明化・検知精度の向上が期待できることから、夜間カメラ画像鮮明化モデルを構築した。

夜間カメラ画像を鮮明化する画像処理技術の一つとして、「ガンマ(γ)補正」がある。この技術は、 γ 値(画像の階調の応答特性を示す数値)を用いて、画像の明るさ・階調性を人間の見た目に最適なものに補正するもので、液晶テレビで自然な明暗の再現にするためにも用いられている。この技術を実装した画像鮮明化モデルを構築し、CCTVカメラ映像の鮮明化とCNNモデルの検知を行った結果を図4-8に示す。



図4-8 ガンマ補正後の検知結果

ガンマ補正の活用により、画像の鮮明化及び検知精度の向上を図ることができた。しかしながら、道路照明の多少など、光が少ない、又は全く無い場所においては誤検知の発生やガンマ補正が適用できないことも想定され、実証実験等を通じ実用性について検証が必要である。

5. 警告発報及び即時情報伝達システムについて

(1) システムの概要

警告発報及び即時情報伝達システム（以下、警告発報システム）は、CCTVカメラ映像から検知システムが検知した迷惑・不法行為の信号を受信し、現地での警告発報及び河川管理者への通報を行うものである。

河川管理者への通報を受信する機器類は、淀川河川事務所内に専用のパソコンを設置することとし、通報を受信した際には、予め登録した職員のメールアドレス宛に通報メールの配信が可能とした。（図5-1）



図5-1 警告システム通報イメージ

また、検知・通報した映像については、迷惑・不法行為の証拠保全が可能となるよう、図5-2に示すように証拠保全画像の自動保存・出力、現地警告発報の制御等を行う操作システムのプロトタイプについても構築した。証拠保全画像の自動保存により、通常巡視だけでは把握できない迷惑・不法行為の網羅的な把握が期待できる。



図5-2 操作システム画面（プロトタイプ）

現地での警告発報に用いる機器類については、下記のとおりである。

(2) 現地での警告発報

現地での警告発報は、図5-3に示す機器類を現地に設置して行う。



図5-3 警告発報機器類現地設置イメージ

現地で検知した迷惑・不法行為に対して、これらの表示板・パトランプ及び音声による警告を行うことを想定しているが、次年度に実施する実証実験においては、出張所とのヒアリングや地元説明をふまえ、音声による警告を控える場所、現地の機器は設置せず管理者への通報のみとする場所など、現場状況に応じた配置計画を立案し、警告発報・河川管理者への通報等を実験・検証する予定である。

6. まとめ及び今後の予定

初年度における取り組みにより、AI技術を活用した河川管理のためのシステム構築を行い、既存のCCTV画像を用いた検証によって、一定の精度をもって迷惑・不法行為を検知できることを確認出来た。次年度の取り組みとして、河川監視システムの実装及び実際の現場での活用を試行的に実施する。

実証実験においては、CCTVカメラ映像を実際に監視し続けることにより、検知システムの精度の向上を図るとともに、自動警告発報の実運用上の課題などを明らかにし、システム全体の更なる改善に繋げる予定である。

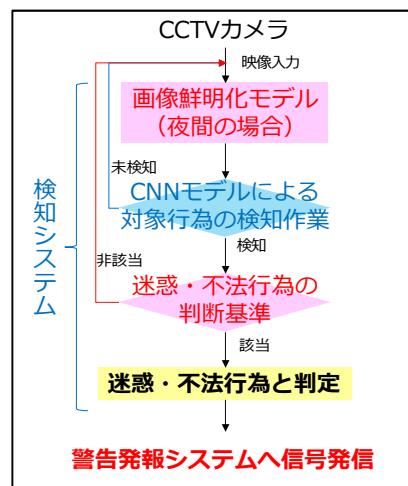


図6-1 河川監視システム全体像

本取り組みが河川監視の高度化の実現に活かされ、適正な河川利用及び河川管理行為の負担軽減に繋がれば幸いである。

本稿は従前の所属である淀川河川事務所調査課在籍中の所掌内容をとりまとめたものである。

謝辞：本取り組み及び本稿をまとめるにあたりご指導・ご協力頂いた全ての方に感謝致します。

道路管理としての雑草対策の取組について

羽山 勇輝¹

¹関東地方整備局 大宮国道事務所 春日部国道出張所 (〒344-0062 埼玉県春日部市 粕壁東6-13-5)

近年、道路管理の分野において、道路環境改善のための新技術工法や新たな二次製品などが開発され、長期的に管理費を抑制できる技術が数多く存在している。

一方、道路管理の現状として、緑地管理費が十分でないうえに、雑草に関する外部からの意見対応に追われ、一時的な除草に時間とお金を費やしている。そのため、年々道路環境が悪化しており、抜本的な解決に至っていない。そこで、出張所管内を対象とした雑草対策について、長期的な管理を見据えた、さまざまな取組としての試験施工状況を報告するものである。

キーワード 道路管理、緑地管理、除草、雑草対策

1. はじめに

春日部国道出張所の管理する道路は、埼玉県の東部に位置しており、国道4号と国道16号の約7.1kmである。

国道4号は、現道4号、新4号バイパス、4号東埼玉道路の3路線あり、特に新4号バイパス・4号東埼玉道路は、田畑や用水路等が多い場所に位置している。また、国道16号は、市街地と田畑が半々程度の場所に位置している。

管理全区域は、周辺に緑地が多く、雑草が繁茂しやすい状況である。(図-1参照)



図-1 管理区間・上空写真

2. 緑地管理等の現状

(1) 緑地管理費

管内全線の緑地管理費(歩道含む全ての緑地帯:年1

回の剪定・除草)は、年間約1億8,000万円必要であるが、現状は、その半分の約9,000万円である。これは、近年の経費削減により雑草等が繁茂し、通常以上に除草費が必要になった事が原因の一つ考えられる。また、管理区間の延長や周辺環境の特徴に合わせた管理費の見直しが追いついていないことも要因と考えられる。

(2) 地域特性

管理区間の地域特性は、周辺に田畑が多く、水路等も多く存在しているため、雑草が繁茂しやすい条件が整っている。そのため、特に夏季は、雑草の成長が著しく、1ヶ月間で10cm~20cm程度成長する箇所が多く存在している。よって、年1回の除草では対応しきれない場合がある。(図-2参照)

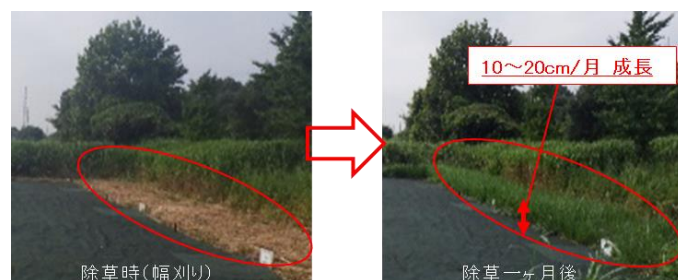


図-2 雑草の生育状況

(3) 外部からの意見割合

令和元年度の外部からの意見割合を算出した結果、除草関係の意見が、全体の1/4を占めており最も多かった。(図-3参照)これらの意見内容を確認すると、ほとんどが歩道の雑草に対する通行障害等についての意見であることが分かった。(図-4参照)

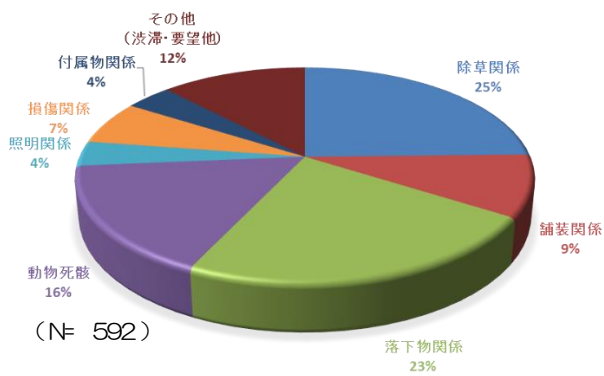


図-3 R1年度 外部からの意見割合



図-4 歩道の雑草繁茂状況

3. 雑草対策の取組 (各新技術等の導入・効果)

道路環境改善のために、前項のとおり、管内の特徴と現状を踏まえて、以下の4つの対策を実施した。(図-5参照)

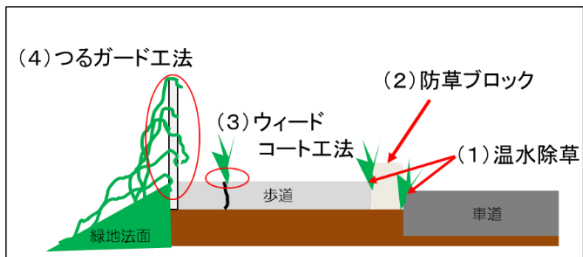


図-5 歩道の雑対策箇所

(1) 温水除草

a) 対策概要・試験施工

植物の根に42℃以上の温水をかけることで、タンパク質の構造を壊す性質を利用した「温水除草システム」を用いて雑草対策を実施した。(図-6参照)

実施に伴い、施工条件・費用等について、効果の検証実験をおこなった。

その結果、散布後1週間程度で植物を一度枯らし、その後の成長を抑制することが確認できた。また、薬剤ではなく水を利用するため、周辺環境への影響がないことも確認できた。しかし、広い中央分離帯など緑地帯では、

大量の温水散布(4~5ℓ/m²)が必要なため、給水等を考慮すると効率的ではないことが把握できた。

これらのことから、今回の試験施工は、目地草の抑制を対象として、温水除草を実施した。



温水高圧洗浄機 アタッチメント
図-6 温水除草システム

b) 効果

温水除草システムは、雑草に対して温水を散布するのみであるため、通常の日地草の除草及び撤去に比べ、経費の削減が可能となった。その結果、国道16号全線で目地草対策を実施することができた。その他、検証結果を以下に示す。

【検証結果】(◎メリット、△デメリット) 図-7参照
◎：雑草の成長抑制が可能となり、歩道の雑草による「通行障害の減少」につながる。

◎：断続的な移動規制で施工可能なため、通常の日地草除草に比べ、「交通への影響が少ない」。

△：成長した雑草に散布した場合、見た目が悪く、枯れた雑草の中から、再度雑草が生えてくるため散布時期の見極めが必要。

△：温水除草システムには、給水用のタンクが必要なためシステムとタンクが一緒に移動するための設備が必要。

【約1km区間の費用比較】

■ 通常除草 (1回当たり)	■ 温水除草 (1回当たり)
期間：6日間	期間：3日間
金額：180万円	金額：90万円



(施工前) (1週間後)
図-7 温水除草システム実施結果

(2) 防草ブロック

a) 対策概要・試験施工

植物の芽・茎は一定の斜角があった場合、成長が抑制される(成長が止まる)性質を利用した「防草ブロック」を用いて対策を実施した。(図-8参照)

本製品については、既に試験施工等の実績があり、効果が発揮されていた。そのため、管内の電線共同溝工事

での歩車道ブロック設置箇所について、施工条件・費用等の効果の検証を行った。(図-9参照)

従来ブロック

防草ブロック

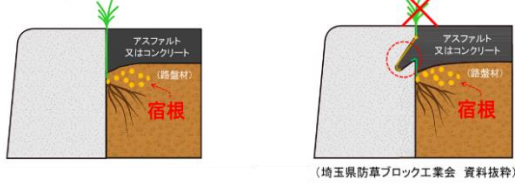


図-8 防草ブロック



図-9 防草ブロック設置状況

b) 効果

上記の設置箇所について、目地部からの雑草発生を抑制できた。その他、検証結果を以下に示す。

【検証結果】(◎メリット、△デメリット) 図-10参照
◎：引続き経過観察が必要となるが、境界ブロックからの雑草の成長が無く、目地部の「長期間の除草が不要」になる。

△：施工時に、空隙への碎石や砂の混入を防ぐため養生が必要。また、通常の境界ブロックより割れやすく、施工性が多少低下する。

△：通常の境界ブロックより材料費がかかる。

【費用比較】(歩車道境界ブロックB種)

■ブロック設置 期間：- 金額(材料費/個)：1,160円	■防草ブロック設置 期間：歩掛同じ 金額(材料費/個)：1,520円
-------------------------------------	--



図-10 防草ブロック設置の実施結果

(3) ウィードコート工法

a) 対策概要・試験施工

③舗装・縁石ブロック等の隙間に材料を注入して雑草の生える場所をなくす「ウィードコート工法」を実施した。(図-11参照)

実施箇所は、雑草が生えやすい「歩道内の舗装打継目

等の隙間」や「老朽化等による表面の凹凸箇所」を対象とした。これらを対象に、施工性や歩道規制等を考慮し、試験施工の実施と効果の検証を行った。(図-12参照)



(ウィードコート工法協会 資料抜粋)

図-11 ウィードコート工法



図-12 ウィードコート工法の施工状況

b) 効果

雑草生育箇所の「隙間埋め」と、舗装打継目箇所の「凹凸の平坦化」ができ、通行障害となる雑草の発生をなくすことができた。その他、検証結果を以下に示す。

【検証結果】(◎メリット、△デメリット) 図-13参照
◎：引続き経過観察が必要となるが、施工時の規制時間が少なく、舗装打継目箇所の雑草発生を無くすことにより、長期的な「通行障害の減少」につながる。

△：除草及び隙間の土砂撤去などの下地処理が必要のため、場所によっては手間と初期費用がかかる。

【約1km区間の費用比較】

■通常除草(1回当たり) 期間：6日間 金額：180万円	■ウィードコート工法 期間：+ 3~4日間 金額：+ 200万円
------------------------------------	--



図-13 ウィードコート工法の実施結果

(4) つるガード工法

a) 対策概要・試験施工

④網目が小さいネットを用いて、法面などからつる草の進入を防ぐ「つるガード工法」という対策を実施した。(図-14参照)

緑地法面や民地等から歩道内につる草が侵入したり、柵に絡みついたりすることで、歩道利用者の支障となっていた。また、つる草（特にくず）は成長が早く年に3～5回除草が必要な箇所も存在した。そのため、これらを対象に施工性等を考慮し、対策を実施した。



図-1 4 つるガード工法

b) 効果

年間を通して、歩道内へのつる草の侵入を防ぐことができた。その他、検証結果を以下に示す。

【検証結果】 (◎メリット、△デメリット) 図-14参照
◎：歩道へのつる草の侵入を防ぐことにより「通行障害をなくせる」。
△：つるガードネットの手前でつる草が繁茂するため、法面除草をしないと繁茂した雑草に上って侵入する。

【約100m区間の費用比較】

■通常除草（1回当たり）
期間：約1日間
金額：35万円

■つるガード工法
期間：約2日間
金額：150万円



図-1 4 つるガード工法の実施結果

4. 成果と今後の課題・展望

(1) 対策の成果

各対策の実施箇所は、管理区間の一部だったものの、道路環境改善として、次項のとおり一定の成果をあげることができた。

a) 雑草に関する意見の件数減少

対策を実施した結果、全体として雑草関係の意見を減少させることができた。具体的には、年間で約3割減少（R1年度146件、R2年度97件）でき、最も雑草の意見が多い夏季については、約5割減少（R1年度91件、R2年度46件）させることができた。

b) 除草経費削減

昨年度の除草対応と今年度実施した各対策について、費用比較をおこなった。その結果、除草回数を大幅に減

少することで、費用を前年比の半分程度に減少させることができた。（表-1参照）

表-1 雑草対策の費用比較

R1年度(除草のみ)		R2年度(各対策)		比較延長(km)
費用[万円]	(回数)	費用[万円]	(対策)	
2,700	(3回)	900	(1) 温水除草×2回	5.0
-		30	(2) 防草ブロック	0.5
360	(2回)	380	(3) ウィードコート工法	1.0
610	(5回)	530	(4) つるガード工法	0.35
(合計) 3,670		(合計) 1,840		6.9

c) 歩道幅員の確保

対策箇所は、年間を通して歩道幅員を確保することができ、その区間は、雑草に関する通行障害の意見が一切なくなった。その上、感謝等の連絡もあり、歩道環境の向上が実現できた。（図-1 5 参照）



図-1 5 歩道の対策状況

(2) 今後の課題・展望

今回の雑草対策から、試験施工範囲の拡大及び中長期的な有効性の確認が必要と考えられる。また、その他の雑草関係の意見は、秋以降に多かった「緑地帯からの雑草」や「路肩の堆積土砂からの雑草」などであり、これらについても対策検討が必要と思われる。

今後の展望としては、様々な新しい技術等を用いて、現場での試験施工による効果を検証し、各場所、時期等に適した対策を実施していきたい。また、その結果として、よりよい道路環境の整備を実施していきたい。

謝辞：各対策の実施にあたり、技術紹介頂いた各種メーカーおよび実施頂いた業者の皆様にご感謝の意を表します。

参考文献

- 1) WEED CONTROL SYSTEM (温水除草システム) 提案書
ケルヒージャパン株式会社
- 2) 防草機能を装備した道路コンクリート二次製品「防草ブロック」資料 (埼玉県防草ブロック工業会) 令和2年度 第1回 新技術活用検討会
- 3) ウレタン樹脂の流し塗り工法「ウィードコート工法」資料 (ウィードコート工法協会) 令和2年度 第1回 新技術活用検討会
- 4) つるガード工法 パンフレット資料 株式会社白崎コーポレーション

洋上風車建設基地港 実証実験 ～新たな基準作りに向けた砕石置換効果の検証～

幾世橋 哲矢¹・木村 貴彦¹

¹東北地方整備局 港湾空港部 港湾計画課 (〒980-8602 宮城県仙台市青葉区本町3-3-1)

洋上風車の建設に用いられる自己昇降式作業台船（SEP船）が全国で初めて秋田港に入港するにあたり、岸壁前面泊地へのレグ（脚）着底及び載荷重による岸壁構造物への影響（沈下・傾き）が危惧されていた。本実証実験は、実際にレグ荷重が掛かる環境下において実貫入量、海底地盤の土層変位等を計測し、地盤の状況や砕石置換による影響抑制効果の検証を行うことを目的としている。検証の結果、秋田港飯島地区の原地盤はレグ載荷（約6,000t/脚：90t/m²）に対して十分な支持力があること、砕石置換によってさらに土層変位が抑制され荷重分散効果があることが確認された。また、今回のレグ荷重による岸壁の変位は確認されなかった。

キーワード 洋上風力発電，砕石置換，基地港湾，脱炭素

1. 背景と目的

洋上風車建設には自己昇降式作業台船（SEP船）と呼ばれる、4本のレグ（脚）で自立し、波浪の影響を受けずに工事を行える作業船が用いられる（図-1）。

一般、秋田港及び能代港の港湾区域内で行われる洋上風車建設のため、SEP船「ZARATAN号」が国内で初めて秋田港に入港し、飯島地区岸壁（-11m）（図-2）の前面泊地においてレグ着底及び載荷重（約6,000t/脚：90t/m²）が行われることから、岸壁本体への影響（沈下・傾き）が懸念されていた。しかし、現行の「港湾の施設の技術上の基準・同解説（省令第15号）」では、岸壁前面泊地における鉛直外力（貫入力）による構造物への影響は考慮されておらず、対策はおろか影響予測手法や評価方法もなく、海外の事例においても秋田港の現地条件に類似するものがなく参考にすることができない状況下であった。

唯一、当局が開催した有識者検討会において、砂質の原地盤（φ30° 評価）よりは砕石置換（φ35° /40°）を行った方がSEP船レグ貫入を一定程度抑制する効果があるとの評価は示されていたものの、砕石の層厚・粒径に関する具体的な検討にまでは至っていなかった。

本報告は、SEP船実作業時のレグ着底（載荷）に合わせた現地挙動計測により、砕石置換部と原地盤の比較検証を行った実証実験の結果について報告するものである。



図-1 SEP船 ZARATAN号



図-2 実証実験対象位置図

2. 実験内容・方法

SEP船の四隅に配置されているレグのうち、岸壁に近い側の2本が砕石上に、遠い側の2本が原地盤上に着底するように、砕石置換（幅20m×延長140m・厚さ3m）を施工した。このうち、岸壁に近い側と遠い側で対角線上にあるレグA（砕石置換部）とレグC（原地盤）を計測対象とした（図-3～4）。計測は初回着底時、2回目着底時、最終となる14回目着底時の合計3回で実施した。

なお、実証実験対象地点の飯島地区は砂質土の下に粘性土も含む多層地盤となっている。

【検証項目①：レグ着底後降下量】

レグ着底後の地盤への貫入量を砕石置換部と原地盤で比較するため、トータルステーションを用いてレグA・Cの先端部を照準に降下量を計測した。船内情報によりピンポイント地点（レグ降下において地盤からの反力を受けた時点）を基準値（ゼロスタート）としてプレロード荷重時及びジャッキアップ時のレグ降下量を算出した。

【検証項目②：レグ貫入量・表面変状】

砕石置換部と原地盤におけるレグ貫入量と表面変状の差異を把握するため、レグ着底前後にナローマルチ及び水中3Dスキャナを用いて深浅値（標高DL）を計測した。

【検証項目③：地盤中の土層変位】

砕石置換部と原地盤の荷重分散効果を比較検証するため、計測対象レグの着底部端部からそれぞれ約3m、約10m離れた場所にあらかじめ多段式傾斜計をDL約-35mまで埋設し、レグ荷重時の土層変位を計測した。

【検証項目④：岸壁変位】

岸壁本体上に据置型傾斜計（xy方向）とGNSS変位計を設置し、地盤変位（レグ貫入）に伴うケーソンの運動変位を計測した。

3. 計測結果

(1) レグ着底後降下量

トータルステーションにて計測したレグ降下量を表-1～2、図-5～6に示す。

砕石置換部、原地盤共に着底の回数を重ねるごとにレグ着底後の降下量が小さくなっていること、最大荷重（プレロード）後のジャッキアップ完了時にリバウンドが確認されていることより、今回のレグ荷重（載荷）においては、地盤に十分な支持力があることが確認された。

また、砕石有無の比較観点においては、1回目着底時の降下量が砕石置換部の方が大きい結果となった。これは敷設した砕石が投入・敷均しのみによるもので、十分に締固めを行わなかったためと推察される。

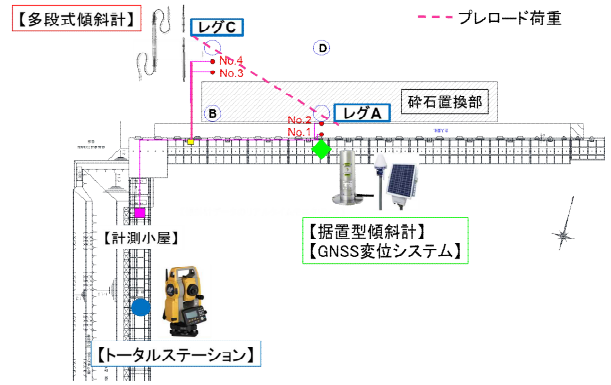


図-3 計測機器 設置平面図

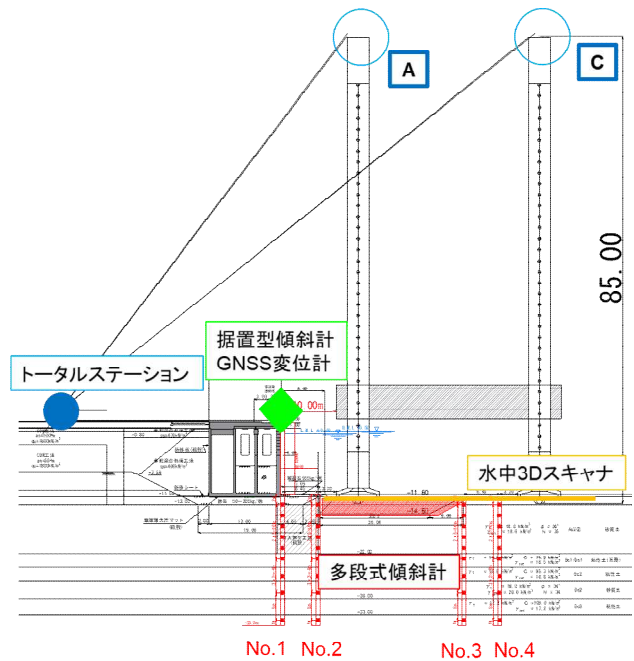


図-4 計測機器 設置断面図

表-1 レグA降下量（砕石置換部）

レグA 砕石置換	レグ降下量 (m)		
	1回目	2回目	14回目
最大荷重 (プレロード)時	0.62	0.20	0.07
ジャッキアップ 完了時	0.62	0.19	0.05

表-2 レグC降下量（原地盤）

レグC 原地盤	レグ降下量 (m)		
	1回目	2回目	14回目
最大荷重 (プレロード)時	0.48	0.32	0.10
ジャッキアップ 完了時	0.46	0.29	0.05

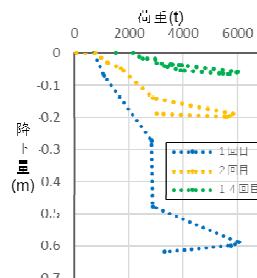


図-5 レグA降下量（砕石置換部）

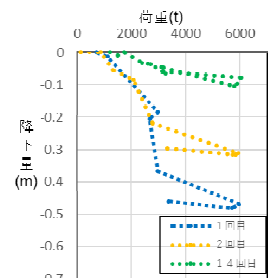


図-6 レグC降下量（原地盤）

(2) レグ貫入量・表面変状

次に、ナローマルチ及び水中3Dスキャナによる深浅値 (DL) データを図7~8、表3に示す。

図7~8では碎石置換部と原地盤でそれぞれ初回・2回目・14回目着底後の深浅値 (DL) を計測、着底回数ごとに色分けして表示した。碎石置換部と原地盤の双方において、着底回数を重ねるごとに、レグ着底前の原地盤を基準とする貫入量の絶対値は大きくなっているものの、着底前後の差異としては減少傾向にあることから、(1)レグ着底後降下量の考察同様、今回のレグ荷重 (载荷) において地盤には十分な支持力があることが確認された。

表3では初回・2回目・14回目着底後のレグA・Cの貫入量 (深浅値) を碎石置換部と原地盤での比較検証しており、(1)レグ着底後降下量の考察同様、初回着底において碎石置換部の方が原地盤に比べて貫入量が大きくなっているものの、最終的には碎石置換部と原地盤でほぼ同等の数値であることが確認された。

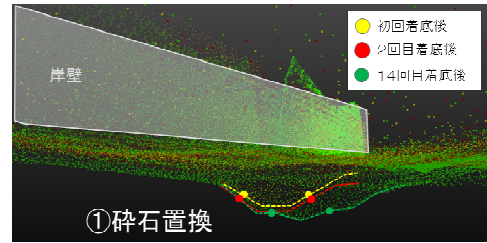


図7 水中3Dスキャナ計測データ (碎石置換部)

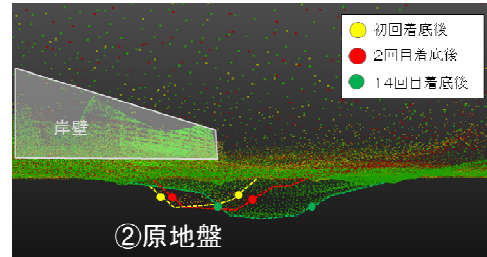
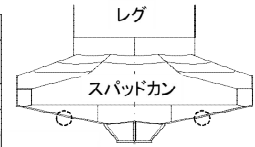


図8 水中3Dスキャナ計測データ (原地盤)

表3 レグA・C深浅値比較

着底回数	深浅値 (DL)	
	レグA (碎石置換部)	レグC (原地盤)
1回目	● 0.63	● 0.45
2回目	● 0.80 (0.17)	● 0.72 (0.27)
14回目	● 0.90 (-0.05)	● 0.88 (-0.07)

※()内の数字は着底前後の差



深浅値はスパッドカン中間地点の平均値

(3) 地盤中の土層変位

多段式傾斜計の計測結果を図9~10に示す。図9~10では、No.1~No.4傾斜計について、初回・2回目・14回目着底時における荷重ごとの変位量をグラフ化して比較検証した。

碎石置換部と原地盤において、荷重点であるレグの着底部端部から約3m離れた地点の計測結果について比較分析した結果を図9に示す。No.2 (碎石置換部) は初回から14回目において変位量が一定程度に留まっている傾向にあるのに対し、No.4 (原地盤) では着底回数を重ねるごとに累積的変位量となっている。特に碎石層直下のDL-16m地点の層と比較すると、No.2 (碎石置換部) については14回目着底後も約13mmに留まっているのに対し、No.4 (原地盤) は累積的変位量での約26mm (最大値) となっている。このことから、碎石置換により荷重分散が図られ、土層変位を抑制する効果が確認された。

次に、レグの着底部端部から約10m離れたNo.1・No.3の計測結果を比較分析すると、No.2・No.4の比較結果と同様、No.1 (碎石置換部) では初回から14回目において変位量にほぼ差がないのに対し、No.3 (原地盤) では着底回数を重ねるごとに累積的変位量となっており、特に表層部においては原地盤No.3に対し碎石置換部No.1での変位量抑制が確認された。

また、No.3の結果では、粘性土層にて比較的大きな変位が見られ、事前に実施した室内模型実験と同様の傾向が確認された。

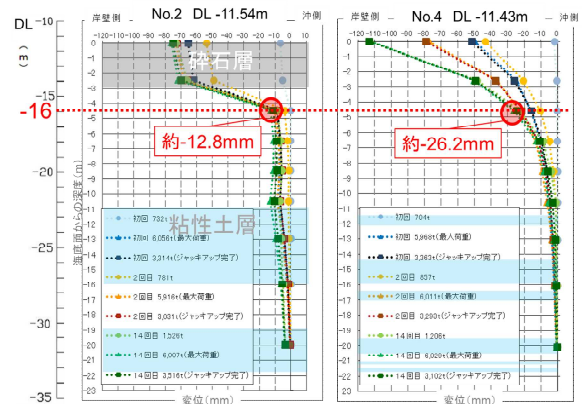


図9 No.2・No.4多段式傾斜計比較

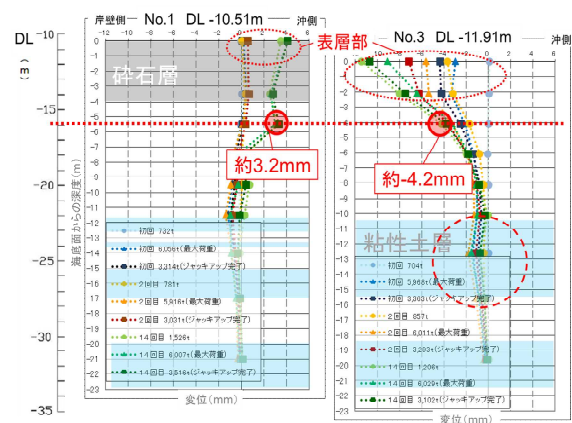


図10 No.1・No.3多段式傾斜計比較

(4) 岸壁変位

最後に、GNSS変位システムの計測結果を図-11に示す。計測は当局と施工業者でそれぞれが機器を設置して行った。当局は初回と14回目の計測日前日に機器を設置して、載荷時の岸壁変位を計測した。施工業者は工事期間中継続して観測を行った。

当局の計測結果では、2回目着底後に最大約2.5mmの数値が確認されたものの、初回・14回目着底後の計測結果では変位が見られなかった。一方で施工業者による計測結果ではほとんど変位が生じていないことから、当局の計測結果は誤差と判断した。

以上の結果より、今回のレグ着底においては岸壁への影響は確認されなかった。

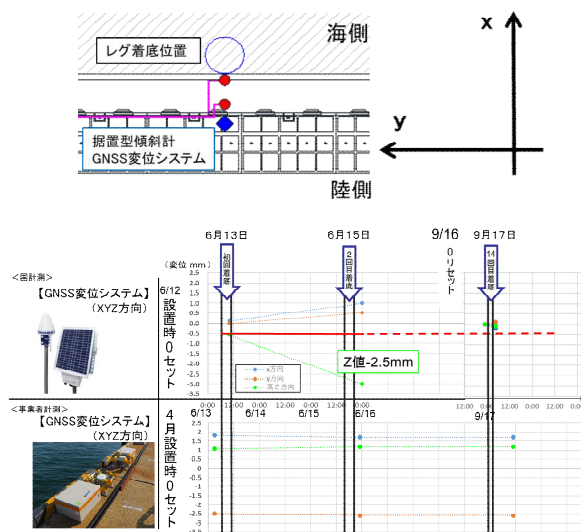


図-11 岸壁変位計測結果

4. 結論

一般のSEP船レグ着底実証実験の各計測結果一覧を表4に示す。

レグ着底後の降下量とレグ貫入量・表面変状の計測結果より、着底の回数を重ねるごとにレグ降下・貫入量が小さくなっていること、ジャッキアップ完了時にリバウンドが見られたことから、秋田港飯島地区の地盤についてはレグ載荷(約6,000t/脚: 90t/m²)に対して十分な支持力があることが確認された。

土層変位の計測結果より、繰り返し荷重において、原地盤では累積的に変位するのに対し、砕石置換部では変位が一定程度に留まっていることから、砕石置換による変位量の抑制、すなわち荷重分散効果が確認された。

地盤変状、土層変位に連動しての岸壁構造物への影響については、今回確認されなかった。

今後の展望としては、今回得られた各種データを活用し、同様の使用条件下に置かれる他港への適用を念頭に、岸壁構造物への影響を事前予測するためのSEP船レグ支持力(貫入量)推定式や影響予測手法としてシミュレーションモデルの構築に反映する計画としている。

最後に、国内初となる本実証実験が、今後の基地港整備に向けた大きな成果となり、将来の洋上風力発電の発展に寄与することを期待する。

謝辞：現地実証実験実施にあたりご協力いただいた秋田洋上風力株式会社様及び鹿島建設株式会社様、また、実証実験計画からデータとりまとめについてご指導いただいた港湾空港技術研究所高橋・水谷両グループ長に改めて感謝申し上げたい。

表4 計測結果一覧

計測項目	計測値内容 (計測機)	砕石	変位量			備考
			初回計測	2回目計測	14回目計測	
1. レグ着底後の降下量	船内情報に基づくレグ地盤着底からの降下量値(トータルステーションT.S)	有	0.62m	0.19m	0.05m	レグA
		無	0.46m	0.29m	0.05m	レグC
2. レグ貫入量及び表面変状	レグ着底前の原地盤を基準とする陥没量深淺値スナッドカン中間値を表記(水中3Dスキャナー)	有	0.63m	0.80m [0.17m _※]	0.90 [-0.05m _※]	レグA
		無	0.45m	0.72m [0.27m _※]	0.88 [-0.07m _※]	レグC
3. 土層変位	レグ荷重前後での土層移動量(多段式傾斜計)	有	X軸変位 -12.8mm (DL-16mの位置)			レグA No.2
		無	X軸変位 -26.2mm (DL-16mの位置)			レグC No.4
4. 岸壁変位	レグ荷重前後での岸壁傾斜量(据置型傾斜計)	—	海側0.02° [誤差]	陸側0.003° [誤差]	陸側0.003° [誤差]	—
	レグ荷重前後での岸壁移動量(GNSS変位計)	—	Z値(高さ方向) 0 [※2回目 -2.5mmについては機器設置誤差]			—

※ []は直前の着底前後の差

衛星画像を用いた国家座標の管理に向けて ～干渉SAR時系列解析の概要と活火山への応用～

市村 美沙¹・三木原 香乃¹・石倉 信広¹・島崎 久実¹
石本 正芳¹・佐藤 雄大¹・小林 知勝²

¹国土地理院 測地部 宇宙測地課 (〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番)

²国土地理院 地理地殻活動研究センター 宇宙測地研究室 (〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番)

国土地理院では、公共測量をはじめi-Constructionや位置情報サービス等の様々な分野で高精度な位置情報が利活用できるよう、国の位置の基準である「国家座標」を管理している。地殻変動が活発な我が国で「国家座標」を維持するためには、時刻ごとに地表の動きを把握する必要がある。このため、従来より高い計測精度で地殻変動を把握できる衛星画像を用いた時系列解析の導入を進めている。地殻変動に関する情報は「国家座標」の維持管理の高度化のみならず、地震や火山等の防災においても重要である。そこで、この新たな解析を全国に展開する前段階として、活火山の監視に先行的に導入した。本発表では、その概要と解析結果を報告する。

キーワード だいち2号, ALOS-2, 干渉SAR, 干渉SAR時系列解析, 地殻変動

1. はじめに

国土地理院では、公共測量等の測量分野のみならず、i-Construction, ドローン, 位置情報サービス等の様々な分野において、安心して位置情報を利活用できるよう、国の位置の基準である「国家座標」を管理している。地殻変動が活発な我が国で、いつでも・どこでも・誰でも高精度で使いやすい「国家座標」が得られるようにするためには、地表の動きを時刻ごとに把握し、「国家座標」の基準日に合わせて位置を補正する必要がある。国土地理院では、GPSや準天頂衛星システムを利用したGNSSの連続観測点である電子基準点により高精度に地表の動きを監視してきた。しかし、限られた数の電子基準点では捉えきれない局所的で複雑な地表の動きを広域で監視するため、陸域観測技術衛星2号「だいち2号」(ALOS-2)に搭載された合成開口レーダー(SAR)のデータを用いて解析を実施し、日本全国の地殻変動を定常的に監視している。

ALOS-2は、宇宙航空研究開発機構(JAXA)が2014年5月に打ち上げ、運用している人工衛星である。地表に向かって電波を照射し、反射してきた電波を受信することで地表を広域的に観測でき、日本全国の陸域を年に3～4回観測している。

SAR干渉解析は、異なる2時期に観測されたSARデータに含まれる電波の位相差を計算することにより、観測間に発生した地表変位を高い空間分解能で計測できる技術である。SAR干渉解析では数cmの地表の変位を面的

に把握することができる。そのため、地震や火山噴火等の時間スケールが短くかつ変動量大きい現象に対し、地殻変動を把握する有効な手法として、1990年代後半から広く使用されるようになった。

しかしながら、SAR干渉解析により得られる結果(SAR干渉画像)には地殻変動に加えて様々な誤差が含まれている。主なものとして、1) 地表の散乱状態の変化(主に植生)に伴う誤差、2) 対流圏擾乱(主に水蒸気)に伴う誤差、3) 電離圏擾乱に伴う誤差が挙げられる。これらの誤差により、SAR干渉解析では地震等による大きな地殻変動は検出できるものの、平時の火山活動や地盤沈下のように時間スケールが長い微小な変動を検出することは困難である。

こうした背景から、多数枚のSAR干渉画像を統計的に処理することで、SAR干渉画像に含まれる誤差を低減させて計測精度を向上させる干渉SAR時系列解析が提案されてきた。干渉SAR時系列解析では、通常SAR干渉解析より高い計測精度で変動の時間発展を追跡し、年間数mm程度の速度で進行する微小な定常変動も検出することが可能となる。

そこで国土地理院では、干渉SAR時系列解析システム「GSITSA : GSI InSAR Time Series Analysis」を開発し¹⁾、地殻変動の監視に向けた検討を進めてきた。干渉SAR時系列解析には様々な手法が提案されているが、代表的な手法であるPSI法²⁾とSBAS法³⁾等が、GSITSAには実装されている。このうちSBAS法は、垂直基線長(1回目と2回目観測の衛星間距離のうち衛星-地表視線方向に対する直交成分)が短くかつ干渉性が良いSAR干渉画像を複

数作成し、各観測日の変動量を推定する手法である。標準的なSBAS法では、PSI法と異なり、マルチルック処理（隣接する複数の画素を平均化する処理）を施した干渉画像を利用するため、山間部においても、比較的精度の良い画素を選択的に利用した計測が可能となる。マルチルック処理により画素の空間分解能が劣化するという欠点はあるものの、ALOS-2をはじめとする近年のSAR衛星は空間分解能が高く、本処理を施しても実際の監視に必要な分解能を確保できるようになってきた。近年のデータ環境の向上を受け、SBAS法は、森林地域の多い日本の国土の変動を詳細に把握するのに適した手法と言える⁴⁾。

したがって国土地理院では、GSITSAを用いたSBAS法による干渉SAR時系列解析の検討を進め、はじめに活火山の地殻変動監視に導入することとした。解析は国内111活火山のうち活動的な16活火山について実施した。

本報告では、干渉SAR時系列解析について概説するとともに、顕著な地殻変動を検出できた例として、解析を実施した16活火山のうち、これまで山頂部の詳細な変動を捉えることが困難だった口永良部島と焼岳における解析結果を紹介する。

2. 干渉SAR時系列解析システムの概略

本章では、国土地理院が開発した干渉SAR時系列解析システム「GSITSA」の主な流れ及び特徴について紹介する。図-1は本システムの解析フローの概略である。

図-1に示されるように、本システムは、国土地理院の干渉SAR解析ソフトウェア「GSISAR」で生成されたSAR干渉画像を入力データとする。各干渉画像には、対流圏遅延誤差低減処理（数値気象モデルを利用⁵⁾）、電離層遅延誤差低減処理（Range Split-Spectrum法⁶⁾を利用）、長波長補正（GNSS補正^{7,8)}及び幾何補正）を必要に応じて適用することができる。次に、コヒーレンス（干渉性の高さ）または正規化位相分散（隣接する領域内の位相のばらつきを示す指標）に基づくマスク及び水部マスクを適用し、干渉画像内の品質の悪いデータを除外する。これらの処理を行い得られた干渉画像についてMCF法⁹⁾により位相連続化処理（干渉画像の位相データを変位量に変換する処理）を行い、さらにSBAS法で処理することで、各観測日の変位量と観測期間における変位速度を推定する。SBAS法に時間方向のスムージング処理を組み込み、SAR干渉画像の誤差低減処理では十分に低減できなかった誤差の影響をさらに抑えている。スムージングの強さは、Cross Validation Sum of SquareまたはABICの統計指標を利用して最適な値に決めることが可能となっている。

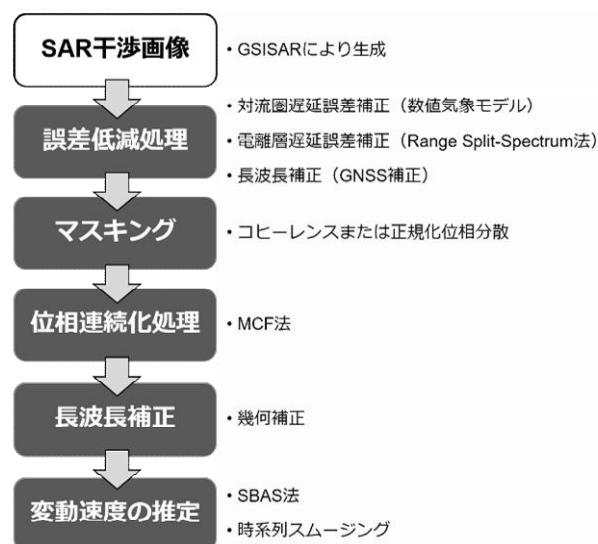


図-1 干渉SAR時系列解析システムGSITSAの概略

表-1 干渉SAR時系列解析を実施した16活火山

火山名	衛星 進行方向	観測期間 (YYYY/MM/DD)	干渉 ペア数
十勝岳	南行	2016/06/02～2020/10/29	25
有珠山	南行	2015/10/08～2020/11/26	23
吾妻山	南行	2015/07/30～2020/11/26	33
草津白根山	北行	2014/04/17～2020/06/19	14
	南行	2014/10/28～2020/11/03	56
浅間山	北行	2015/04/17～2020/06/19	14
	南行	2014/10/28～2020/11/03	56
焼岳	北行	2014/08/22～2020/05/22	16
	南行	2014/09/30～2020/09/08	29
御嶽山	南行	2014/10/05～2020/10/25	44
箱根山	南行	2014/10/09～2020/09/17	77
伊豆大島	南行	2014/12/04～2020/11/26	40
三宅島	南行	2014/12/04～2020/11/26	64
阿蘇山	南行	2016/04/18～2021/03/01	180
雲仙岳	北行	2014/09/17～2021/02/24	18
霧島山	南行	2015/02/09～2020/11/09	314
桜島	南行	2015/08/24～2020/11/09	196
口永良部島	北行	2015/06/10～2021/02/10	24
	南行	2015/06/01～2021/03/01	62
諏訪之瀬島	北行	2014/10/06～2020/06/22	49
	南行	2015/03/09～2021/03/15	36

3. 国内16活火山における干渉SAR時系列解析

干渉SAR時系列解析システムGSITSAを用いて、国内における活動的な16活火山について、解析を実施した(表-1)。今回解析の対象とした火山は、解析当時で、噴火警戒レベル2以上の火山、レベル1でも直近で顕著な活動の変化が見られた火山、顕著な地殻変動が継続している火山、過去に活発な活動があり注目度が高い火山のいずれかに該当するものである。

SAR干渉画像の作成では、各火山について2時期の観測が垂直基線長100 m以内かつ観測間隔730日以内のペアを選択することを基本とし、マルチルック処理におけるルック数は基本的に8ルックとした。最終的な1画素の分解能は約30 mとなる。本解析では解析対象を火山地域としており解析範囲が狭いため、干渉画像に対する誤差低減処理は対流圏遅延誤差補正のみ適用し、位相連続化処理後に、幾何補正(3変数で表される傾斜平面を仮定)による長波長補正を施した。

解析結果は、2021年6月に開催された火山噴火予知連絡会に提供し、火山活動の評価に活用された。また、同年7月に地理院地図において一般に公開した。

4. 干渉SAR時系列解析結果

前章で示した16活火山のうち、浅間山の1火山を除き山頂部の局所的な変動などの有意な地殻変動が検出された。このうち、干渉SAR時系列解析によって顕著な地殻変動が検出された口永良部島と焼岳の解析結果を紹介する。

(1) 口永良部島の解析結果

口永良部島では、2015年5月に火砕流を伴う爆発的噴

表-2 口永良部島の観測情報

衛星進行方向	北行	南行
観測期間	2015/06/10 ~2021/02/10	2015/06/01 ~2021/03/01
電波照射方向	右	右
電波照射方位	東	西
観測モード	U*	U*
軌道番号	131	23
フレーム番号	600	3000
入射角	37.2°	37.6°
偏波	HH	HH
データ数	15	27
干渉ペア数	24	62
ルック数	8	8
垂直基線長の上限	100 m	100 m
観測間隔の上限	730日	730日
冬季データ	含む	含む

*U：高分解能(3m)モード

火(平成27年口永良部島噴火)が発生した。2015年6月と2018年10月から12月にかけてごく小規模な噴火、2018年12月と2019年1月及び2020年2月に火砕流を伴う爆発的噴火が発生し、その後もごく小規模な噴火が時々発生している¹⁰⁻¹³⁾。

ALOS-2による観測は、2015年6月から2021年2月までに15回の北行軌道・右方向観測、2015年6月から2021年3月までに27回の南行軌道・右方向観測が実施されている(表-2)。これらのデータを用いた干渉SAR時系列解析の結果を図-2及び図-3に示す。北行観測(図-2)及び南行観測(図-3)それぞれについて、解析期間における変位速度、図中に示す地点A、B及びCでの衛星-地表間の変位量の時系列を示した。なお、本解析では、参照点(変動しないと仮定した固定点)を電子基準点「口永良部島」付近とした。

解析の結果、北行軌道の観測では、新岳山頂周辺で衛星から遠ざかる変動が見られた(図-2a)。新岳山頂西側の地点Aでは、2015年5月の噴火後から2019年4月にかけて衛星から遠ざかる変動が見られ、特に2018年12月の噴火後から2019年4月までの変動量が大きい(図-2b)。

南行軌道の観測でも、新岳山頂周辺で衛星から遠ざかる変動が見られた(図-3a)。新岳山頂東側の地点Bでは、2015年5月の噴火後から2018年1月までと、2019年1月の噴火後から2019年7月頃までの2期間で衛星から遠ざかる変動が見られた(図-3b)。2019年7月以降は衛星から遠ざかる変動が鈍化していることがわかる。

北行軌道及び南行軌道の解析結果から、口永良部島では、2015年と2019年の噴火後に山頂部で収縮する変動があったことが明らかとなった。この変動は、従来のSAR干渉解析結果では捉えておらず、干渉SAR時系列解析により初めて明らかになったものである。

(2) 焼岳の解析結果

焼岳では、2017年8月に空振を伴う火山性地震と山頂西側の噴気が観測された。2018年11月から12月には焼岳周辺で地震活動が活発化し、2019年7月から10月にかけて空振を伴う火山性地震が発生した¹⁴⁾¹⁶⁾。

ALOS-2の観測は、2014年8月から2020年5月までに10回の北行軌道・右方向観測と、2014年9月から2020年9月までに13回の南行軌道・右方向観測が実施されている(表-3)。これらの観測データを用いた干渉SAR時系列解析の結果を図-4及び図-5に示す。図-2及び図-3と同様に、北行観測(図-4)及び南行観測(図-5)それぞれについて、解析期間における変位速度、地点A、B及びCでの衛星-地表間の変位量の時系列を示した。参照点は、気象庁のGNSS観測点「大正池南」付近とした。

解析の結果、北行軌道の観測では、山頂の北西側で衛星に近づく変動が見られた(図-4a)。山頂北西側の地点Bでは、2016年11月から2019年11月にかけて衛星に近づく変動が見られ、特に2016年11月から2017年9月の変動が顕著である(図-4b)。

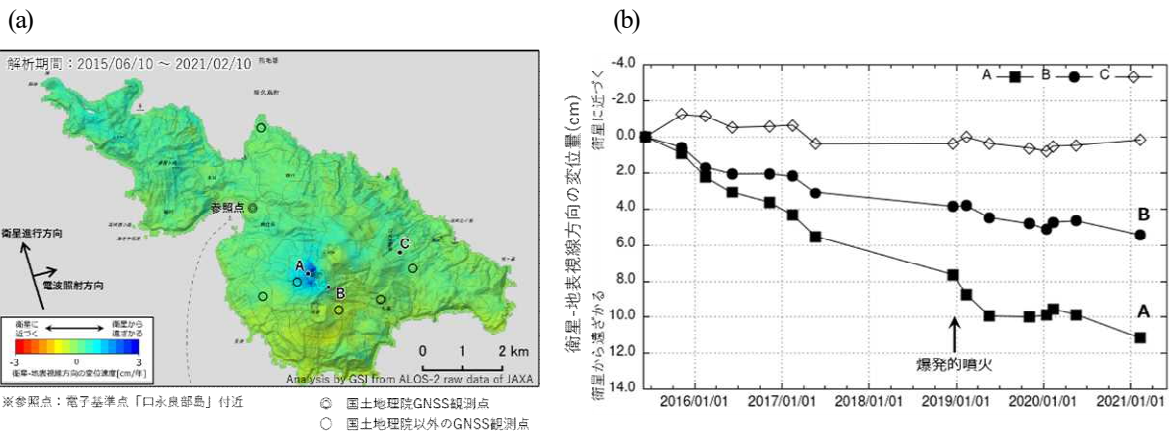


図-2 口永良部島(北行観測)の干渉SAR時系列解析結果。(a)は変位速度図、(b)は地点A、B及びCにおける衛星-地表視線方向の変位量の時系列。地点A、B及びCの位置は(a)のとおり。

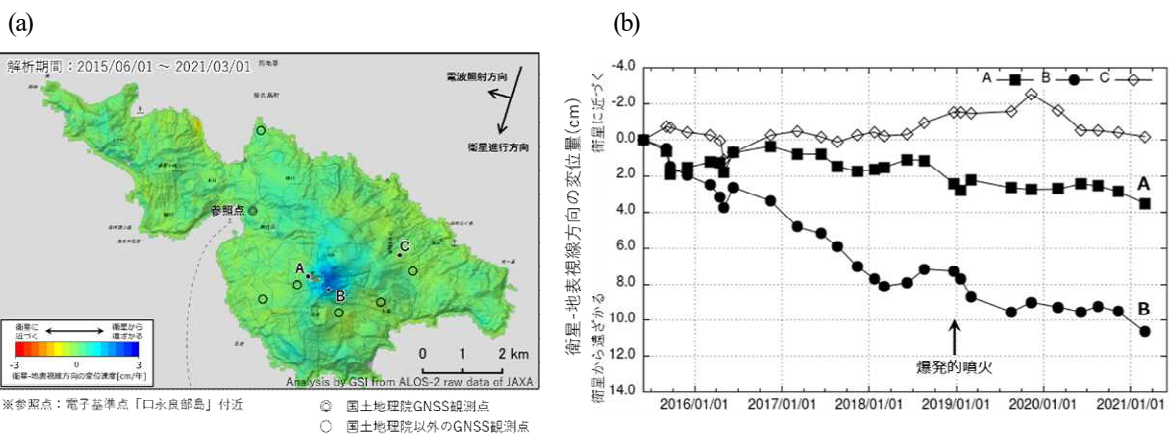


図-3 口永良部島(南行観測)の干渉SAR時系列解析結果。(a)は変位速度図、(b)は地点A、B及びCにおける衛星-地表視線方向の変位量の時系列。地点A、B及びCの位置は(a)のとおり。

表-3 焼岳の観測情報

衛星進行方向	北行	南行
観測期間	2014/08/22 ~2020/05/22	2014/09/30 ~2020/09/08
電波照射方向	右	右
電波照射方位	東	西
観測モード	U*	U*
軌道番号	126	19
フレーム番号	710	2890
入射角	36.7°	42.3°
偏波	HH	HH
データ数	10	13
干渉ペア数	16	29
ルック数	8	8
垂直基線長の上限	100m	130m
観測間隔の上限	1095日	1095日
冬季データ	含まない	含まない

*U: 高分解能 (3m) モード

一方、南行軌道の観測では、山頂の北東側で衛星に近づく変動が見られる (図-5a)。山頂北東側の地点Aでは、2016年4月から2020年9月にかけて衛星に近づく変動が見られた (図-5b)。特に、2018年の地震活動活発化前にあたる同年6月から9月までに顕著な変動が認められる。なお、2016年4月から8月までと2020年7月から10月までの急激な変動は、原因を特定することはできないが何らかの誤差による影響の可能性がある。

これらの変動から、焼岳では2016年から2020年にかけて、山頂北側を中心に山体が膨張していたと考えられる。

5. まとめ

国土地理院では、「国家座標」の維持管理の高度化や防災に貢献するため、多数のSAR干渉画像を統計的に処理する干渉SAR時系列解析の検討を進めている。この解

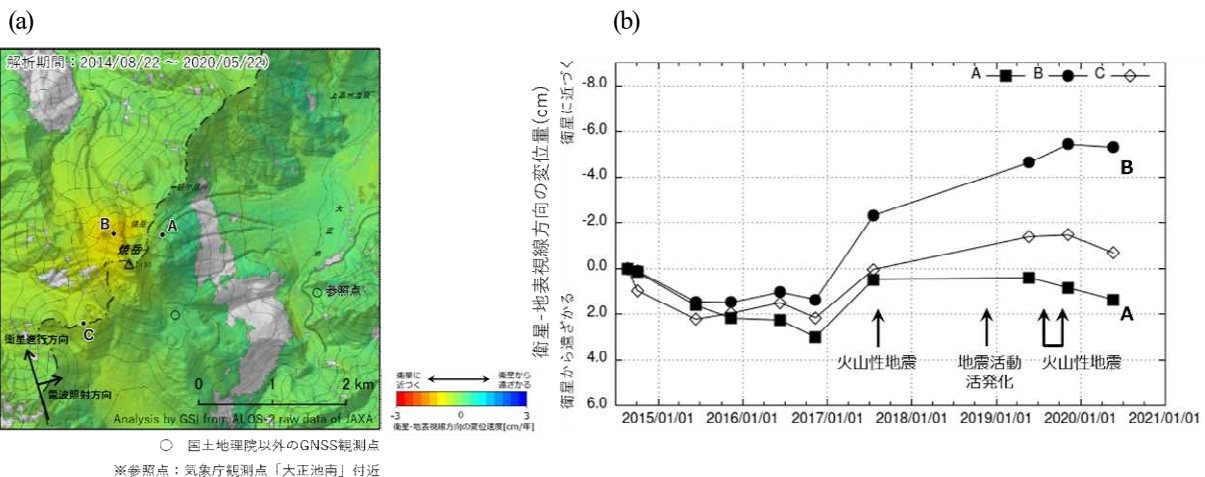


図-4 焼岳 (北行観測) の干渉SAR時系列解析結果. (a)は変位速度図, (b)は地点A, B及びCにおける衛星-地表視線方向の変位量の時系列. 地点A, B及びCの位置は(a)のとおり.

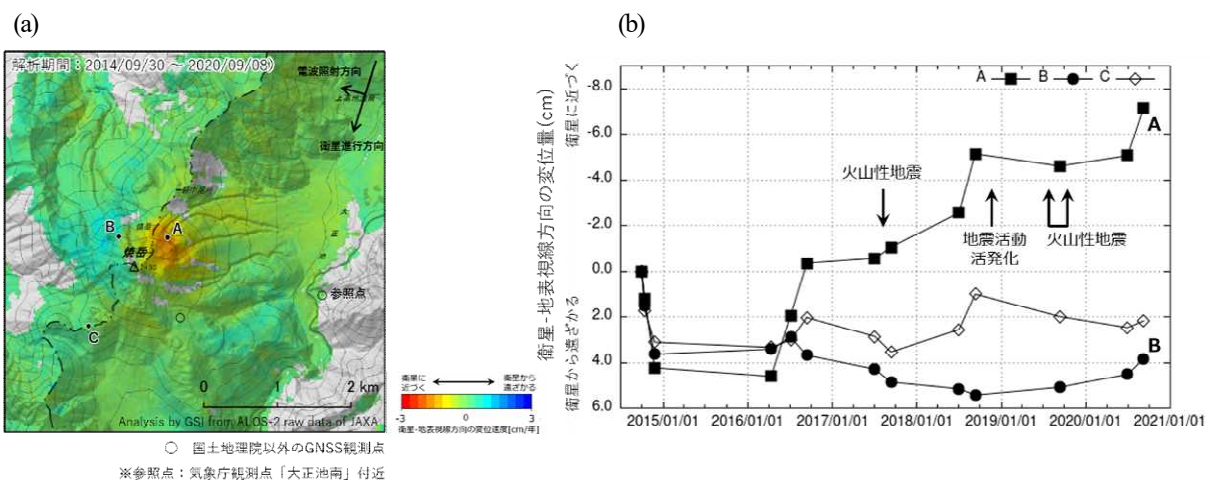


図-5 焼岳 (南行観測) の干渉SAR時系列解析結果. (a)は変位速度図, (b)は地点A, B及びCにおける衛星-地表視線方向の変位量の時系列. 地点A, B及びCの位置は(a)のとおり.

析手法を、まず国内の活火山監視に導入した。国内111活火山のうち活動的な16活火山を対象に、ALOS-2による過去7年分の観測データを用いて干渉SAR時系列解析を実施した。その結果、地下の火山性流体（熱水やマグマ等）の動きを示すと考えられる山頂部の膨張・収縮など、従来のSAR干渉解析では検出が困難な微小な変動を検出することに成功した。これらの解析結果は、火山噴火予知連絡会に提出し、山体の収縮を示す根拠になる等、火山活動評価の有益な情報となった。このように干渉SAR時系列解析は、これまで把握することができなかった微小な変動や、GNSS連続観測点ではカバーできない領域の変動の把握に有効な手段であることがわかった。今後は、他の火山についても解析を進めるとともに、火山のみならずより広域的な解析の戦略も含めた「国家座標」の管理について検討を進めていく。

現在、ALOS-2は設計寿命を超えて運用しており、令和4年度にはその後継機として先進レーダ衛星「だいち4号」（ALOS-4）の打上げが予定されている。ALOS-4では、ALOS-2と比較して日本域での観測回数が年4回から年20回へと5倍の高頻度で観測されるようになる。ALOS-4の高頻度観測データを用いることで、干渉SAR時系列解析の精度が向上し、さらに有効な地殻変動の監視方法になると期待されることから、ALOS-4の観測データを活用した検討も併せて進めていく予定である。

謝辞：解析で用いたALOS-2データは、火山噴火予知連絡会衛星解析グループ（火山WG）の活動、及び「陸域観測技術衛星2号に関する国土地理院と宇宙航空研究開発機構の間の協定」に基づいて、宇宙航空研究開発機構（JAXA）から提供を受けた。原初データの所有権はJAXAにある。数値気象モデルは「電子基準点等観測データ及び数値予報格子点データの交換に関する細部取り決め協議書」に基づき、気象庁から提供を受けた。GNSSデータの一部は気象庁から提供を受けた。

参考文献

- 1) 小林知勝, 森下遊, 山田晋也 (2018) : 干渉 SAR 時系列解析プロトタイプシステムの開発. 国土地理院時報, 130, 123-133.
- 2) Ferretti, A., C. Prati and F. Rocca (2001) : Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 39, 8-20.
- 3) Berardino, P., G. Fornaro, R. Lanari and E. Sansosti (2002) : A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 40, 2375-2383.
- 4) 林京之介, 山下達也, 桑原将旗, 本田昌樹, 酒井和紀, 宗包浩志, 小林知勝 (2019) : 干渉 SAR 時系列解析による日本全国の地盤変動監視に向けた取り組み. 日本地球惑星科学連合 2019年大会, STT45-P10.
- 5) 小林知勝, 石本正芳, 飛田幹男, 矢来博司 (2014) : SAR 干渉解析のための数値気象モデルを用いた大気遅延誤差の低減処理ツールの開発. 国土地理院時報, 125, 31-38.
- 6) Gomba, G., A. Parizzi, F.D. Zan, M. Eineder and R. Bamler (2016) : : Toward operational compensation of ionospheric effects in SAR interferograms: The split-spectrum method, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 54, 1446-1461.
- 7) Kobayashi, T., Tobita, M., Nishimura, T., Suzuki, A., Noguchi, Y., and Yamanaka, M. (2011) : : Crustal deformation map for the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, detected by InSAR analysis combined with GEONET data, *Earth Planets Space*, 63, 621-625.
- 8) 飛田幹男, 宗包浩志, 松坂茂, 加藤敏, 矢来博司, 村上 亮, 藤原智, 中川弘之, 小澤拓 (2005) : 干渉合成開口レーダの解析技術に関する研究. 国土地理院時報, 106, 37-49.
- 9) Costantini, M. (1998) : : A novel phase unwrapping method based on network programming, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 36, 813-821.
- 10) 気象庁 (2015) : 平成 27 年 (2015 年) の口永良部島の火山活動.
- 11) 気象庁 (2018) : 平成 30 年 (2018 年) の口永良部島の火山活動.
- 12) 気象庁 (2019) : 平成 31 年・令和元年 (2019 年) の口永良部島の火山活動.
- 13) 気象庁 (2020) : 令和 2 年 (2020 年) の口永良部島の火山活動.
- 14) 気象庁 (2017) : 平成 29 年 (2017 年) の焼岳の火山活動.
- 15) 気象庁 (2018) : 平成 30 年 (2018 年) の焼岳の火山活動.
- 16) 気象庁 (2019) : 平成 31 年・令和元年 (2019 年) の焼岳の火山活動.

筑後川下流用水施設における 機能診断調査での新しい知見と独自の取組

藤野 百江¹・井崎 靖²・松岡 良司³

¹独立行政法人水資源機構 筑後川下流総合管理所（〒830-0071 福岡県久留米市安武町武島 23-1）

²独立行政法人水資源機構 筑後川下流総合管理所（〒830-0071 福岡県久留米市安武町武島 23-1）

³独立行政法人水資源機構 筑後川下流総合管理所（〒830-0071 福岡県久留米市安武町武島 23-1）

筑後川下流用水施設（以下「下流用水施設」という。）の一部では、プレストレストコンクリート管（以下「PC管」という。）を採用している。PC管のカバーコートは、地下水中の侵食性遊離炭酸の影響により中性化、薄肉化し、内部のPC鋼線の発錆を招き管本体の破損に繋がる懸念される。そのため、当該施設の健全度を確保するべく、試掘調査等を実施した結果、カバーコート及びPC鋼線が健全であることを確認した。この要因分析として、年間を通じ地下水位が管頂以上と高いことや地下水の流動性が少ないことなどを立証したうえで、カバーコートの健全性を継続監視する上で効率的かつ経済的な調査手法も確立したことから、報告するものである。

キーワード：侵食性遊離炭酸、カバーコート、地下水、流動性、定点調査

1. はじめに

水資源機構が管理する下流用水施設は、筑後川から取水した水を福岡・佐賀の約3万haの受益地域に農業用水を供給する導水路施設である。

1998年度（平成10年度）の管理開始以降、施設の状態を適切に把握するため、非灌漑期に導水路管内を空水にした機能診断調査を計画的に実施している。

これまでに導水路延長約70kmのほぼ全線の調査は完了し、施設の変状が顕著に見られる区間は、劣化の進行性確認のため再調査を計画的に進めており、2017年度（平成29年度）には施設全体の機能保全計画書の策定を行ったところである。

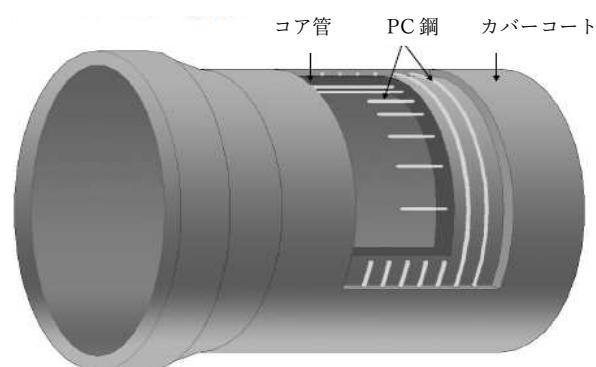


図-1 PC管の構造

2. 機能診断調査での新しい知見

(1) 機能診断調査の実施状況

下流用水施設の管水路区間は、全水路延長の8割以上を占め、採用している管種はFRPM管、鋼管、PC管及びDCIP管など様々である。

そのため、機能診断調査では、管内での近接目視調査のほか、たわみ量調査、塗膜厚調査、継手間隔調査、管底高測量及び可とう管調査などを各管種に応じて選択し実施している。施設の変状や計測値、過年度調査以降の進行性などから総合的に判断し、5段階（S-1～5）での健全度評価を行い、その結果を保全計画書へ反映するものである。



写真-1 PC管の劣化に伴う出水（他地区）

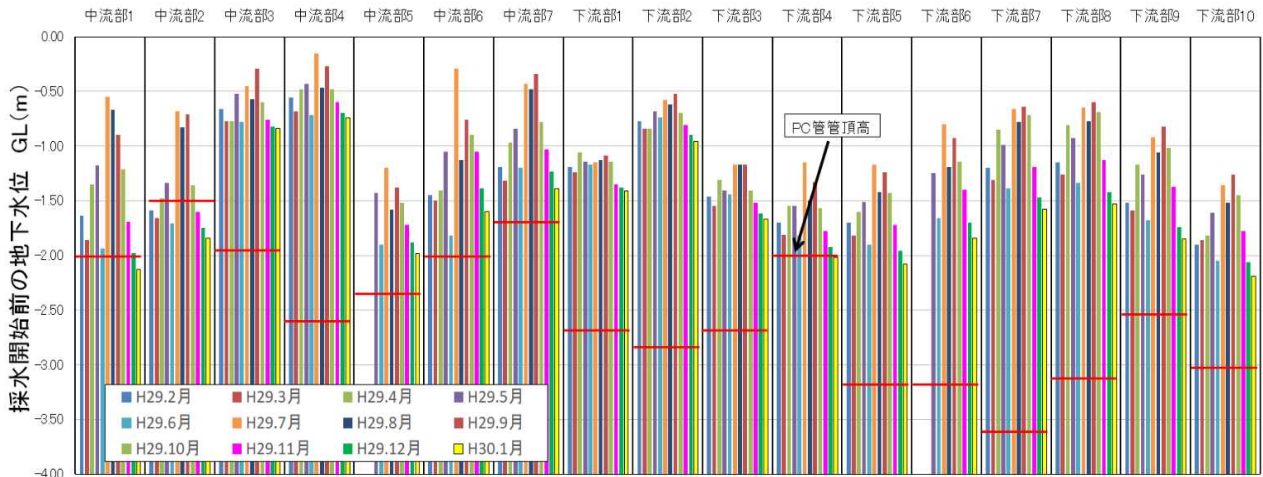


図-2 各観測孔における地下水位の年間推移

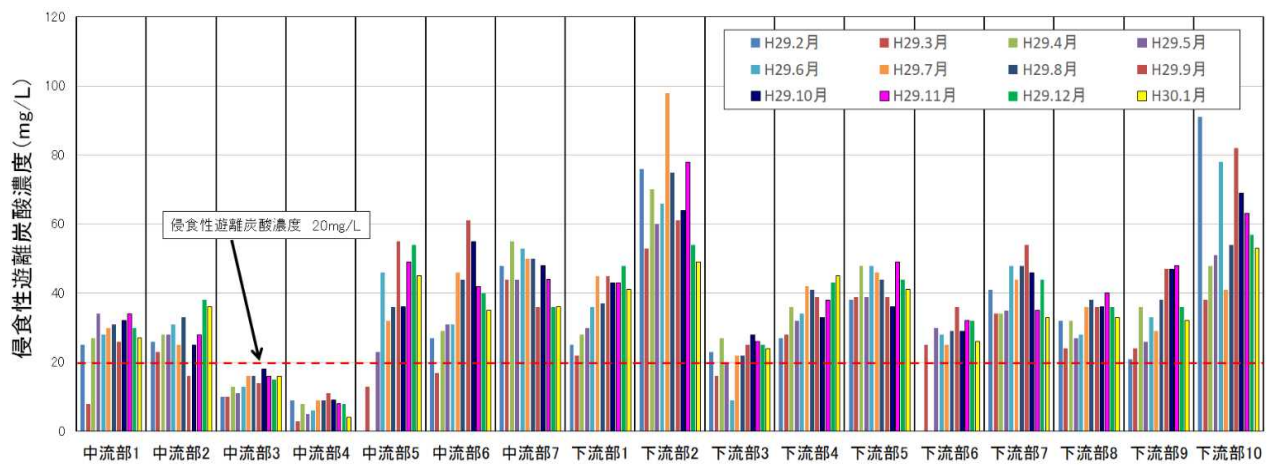


図-3 各観測孔における侵食性遊離炭酸濃度の年間推移

(2) PC管調査

水資源機構が管理する他地区の施設においては、図-1 に示すカバーコートの中性化に伴う PC 鋼線の破断による出水事故(写真-1)が発生している。下流用水施設においては同様の事故は発生していないものの、筑後導水路下流部では、約 5km にわたり PC 管を採用していることから、その劣化状況を把握するため、PC 管の周辺(埋設)環境を調査した。調査にあたり、管路近傍でボーリングを実施し、その後、地下水位観測孔(以下「観測孔」という。)として残置し水質調査等を行った。

a) 土壌調査

土壌調査では、全ての地点で PC 管本体の劣化に関する調査・診断マニュアル(以下「PC 管マニュアル」という。)¹⁾に規定される腐食性評価基準値未満であったことから、PC 管の劣化に影響を与える腐食性土壌では無いことを確認した。

b) 地下水位観測

地下水位観測では図-2 に示すとおり、ほぼ全ての観測孔において年間を通じて PC 管の管頂部以上に地下水位が推移していることを確認した。調査初年度の 2017 年度(平成 29 年度)は、過去 10 年間で 2 番目に降水量が少ない年であったにもかかわらず、PC 管周辺の地下水位は常に高い位置に推移していたも

のである。

c) 水質調査

水質調査において、PC 管のカバーコートの中性化、薄肉化させる重要な因子の一つである侵食性遊離炭酸濃度については、過去の破損事故等の事例に基づき PC 管マニュアルでは閾値 20mg/l を規定している。

図-3 に示すとおり、ほぼ全ての観測孔では年間を通じて閾値 20mg/L を超えており、さらに 3 倍以上の高濃度を示す地点も確認し、PC 管の劣化が懸念される結果となった。

d) 管外調査(試掘調査)

上記の調査結果を踏まえ、管の状態を直接確認するため管外調査(試掘調査)を実施することとした。



写真-2 管表面のマーキング状況



写真-3 チッピング箇所での地下水の浸出

調査地点は土地利用状況を踏まえ、2地点を選定した。試掘調査では地下水を排水するものの、翌朝には管頂以上に水位が回復している状況であったことから前述のb)地下水水位観測の内容を裏付けるものであった。

PC管の目視調査では、写真-2のとおり、PC管表面に建設当初の管製造番号等のマーキングが残っていたことと写真-3のとおりチッピング箇所におけるフェノールフタレイン溶液による中性化試験の結果及びPC鋼線の状況等から、カバーコートの侵食は少なく、PC管は比較的健全な状態であることが窺える結果であった。

そこで、カバーコートの健全性を詳細に確認するため、チッピングした箇所から採取したカバーコートの破片を組成鉱物に基づいて判定するX線回折分析を行った。表面部及び内面部における水酸化カルシウムの検出量と炭酸カルシウムの検出量を比較すると、劣化生成物である炭酸カルシウムが多く検出された。この結果から、カバーコート内では少なからず侵食性遊離炭酸濃度の高い地下水の影響を受けて中性化が進行する恐れがあることが判明した。

さらに、写真-3で判る通り、チッピングした直後は、地下水が浸出した状況も写し出していることから、その要因を確認するため、カバーコートの密度試験を行った結果、密度は2.25 g/cm³であった。これは地下水の浸透やJISで規定されている圧縮強度350kg/cm²を満足するために製造メーカーが定めている基準の密度(比重)をほぼ満足していたが、カバーコート内部への地下水の浸透を完全に防ぐことが出来ないことも確認することが出来た。

したがって、管外調査では、侵食性遊離炭酸濃度の高い地下水がカバーコート内部へ浸透しているにも関わらず、カバーコートが中性化・薄肉化することなく、PC鋼線が発錆することなく健全な状態であることが確認出来た。

e) 地下水の流向流速測定

前述の結果を踏まえ、侵食性遊離炭酸濃度が同様に高いにも関わらず、劣化が進行していない要因について、更に踏み込んで検討を行うこととした。

まず、当該地区と他地区との違いに着目したところ、当該地区で注目すべき事項としては恒常的に地下水水位が高いことが挙げられる。管外調査箇所における地下水水位は、前項で述べたとおり、管頂以上の高い位置に推移しており、観測孔における地下水水位の測定結果も高いことを踏まえ、地下水の流れに着目することとした。他地区の破損事例から、地下水が基礎材を流出させている事例もあったことから、当該地区における地下水の流れを把握するため、流向流速測定を実施した。2地点の観測孔での測定結果を図-4に示す。流速は98~112cm/日(0.068~0.078cm/分)程度と地下水の流動性は低い結果であった。これは、当該地区が広大な筑紫平野に平地部に位置しており、傾斜地や山間地、丘陵地の地下水と比較すると導水勾配がほとんど無いことが影響していると言える。

f) 新しい知見

これまでの調査結果を整理し、当該地区のPC管の健全性の根拠を整理する。

- ① 試掘調査の結果、地下水が含まれていたにも関わらずカバーコートやPC鋼線は健全であった。
- ② PC管周辺の地下水中には、高濃度の侵食性遊離炭酸が含まれており、PC管の劣化が懸念された。
- ③ PC管周辺の地下水は、年間を通してPC管の管頂以上と高く、PC管が常時地下水中に浸された状態である。
- ④ 平地部に埋設されていることから、地下水の導水勾配が殆ど無く、PC管周辺の地下水の流動性は低い。

以上の調査結果から、侵食性遊離炭酸濃度が高い地域であっても、地下水中に管が浸されていることでカバーコートが乾湿を繰り返さないこと、すなわちPC管に新たな地下水が連続的に供給されないことで、カバーコートの健全性が保たれていることが本調査によって立証できた。

また、劣化因子である侵食性遊離炭酸についても濃度が高い状態は危惧すべき内容であるが、地下水の状態によっては健全な状態が保たれているという新しい知見も得た。

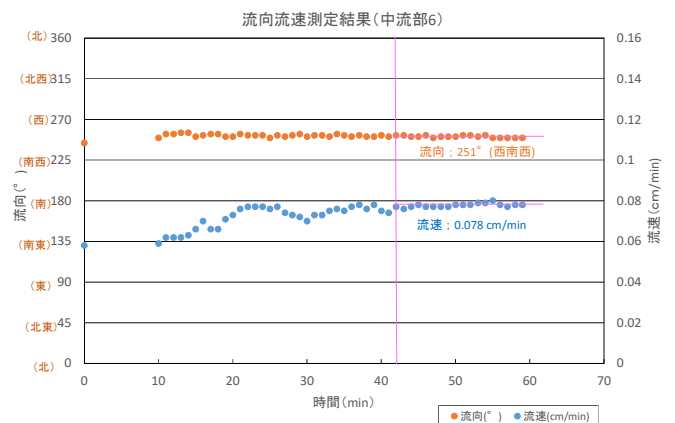


図-4 流向流速測定結果

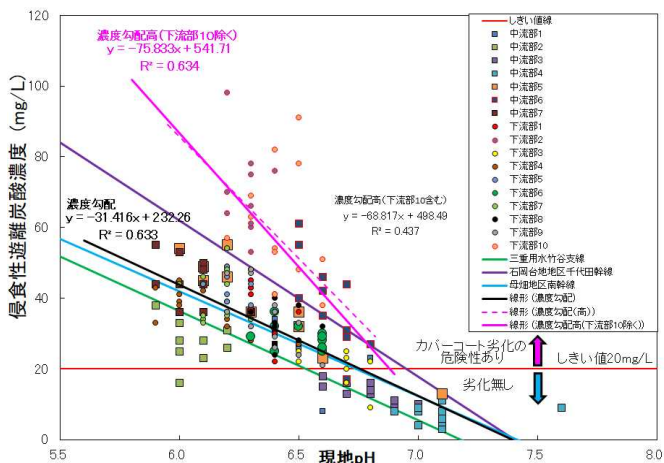


図-5 現地 pH と侵食性遊離炭酸濃度の相関図

3. 独自の取り組み

(1) 後継調査としての定点調査手法

今後、周辺環境の変化により地下水位が管体以下に低下するなど水位変動を繰り返したり、更なる水質悪化が進行する場合には、カバーコートの中性化・薄肉化の進行が急速に早まる危険性もある。そのため、カバーコートの健全性を継続監視する必要があるが、従前より実施している空水調査では費用や手間を要するだけでなく、数年に一度しか実施出来ないことから劣化傾向を掴みにくいことが課題として挙げられる。

この課題を解決するため、効率的かつ経済的な調査手法として、既存の観測孔を利用した地下水位観測を月1回実施することとした。また、一般的に、侵食性遊離炭酸濃度と水素イオン濃度 pH とは相関性があると言われていていることに着目し、本調査地区全体の現地 pH と侵食性遊離炭酸濃度の相関図を図-5に整理した。この相関式を基に、観測孔にて地下水位の観測に併せて現地 pH を計測し、侵食性遊離炭酸濃度を算出して、地下水の変動を確認することとした。万が一、pH が低下し酸性側に変化した場合には、室内での分析を行い侵食性遊離炭酸濃度を詳細に確認することで、管周辺の環境の変化を速やかに把握

し、その結果によっては試掘調査や管内調査などを検討することとした。

定点調査については、現在まで約4年間、月1回の観測を継続しているが、現地 pH も酸性側へ大きく変動することはなく、地下水位も管頂以上と高い位置に推移しているという傾向が掴めている。なお、侵食性遊離炭酸濃度は依然として高いものと想定されるが、地下水位が高い状態は変わらないことから、カバーコートの劣化のリスクは少ないものと推測出来る。

このことは、継続的に PC 管の状態を把握する上で効率的かつ経済的な調査手法で、通常時でもカバーコートの状態把握が可能となり、下流用水独自の取組として今後も継続したいと考えている。

4. おわりに

今回、PC 管周辺では侵食性遊離炭酸が高濃度であり、調査開始時は PC 管の劣化が危惧されていた。しかし、当該地区特有の現地条件（地下水位が年間を通して管頂以上と高いことや、平地部で動水勾配が小さく地下水の流動性が少ないこと）から、侵食性遊離炭酸等の濃度が高い埋設環境下でも PC 管の健全性が保たれているという新しい知見が得られた。また、施設の状態を継続して把握するために重要な定点調査が、手間と費用に係る試掘調査や管内調査ではなく、観測孔を利用した地下水等の観測を月1回実施することで、周辺環境の変化に伴う施設状態の想定が可能となったことは大きな成果である。

今後、施設の老朽化は確実に進行していくため、施設の状態を正確に把握し、適切に保全管理することが求められる。あわせて利用者へ安心安全な水を安定して供給し続けることが、我々施設管理者の使命であると考えます。

参考文献

- 1) 独立行政法人水資源機構. 2012. PC 管本体の劣化に関する調査・診断マニュアル(案)

電磁波レーダを用いたRC床版上面の 滞水早期検知に関する取組み

岩谷 祐太¹・石田 雅博¹・藤木 裕二¹・夏堀 格¹

¹ (国研) 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

近年、RC床版上面の土砂化が顕在化しており、床版の抜け落ちに至る事例も見られている。土砂化は、床版下面の変状との相関が明確ではなく、定期点検による床版下面の近接目視のみでは早期発見が難しい。そこで、土砂化の発生要因と考えられる床版上面の滞水に着目し、非破壊検査手法である電磁波レーダを使用したRC床版上面の滞水検知手法について検証を行った。検証の結果、電磁波の反射強度の違いから、滞水の有無及び範囲を視覚的に判断することが可能であることが分かった。また、作業効率化及び定量的な評価を行うため、AIを用いて電磁波レーダの計測結果から床版上面の滞水を自動推定可能なアプリケーションを構築した。

キーワード RC床版, 土砂化, 電磁波レーダ, 滞水, AI

1. はじめに

道路橋では、2014年の道路法改正により5年に1度の頻度で近接目視を基本とする点検（以下、定期点検）が義務化されている。これは、道路構造物で老朽化による変状が顕在化してきたことを背景に、道路構造物の状態を適切に把握し、その後の診断・措置といったメンテナンスにつなげるためのものであり、道路橋定期点検要領及び橋梁定期点検要領において橋長2.0m以上のものに対して行うこととされ、現在2巡目の定期点検を行っているところである。道路橋定期点検要領及び橋梁定期点検要領における既設床版の劣化・損傷状況の点検は、主な着目箇所の例として床版下面及び舗装面が挙げられており、実際の現場でも床版下面からの外観目視および舗装面のひび割れ等の発生状況の目視確認により行われている¹⁾²⁾。しかし、輪荷重による疲労、材料劣化等により生じるRC床版上面の土砂化は、舗装のポットホールや床版下面のひび割れおよび漏水痕などの外観変状との相関が明確でなく、現状の定期点検では床版上面の土砂化の発生や進行を見落とすリスクを抱えている。

加えて、1993年のスパイクタイヤ規制以降、凍結防止剤の散布量が増加しており³⁾、塩分を含んだ水が床版へ浸入し、床版下面に変状が発生していなくても、床版上面が土砂化している事例が報告されている。写真-1は、供用後10年経過した橋梁の舗装開削後のコンクリート床版上面の状況である。全面的に土砂化が発生していることが確認できる。また、写真-2は前回の定期点検時には

明確な変状が見られず、対策不要と判定されていた箇所、数年後に床版下面の抜け落ちが発生した事例である。このように床版の土砂化は、損傷の進行が速いことが特徴となっている。これらは、路面からの水が床版上面に浸入し、輪荷重による疲労劣化を促進するだけでなく、凍害、塩害等のコンクリートの劣化を誘発することが原因と推察される。

床版上面の滞水は、舗装や床版の劣化状況からその有無を推測することは可能だが、多くの場合変状箇所の舗装を開削して初めて確認され、この時点で既に床版の性能が著しく低下していることがある。また、変状箇所の舗装開削により局所的な滞水を確認することは可能であっても、橋梁全面の滞水箇所を面的に把握することはできず、潜在的な劣化リスクを抱えている箇所を全て特定

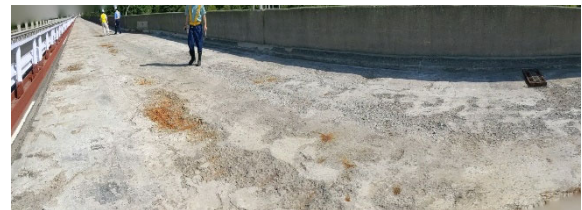


写真-1 舗装開削後の土砂化が進行した事例



(a)前回の定期点検時 (b)床版下面抜け落ち時
写真-2 床版下面の抜け落ち事例

することは困難なのが現状である。

膨大な量の道路橋を効率的に維持管理していくためには、潜在的な劣化リスクを抱えた箇所をスクリーニングし、劣化が生じる前に予防保全対策を実施することが重要である。そこで本稿では、非破壊検査技術の一つである電磁波レーダを使用した床版上面の滞水検知手法の検討結果について報告する。

2. 電磁波レーダ法の原理

電磁波レーダ法は、電磁波が金属以外の媒質を透過し、透過した媒質と異なる比誘電率を持つ媒質の境界で反射する性質を利用し、物質内部を非破壊で探査する手法である。探査原理は、図-1に示すように電磁波を媒質中に送信器から放射し、反射した電磁波（以下、反射波）を受信アンテナで受信し、反射波が返ってくるまでの時間から深さ方向の位置を推定するものである。平面的な位置は、距離計を内蔵した装置を移動させることで位置情報を得る。

電磁波の速度は、真空中の速度（ 3×10^8 m/s）が基準となり各媒質に対する固有の速度で伝わる。各媒質内での伝播速度は、各媒質の固有の比誘電率に依り、式(1)の速度で進む。

$$V = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

ここで、

V ：各媒質における電磁波の速度（m/s）

ϵ_r ：各媒質の比誘電率

電磁波が媒質の異なる境界面に達すると、その境界面で一部反射し残りは透過する。境界面に電磁波が垂直に入射する場合、この反射と透過の割合は境界面で接する二つの媒体の比誘電率によって決まり、式(2)により反射強度として表すことができる⁹⁾。比誘電率の概略値を表-1に示す。アスファルトとコンクリートでは比誘電率に大きな差はなく、反射強度は小さい値となる。一方、水の比誘電率は大きいため、舗装下に滞水が生じていた場合反射強度は大きい値となる。電磁波レーダの計測結果を図化した場合、この反射強度の違いが白黒の濃淡となって表示される。

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (2)$$

ここで、

R ：反射強度

ϵ_{r1} ：上層の比誘電率

ϵ_{r2} ：下層の比誘電率

電磁波レーダには、ハンディ式、カート式、車載式といくつかの種類があるが、本研究では交通規制を伴わず一度に広範囲を計測可能な車載式電磁波レーダを主に用いている。外観および仕様について、写真-3及び表-2に示す。

3. 実橋における電磁波レーダの適用

積雪寒冷地に架橋され、冬季には凍結防止剤が散布される鋼橋のRC床版において、車載式電磁波レーダによる計測を実施した。本橋梁は上り線と下り線で供用年数が異なり、上り線は39年、下り線は7年である。車載式電

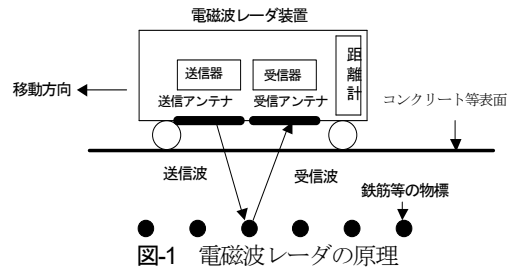


図-1 電磁波レーダの原理

表-1 比誘電率の概略値

材料	比誘電率
アスファルト	2~4（乾燥状態）
	6~12（湿潤状態）
コンクリート	4~10（乾燥状態）
	10~20（湿潤状態）
水	81



写真-3 車載式電磁波レーダ外観

表-2 車載式電磁波レーダ仕様

項目	仕様	性能
測定速度	推奨 40km/h	80km/h
距離測定	車速信号取得	精度±0.3%以内
電磁波	マルチステップ周波数方式	200MHz~3GHz
	アンテナ幅1.8m	有効測定幅員1.5m
	チャンネル数21	走行方向 7.5cm 間隔 走行直角方向 7.5cm 間隔 深さ方向 1.0cm 間隔

磁波レーダによる計測結果を図-2に示す。ここで、図上段が計測時に併せて取得した路面画像、図中段が床版上面付近で計測した電磁波の反射強度の違いを濃淡で表した平面コンター図、図下段が平面コンター図の緑破線位置における縦断スライス図である。平面コンター図は、反射強度に差がない、即ち水が存在しない場合は濃淡の変化の少ない一様な色調で表示される。平面コンター図を見ると、供用年数が短い下り線は全体的に一様な色調であるのに対し、供用年数の長い上り線では局所的に白いまだら模様が生じている。これは、舗装下に生じた滞水により反射強度が大きくなったためと考えられる。次に縦断スライス図を見ると、下り線では舗装と床版の境界面の反射が連続的に確認できているが、上り線では部分的にがたつきが生じ、境界面の反射が不連続となっている。同位置の舗装面では土砂噴出が確認されており、床版に土砂化が生じていると考えられる。

このように、電磁波レーダを用いることで滞水の有無を視覚的に判断可能であるが、判断のためには平面コンター図及び縦断スライス図を人間の目で1つずつ確認する必要があり、多大な労力を要する。また、判断基準が定性的であり、判断する人間により結果にばらつきが生じるおそれがある。

以上のような課題への対応策として、AIによる機械学習を用いて、電磁波レーダの計測により取得した波形データから床版上面の滞水を自動推定する手法について検討を行った。

4. 機械学習による滞水自動推定手法の検証

(1) 機械学習の概要

機械学習とは、コンピュータにデータを学習させ、アルゴリズムに基づき分類や予測などのタスクを遂行する技術のことをいう。本検討では、電磁波レーダ計測で取

得した床版上面付近の波形データと、舗装を開削し計測した床版上面の水分量を学習データとし、それをAIに学習させる教師あり学習を実施し、構築した学習モデルに任意の波形データを入力することで、床版上面の水分量を正確に推定できるかを検証した。

(2) 学習データの整備

AIに学習させる電磁波レーダ計測による波形データは、中部地方に位置する橋梁にて写真-3に示した車載式電磁波レーダを用いて取得した。また床版上面の水分量は、電磁波レーダ計測後に舗装を開削し、露出したコンクリート床版上面で電気抵抗式水分計を用いて計測した。電磁波レーダの計測結果（平面コンター図）及び床版上面水分量の計測結果を図-3及び図-4に示す。なお、

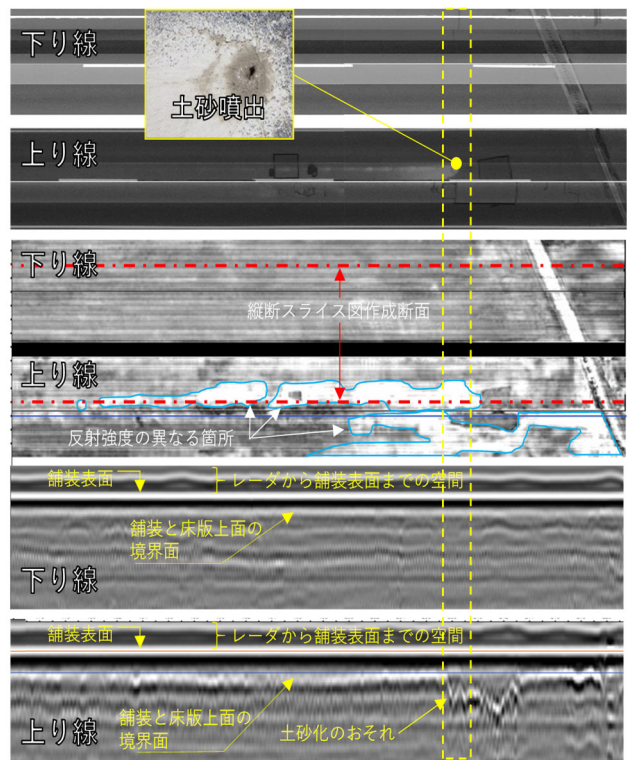


図-2 車載式電磁波レーダによる計測結果

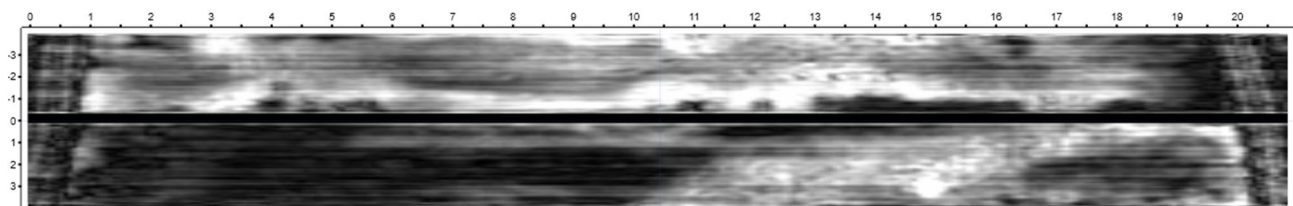


図-3 車載式電磁波レーダ計測結果

A1	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	1550	1600	1650	1700	1750	1800	1850	1900	A2
0	170	160	833	282	265	213	212	360	140	484	536	521	251	462	520	555	521	298	276	632	578	600	579	887	841	598	723	521	535	708	628	877	688	860	298	820	317	571	530	
50	310	437	521	184	223	657	176	207	194	183	286	599	601	828	851	783	762	267	263	139	520	521	524	384	214	257	588	545	333	181	785	521	822	539	537	282	518	651	817	
100	325	325	192	184	220	235	430	131	156	297	333	242	308	398	875	186	107	198	164	244	269	150	122	264	213	900	475	206	536	218	639	838	868	302	101	238	141	155	157	
150	120	158	99	178	80	157	159	175	151	105	90	129	113	146	111	107	107	128	151	90	152	150	201	870	834	452	520	247	536	149	273	166	162	201	208	181	171	148	212	
200	167	196	124	45	138	135	104	123	125	123	139	108	108	62	84	152	104	158	105	88	136	180	189	176	726	586	532	698	904	183	187	178	170	156	185	166	129	145	198	
250	216	206	144	193	135	147	206	109	148	137	116	146	150	146	117	100	76	63	75	112	132	126	226	531	537	571	564	715	915	763	171	171	132	145	150	143	132	152	599	
300	226	184	133	162	208	222	234	135	198	193	194	177	135	223	250	197	141	158	187	231	74	205	171	438	915	753	301	665	600	202	110	163	231	72	145	132	240	210	169	
350	363	110	238	259	224	209	354	322	241	132	123	179	242	160	224	176	211	187	187	211	172	188	283	261	805	286	258	256	831	235	241	189	304	199	250	163	329	167	522	
400	147	245	256	217	247	219	184	240	174	247	135	180	192	123	189	207	201	209	103	158	165	132	140	175	278	266	202	142	160	143	181	231	165	225	67	138	229	113	149	
450	534	537	688	520	378	93	525	525	644	521	339	347	238	542	248	598	538	535	554	532	236	524	683	629	685	492	233	535	532	321	160	283	522	522	609	298	644	719	489	

図-4 床版上面水分量計測結果

床版上面水分量を計測した範囲は図-4 の赤囲み部である。

電気抵抗式水分計は、床版防水施工時に床版上面水分量を測定することを目的とした製品であり、計測面の水分量をカウント値（電気抵抗換算値）として表示でき、これが大きければ水分量が多いことを意味する。水分計の仕様を図-5 に、水分状態とカウント値の関係を図-6 に示す⁵⁾。

(3) 分類モデルの構築

前記のデータを AI に学習させた場合、任意の波形データを入力することでカウント値を推定する学習モデルとなるが、カウント値のままでは目で滞水が生じているか分かりづらい。そこで、推定したカウント値から床版状態を健全部、湿潤部及び滞水部の3つに分類する分類モデルを構築することとした。水分量による床版状態の分類基準は、図-6 の水分状態とカウント値との関係を参考に表-3 とした。この分類基準に従い、実際に橋梁上で計測したカウント値から得られた床版状態の分布を図-7 に示す。横方向が橋軸方向（車両走行方向）、縦方向が橋軸直角方向である。白色が健全部、薄い水色が湿潤部、濃い青色が滞水部を示している。分類モデル構築に用いるアルゴリズムは、分類精度や計算コスト等を考慮し複数のアルゴリズムで検証した結果、最も分類精度の高かったランダムフォレストを採用した。

(4) 分類モデルによる滞水推定

ランダムフォレストを用いて構築した分類モデルに、学習に用いた図-3 の波形データを入力して得られた滞水推定結果を図-8 に示す。図-7 の実際の床版状態の分布と類似した結果を示しており、精度良く推定できることを確認した。

仕様	
(1) 測定方式	電気抵抗式
(2) 検量線	カウント（電気抵抗換算値）
(3) 測定範囲	10～990カウント



図-5 水分計の仕様

コンクリート表面の水分状態	カウント値の目安						
① 絶乾状態	10	55					
② 乾燥状態	60	132					
③ 表面乾燥状態		137	230				
④ 湿潤状態			235		520		
⑤ 滞水状態					521	744	
		100	200	300	400	500	600
							700
		電気抵抗式水分計（カウント値）					

図-6 水分状態とカウント値との関係

表-3 水分量による床版状態の分類基準

床版状態	分類基準
健全部	水分量 ≤ 230
湿潤部	230 < 水分量 ≤ 520
滞水部	520 < 水分量

5. 模型供試体を用いた推定精度の検証

(1) 模型供試体の概要

上記の滞水推定結果は、機械学習に使用した1橋のものにのみのものであり、舗装厚等諸条件が異なる場合にも同様の精度が確保できているか検証する必要がある。そこで、当研究所が保有する舗装と床版の境界部に滞水を模擬できる模型供試体を用いて推定精度の検証を行った。

模型供試体の概要図を図-9 を示す。供試体の寸法は2.0m×2.0m、主筋のかぶり厚が40mmとなっており、舗装と床版の間には床版防水層（Wp）が施工されている。また、舗装と床版防水層の間（As/Wp）と床版防水層と床版上面の間（Wp/Co）の2パターンの滞水状況を再現できるようにしており、各層に厚さ1mmのゴム板で50cm四方の滞水スペースを作り、滞水スペース内に注水孔と排水孔を設けることで供試体内部への水の出し入れを可能とした（写真-4）。滞水スペースに注水した供試体を電磁波レーダで計測し、その波形データを用いて滞水推定を行った。模型供試体の電磁波レーダ計測結果（平面コンター図）を図-10、滞水推定結果を図-11 に示す。縦

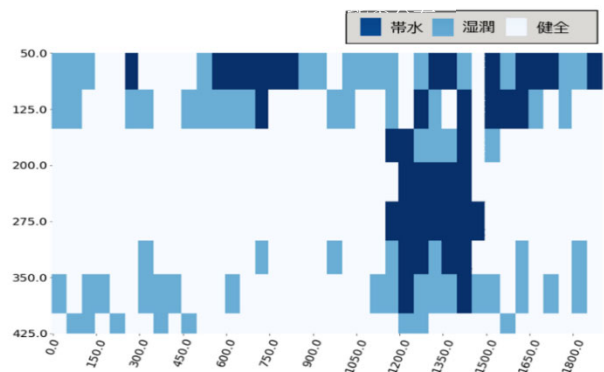


図-7 実際の床版状態の分布

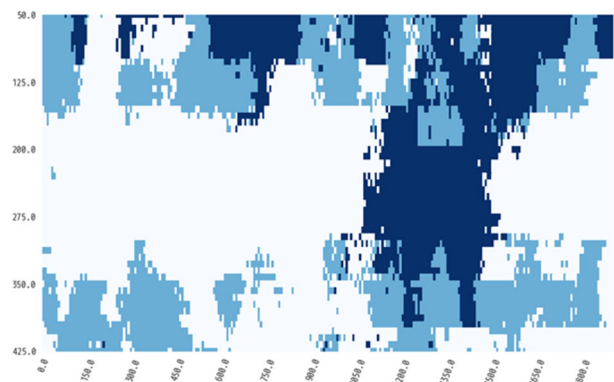


図-8 AIによる滞水推定結果

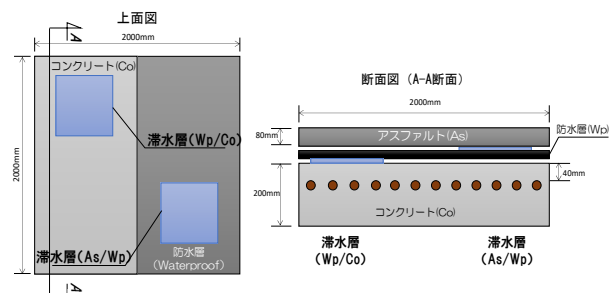


図-9 模型供試体概要図

軸及び横軸は計測長と幅員を表しており、図-10 の左上と右下の滞水スペース部に白い模様を確認できる。これは設計通りに滞水スペース内に水が存在していることを示している。図-11 でも同様に左上と右下の滞水スペースを滞水部と推定している。滞水スペース以外の部分については全体的に湿潤部と判定しており、一部滞水部と推定している部分も確認された。健全部と湿潤部の区別は難しいものの、滞水スペースに注水した水については概ね推定できており、構築した分類モデルが舗装厚等異なる条件下においても比較的精度の良い推定結果を示すことを確認できた。

6.滞水推定結果の活用方法

出力した滞水推定結果を活用することで、目視では確認できない床版上面の診断・措置につなげることが可能である。図-12 は図-2 の橋梁の上り線の計測結果を用いて出力した滞水推定結果である。舗装打継目周辺や路肩部、及び伸縮装置付近に滞水（青色部）が推定されているのが確認できる。これは、施工打継目や地覆及び伸縮装置との境界の目地部から雨水が浸入したためと考えられる。このような場合の措置としては、止水シールや目地充填材等の止水工法による止水や、舗装の打換えによる排水がある。舗装面や床版下面の劣化状況と組み合わせることで、優先順位をつけつつ適切な予防保全を行うことができると考えられる。

7.おわりに

電磁波レーダを用いて RC 床版上面の滞水を早期に検知することにより、事後保全型メンテナンスから予防保全型メンテナンスへと転換でき、補修コストの低減にもつなげることができる。今後も引き続き実橋を用いた検証等を行い、滞水推定の更なる精度向上や、電磁波レーダを用いた点検の留意点等の整理を行っていく。

謝辞：本研究は、「官民研究開発投資拡大プログラム（PRISM）」及び「AI を活用した道路橋メンテナンス効率化に関する共同研究」の成果の一部である。また、研究の実施にあたり、調査フィールドを提供頂いた各道路管理者には多大なるご協力を頂きました。ここに謝意を記します。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領，p.36，2019.
- 2) 国土交通省道路局：橋梁定期点検要領，p.54，2019.
- 3) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：凍結防止剤散布と沿

- 道環境，国土技術政策総合研究所資料，第412号，pp.6-32，2007.
- 4) 松井繁之：移動荷重を受ける道路 RC 床版の疲労強度と水の影響について，コンクリート工学年次論文報告書，Vol.9，No.2，pp.627-632，1987.
 - 5) 谷倉泉，榎園正義，後藤昭彦：床版防水工における水分計の適用性に関する研究，構造工学論文集，pp.1122，2012.

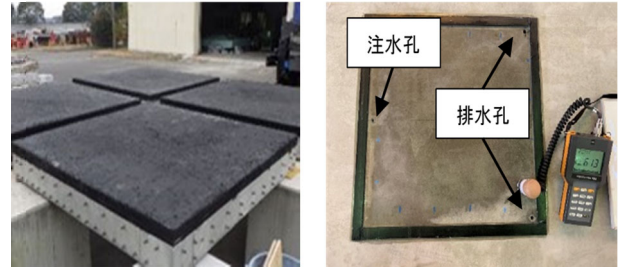


写真4 模型供試体外観と滞水スペース

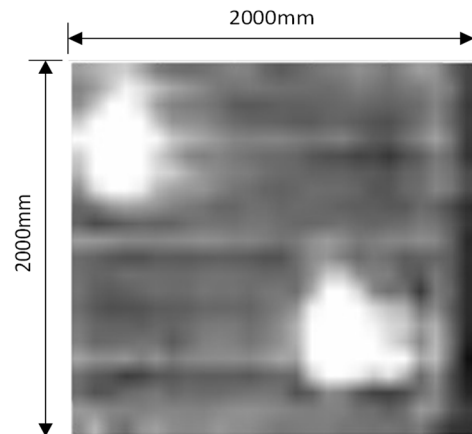


図-10 模型供試体の電磁波レーダ計測結果

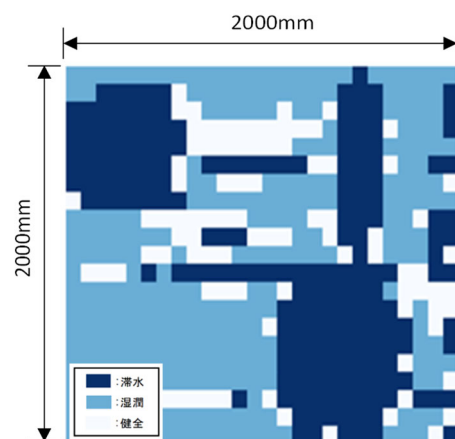


図-11 学習モデルによる滞水推定結果

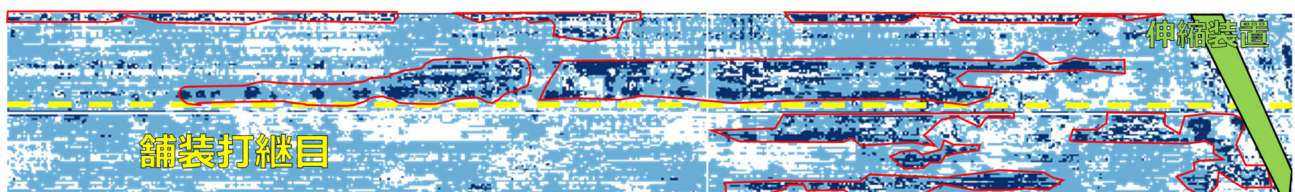


図-12 滞水推定結果

大河津分水路改修（令和の大改修）における 新しい監督・検査のあり方について

山根 恭子¹・南 健二²

¹北陸地方整備局 信濃川河川事務所 大河津出張所 管理第二係長（〒959-0123 新潟県燕市大川津）

²北陸地方整備局 信濃川河川事務所 事業対策官（〒940-0098 新潟県長岡市信濃1丁目5番30号）。

新型コロナウイルスは、日本社会においても、非接触型ニーズを高め、あらゆる分野や産業でデジタル化を急拡大させた。デジタル化された技術やサービスが成長領域として立ち上がり、デジタル化による変革「デジタル・トランスフォーメーション」をさらに加速させる。建設現場においても遠隔臨場の推進により工事の生産性向上を図っているところである。本稿では、大河津分水の改修事業において実施している最新の遠隔臨場に関する取り組みと、それをふまえた工事監督・工事検査のあり方について、今後の構想を述べる。

キーワード 大河津分水路改修, DX, BIM/CIM, 遠隔臨場

1. はじめに

我が国は人口減少・高齢化が進行しており、バブル崩壊以降、経済成長も停滞している。加えて、コロナ禍では人と人との接触を避ける非接触形式のニーズも高まっている。

建設産業においても就業者数の減少、特に、中長期的な担い手確保は急務であり、IoTやAIに代表される先端デジタル技術の活用により、建設生産システム全体をデジタル化・自動化し、業務・サービスの高度化、それらによる働き方そのものを変革するデジタルトランスフォーメーション（以下、DXと記す）に向けた動きが活発化している。そして、伝統的に行われてきた対面式のスタイルがオンライン化されることにより、新たな付加価値を持つようになった。

建設現場においてもデジタル化や電子化の動きは以

前から存在していたものの、旧来の制度、慣習などにより、ゆっくりとした普及拡大にとどまっていた。今回の新型コロナウイルス蔓延拡大防止により非対面式は常態化され、デジタル化による変革としてDXによる工事の生産性向上に関する取り組みが推進されている。

このような建設現場を取り巻く環境下のなかで、信濃川河川事務所は国土交通省の「i-Constructionモデル事務所」に指定され、特に大河津分水路改修事業（以下、本事業と記す）は、「3次元情報活用モデル事業」（施工段階）として位置づけられている。

大規模な河道掘削や構造物の改築を伴う本事業において、工事の生産性向上や品質確保を図るために、3次元モデルを併用した遠隔臨場の試行内容について、事例に基づき紹介するとともに、新たな技術を活用した工事監督や工事検査の構想等について報告する。

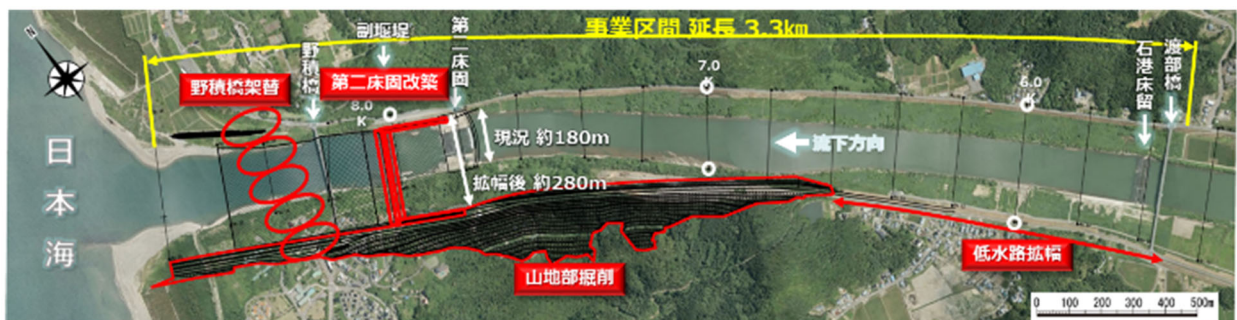


図-1 大河津分水路改修事業の概要

2. 大河津分水路改修事業（令和の大改修）の概要

大河津分水路は、信濃川の流量を調節し、下流に位置する越後平野を洪水から守る機能を持つ。しかし、現状の河口付近において、洪水を安全に流下させる断面が不足していることから、本事業により山地部の掘削及び低水路拡幅で断面を確保する工事を行うとともに、老朽化が進む第二床固の改修も行っている。また、河口付近の川幅が広がることから、国道402号野積橋の架け替えを行うものである。（図-1、2参照）

本事業を円滑に進めるにあたり、特に課題となるのは以下の三点である。

- ① 事業期間が18年間と長期に及ぶこと
- ② 多数の関係者との協議・調整を要すること
- ③ 複数の工事が同時に進行すること

このような複雑・長期にわたる事業を、効率的・効果的に執行・監理するためには、視覚的に理解しやすく、また多様な情報を一元的に管理できるツールが必要である。そこで、本事業ではBIM/CIMを全面的に導入することとした。



図-2 大河津分水路位置図

3. 一般的な遠隔臨場

遠隔臨場は、一般的に以下のように実施されている。

- ① 受注者が現地のウェアラブルカメラ映像を配信
- ② 発注者がPCもしくはタブレットにより現地から配信される映像を確認（図-3参照）

上記の方法により、受発注者が現地映像をリアルタイムに共有することができ、モニターに映ったカメラ映像により必要な視覚的情報が得られる。立会臨場に比べると、時間的制約が格段に減り、工事の生産性向上につながる取り組みといえる。加えて、昨今のコロナ禍では、普段顔を合わせない人同士の接触は特に避ける必要があることから、感染拡大防止の観点からも、



図-3 タブレットを用いた遠隔臨場の実施状況

臨場方法として遠隔を選択する場面が増えている。

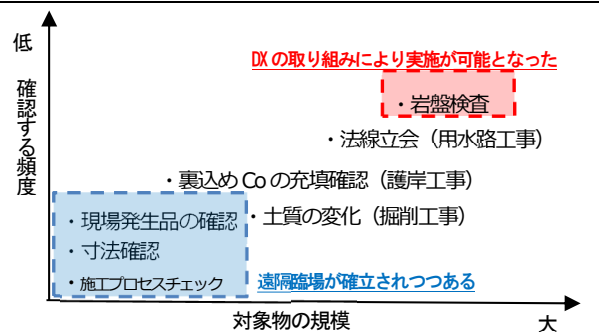
問題点として挙げるとすれば、モニターから得られる平面的かつ限定された情報では、工事現場全体を確認することができないため、構造物同士の位置関係を把握しづらい点にある。また、不可視部などの「段階確認」は共通仕様書で定められていることなどから、工事監督員自ら、直接目視をした形で実施することが必要ではないかと感じることもある。

公共工事では、税金を投じて施工された完成物が、長きにわたり健全な状態で残されることが求められる。工事の施工においては、契約書に定めるとおり、受注者責任ではあるが、遠隔臨場を定着されるためには、工事の品質は確保しつつ、受発注者双方ともに工事の生産性向上を実現することが求められる。なお、現時点において、本事業に係わる工事受注者の意見や監督員（現場技術員含む）の意見を整理して結果を示す。（表-1参照）

また、R3年度上半期に試行した臨場項目について、遠隔臨場の適性を評価した。（図-4参照）なお、後述する大河津DXの取り組みにより、遠隔臨場特有の、出来形及び品質の確認に関して新たな優位性も得られた。

表-1 遠隔臨場に対する意見

受注者の意見
○監督員との時間調整がしやすい。
△作成する工事書類は従来と同じ。
×使い慣れていない。
×通信環境が悪い。
×現時点の試行段階では費用全額を発注者負担はよいが、その後は不透明。
×発注者側のセキュリティの都合で、端末は受注者が用意する。
発注者の意見
○現場への移動時間がなくなり、日程調整が楽になった。
○作業服に着替えることは多い。（スカートのままでよい髪型も崩れない）
○狭い部など同時に複数人で立ち会いことが出来ない箇所は、PC画面を通じ、一同に介して確認できる。
○監督員の仕事について、先輩から後輩へ技術の伝承（人材育成）
×遠隔機器（PC、タブレット、ソフトなど）は工事毎に異なり、工事の本数だけ機材があり、扱いが煩雑。
×視覚的情報が限定され、工事現場全体を確認することができない。
×不可視部分は直接目視が必要な時もある。



※R3 上半期 大河津出張所管内の工事における臨場項目を基に整理

図-4 遠隔臨場の適性（施工体制、出来形、品質）

4. 大河津分水路改修事業におけるDXの取り組み

大河津分水路改修事業では「大河津DX」として、BIM/CIM活用を組み合わせた遠隔臨場を行っている。大河津DXでは、通常の現場での臨場でも目視できない水面下の状況確認等が可能となる。以下、その取り組み事例について紹介する。

(1) 新第二床固改築工事の概要

既設の第二床固は大河津分水路の河口付近である7.8kに位置し、大河津分水路全体の河床洗掘を防ぐために昭和6年に構築された。しかしながら、竣工後100年近くが経過し、老朽化による機能低下が懸念されている。

新第二床固改築工事は、施設の老朽化、河床低下による構造物の安定性低下対策として、新しい川幅に合わせて、既設の第二床固より約200m下流に、新たに第二床固を施工する。(図-5参照)

工事施工箇所は、河川の流水に加え、海上からの強風、波浪の影響を受ける非常に厳しい条件下であり、限られた施工期間の中で着実に施工をしなければならない。床固施工にあたり、鋼殻ケーソンを順次曳航、据付、設置、固定の作業を実施する。そして新設する第二床固本体工の下流側には、減勢工及び護岸工の施工を行う。



図-5 第二床固 (既設・新設)

このように、現河道に流水させながらの工事施工であり、台船の活用や潜水作業を伴う、水中施工主体の工事である。鋼殻ケーソンを設置する前の岩盤検査や水中コンクリート打設の状況など、直接現場に立ち入ることができない現場特性でもある。

本工事で行った岩盤検査は、事前に行った水中打球探査の状況やその測定結果を、仮想空間内で再現するという方法で、岩盤の状況を遠隔立ち会いすることを試行した。

以上の状況から、本工事では特に、水面下であったり、永久に不可視部分になってしまう構造物の品質を、いかにして確保するかが課題とされる。これまでは、写真やデータの表記された書面(数値的評価)により

工事の品質を判断しているのみであったが、仮想空間に遠隔から入り込むことで、直接現場に立ち入った状況を再現可能となった。

(2) 本工事における遠隔臨場の取り組み

本工事では、従来のようなPCに加えて、VRを利用した臨場に取り組んでいる。受発注者がそれぞれのPCとVRゴーグルを用い、同じ仮想空間に遠隔から入り込むのである。(図-6参照)

現段階での試みでは、受注者があらかじめ撮影した三次元画像を仮想空間とし、発注者がVRゴーグルを用いて段階確認などを行っている。したがって、従来の遠隔臨場とは異なり、リアルタイムに現地を確認しているわけではないが、以下の三点が大きな利点である。

- ① 受発注者が別々の場所から同一の仮想空間に入り込むことで共通の認識を持つことができること
- ② 発注者自ら確認したい位置に近づくことができること
- ③ BIM/CIM活用と組み合わせ、三次元モデルを取り入れた遠隔臨場が可能であること

特に③に関しては、まさに建設工事におけるDXの先進的な取り組みであり、本工事をモデルケースとした大河津DXとして、利点や課題を抽出することで、他工事への展開の礎となることが期待される。(図-7参照)



図-6 VRゴーグルを用いた遠隔臨場の実施概念図

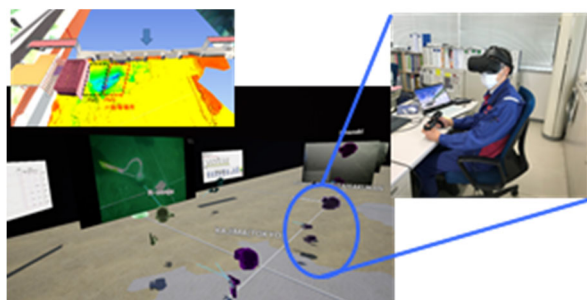


図-7 CIMモデルと遠隔臨場の組み合わせ

5. 今後の構想 - 令和時代の「工事監督・工事検査」の取り組み

本章では、これまでの遠隔臨場の実績をふまえ、令和という新しい時代における工事監督・工事検査について、今後の構想を述べる。なお、以下に述べる構想

は、新第二床固改築工事において実際に試行することを予定している。

(1) より正確な現地状況の把握

現地に360°カメラを設置し、リアルタイムで映像を配信する。受発注者はVRゴーグル等により同一の仮想空間に入り込み、その仮想空間にてリアルタイム映像を見ながら（遠隔）臨場を行う。さらに、CIMモデルと実物の映像を併用することで、設計との相違を三次的に確認することが可能となる。（図-8.9参照）

このような取り組みにより、工事の品質は確保しつつ、施工段階における工事書類のやりとりや「施工プロセスチェック」、「施工状況把握」、「段階確認」の「項目」と「頻度」を簡素化できるものはないか検討する。

また、VRの場合、アバターとして登場する技術者の本人確認や監督員確認後の署名の代替をどのようにするかも併せて検討する。



図-8 VRを用いたリアルタイム遠隔臨場の概念図



図-9 VR空間内に同時接続し情報共有

(2) CIMモデルへの情報付与

発注者が確認した寸法などの情報を、逐一CIMモデルに確定情報として付与していく。情報を蓄積・一元化することで、工事の進捗把握と品質確認が容易となり、工事の完成検査のための資料整理を簡素化することができる。

また、従来の設計図では、構造図や配筋図等がそれぞれ異なる図面として作成されているが、工事監督及び検査時にCIMモデルを活用することで、それらが一つの設計図として確認できるようになる。これにより、施工上の不具合や問題点が把握しやすくなり、協議事項の判断や解決の時間短縮や品質向上にもつながる。

さらに、このようなデータ一元管理のもと、工事完成書類としてまとめた後、維持管理段階へ引き継ぐものとする。

(3) 「大河津分水改修工事監督・検査技術要領(案)」の策定

(1)(2)の試行結果により、工事の品質は確保しつつ、受発注者双方ともに工事の生産性向上を実現可能となることに期待する。

第二床固は大河津分水路の中でも特に、重要な構造物であるため、出来形や品質の確保は見逃すことができない。工事の品質確保のためには、監督員個人の責任によらない一定の監督・検査ルールが必要となる。この要領(案)のもとで工事監督・検査を行うことで、働き方そのものを変革するDXのねらいを達成できることが望ましい。

将来的には、本要領(案)を他工事にも展開することで、北陸から全国へと建設現場におけるDXを促し、かつその有用性の発信につなげていきたい。

6. おわりに

我々の行う公共事業は、その土地固有の地形を変化させ、長年にわたり地域に影響を及ぼすものである。人口減少、情報技術の発達、そしてパンデミックといった、社会が激動していく令和時代においても、それは変わらない。

建設工事においてDXに向けた取り組みを行うことで、品質管理や出来形管理などの各種管理についてのサイクルが最適化されていくことが期待されるが、それには土木技術者として施工全体を網羅する知識が必要となる。情報技術が進展しても、土木技術者が備えるべき能力が不要となるわけでは無いことに留意したい。

今後さらに新しい技術が生まれたとき、それがどのように、また何のために活用されていくべきかを常に考える必要がある。

謝辞：日々工夫を重ねながら先進技術の活用に取り組んでいる受注者の皆様へ、感謝と尊敬の意を申し上げます。

参考文献

- 1)令和3年度版 国土交通白書
- 2)「建設現場が目指すDXーデジタル化と自動化がもたらす未来ー」(令和3年度土木学会報文 鹿島建設株式会社)

水中バックホウ遠隔操作支援システムによるマウンド均し作業への適応試験

○高尾 俊輔¹・喜多 司¹・平林 丈嗣¹

¹国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

港湾空港技術研究所 インフラDX研究領域（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）

透明度の高い沖縄における港湾工事では、潜水士搭乗型的水中バックホウが実用化されている。港湾工事における潜水士作業のさらなる肉体的負担の軽減、安全性向上のため、近年では情報化施工技術や遠隔操作化に対する期待も高まっている。しかし水中作業では発生する濁りにより視覚情報が劣化するため、光学映像に代わる外界計測技術が必要となる。そこでプロファイルソナーによりマウンド形状を計測し、設計図面と重畳表示する水中作業情報呈示システム（水中版マシンガイダンス）を構築した。さらに、作業支援アタッチメントの開発と深層学習による水中画像補正など遠隔操作化に向けた取り組みについても紹介する。

キーワード 港湾工事，水中バックホウ，水中マシンガイダンス，水中画像処理

1. はじめに

水中施工は一般的に潜水士の手作業に依存しているが、作業効率、安全性を大幅に改善させることに加え、潜水士の高齢化の問題や肉体的負担を軽減する点においても水中機械化施工を推進することは有効である（図-1）。本技術開発は、沖縄で既に実用化され適用例の多い水中バックホウ¹⁾を対象に、水中版マシンガイダンス（以下、水中MG）を、港湾構造物の基礎マウンド構築などの作業へ適応することで、安全で効率的な水中施工を実現することを目的としている。

水中MGでは、バックホウ姿勢傾斜情報、設計図面情報、バケット接触座標の表示といった作業情報の提示に加え、プロファイルソナー計測による現状地形を重畳表示することで、濁水中での状況認識が可能であると考えられる。また、遠隔操作において微小なレバー操作を行うことは困難であると考え、遠隔時の操作を簡素化する作業支援アタッチメントについても検討を実施した。

本稿では、「水中MG」「ソナー外界計測」「支援機構」を水中遠隔操作の要素技術²⁾とし、それぞれの開発状況と実海域試験について報告する。また、深層学習による水中光学画像補正の研究の概観についても記載する。



図-1 潜水士手作業（左）と水中バックホウ（右）

2. 水中作業情報呈示システム（水中MG）

(1) 使用するセンサの選定

気中と水中におけるセンシングの違いとして、水中では電波の減衰が著しく、また光学については砂泥等の微小粒子による濁りに大きく影響される点が挙げられる。そのため、陸上のマシンガイダンス³⁾に一般的に用いられるセンサをそのまま水中用として適応することは困難である。例えば、陸上マシンガイダンスにおいて、GNSSにより機体座標（平面位置・高さ）と機体方位を検出することが一般的であるが、水中においては代替として音響測位装置（USBL）を使用し、方位については地磁気方位計を用いることとした。しかし音響測位装置は経験上、数十cm以上の計測誤差が発生することが考えられる。そのため高さ方向の機体計測は高精度水圧計を用いることとした。機体の関節角度については、ブー

ム・アーム・バケットリンクに重力加速度計を設置し角度検出する方式が一般的であるが、遠隔操作化を考慮した場合、振動の影響を受けにくく静定時間が少ない方式が適していると考えられる。そのため、油圧シリンダのストローク量を計測する磁歪式リニアセンサを用いることとした。

選定したセンサについて、水中バックホウに設置する場合の配置などを検討した。図-2にセンサ設置状況を示す。

a) 傾斜センサ

機体の傾斜角度を検出する傾斜センサについては、水中バックホウ上部旋回体に設置する。またベースフレームとの取付け誤差を補正する。

b) 地磁気方位計

地磁気方位計については、磁性体である機体の動きによる影響が少なくなるよう、機体から離れた車体後部に設置することにした。防水容器については、塩化ビニルによる筐体を作成している。

c) 水圧計

水圧計については、機体と試験海域（既知水深）の二カ所に設置し、差分により潮位を補正する方式とした。

d) 水中モニタ

水中でのオペレータと同一の情報を陸上でも確認することから陸上局PC画面をミラーリング表示としている。

e) 水中測位装置（USBL）

位置の計測を行うUSBLは親機と子機の間で障害物となるものが存在しないように設置する必要があるため、機体上部面で、かつ近傍に障害物が無い場所に設置した。

f) 磁歪ストロークセンサ

機体関節角度を遅延なく計測するため、重力式を用い

ず直動式のリニアセンサを選定した。防水性を考慮し磁歪式ストロークセンサを油圧シリンダの側面に設置した。

(2) 作業情報表示モニタの検討

水中基礎マウンド均し作業において必要となる情報は、マウンド形状、目標高さ、バックホウ姿勢、周辺状況（既設構造物等）が考えられる。そこで、本システムでは鳥瞰表示、上面表示、側面表示の表示方式を任意に切り替えて表示することとした。また、モニタ上には既存施設を表示させ、機体位置との位置関係を認識できるようにしている。

(3) 実海域運用試験

本システムは水槽等で試験開発を行ったが、実用化のためには実機による運用試験を実施する必要がある。そこで沖縄県宮古島市平良港において実海域運用試験を実施した。試験は運用時の課題点抽出や潜水士ヒアリングによる改善点抽出を目的とし、0.8立米クラスの水中バックホウ実機（TKM200-9）に水中用MGを実装し、潜水士搭乗操作による本均し工において実施した。ただし試験は実工事内で実施したため、工期や施工精度の影響が無いよう、通常の施工手順（丁張り作業及び別潜水士による誘導）により作業を行い、運転操作する潜水士には目視による安全確認を優先し、水中用MGによる情報は補助的なものとして利用するように指示している。図-3に運用試験状況を示す。

運用試験では、大きなトラブルは発生しなかったものの、USBLの位置計測情報が数百m離れた場所となる事象が多発した。これは潜水士の呼吸による気泡が音響の遮蔽物となり、既設ケーソン等からの反射波を真値として認識してしまったためと考えられる。



図-2 水中作業情報呈示システム設置センサ

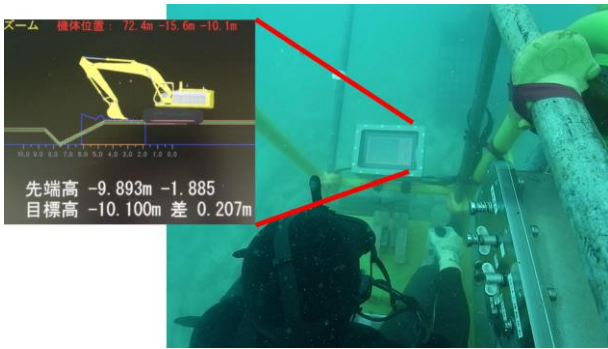


図3 運転席に設置したガイダンスモニタ

また、試験後の潜水士ヒアリング調査では、実用化に向けた課題点や今後の遠隔操作化に向けた貴重な意見を頂戴しており、システムに反映させている。

3. ソナーによる外界計測

立体感が損なわれる遠隔操作作業において、設計断面（目標高）と現状のマウンド形状とを重畳表示し、その差分をわかりやすく呈示することは作業状況を認識するために重要である。そこで現状のマウンド形状を計測するため、Kongsberg社M3ソナーによる外界計測を行うこととし、その特性や精度について、実物大の割石マウンド模型を対象とした水槽実験（図4）を行った。センサは固定ジグにより一定距離に固定した状態で、水槽内に吊り下げて計測を行った。なお、マウンド模型底面とセンサ間の距離は、水中バックホウ実機のキャビン上面高さ（2.8m）とした。

図5は±10cmのマウンド模型について計測したデータである。図中の口線は事前に計測した光学測量のデータである。結果から特徴的な凹凸形状について認識できていることがわかる。

さらに、M3ソナーを当所所有の水中バックホウ実験機に搭載し、水中における地形計測を行う。M3ソナーは断面形状しか計測できないが、マシンガイダンス搭載センサ（機体傾斜、方位）のデータを用い、旋回動作によるスキャンを行うことで面的な形状を計測する（図6）。

結果として、計測誤差があったことや、割石の形状によっては欠測が発生するといった特性があったが、マシンガイダンス搭載センサの情報を付加し、三次元情報を持たせた計測点を点群表示することで対象物の形状が認識できていることがわかる（図7）。割石のサイズやマウンドの凹凸形状の認識は、特に視覚情報が劣化する水中作業において重要であるため、今回使用したM3ソナーによる形状認識は非常に有効であるものと考えられる。

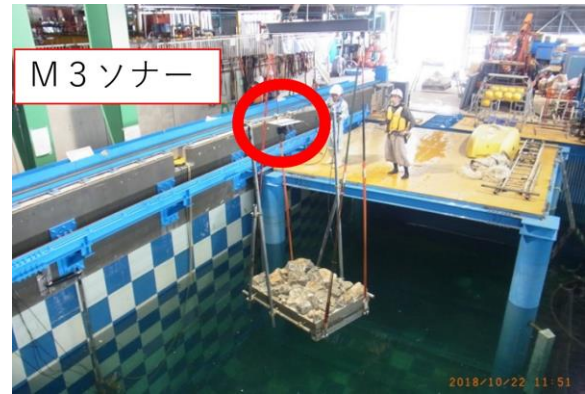


図4 M3 ソナーによる外界計測試験状況

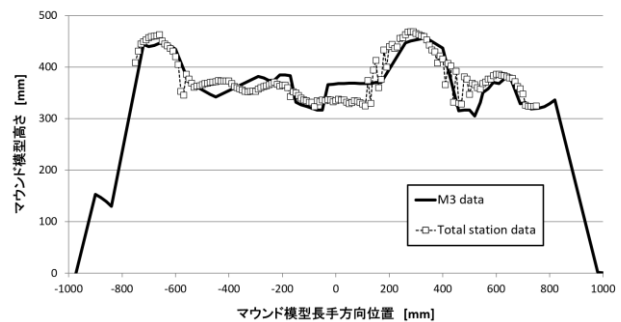


図5 マウンド模型断面形状計測結果

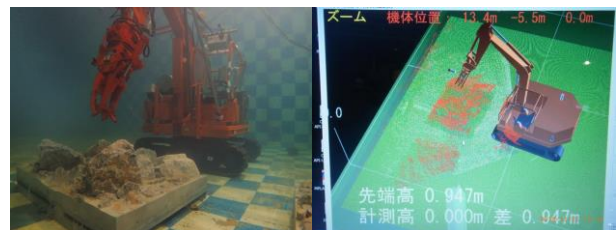


図6 水槽に設置したマウンド模型の認識

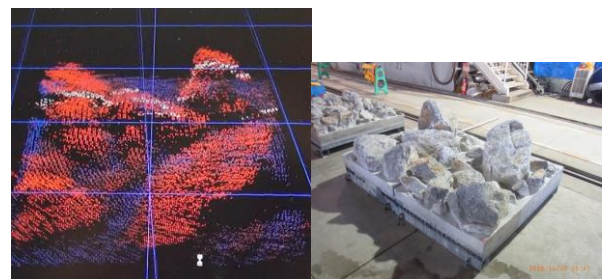


図7 点群表示による割石の個別形状認識

4. 作業支援アタッチメント

鮮明な光学映像を利用できる陸上でも、遠隔操作では作業効率が低下することが一般的⁴⁵⁾である。濁りによ

り目視情報が劣化する水中では、その作業効率がさらに低下することが懸念される。そこで共同研究者（極東建設株式会社）が平成 18 年度の護岸設置工事で利用した叩き均し機構を原案とし、「起震装置を押しつける」といった操作入力を単純化することにより遠隔操作時の均し作業効率の向上を目指すこととした。具体的な機構としては、油圧ブレーカ（古河ロックドリル社製 Fxj275）をベースとし、チゼル先端に転圧板を圧入したものである。

開発試験は、碎石現場における陸上均し試験（図-8）と鋼製水槽における水中打撃力測定により基本的な性能の確認を行った後、沖縄県宮古島市平良港の実際のマウンドにおいて、水中における単位時間毎の沈み込み量などの性能試験（図-9）を実施した。試験は潜水士の搭乗操作によるものであるが、前述のマシガイダンスモニタによる目標高さの呈示により、別潜水士が誘導することなくマウンドを平面に均すことができおり、遠隔操作時の有効性についても示された。



図-8 碎石場における陸上試験状況（沖縄名護市）



図-9 作業支援アタッチメント性能試験状況

5. 遠隔操作支援システムの構築

前章までの「水中作業情報呈示システム」「ソナーによる外界計測」「作業支援アタッチメント」は水中での遠隔操作を実現するための要素技術である。これらの要素技術を統合し、宮古島市平良港のケーソン仮置マウンドを対象とした遠隔操作による模擬作業試験を実施した。作業は 10m×10m の範囲を対象として割石投入直後の状態から開始し、通常バケットによる荒均し、作業支援アタッチメントによる本均しの 2 工程で実施した。なお、オペレータはバックホウ支援台船上に設置した遠隔操作室（図-10）から行った。荒均し工程では、作業によって変化するマウンド形状を適宜 M3 ソナーで計測しつつ、「崩す」、「掬う」、「払う」といった運転操作を行い、1.9m 程度の山となっている割石を±30cm 程度の不陸まで均すことができた。

本均し工程では、オペレータは目標範囲（-8.5m±10cm）より高い部分に支援アタッチメントを誘導し、叩いて均す操作入力を繰り返す。目標高さになったかどうかの判断は、マシガイダンスモニタに表示される転圧板の高さにより判断した（図-11）。また目標より低い場所については、背面に設置した小型バケットにより石を移動させる動作を行う。

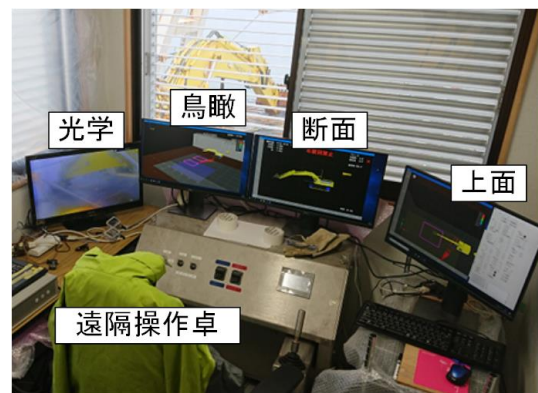


図-10 遠隔操作室

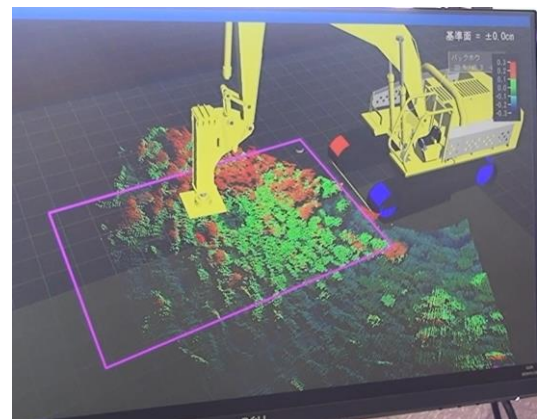


図-11 M3計測によるマウンド形状確認

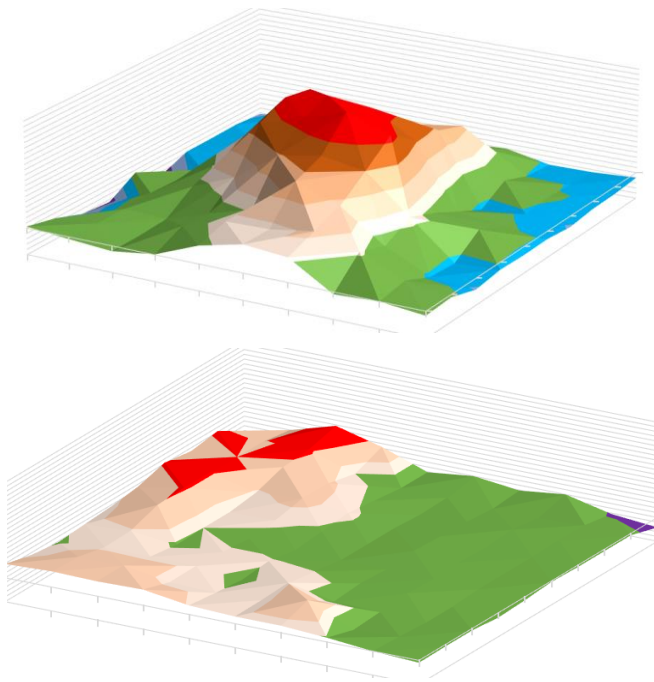


図-12 水中水準器で計測したマウンド形状 (10m×10m)
(上図：割石投入直後／下図：遠隔操作叩き均し後)

残念ながら機械トラブルにより評価範囲すべての作業はできなかったものの、叩き均しを行った範囲の測量結果では、ほぼすべての点で基準範囲(±10cm)に入っており、本遠隔操作支援システムの有効性は示されたと考える(図-12)。今後は実現場を利用した試験を実施し、運用面のブラッシュアップを図る予定である。

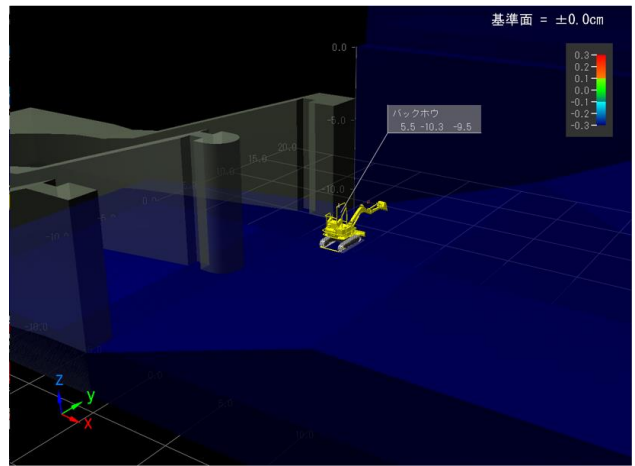
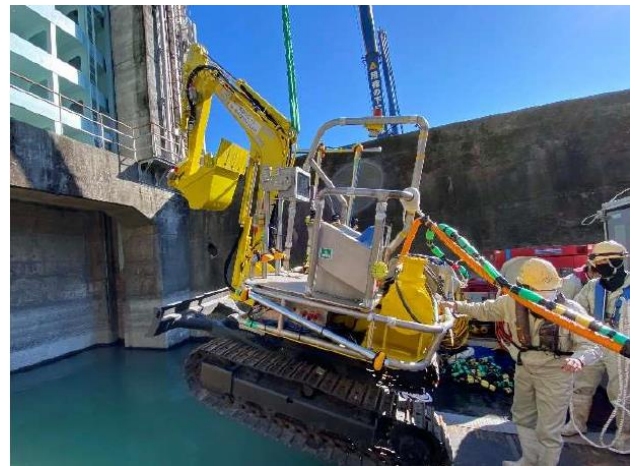


図-13 発電所放水口で使用された水中ミニショベル(上)と水中トンネル部の3D表示画面(下)(熊谷組発表資料⁸⁾より引用)

6. 水中機械化施工の発展(水中施工のDX)

本稿で述べた水中MGは、機体姿勢や設計図面情報だけでなく、作業により変化する地面の形状をソナーにより計測し、設計図面に重ねて表示する機能を有している。この機能を用い外界の状況を適切に呈示することができれば、無視覚(濁水中)の条件でも機械化作業を実現可能であると考えられる。

図-13は、トンネル形状の発電所放水口で実際に使われた水中ミニショベル(熊谷組TKM-30)⁸⁾である。

機体には水中MGを改良し、三次元CADデータを用いたトンネル部表示、トンネル壁面を検出するための回転式ペンシルビームソナーを搭載しており、透明度30cm以下のほぼ無視覚の暗渠狭至部での機械化作業を実現している。いままで透明度が低い条件では使えなかった水中施工機械であるが、情報化施工技術により水中機械化施工を実現した例であると言える。

音響ソナーでの形状把握では、フォークグラブによる把持など、水中での複雑かつ高精度な作業を実施するうえで重要な色や陰影、輪郭といった視覚情報が不十分である。また、上述の三次元CADデータに加え、実際の水中映像を提示することは周辺環境の把握に有用であると考えられる。ただ、可視光の波長領域は水中での減衰が大きく、利用には補正が必要となる。

我々の研究グループでは、近年急速に発展を遂げている深層学習を利用した水中光学画像の画質改善の研究に取り組んでいる。深層学習で必要となる学習データを十分確保するために、厳密な水中画像モデルの再定式化と、十万枚程度の人工データの生成を行った。生成した人工的な水中画像と陸上画像のペアを学習データに、水中画像を補正するモデルの開発を行っている⁹⁾(図-14)。他にも訓練画像を必要としないZero-Shot学習の枠組みでモデルの開発に取り組んでいる。

このように視覚情報が劣化する水中施工にこそ、DX(デジタルトランスフォーメーション)が必要であると

考える。水中施工のDX化による情報化施工を推進し、機械化施工の一層の普及を促進することで、いままで潜水士による人力作業に多くを依存してきた港湾工事において、施工の安全性と生産性の向上に資するものと期待する。

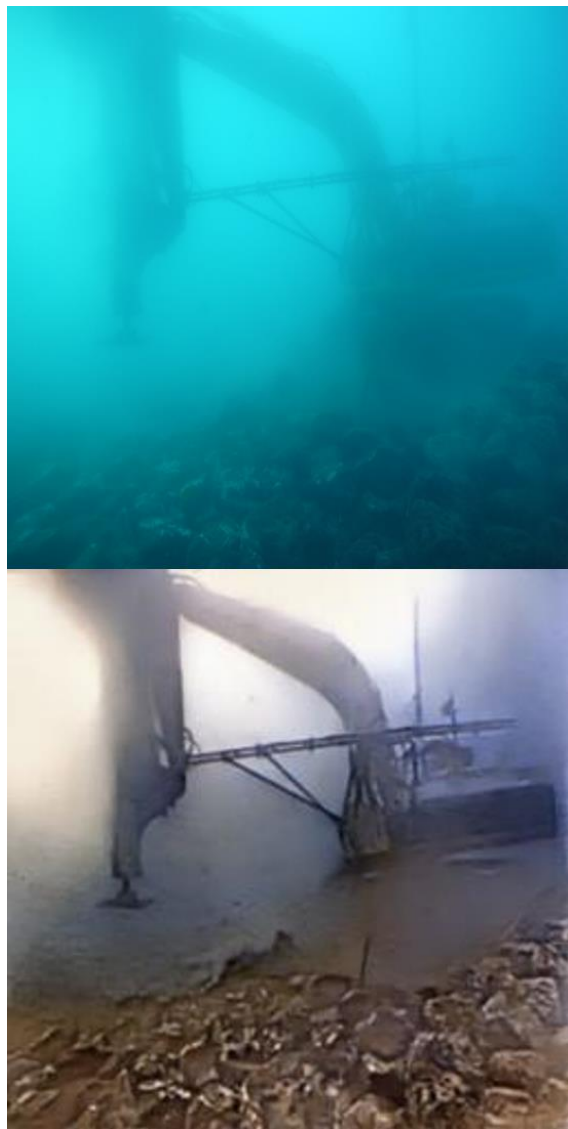


図-14 水中光学画像補正結果の例

7. おわりに

本稿は、ICTを港湾施工現場に適用するため、陸上施工で活用されてきたマシンガイダンス技術を水中作業情報の提示インターフェースとして利用し、遠隔操作を目指したものである。ここで水中独自の課題点として濁水による作業対象（マウンド）の形状認識の困難性を挙げ、その対策としてソナーによる外界計測を提案した。さら

に、遠隔操作時の作業効率向上を目的とした支援装置（水中ブレーカ等を応用した起震均しアタッチメント）を加え、遠隔操作施工を目的とした試験を実施し、その有効性について確認した。

これらの成果は海底資源の採掘にも応用可能な将来性のある技術であると考えている。今後も水中作業に特化した情報化施工技術について研究を行い、水中施工のさらなる発展を目指していきたい。

謝辞：

本稿は、内閣府沖縄総合事務局の委託研究「沖縄管内における港湾空港施設整備等高度化研究委託」により実施した成果である。

また本項で述べた遠隔操作に係る検討については、（一財）港湾空港総合技術センターとの共同研究「港湾・海洋における建設現場の生産性向上のための研究開発」における水中建機遠隔操作支援システムの現場適用の確立に向けた研究開発の成果を含むものである。

参考文献

- 1) 大宮敬治，加藤政徳：“平良港防波堤工事における水中バックホウによる施工”，建設の機械化 1996年7月号，pp.17-22，（1996）
- 2) 平林丈嗣，“水中建機を対象とした作業情報呈示システムの検討”，機関誌作業船 2020年10月号，Vol.341（2020）
- 3) 古賀康正，“雲仙普賢岳における砂防工事の無人化施工”，砂防学会誌，Vol.52，No.4，pp.64-68，（1999）
- 4) 茂木正晴，西山章彦，藤野健一，油田信一，“無人化施工における油圧ショベルの作業時間計測～モデルタスクによる搭乗・遠隔操作での作業時間比較～”，土木技術資料，vol.57，No.4，pp.16-19，（2015）
- 5) 伊藤ら“無人化施工において遠隔操作の映像環境が作業効率へ与える影響について”，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol.73，No.1，15-24，（2017）
- 6) 田場大貴，金城寛，大城尚紀，鈴木正己，平林丈嗣，吉江宗生，上山淳，“振動式締固め機の水中毒モデリング”第37回計測自動制御学会九州支部学術講演会，（2018）
- 7) 金城寛，大城尚紀，平林丈嗣，喜彦，上山，“マウンド均し専用油圧ブレーカの運動解析”，油空圧技術 第60号，No.3，pp.24-29，（2021）
- 8) 熊谷組発表資料
https://www.kumagaigumi.co.jp/news/2021/pr_20210520_1.html
- 9) 高尾俊輔，“正確な水中画像モデルに基づくデータセットの構築と解析”，電子情報通信学会研究会 特殊な環境下におけるCV・パターン認識（2021年）

山陰西部国道事務所における i-Constructionの取り組み

濱永 貴史¹・山村 嘉治²・石田 高嗣²・福井 真吾¹

¹中国地方整備局 山陰西部国道事務所 工務課 (〒758-0041 山口県萩市大字江向318番地2-3)

²中国地方整備局 山陰西部国道事務所 (〒758-0041 山口県萩市大字江向318番地2-3)

中国地方整備局のi-Construction推進計画のモデル事業に位置づけられたことを受け、3次元設計、CIM活用（ICT含む）及び必要な測量データの取得など、測量、設計及び施工に向けた取り組みを実施。点群データの取得から3次元ベクトルデータの作成、CIMを用いた協議、ICT施工用データ作成からICT施工と各段階では一定の成果を得た。しかし、測量の精度に合わせた再度の設計、設計から施工まで一貫した互換性の確保といった課題が残る。設計の流れ、設計成果の納品方法を抜本的に変革していくことが対応策として求められる。現時点では改変に向けた過渡期であり、現有、活用可能な知見、技術を探求することが重要であると思料する。

キーワード i-Construction, CIM, AR, 3次元設計, ICT

1. はじめに

山陰西部国道事務所は、主に山口県内の山陰道整備を推進するため、令和2年度に新設された事務所である。木与防災事業（平成27年度事業化）、俵山・豊田道路（平成28年度事業化）は令和2年度に起工式を行い本線工事を促進。また、令和3年度4月には、大井・萩道路、益田・田万川道路が新規事業化され、調査設計に着手。

その中、令和元年度に中国地方整備局のi-Construction推進計画（以下「推進計画」）の「早期段階から一貫したBIM/CIMを導入するモデル事業」に木与防災事業、俵山・豊田道路が位置づけられたことを受け、事務所としてi-Construction（CIM）を本格的に推進している。

本報告は、i-Constructionの実現に向けて、3次元設計、CIM活用（ICT含む）及び必要な測量データの取得など、測量、設計及び施工に向けた一連の取り組みと、その内容と結果から見える課題について、主に俵山・豊田道路で取り組んだ結果を報告する。

2. 令和2年度の取り組み

令和元年度に推進計画に位置づけられた時点で、事業は一定の進捗が図られていたため、事業進捗の度合いに合わせて対応可能な取り組みを基本方針とし、必要なデータ取得、作成を各段階毎に実施した。

<基本方針>

・豊田工区：詳細設計概成⇒工事への展開（ICT施工デ

ータ作成）

・俵山工区：詳細設計中 ⇒道路、構造物設計への展開（3次元設計、CIMの導入活用）

<取り組み段階>

(1) 測量段階 (2) 設計段階 (3) 施工段階

基本方針と各段階の関係を表-1に示す。

豊田工区、俵山工区に進捗度合いの差があるものの、工事施工の全面展開に変化させていく時期であることから、CIM導入にあたっては、設計に必要な測量及び施工時に必要な設計について検討・実施した。

3. 各段階の取り組み

(1) 測量段階

過年度、航空写真・レーザー測量により数値図面化された図面作成が完了。現地路線測量、縦横断測量が実施済みであり、航空レーザー測量にて点群データを取得済み。後述する設計段階の意見を聴取し、既存点群データ

表-1 基本方針と各段階の関係

	豊田工区	俵山工区
測量段階	施工実施箇所以外	全線実施
設計段階	不足データの作成 要求項目の実現（施工）	不足データの作成 要求項目の実現（協議）
施工段階	ICT施工データの作成	未実施

では点群密度が粗であり、詳細な点群データを必要とすることからUAVレーザー測量を実施した。

＜要求点密度＞

・既存成果（航空レーザー）

⇒要求点密度 1点/m²（地図精度：1/1000）

・新規取得（UAVレーザー）

⇒要求点密度 20～200点/m²（地図精度：1/500）

設計と並行して測量を実施するため、迅速な測量成果取得が必要であり、施工段階を見据えた、設計段階で必要な範囲を実施。

＜データ取得範囲の考え方＞

・地形精度が用地取得幅に影響する可能性がある範囲
⇒官民境界（幅杭範囲）、切盛境界周辺

・将来返却（借地）する土地
⇒工事用進入路など原形復旧時に必要なデータ取得

・施工計画立案に必要な範囲
⇒正確な電線の位置

本線中央部については、立木の繁茂状況が地表面のデータ取得精度に影響するため、立木伐採後に地表面データを施工段階で取得することとした。また、工事着手箇所は工事受注業者にて点群データを取得するため、業務では測量を実施しないこととした。

取得した点群データは「UAV搭載型レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル（案）（以下「マニュアル」）」に準拠し、①点群オリジナルデータ、②点群グラウンドデータ、③地形モデル（サーフェス）、④等高線データ、⑤点群グリッドデータを作成。しかし、設計段階において「草木で隠れる水路断面等は点群だけでは正確に把握できない（エッジの取得）」「①～⑤のデータを設計ソフトに反映すると、データ容量が大きすぎ、設計ができない（動かない）」など、3次元設計を行うことが困難となるため、3次元ベクトルデータ（図-1）を追加作成した。

また、草木で隠れている箇所等の位置、高さを特定するために現地において補備測量を実施した。

(2) 設計段階

設計は主に「道路設計」「構造物設計（橋梁・トンネル）」を実施。3次元設計及びCIM活用を具体的に進めるため、発注者が要求事項（リクワイアメント）を選定し、設計各社と何ができるのか具体的な計画立案を行った。選定した要求事項を表-2に示す。

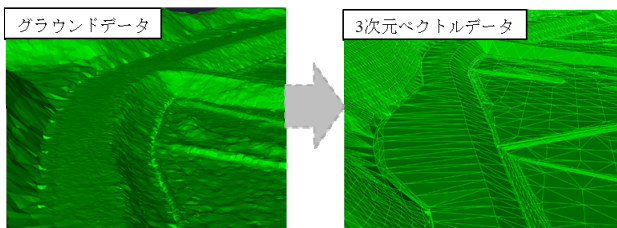


図-1 3次元ベクトルデータ

要求事項を満足するためのCIM作成の詳細度は、各社と協議を行い、道路設計及びトンネル設計については詳細度300を基本として実施した。橋梁については、PC上部、鋼橋上部等の橋種により難易度が変化、CIM作成費用に影響する。そのため、下部・PC上部は、鉄筋干渉チェック等に必要な詳細度400、鋼橋上部については、工事受注業者が原寸図に変わるCIM作成（400）を行うことから、重複を避けるため詳細度300とした。橋梁付属物（伸縮装置、排水施設等）についてもCIM作成コストを踏まえ詳細度300とした。橋梁の詳細度について図-2に示す。

道路設計について、過去の業務成果においてサーフェスモデル（LandXML）の作成が実施されていたが、要求事項を満たす3次元設計を行うために、前述で記載した3次元ベクトルデータを基に、3D設計ソフトを使用した3次元設計、CIM統合モデルを作成した。

道路設計、構造物設計ともに3次元設計及びCIMを業務成果として納品するものではなく、設計プロセスを効率化することに着目、目標を設定した。

道路設計では、3次元設計から得られたCIM統合モデルを活用。3次元設計データから3Dプリンターを用いた模型の製作やARを用いた視覚的に分かりやすい地元説明を実施した。

橋梁設計では、県道、河川及び電線類等の支障物件と

表-2 選定した要求事項

要求性能
情報共有システムを活用した関係者間における情報連携
工期設定支援システム等と連携した設計工期の検討
CIMモデルを活用した自動数量算出
CIMモデルを活用した効率的な照査
後段階におけるCIMモデルの効率的な活用方策の検討

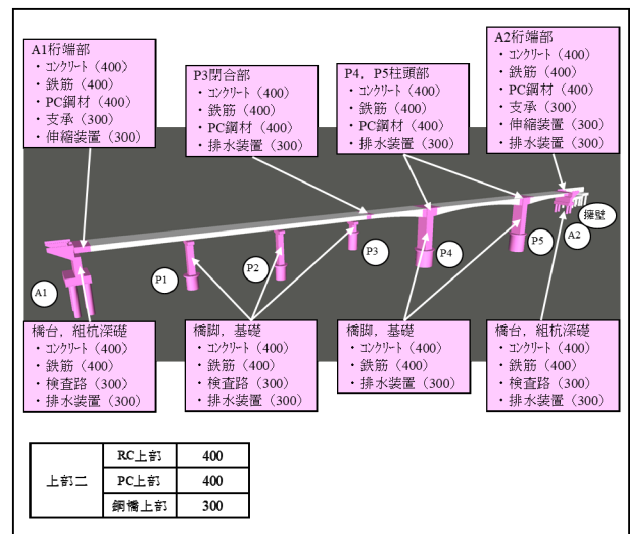


図-2 橋梁の詳細度

の影響を具体的に示すため、下部工施工時及び上部工施工時の一連作業の施工ステップ（4次元）CIMを作成。また、道路への影響範囲（俯角）や、上部工架設時の高圧線への影響範囲を示したCIMモデルを作成した。

(3) 施工段階

設計段階で作成されたデータ（LandXML）は、道路完成形状が作成される。工事施工段階では、現地の工事進捗度合いや予算状況など工事規模発注ロットとして分割統合されるため、設計段階で作成されたデータがそのまま発注データとして活用できない。

また、現状のICT施工（土工）では、施工業者が工事受注後に契約図面（2次元）を基に、ICT建機用の3次元データの作成を行っており、工事契約後、工事着手までの一定期間、データ作成等に時間を要している。そのため、早期工事着工できる環境整備も含めて、工事発注図作成に合わせてICT施工機械用のデータも発注者が作成し、受注業者へ貸与する試行を実施した。また、ICTデータの作成に合わせて、発注工事を対象とした施工ステップを示す（4次元）CIMを作成し、工事工程表として活用した。

4. 取り組み結果及び考察

(1) 設計に必要な測量データ

設計の概念として、道路設計及び構造物設計に必要な図面は、必要設計段階に合わせて図面精度も向上させている。たとえば、道路の概略設計では1/5000、予備設計では1/2500、詳細設計では1/1000、構造物周辺は1/500等、設計を行う準備として図面精度を向上させ、精度が向上した図面を利用した設計が行われる。合わせて、2次元の平面図は、点群データでは得られない地図としての機能（地図記号）を有している。設計者が平面図を見ることで、様々な情報を読み取り、地図上に展開した平面図で設計している。

点群データは、レーザーが照射された地点のX、Y、Zデータの集合体で、精度は点群密度等で判断されるため、点密度を向上させることが業務遂行上の目的となる。UAVの運行経路や、レーザー照射角度、場合によっては、地上レーザーと組み合わせることで、必要範囲の点密度を向上させることが重要であり、国土地理院の精度検定の項目として求められている。

また、取得した点群データを用いてマニュアルに準拠した、点群オリジナルデータ、点群グラウンドデータ、地形モデル（サーフェス）、等高線データ、点群グリッドデータを作成する。しかし、現時点で点群データから得られる5つのデータには、地図としての機能を有する情報が無い。また、既存の地図と融合させる基準・精度検定も整備されていない。一方、道路事業実施段階では、

都市計画の縦覧図書など法的に必要な図面を準備する必要があり、現状においても法的に定められた従来の2次元図面の作成は必要不可欠である。

これらの背景を踏まえ、以下の点が考察として上げられる。

a) 3次元データを有した地図

測量関連基準の整備及び法律に付随する図書の基準等、環境が整備されるまでは、地図機能を有していない3次元データだけで事業遂行を行うことは困難である。そのため、3D設計、ICT施工等の活用方法を事業初期段階で明確にしたうえで、点群データ取得範囲を決定していくことが重要である。

b) 点群データの精度

道路設計を主に考えると、精度検定が整備されていない3次元ベクトルデータの活用が優位と考えられる。しかし、3次元ベクトルデータは、設計段階で使用するパソコン、ソフトの動作環境に依存し作業性に重きをおいたデータ形式となっている。地形データ別のデータ容量の例を表-3に示す。

3次元ベクトルデータの作成は、設計者の意見である既存構造物等のエッジを表現するためには必要な手法ではあるものの、3次元ベクトルデータを作成するためには、精度基準を満たす点群データをマスキングする作業を実施することとなる。一方で、測量技術者は精度基準を満たす点群データ取得に重点を置く傾向がある。3次元設計をスムーズに実施するため、現在の環境（測量規定等による点群精度基準、パソコン、ソフトの動作環境）では、マスキングした3次元ベクトルデータと精度基準を満たす点群データ両方の成果を求めざるを得ない結果となった。

(2) 3次元設計・CIMの活用

取り組みに示すとおり、道路設計及び構造物設計にて3次元設計、CIMの作成を行った。特に「何ができるのか」を更に具体的に実施するため、業務実施段階で活用し、その有用性が確認できたので、道路設計、構造物設計それぞれの結果を以下に示す。

a) 道路設計における活用

俵山工区の道路設計は、本線の設計が概成し、道路周辺の地元設計協議の熟度を上げる作業を実施していることから、地元協議へCIMを活用した。CIM統合モデルを用いることで、パソコン上でも視覚的に分かりやすいデータの作成が可能となるが、更に地元へ出向いて地元関係者の理解が深まるよう、データを3Dプリンターで作

表-3 地形データ別のデータ容量

	グラウンドデータ	等高線データ	3次元ベクトルデータ
データ形式	点群データ (.txt)	ポリライン等のCADデータ (.dwg等)	ポリライン等のCADデータ (.dwg等)
データ容量	約29MB	約9MB	約5MB
データ容量 (サーフェス作成後)	約100MB	約11MB	約10MB

成した模型と、ARを用いた地元協議を実施。地元協議に使用した資料を図-3に示す。

地元協議の流れとして①従来型の2次元図面で説明、②PCにて統合モデルを提示、③3Dプリンターの模型を提示、④現地にてARで確認の順序で進めた。また、構成は、男性60歳代、30歳代、女性60歳代の3名が対象であった。説明者の視点では、①で説明する場合、平面図を理解してもらい説明が必要となるが、②③④ともに土木知識がなくとも理解力が向上しており、平面図を見るための一定の技術力を引き出す作業を削減することが可能となる。②は相手方が見たい箇所を眺望を確認することができる一方、狭い範囲がPCに表示されるため、全体をイメージするには時間を要する。また、説明者がシステムに不慣れな部分もあり、説明に使用するシステムの熟練度が、相手方の理解度に直結した。③は詳細部分まで確認できないまでも、全体のイメージをつかむことには優れていた。①から③については、説明者の説明と合わせ相手方が受動的に理解する必要があるが、④については見たい場所、見たい情報を地権者自らが主導的に見に行くことが可能となった。

また、相手方の理解度から考えると、年齢を含めて個人の習熟度合いによって興味を示す傾向が変化した。全年齢的に③模型は興味を示し、理解が促されている傾向があった。②パソコン④ARについては、30歳代は、興味も含め積極的に情報を得るための行動が見られたが、60歳代は、主導的に情報を取得できる環境であっても、説明と合わせた受動的な手法を求める傾向が見られた。また男女の差は無かった。

なお、地元設計協議は、対話により相手の意向を聞き出し設計に反映させることが大きな目的である。相手の理解度が向上し、具体的な意向を聞き出すことが可能ではあったが、意向に対する対応方針は、既存①に絵を描

いて説明した。

これまでの説明を主体とする受動的な説明ツールとは異なり、主導的に情報収集可能なツールを活用することで、相手方の理解が深まり、説明者と相手方の思い違いを防止するには有用であった。ただし、各ツールともに相手方の興味と習熟度に依存する傾向にあった。また、相手方の意向に対する対応方針を示すには現時点では説明者側の熟練度が高い①平面図を使用せざるえない。今後、説明者の熟練度が高まり、PC上で加工が可能となれば、②PCを使用して、具体的な方針を示す検討も望まれる。

b) 構造物設計における活用

構造物設計における活用は、過密配筋に関する活用事例は多数あり、本事業も同様に実施した。その中、一般的な下部工だけでなくPC上部工においては、PCケーブルと上部工の配筋が干渉する箇所を特定し、干渉を防ぐ配筋方法を検討し、干渉対策完了後の配筋図を設計成果に納めた。また、橋梁施工手順をCIMで再現し4次元CIMを用いた施工計画の検討、関係機関協議に活用した。

関係機関協議に活用した構造物は、道路、河川を横断する橋梁を用いた。特に地形的な制約により電線類の移転候補地が限られることから、電線類の移転可否が橋梁の施工計画に大きく影響を及ぼす箇所であった。関係機関協議は作成した4次元CIMを机上にて説明。電線類が支障となる橋梁の施工内容及びヤードや、上部工架設時の高圧線との保安距離を示した。(図-4)その後、現地にてARで橋梁位置を確認いただいた。

協議を通し、協議先である電線事業者から、説明に関する反応・質問は無かった。一般的な協議の場合、相手方から「どのような施工をするのか」「時期はいつ頃になるのか」「移転先はどこなら大丈夫か」等、伝えられていない情報に対する質問を答えていくが、橋梁の完成

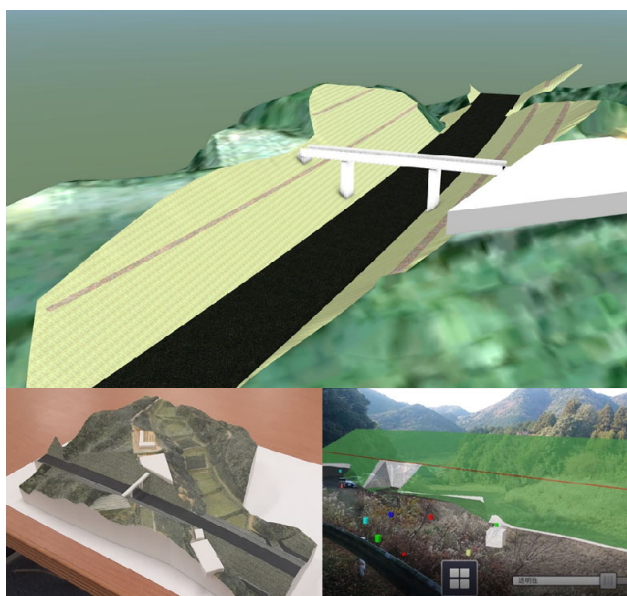


図-3 地元協議に使用した資料

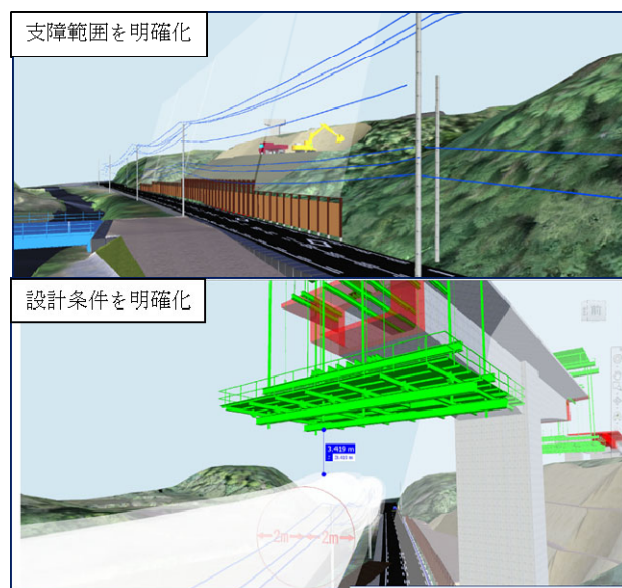


図-4 関係機関協議に使用した資料

計画だけでなく、全ての施工ステップを示すことで、関係者が必要な情報を自らが情報収集することが可能となり、説明時間の短縮、理解度の向上につながった。

今後、更に4次元CIMが推進することで、協議方法が対面からWEBに変革する現在においては、有用な技術であることが確認できた。

(3) ICT施工を見据えた設計

ICT施工機械に入力するデータは、工事発注後に施工業者で作成することが一般的である。道路設計を行う設計コンサルにはノウハウが無いため、実績を有する業者へのヒアリングを実施した。

ICT施工用データは、発注された2次元CADデータを専用ソフトで読み込み、データ照査を行ったうえで、必要なデータを追加するのが一般的である。また、設計成果として納品されるLandXMLデータは追加変更等の改変ができないデータであるため使用されていない。そのため、ヒアリング業者と同様に、契約図を基本とし必要な測線を増加させていくこととした。将来的に、地形の変化点、設計断面の変化点を全てを押さえた詳細データ（マシンコントロール）を作成することが目標ではあるが、測線を細かくすることの注意点として以下の点が上げられる。

- ・精度を上げるには費用と時間が必要
 - ・点群データが無いと実際地形が再現できないため、モデル作成が出来ない。
 - ・ラウンディング等の細かい処理を設計で行うと、機械施工時にエラーが出る可能性がある。
 - ・データピッチが狭すぎるとエラーが出る可能性がある。
- 以上の課題に配慮し、施工可能データ（マシンガイドン

ス）の作成を実施した。施工データ作成のモデル比較を表4に示す。

作成したデータは、今後、ICT機械にデータを搭載させ、実施工を踏まえた検証を行う予定である。

5. 取り組み課題と対応策（案）

設計を軸とした3次元設計及びCIM活用に取り組んだ結果、段階毎には解決可能な課題と効果が確認できたが、更に効率的に進めるためには、様々な課題があり、その対応策（案）をまとめた。

(1) 設計に必要な測量データとその関係性

前述で説明したとおり、測量データを先行した場合には、設計に必要な範囲以外もマスキング等の処理（3次元ベクトルデータ作成）を行う可能性があり、費用・時間を無駄にする可能性が高い。

そのため、設計の流れを抜本的に変化させる必要がある。地図に必要となる点群データ取得以外は、設計の流れに合わせ、設計を更新するのではなく点群精度及びデータを更新していくことが必要だと考える。（図-5）そのためには、現在納品されていない設計技術者が使用する3次元設計データ（設計要素データ）を設計の各段階に引き継ぎ、使用することが1つの方法だと考えられる。

測量基準、パソコン環境の過渡期である現時点においては、設計を先行実施しつつ、高密度点群が必要な範囲と3次元ベクトルデータを活用することで、従来の線

表4 施工データ作成のモデル比較

	① 簡易データ	② 施工可能データ	③ 詳細データ
概要	<ul style="list-style-type: none"> ・現在の発注に沿った2次元契約ベースの3次元設計データ ・断面が20mごとしかない3次元設計データ ・断面が20mごとがなくICT機械では施工不可 	<ul style="list-style-type: none"> ・要領等に沿った3次元設計データ ・3次元起工測量から得られた地形TINデータを重畳し地形に沿った3次元設計データ ・オペレータの扶量必要（マシンガイダンスのレベル） 	<ul style="list-style-type: none"> ・ICT機械に搭載する3次元設計データ ・要領等に沿った3次元設計データに現場オペレータ作業容易性・丁寧不要の施工可能データ ・オペレータの扶量はほとんど必要ない（マシンコントロールのレベル）
作成データ 全景			
データ 作成範囲			
作成時間	1	2倍	2.7倍
作成費用	1	2倍	2.7倍

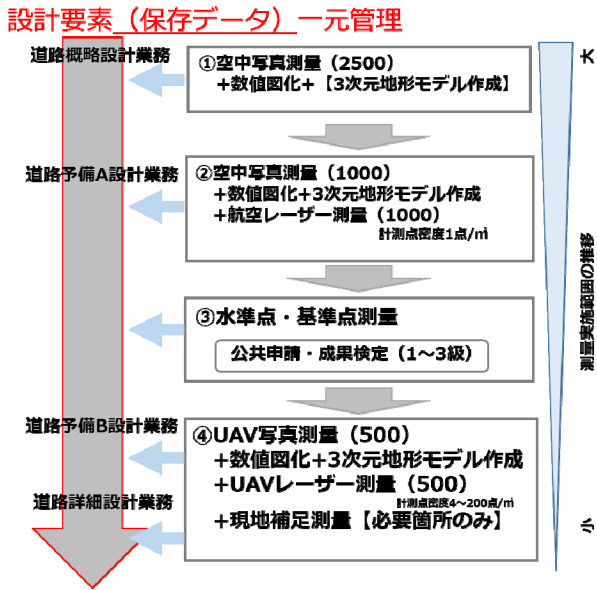


図-5 設計の流れ

形計算を基にした路線測量等，現地測量作業を最小限にすることが可能だと考える。

(2) 設計から施工まで一貫した互換性の確保

LandXMLデータを基本とした現在の取り組みでは，軽微な修正すら困難であり，設計から施工までを一連のデータで進めることが出来ない。

また，3次元設計で使用している設計ソフトは，設計

会社毎に異なっており，ソフト間の互換性は低い。かつ，ICT施工に必要な土工データを作成するソフトは，建設機械と互換性の高いソフトを使用して作成されており，山口県内のリース業者は全て同じソフトを使用しているが，設計会社が使用しているソフトと異なっている状況にある。

今後，フロントローディングを進める上で，設計から施工まで一貫したデータ互換性を確保することが必要である。建設機械への入力を見据えた設計ソフトの互換性を向上させるため，設計ソフトを特定し，ソフトの保存データを納品させ，後工程（設計，施工，管理）に受け渡しできるようになれば，生産性向上につながるものと思料する。

6. まとめ

CIM活用を推進していく中で様々な効果，課題が見つかった。CIMは納品するものではなく業務遂行時に活用するものと考え，新たな技術の進展に伴い，道路設計の進め方を抜本的に見直すことで，更なる生産性向上が期待できる。

しかし，現時点では法律，基準，PC環境など，様々な段階で改変に向けた過渡期であり，現有，活用可能な知見，技術を探求することが重要である。

インフラ分野のデジタル・トランスフォーメーション 推進の取組について

坂野正弥¹

¹中部インフラ DX 推進室（〒460-8504 名古屋市中区三の丸 2-5-1）

令和3年度より各地方整備局等において、デジタルトランスフォーメーション（以下、「DX」と称する。）推進において鍵となる各種施設の整備が進んでいる。一方、デジタル技術を活用した様々な業種で推進されるDXの内容は多岐にわたる。この中で、インフラ分野におけるDXの捉え方、推進のための課題、対応策について考察した。

キーワード：インフラDX, BIM/CIM, i-Construction

1. はじめに

建設業界においては、就業者数減少の影響もあり、生産性向上を追求している。この中で重要視されているのが、「デジタル化」であり、情報通信技術（ICT）を活用した建機制御をはじめとした様々な新技術が開発・導入されている。

また、DXと称して、今までの働き方を変革しようとする動きも浸透しつつある。

中部地方整備局においても、このような業界の状況を踏まえ、技術・取組についての情報発信・交流・研修の場として活用することを目的として、令和3年3月、5月に、インフラDXソーシャルラボ、インフラDXセンターを開設した。

本稿ではインフラ分野におけるDXの捉え方、推進するための取組内容及び、取り組んでいく際の課題及び対応策について考察する。

2. インフラ分野におけるDXの考え方

2.1 DXの定義

DXの定義については様々な解釈があるが、データ・デジタル技術を活用する、業務プロセス等を根本的に変え、生産性を向上させる。といった部分が

共通しており、本稿では、この定義によって論ずることとする。

2.2 BIM/CIMとの関係・課題

国土交通省において、DXと合わせ議論される技術として、BIM/CIM（Building / Construction Information Modeling, Management）がある。

BIM/CIMモデルは現在、図-1に示す施工前の設計妥当性の確認、図-2に示す施工ステップ検討の他、景観検討、ICT建機制御データとして使用されているところである。

しかしながら従来手法に対し、前述の活用を比較すると、負担軽減される作業があるのに対し、モデル作成手間等、増える作業もあることから、生産性向上効果を十分に得られていないと考えられる。

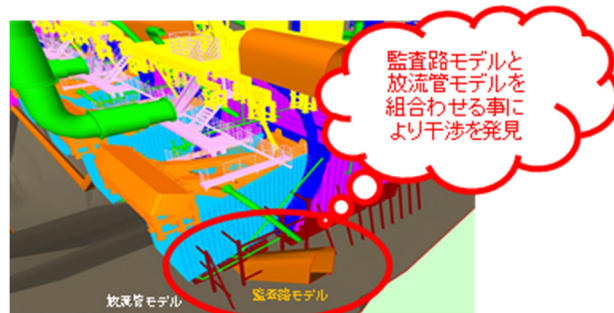


図-1 モデルを活用した設計確認



図-2 施工ステップ検討(4Dモデル)

■土工に係る延べ作業時間(※全工事(人・日)での比較

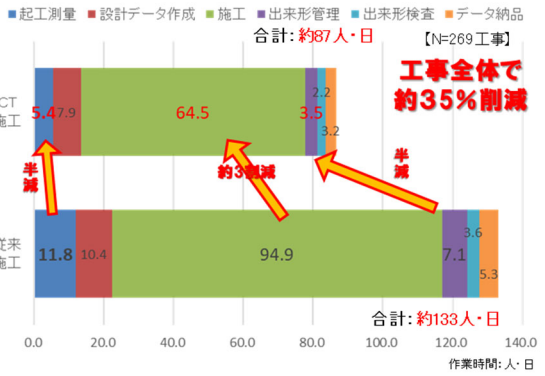


図-3 ICT建機活用による作業時間短縮効果

■土量別削減率の分布 ※全工事(人・日)での比較

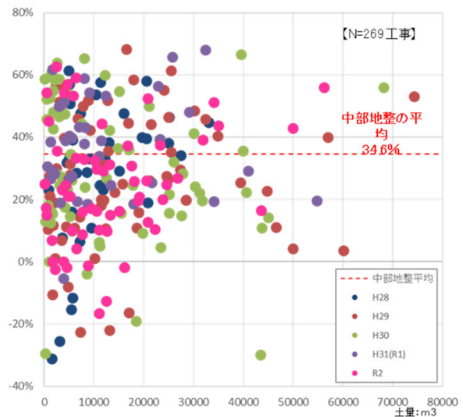


図-4 土量別削減率の分布

2.3 技術開発の課題

ICT建機を活用した、中部地方整備局管内の平成28年度から令和2年度までの土工施工実績を分析した結果、全体で約35%の作業時間短縮効果が認められている。(図-3)なお、施工規模によって効果の発現程度が異なる可能性を考慮し、施工土量毎の作業時間短縮効果を確認したところ、施工土量の違いによる効果の優位な差は認められなかった。(図-4)

作業時間短縮による、工期の平準化については喫緊の課題としてとりあげられているところである。

しかしながら、既存技術を活用場面を変えず、更に便利に活用しようとするれば、その為の改良コスト及び開発期間が必要となり、結果として生産性向上効果を十分に発現できない可能性がある。

また、汎用性がない新技術については浸透しづらく、結果として限定的な活用に留まってしまう。

以上のことから、インフラ分野のDXを考える上で重要となるのは、既存技術を活用し、新たな価値が創出できるか、といった点と考える。

3. 既存技術の新たな活用法

3.1 現場バーチャルツアー

中部地方整備局管内の、新丸山ダム工事事務所にて実施した取組である。

昨年度より続く新型コロナウイルス感染症拡大の影響により、ダムの見学会等を行うことが出来ず、一般の方がダムの見学を行えない状況が続いている。

一方、今年度より新丸山ダムの本体工事を着工することもあり現在の丸山ダムの情景を確認できる期間は残り少ない。そのため堤体内監査路等も含めた丸山ダムを3D化し、インターネット上でダム見学を行えることが出来るようバーチャルダムツアーの作成を行った。バーチャルダムツアーはドローン等を用い撮影した写真をつなぎ合わせるにより3Dモデルを作成し、ダム内部の付属物等の紹介文

章を入れることによりインターネット上でダム見学を行えるものである。(図-5)

本事例は、専用のモデルを作成したものとなるが、3次元モデリングした工事現場のモデルを流用し、施工当時の映像、写真、図面を関連づけることは、低コストで実現できる。



図-5 バーチャルツアーモデル

3.2 自律（自動）施工の実現

i-Construction発足当時より活用が進んでいる技術として、MC, MG (マシンコントロール・マシンガイダンス) がある。

これらは3次元設計データの位置情報をもとに、建設機械に取り付けられたセンサーにより機械の制御及び補助を行うものであり、従前必要となっていた丁張り作業負担が軽減される等の効果が確認できている。

しかしながら、これらの技術については、機材リース費がかかる上、従来同様建機1機あたり一人のオペレーターが必要であることから施工人員削減効果は小さい。

一方、無人・自律施工可能な施工機械が、一部企業にて開発・活用されてきている。自律施工の場合、1人の管理者による複数建機の操作が可能であり、尚且つ労働災害のリスクも激減することができる。

本技術は一見新技術に見えるが、システムを細分化すると、根底となる部分はモデルデータに基づく測位が重要となっており、現在のMC・MG技術及び、ロボQS (図-6) といった遠隔操作技術を組み合わせた発展技術と言える。

また開発においては、2.3にて述べたとおり、汎用性が重要となる。開発企業における事例(図-7)では、単純操作の汎用機械に制御装置を装備することで、簡易な自律施工を実現している。



図-6 ロボQS

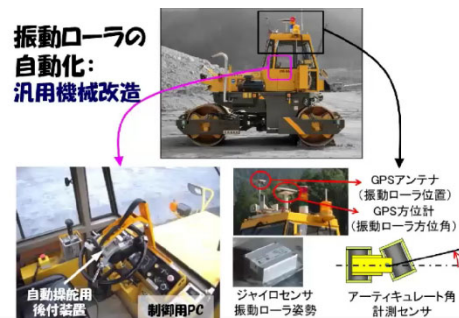


図-7 鹿島建設(株) A⁴CSELにおける振動ローラ自動化

3.3 発注者職務遂行におけるモデル活用

現在は、携帯による点群取得も出来るように、ソフトウェア等を用意できれば、点群データを取得することは難しいことではない。また、3次元CADソフトに関しては、各地方整備局職員は全員活用できる環境が整っている。

よって、発注者において現地取得した点群データに、詳細設計等で作成した3次元モデルデータを合わせ簡易な統合モデルを作成することは可能となっている。

3次元データは、2次元データと異なり、構造物、分割モデルごとといった、任意の分割単位モデルに、立体的に参照情報を入れ込むことができる。

この特性を活用し、発注者の通常業務で必要となる情報を現地モデルと紐付けることにより、視覚的に分かりやすいフォルダ管理等が可能となる。

また、新任職員に対し、積算における算出方法等を習得させる際に、3次元モデルに数量計算データ等を紐付けたモデル(図-8)を活用することによ

り、算出の考え方の理解促進に繋がることを期待できる。

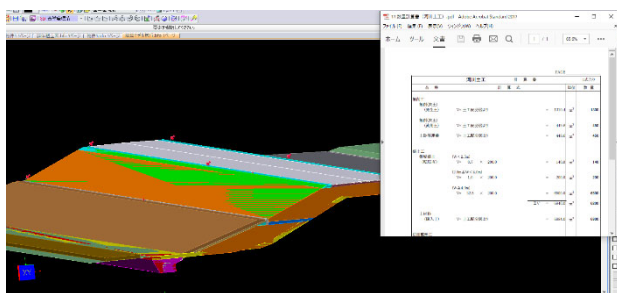


図-8 積算 3D モデル

3.4 複数地整協力による災害対応

令和3年7月の熱海市において、豪雨による甚大な被害が発生したことは記憶に新しい。

中部地方整備局では、本災害の被災地状況調査のため、TEC-FORCE ドローン調査隊を派遣した。

被災地状況調査については迅速な対応が求められる一方、隊員の移動、準備に労力を要し、現地状況把握やドローンのフライトプラン（図-9）検討が十分にできないという状況にあった。

そこで、昨今一般化しつつあるWEB会議システム（Teams）を活用し、ドローンによる被災地状況調査の経験が豊富な九州地方整備局、関東地方整備局の職員に協力を仰ぎ、各種資料作成、検討補助や助言を頂いた。

遠隔地の職員同士で協力し、1つのミッションを達成した、非常に効果的な事例となった。



図-9 作成されたフライトプラン

4. 今後想定される課題

4.1 基礎知識の習得

課題の1つ目として、基礎知識の不足が挙げられる。ここでいう基礎知識とは、デジタル技術を活用

する上で必要となる通信技術、データ形式といった知識を指す。

DXを推進するにあたり、デジタル技術は切り離せない技術であり、この知識については専門的なものが多く、土木分野において習熟している技術者は少ない。

しかしながら、DX推進を考える際重要となる、新たな価値の創出を考えるためには、これら技術の特徴、性質について理解することが必須となる。

デジタル技術は非常に便利な技術である一方、システム構築段階での方向性を誤った場合、後の活用・改良に支障を来すこととなり、結果として開発したシステムが上手く活用されない、活用しづらい状況となる。

4.2 各種ソフトウェア等の操作

課題の2つ目は、各種ソフトウェア等の操作技術者の育成である。3DCADをはじめ、クラウド技術を活用した情報共有システム、WEB会議システム等、様々なデジタル技術が開発・リリースされている。

これら技術はここ数年で急激に浸透してきたものが多く、受発注者問わず使いこなせる人材の育成が急務となっている。

5. 課題に対する対応策

5.1 実務的な研修の実施

知識のインプットは重要であるが、日常業務の中でのアウトプットが無ければ活用は見込めない。このため、基礎知識を踏まえ、現在の職務内容と紐付けた研修の実施が必要であると考えられる。

中部地方整備局では、発注者、受注者別に10月中旬よりWEB会議システムを活用したオンライン研修（図-10）を開始しており、研修コンテンツ改良を合わせて進めている。

DX研修A オンライン	
DX研修Aは中部地方整備局職員等の発注者向けの研修です。インフラ分野のDX、BIM/CIMおよびICT施工について、最新技術の概要を理解し、受注者と技術的事項に関する意思疎通が行えるように、導入・推進の必要性及び関係基準類、技術概要を理解し、発注業務等の実務を行うとともに、監督者の補助ができるよう理解を深めることを目的としたものです。	
1 日目	2 日目
建設産業におけるDXの動向	3次元測量の基礎
ICT活用取組事例紹介	3次元設計データの作成
BIM/CIMの概要	3次元設計データの応用利活用 (丁張逆打、基礎杭中心・構造位置決め)
3次元モデリング、ソフトウェア等の基礎	ICT建設機械の仕組み
BIM/CIM活用業務及び工事の流れ	3次元出力形管理手法
BIM/CIM活用業務及び工事のプロセス整理と留意点	
3DCADソフトウェアの応用操作とBIM/CIMモデルの活用	

図-10 DX研修の一例

5.2 インハウスエンジニアの育成

発注者においては、インハウスエンジニアとして、現在各事務所等に導入されているシステムを使用することを前提に、尚且つ実際に工事を発注、管理していく立場で各ステップごとの研修コンテンツを作成することが重要と考える。

具体的には、ステップのうち工事積算であれば、実際に発注された工事データを3次元化するための所要時間、必要とされるCAD操作、工事積算システムへの入力手法等に加え、従来のやり方との結果の比較といった内容とすべきと考える。

また、ただ操作方法などについてのみ述べるのではなく、別場面での活用方法や、データ形式及びその特徴について、関連させ盛り込んでいくことで、研修後も職員が自発的に活用・研鑽したくなるような内容を検討する。

5.3 現場活用を見据えたハンズオン研修

受注者においては、各種ソフトウェアの操作研修はハンズオン研修を基本とし、この研修内容は、研修用モデルデータとして、実際の工事現場のモデルデータを作成する等、受講者が自身の業務と関連づけて活用方法をイメージしやすい研修となるよう配慮する必要がある。

5.4 研鑽・情報発信

中部地方整備局では、自律施工勉強会と題し、技術開発に関する情報を講習会という形で紹介頂き、この内容をYouTubeを活用して発信している。(図-

11)

ソーシャルメディアを活用した開発内容の発信を行うことにより、知識の習得に繋がることに加え、新たな技術開発促進に繋がることを期待している。

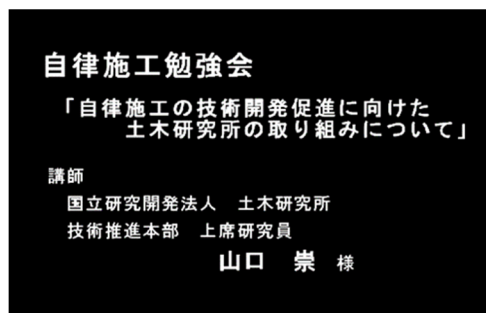


図-11 自律施工勉強会

6. まとめ

中部地方整備局では、昨年度末から今年度にかけて「DX推進」を掲げ、働き方改革として、大規模に動き出している。この中で、中部インフラDX推進室として行う施策は非常に重要であり、検討される内容は公共工事関係にとどまらず、中部地整職員全員の働き方改革に寄与するものとする。

現代においては、めまぐるしく状況は変化し、必要となる知識についても、急激に増加している。

しかしながら、新技術と言えど、真新しい技術は非常に珍しく、多くの技術は既存の仕組みを組み合わせたもの、若しくは改良したものが多い。よって、重要となるのは基礎知識であり、この知識を随時更新していくことが、最もDX推進に寄与すると考える。

これらを踏まえ、DX関係施設、現場等と連携し、目の前の課題解決のみならず、長期的な視点でデジタル技術の活用を起点とした検討を進めていく。

7. 謝辞

本論文の作成にあたり、講義資料の使用を快諾いただきました。鹿島建設(株)三浦様、3DCAD「V-nasシリーズ」についての疑問点や課題について、ご助言いただきました。川田テクノシステム株式会社荒木様、事務所取組説明、施工機械に関する助言を頂きました。新丸山ダム工事事務所、本局施工企画課の皆様にご心から感謝いたします。

地方公共団体及び企業における スマートシティ化の意向と課題

熊倉 永子¹・勝又 済¹・新階 寛恭²

¹国土技術政策総合研究所 都市研究部 都市計画研究室 (〒305-0802 茨城県つくば市立原1番地)

²国土技術政策総合研究所 都市研究部 都市施設研究室 (〒305-0802 茨城県つくば市立原1番地)

地方公共団体による都市問題の解決に向けたIoT等新技術の活用（スマートシティ化）の支援を目指し、地方公共団体と企業へスマートシティ化に関するアンケート調査を行い、意向や課題を俯瞰的に把握した。その結果、(1)地方公共団体が新技術を用いて解決したい都市問題は都市規模により違いがあること、(2)都市問題と新技術のマッチングは分野により進捗状況が異なること、(3)新技術導入の最大の課題はコストであり、コストに見合う都市問題解決効果が得られる評価手法の整備が期待されること等が分かった。

キーワード スマートシティ、地方公共団体、都市問題、意向調査

1. はじめに

超高齢社会の到来、交通弱者の増加、生産年齢人口の減少、インフラの老朽化、地方財政の逼迫等、わが国の都市問題は深刻化しつつあるが、IoT等の新技術の活用により都市問題の解決を図る「スマートシティ」への取り組みが着目され、Society5.0の社会的実践の場としても期待されている。スマートシティのテーマは、かつての環境・省エネルギーから、交通、生活支援、防災、防犯、観光等に多分野化し、活用が期待される新技術も技術革新により多様化している¹⁾。地方公共団体による都市問題の解決に向けたスマートシティ化を推進・展開するには、先進事例の共有や、新技術の導入・運用に当たり対処すべき課題等について俯瞰的に整理した情報が参考になると考えられる。

そこで本研究は、地方公共団体と企業に対しアンケート調査を行い、地方公共団体が解決したい都市問題と導入したい新技術、企業が保有する新技術と解決に資すると考える都市問題の傾向を、多分野にわたり俯瞰的に把握し、また両者の結果を突き合わせ相違を分析することで、地方公共団体がスマートシティ化の取り組みを実施する上での課題を抽出することを目的とする。

2. アンケート調査の概要

本研究では、都市問題を抱える地方公共団体と新技術を保有する企業に対しアンケート調査を実施し、それぞ

れの立場から都市問題の解決に向けた新技術導入に関する意向、導入状況、課題等についての回答を分析する。アンケート調査の対象は、回答の信頼性を確保するにはスマートシティの取り組みに一定の関心を有する主体が望ましいと考え、「2018年国交省ニーズ・シーズ調査」に応募した61の地方公共団体および146の企業とした²⁾。2020年12月～2021年1月にかけて、電子メールによる依頼・回収方式により実施した（回収数及び回収率は、地方公共団体：59団体、96.7%、企業：75団体、62.7%）。調査内容は、地方公共団体については、新技術を導入して解決したい都市問題をリストから選択し、それぞれの都市問題に対し導入したい新技術を回答するものとした。企業については逆に、保有する新技術をリストから選択し、それぞれの新技術に対し解決したい都市問題を回答するものとした。都市問題のリストは、「2018年国交省ニーズ・シーズ調査」の結果概要³⁾における12の分類を大分類とし、その下に筆者らが独自に42の中分類、172の小分類に細分化したものをを用いた。新技術のリストも同様の結果概要³⁾における7の分類を元に、回答が多いと予想した「自動運転技術・ロボット・新技術（輸送）」「ロボット・新技術（輸送以外）」を加えた9を大分類とし、その下に62の小分類へ筆者らが細分化したものをを用いた。その他、アンケートでは新技術の導入状況、新技術の導入にあたっての課題も回答するものとした。

アンケートに回答した地方公共団体は、図-1に人口規模の内訳を、図-2に窓口担当部局の内訳を示す。59団体中37団体（62.7%）が国のスマートシティ関連のモデル事業³⁾を実施していた。企業の業種の内訳は図-3に示す。

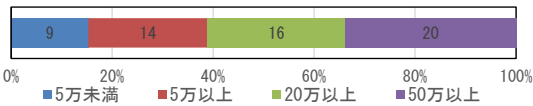


図-1 回答した地方公共団体の人口規模の内訳

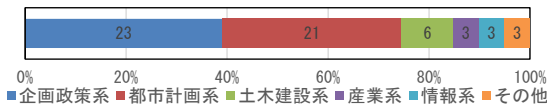


図-2 回答した地方公共団体の窓口担当部局の内訳

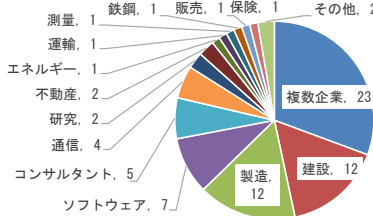


図-3 回答した企業の業種の内訳

表-1 新技術を導入して解決したい都市問題

大分類	中分類	都市規模別 (都道府県は除く)			
		地方公共団体全体(N=59)	大都市(政令市・特別区・中核市・特例市)(N=32)	左記以外の都市(N=22)	企業(N=75)
(ア) 交通・モビリティ	公共交通利用促進	59.3%	55.6%	45.5%	18.7%
	交通弱者の移動支援	69.5%	56.3%	86.4%	22.7%
	渋滞対策	16.9%	18.8%	9.1%	14.7%
	交通事故対策	3.4%	3.1%	4.5%	10.7%
	歩行者・自転車利用促進	20.3%	31.3%	0.0%	12.0%
	交通マネジメント	8.5%	9.4%	4.5%	25.3%
(イ) エネルギー	省エネ・省CO2	23.7%	28.1%	18.2%	24.0%
	再生可能エネルギー効率利用	15.3%	18.8%	13.6%	17.3%
	新エネルギーの利用	6.8%	3.1%	13.6%	5.3%
	エネルギーマネジメント	15.3%	18.8%	9.1%	21.3%
(ウ) 防災	災害時対策	35.6%	25.0%	45.5%	30.7%
	防災モニタリング・予測	28.8%	21.9%	40.9%	16.0%
	防災情報発信	32.2%	25.0%	40.9%	21.3%
	防災マネジメント	13.6%	9.4%	18.2%	12.0%
(エ) インフラの維持管理(老朽化)	公共施設の維持管理	1.7%	0.0%	4.5%	4.0%
	公共インフラの維持管理	23.7%	21.9%	22.7%	13.3%
	市民サービスに関する維持管理	13.6%	9.4%	22.7%	2.7%
	民間施設の維持管理	6.8%	3.1%	9.1%	5.3%
	デジタルインフラの整備・活用	16.9%	15.6%	9.1%	21.3%
	インフラの維持管理マネジメント	8.5%	3.1%	4.5%	24.0%
(オ) 観光	観光促進	42.4%	50.0%	31.8%	21.3%
	エリアブランディング	10.2%	12.5%	9.1%	9.3%
	観光情報発信	27.1%	25.0%	18.2%	16.0%
(カ) 健康・医療	地域振興・活性化	10.2%	3.1%	18.2%	12.0%
	健康促進	35.6%	31.3%	40.9%	20.0%
	医療費削減	3.4%	0.0%	9.1%	6.7%
	医療サービスの充実	18.6%	9.4%	31.8%	4.0%
(キ) 生産性向上	介護サービスの充実	10.2%	3.1%	13.6%	0.0%
	労働力不足	40.7%	37.5%	50.0%	20.0%
	産業振興	11.9%	6.3%	22.7%	18.7%
	市民意見の効率的な収集・活用	1.7%	3.1%	0.0%	2.7%
(ク) 環境	人材活用	5.1%	6.3%	4.5%	9.3%
	環境の保全・管理	3.4%	3.1%	4.5%	4.0%
	景観保全	1.7%	0.0%	4.5%	2.7%
(ケ) セキュリティ	鳥獣被害対策	5.1%	0.0%	13.6%	1.3%
	防犯・見守り	23.7%	15.6%	31.8%	22.7%
(コ) 物流	物流効率化	16.9%	9.4%	22.7%	9.3%
	買い物弱者支援	18.6%	9.4%	31.8%	1.3%
(サ) コンパクトなまちづくり	賑わい形成・地域の活性化	42.4%	50.0%	36.4%	36.0%
	都市開発の効率化	6.8%	3.1%	9.1%	10.7%
(シ) その他	行政サービス	22.0%	15.6%	31.8%	8.0%
	政策立案・評価	11.9%	15.6%	4.5%	10.7%
	不明				14.7%

※表中の数字は選択率。選択率25%以上を灰色でマーキング

3. 調査結果

(1) 新技術を導入して解決したい都市問題

表-1に、地方公共団体が新技術を導入して解決したい都市問題(中分類)、および企業が保有する新技術で解決しようとする都市問題(中分類)の選択状況を示す。地方公共団体が都市規模によらず共通して選択率が25%以上と高かったのは、「公共交通利用促進」「交通弱者の移動支援」「災害時対策」「防災情報発信」「観光促

表-2 都市問題解決のために導入したい新技術

大分類	小分類	都市規模別 (都道府県は除く)			
		地方公共団体全体(N=59)	大都市(政令市・特別区・中核市・特例市)(N=32)	左記以外の都市(N=22)	企業(N=75)
(1) 通信ネットワークとセンシング技術	通信ネットワークの活用(5G・LTE・LPWA・NB-IoT等)	18.6%	6.3%	36.4%	37.3%
	ジェネラティブ(基地局、通信インフラ等)	0.0%	0.0%	0.0%	9.3%
	ビーコンなどによる通信・情報配信	6.8%	12.5%	0.0%	22.7%
	ケーブルテレビの活用	1.7%	0.0%	4.5%	5.3%
	車載センサー(カメラ・GPS等)	16.9%	21.9%	9.1%	18.7%
	ETC2.0	3.4%	6.3%	0.0%	9.3%
	顔認証	5.1%	3.1%	4.5%	21.3%
	キャッシュレス化(電子決済等)	16.9%	9.4%	31.8%	21.3%
	水位の監視	22.0%	18.8%	31.8%	17.3%
	遠隔計測技術の活用(環境センサー等)	8.5%	3.1%	18.2%	21.3%
(2) 分析・予測技術	遠隔センシングデータの活用(カメラ、レーザ等)	18.6%	15.6%	22.7%	25.3%
	市民のスマホからのデータの活用(歩数、居住データ等)	13.6%	9.4%	18.2%	18.7%
	AIを活用した解析	40.7%	43.8%	31.8%	37.3%
	ビッグデータ等による分析・予測	23.7%	25.0%	18.2%	29.3%
	人流データ(防犯カメラ等)	13.6%	18.8%	4.5%	20.0%
	人流データ(携帯基地局・GPS等)	28.8%	25.0%	22.7%	21.3%
	人のバイタルデータ(心拍・歩数等)	13.6%	12.5%	9.1%	13.3%
	建築物・構造物の三次元データ	6.8%	6.3%	0.0%	22.7%
	建築物・構造物の性能に関するデータ	5.1%	0.0%	9.1%	12.0%
	地形・地盤データ	5.1%	0.0%	9.1%	17.3%
(3) データ共有	民間データ(POS・SNS・交通データ等)	10.2%	12.5%	4.5%	12.0%
	設備データ(稼働状況・故障等)	3.4%	3.1%	4.5%	20.0%
	環境・エネルギーデータ	1.7%	0.0%	0.0%	22.7%
	情報銀行(属性データ・健康データ等)	5.1%	3.1%	9.1%	8.0%
	データセンター	0.0%	0.0%	0.0%	9.3%
	データプラットフォーム構築(集約型)	18.6%	18.8%	13.6%	17.3%
	データプラットフォーム構築(分散型)	5.1%	0.0%	9.1%	13.3%
	データクラウド化(クラウドサービス等)	6.8%	3.1%	13.6%	22.7%
	IoTプラットフォーム(都市OS等を含む)	16.9%	12.5%	22.7%	25.3%
	ブロックチェーン	3.4%	3.1%	0.0%	8.0%
(4) データプラットフォーム	デジタルサイネージ	18.6%	21.9%	13.6%	18.7%
	可視化ツール(ダッシュボード等も含む)	23.7%	25.0%	13.6%	24.0%
	3D都市モデル(3Dマップ、AR等を含む)	13.6%	12.5%	9.1%	20.0%
	音声ナビゲーション	10.2%	6.3%	13.6%	10.7%
	計画支援システム(インフラ・施設管理等)	3.4%	0.0%	9.1%	12.0%
	リアルタイムナビ(計画・経路最適化を含む)	8.5%	9.4%	9.1%	14.7%
	MaaS(経路検索・運行情報等)	42.4%	43.8%	31.8%	20.0%
	MaaS(予約・決済)	28.8%	37.5%	13.6%	17.3%
	オンデマンド型交通	40.7%	43.8%	36.4%	18.7%
	交通社会イナボミマップ	6.8%	3.1%	4.5%	9.3%
(5) データの活用(可視化技術等)	自動運転運行管理システム	11.9%	12.5%	9.1%	14.7%
	駐車管理システム(空き・満車情報提供等を含む)	1.7%	3.1%	0.0%	8.0%
	スマートエネルギーEMS(エネルギーの最適化・分散制御)	13.6%	15.6%	9.1%	18.7%
	グリーン電力供給(太陽光発電、バイオマス等)	20.3%	21.9%	18.2%	17.3%
	地域冷暖房システム	0.0%	0.0%	0.0%	16.0%
	バーチャルパワープラント技術(VPP)	5.1%	6.3%	4.5%	16.0%
	データドリブンマーケティング(販促・クーポン等を含む)	6.8%	3.1%	9.1%	10.7%
	防災情報システム(災害モニタリング等を含む)	16.9%	9.4%	27.3%	24.0%
	防犯・見守りシステム(見守り装置を含む)	10.2%	6.3%	13.6%	16.0%
	健康管理システム(ポイント付与等を含む)	27.1%	25.0%	31.8%	16.0%
(6) (1)～(5)を活用した新たな技術	維持管理システム(遠隔制御等を含む)	1.7%	0.0%	4.5%	18.7%
	コワーキング環境整備	1.7%	0.0%	4.5%	8.0%
	自動運転技術(人の輸送)	59.3%	53.1%	43.6%	17.3%
	燃料電池バス、電動モビリティ導入	16.9%	15.6%	18.2%	8.0%
	パーソナルモビリティ	18.6%	18.8%	13.6%	13.3%
	無人輸送(自動運転、ドローン等)(物流輸送)	6.8%	3.1%	9.1%	17.3%
	貨客混載輸送	1.7%	0.0%	0.0%	8.0%
	シェアリング(カーシェア・シェアサイクル等)	22.0%	25.0%	18.2%	14.7%
	ロボット(ドローン以外)	10.2%	0.0%	27.3%	13.3%
	ドローン	18.6%	12.5%	27.3%	17.3%
(9) その他	その他	25.4%	28.1%	18.2%	9.3%
	不明	37.3%	34.4%	45.5%	

※表中の数字は選択率。選択率25%以上を灰色でマーキング

進」「健康促進」「労働力不足」「賑わい形成・地域の活性化」であった。都市規模別には、大都市では「歩行者・自転車利用促進」「省エネ・省CO2」「観光情報発信」、その他都市では「防災モニタリング・予測」「医療サービスの充実」「防犯・見守り」「買い物弱者支援」「行政サービス」の選択率が高かった。一方、企業では、「交通マネジメント」「災害時対策」「賑わい形成・地域の活性化」が多く選択されていた。

(2) 都市問題解決のために導入したい新技術

表-2に、地方公共団体が都市問題解決のために導入したい新技術(小分類)、および企業が保有する新技術(小分類)の選択状況を示す。地方公共団体が都市規模によらず共通して選択率が25%以上と高かったのは、「AIを活用した解析」「MaaS(経路検索・運行情報等)」「オンデマンド型交通」「自動運転技術(人の輸送)」であった。都市規模別には、大都市では「MaaS(予約・決済)」, その他都市では「通信ネットワークの活用」「キャッシュレス化」「水位の監視」「防災情報システム」「健康管理システム」「ロボット」「ド

ーン」であった。一方、企業で選択率の高かったのは、「通信ネットワークの活用」「遠隔センシングデータの活用」「AIを活用した解析」「ビッグデータ等による分析・予測」「IoTプラットフォーム」であった。

(3) 新技術と都市問題の選択の組み合わせにおける地方公共団体と企業の相違

地方公共団体が考える都市問題と新技術の組み合わせと、企業が考える組み合わせの相違を見るため、両者の回答を大分類で重ねた結果（マッチング）を表-3に示す。都市問題の観点からは、「(ア)交通・モビリティ」「(ウ)防災」「(エ)インフラの維持管理」「(サ)コンパクトなまちづくり」は両者の考えが一致する組み合わせが多い。一方、「(オ)観光」「(カ)健康・医療」は、地方公共団体の回答は多いが、企業の回答は少なかった。新技術の観点からは、「(1)通信ネットワークとセンシング技術」「(6) (1)～(5)を活用した新たな応用技術」は多くの都市問題に対し両者の回答が多かった。

「(3)データ保有」は、企業の回答割合は多いが、地方公共団体の回答割合は少ない傾向にあった。

(4) 地方公共団体と企業が考える新技術導入に当たっての課題認識とその相違

地方公共団体と企業が考える新技術導入に当たっての課題を導入状況別に整理した結果を、それぞれ表-4、表-5に示す。

まず、地方公共団体の導入したい新技術の回答数を導入状況別に見ると、「導入検討中」では「不明」が多い。企業でも「導入検討中」では課題として「都市問題との対応」の選択が多いことから、両者とも都市問題と新技術のマッチングに苦慮している様子が窺われる。

次に、地方公共団体と企業の新技術導入の課題を全体的に比較すると、両者とも「導入コスト」「運用コスト」、そして企業では「収益構造」がどの新技術にも共通して多く挙げられている。

新技術の種類別に導入の課題を見ると、「(2)分析・予測技術」は、地方公共団体ではコスト面の他に「人材不足」「精度懸念」「効果指標がない」も比較的多く、企業では「都市問題との対応」や「収益構造」が他の新技術に比べ多いことから、地方公共団体が求める精度や活用方法に対しビジネスとして成り立ちにくい可能性が読み取れる。「(3)データ保有」については、地方公共団体でコスト面以外に「社会受容性」「人材不足」「精度懸念」の課題が挙げられており、個人情報をはじめとするデータの取り扱いが課題となっている可能性がある。

「(7)自動運転技術・ロボット・新技術（輸送）」と「(8)ロボット・新技術（輸送以外）」は、地方公共団体、企業ともに、コスト面の他に「現行法規制」の選択も多く、社会実装のネックになっていることが窺われる。「(7)自動運転技術・ロボット（輸送）」では、地方公

表-3 地方公共団体と企業の回答のマッチング

都市問題	新技術								
	(1)通信ネットワークとセンシング技術	(2)分析・予測技術	(3)データ保有	(4)データプラットフォーム	(5)データの活用(可視化技術等)	(6)(1)～(5)を活用した新たな応用技術	(7)自動運転技術・ロボット・新技術(輸送)	(8)ロボット・新技術(輸送以外)	(9)その他
(ア)交通・モビリティ	★	○	○	○	○	★	○	△	△
(イ)エネルギー	△	△	△	△	△	△	△	△	△
(ウ)防災	★	○	○	○	○	★	○	△	△
(エ)インフラの維持管理	○	△	★	○	○	○	○	△	△
(オ)観光	△	△	△	△	△	△	△	△	△
(カ)健康・医療	△	△	△	△	△	△	△	△	△
(キ)生産性向上	△	△	△	△	△	△	△	△	△
(ク)環境	△	△	△	△	△	△	△	△	△
(ケ)セキュリティ	△	△	△	△	△	△	△	△	△
(コ)物流	△	△	△	△	△	△	△	△	△
(サ)コンパクトなまちづくり	○	△	○	△	○	○	○	△	△
(シ)その他	△	△	△	△	△	△	△	△	△

地方公共団体の回答割合

- 75%以上
- 50%以上75%未満
- 25%以上50%未満
- 25%未満
- 0%

企業の回答割合

- ★ 75%以上
- ◎ 50%以上75%未満
- 25%以上50%未満
- △ 25%未満
- 空欄 0%

例: ★ 両者の考えが一致している分野
◎ 両者の選択がない分野

表-4 導入段階別に見た新技術導入の課題<地方公共団体>

新技術導入の課題	都市問題解決のために導入したい新技術									不明	
	(1)通信ネットワークとセンシング技術	(2)分析・予測技術	(3)データ保有	(4)データプラットフォーム	(5)データの活用(可視化技術等)	(6)(1)～(5)を活用した新たな応用技術	(7)自動運転技術・ロボット・新技術(輸送)	(8)ロボット・新技術(輸送以外)	(9)その他		
各新技術の回答数(件)	導入済(159)	34	9	9	14	16	46	20	4	7	0
	導入予定(146)	20	18	20	9	13	42	9	6	3	6
	導入検討中(755)	112	54	74	30	31	212	100	20	10	112
各新技術における導入課題の内訳	導入コスト	導入済	3%	0%	0%	0%	19%	2%	5%	25%	0%
		導入検討中	18%	12%	20%	22%	26%	30%	23%	15%	38%
	運用コスト	導入済	15%	22%	11%	7%	19%	20%	75%	25%	0%
		導入検討中	19%	17%	19%	28%	32%	27%	22%	16%	54%
	合意形成	導入済	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		導入検討中	3%	3%	1%	9%	3%	5%	2%	3%	8%
	社会受容性	導入済	0%	0%	0%	0%	6%	9%	0%	0%	14%
		導入検討中	5%	2%	12%	6%	0%	4%	12%	6%	0%
	現行法規制	導入済	0%	0%	0%	0%	0%	2%	5%	25%	0%
		導入検討中	1%	2%	1%	3%	3%	2%	12%	19%	0%
	設置場所	導入済	9%	0%	0%	0%	6%	7%	5%	0%	0%
		導入検討中	5%	5%	1%	0%	0%	2%	2%	0%	0%
	人材不足	導入済	0%	11%	22%	7%	0%	0%	0%	0%	0%
		導入検討中	3%	7%	5%	0%	0%	3%	1%	3%	0%
	精度懸念 ²⁾	導入済	0%	11%	22%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	導入検討中	10%	15%	9%	0%	12%	3%	4%	3%	0%	
効果指標がない ²⁾	導入済	6%	22%	0%	0%	6%	7%	0%	0%	0%	
	導入検討中	3%	3%	2%	0%	3%	1%	4%	10%	8%	
製品選択の根拠 ²⁾	導入済	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	14%	
	導入検討中	0%	5%	1%	3%	0%	5%	3%	3%	0%	
その他	導入済	12%	11%	0%	0%	19%	15%	0%	0%	43%	
	導入検討中	8%	10%	20%	13%	6%	17%	4%	3%	15%	
空欄	導入済	56%	22%	44%	86%	25%	39%	10%	25%	29%	
	導入検討中	24%	19%	9%	16%	15%	7%	4%	10%	0%	

1) 各新技術における導入課題の延べ回答数で除した割合
2) 地方公共団体へのアンケートのみ

表-5 導入段階別に見た新技術導入の課題<企業>

新技術導入の課題	保有する新技術									不明	
	(1)通信ネットワークとセンシング技術	(2)分析・予測技術	(3)データ保有	(4)データプラットフォーム	(5)データの活用(可視化技術等)	(6)(1)～(5)を活用した新たな応用技術	(7)自動運転技術・ロボット・新技術(輸送)	(8)ロボット・新技術(輸送以外)	(9)その他		
各新技術の回答数(件)	導入済(372)	88	27	61	36	38	89	15	14	4	
	導入予定(118)	26	12	15	12	9	32	5	4	3	
	導入検討中(321)	63	13	62	18	19	97	41	8	0	
各新技術における導入課題の内訳	導入コスト	導入済	19%	26%	18%	25%	21%	24%	27%	7%	25%
		導入検討中	4%	0%	6%	0%	0%	4%	11%	13%	0%
	運用コスト	導入済	23%	30%	25%	25%	26%	23%	0%	0%	25%
		導入検討中	5%	7%	22%	6%	5%	5%	16%	25%	0%
	合意形成	導入済	2%	4%	2%	3%	5%	4%	0%	7%	0%
		導入検討中	5%	0%	0%	0%	0%	2%	5%	0%	0%
	社会受容性	導入済	3%	0%	3%	0%	3%	3%	7%	0%	0%
		導入検討中	1%	0%	3%	0%	0%	2%	5%	0%	0%
	現行法規制	導入済	1%	4%	0%	3%	0%	2%	0%	29%	0%
		導入検討中	4%	0%	0%	0%	0%	5%	15%	13%	0%
	設置場所	導入済	7%	4%	2%	0%	3%	3%	0%	0%	0%
		導入検討中	4%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%
	人材不足	導入済	2%	0%	2%	5%	5%	1%	0%	0%	0%
		導入検討中	0%	0%	1%	11%	0%	0%	0%	13%	0%
	都市問題との対応 ²⁾	導入済	1%	0%	2%	3%	5%	3%	7%	7%	0%
	導入検討中	10%	29%	6%	6%	10%	10%	0%	0%	0%	
他社との優位性 ²⁾	導入済	3%	0%	7%	0%	8%	7%	13%	7%	0%	
	導入検討中	0%	7%	3%	0%	0%	4%	2%	0%	0%	
収益構造	導入済	12%	30%	21%	23%	21%	19%	27%	14%	0%	
	導入検討中	10%	29%	25%	22%	29%	35%	18%	0%	0%	
その他	導入済	5%	0%	8%	3%	0%	4%	7%	21%	50%	
	導入検討中	18%	14%	10%	28%	10%	12%	9%	0%	0%	
空欄	導入済	21%	4%	11%	13%	3%	4%	13%	7%	0%	
	導入検討中	38%	14%	22%	28%	48%	21%	18%	38%	0%	

1) 各新技術における導入課題の延べ回答数で除した割合
2) 企業へのアンケートのみ

共同体で「社会受容性」も多く、自動運転技術を利用する市民の理解や経験が成熟することで多方面での活用が

期待される。なお、「空欄」は導入課題のないことを意味し、その割合は「導入済」の地方公共団体で高い傾向にある。「導入済」の地方公共団体では「合意形成」の課題はどの新技術でも0%である。「導入済」の地方公共団体のノウハウの共有が新技術導入の展開に有効となることが期待される。

4. 地方公共団体がスマートシティ化の取り組みを実施する上での課題の抽出と考察

前章までのアンケート調査の分析結果を踏まえ、地方公共団体がスマートシティ化の取り組みを実施する上での課題を考察する。

(1) 新技術を用いて解決したい都市問題の都市規模による違い

地方公共団体が新技術を導入して解決したい都市問題には、大都市では公共交通の利用促進に向けた問題、その他の都市では防災面に加え主に高齢者の生活支援に関する問題が多く挙げられるという違いが見られた。大都市では都市サービスの一層の効率化・高度化が、その他都市では、近年激甚化しつつある水災害等への対応や大都市に先行した人口の超高齢化への対応が求められていることが窺われる。地方公共団体のスマートシティ化の取り組みは全国一律ではなく、都市規模に応じた対応が求められる。

(2) 都市問題と新技術のマッチングに関する情報共有の必要性

「交通・モビリティ」等、地方公共団体が解決したい都市問題（公共交通利用促進、交通弱者の移動支援、等）と企業の保有する新技術（MaaS、オンデマンド型交通、等）のマッチングが進んでいる分野がある一方、「健康・医療」等、地方公共団体の導入意向に対し適用可能な新技術が十分でない分野や、AIやビッグデータを活用した「分析・予測技術」等、企業の期待に対し導入可能な都市問題が確立していない分野があることが示された。また、新技術導入の検討段階にある地方公共団体や企業では、都市問題と新技術のマッチングに苦慮している様子が窺われた。

マッチングが進んでいる分野では、社会実装の展開に向けて、新技術導入の課題への対処方策をはじめとした先行事例の情報共有を図っていくことが重要であると思われる。また、都市問題に適用可能な新技術や、新技術が導入可能な都市問題が確立していない分野については、地方公共団体と企業の間で情報交換を図り、マッチングの模索を進めることが考えられる。これらの取り組みを積み重ねることで、新技術導入の検討段階にある地方公共団体や企業にとって参考となるであろう都市問題と新技術の体系的整理につながることを期待される。

(3) 新技術導入におけるコストの考え方

新技術導入の最大の課題は、地方公共団体、企業ともにコスト面（導入コスト、運用コスト、収益構造）であり、どの新技術にも共通していることが明らかとなった。新技術が普及すれば市場原理によるコスト低下が期待できるが、そのためには、モデル事業による実証実験等を通じ持続可能な導入事例を増やしていくことが重要であると考えられる。また、地方公共団体においては、都市問題解決効果の直接的または経済的評価指標はほとんど見られなかったことから、新技術の導入・運用コストに見合った都市問題解決効果が得られるかどうかを計画段階や進捗段階で定量的に予測・評価可能な手法の整備も、今後必要と考えられる。

5. まとめ

今回のアンケート結果から、①地方公共団体の抱える都市問題は都市規模により異なり、スマートシティ化の取り組みは全国一律ではなく都市規模に応じた対応が必要であること、②「交通・モビリティ」等、地方公共団体の都市問題と企業の新技術のマッチングが進んでいる分野がある一方、「健康・医療」等、適用可能な新技術が不十分な分野、「分析・予測技術」等、導入可能な都市問題が認識されていない分野等もあり、都市問題と新技術のマッチングに関する情報共有が必要であること、③どの新技術の導入においても最大の課題はコスト面（導入コスト、運用コスト、収益構造）であり、コストに見合った都市問題解決効果が得られることを計画段階や進捗段階で定量的に予測・評価するための評価手法の開発が求められること、等が明らかとなった。弊所では、地方公共団体におけるスマートシティ化の推進支援のため、これらの課題に対する研究開発を今後も進めたい。

謝辞：本研究のアンケートにご協力いただいた地方公共団体、企業の方々に感謝の意を申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省都市局（2018）、スマートシティの実現に向けて【中間とりまとめ】、<https://www.mlit.go.jp/common/001249774.pdf>、最終確認日：2021年10月20日
- 2) 国土交通省スマートシティプロジェクトチーム事務局（2019）、スマートシティの実現に向けた提案募集の結果について、https://www.mlit.go.jp/toshi/city_plan/toshi_city_plan_tk_000044.html、最終確認日：2021年10月20日
- 3) 内閣府「近未来技術等社会実装事業」、総務省「データ利活用型スマートシティ推進事業」、経済産業省「地域版 MaaS 創出推進事業」、経済産業省「パイロット地域分析事業」、国土交通省「スマートシティモデル事業（先行モデルプロジェクト、重点事業化促進プロジェクト）」、国土交通省「新モビリティサービス推進事業」2021年4月時点