

**令和 6 年度
国土交通省 国土技術研究会**

**概要論文集
～イノベーション部門Ⅰ～**

研究会1日目(12月5日(木)):B会場

10:15～15:45

令和6年度 国土交通省 国土技術研究会 プログラム

1日目(12月5日(木))			
研究発表会場			
会場	A 2号館共用会議室2A・2B	B 2号館共用会議室3A・3B	C 2号館共用会議室5
区分	○自由課題 ・一般部門(安全・安心Ⅰ) ・一般部門(安全・安心Ⅱ) ※国土技術開発賞受賞 技術報告含む	○自由課題 ・イノベーション部門Ⅰ ・一般部門(活力) ※SBIR建設技術研究開発 助成制度成果報告および 国土技術開発賞受賞 技術報告含む	○自由課題 ・アカウンタビリティ部門 ・イノベーション部門Ⅱ ※SBIR建設技術研究開発 助成制度成果報告および 国土技術開発賞受賞 技術報告含む
9:00			
10:00	9:45～ 受付開始		
11:00	A1 10:15～12:00 一般部門 (安全・安心Ⅰ) ・審査課題:6本 ・報告課題:1本	B1 10:15～12:00 イノベーション部門Ⅰ ・審査課題:6本 ・報告課題:1本	C1 10:15～12:00 アカウンタビリティ 部門 ・審査課題:7本
12:00			
13:00	A2 13:00～14:15 一般部門 (安全・安心Ⅰ) ・審査課題:4本 ・報告課題:1本	B2 13:00～14:15 イノベーション部門Ⅰ ・審査課題:5本	C2 13:00～14:15 イノベーション部門Ⅱ ・審査課題:4本 ・報告課題:1本
14:00			
15:00	休憩(15分)	休憩(15分)	休憩(15分)
	A3 14:30～15:45 一般部門 (安全・安心Ⅰ) ・審査課題:5本	B3 14:30～15:45 イノベーション部門Ⅰ ・審査課題:4本 ・報告課題:1本	C3 14:30～15:45 イノベーション部門Ⅱ ・審査課題:4本 ・報告課題:1本
16:00			
17:00	休憩(15分)	休憩(15分)	休憩(15分)
	A4 16:00～17:00 一般部門 (安全・安心Ⅱ) ・審査課題:4本	B4 16:00～17:00 一般部門(活力) ・審査課題:4本	C4 16:00～17:00 イノベーション部門Ⅱ ・審査課題:4本
18:00	A5 17:15～18:15 一般部門 (安全・安心Ⅱ) ・審査課題:4本	B5 17:15～18:15 一般部門(活力) ・審査課題:4本	C5 17:15～18:15 イノベーション部門Ⅱ ・審査課題:4本

2日目(12月6日(金))

	研究発表会場			特別講演会場
会場	A 2号館共用会議室2A・2B	B 2号館共用会議室3A・3B	C 2号館共用会議室5	D 3号館10階共用会議室
区分	○自由課題 ・一般部門(安全・安心Ⅱ) ※SBIR建設技術研究開発 助成制度成果報告および 国土技術開発賞受賞 技術報告含む ○各局等提案課題	○自由課題 ・一般部門(活力) ※SBIR建設技術研究開発 助成制度成果報告含む ○各局等提案課題	休憩スペース ※14:00まで	○特別講演 ○表彰式
9:00				
	9:15～ 受付開始			
10:00	A6 9:45～10:45 一般部門 (安全・安心Ⅱ) ・審査課題:3本 ・報告課題:1本	B6 9:45～10:45 一般部門(活力) ・審査課題:4本		
	休憩(15分)	休憩(15分)		
11:00	A7 11:00～12:00 一般部門 (安全・安心Ⅱ) ・審査課題:3本 ・報告課題:1本	B7 11:00～12:00 一般部門(活力) ・審査課題:3本 ・報告課題:1本		
12:00				
13:00	A8 13:00～14:00 各局等提案課題 ・2本	B8 13:00～14:00 各局等提案課題 ・2本		
14:00				
15:00				
			15:00～16:00 特別講演	
16:00			16:05～16:35 表彰式	
			16:35～16:50 受賞者記念撮影	
17:00				
18:00				

自由課題(イノベーション部門Ⅰ)

B会場：12月5日(木)10:15～15:45

セッション	発表 順序	質疑 区分	発表時間	課題名	発表者所属	発表者名
B1	1	審査課題	10:15～10:30	秋田港におけるトラック自動運転技術の実証実験について	東北地方整備局 秋田港湾事務所 保全課	三上 煌央
	2		10:30～10:45	OD交通量の動画化から見る社会課題の把握について	北陸地方整備局 長岡国道事務所	佐谷 一樹
	3		10:45～11:00	令和5年度トンネル点検業務で活用した「隧道SfM/MVS技術」の計測結果と課題についての一考察	中国地方整備局 松江国道事務所 管理第二課	金山 直樹
	4		11:00～11:15	アスファルト舗装の長寿命化に向けた取組	東北地方整備局 仙台河川国道事務所 道路管理第二課	松浦 友香
	5		11:15～11:30	都市問題の解決に向けたスマートシティ化に関する研究	国土技術政策総合研究所 都市研究部 都市計画研究室	安藤 亮介
	6		11:30～11:45	都市の暑熱対策における人流データの活用	国立研究開発法人建築研究所 環境研究グループ	熊倉 永子
	7	報告課題	11:45～12:00	【SBIR建設技術研究開発助成制度成果報告】 ※論文掲載なし 3Dデジタル技術による最適化設計を用いた非溶接橋梁用ブラケットの研究開発	ヒノデホールディングス株式会社 ヒノデグローバルイノベーションセンター 技術開発グループ マネージャー	黒川 貴大
B2	8	審査課題	13:00～13:15	デジタル技術等を活用した河川管理高度化への挑戦 ～全国初の河川系DX出張所～	関東地方整備局 利根川下流河川事務所 管理課	藤巻 香祐
	9		13:15～13:30	庄内川における河道内樹木の管理に関する取組について	中部地方整備局 庄内川河川事務所 管理課	坂野 正弥
	10		13:30～13:45	和歌山工業高等専門学校と連携した土砂災害防災学習教材の開発	和歌山県 土砂災害啓発センター	岐山 雄亮
	11		13:45～14:00	AIを用いた日吉ダム低水管理支援システムの構築	独立行政法人水資源機構 日吉ダム管理所	林 良真
	12		14:00～14:15	BIM/CIM導入・運用を支援するチャットボットの役割と展望	四国地方整備局 四国技術事務所 品質調査課	日詰 太郎
B3	13	審査課題	14:30～14:45	山間部でDX推進！ ～砂防施設点検における長時間ドローン等の活用～	中部地方整備局 越美山系砂防事務所 工務課	安田 真翔
	14		14:45～15:00	吸い出しによる空洞陥没の二層フィルターを用いた復旧及び再発防止対策について	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地盤研究領域 動土質研究グループ	工代 健太
	15		15:00～15:15	下新川海岸における離岸堤工事のICT施工導入効果	北陸地方整備局 黒部河川事務所	大谷内 啓丞
	16		15:15～15:30	海峡部低位置道路照明設備の採用及び試験施工	本州四国連絡高速道路株式会社 保全部電気通信課	堀川 峻
	17	報告課題	15:30～15:45	【国土技術開発賞受賞技術報告】 ※論文掲載なし マンホール鉄蓋取替工法（セイフティーフラット工法）	株式会社シー・エス・ケエ 取締役工事部長	工藤 守

秋田港における トラック自動運転技術の実証実験について

○三上 煌央¹ ・ 斉藤 雅志²

¹秋田港湾事務所 保全課 （〒011-0945 秋田県秋田市土崎港西1丁目1-49）

²秋田港湾事務所 海洋利用調整室 （〒011-0945 秋田県秋田市土崎港西1丁目1-49）。

近年、物流業界では少子高齢化の進行、長時間労働などのさまざまな原因によりトラックドライバー不足が顕著化してきている。港湾貨物において、トラックドライバー不足は貨物等の輸送力の低下に直結するため、物流機能の確保が課題となっている。

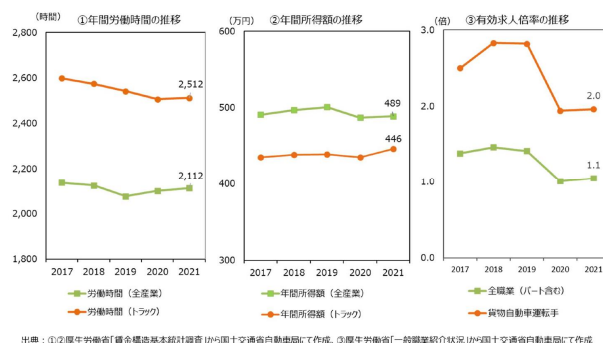
このような状況を改善するためには、トラックドライバーの負担を減らすため労働環境を改善する必要がある。その方法の一つとして、自動追従機能や車線維持機能等のシステムを搭載したトラックを用い、1人のドライバーで複数の車両をコントロールする「自動運転」の活用が挙げられている。今回、秋田港をモデルとして、実際に荷役作業が行われているルートで「自動運転レベル2」での実証実験を行い、将来的な社会実装へ向けて安全性の検証を行った。

キーワード トラック自動運転

1. 現在の物流における課題

物の飛び交いが激しい現代において、トラック輸送は重要な輸送形態のひとつである。現在の国内貨物のモード別輸送量は、トンベースが9割超、トンキロベースでは約5割を占めており、人々が生活する上で、トラック輸送は非常に大切な役割を果たしている。近年では個人がインターネットで簡単に商品を購入できるようになったことで取り扱う荷物が増加してきていることから、今後もトラック輸送の需要は高まっていくことが見込まれている。また、港湾においても、船舶により運ばれてきた貨物が港でトラックに積替えられ、荷主のもとへ輸送されることから、トラック輸送は欠かせないものとなっている。しかし、近年は少子高齢化の進行をはじめ、長時間運転しつづければならないような過酷な環境であることや、他の職業と比べて相対的に低賃金であることなどから、トラックドライバーを目指す人が減少しており、ドライバー不足が顕著化してきている。このような現状を踏まえ、過酷な環境を改善すべく、今年4月1日から自動車運転業務における時間外労働「年間960時間」の上限規制が適用された。その結果、労働時間が短くなることで1人で1日に走行できる距離が短くなってしまったため、今まで通りの輸送ができなくなってしまい物流が滞ってしまう恐れがある、いわゆる「物流の2024年問題」に直面している。

このような様々な原因によってトラックドライバー不足による物流機能の停滞の可能性が懸念されている。



図ー1 トラックドライバーの現状

2. トラック自動運転化について

上記のような状況を改善するためには、トラックドライバーの労働環境を改善していくとともに、限られたドライバーで効率的に荷物を運べるような生産性向上を図る必要がある。その具体的な方法として注目したのが、トラック自動運転である。

トラック自動運転は、道路を走行する一般車両・通行人・障害物・信号などを検知するカメラ、自動アクセル・ブレーキ、前後の車両との間隔や車両から車線までの距離を感知するセンサー等の機器を車両に搭載し、自動での走行を可能にすることを目的とした取り組みである。

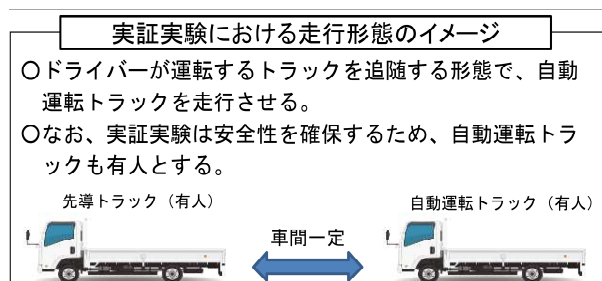
現代の発達した技術により開発されたシステムを用いて多くの運転操作を自動化することによって、ドライバーの負担軽減を図ることができる。さらに、一人のドライバーで複数の車両をコントロールすることが可能となれば、生産性が向上することにより労働環境の改善につながることを期待できると考えられる。

3. 秋田港における実証実験の内容

これまで一般道や高速道路での自動運転の実証実験は実施されてきたが、実際に荷役作業が行われている場所での走行は前例がなく、限られた場所・時間で荷物を積んだトラックが自動での走行は可能なのか、また、荒天時や冬期に強風・積雪等の厳しい環境となる場所では安全性を確保できるのかなど、課題が多く残されていた。

そこで今回、通常の道路と走行環境が異なる港湾区域内において、実際に荷役作業が行われているルート（ふ頭内道路、臨港道路、企業の工場内道路など）での安全性について、秋田港（秋田県）で検証を行うこととなった。港湾周辺には多くの企業が集中して立地し、荷役場所から工場までの比較的短い距離で大量の荷物のピストン輸送が行われることにあわせ、冬期に厳しい環境となる秋田港は、実証実験を行うには最適な環境であると考えられた。

実験の方法は、人が運転する先導車両を自動追従機能や車線維持機能を持つ機器を搭載したトラックが、後方を追従する形態で行う。なお追従する後続車は有人とし、危険を察知した際に手動での操作に切り替え可能な「レベル2」での走行を行う。



図－2 走行形態イメージ

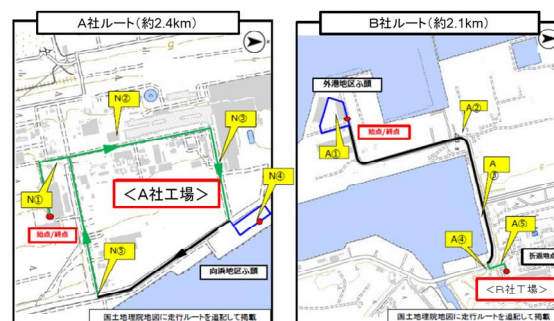
また、荒天時における走行中の自己位置を正確に推定するため、準天頂衛星測位、ネットワーク型RTK-GNSS測位の2つの衛星測位システムを用い、自動運転を行う上でどちらが安全性を向上させることができるのかを検証する。



図－3 自動運転トラックの搭載機器

今回は港湾背後に工場を構える2社の企業の協力のもと、実際に荷役作業が行われる岸壁から工場敷地内までのルートを走行し、定められたコースの通り走行ができるかに加え、前車両との車間距離や進行方向に対する横ずれ、工場内の狭い道路や右折で公道へ進入する地点などの安全性、積雪・吹雪などの荒天時にどのくらい自動での走行が可能なのか等の観点から安全性の検証を行った。実験期間はAルート・Bルートともに秋期（令和5年10月～11月）と冬期（令和6年1月～2月）において、計4回の実験を行った。

なお、実証実験にあたり各企業及び有識者、関係各署による検討会を開催しより多くの視点から意見をいただき、安全対策に万全を期した状態で実験に臨んだ。



図－4 実証実験走行ルート

4. 実証実験の成果

(1) 秋期実験の結果

○秋期実験全体を通しての結果

- ・先導車両を正常に認識し、車間距離は設定値である(車間時間3秒)を維持し安定して走行することができていた。
しかし、先導車両を認識している場合でも、システムの制御遅れにより設定した車間距離よりも開き気味・詰まり気味になる場面もまれに見受けられた。
- ・横ずれの幅については、両方のルートにて全区間で概ね±50cmの範囲で走行していた。この横ずれ幅は直線路では小さく、カーブの際に大きくなる傾向であったが、ルート内での走行に問題はなかった。
- ・車両の停止については、両方のルートにて設定した位置よりも平均0.2m～0.3mのずれがあったが、ほぼ指定通りの位置で停止できていた。



写真－1 自動運転トラック

○A社ルート

- ・工場内の道路において対向車とすれ違う際、ドライバーが対向車との間隔が十分ではないと判断し、錯綜を避けるため手動で回避する場面が何度あった。障害物を検知するシステムの検知範囲を広げることで、改善が可能であることが分かった。
- ・工場内にて水蒸気が噴射され視界が遮断されてしまい、一時的に先導車両を検知することができなくなってしまった場面があった。現状のシステムでは水蒸気を障害物と認識してしまうため、今後の技術発展にて水蒸気等が発生しても正常に先導車両を検知できるシステムを開発する必要がある。

○B社ルート

- ・荷役作業を行うふ頭内の上屋では、GNSSによる衛星通信環境が悪く、上屋を出た直後は衛星を受信するまで時間がかかるため、手動に切り替えて走行する場面もあった。

- ・工場出口から右折により公道への進入では、車両のほかに公道の周辺の電柱等に路側センサーを設置したことにより、概ね安全に進入することができていた。しかし、手動での運転と比べて時間がかかることや、路側センサーからの検知情報を車両が受信しないことにより、発進可能であるにも関わらず発進しないケースも何度かあった。
改善策として、車両や工場出入口周辺に設置した各センサーの検知範囲を広げることや、通信環境の整備を図る必要がある。



写真－2 追従走行中の様子

(2) 冬期実験の結果

○冬期実験全体を通しての結果

- ・秋期実験で得た結果を踏まえ、センサーの障害物を検知する範囲の拡大、歩行者等を検知してからブレーキがかかるまでの時間を早める等のシステムの設定を見直し、冬期実験に臨んだ。例年になく暖冬で積雪・強風雪となる期間が短く、思うように荒天時のデータをとることができなかったが、積雪や強風雪時のトラックの挙動や秋期との違いを得ることもできた。



写真－3 人(マネキン)を検知し停止する様子
(A社ルート)

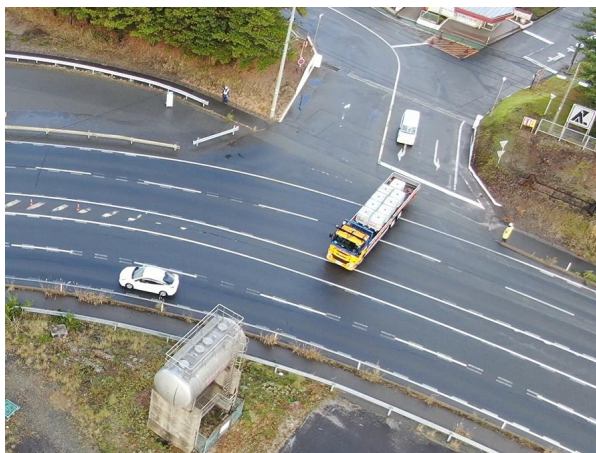
- ・積雪・吹雪が発生した際、車両に搭載した障害物の形状等を検知するセンサーが、雪を障害物と判断し一時停止する事象が発生した。また、カメラに雪が付着することにより先導車両を検知できない事象が発生した。このような事象に対する対処法について検討したが、期間内に同様の降雪がなくデータの蓄積を行うことができなかった。

○A社ルート

- ・対向車とのすれ違いにおいて、秋期の結果を受けて制御対象領域(障害物を検知する範囲)を拡大する等のシステム変更による微調整を行ったところ、トラックが対向車を早めに検知することで安全に走行できていた。これによりドライバーが手動により回避する場面は減少した。
- ・秋期実験時と同様、工場内の道路において対向車や駐車中の車両とすれ違う際、錯綜を避けるため手動で回避する場面が何度かあった。今回の実験で用いたシステムでは障害物を回避する機能は搭載されていないため、手動による回避が必要となる。今後の技術開発により、障害物を安全に回避することは可能であることが分かった。

○B社ルート

- ・工場出口から右折により公道への進入では、秋期実験時と同様、概ね安全に進入することができていたが、手動での運転と比べて時間がかかることや、路側センサーからの検知情報を車両が受信しないことにより、発進可能であるにも関わらず発進しないケースが発生。対応策として、路側センサーの検知範囲を広げることや、通信環境（今回は4Gを使用）の改善を図る必要がある。



写真－4 右折で公道へ進入する様子
(B社ルート)

(3) 全体を通して得られた成果・課題

- ・今回の実証実験期間中に、協力いただいている企業や有識者を対象に実験の様子を公開する視察会を開催し、実験内容や実施方法について多くのご意見をいただいたことで、実験の精度向上へ向けて対応を行うことができた。
- ・秋期、冬期ともに先導する車両や信号の認識による減速・停止等の挙動や、発進、指定場所への停止については、概ねよく反応できており、他の車両や障害物との接触の危険性も見られなかったことから、現在の技術でも安全に走行できていたと考えられる。
- ・自己位置をより正確に推定するために用いた準天頂衛星測位、ネットワーク型RTK-GNSS測位の2つの衛星測位システムについては、ネットワーク型RTK-GNSS測位の方がより高精度に推定できることがわかった。ただし、工場内の上部構造物がある場所や荷役作業を行うふ頭内の上屋などでは衛星を検知することが難しいため、今回衛星のほかにも用いた3次元地図をアップデートし併用することで、障害物により衛星からの通信が遮断されても安全に走行することが可能だと考えられる。



写真－5 降雪時の運転の様子(車内カメラ)

5. 今後に向けて

今回の実験では、短・中距離で貨物の移動が激しい港湾での実験として、秋田港をモデルに現状のシステムで悪天候時における安全性などを検証し、将来的な社会実装へ向けて有益な成果を得ることができた。前述の通り、ドライバー不足により物流面で多くの課題が残されている中、限られたドライバーで現在またはそれ以上の輸送能力を確保するために、自動運転技術は生産性向上を図る上で必要となってくると考えられる。今後自動運転の検証が繰り返され、社会実装されることにより、労働環境の改善やトラックドライバー不足の改善にも寄与される考えられる。本実証実験の成果・課題が物流における課題解決へ寄与するとともに、更なる技術の発達による国内の物流機能の維持と労働環境の改善に期待したい。

OD交通量の動画化から見る社会課題の把握について

水口 直人¹・佐谷 一樹¹

¹北陸地方整備局 長岡国道事務所 計画課 (〒940-8512 新潟県長岡市中沢4-430-1)

近年、道路の交通課題については、日単位から時間単位への分析など、より詳細な現状課題を把握するため様々な検討が進められている。その中で、交通容量や道路構造に対し、実際の交通量や旅行速度が適かななどの一般的な分析が行われているが、利用者動向を重ねて把握することは容易ではない。今回、ETC2.0プローブデータのOD交通量等を動画化することで、利用者動向から見る交通課題の分析を行ったので、その有用性を報告する。

キーワード 見える化、ETC2.0プローブデータ、OD交通量、社会課題、動画

1. はじめに

道路交通課題の分析に用いる交通量などのデータは、あらかじめ道路に設置したトラフィックカウンターによる交通量観測や人手観測などの定点データ、ETC2.0をはじめとするプローブデータなどから取得している。中でも、ETC2.0プローブデータは車両1台あたりの位置情報を時系列で把握でき、車の走行速度、走行経路、OD（発着）、挙動履歴といったデータが取得できるため、道路交通状況の課題把握に大いに役立っており、交通渋滞などの要因分析には必要不可欠なデータとなっている。

一方で取得データが膨大になることから、交通課題の正確な把握は出力データの見える化が必要となる。これまでも旅行速度の見える化やODの見える化など、それぞれのデータ毎に見せ方を工夫して道路交通の課題把握を行ってきたが、従来の見える化では複数の図表を比較して検討する必要性や、時間経過、移動経路を把握することのほか、広範囲の交通状況を踏まえた課題箇所の抽出が難しいなどの課題があった。

本稿では、ETC2.0プローブデータの旅行速度データとODデータの両データを分単位で同時に把握することを目的として、プローブデータの動画化による新たな見える化の実施内容、及び交通課題分析への活用性について報告する。

2. 使用データの概要

今回の分析では交通ビッグデータのETC2.0プローブデータを用いた。

ETC2.0プローブデータは、図-1に示すように、ETC2.0サービスに対応する車載器を搭載した車両が道路に設置された路側機と呼ばれる機械下を通過する際に、道路（路側機）と車両（車載器）とで双方向通信することにより、プライバシー対策がなされた形式で「走行情報」「経路情報」などの情報をプローブ情報として収集している²。

3. 現状の分析手法と新たな見える化

(1) 現状の分析・見える化の手法

昨今のETC2.0プローブデータを用いた交通状況分析は、整備効果、交通実態、観光動向等の把握に活用している。それらの分析を行うにあたっては一般的に、プローブデータを旅行速度図やモザイク図、ODペア図と呼ばれる図に置き換えることで、ETC2.0プローブデータの見える化を行っている。表-1に上述の各分析手法をまとめた一覧表を示す。



図-1 ETC2.0によるプローブ情報の取得¹⁾

表-1 各分析手法における把握内容

分析手法	把握できる内容
旅行速度図	対象地域内の主要な交通渋滞箇所の顕在化を表示
モザイク図	任意の区間において時間帯別に詳細な旅行速度を表示
ODペア図	対象断面を通過する車両のODの割合を地図に重ね合わせて表示



図-2 旅行速度図(長岡市街地地域の例)

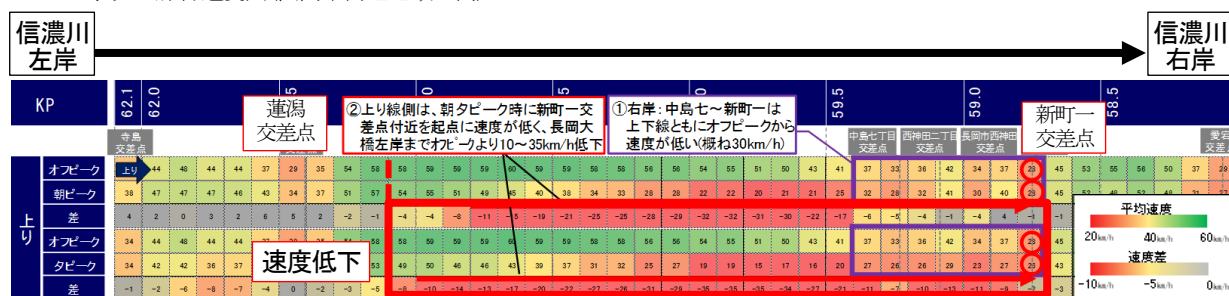


図-3 モザイク図(長岡大橋左右岸区間の例)

旅行速度図(図-2)では、対象地域全体で車両の平均旅行速度を速度毎の色分けにすることにより、一定時間帯での旅行速度を把握することができ、対象地域内における主要な交通渋滞箇所の顕在化が面的に把握できる。

例に、長岡市街地地域では、長岡大橋の上り車線(信濃川左岸から右岸方向)などの信濃川にかかる橋梁部、橋梁両岸の端部、主要渋滞箇所付近での旅行速度が20km/h以下に低下していることが読み取れる。

モザイク図(図-3)では、上述の旅行速度図で得られた旅行速度が低下する区間など任意の道路区間において、線的に時間帯別の詳細な車両旅行速度を把握することができる。

例に、旅行速度の低下が見られた長岡大橋左右岸区間(100mピッチ)の分析結果では、上り車線において朝夕のピーク時間共に右岸側の新町一交差点を起点に速度低下が発生し、左岸側の蓮潟交差点手前まで影響していることを読み取れる。これにより長岡大橋右岸側の新町一交差点を先頭とする近接交差点などにおいて、何らかの交通課題が生じていると推測することができる。

ODペア図(図-4)は、車両の起終点を矢印で対象地域の地図に重ね合わせて表示しており、矢印の太さで任

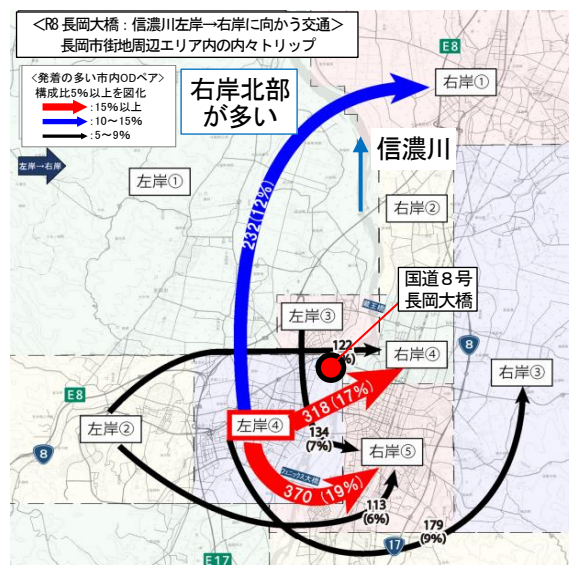


図-4 ODペア図(長岡市街地地域の例)

意断面を通過する車両のODの割合を把握できる。

例に、長岡市街地地域において、長岡大橋の上り車線(信濃川左岸から右岸方向)のODは、左岸エリアから右岸の北部エリアへのトリップが多いことが読み取ることができる。さらに長岡市の都市計画区域図を重ね合わせて分析すると、右岸側には商業・工業エリアが多いことから、左岸側の住宅エリアからの通勤などによる移動が多いと推測することができる。

(2) 現状の分析手法における課題

上述のように、ETC2.0プローブデータを用いた分析では、図表などに置き換えて道路交通状況の見える化を実施しており、面的視点、線の視点の段階を経て分析を行っている。

一方、市街地部では、交通課題が複数の路線にも存在するなど、面的に課題が生じていることが多く、上述した分析方法を用いて、各路線、各地点、各時間帯別で整理することは可能であるが、詳細な時間経過や移動経路を一度に把握することが困難であるほか、広範囲の交通状況を踏まえた課題箇所の抽出が難しくなる側面がある。

(3) 新たな見える化手法

市街地部など面的かつ複雑な交通課題を抱える地域において、より効率的に潜在的な交通課題の発見・把握を行うため、旅行速度データとODデータの両データを路線別・時間帯別に動画化する、ETC2.0プローブデータの新たな見える化手法を実施した。

4. ETC2.0プローブデータの動画化

(1) 動画化の方法と概要

ETC2.0 プローブデータの動画化にあたっては、令和5年10月の一カ月分のETC2.0プローブデータ 様式1-2 走行履歴情報を用いて作成している。また今回作成した動画は、任意の断面を通過した各車両の個々の動きを10秒単位の時系列で各車両を1つのポイントとして走行位置を地図上にプロットして表示している。

表-2 ETC2.0プローブデータの動画化の概要

使用データ	ETC2.0プローブデータ 様式1-2
期間	R5.10(1カ月分)
概要	- 任意断面の通行車両の時間毎(10秒単位)の走行位置・走行速度をプロット - 走行速度別に色分け(10km/h単位) - 一ヶ月間のデータを重ねて表示 30分間不動のポイントをその車両の目的地と仮定

また、各車両の走行速度は赤色から青色で走行速度別に色分けして表示している。なお、ポイントが30分間不動の場合はその車両の目的地と仮定した。動画化の概要を表-2に示す。

(2) 動画化で得られる情報

次に、長岡市街地地域の朝の通勤時間帯におけるETC2.0プローブデータの動画化の例について紹介する。

図-5は長岡大橋の上り車線(信濃川左岸から右岸方向)を通過した車両について、7時00分頃から8時15分頃までの4場面を切り取った図である。紙面の都合上4つの時間帯を切り出して抜粋した静止画で紹介しているが、動画ではそれぞれのポイントがa→b→c→dと動くため、実際の交通の流れを俯瞰して確認することができる。

各時間帯を具体的に見ると、7時00分頃(図-5 a))では多くの車両が50km/h以上の速度で走行し、かつ国道8号の交通量が多いことが分かる。7時30分頃(図-5 b))になると、国道8号の長岡大橋の右岸及び福島交差点付近で旅行速度が低下し始めるとともに、県道の交通量が増加し始めることが分かる。

国道8号の混雑は、7時30分(図-5 b))から7時45分頃(図-5 c))の間に福島交差点でピークに達する。一方長岡大橋右岸側では、8時15分頃(図-5 d))に混雑のピークに達していることが分かる。

また、7時45分頃(図-5 c))、8時15分頃(図-5 d))

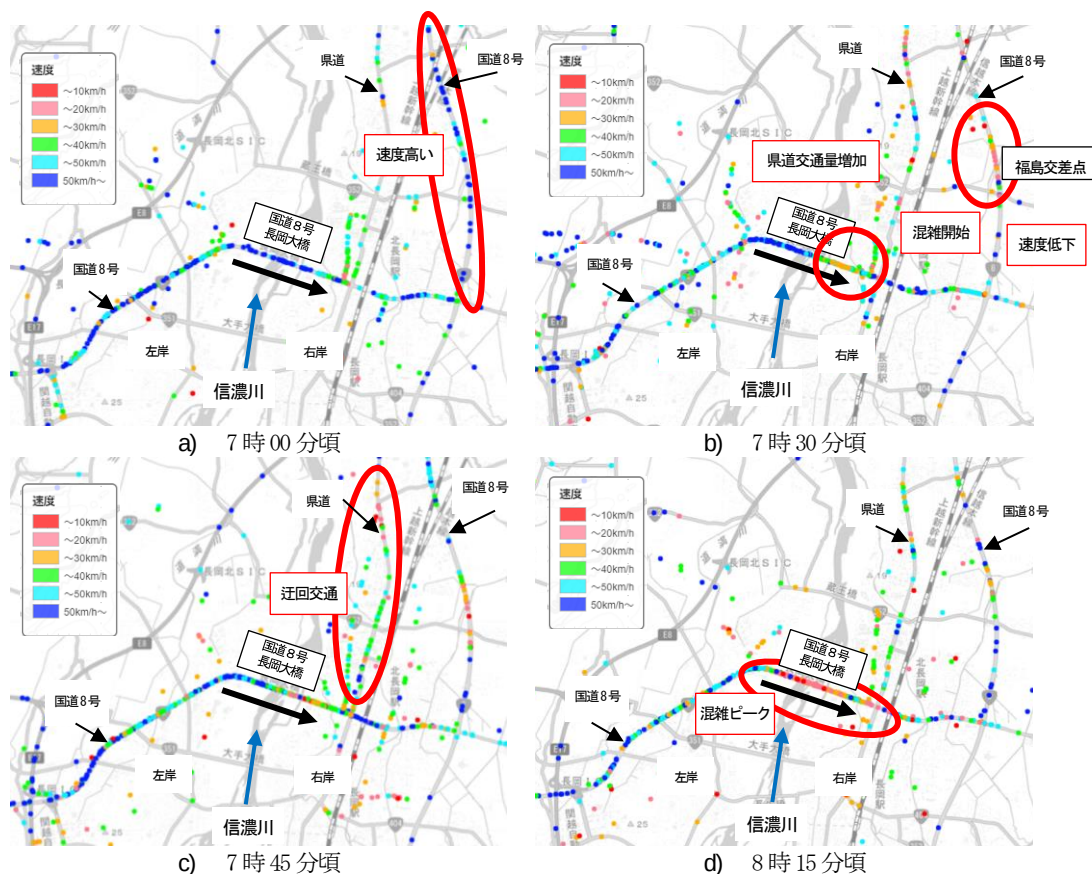


図-5 時間帯別の旅行速度動画化抜粋図(長岡市街地地域の例)

の国道8号の交通状況を見てみると、静止画では分かりにくい動画で時系列に表示して見てみると、長岡大橋を通過した車両は国道8号を北上せずに、国道8号に平行する県道を迂回利用して北上しているほか、長岡大橋右岸の北部エリアでプロットが消滅する現象が一定数発生しており、このことから右岸の北部エリアが長岡大橋を通過する車両の目的地となっていることが把握できる。

図-6は、混雑ピーク時に国道8号を迂回する交通に着目し、長岡大橋の混雑がピークとなる8時15分頃における古正寺町西交差点と灰島新田交差点の両方を通過する各車両を抽出した図である。

これにより、長岡大橋の混雑ピークの時間帯においては、長岡大橋を迂回するように信濃川下流側の橋梁を抜け道として、左岸から右岸へ移動している車両が一定数あることが把握できる。

このような長（中）距離トリップ交通については、本来幹線道路の国道8号が担うべきものであるが、長岡大橋を含む国道8号の混雑を避けるため車両が県道等に迂回しているものと推測される。

以上のように、ETC2.0プローブデータを動画化することにより、対象地域の交通課題をいつ、どこで、どのような課題が発生しているのかを面的な視点で把握することができた。

(3) 動画化による有用性

ETC2.0プローブデータの動画化は、車両の走行状況を面的にかつ俯瞰的に把握できることが大きな効果として挙げられる。

さらに動画化では時間情報と位置情報、走行速度情報をまとめて見える化し、俯瞰的な視点で実際の走行状況を再現することができるため、従来は「何時頃に〇〇付近で速度低下が発生する」といった情報までしかわからなかったものが、「何時頃に〇〇付近で『どこからどこへ向かう車両により』速度低下が発生する」といったように『原因』を把握・推測しやすくなった。特に、市街地部など道路が多く存在する地域の分析の際には、従来の見える化の手法では複数の資料を見比べながら課題や原因を抽出する必要があるが、ETC2.0プローブデータの動画化により、10秒単位での交通状況や車両の移動経路が俯瞰的に把握できるようになったことで、妥当性を高めた課題箇所の抽出・優先順位の検討がより容易となったと考えられる。

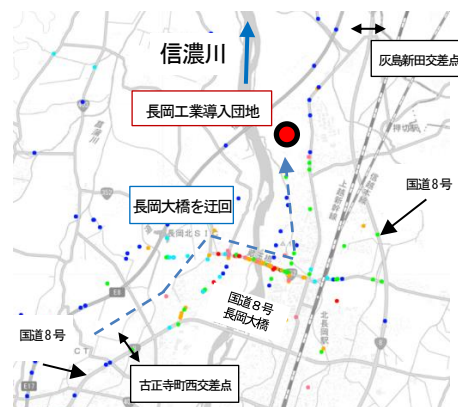


図-6 通過交通旅行速度動画抜粋図（8時15分頃）

5. おわりに

本稿では、ETC2.0プローブデータの動画化による有用性を中心に報告した。従来の方法における道路交通分析では、旅行速度図やモザイク図、ODペア図などの複数の図表を比較検討し、交通課題となる箇所を把握しているが、ETC2.0プローブデータを時系列表示できる動画化を用いることにより、交通混雑のボトルネック箇所の把握や交通課題が視覚化され、面的に、いつどこで、どのような課題が隠れているのかをこれまでより容易に把握することができた。

今後の展望として、交通課題箇所の洗いなおしや、交差点改良等による対策効果において、前後区間や平行路線などを含めた線的な検証などに活用できると考えられる。さらに、豪雪地帯が多い北陸地方においては、大雪などの悪天候時に通行止め前後の交通状況や、通行止めによる迂回状況を詳細に把握することへの活用ができると推察される。

謝辞：本論文の作成にあたりご協力いただいた皆さまに心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：ETC2.0 プローブデータによる交通状況分析について
- 2) 国土技術政策総合研究所道路交通研究部高度道路交通システム研究室（ITS 研究室）：ETC2.0: 「ETC2.0」プローブ情報

令和5年度トンネル点検業務で活用した 「隧道SfM/MVS技術」の計測結果と課題 についての一考察

金山 直樹¹・高橋 大輔²

¹中国地方整備局 松江国道事務所 管理第二課 (〒690-0017 島根県松江市西津田2-6-28)

²中国地方整備局 松江国道事務所 保全対策官 (〒690-0017 島根県松江市西津田2-6-28)

令和4年度より、トンネルの定期点検において、点検支援技術の活用が原則化され、定期点検の高度化・効率化が求められている。現在、トンネル点検で使用される点検支援技術においては、走行型高速3Dトンネル点検システム(以降、MIMM)が多く活用されているが、令和5年度松江国道事務所管内のトンネル定期点検では、MIMMより経済性や汎用性に優れる隧道SfM/MVS技術(以降、MVS)を試行的に活用した。本報告は、そのMVSを活用した際に生じた問題点とその対応について報告するものである。また、当技術の活用にあたっては、現場計測時における撮影機器の設定や現場条件に応じたキャリブレーションが重要であり、その留意点を整理した。

キーワード トンネル定期点検、点検支援技術、隧道SfM/MVS技術、高度化・効率化

1. はじめに

直轄国道の道路トンネルは、平成26年度に道路法及び道路法施行規則の改正に伴い改訂された「道路トンネル定期点検要領」(平成31年度に改訂)に従って、5年以内に1回の定期点検を実施している。一方で、少子高齢化に伴う建設業従事者の高齢化や大量離職、2024年問題、働き方改革の推進といった建設業を取り巻く現状と課題を背景に、点検支援技術の活用による点検の効率化・高度化が推進されているところである。

本報告では、松江国道事務所が管理する道路トンネルの定期点検において、点検支援技術の1つであるMVSを活用した際に生じた問題点とその対応、ならびに当技術の活用にあたっての留意点について報告する。

2. 従来のトンネル点検手法

従来のトンネル点検手法は、トンネル点検車等を用いて覆工面に近接し、覆工コンクリートのひび割れやうき・はく離、漏水等の変状を確認する近接目視とひび割れや横断目地沿い等を点検ハンマーで打診し、うきやはく離を確認する打音検査を基本としている(写真-1)。



写真-1 従来点検手法によるトンネル点検状況

3. トンネル点検における点検支援技術とは

トンネル点検における点検支援技術には、壁面画像からひび割れ等の変状を撮影するものや、点群データによりトンネル内部を立体的に捉える技術がある。また、これらの組合せによりデジタル空間上で3次元モデルからひび割れを抽出する技術も開発されている(図-1)。

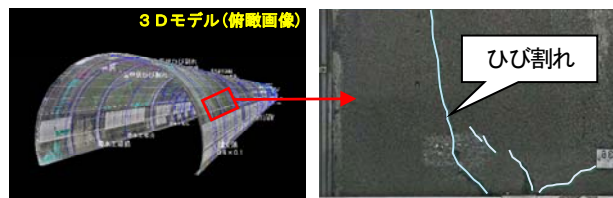


図-1 トンネルの3次元モデルの例

4. MVSの試行の経緯

トンネルの点検支援技術は、民間企業の独自のノウハウや経験を活かした技術の開発が進められている。その中の点検支援技術の1つとして、走行しながらトンネルの壁面画像や断面形状の計測を可能としたMIMMがある(写真-2)。MIMMは、専用車両に走行型画像計測システム(MIS)と走行型レーザ計測システム(MMS)を搭載し、時速50～70kmで走行しながら交通規制を行わずに効率的に計測を行うことができることから、これまで、多くの道路トンネルで活用されている。しかしながら、MIMMは3tベースの比較的大型の車両であるため、狭隘な断面のトンネルには適用が困難であることや、国内に3台と台数に限りがあることから工程計画において稼働状況の

影響を受けやすいといった問題もある。また、トンネル延長が短く、点検面積が少ない場合には、外業効率化によるコスト低減効果より画像解析等の内業及び機械経費が高く、全体的にコスト高となるといった課題もある。

このことから、本業務ではトンネルの画像計測が行える技術を抽出し、効率性、安全性、経済性、発展性等について比較検討を行い、MVSを選定した(表-1)。



写真-2 MIMMによるトンネル計測状況

表-1 画像計測技術の比較表

技術名	走行型高速3Dトンネル点検システム MIMM(ミーム)	隧道SfM/MVS技術 (Structure from Motion/Multi View Stereo)
計測速度	40~80km/h	15km/h
交通規制の要否	否	要
最小ひび割れ幅	0.2mm	0.2mm
画像計測	○	○
形状計測	○	○
費用	5.8百万円	3.1百万円

※ 費用は、トンネル1本、延長500m、点検面積:10,000m²あたり

5. MVSの技術概要

MVSは、車両に搭載した民生用デジタルカメラとLED照明を用いて、走行しながらトンネルの壁面画像撮影と断面形状計測を行うトンネル点検支援技術の「画像計測技術」である。また、壁面画像のひび割れ抽出には、AI(C2finder)を用いて解析を行うものである(表-2)。

表-2 隧道SfM/MVS技術(MVS)の主要性能

機器名	性能・台数
【カメラ】	
有効画素数	約1530万画素×5台
センサータイプ	1.0型(13.2mm×8.8mm)アスペクト比3:2
レンズタイプ	ZEISS テッサー-T*レンズ(レンズ構成:6群6枚(非球面レンズ6枚))
画角(35mm判相当(静止画))	84°(24mm×2)
【LED照明】	
消費電力	480W×3台
明るさ	76800Lumen
【損傷自動検出AI(C2finder)】	
検出可能な変状	ひび割れ(位置、形状、幅、長さ、幅ごとの総延長)(自動検出)
損傷検出の原理	AI(ディープラーニング)
出力ファイル形式	検出結果重量画像:JPEG、CAD等ベクターデータDXF/SXF/SVG
【MVSの外観、計測状況及びAI(C2finder)によるひび割れの自動抽出例】	

6. MVSの活用目的及び活用方法

(1) 活用目的

活用目的は、MVSによる覆工面のひび割れを正確に把握することである。併せて、計測結果と近接目視点検結果を基にひび割れ検出精度の検証を行い、本技術の活用効果を確認することとした。

(2) 対象トンネルの選定

MVSの計測は、国道9号(自動車専用道路)の多伎朝山道路の2トンネルと仁摩温泉津道路の6トンネルを対象に実施した(図-2)。



図-2 対象トンネルの位置図

(3) 検証方法

検証方法は、MVSにより撮影した覆工面の画像からAI(C2finder)によるひび割れ解析を実施し、近接目視点検で得られた変状展開図との比較を行い、ひび割れの検出率、的中率を求めることにより、ひび割れ検出精度の検証を行った(図-3)。

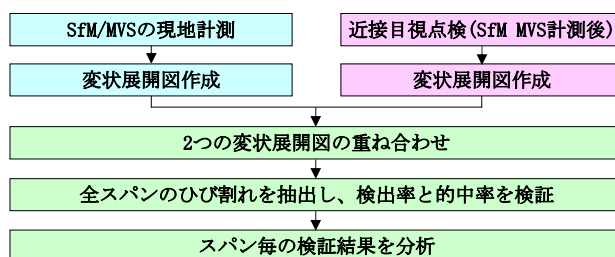


図-3 検証のフロー

a) ひび割れの検出率の算定方法

MVSが検出したひび割れを対象にひび割れの有無、ひび割れの方向、ひび割れの幅と長さについて近接目視で確認し、図-4の要領で検出率を算定した。

検出率は、実際のひび割れに対してどの程度MVSが検出できたかを表す指標であり、実際のひび割れをMVSが見落とすと検出率は下がっていく。誤検知したひび割れは算出式に含まれないため、あくまで実際のひび割れを検出出来たかどうかを表す指標である。

ここで、ひび割れ非検出の判断は近接目視とMVSとの交角が概ね10°以上乖離した場合とした。

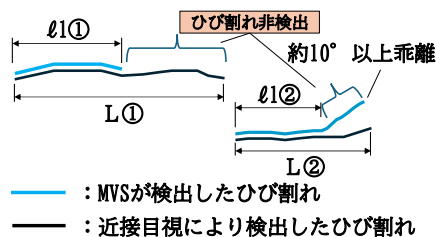


図4 ひび割れ検出率の算定方法

b) ひび割れの的中率の算定方法

検出されたひび割れを対象に、MVSが検出したひび割れの延長ℓ1を近接目視により検出したひび割れ延長(ℓ1+ℓ2)で除した比率で求めた(図-5)。

的中率は、MVSが検出したひび割れに対してどの程度実際のひび割れを検出できたかを表している。実際にはひび割れをMVSが誤検知すると下がっていくため、検知精度の正確性を表している。

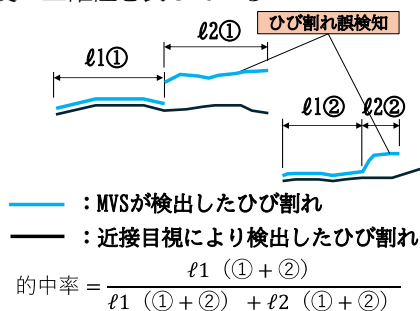


図-5 ひび割れの的中率の算定方法

7. MVSの実施結果(精度検証結果及び問題点)

(1) 精度検証結果

各トンネルの精度検証結果一覧を表-3に示す。

- ・ ひび割れの検出率は、幅0.3mm未満で0%~4%、幅0.3mm以上3mm未満で0%~48%であった。
- ・ ひび割れの的中率は、幅0.3mm未満で0%~3%、幅0.3mm以上3mm未満で0%~27%であった。

表-3 各トンネルにおける精度検証結果一覧

トンネル名	検出率(平均)			的中率(平均)		
	~0.3mm	0.3mm~3mm	3mm~	~0.3mm	0.3mm~3mm	3mm~
湯迫トンネル	1%	6%	—	1%	5%	—
天河内トンネル	0%	5%	—	0%	4%	—
新馬路トンネル	0%	0%	—	0%	0%	—
新湯里トンネル	1%	3%	—	1%	2%	—
清水・梨の木坂トンネル	4%	16%	—	3%	12%	—
福光トンネル	0%	9%	—	0%	7%	—
朝畑トンネル	3%	12%	—	3%	8%	—
赤谷トンネル	2%	48%	—	1%	27%	—

(2) 想定される問題点

今回の検証では、ひび割れの検出率及び的中率が低い結果となった。この要因としては、主に撮影画像が不十分であったことが考えられる。具体的には、以下の要因①、②が想定される。

要因①：画像の鮮明さや画質の差による撮影精度の低下

デジタルカメラの特性上、近距離と遠距離の画像では、近距離から撮影した方が鮮明で高画質な画像が得られる。今回、画像計測には5台のカメラを用いているが、各カメラと覆工面までの撮影距離の違いから、画像の鮮明さや画質に差があったことが撮影精度の低下の一因として考えられる(図-6)。

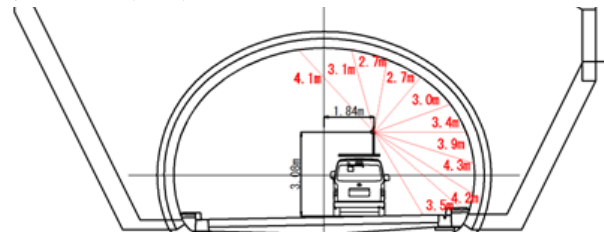


図-6 カメラと覆工面までの撮影距離の違い

要因②：覆工面の明暗の差による現場条件の影響

コンクリートの色調の違いや打設ムラ、トンネル内の照明のあたり方の違いにより、覆工面に比較的明るい領域と暗い領域が存在する。この明暗の差により覆工面の明るさが均一でないことによる現場条件が影響した可能性が考えられる(図-7)。

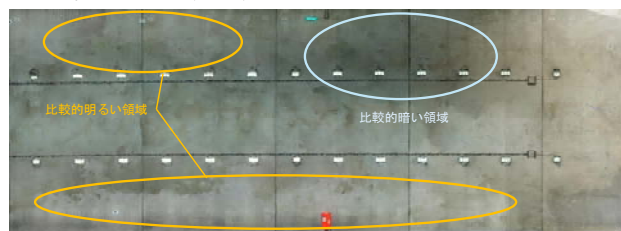


図-7 覆工面の明暗の差

要因③：画像変換時のひび割れ情報の欠落

ひび割れ抽出は、現場撮影時のオリジナル画像をオルソ画像に変換して抽出している。オルソ画像はカメラレンズの歪みを補正し、正射変換(画像を真上から見ていような状態にするための変換)された画像である。この正射変換する際に、元の画像から一部の情報が失われる可能性がある。特に、立体的な物体の形状や高さに関する情報が欠落することがあり、ひび割れの立体性が欠如することにより、一部のひび割れでは、オリジナル画像では検出していたひび割れでもオルソ画像では検出し難くなったことで検出精度の低下の原因となったことが考えられる(図-8)。

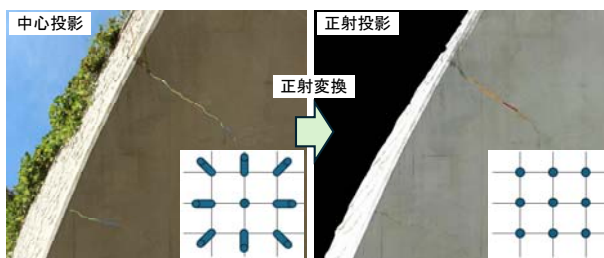


図-8 オリジナル画像からオルソ画像への正射変換

8. 精度向上に向けた対応

(1) 対応方法の立案

上述のように、0.3mm未満及び0.3mm以上3mm未満のひび割れの検出率及び的中率がいずれも低い結果となった。これは、取得画像の品質が低くひび割れの抽出に適した画像が取得できなかったためである。このため、画像処理とひび割れの抽出方法に着目することで以下の3つの方法を立案し、再検証を行った。

方法① 画像処理：オルソ画像を使用した。

抽出方法：AIによりひび割れを抽出した。

方法② 画像処理：オリジナル画像を使用した。

抽出方法：AIによりひび割れを抽出した。

方法③ 画像処理：オリジナル画像を使用した。

抽出方法：各種画像処理アルゴリズムによる自動検出によりひび割れを抽出した。

方法①～方法③の具体的な作成手順を以下に掲載する。

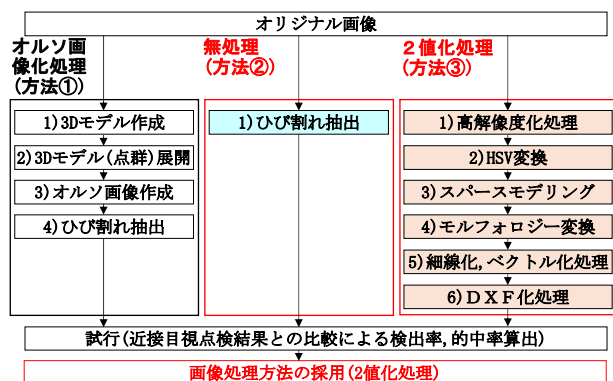


図-9 各種画像処理と採用までの流れ

a) オルソ画像化処理(方法①)

オルソ画像化処理では、隣り合う画像同士を繋ぎ合わせて一本化したトンネルの3Dモデルを作成し、これを点群展開してオルソ画像を作成することにより、覆工面の連続したひび割れをAIで判読可能となることを期待した。

1) 3Dモデル作成

MVSで撮影したオリジナル画像について、ステレオマッチング(同一の静止画像を別視点から捉えた2枚の画像を用いて画像中に写る画像の奥行きを推定するもの)を行い、複数のオリジナル画像を繋ぎ合わせることでトンネルの3Dモデルを作成した(図-10)。

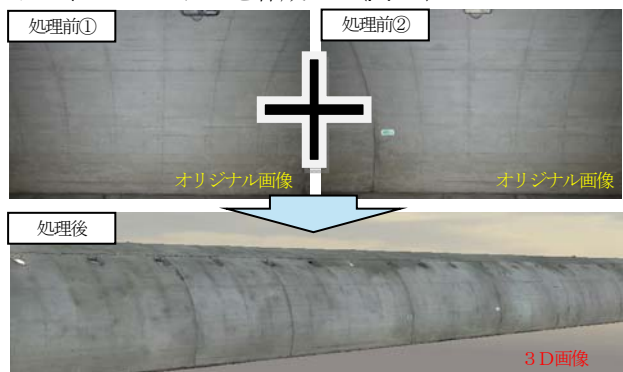


図-10 3Dモデル作成

2) 3Dモデル(点群)展開

3Dモデルから点群モデルを作成し、画像処理により展開画像を作成した(図-11)。

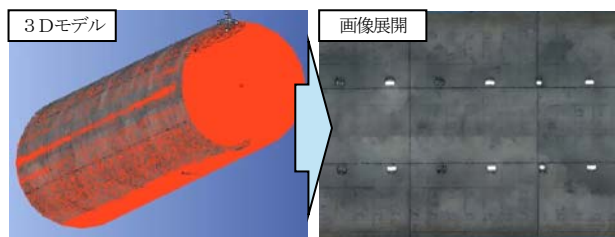


図-11 3Dモデル(点群)展開

3) オルソ画像作成

展開画像をもとに、オルソ画像を作成した(図-12)。



図-12 オルソ画像作成

4) ひび割れ抽出

オルソ画像からAIによりひび割れを抽出した。また、ひび割れ幅及び長さの計測は統計解析手法により、ひび割れ境界を特定し、幅及び長さを算出した(図-13)。

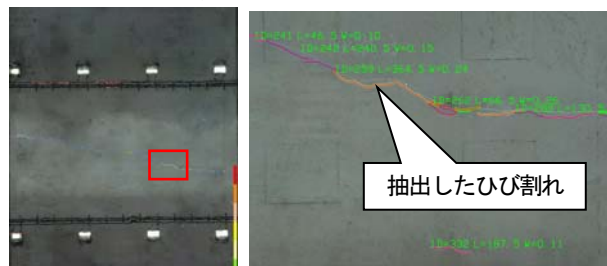


図-13 オルソ画像からのひび割れ抽出

b) 無処理(方法②)

無処理では、オリジナル画像にあえて処理を加えないことで画質を保持し、AIによるひび割れ検出精度の向上を期待した。

1) オリジナル画像からAIによるひび割れを抽出

オリジナル画像からAI(C2finder)によりひび割れを抽出した(図-14)。

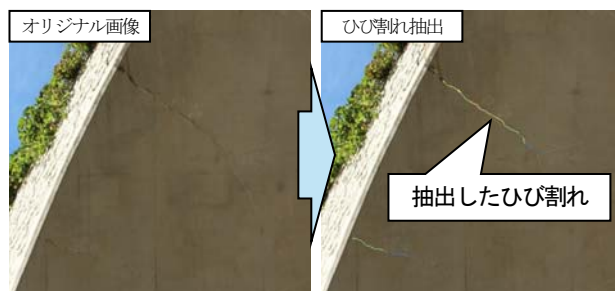


図-14 オリジナル画像からのひび割れ抽出

c) 2値化処理(方法③)

2値化処理では、オリジナル画像の解像度を上げるための高解像度化処理を行い、さらにひび割れのチョーキングを際立たせるためのHSV変換、スパースモデリング、モルフォロジー変換、細線化・ベクトル化処理を施した。こうすることで、判別の難しかったひび割れの多くを抽出可能となることを期待した。

1) 高解像度化処理

オリジナル画像に対して、輝度、エッジ、コントラスト及びピクセル数を調整するとともに、画像からノイズ除去することによる高解像度化処理を行った(図-15)。



図-15 高解像度化処理

2) HSV変換

高解像度化した画像をもとにHSV変換を行った。HSV変換は、色を赤・緑・青の3つで表現する「RGB」から同じく色を色相・彩度・明度の3つで表現する「HSV」を相互変換するものである。このHSV変換を行うことで覆工面のチョーキングの検出において、誤検出の要因となる不要な領域(照明、ケーブル類、空や草木等)を除外した(図-16)。



図-16 HSV変換

3) スパースモデリング

スパースモデリングは、画像に含まれる少量のデータからどこが本質的な特徴を決定づける要素(チョーキング)なのかを見極めて抽出するものであり、以下の(A)、(B)、(C)の処理を行うことで画像から必要な要素(チョーキング)を選択し、分析を行うものである。

(A)画素値三次元プロット

画素値三次元プロットは、画像を小領域毎に区切り、画像に含まれるデータ(画素値)を三次元空間で視覚的に表現したもので、X軸にトンネル縦断方向、Y軸にトンネル横断方向、Z軸にベクトルを表したものである(図-17)。

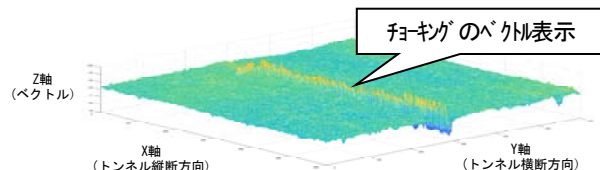


図-17 画素値三次元プロット

(B)TV(Total Variation)最適化

TV 最適化では、元の画像に似ている及び画素勾配を小さくするための勾配最小処理を行った。このことで、画素値三次元プロット画像からノイズを除去した画像を再構成する(図-18)。

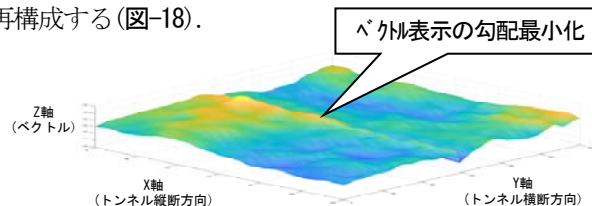


図-18 TV最適化

(C)差分(A-B)

差分は、TV 最適化を行った上で元の画像の背景との差分から卓越して高い値のみを抽出し、低い値は除外する処理を行ってチョーキングを抽出した(図-19)。

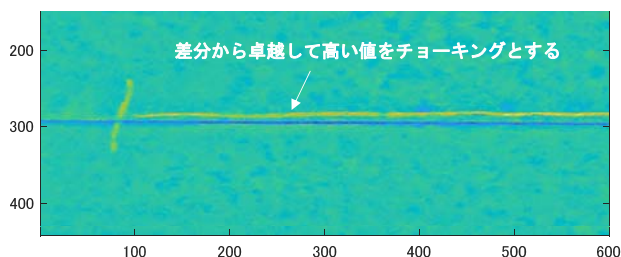


図-19 差分

4) モルフォロジー変換

検出結果である2値化(白黒)画像について、モルフォロジー演算による孤立した点の除去や近接する点同士の接続処理を行った(図-20)。

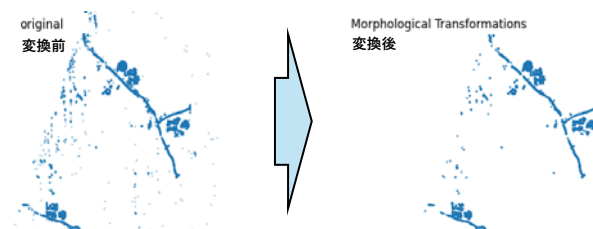


図-20 モルフォロジー変換

5) 細線化、ベクトル化処理

点同士の接続処理によって作成した各線について、幅を1にする細線化及びベクトル化処理を行い、画像上の位置(X1, Y1), (X2, Y2), ...を抽出した(図-21)。

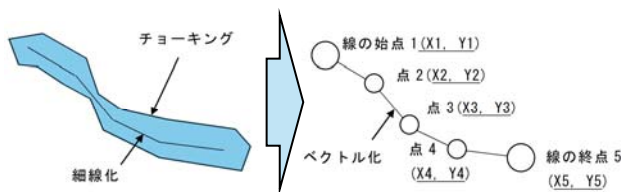


図-21 細線化、ベクトル化処理

6) DXF化処理

抽出した線の位置を XY 座標に変換し、CAD システムへ DXF 化処理したデータの書き出しを行った。

(2) 対応方法別の精度確認結果

対象トンネルのうち、新馬路トンネル、清水・梨の木坂トンネル及び赤谷トンネルの一部のひび割れを対象とし、オルソ画像化処理(方法①)、無処理(方法②)、2値化処理(方法③)を試行し、ひび割れの検出率及び的中率を算出した。精度確認結果一覧を表-4に示す。

表-4 精度確認結果一覧

トンネル名	スパン	画像処理	検出率(平均)		的中率(平均)	
			～0.3mm	～3.0mm	～0.3mm	～3.0mm
新馬路トンネル	S11	オルソ画像化処理	0%	2%	0%	100%
		無処理	7%	64%	24%	92%
		2値化処理	92%		100%	
清水・梨の木坂トンネル	S1	オルソ画像化処理	0%	0%	0%	0%
		無処理	6%	36%	100%	100%
		2値化処理	100%		100%	
赤谷トンネル	S61	オルソ画像化処理	0%	29%	0%	92%
		無処理	0%	32%	0%	100%
		2値化処理	100%		100%	

a) ひび割れの検出率・的中率の確認結果

(オルソ画像化処理): ひび割れの検出率は、幅0.3mm未満で0%、幅0.3mm以上3mm未満で0%～29%であった。また、ひび割れの的中率は、幅0.3mm未満で0%、幅0.3mm以上3mm未満で0%～100%であった。

(無処理): ひび割れの検出率は、幅0.3mm未満で0%～7%、幅0.3mm以上3mm未満で32%～64%であった。また、ひび割れの的中率は、幅0.3mm未満で0%～100%、幅0.3mm以上3mm未満で92%～100%であった。

(2値化処理): ひび割れの検出率は、92%～100%であった。また、ひび割れの的中率は、100%であった。

b) 確認結果の分析

オリジナル画像について、オルソ画像化処理、無処理及び2値化処理を行った結果、無処理の場合と2値化処理を行った場合でいずれもひび割れの検出率、的中率が向上することが確認された。特に、2値化処理では高精度でひび割れを検出しており、画像に写るチョーキングと覆工面との境界を明確化したことで検出精度が向上したと考えられる。

(3) 2値化処理(方法③)による再検証結果

前述したように、オリジナル画像の2値化処理を行うことでひび割れの検出率、的中率が向上したことから、対象トンネルの全てのひび割れについて再検証を実施した。再検証結果は以下の通りである。

- ・ひび割れの検出率は、74%～99%であった。
- ・ひび割れの的中率は、99%～100%であった。
- ・ひび割れの検出率、的中率ともにAIによるひび割れ解析結果よりも大幅に向上することを確認した(表-5)。

表-5 再検証結果一覧

トンネル名	検出率(平均)	的中率(平均)
湯迫トンネル	99%	100%
天河内トンネル	74%	100%
新馬路トンネル	90%	100%
新湯里トンネル	83%	100%
清水・梨の木坂トンネル	94%	100%
福光トンネル	85%	100%
朝畑トンネル	89%	99%
赤谷トンネル	93%	100%

9. 今後のMVSの活用にあたっての考察

(1) 取得画像について

今回、現場計測において取得した画像は、画質が低くひび割れの抽出に適した画像とは言い難い画像であった。その理由は、主に①各カメラと覆工面までの距離の違いから生じる画像の鮮明さや画質の差、②覆工面の明るさが均一でないことによる明暗の差であり、現場での撮影機材の調整や設定、撮影条件の統一が図れていないことが原因と考えられる。このことから、今後の現場計測においては、カメラから覆工面までの適切な離隔の設定やカメラの均等な配置、十分な照度を確保することに留意する必要がある。また、現場計測では大容量のデータを扱うことから、トンネルの短いスパン(10m程度)のデータのキャリブレーションやクラウドサービス等を利用したデータ管理により、取得画像の品質を直ちに確認できる体制の構築も必要と考える。

(2) 画像処理について

今回、品質の低いオリジナル画像であったため上手くひび割れ抽出ができなかったが、取得画像の2値化処理を行うことでひび割れの検出率及び的中率の向上を図ることができた。2値化処理では覆工面のチョーキングを抽出するため、ひび割れ以外のうき・はく離やはく落、鋼材露出等にも有効であり、今回のように、点検支援技術を活用しひび割れ抽出が上手くいかなかった場合の対策として有効な手段のひとつである。

10. おわりに

今回、点検支援技術としてMVSを活用したが、取得画像が不十分で本来のひび割れ抽出ができなかったことから、2値化処理等を駆使し、チョーキングを高い精度で抽出したところであるが、本来、MVSにはこのような画像処理等は不要であり、現地で鮮明な画像を取得し、通常どおりの流れでひび割れを抽出することが望まれる。

そのためには、現地キャリブレーションが非常に重要なプロセスであり、これを怠ると取り戻すのにかなりの労力を要することを理解することができた。

今後、点検支援技術をより一層活用していく上では、現地キャリブレーションを十分に行い、点検支援技術が持つ技術を100%発揮させることが重要と考える。

一方で、MVSがどのような条件下でも活用できるよう、品質が向上していくことを期待している。

アスファルト舗装の長寿命化に向けた取組

松浦 友香¹・坂本 智子¹・渡辺 真史¹

¹東北地方整備局 仙台河川国道事務所 道路管理第二課

(〒982-8566 宮城県仙台市太白区あすと長町四丁目1-60)

舗装点検要領に基づく点検結果より修繕をする場合、表層から見えない路盤や路床などの状態把握が難しく、路盤や路床の損傷がある状況で措置しても舗装の早期再劣化に繋がる可能性がある。本報告は、点検結果から詳細調査を実施・修繕工法の検討を行い定量的な指標に基づく維持管理・修繕の検討を目的とするものである。従来の方法で詳細調査区間を設定するとFWD調査が必要となるが、走行しながらたわみ量を測定できるMWD調査を活用することでFWD調査区間を縮小でき、費用と日数を抑えることができた。本取組は、アスファルト舗装の長寿命化に向けた取組として他道路管理者でも同様に実施できるため、全国展開可能と考える。

キーワード 舗装修繕，メンテナンス

1. はじめに

従来の舗装修繕は、点検より表層の状態から診断を行い、措置を実施するのが一般的な流れである。仙台河川国道事務所管内の舗装点検においても表層のひび割れ率、わだち掘れ、IRIから措置していた。路盤や路床が劣化していても表層まで影響が現れていない場合、路盤や路床の損傷状態を把握できずに措置する可能性がある。路盤や路床が損傷を受けた状態のままでは、たとえ表層を修繕したとしても劣化を繰り返す事象が考えられる。

2023年3月に「アスファルト舗装の詳細調査・修繕設計便覧」¹⁾（公益社団法人日本道路協会）（以下、便覧）から構造的健全性の把握や調査結果に基づく修繕設計、工法について記載されている資料が出版された。

本取組は、便覧に基づき舗装の点検診断後に詳細調査を実施し、周辺環境や損傷具合に応じた修繕設計を行うことによるアスファルト舗装の長寿命化に向けた成果について報告するものである。

2. 調査方法

以下の流れで実施した。

① 健全度・舗装管理実態の把握

仙台河川国道事務所管内の定期点検結果、舗装修繕履歴から標準使用目標年数と実際の修繕サイクルの差異を整理した。

② 詳細調査区間の設定

現地状況や①で整理した情報から詳細調査が必要な区間について選定した。

③ アスファルト舗装の詳細調査・修繕工法の検討

②で設定した区間よりFWDたわみ量調査、コア抜き調査を実施した。加えて、詳細調査の結果を踏まえた修繕工法を検討した。

3. 調査結果

(1) 健全度・舗装管理実態の把握、詳細調査区間の設定

仙台河川国道事務所管内の定期点検結果と舗装修繕履歴等を反映させた資料として以下の資料を作成した（図-1）。修繕履歴は上下線それぞれの回数を可視化させることで修繕頻度を見える化した。

加えて、修繕履歴から平均使用年数や前回修繕からの経過年数より東北地方整備局で使用目標年数13年以上の箇所を表示する情報をまとめた。

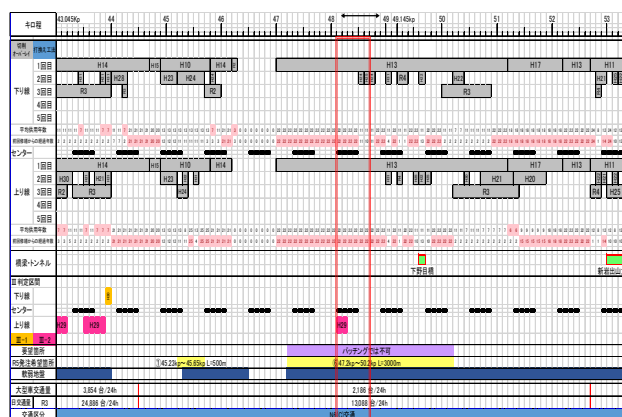


図-1 定期点検結果と舗装修繕履歴の表

次に管内区間433km中、Ⅲ判定区間が132kmあり、全ての区間をFWDたわみ量によりたわみ量を測定することは費用と日数がかかる。Ⅲ判定区間の点在や調査候補箇所が多い場合、詳細調査区間をどのように設定するかが課題である。本取組では、定量的な調査方法としてMWD（Moving Wheel Deflectometer）によるたわみ量調査を実施した。MWDは走行しながら舗装のたわみ量を測定できる車両である。時速40km程度で走行可能なため、交通規制不要で調査できるのが特徴である。実際に管内132kmの調査を4日間で実施した（図-2）。



図-2 MWD測定車の外観

定期点検結果と舗裝修繕結果及びMWDによる調査結果を合わせて路線毎に一覧にしたのが「舗装カルテ」である。図-1とMWD調査結果を合わせることで今までの舗装情報と現在の舗装によるたわみ量を読み取ることが可能になる（図-3）。

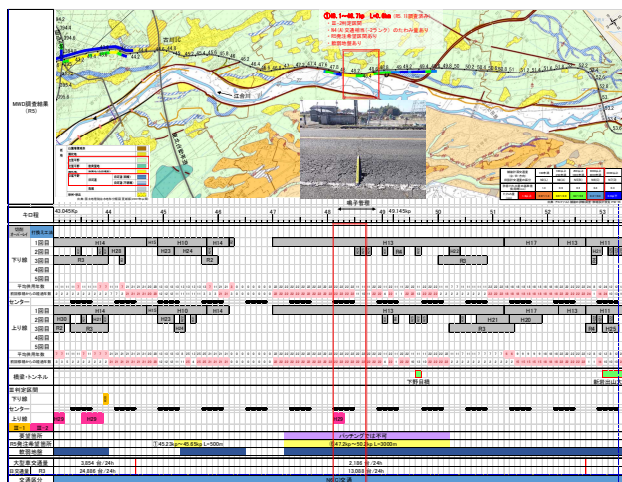


図-3 舗装カルテ（国道47号）

舗装カルテから舗裝修繕頻度や交通区分における許容たわみ量とMWD調査におけるたわみ量の差等の情報を踏まえて、詳細調査区間を設定した。本取組では2024年4月末時点で8箇所、詳細調査区間にする11km選定した（図-4）。今回は選定場所から国道47号古川地区48.1～

48.7km（以下、古川）の結果を説明する。古川は、2017年に点検結果よりⅢ-2判定箇所であり、交通区分における許容たわみ量とMWD調査における舗装のたわみ量の差が2ランク以上あるため選定し、実施した。



図-4 詳細調査区間の位置図

(2) 詳細調査

詳細調査は、FWDたわみ量調査・コア抜き調査を実施した。

FWDたわみ量調査とは、FWD(Falling Weight Deflectometer)で路面に衝撃荷重を与えた際に舗装のたわみ形状を複数センサーで測定できる非破壊調査である。各層の弾性係数等、修繕設計に必要な値を得ることが可能である（図-5）。測定位置のたわみ量が交通区分によるたわみ量の基準値より超過している場合、舗装体の支持力が低下しているといえる。

コア抜き調査とは、アスファルト舗装からコアを採取して舗装層の確認や材料確認を行う調査であり、結果は以下の通りである。

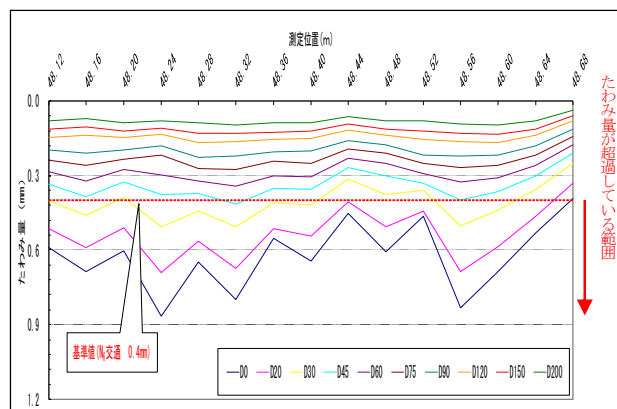


図-5 FWDたわみ量調査の結果（上り線）



図-6 コア抜き調査の結果
(左図：採取したコア 右図：コアの図)

4. 修繕工法の検討

舗装の修繕における構造設計は、便覧において理論的設計方法と経験に基づく設計方法の2通りが紹介されている。本取組では、理論的設計方法の多層弾性理論と経験に基づく設計方法を用いて設計した。

多層弾性理論はFWDたわみ量調査の結果から逆解析を行い、既設舗装の弾性係数(E)を求めることができる(図-7)。求めた弾性係数から既設舗装を表層・基層用加熱アスファルト混合物層の厚さとして換算する残存等値換算厚(T_{A0})を求めるため、残存等値換算係数(a_n)を把握する。 $a_n=0.0404 \cdot E^{0.3711}$ と厚さを乗じて得られた値が既設舗装の残存等値換算厚 $T_{A0}=19.64$ である。交通量区分とCBRから目標 $T_A=26$ と $T_{A0}=19.64$ の差6.36が調査箇所の不足 T_A である。

合計舗装厚 $t=50\text{cm}$	厚さ (cm)	E (Mpa) 基準値	E (Mpa) 現況	a_n	T_A (cm)
アスコン $t=10\text{cm}$	10	6,000	4,600	0.90	9.00
上層路盤 $t=8\text{cm}$	8	3,000	840	0.49	3.92
下層路盤 $t=32\text{cm}$	32	100	90	0.21	6.72
路床 $t=100\text{cm}$	100	-	84	-	-
推定設計CBR					8
既設舗装 T_A					19.64
目標 T_A					26
不足 T_A					6.36

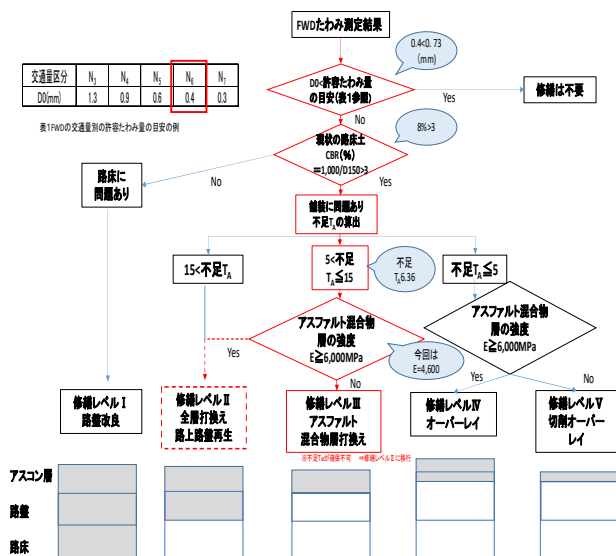
図-7 理論的設計方法より求めた不足 T_A

不足 $T_{A6.36}$ を解消させ、舗装の機能回復を図るため3通りの工法を検討した(図-8)．経済性や施工性等の総合評価の結果、部分打ち換え工法(路上路盤再生工法)を採用した．

[illegible]

図-8 修繕工法の比較

経験に基づく設計方法は多層弾性理論で導き出した設計方法の妥当性を確認するために実施した。図-9のフローにより修繕設計を行うことができる。理論的設計方法から導き出した値を用いてフローに沿うと、全層打換えまたは路上路盤再生となる。理論的設計方法から選定した工法と経験に基づく設計方法による修繕方法が一致しているため、多層弾性理論を用いた設計結果との妥当性がとれていると考える。



※着色箇所が補修断面

図-9 経験に基づく設計方法による修繕設計のフロー

また、修繕工法の検討にはFWDたわみ量調査から推定した路床CBRを用いている。推定したCBRが実際のCBRと異なる場合、舗装修繕の工法が変わる可能性が考えられる。開削調査より試料採取を行い、室内CBR試験

を実施してFWDたわみ量調査による設計CBRと室内CBR試験による設計CBRの差異を確認した。FWDたわみ量調査結果から路床の弾性係数は84である。路床の弾性係数EとCBRの関係は、 $E=10CBR \text{ (Mpa)}^2$ の式を用いると「舗装設計便覧」³⁾の区間CBRと設計CBRの関係から80以上120未満に該当するため、推定設計CBRは8である（表-1）。開削調査の結果CBRは9.5であり、8以上12未満に該当する（表-2）。FWDたわみ量調査結果と室内CBR試験による設計CBRはともに8であると判明した（表-3）。

表-1 路床の弾性係数と推定CBRの関係について
(FWDたわみ量調査)

路床弾性係数の 区間代表値 (MPa)	推定設計 CBR (%)
30 未満	—
30 以上 40 未満	3
40 以上 60 未満	4
60 以上 80 未満	6
80 以上 120 未満	8
120 以上 200 未満	12
200 以上	20

表-2 区間CBRと設計CBRの関係性について
(室内CBR試験)

区間の CBR	設計 CBR
(2 以上 3 未満)	(2)
3 以上 4 未満	3
4 以上 6 未満	4
6 以上 8 未満	6
8 以上 12 未満	8
12 以上 20 未満	12
20 以上	20

表-3 CBRの比較結果

調査箇所	路床の 弾性係数	推定設 計 CBR	室内 CBR 試 験結果	推定設計 CBR
国道 47 号 古川	$80 \leq 84 < 120$	8	$8 \leq 9.5 < 12$	8

5. MWDの整合性と課題の考察

舗装修繕検討において、MWD調査とFWDたわみ量調査を実施した。MWDとFWDの整合性について実際の調査結果からの考察と課題について論じる。

(1) MWDとFWDの整合性

古川のMWDとFWDのたわみ量を比較すると、たわみ量の増減の傾向と値が概ね同じであるため整合性がとれていると考える（図-10）。

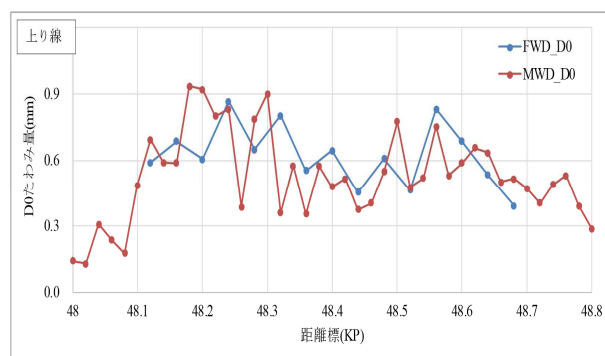


図-10 MWDとFWDの整合性（古川）

一方、他の調査箇所では相異が見られた箇所もある。国道45号大谷地区120.2～120.6kp（以下、大谷）は上り線でMWDとFWDのたわみ量の値にばらつきが生じている（図-11）。原因は、カーブによる影響が考えられる。大谷の調査区間にはカーブが1箇所あり、上りでは左カーブ、下りでは右カーブにあたる。カーブ走行で傾きが生じたことで各センサの値が変化し、たわみ量の結果に影響を及ぼした可能性が考えられる。

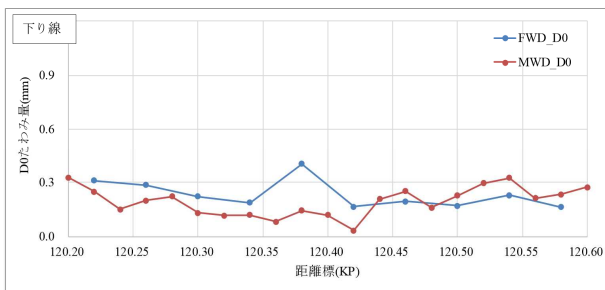
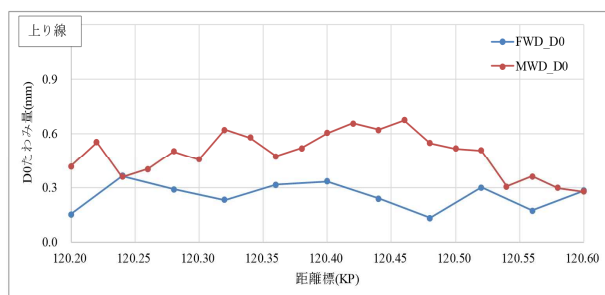


図-11 MWDとFWDの結果（大谷）

(2) MWDの課題

MWD測定車は国内に2台しかないため、台数が少ない状況である。その結果、実施できる調査会社が限定される等の課題があると考えられる。

6. 最後に

国内で2023年3月に便覧が出版され、2023年5月に本省道路メンテナンス企画室からアスファルト舗装修繕の実施にあたり技術基準等として活用する連絡があったばかりである。

他道路管理者にとっても点検結果等から点在や調査候補距離が長い中から詳細調査区間をどのように選定するかが課題であると考ええる。

今回の取組は、精度面と台数面で課題があるもののアスファルト舗装の長寿命化に向けた取組として他道路管理者でも同様に実施できるため、全国展開できると考える。

謝辞：本論文の作成にあたり、各種助言をいただきました関係者の皆様にこの場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) (公社)日本道路協会：アスファルト舗装の詳細調査・修繕設計便覧，2023年3月。
- 2) heukelom, W. et al. : Road Design and Dynamic Loading, AAPT, Vol.33, 1964.
- 3) (公社)日道路協会：舗装設計便覧，2006年2月。

都市問題の解決に向けたスマートシティ化に関する研究

安藤 亮介¹・勝又 済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（〒305-0802 茨城県つくば市立原1番地）。

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は、国のモデル事業等の推進やスマートシティ官民連携プラットフォームでのノウハウの共有等により、各地域での取組が着実に増加しているが、取組を行っていない地方公共団体もいまだ多く、全国横展開が課題となっている。本研究では、都市の抱える諸問題の解決に向けて、地方公共団体がIoT等新技術の活用（スマートシティ化）による主要な都市問題解決の方向性について検討する際の支援を目的として、①個別の都市問題の解決に対応可能な新技術の体系的整理、②新技術の活用による主要な都市問題解決効果に係る計画評価手法の開発を行うものである。

キーワード スマートシティ、KPI、計画評価

1. 研究の背景と目的

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は、国のモデル事業等の推進やスマートシティ官民連携プラットフォームでのノウハウの共有等により、各地域での取組が着実に増加しているが、取組を行っていない地方公共団体もいまだ多く、全国横展開が課題となっている。

本研究では、都市の抱える諸問題の解決に向けて、地方公共団体がIoT等新技術の活用（スマートシティ化）による主要な都市問題解決の方向性について検討する際の支援を目的として、

- ①個別の都市問題の解決に対応可能な新技術の体系的整理
- ②新技術の活用による主要な都市問題解決効果に係る計画評価手法の開発

を行うものである。

2. 地方公共団体及び企業へのアンケート調査

まず始めに、都市の諸問題と新技術の体系的整理に向けた実態把握を行うため、地方公共団体及び企業に対して都市問題と新技術の導入に関するアンケート調査を実施した。

スマートシティに取り組む意向のある地方公共団体61団体と146の企業を対象にアンケート調査を行った（2020年12月～2021年1月実施、回収率は地方公共団体

96.7%、企業62.7%）。調査内容は、地方公共団体が新技術を用いて解決したいと考える都市問題と、企業が保有する新技術とそれにより解決しようとする都市問題を回答するものとした。

このアンケート結果において、企業側から都市問題の解決にどのような新技術が活用できるのか分からないといった回答が多いことや、新技術導入の最大の課題は、どの新技術にも共通して、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）であることが明らかとなった¹⁾。

3. 「スマートシティ事例集【導入編】」の公開

アンケート調査の結果より、都市問題と新技術のマッチングに関する情報共有や体系的整理による支援の必要性が再認識されたことから、全国各地のスマートシティ事業について、都市の抱える課題を解決するための新技術を検索できる『スマートシティ事例集【導入編】』を作成した。

(1)対象とした「都市問題」と「新技術」

国のモデル事業の採択事例を中心に、全国各地のスマートシティの取組の中から、実装段階や実証実験段階で新技術の導入実績がある事例を対象として、都市問題と新技術の分類のバランスや組み合わせのバリエーションを考慮しながら、表-1に示す都市問題と新技術の組み合わせ85事例を抽出した。

表-1 対象とした都市問題と新技術

都市問題	新技術	h	f	c	b	a	i	d	e	g	総計
		自動車	データ活用	分析・予測	観測	通信	ロボット・ドローン	データ基盤	ビッグデータ	エネルギー	
A	交通	14		3		2	1	1			21
C	賑わい	2	5	4				2	1		14
D	健康・医療	2	3	1	1	1		2	1		11
G	防災		2		2	3	1	1	2		11
F	環境		2	1	2		1			2	8
B	産業	2	1				4				7
E	インフラ	1		1	2		1	1			6
H	安心				2	3					5
I	分野共通		2								2
総計		21	15	10	9	9	8	7	4	2	85

(2) 掲載情報

都市問題と新技術の組み合わせごとに、基本的に3枚組の共通フォーマットにより、下記の項目について情報を掲載している。図-1に事例の掲載情報のイメージと事例の見方（事例集より一部抜粋）を示す。

4. 簡易計画評価モデル(案)の作成

次に、取組を行っていない地方公共団体等が着手するには、新技術の導入・運用コストに見合った都市問題解決効果を計画段階や進捗段階で定量的に予測・評価することが必要であると考えられることから、新技術の導入（スマートシティ化）による効果を予測する上で参考となるツールとして、簡易計画評価モデル（案）を作成した。

(1) 特徴

評価モデル（案）は、様々なスマートシティの取組事例がある中、「地方公共団体等から多くのニーズがあり、汎用性が高い」、「既存の取組が比較的進んでおり、効果に関する情報が得られやすい」点を考慮し、今回は表-2に示す6つの主要な都市問題を対象に、活用可能な新技術を設定した。これらの都市問題と活用可能な新技術の組合せ毎に、地方公共団体の先進的取組事例についてヒアリング等により情報収集を行った。

そして、取組で得られている効果等に関する情報をも

都市が抱えている問題を一般的な視点で解説。

新技術の導入により期待される都市問題解決の効果を、利用者、地域、地方公共団体毎に解説。

National Institute for Land and Infrastructure Management

都市問題と新技術の組合せ

H03 高齢者・子どもの見守り × b03 BLEタグ検知

都市問題

高齢者・子どもの見守り

- 認知症の行方不明者発生件数の増加により、警察や地域ボランティアによる捜索に多くの時間や人手が必要。
- 高齢者が関係する交通事故の増加。
- 人口減少が進み、人口密度が低下している地域において、子どもたちの見守り活動の維持が困難。

新技術

BLEタグ検知

- BLE (Bluetooth Low Energy) は、免許なく使える2.4GHz帯の電波を用い、最大1Mbpsの通信が可能。対応チップは従来のビーコンの1/3程度の電力で動作することができ、ボタン電池一つで数年稼働可能。
- 行方不明者の捜索など、市民生活の安全保障に活用可能。
- 域内に設置した見守りカメラにBLEタグを検知できる検知器を同梱。

BLEタグの例

見守り対象者 → BLEタグ → 検知器 → 保護者など

出典：徳島県スマートシティ実行計画

1 新技術導入により期待される都市問題解決の効果

- 利用者にとって・・・高齢者、子ども、および家族がともに安心して暮らせる。
- 地域・自治体にとって・・・認知症のある方が外出して家に帰れなくなる、行方不明事案に対応し、捜索の負担を軽減。見守り高度化による犯罪抑止力が向上。

2 新技術の適用条件

- プライバシーや個人情報の保護との両立と、それに対する市民との合意形成。
- カメラを設置する電柱や土地等の所有者との調整。

【併せて参照いただきたい項目】

- ✓ H03_高齢者・子どもの見守り × a01_ローカル5G
- ✓ a03_低消費電力・広域通信 (LPWA)
- ✓ b04_防犯カメラ網

●見守りサービスイメージ

見守りサービスイメージ

出典：徳島県スマートシティ実行計画

都市問題を解決するための新技術の概要を解説。

新技術の導入の際に、考慮すべき条件やポイントを解説。

図-1 事例集の掲載情報のイメージと見方（事例集より一部抜粋）

とに導入効果のKPIの例を設定し、評価モデル（案）を作成した。評価モデル（案）の考え方やもとなつた事例、留意点などについては、「解説書」として整理した。また、新技術投入量に対する効果量の原単位を推計し、この原単位を用いた新技術の導入効果の概算が可能なツールとして「簡易計算シート」を作成した。

表-2 対象とする都市問題及び活用可能な新技術

都市問題	活用可能な新技術	KPI の例
高齢者・子どもの見守り	「カメラ網」、「BLE タグ」、「GPS タグ」	搜索時間の短縮、面積カバー率
観光・まちなか等の情報提供	「デジタルサイネージ」、「統合型アプリ」	1日あたり閲覧回数、来訪者の増加率
住民の健康活動促進	「アプリを活用したインセンティブ付与」、「健康データの提供」	1日あたり利用回数、歩数の増加量
交通・買い物弱者への支援	「自動運転車」、「オンデマンド交通」、「輸送用ドローン」	サービスカバー率、買い物コスト削減費用
災害情報の提供	「統合型アプリ」、「タッシュボード」	1日あたり閲覧回数
河川や水路のリアルタイム状況把握	「水位センサー」、「河川カメラ」	現場確認に要する時間の短縮

(2) 解説書と簡易計算シートの構成と内容

① 解説書

解説書では、前項の表に示す項目について「導入効果の評価方法」、「取組事例における評価例」、「効果の発現に影響するポイント」等を整理しており、都市問題の解決に活用する新技術を選定する上で参考となる情報を整理している。

例えば、BLEタグ・GPSタグによる高齢者・子どもの搜索時間の減少の評価であれば（図-2）、従前は、対象となるエリア内をくまなく搜索すると仮定し、従後は搜索範囲をある程度絞れることで、搜索に要する時間が短縮されるというモデルを設定している。

また、日常的な買い物に要する住民の負担軽減の評価であれば（図-3）、従前は、最寄の食品スーパーまでタクシーで移動すると仮定し、従後は、自動運転車、オンデマンド交通、輸送用ドローンによるサービスを活用した移動や物資の受け取りにより、買い物コストが削減するというモデルを設定している。

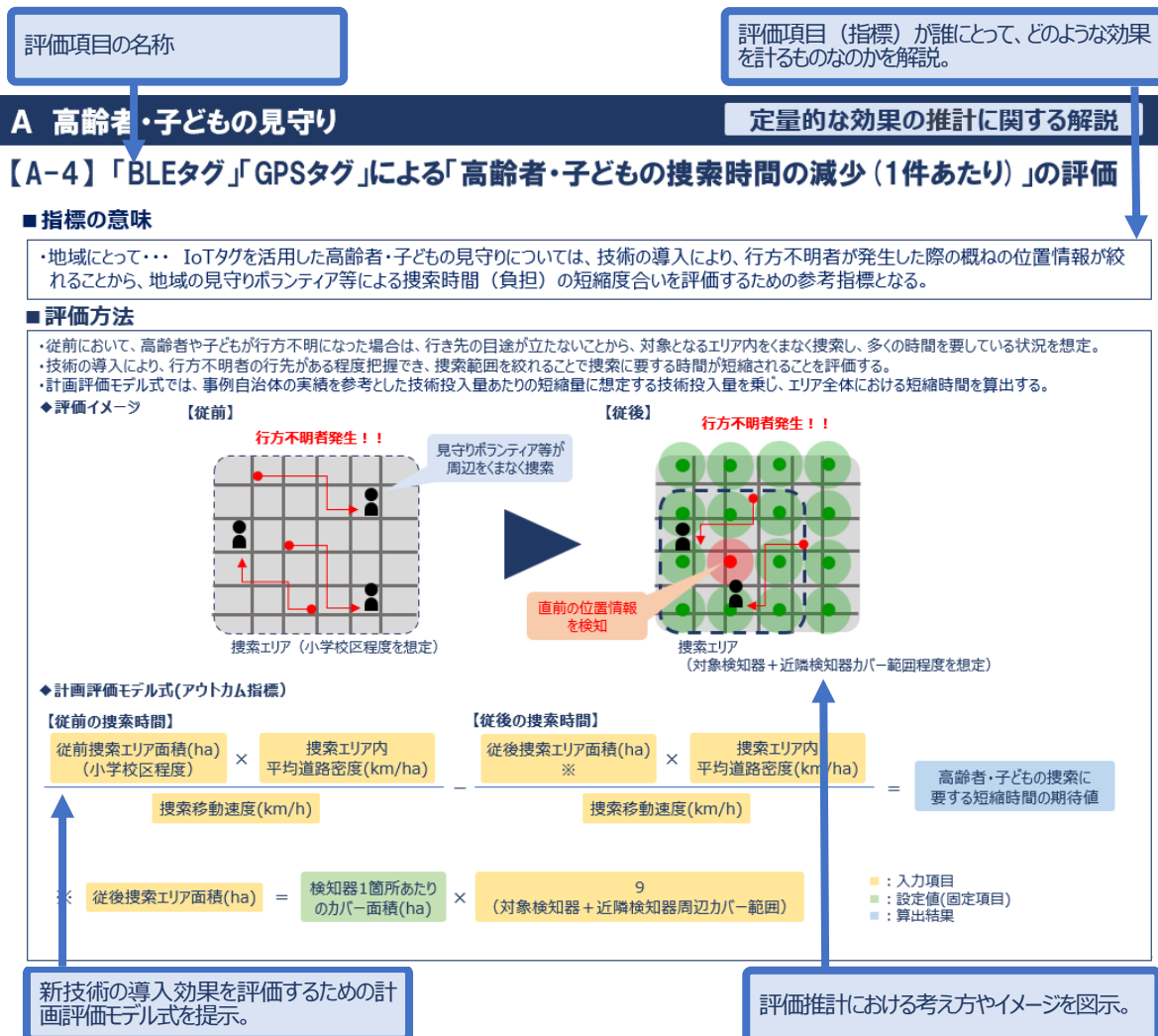


図-2 「BLE タグ・GPS タグによる高齢者・子どもの搜索時間の減少の評価」のイメージと見方（解説書より一部抜粋）

②簡易計算シート

地方公共団体の取組事例の情報をもとに推計した新技術投入量に対する効果量の原単位を活用し、地域情報や想定条件、導入しようとする新技術の投入量等を入力することで、期待できる効果（KPI）を概算することができるシートをMicrosoft Excelで作成した。

5. 成果の活用

都市問題を抱える地方公共団体と新技術を有する企業に対し実施したアンケート調査結果については、学会や雑誌等において論文として多数発表することにより、スマートシティ推進上の課題を広く社会に周知した。また、『スマートシティ事例集【導入編】』については、令和4年10月に国総研ホームページでPDFを公開し²⁾、記者発表、全国の地方公共団体への周知、スマートシティ官民連携プラットフォームオンラインセミナーでの報告等により普及に努め、令和6年9月までに11,456件のダウンロード実績を得ている。令和6年8月には主に環境、防災の都市問題を対象として更新を行っており、今後も取組事

例の増加や技術革新に合わせた内容更新等、随時改定を行ってまいりたい。

また、簡易計画評価モデル（案）については、取りまとめを行い、国総研ホームページで公開する予定である。それぞれ、スマートシティの新規事例等について情報収集を継続的に行うことにより、更新版を作成し、一層の成果の普及を図る予定である。

参考文献

- 1) 勝又済・熊倉永子・新階寛恭（2021）「都市問題の解決に向けた新技術導入（スマートシティ化）に関する研究－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への意向調査－」、『都市計画論文集』，Vol.56-3，pp.1413-1420
<https://doi.org/10.11361/journalcpj.56.1413>
- 2) 『スマートシティ事例集【導入編】』PDF ファイル公開 URL（国総研都市計画研究室ホームページ内）
<https://www.nilim.go.jp/lab/jbg/smart.html>

F 交通・買い物弱者への支援

定量的な効果の推計に関する解説

【F-3】「日常的な買い物に要する住民の負担軽減」の評価

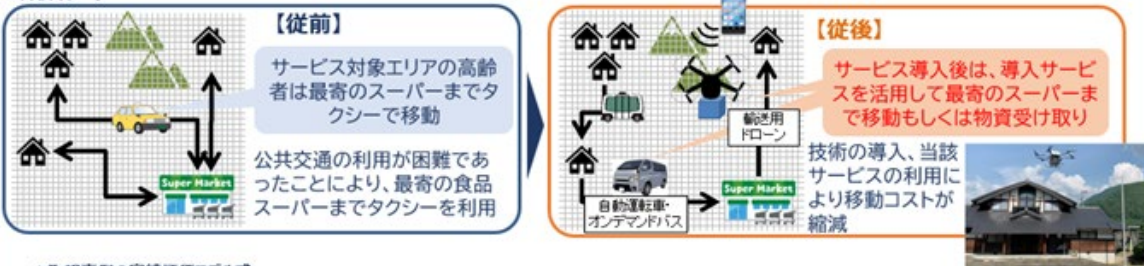
■指標の意味

・住民にとって・・・導入する技術（サービス）により、日常的な買い物に要するコストがどの程度縮減されるかを把握するための参考指標となる。

■評価方法

- ・サービス導入前における公共交通空白エリアを当該サービスの対象エリアと想定し、当該エリアの65歳以上人口を対象とする。当該人口において、従前は公共交通の利用が困難であったことにより、最寄の食品スーパーまでタクシーを利用していたが、従後は当該サービスの利用により移動コストが縮減する状況を推計する。
- ・上記の推計をメッシュ単位（100m）で集計し、エリア全体の買い物コスト削減率として評価する。
- ・計画評価モデル式では、取組事例の実績を参考とした車両1台あたりの縮減費用に想定する車両導入台数を乗することで、エリア全体の縮減費用を算出する。

◆評価イメージ



◆取組事例の実績評価モデル式

$$\frac{\left[\sum \left(\text{メッシュ人口 (65歳以上)} \times \text{当該メッシュから最寄り店舗までのタクシー料金} \right) - \sum \left(\text{メッシュ人口 (65歳以上)} \times \text{当該メッシュから最寄り店舗までの導入サービス利用料金} \right) \right]}{\text{対象エリア人口 (65歳以上)}} \div \text{技術投入量} = \text{技術投入量あたり、日常的な買い物に要する片道1人あたり縮減費用}$$

※タクシー料金は、各メッシュから最寄りスーパーまでの移動距離を計測し、各都市毎のタクシー運賃を基に算出

※技術投入量は、自動運転車及びオンデマンド交通については車両台数、輸送用ドローンについてはドローン台数とした。

出典：伊那市直4

◆計画評価モデル式

$$\text{技術投入量} \times \text{技術投入量あたり、日常的な買い物に要する片道1人あたり縮減費用} = \text{対象エリアにおける、日常的な買い物に要する片道1人あたり縮減費用}$$

●：入力項目 ■：設定値(固定項目) ○：算出結果

→ 計算シートで「入力項目」を入力することにより、指標が算出できます。

図-3 「日常的な買い物に要する住民の負担軽減の評価」のイメージ（解説書より一部抜粋）

都市の暑熱対策における人流データの活用

熊倉 永子

国立研究開発法人建築研究所 環境研究グループ (〒305-0802 茨城県つくば市立原1番地)

携帯電話の位置情報から取得された人流データを用いて、人々の移動の挙動を、電車、車、徒歩、滞在に分類し、暑さ指数との関係を分析することで、暑熱曝露の実態を定量的に分析した。休日に比べ平日の歩行者の方が暑熱に曝露しやすい等、時間帯や立地に応じて人々の暑熱に対する応答が異なることを明らかにした。

キーワード 人流データ、暑熱適応、WBGT、歩行者

1. はじめに

気候変動の影響の一つとして、近年は極端な高温が発生しており、人々の生活における暑熱への対応は急務である。特に、熱中症による健康被害の拡大に対しては、熱中症対策実行計画（2023年5月閣議決定）において、2030年までに熱中症による死亡者数の半減が目標とされている。また、改正気候変動適応法（2024年4月全面施行）では、対策の一つとして市町村長による暑熱避難施設の指定が可能となった。植栽や日よけによる日射遮蔽や、地表面温度を低下させるような建材、ミストや冷却ベンチ等の既存の対策技術に、暑熱避難施設も加わり、気候変動に適応した都市開発や自治体が進める暑さ対策の中で、いつ、どこへ、どのような対策技術の導入が効果的か、効率的に検討していく必要がある。

本研究では、人々の移動や滞留に関する情報を、詳細かつ広範囲で把握できる人流データに着目し、地域住民の行動特性の実態に応じた暑熱リスクの軽減に向けた対策の検討や、リスク評価の開発に取り組んでいる。本報はその基礎的な研究として、品川・田町エリアを対象とした街区スケールで、人々の移動の実態と暑熱に対する応答について分析した。

2. 交通手段別人口等の推計

人々の移動を電車、車、徒歩、滞在に分類し、天候や曜日による移動の傾向について分析するため、GPSによる携帯電話の位置情報から、人の移動軌跡が数分間隔で取得されるポイント型人流データ¹⁾を使用した。しかし、サンプルユーザー数が非常に少ないため、移動を推定し

分類した上で、携帯基地局との通信をもとに取得されるサンプル数が多いメッシュ型人流データ²⁾を教師データとして拡大係数を設定し、当該エリアにおける交通量を推計した。ただし、ポイント型人流データは、GPSで測位しやすい場所に限られることや、サンプルの対象者に偏りがあること等に注意が必要である。いずれも秘匿化処理（推定した居住地周辺のログの削除や、人数が少ないエリアの情報を削除する処理）が施されたデータである。新型コロナ感染症による生活様式の変化等を受ける前の暑い時期のデータとして、2019年8月を対象とした。

(1) 対象地

本報では、東京の主要な開発地域である品川駅を中心とする25km²の地域を対象とした。品川駅や田町駅などの主要駅が中心部にあり、その周辺部は商業地域が広がる。住宅地や公共用地、大規模な緑地も各所にあり、対象地の南側には住宅密集地が広がり、様々な人々の動きが想定される地域である。

(2) 使用した人流データと移動手段等の推定

本報で使用したポイント型人流データは、1日1ユーザーあたりの平均測位回数が52回、中央値が28回であった。GPSの位置誤差の最頻値は14m、平均値は約18mであった。測位の時間間隔は、1日1ユーザーあたり平均15分、中央値6分であった。道路位置を特定するため、位置誤差が50mを超えるデータは除外した。ユーザー毎の移動速度・距離を算出し、20分以内に直線距離で100m以上移動した場合を「移動」とし、図-1に示す方法で交通手段を分類した。半径250mに20分以上存在した場合は「滞在」とした。

(3) 拡大人口の推計方法

ポイント型人流データは、メッシュ型人流データの

1.87%（平日），1.21%（休日）であった．拡大係数は以下のように推計した．①ポイント型人流データの各ユーザーが最も長い時間滞在した100mメッシュを特定し，その100mメッシュ毎にユーザーグループを設定し，②メッシュ数×2（平日・休日）×24（時間）の条件ごとにメッシュ型人流データとの比率を各ユーザーグループの拡大率とした．最後に③②の拡大率で重み付けした値を各ユーザーグループの拡大係数として算出した．推計した値とメッシュ型人流データの決定係数は0.94（平日），0.90（休日）であった（図-2）．拡大係数は，多くのユーザーグループで50～250の範囲におさまった．

(4) 交通ネットワーク図の作成

拡大推計をした交通手段別人口を用いて「電車」「徒歩」「車」の交通ネットワーク図を作成した．「徒歩」と「車」の交通ネットワークは，全国デジタル道路地図データベースを元に実測値とオンライン地図から作成した．歩行者ネットワークは，幅員5.5m以上の道路を対象とした．鉄道ネットワークは，デジタル国土情報に基づいて作成したが，新幹線は通過時間が速いためデータが取得できていない可能性が高いと考え除外した．人流データの各ポイントについて，作成した交通ネットワークの最寄りのノードとリンクから最短経路を探索した．

(5) 交通量等の推計精度

推計した各交通量等について，公的データと比較をした（図-3）．「車」は，平日1330リンクを対象に，2015年道路交通センサスデータと比較した．特に交通量の多い道路や対象地の外周部では，交通量が過小評価されていた．これは，位置情報の取得間隔に対して，車の移動速度が速いため，対象地点通過したにも関わらず，多くの利用者の位置情報が取得できていないことが要因と考えられる．また，センサスデータは車の台数であるのに対し，推計値は人の数であることも誤差が大きい理由である．「電車」は，平日53リンクを対象に，第12回首都圏交通センサスと比較した．推計値はセンサスよりも低い傾向であった．これは，走行速度が速いために位置情報が得られないこと，GPSが届きにくい地下鉄駅では位置情報が得にくいことなどが原因と考えられる．「滞在」は，1時～4時の各町丁目の滞在人口を平均し，2020年国勢調査の人口と比較した．人流データは，秘匿化により推定された自宅とその周辺情報が削除されているため，国勢調査の人口よりも低くなる傾向が見られた．一方で，平日の推計人口が多い地点もあり，これらの地域は，昼間人口が夜間人口の7倍以上と非常に多い場所であった．これは，拡大係数を計算する際，昼間人口の影響が強く，夜間人口が過大に見積もられたためである．「徒歩」は公式な統計データがないため比較をしなかった．

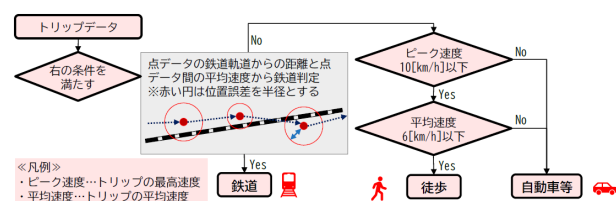


図-1 移動手段の分類

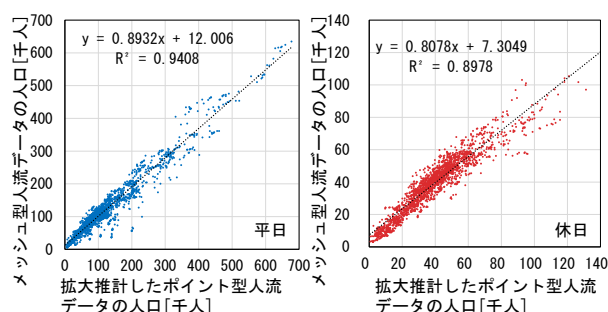


図-2 メッシュ型人流データと推計したデータの比較

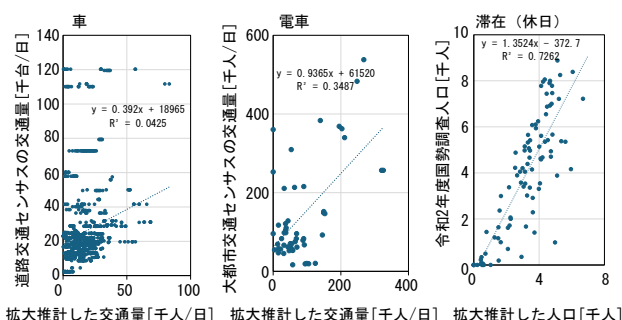


図-3 メッシュ型人流データと推計したデータの比較

3. 人々の移動の特徴と暑さ指数との関係

(1) 交通量等の分布

図-4に各交通量等の分布を示す．休日は，平日よりも就労者が少ないため，対象エリアの主に駅周辺における人口の集中が少なかった．しかし，住宅地や観光地の商店街では，休日でも歩行者数は減少しなかった．「車」の分布では，平日も休日と同じ幹線道路で交通量が多く，「電車」の分布では，品川-田町間，大崎-五反田間で平日，休日ともに交通量が多かった．

(2) 曜日・時間帯別の移動

図-5に，各交通量等における2時の値に対する比率を示す．平日の通勤時間帯は，「電車」「車」「徒歩」のピークが8時と18時であり，「徒歩」等は昼休みの12時にもピークがみられた．「滞在」にはピークは見られず，

就業時間帯に人口が増加する傾向であった。休日は「電車」「車」「徒歩」とも昼間に向けて増加し、12時頃と17時頃に緩やかなピークが見られた。「滞在」の日中の増加は、休日よりも平日の方が大きい傾向であった。

(4) 人々の移動と暑さ指数の相関

東京の暑さ指数（WBGT）の実況推定値（確定版）を用いて³⁾、人々の動きとの関係を分析した。1mm以上の降雨があった日は除外した。夏季休暇取得者が多い8月11日～16日は除外した。人々の移動に関するデータは、各交通手段の1時間あたりの人口を、対象地全体の1時間あたりの総人口で割った比率とし、各日時のデータを平準化したものを用いた。各人口の比率とWBGTとの相関は、平日と休日それぞれにおいて、スピアマンの相関係数を用いた。休日の結果では、「電車」と「車」の人口はどの時間帯でも有意な相関は見られなかったが、「徒歩」と「滞在」は特定の時間帯で有意な相関が見られた。平日の結果では、どの交通手段とも有意な相関はほぼ見られなかった。この平日と休日の違いは、休日の余暇活動が平日よりも天候の影響を受けやすいことを示している。休日の「電車」と「車」で相関がないのは、本報で使用

したデータセットでは、対象地域を短時間で高速に移動する人の動きを捉えることができず、推定精度が低かったことが影響していると考えられる。

有意な相関が認められた時間帯における、WBGTと「徒歩」「滞在」の割合との関係を図-6に示す。「徒歩」はWBGTと負の相関を示したが、「滞在」は正の相関を示した。「徒歩」だけに注目すると、WBGTが同程度でも、20時は8時の4倍程度、14時は13時の2倍以上の傾きであった。天候が人々の活動に与える影響は、地域特性や天候の種類によって異なるが、東京都心の夏における日本人を対象とした本報の結果は、次のことを示唆している。WBGTが高くなると人々は歩くのをやめ滞留する傾向がある。同じWBGTレベルでも、暑さが歩行者数の減少に及ぼす影響は、朝よりも夜の方が大きい。これは、昼間の暑さの記憶と実際の体内蓄熱が、夜間の外出行動に影響している可能性を示している。また、昼間が暑い日は外出者が減るため、夜間に帰宅する人も減る結果、より夜間の歩行者が減少する要因となる。

(5) 土地利用別の傾向

次に、対象地域の中で、特にどのようなエリアで人々の暑熱に対する適応行動がとられやすいのかを調べるた

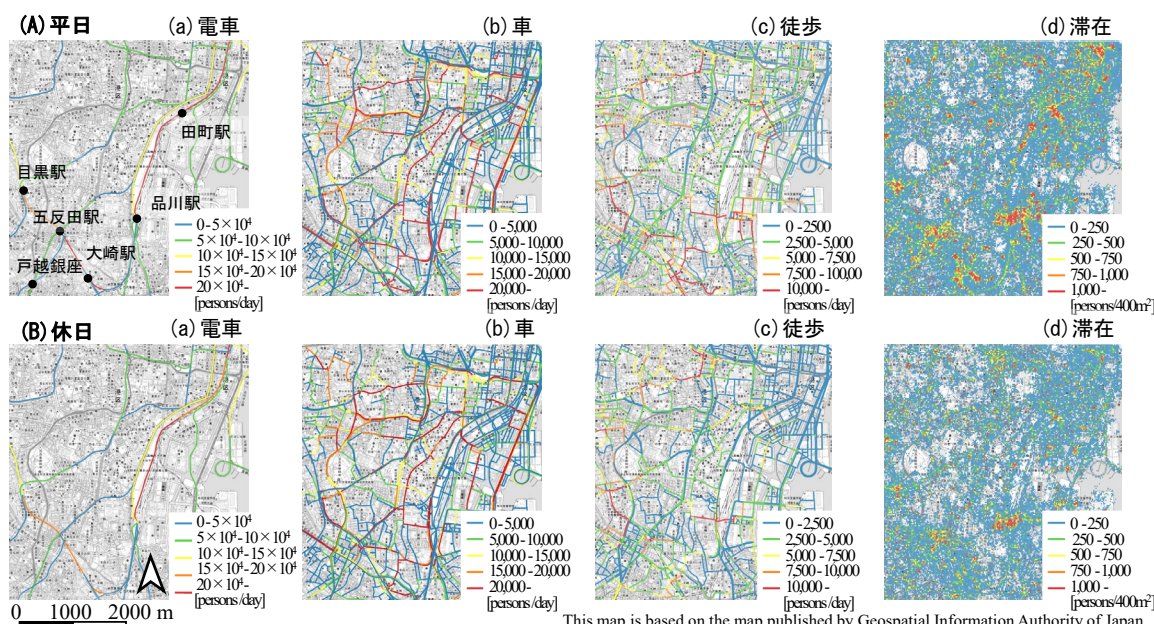


図-4 推計した交通量等の分布

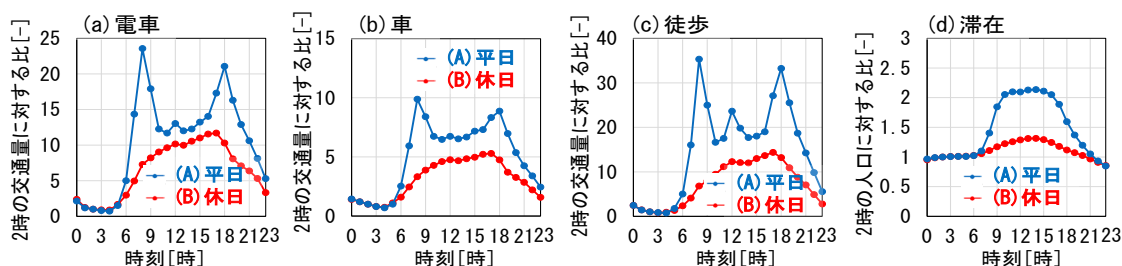


図-5 曜日・時間帯による人々の移動の日変化

め、図-6の時間帯を対象に、100mメッシュ単位の土地利用別にWBGTとの関係のみた。

「滞在」の14時では「高層建物」と「公園・緑地」で有意な相関がみられた。それぞれの相関からは、WBGTが高いほど高層ビル街で滞留人口が増え、公園や緑地では減少する傾向であった。20時はどの土地利用でも有意な相関がみられなかった。

「徒歩」では、いずれの土地利用でも負の相関であった（図-7）。8時と20時で相関があった「高層建物」は、住宅地・市街地等で建物が密集している地域であることから、観光など休日の外出者が主に減少した可能性がある。20時のみで相関がみられた「低層建物」は、3階建て以下の住宅がまとまって分布する地域である。これは、夜間の外出だけでなく、住宅地へ帰宅する人も減ることを示しており、図-6で示したように、WBGTに対する歩行者数の減少感が朝より夜間の方が高くなることを裏付けていると言える。13時と14時に相関を示した「低層建物（密集地）」は、3階建て以下の住宅が密集している地域であり、WBGTが高い日中は、人々が自宅から外出しなくなること示している。14時では「道路」でも相関が見られたが、13時では見られなかった。このことは、図-6で示したWBGTに対する歩行者数の減少感が13時より14時の方が高い結果と合わせると、13時は、昼食をとるなどの目的があれば、歩行者数は暑さの影響を受けにくく、14時の方が暑さを避ける適応行動が見られやすいと言える。また、「低層建物（密集地）」では、建物が低層であるため、日中に建物による日陰がなく、歩行空間が日射にさらされやすい。したがって、住宅が熱的に脆弱な場合は、暑熱避難施設等への利用も促進されているが、日陰がまばらな地域では、施設までの距離やその経路への暑熱対策の検討も重要な課題と言える。

4. 暑熱対策の必要性

以上の人流データの分析から得た人々の暑熱曝露の実態を通じて、以下のような暑さ対策が重要と考える。平日は暑くても徒歩で通勤する人が多いため、就労者が最も利用しやすい歩道や時間帯に、日陰やミストを設置することで、暑熱対策の効果を多くの人々が受けられる。休日は暑さに適応した行動をとりやすい。したがって、ウォーカブルな都市という観点からは、観光客が朝晩に暑くても外出しやすい経路を増やすこと、熱中症予防の観点からは、住宅で暑熱対策が不十分な場合、暑熱避難施設等までの経路や時間帯も合わせて情報提供すること等が考えられる。

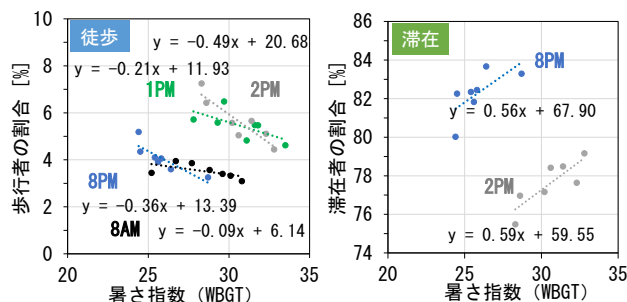


図-6 徒歩・滞在の割合と暑さ指数との関係

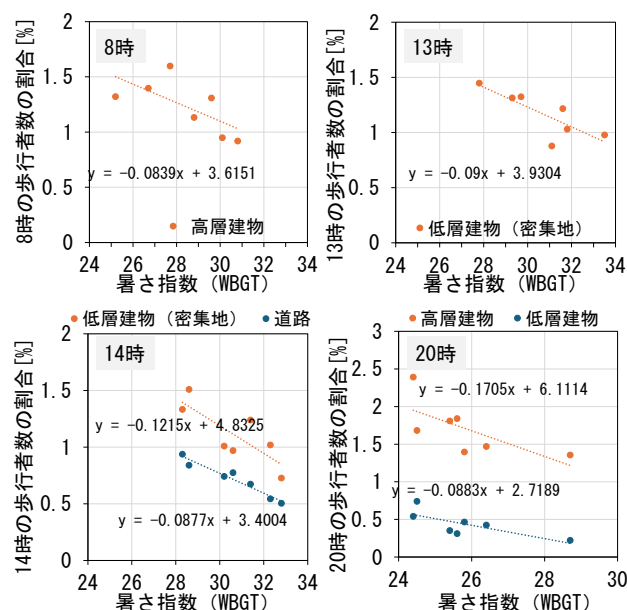


図-7 土地利用別の歩行者比率と暑さ指数の関係

5. まとめ

都心の開発地域を対象に、携帯電話の位置情報から取得された人流データを用いて、人々の移動の挙動を、電車、車、徒歩、滞在に分類し、暑さ指数との関係を分析することで、暑熱曝露の実態を定量的に分析し、休日に比べ平日の歩行者の方が暑熱に曝露しやすいこと等を明らかにした。人流データを活用することで、物理的な暑さだけでなく、地域特性やニーズに合わせて、より具体的な暑熱対策の導入を検討していく必要がある。

謝辞：本研究は、（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費（JPMEERF20212006）により実施した。

参考文献

1)株式会社NTTドコモ モバイル空間統計 2) 株式会社Agoop ポイント型流動人口データ 3) 熱中症予防情報サイト、環境省

デジタル技術等を活用した 河川管理高度化への挑戦 ～全国初の河川系D X出張所～

藤巻 香祐

元 関東地方整備局 荒川下流河川事務所 管理課（〒115-0042 東京都北区志茂5-41-1）

現 関東地方整備局 利根川下流河川事務所 管理課（〒287-8510 千葉県香取市佐原イ4149）

荒川下流河川事務所では、建設生産プロセスの変革による生産性向上を図り、魅力ある建設現場を目指すため、インフラ分野におけるデジタルデータと情報技術を活用したD X（デジタル・トランスフォーメーション）を推進している。本稿では、2023年度より業務を始動した全国初の河川系D X出張所の小名木川出張所におけるデジタル技術を活用した河川管理の高度化による行政サービスの向上、働き方改革の取り組みについて紹介する。

キーワード デジタル技術の導入、河川管理D X、河川管理の高度化、ウェアラブルカメラ、行政サービスの向上、働き方改革、デジタル河川管内図、チャットボット、宅配ロッカー

1. はじめに

労働基準法改正により2024年4月から建設業時間外労働の上限規制が始まり、建設業においても働き方改革が求められている。さらに、人口減少や少子化・高齢化により、建設業全体でも技術者や技能者の担い手確保が喫緊の課題となっている。

これらを背景に、全国初の河川系D X出張所（写真-1）として、小名木川出張所において挑戦中のデジタル技術等を活用した河川管理の高度化による行政サービスの向上、働き方改革の取り組みについて紹介する。



写真-1 小名木川D X出張所の執務環境

2. リアルタイム映像伝送設備 （ウェアラブルカメラ・トラッキング）

河川の維持管理の現場では、河川管理施設等の異常や変化を把握するための河川巡視を365日行っているほか、台風や地震時の際には緊急的な状況把握を行うための点検を24時間体制で行っている。

荒川下流河川事務所では、左右岸併せて約60kmの区間を日々河川巡視・点検する際に、リアルタイム映像伝送設備（ウェアラブルカメラ・トラッキング）を導入（図-1）し、リアルタイムに現場の映像伝送や位置情報の共有を実現した。これにより出張所と現場との距離が近く、意思疎通が容易となり、点検作業の迅速化・精度向上を図ったほか、巡視員や点検員の負担軽減にも寄与している。

(1) 課題整理

これまでの台風や地震時の緊急的な点検の際は、現場状況や点検の進捗状況を1時間ごとに電話で把握し、事務所へ報告していた。

また、異常箇所を発見した際の対応についても、電話による音声のみでの連絡となり出張所職員と現場の点検員とのやり取りに多くの時間と手間を要していた。

さらに、苦情や要望が寄せられた際に対応すべき現場が河川内のCCTVカメラの死角になっていて視認できない場合があるなど、リアルタイムで現場の情報を取得できない等の要因により情報の正確性や対応の即時性に欠けている等の課題がある。

(2) 導入後の効果

リアルタイム映像伝送設備（ウェアラブルカメラ・トラッキング）を導入することにより、（図-2）に示すとおり、導入前は一件当たり約3時間ほどかかっていた異常時の対応時間が、導入後は一件当たり約1時間に短縮され、一件当たり約2時間の縮減を実現している。なお、（図-2）導入前の水色の箇所はリアルタイム映像伝送設備（ウェアラブルカメラ・トラッキング）を使用したことにより時間を短縮することができた項目である。

また、台風や地震時の緊急的な点検の際は、1時間ごとの電話による点検状況報告が必要であったが、トラッキングによる点検員のリアルタイム位置情報の共有が可能となったことにより、点検の進捗状況がひと目で把握でき、電話による点検状況報告が不要となっている。

さらに、河川内のCCTVカメラでも確認できない箇所等のリアルタイムの状況も把握できるようになったことで、的確な状況把握と迅速な指示が可能となった。

ウェアラブルカメラを用いたリアルタイム現地映像は関係者（重大な案件は本局や事務所も一緒に）とWeb会議上で共有でき、異常箇所の点検、診断、措置等、迅速かつ的確な指示が可能となっている。

加えて、ウェアラブルカメラで蓄積した記録（映像・位置・時間）は、現地で問題や異常が発生した際の検証や原因究明に活用できるほか、副次的に点検時の河川利用者とのトラブル発生時の状況把握や巡視員の安全性の確保にも貢献している。

(3) 今後の展望

現在使用しているウェアラブルカメラについては首からぶら下げるタイプの物を使用しているが、一部の巡視員から“首が凝る”等の意見が出ている。今後はウェアラブルカメラやその装備品も含め、より巡視員の負担が少なくかつ音声等の精度が高いものを探していくこととしている。また、トラッキングについては専用のスマートフォンを事務所から貸与しているが、巡視員の持ち物が多くなってしまうことから、今後はRiMaDIS用のタブレット端末にトラッキングのアプリをインストールし、RiMaDISとトラッキングを同じ端末で利用できるか検討

しているところである。

異常時の対応に関する効率化（巡視員／出張所／事務所）			
導入前		導入後	
作業内容	時間	作業内容	時間
①【出張所→巡視員】現地確認依頼（口頭・電話）	5	①【出張所→巡視員】現地確認依頼（口頭・電話）	5
②【巡視員】現地へ移動	20	②【巡視員】現地へ移動	20
③【巡視員】現地確認（写真）	5	③【巡視員・出張所・事務所】ウェアラブルカメラによるリアルタイム映像・音声による状況確認	10
④【巡視員・出張所】状況報告（電話）	5		
⑤【巡視員】出張所へ移動	20		
⑥【巡視員→出張所】状況報告（写真・メール・口頭）	10		
⑦【出張所→事務所】状況報告（電話・メール）	10		
⑧【事務所・出張所】現地対応依頼（電話・メール）	10		
⑨【出張所→巡視員】現地対応依頼（口頭）	5		
⑩【巡視員】現地へ移動	20		
⑪【巡視員】現地確認（写真）	5		
⑫【巡視員】対応報告（電話）	5		
⑬【巡視員】出張所へ移動	20		
⑭【巡視員→出張所】状況報告（写真・口頭）	10		
⑮【出張所→事務所】対応報告（電話・資料作成・メール）	20		
	175		65
			縮減時間／件 120

図-2 ウェアラブルカメラ・トラッキング導入後の定量的効果

3. 河川管理ダッシュボード（デジタル河川管内図）

(1) 課題整理

これまで出張所で実施していた工事工程会議は、各社の情報が一元的に管理ができておらず、調整に時間を要すなど効率化が課題となっていた。また、受注者が会議のために出張所までの移動に年間で約75時間、さらには会議資料として年間で約1,440枚を印刷、持参を要していた。

(2) 導入後の効果

荒川下流河川事務所では、河川管理ダッシュボード（図-3）を導入することにより、一時使用、占有状況、隣接する工事情報等の各種デジタル情報を一元的に管理、閲覧可能としたことで、発注者と受注者間の情報共有や事業調整が容易になり、業務効率が飛躍的に向上した。また、今まで対面で実施していた工事工程会議をWeb開催に切り替えて河川管理ダッシュボード上に会議資料を保存することにより、「いつでも」「どこでも」事業調整を可能としたほか、ペーパーレス化も実現している。



図-1 リアルタイム映像伝送（ウェアラブルカメラ・トラッキング）による河川巡視の様子

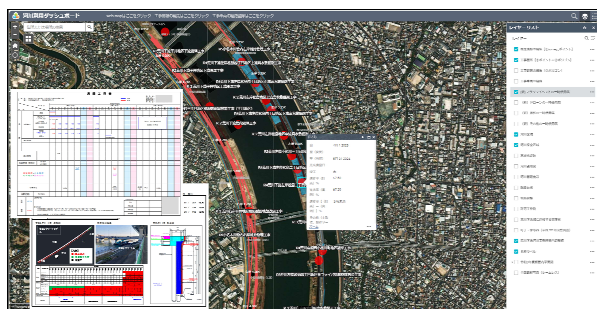


図3 河川管理ダッシュボードの例

4. 河川区域等の把握（デジタル河川管内図）

(1)課題整理

河川沿川の河川保全区域内で建築物を新たに建築や解体をする際は、河川法第55条の申請が必要となる。荒川下流河川事務所では、河川保全区域の確認の問い合わせが多数寄せられ、電話対応等で窓口業務が圧迫されている現状があった。

(2)導入後の効果

荒川下流河川事務所HPにおいてデジタル河川管内図上に河川区域および河川保全区域を公開することにより、住所検索機能で区域の確認を可能とし、一般利用者の問い合わせから職員が回答するまでの時間が短縮され行政サービスが向上した。さらに、職員の問い合わせ対応時間も年間約50時間削減（図-4）した。

また、HPへの誘導のみで解決できるようになったため、直接の担当職員以外でも問い合わせ対応が可能となり、担当職員の負担軽減を図ることができた。

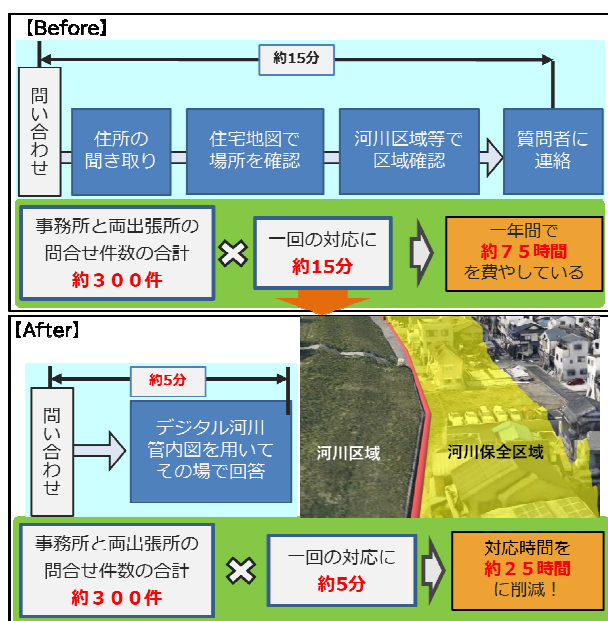


図4 河川区域等を公開したことによる年間の時間削減効果

5. チャットボットの導入

荒川下流河川事務所では、HP上にチャットボットを導入（図-5）し、窓口業務の改善に取り組んでいる。

「いつでも」「どこでも」問い合わせ可能とすることにより、行政サービスの向上と職員の問い合わせ対応への業務負担軽減を目指すものである。

(1)課題整理

荒川下流河川事務所管内では、年間約1,500万人の河川利用者がおり、年間約710件と多くの問い合わせを受けている。2019年台風第19号の際には、一週間で80件を超える問い合わせを受け、通常業務の圧迫や迅速な災害対応等に支障をきたす恐れがあった。

(2)導入後の効果

チャットボットを導入後は、災害時の膨大な問い合わせにも職員の対応なく即時回答することができるようになった。平時の平均稼働数は200～300回程度であるが、2023年台風第2号の出水時には約9万回稼働し、地域住民等への情報提供に寄与している。

また、（図-6）に示すとおり、2023年7月～9月の3か月でチャットボット利用者数の業務時間内の稼働（赤枠）が1,605回、業務時間外の稼働（青枠）が1,118回と約4割が業務時間外であり、利用者からの需要が高いことが分かる。さらに、質問に対して即時回答することができるため、利用者が欲しい情報をすぐに手に入れることができ、行政サービスの向上・窓口業務の改善に寄与している。

(3)今後の展望

現状のチャットボットでは十分な回答ができていない問い合わせ内容を整理し、チャットボットへの学習を行うこととしている。また、台風や地震時にチャットボットの利用が増加することから、ライブカメラ映像や水位情報の提供に関する回答を充実させる予定である。

今後、更なる行政サービスの向上や電話問い合わせの削減に向け、チャットボットを活用した自動音声対応などを検討していきたいと考えている。

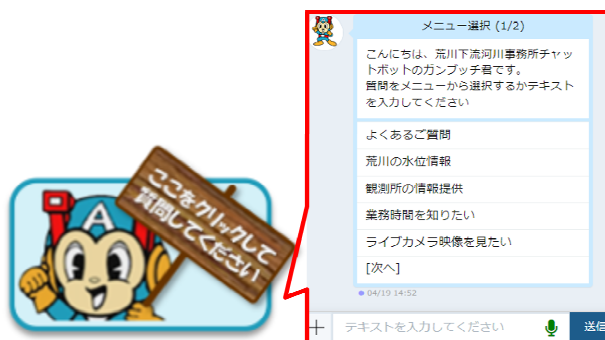


図5 チャットボット（ガンブッチ君）

	月	火	水	木	金	土	日
0時～2時	3	11	10	2	5	8	1
3時～5時	0	18	5	1	1	15	7
6時～8時	14	46	16	25	51	16	20
9時～11時	75	110	82	139	223	73	31
12時～14時	74	90	53	56	157	46	41
15時～17時	89	103	95	76	183	58	49
18時～20時	68	46	63	36	57	75	48
21時～23時	14	19	10	7	53	39	10

業務時間内: — 業務時間外: —

図6 2023年7月～9月間の曜日時間帯別チャットボット稼働回数



写真2 荒川下流河川事務所管内の車止めゲート

6. 宅配ロッカーと連携した貸出事務の電子化

(1)課題整理

大都市の貴重なオープンスペースとなっている荒川は、河川利用者が多く、特に週末には多数のイベント等が行われている。河川管理上、一般車両が進入できないように管内に車止めゲート（写真-2）を多数設置しているため、河川利用者は一時使用届の提出やゲートの鍵を借りる必要があり、出張所では鍵の貸出事務に多くの時間を要している。イベントなどは週末に多い傾向があるため、河川利用者は開庁日である平日に出張所へ足を運び、鍵を借用、返却しなければならないほか、鍵を休日を跨ぎ数日間貸し出すことになるため、安全面や河川利用者への負担等が課題となっている。

(2)導入後の効果

導入前は、鍵の受け渡しは出張所の窓口にて行っていたが、一時使用届をオンライン申請とすることで、利用者の出張所への来庁回数を減らすとともに宅配ロッカーを活用した鍵の受け渡しをすることにより非対面・非接触で、担当職員が不在でも鍵の受け渡しが可能となった。（写真-3）

また、オンライン申請、宅配ロッカーを活用した鍵の受け渡しにより、週末のイベント終了後当日に出張所へ鍵の返却も可能としたことで、河川利用者の負担が少なくなり行政サービスが向上した。さらに、職員の窓口業務の改善・ペーパーレス化も実現している。

(3)今後の展望

鍵の貸出のための宅配ロッカーは現在出張所玄関の中に設置されており、業務時間外の貸出には、時間に制約がある。今後は宅配ロッカーを出張所玄関の外に設置し、返却時同様に夜間休日24時間対応可能とすることにより、さらなる行政サービスの向上を検討している。



写真3 宅配ロッカーによる非対面の鍵の受け渡し

7. まとめ

荒川下流河川事務所では挑戦中の河川管理DXは「D（デジタル技術）を導入しても、X（変革・改革）できなければ職員の負担が増えるだけとなること、行政サービスの向上や働き方改革を実現できなければDXの意味がない」を強く意識し、D（デジタル技術）よりもX（変革・改革）を合言葉に、所内関係者でプロジェクトチームを結成して議論を重ね、取り組みを推進している。

人口減少や少子化・高齢化による担い手確保が課題となる中で、どのようにX（変革・改革）できるかを試行錯誤しながら、課題解決型の河川管理の高度化を図り、行政サービスの向上と働き方改革に挑戦し続ける必要がある。

また、今後は荒川下流河川事務所では実装した各種の取り組みを他事務所へ横展開し、みんなと意見交換や改善を重ね、さらなる業務の効率化・河川利用者への利便性向上を目指していきたい。

より良い行政サービス提供のため、失敗を恐れずに新しい技術を積極的に導入して変容を追い求めていくことは、建設業全体が将来を担う若者から選ばれる魅力ある産業として発展し、強靱で持続可能な地域づくりに寄与するものと考えている。

庄内川における河道内樹木の管理に関する 取組について

坂野 正弥¹

¹国土交通省中部地方整備局 庄内川河川事務所 管理課（〒462-0052 愛知県名古屋市中区福徳町5-52）

庄内川水系の直轄管理区間における河道内樹木に対し、「緊急3カ年」施策による樹木伐採後に複数の再繁茂対策を実施した。本研究では、代表的な樹種であるヤナギ類・ハリエンジュ・タケ類に対する効果を約5年モニタリングし、将来20年間対策を継続した場合のコストを比較し最適な対策を選定した。さらに、今後の維持管理の年次計画をとりまとめるにあたり、AIによる樹林化予測モデルを構築した上で、庄内川樹木管理計画（案）を作成した。本報告では、これらの取り組みの詳細と、作成した庄内川樹木管理計画（案）の概要について報告する。

キーワード 河道内樹木管理，再繁茂対策，試験施工，AI，樹林化予測

1. はじめに

2011年9月の台風第15号による豪雨により、庄内川では中流部の下志段味地区において本川より越水が発生したほか、名古屋市守山区、春日井市、多治見市において内水被害が発生している。

全国的に想定を上回るような豪雨が頻発している中で、河川管理者としては河道内の土砂や樹木を適正に維持管理していくことが求められている。

特に樹木の管理に関しては樹種や繁茂規模によって対策費用が大きく異なり、伐採後も再繁茂を抑制することが必要なため、より経済的な対策が求められている。

このような状況を踏まえ、庄内川における樹木管理を検討するため、2018年度より「防災・減災、国土強靱化のための3カ年対策」（以下、「緊急3カ年対策」という。）の一環として、樹木伐採及び河道掘削を実施した箇所、樹木伐採後の萌芽再生を抑制するための再繁茂対策を試行し、2023年度にかけてモニタリングを実施した。

なお、対策対象樹種は、庄内川において広域的に繁茂が確認されている、ヤナギ類、ハリエンジュ、タケ類とした。これらの樹種は成長が早く、また、根株、地下茎、枝葉から萌芽再生するため、短期間での樹林回復することが課題となっている。

モニタリングの結果、抑制効果が確認された手法について、長期的な対策コストを踏まえた比較検討を行い、各樹種に最適な再繁茂対策を選定、AIを活用した樹林化予測結果と組み合わせ、庄内川樹木管理計画（案）としてとりまとめた。

2. 樹種毎の特性

樹種毎の再繁茂に関する特性を以下に示す。

(1) ヤナギ類

ヤナギ類は種子繁殖と栄養繁殖によって再生産を行う。伐採株・枝からも萌芽再生し、かつ、種子からの発芽と比べて成長が早く、伐採株からの萌芽再生の場合、約2年で高木（4m）に成長する。²⁾

(2) ハリエンジュ

ハリエンジュは種子繁殖と栄養繁殖によって再生産を行い、栄養繁殖には伐採等により損傷を受けた幹（株及び枝）からの萌芽と水平根からの萌芽（根萌芽）とがある。³⁾ 栄養繁殖力は旺盛であり、伐採のみを行った場合は、伐採株から萌芽して約3年で高木に成長する。²⁾

(3) タケ類

タケ類は、主に地下茎からの栄養繁殖により再生産を行う。地下茎は毎年伸長し、新たな筍（発芽個体）を出す。また、伐採のみを行った場合には、地下茎から萌芽再生し、1年で元通りまで成長することがある。²⁾



図-1 対策対象樹種（左：ヤナギ類、右：ハリエンジュ）

3. 再繁茂対策手法

対策効果の検証は、緊急3カ年対策実施箇所において試験施工エリアを区切り実施した。なお、対策手法は次のとおりであり、初年度施工は、2019年11月～2020年1月にかけて実施した。

(1) ヤナギ類

庄内川右岸27.8～28.2km及び、左岸29.0km付近で以下a)～d)の対策を行った。

a)伐採除根

初年度のみ伐採除根を実施した。

b)定期伐採

1回/年の頻度で伐採のみを実施した。なお初年度施工以後の施工は、2020年12月、2021年9月に実施している。

c)伐採＋樹皮剥皮

萌芽再生の発生源である休眠芽を取り除くことを目的として、伐採後に伐採株の樹皮を地下10cm程度まで剥皮した。

d)伐採＋木酢液の塗布

木酢液の塗布により伐採株からの呼吸を阻害することを目的として、伐採株に木酢液を塗布した。

(2) ハリエンジュ

庄内川左岸25.8～26.2km付近で以下a)～f)の対策を行った。

a)伐採除根

初年度のみ伐採除根を実施した。

b)伐採除根＋定期伐採

初年度伐採除根を実施し、2年目以降は1回/年の頻度で伐採のみを実施した。なお施工時期は2020年12月、2021年9月、2022年9月に実施している。

c)伐採除根＋踏み倒し

初年度伐採除根を実施し、2年目以降はブルドーザによる踏み倒しを実施した。なお、踏み倒しは3t型のブルドーザにより行い、施工時期は、2021年2月、9月、11月、2022年8月に行った。

d)伐採除根＋砂利敷均し

伐採除根後転圧を行い、表層に30cm砂利を敷均した。砂利はC40材料を使用し、転圧はしていない。

e)天地返し

伐採除根後、上層50cm、下層50cmの層厚で上層土を下層土と入れ替えた。

f)伐採＋木酢液の塗布

ヤナギ類と同様に伐採株に木酢液を塗布した。

(3) タケ類

庄内川左岸27.8～28.2km付近で以下a)～f)の対策を行った。

a)伐採除根

初年度のみ伐採除根を実施した。

b)伐採＋追加伐採

初年度に伐採を実施し、2020年9月、11月、及び2022年9月に再度伐採を実施した。

c)伐採＋踏み倒し

初年度に伐採を実施し、2年目以降はブルドーザによる踏み倒しを実施した。なお、踏み倒しは3t型のブルドーザにより行い、施工時期は、2021年2月、9月、11月、2022年8月に行った。

d)1m残し伐採

地表面から1mを残して伐採を実施し、その後2020年6月、12月、2022年9月に再度伐採を実施した。

e)伐採＋転圧＋竹チップ敷均し

伐採後転圧を行い、表層に30cm竹チップを敷均した。竹チップの転圧はしていない。

f)伐採＋転圧＋砂利敷均し

伐採後転圧を行い、表層に30cm砂利を敷均した。砂利はC40材料を使用し、転圧はしていない。



図-2 踏み倒しの状況（左：施工前、右：施工後）

4. 結果

モニタリングは毎年8月に実施している。その結果、胸高直径が10mmを超えるものが確認された場合、「再繁茂が確認された」としている。それ以下の場合は草本類に区分されるものとし、「再繁茂が確認されなかった」と評価した。

次に、樹種毎の2023年度末時点での評価結果を示す。

(1)-1 ヤナギ類（庄内川右岸27.8～28.2km）

a)伐採除根

全期間で再繁茂が確認されなかった。

b)定期伐採

2020年8月の調査では、対象株11本中10本が枯死或いは衰弱していることが確認され、再繁茂したヤナギ類の樹高は0.7m、胸高直径は12.5mmであった。その後2020年12月に伐採が実施され、2021年8月以降の調査では再繁茂は確認されなかった。

c)伐採＋樹皮剥皮

2020年8月の調査では、対象株11本のうち10本が枯死或いは衰弱していることが確認され、再繁茂したヤナギ類の樹高は0.7m、胸高直径は11.8mmであった。2021年8

月の調査では1本（樹高1.96m，胸高直径17mm）確認されたが，これは伐採株からの再繁茂ではなかったため，出水等により供給された種子等による萌芽と想定される。2022年8月の調査では，全ての株が枯死していることが確認された。2021年8月に確認されたものに対しては伐採等を行っていないため，出水等の影響により枯死したものと推定される。

d)伐採+木酢液の塗布

2020年8月の調査では，対象株11本のうち，9本が枯死或いは衰弱していることが確認され，再繁茂したヤナギ類の平均樹高は0.7m，平均胸高直径は12.7mmであった。2021年8月以降の調査では再繁茂が確認されなかった。対象株に土が被覆していたため，出水等で土が被覆し，酸素供給等が阻害され枯死したものと推定される。



図-3 伐採株の状況

（左：良好（多数の萌芽有），右：衰弱（萌芽が少ない），左下：土被覆した状況，右下：ヨシに遷移した状況）

(1)-2 ヤナギ類（庄内川左岸29.0km）

庄内川右岸27.8～28.2kmの試験施工箇所においては，全ての試験施工手法において再繁茂抑制効果が確認されたが，競合植生であるヨシに遷移している箇所も確認されており，冠水による土の被覆も確認されている。

また，初回の現地調査の時点で，全ての対策箇所において，対象株の8割以上が枯死或いは衰弱していたこともあり，再繁茂対策による効果ではなく，外的要因（ヨシ，冠水等）による効果である可能性が高いと考えられた。

このため，各試験手法の再繁茂抑制効果を再度確認するべく，2023年1月に，近傍のヤナギ類林にて同様の試験施工を実施した。前回施工箇所との違いは，周辺にヨシ群落が少ない点，対象株数が多い点（前回：平均11株，今回：平均25株）平均比高が高い点（前回：比高0.7m，今回：比高1.6m）である。

2023年8月に実施した現地調査の結果は，以下のとおりであった。各試験施工箇所でヨシの繁茂は確認された

が伐採株への土の被覆は見られず，各対策の効果の差を詳細に確認することができた。

a)伐採除根

全期間で再繁茂が確認されなかった。

b)定期伐採

対象株31本のうち，6本が枯死或いは衰弱していることが確認された。1株あたりの平均萌芽本数は，4.5本であった。

c)伐採+樹皮剥皮

対象株18本のうち，4本が枯死或いは衰弱していることが確認された。1株あたりの平均萌芽本数は，2.3本であった。

d)伐採+木酢液の塗布

対象株26本のうち，9本が枯死或いは衰弱していることが確認された。1株あたりの平均萌芽本数は3.2本であった。

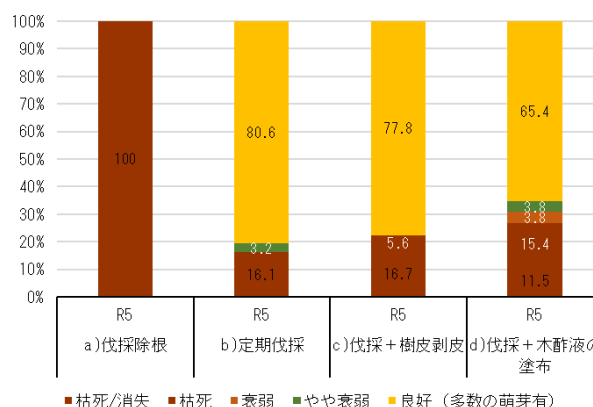


図-4 ヤナギ類試験施工対象株の枯死率及び樹勢

(2) ハリエンジュ

a)伐採除根

2020年8月の調査では，30本（平均樹高3.2m，平均胸高直径15.1mm）の再繁茂が確認され，2023年8月の調査では，24本（平均樹高6.5m，平均胸高直径49mm）まで生長した。初年度施工以降未対策のため，本数が減少した要因としては，出水等による消失が考えられる。

b)伐採除根+定期伐採

2020年8月の調査では，4本（平均樹高3.3m，平均胸高直径は16.8mm）の再繁茂が確認され，2021年8月の調査では再繁茂が確認されず，2022年8月の調査では，5本（平均樹高2.4m，平均胸高直径11mm）の再繁茂が確認され，2023年8月の調査では再繁茂が確認されなかった。

c)伐採除根+踏み倒し

2020年8月の調査では，16本（平均樹高3m，平均胸高直径13.3mm）の再繁茂が確認され，2021年8月の調査では23本（平均樹高3.01m，平均胸高直径17mm）2022年8月の調査では12本（平均樹高2.7m，平均胸高直径11mm），2023年8月の調査では13本（平均樹高2.8m，平

均胸高直径12mm) 確認された。

d)伐採除根+砂利敷均し

全期間で再繁茂が確認されなかった。

e)天地返し

全期間で再繁茂が確認されなかった。

f)伐採+木酢液の塗布

2020年8月の調査では、102本（平均樹高3.4m, 平均胸高直径19.6mm）の再繁茂が確認され、2021年8月には575本（平均樹高3.34m, 平均胸高直径22mm）の再繁茂が確認されたことから、抑制効果はないものとして、以降のモニタリングを中止した。

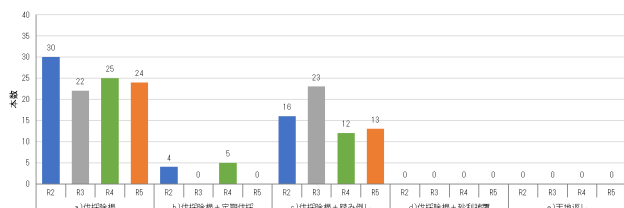


図-5 ハリエンジュ試験施工箇所の対策毎の再繁茂本数

(3) タケ類

a)伐採除根

2020, 21年の調査では再繁茂が確認されなかったが、2022年8月の調査で3本（平均樹高2.5m）, 2023年8月の調査で9本（平均樹高4.3m）の再繁茂が確認された。

b)伐採+追加伐採

2020年8月の調査では、119本（平均樹高3.1m）の再繁茂が確認され、2021年8月の調査では再繁茂が確認されず、2022年8月の調査では175本（平均樹高3.5m）の再繁茂が確認され、2023年8月の調査では再繁茂が確認されなかった。

なお、2021年8月及び2023年8月に再繁茂は確認されなかったが、特段対策は行っていないため、要因は特定できていない。

c)伐採+踏み倒し

2020年8月の調査では、78本（平均樹高3.5m）の再繁茂が確認され、2021年8月の調査では、175本（平均樹高2.99m）の再繁茂が確認され、それ以降の調査では再繁茂は確認されなかった。

d)1m残し伐採

2020年8月の調査では再繁茂が確認されなかったが、2021年8月の調査では、150本（平均樹高2.48m）2022年8月の調査では225本（平均樹高3.9m）の再繁茂が確認された。2023年8月の調査では、再繁茂は確認されなかった。

e)伐採除根+竹チップ敷均し

2020年8月の調査では4本（平均樹高2.5m）の再繁茂が確認され、2021年8月の調査では89本（平均樹高2.98m）が確認されたことから、再繁茂抑制効果が1年以

上継続しないことが確認出来たため、以降のモニタリングを中止した。

f)伐採除根+砂利敷均し

全期間で再繁茂が確認されなかった。

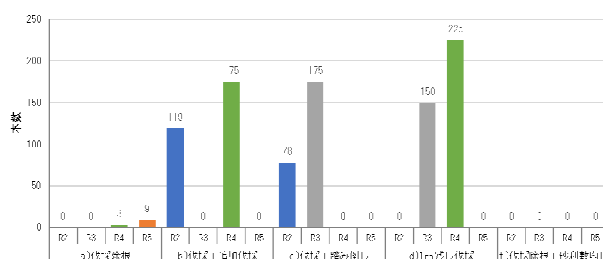


図-6 タケ類試験施工箇所の対策毎の再繁茂本数

5. 考察

(1) ヤナギ類

試験施工箇所2箇所に共通して、伐採除根を行った場合、再繁茂が完全に抑制されることが確認できた。

右岸29.0kmの試験施工箇所でも再繁茂が確認されている手法間の再繁茂状況の違いを比較すると、平均萌芽数では、c)樹皮剥皮を行った手法、株の枯死率で比較した場合には、d)木酢液の塗布をした手法が有意である結果となっており、それぞれの手法の狙い（樹皮剥皮：休眠芽の除去による萌芽抑制、木酢液：呼吸阻害による伐採株の衰弱）通りの効果は確認出来ている。

一方、全ての手法で60%以上の再繁茂率が確認されていることから、a)伐採除根と比較すると、再繁茂抑制効果が見られない。しかし、2024年以降にかけて自然枯死する可能性もあり、b)定期伐採を行った箇所においては、現地調査以降に行った伐採の効果を確認する必要がある。

また、競合植生であるヨシ等の繁茂による伐採株への日照の阻害、出水による冠水の影響についても注視する必要がある。

(2) ハリエンジュ

現地調査の結果、d)砂利被覆及びe)天地返しにより、再繁茂が完全に抑制されることが確認できた。両手法の共通点は、日光が遮断（抑制）されることであり、既往研究等でも、ハリエンジュの耐陰性は無い（日照が確保出来ない箇所では生長できない）とされている。³⁾

敷均しや天地返し以外の伐採手法としては、伐採除根のみでは再繁茂抑制効果が得られないことは明らかであり、生育密度に着目すると、木酢液の塗布では、伐採前より状況が悪化していることから、伐採株及び水平根からの萌芽が顕著であることが確認出来る。一方で、定期的な伐採や踏み倒しにより、再繁茂のスピードを遅くさせることが出来ていた。

耐陰性が無いことを踏まえると、定期的に伐採、踏み倒しを行うことにより樹勢が抑えられ、かつ、競合植生による地表被覆により萌芽後の生長抑制効果が期待できる結果となった。



図-7 再繁茂状況（左：初回施工直後 右：2023年8月時点）

(3) タケ類

伐採除根した場合、2年程度は再繁茂抑制されるが、3年目以降、徐々に回復していく傾向が見られる。

伐採後、追加で伐採や踏み倒しを実施した箇所では、冬期に伐採をした場合、翌年再繁茂が確認されたが、夏期に伐採をした場合、翌年再繁茂が抑制されている。

（表-1赤枠）しかし、1年経過後に再繁茂していることから、伐採の再繁茂抑制効果は1年と考えられる。

既往研究において、竹類伸長時の養分使用実態から、夏期の伐採が有効であることが報告されている⁴⁾、実証のため、2023年度は刈取及び踏み倒しを秋～冬期にかけて実施した。この結果については、2024年度の現地調査にて確認する。

表-1 試験施工時期によるタケ類の再繁茂抑制効果の違い

施工 頻度	手法	1年目		2年目		3年目		4年目	
		施工時期	再繁茂	施工時期	再繁茂	施工時期	再繁茂	施工時期	再繁茂
		R1年度	R2年度	R2年度	R3年度	R3年度	R4年度	R4年度	R5年度
年1回	b)伐採+追加伐採	11～12月	あり	9月、11月	なし	—	あり	9月	なし
	d)1m残し伐採	11～12月、6月、7月	なし	12月	あり	—	あり	9月	なし
	c)伐採+踏み倒し	11～12月	あり	2月	あり	9月、11月	なし	8月	なし

6. 樹木管理手法の選定

モニタリング結果及びコスト比較結果により、庄内川における樹種毎の管理手法を以下のとおり選定した。

なお、コスト比較は、20年間のトータルコストで比較することとし、モニタリングの結果再繁茂が確認されていない試験手法については、庄内川における樹木生長曲線及び既往文献⁹⁾より再伐採期間を設定した。

表-2 各樹種の再伐採期間

樹種	再伐採が必要な樹高 (死水域設定の樹高)	再伐採期間
ヤナギ林	6 m	6年程度
ハリエンジュ林	8 m	5年程度
竹林	3 m 程度	5年程度

(1) ヤナギ類

新たに設定した試験施工地にてモニタリング検証途中ではあるが、現状で効果が見られトータルコストが最も安価となる、「伐採除根」を選定した。

(2) ハリエンジュ

再繁茂スピードを遅くする効果があり、従来工法（伐採除根）に比べて最も経済的となる、「伐採除根+踏み倒し」を選定した。

(3) タケ類

再繁茂抑制効果が高く、従来工法に比べて最も経済的となる、「伐採+踏み倒し」を選定した。

なお、今回選定していないが、再繁茂抑制効果が確認できた天地返し及び砂利敷均しは、狭隘な箇所や現場へのアクセス制限等により毎年対策することが困難な箇所にも有効であることから、今後事業を進める中で現場状況に応じて適用していくことを検討する。

7. 樹木管理計画（案）の作成

前述した伐採後の対策効果の検証と合わせて、将来的に繁茂する箇所や樹種を予測することで再繁茂対策の優先度を検討するため、AI（深層学習）を活用した予測モデルの構築を行い、予測結果を反映した庄内川樹木管理計画（案）を作成した。

(1) AI（深層学習）による植生予測

庄内川では平成30年度に、河川環境基図と立地環境データを一般化線形モデルを用いてモデル化し、樹林の分布予測を実施している。しかし、説明変数同士の相互作用をモデルに反映できないなど、改良の余地があった。ここでいう説明変数同士の相互作用とは、水際近くで河川水位に対する比高が高い場合には水はけが良いことを意味し、低い場合には浸潤であることを意味する。といったように、ある変数の影響が、他の変数の大小によって変化するような事象を指し、深層学習の場合には中間層の存在によって、そのような説明変数同士の相互作用をモデルに取り入れることができる。

そこで、予測精度及び今後の更新を視野に入れ、統計的手法の1つであるAI（深層学習）を用いてモデルを構築した。

モデルでは、河道を10mメッシュに区切り、河川環境基図（2020年作成）に基づく、対象メッシュの半径60m内及び上流側1kmの同種群落面積、現地の地盤高、水面からの距離を予測用説明変数として与え、予測を実施した。

(2) 予測結果

予測の樹木判別結果は、ヤナギ類群落、ハリエンジュ群落、竹類群落、その他樹林の4種に分類され出力される。

精度確認として、構築したモデルにより、河川環境基図を再現した結果に対し、ROC曲線（Receiver operating characteristic Curve）を作成し、AUC（Area Under Curve）を確認したところ、ヤナギ、ハリエンジュ、タケ類共に0.9を超えるAUCとなっており、信頼度の高いモデルを構築できていることが確認された。（AUCは1に近いほど信頼性の高いモデルと評価される。）

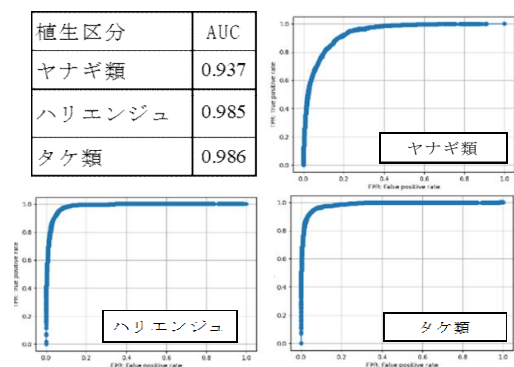


図-8 植生区分毎のROC曲線とAUC

(2) 治水面から支障をおよぼす樹木群の抽出

植生予測結果を基に死水域を設定、準二次元不等流計算を実施し、計算水位が計画高水位を超過する区間の樹木群を、治水面から支障を及ぼす樹木群として抽出した。



図-9 予測結果及び抽出された樹木群の例

(3) 年次計画の作成

対策範囲、対策優先度、コストを踏まえた以後20年間の年次計画を作成した。樹種毎の対策手法は前述のとおりであるが、樹林化予測の結果、その他樹林と予測される箇所においては、樹種が特定できないため、繁茂特性に応じた対策ができない。このため、低コスト、かつ、効果を継続させることが期待し「伐採＋定期踏み倒し」を実施する想定とした。

20年間の累計費用は約9億円となり、伐採除根等初期対策が必要な期間（2024年～2027年）では、約1.2億円/年が必要となるが、その後は伐採や踏み倒しのみとなり、維持対策が主体となることから、約4千万円/年の対策費用で対応可能となる。

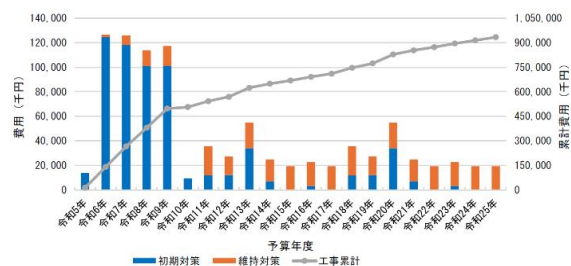


図-10 20年間の予算年次計画

(4) 今後の更新

樹木管理計画は、河道の将来予測を基に検討しているため、定期縦横断測量や水辺の国勢調査が実施されたタイミングで、予測モデルの精度確認（樹種の変化状況）、説明変数等の更新を行い、伐採実施面積や要した費用の実態と合わせ計画更新をする必要がある。

計画更新は概ね5年に1度を想定しており、更新までの期間は、調査時期等を一律としたモニタリングを継続する必要がある。

8. まとめ

今回の取組により、ヤナギ類、ハリエンジュ、タケ類に対して有効な対策を選定し、対策費用を含めた年次計画等を作成することができた。

ヤナギ類の対策は伐木除根であり、6年程度に1度の対策で効果が期待できるが、ハリエンジュ、タケ類に対しては毎年の対策（踏み倒し）を継続する必要がある。

限られた予算の中で対策を継続するため、今後、施工頻度を2年に1回にした場合、踏み倒し回数を変えた場合など、施工方法の違いによる再繁茂状況の変化を把握することで、コスト削減につなげていく。

また、対策効果の検証も継続し、他河川への展開も視野に入れていく予定である。

更に、再繁茂対策と併せて、伐採から処分まで、民間事業者への公募等を活用してさらなるコスト削減を図り、適切な河川管理に努めていきたい。

参考文献

- 1) 崎尾均(編)：ニセアカシアの生態学，文一総合出版，2009
- 2) (独)土木研究所：河道内樹木の萌芽再生抑制方法事例集，土木研究所資料，第4253号，2013
- 3) 平成26年度 第1回愛知目標達成のための侵略的外来種リスト作成会議 参考資料1ハリエンジュに関する情報（案）
- 4) 田屋祐樹，槇島みどり，赤松史一，中西啓，三輪準二，萱場祐一(2013)河道内樹林の効率的な管理に向けた伐採後の萌芽再生抑制方法の検証（河川技術論文集第19巻）
- 5) 槇島みどり，赤松史一，田屋祐樹，中西啓，萱場祐一(2013)萌芽再生抑制方法の適用による河道内の樹木管理費用の低減効果（河川技術論文集第19巻）

和歌山工業高等専門学校と連携した 土砂災害防災学習教材の開発

岐山 雄亮¹・有田 貴洋²

¹和歌山県土砂災害啓発センター（〒649-5302和歌山県東牟婁郡那智勝浦町大字市野々3027-6）

²和歌山県東牟婁振興局農林水産振興部林務課（〒647-8551 和歌山県新宮市緑ヶ丘 2-4-8）

和歌山県土砂災害啓発センターでは、過年度より、国立和歌山工業高等専門学校と共同で、土砂災害に関する研究および防災学習教材作成を行っている。高専の学生とともに取り組むため、災害復旧におけるDX推進や、若年層が興味を持って取り組める防災学習教材の開発など、比較的新しい課題の解決をテーマとして取り組んでいることが特徴である。本発表では、令和5年度に実施した取り組み3件の概要を報告する。

キーワード 土砂災害、防災学習、すごろく、プログラミング、バーチャル現場

1. はじめに

和歌山県土砂災害啓発センター（以下、当センター）は、平成23年紀伊半島大水害により甚大な被害を受けた那智勝浦町に、土砂災害に関する研究および啓発の拠点として設置された施設である。

当センターでは、子ども向けの防災学習を重視している。これは、子どもから家族へ、そして地域の方々へと防災意識が伝達されていくことを意図しているためである。そのため、子どもたちが興味を持って学習できる教材開発は非常に重要な意味を持つ。

そこで、当センターは国立和歌山工業高等専門学校（以下、和高専）と共同で土砂災害に関する防災学習教材を開発してきた。過去には、防災RPG¹⁾ ²⁾ や防災学習砂場³⁾ などを開発し、それらを県内の小中学校での出前授業や防災関連のイベントで活用している。

今回の発表では、令和5年度に当センターと和高専が共同開発した2件の防災学習教材の概要を報告する。

また、防災学習教材の開発ではないが、令和5年度に共同で取り組んだ研究の概要についても併せて報告する。

2. 防災すごろく～土砂災害編～の開発

防災学習はそのテーマ上「堅く」「難しい」というイメージを持たれることが多く、教材としての「敷居の低さ」は重要である。

そのため、誰もが遊んだことのある「すごろく」の形式で土砂災害の知識を学べる教材として「防災すごろく～土砂災害編～（以下：防災すごろく）」を開発した。

(1) 教材の概要

防災すごろくはPC上で遊べるようにMicrosoft Excelを用いて開発した。プログラミングはVBAで行っている。

プレイヤーが行う操作は、基本的にマウスの左クリックのみで完結するため、子どもでも操作がわかりやすい。

この防災すごろくは一度のプレイで1名～4名まで遊ぶことができる。スタートは自宅に設定しており、ゴールは避難所である。「サイコロを振る」ボタンを押すと、画面上でサイコロが振られ、サイコロの目の分だけ自動でプレイヤーが進んでいく。

止まったマスには、マスのコメントとともに「土砂災害に関するクイズ」や「ゲーム」が仕込まれており、それに正解したり勝ったりすることでアイテム（非常持ち出し品）が手に入る。反対に、アクシデントによりアイテムを落とすこともある（図-1）。

すごろくのマスはプレイヤーが進むにつれて「自宅」「がけ崩れ警戒エリア」「土石流警戒エリア」「洪水警戒エリア」「地すべり警戒エリア」「避難所」へと移り変わっていく。そこで起こるイベントや出題されるクイズもそのエリアにちなんだものである。

通常のすごろくは一番早くゴールにたどり着くことを目的とするが、この防災すごろくでは、最終的にクイズの正解（：土砂災害に関する知識）数や持っているアイテム（：非常持ち出し品）数も加味して、最終的な総合順位を決めるようにしている。早く避難することだけに気を取られて知識や物資を軽視してほしくないためである。

また、特定のアイテム（水や携帯電話など）を持っていない場合、避難所エリアにたどり着いた際にトラブル

防災すごろく（土砂災害編）											
21:→ 石につまづい ちゃった。 (アイテムロス)	22:↓ さらにいやな予 感がする。 (クイズ)		27:→ 水かさが増して いる気がする。 (クイズ)	28:↓ 急ごう！		33:→ そうか〜。こうい う場所で「アレ」 が起こるのか〜。	34:↓ 道路に段差がで きている。 (クイズ)	38:→ 親戚のおじさんに連 絡したい。携帯電話 がなければ7マス戻 る。 (アイテム→戻る)	39:↓ 緊張がゆるんで眠く なってきた。毛布が なければ8マス戻 る。 (アイテム→戻る)		
20:↑ いやな予感がす る。 (クイズ)	23:↓ 川が近づいてき た。		26:↑ あ！水たまりに はまっちゃっ た。 (アイテムロス)	29:↓ 水が堤防に激しく 打ち付けられてい る。 (クイズ)		32:↑ 緩い斜面に棚田 が広がっている。 (映像問題)	35:↓ 足をねんざした。 (アイテムロス)	37:↑ 避難所に到着。水を 飲んで一休み。水が なければ6マス戻 る。 (アイテム→戻る)	40:な ご み た ゴ カ ル		
19:↑ あ！この地形。 なんて言ったっ け？ (クイズ)	24:→ ちょっと休憩。 ゲームしよう。 (ゲーム)		25:↑ 大きな川に差し 掛かる。 (クイズ)	30:→ ヤバいよ、ヤバ いよ。	31:→↑ 洪水の浸水危険 区域を抜けた。		36:→↑ 地すべりの危険区 域を抜けた。ゲー ムデモしよう。 (ゲーム)				
18:↑ 谷川に差し掛か る。 (映像問題)											
		14:→↓ もう少しで頂上 だ。	13:→ 山の険しさが気 になる。 (クイズ)		8:↓ 防災無線が鳴り 「避難指示」発 表。 (クイズ)	7:→ おじいさん、おば あさんに連絡す る。 (クイズ)	2:↓ リビングで非常 持ち出し品を見つ ける。 (水をゲット)				
17:↑ がけ崩れの危険 区域を抜けた。 (クイズ)	15:↓ いやな予感がす る。 (クイズ)		12:↑ 足がすべった。 (アイテムロス)		9:↓ 避難場所に迷 う。 (クイズ)	6:↑ 裏山の安全性が 気になる。 (クイズ)	3:↓ ついついゲームを してしまう。 (ゲーム)	1:→↑ スタート			
	16:→↑ あ〜疲れた。 ゲームしよう。 (ゲーム)		11:↑ 山道に入る。 (映像問題)		10:→ 避難しよう。忘 れ物はないか な？	5:↑ 天気予報が気にな る。 (クイズ)	4:→ 雨が強まった。避難準備 だ。もう一つ非常持ち出 しを見付ける。 (懐中電灯をゲット)				

図-1 防災すごろくの盤面

に見舞われ「6マス戻る」などの結果になる。アイテムの重要性を到着順位にも反映するための処置である。

さらに、すごろくの特性として「自分が止まったマスに他のプレイヤーも止まる」ことや、「自分が止まらなかったマスに他のプレイヤーが止まる」ことが多々ある。これにより、同じクイズを復習したり、他のプレイヤーの回答を見て新たな知識を得たりする効果が期待できる。

(2) ふれあい土木展における実践

実践のフィールドとして、国道交通省近畿地方整備局近畿技術事務所で行われた「ふれあい土木展」にて展示させていただき、来場の方々に遊んでいただいた（写真-1）。

小学生から社会人まで幅広い年齢層の方々に楽しそうに遊んでいただけた。中には親子で対戦し、負けた子どもが泣き出すほど白熱した場面もあった。

遊んでいただいた後アンケートを実施し、15の回答を得た。いただいた回答の中で、「楽しかった」「避難中に起こりそうな場面が想定されていて良かった」「単純に進めるだけでなく、ゲットしたアイテムを失ったり特定のアイテムがないと戻されるという要素がいいと思った」など、おおむね好意的な感想をいただいた。一方、「持っていないゲームに影響のないアイテムが複数あったのが少し気になった」「クイズに正解／不正解したときの演出がわかりにくい」「もう少し長いバージョン

があってもよい」など改善点も書いていただいたので、それを反映し改良ができれば、当センターの展示や出前授業等に活用していこうと考えている。



写真-1 ふれあい土木展の様子

3. プログラミング学習を取り入れた土砂災害防災学習の実践

2020年の小学校学習指導要領の改正で、防災学習の必要性が指摘され、「自然災害に関する知識を得ること」などの指導が追記された。また、同時に「プログラミング」に関しても必修化された。

上記2点の改定は小学校の先生にとってなじみの薄い分野である。さらに先生自身が多忙であることも相まって、新しい教材開発は容易ではない。

以上のような状況を踏まえ、プログラミング学習の要素を取り入れて、生徒がゲーム感覚でロボットの動きをコントロールしながら、土砂災害について楽しく学習できる教材を開発し、実践授業を実施した。

なお、本企画は、(株)村田製作所の取り組み「動け！！せんせいロボット」⁴⁾に刺激を受けており、令和5年5月に同所を訪問した際、担当者からアドバイスを受けた。また、独自の技術で低コストの人間ロボットを作成して防災教育を行う企画に賛同していただいた。

(1) 教材の概要

土砂災害の発生するフィールドを設定し、危険を避けるルートを考えて、ロボット役に指示をして避難所（ゴール）へと導くことを目的とする。

学習内容として、防災に関しては、土砂災害に対する知識、有効な対策、そしてそれらを考慮した避難行動に重点を置いた。プログラミングに関しては、行動を分析し組み合わせていくアルゴリズム的思考を意識させることに重点を置いた。

教材は、小学校で使うタブレットまたはPC、教育向けマイコンボードの「micro:bit」、ロボットの頭部、土砂災害の模型とそれを設置したフィールドなどから構成される。ロボットの頭部や土砂災害の模型は段ボール等で作成しており、デジタルー辺倒とならず親しみを持ちやすいよう工夫している。

ロボットの動きを指示する仕組みとして、多くの小学校で導入されているビジュアルプログラミング言語「Scratch」を用いる。ロボットの頭部内には「micro:bit」が設置されており、「Scratch」でプログラミングした指令（進行方向）が信号（矢印）となって「micro:bit」に無線転送される。ロボット役は、その信号を頼りにフィールドを進み、避難所（ゴール）を目指す。（図-2）

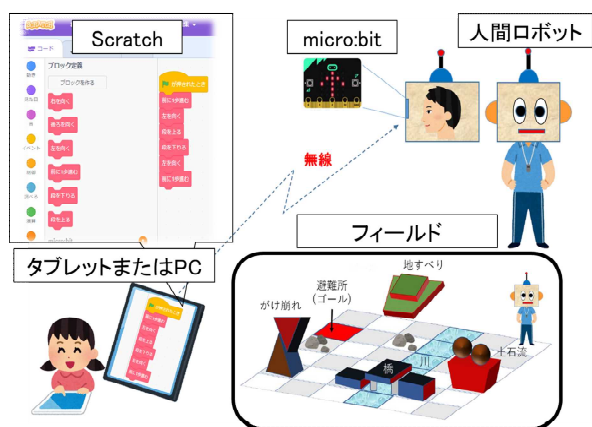


図-2 教材の概要

(2) 小学校における実践授業

実践授業には、那智勝浦町立市野々小学校5、6年生にご協力いただいた。

最初に代表的な土砂災害及びその対策工について講義を行った。

次に、教材の説明や各個人でのプログラミング練習を行った。

最後に、3つの班に分けてそれぞれに土砂災害の対策状況が異なるフィールドを課題として出題し、班ごとに相談してロボットを避難させるようにした（写真-2）。



写真-2 授業の様子

特に授業で工夫した点は下記の通りである。

- ・班ごとに土砂災害の位置・対策工の有無を変更した。これに伴い避難ルートが変わり、フィールドのバリエーションをつくることができる。

- ・土砂災害に児童自らが対策工を実施することで、課題のとなるフィールドが完成するようにした。これにより土砂災害に対応する対策工が何だったか（最初の講義の内容）を復習する効果を狙った。

- ・災害時にパニックにならず行動するには、前もって、順序立てて考えておくことが大切であることを強調した。ゴールするためには20個程度のプログラミングブロックが必要となるが、これを順序立てて組み合わせるには時間がかかる。実際の避難行動はより複雑な選択肢から自分の行動を選ぶ必要があり、その分パニックを起こしやすい。そのため、事前に「どのような行動パターン（プログラミングブロック）があるか」、そして「どのような組み合わせ方（プログラミング方法）があるか」を考えておくことが大切になる。

Scratchを用いたプログラミング実践は避難行動（移動）のみに限定しているが、プログラミング的思考は避難行動全般に通じるものである。実際の避難行動では、

- ①ハザードマップを見て自宅、避難所、ハザードの位置を確認する。また、対策工の有無を確認しておく。
- ②避難ルートを検討する。
- ③避難ルートの安全性を検証する。もし安全であればそ

のルートで避難する。安全でなければ再度ルート検討を行う。

となる。これは授業で用いたフィールドで実践した内容と同じである。普段無意識に行っていることではあるが、手順を分解し、順序立てて物事を考え、条件によってルートの通行可否を考えることなどを含んでおり、プログラミング的思考と避難行動全般の親和性は高いといえる。

授業実施後、児童及び教職員を対象にアンケートを実施した。児童には「楽しく学習できた」と好意的に受け止められた。また、教職員からは、プログラミング要素を取り入れるという視点や、児童が関心を持って取り組めたことに対し好意的な意見をいただいた。一方、「もう少し難度を上げてよかった」「場の設定、準備や片付け等をいかに負担少なくするか」といった指摘をいただき、難易度調整や準備・運営の簡便化が今後の課題といえる。

4. フリーウェアによる土砂災害応急対応バーチャル現場の作成

令和5年度には、防災学習教材開発以外でも共同で研究を実施した。

i-ConstructionやBIM/CIMなどDX技術を用いて建設業界の働き方改革を行おうという動きが活発化している一方、システムの導入費用や専門知識の壁などのため、地方まで普及しきっていないのが現状であり、担当者がその有用性を実感するに至っていない。

そのため、土木におけるDX技術の代表例として取り上げられることも多い「3次元バーチャル現場」を、地方自治体や学生レベルでも「安全・安価・迅速」に実現できないかを試みた。

(1) 3次元バーチャル現場作成の流れ

3次元バーチャル現場作成の流れを下記①～④に示す。基本的な流れは土木研究所地すべりチーム作成の「地すべり災害対応のBIM/CIMモデルに関する技術資料」⁵⁾を参考にしている。

①発災後の崩壊地形をUAV（本研究ではMAVIC AIR2（DJI社）を使用）にて空中写真撮影を行う。

②撮影した写真データから、SFMソフトウェア（本研究ではwebODMを使用）により3次元バーチャル現場を作成する。また、同ソフトより3次元点群データを取得する。

③発災前の同箇所の3次元点群データをオープンソースにより取得する。

④発災前後の3次元点群データをGISソフトウェア（本研究ではQGISを使用）により地図上に展開し、差分から崩壊土量を算出する。

①で用いるMAVIC AIR2は空撮用の入門機という位置づ

けであり、比較的安価な部類である。②で用いるwebODMと③で用いるQGISは無料で利用できるソフトウェアである。地方自治体や学生にとって、①②④で使用する機材・ソフトウェアが高額になることは避けたいので、できる限り費用を抑えた選択となっている。

(2) 災害現場での実践

実践のフィールドとして、和歌山県日高振興局建設部管内にある県道たかの金屋線で発生した災害現場を撮影させていただいた（写真-3）。



写真-3 災害現場

まず、UAV（MAVIC AIR2）により、崩壊後の地形を空撮した。115枚の写真を約30分で撮影できた。機材や飛行アプリのセッティング等を含めても所要時間は約1時間であった。

次に、SFMソフトウェア（webODM）に、現場で撮影した写真データをアップロードし、画像解析を行った。約50分で解析が完了し、3次元バーチャル現場が再現できた（図-3）。このバーチャル現場はPC画面上で拡大、縮小、回転、延長・高さ・表面積などの測定も可能である。また、画像解析後、3次元点群データをテキストデータとして取得できる。

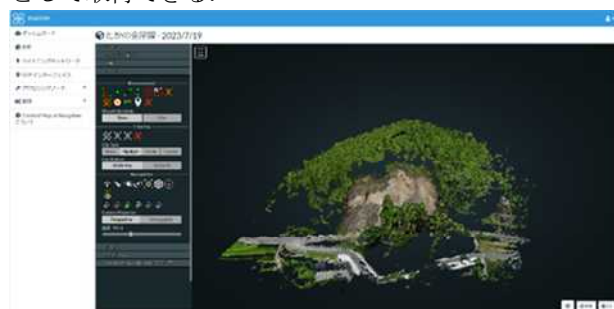


図-3 3次元バーチャル現場

次に、このようにして取得した3次元点群データ（以下「発災後データ」）をGISソフトウェア（QGIS）上でレイヤとして重ねる。QGISの無償プラグインを用いれば、発災後データの断面形状を任意の位置で確認することが可能である。

また、和歌山県HPよりダウンロードした地形図データ（以下、発災前データ）をレイヤとして重ねることで、発災後－発災前の断面図を比較することも可能である（図-4）。

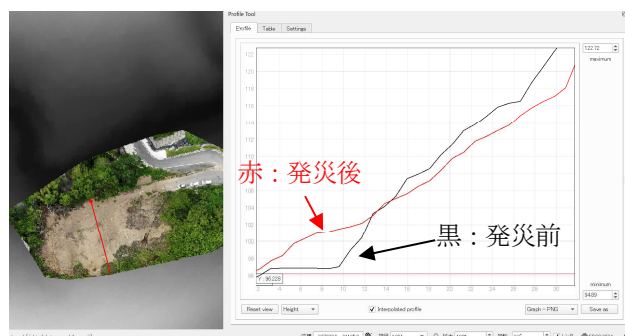


図-4 発災前後の断面比較

さらに、発災後データと発災前データの標高の差分をとり、それを新たなレイヤ（以下：差分レイヤ）とすることで、土砂が崩壊した箇所と堆積した箇所が明確になる（図-5）。この差分レイヤを崩壊箇所と堆積箇所に分類した上でそれぞれを積分することで、崩壊土砂量と堆積土砂量を求めることができた。断面図確認から崩壊土砂量の求積まで、一定の手順に従えば約1時間で実施可能である。



図-5 発災前後の標高差分(土砂の差分)

以上に示した流れは合計約3時間で実現できた。実際にはこれに加えて事務所から災害現場への往復時間を考慮する必要がある。

発災時には現場状況をいかに迅速に把握できるかが求められる。災害報告第一報として必要な情報（例えば、崩壊延長・高さ・面積・崩壊土砂量の概算）は、自らの手持ちの機材とこの程度の手順で得ることができると認

識できることが、自治体等の災害復旧活動の助けになると考えている。

また、現場経験の浅い職員が災害現場を確認して上司に報告する場合、撮影すべき・計測すべきポイントのずれや見落としなどで手戻りが発生することがある。今回の手法であれば、事務所でモニター上の現場を見ながら上司と相談しつつ計測ができるので、OJT用の手法としても効果があると考えている。

5. おわりに

以上、令和5年度に和歌山工業高等専門学校と共同で実施した取り組みを紹介した。地方自治体職員と学生が共同でテーマを持って取り組むことで、異なる視点が得られるなど双方にとってメリットは大きいと考えている。

参考文献

- 1) 岸畑明宏, 坂口隆紀, 筒井和男, 宮崎徳生, 西萩一喜, 辻原治, 木下篤彦: 土砂災害ロールプレイングゲーム「土砂災害が発生したとき」の開発とゲームを用いた防災教育の検証, 第70回令和3年度砂防学会研究発表会概要集, pp. 169~170, 2021.
- 2) 西萩一喜, 辻原治, 坂口隆紀, 岸畑明宏, 筒井和男, 宮崎徳生, 木下篤彦: 土砂災害啓発のためのRPGコンテンツの開発と評価, 砂防学会誌, Vo. 74, No. 4, pp. 48-53, 2021.
- 3) 辻原治, 田中勇摩, 山添成毅, 稲田健二, 筒井和男, 岸畑明宏, 有田貴洋: 学官連携によるAR砂場の構築と土砂災害啓発教育の取り組み, 土木学会第78回年次学術講演会公演概要集, pp. CS1-06_1- CS1-06_2, 2023.
- 4) 株式会社村田製作所: 体験型プログラミング教育「動け!!せんせいロボット」紹介映像, <https://video.murata.com/ja-jp/detail/video/6025379553001>, 2024. 7. 9 閲覧.
- 5) 国立研究開発法人土木研究所土砂管理研究グループ 地すべりチーム: 地すべり災害対応の BIM/CIM モデルに関する技術資料 (土木研究所資料 第 4412 号), 2021.

AIを用いた日吉ダム低水管理支援システムの構築

林 良真¹・今 英樹²

¹独立行政法人 水資源機構 日吉ダム管理所 (〒629-0335 京都府南丹市日吉町中神子ヶ谷68)

²独立行政法人 水資源機構 日吉ダム管理所長代理 (〒629-0335 京都府南丹市日吉町中神子ヶ谷68)

日吉ダムが位置する桂川は、古くからかんがいや舟運観光業などの利用もあり、水道用水の補給とあわせて、日頃からきめ細やかな低水管理が求められる。日吉ダムの低水管理は、利水基準地点が複数あること、ダムから各利水基準地点までの放流の到達時間が幅広いこと、日吉ダム流域以外の残流域の流量変動等の影響を大きく受けることから、放流量の決定には高度な判断が求められ、その能力強化と日々の操作の負担軽減が課題となっている。そのため、低水管理における放流量の決定を支援し、職員の習熟や業務の効率化を図り、更なる有効的な利水補給を実現することを目的として、システムを構築した。本稿は、その内容について、報告するものである。

キーワード 低水管理, AI, 業務改善

1. はじめに

日吉ダムは、淀川水系桂川の中流域に位置する多目的ダムであり、洪水調節、流水の正常な機能の維持及び水道用水の供給（京阪神地域）を目的としている。

日吉ダムの低水管理の運用は、ダム下流の利水基準地点（以下「基準地点」という。）の流量を確保するため、放流位置の異なるダム放流量と新庄発電取水量を決定し放流している。基準地点のうち、新町と嵐山は、各取水堰の位置関係等を考慮し、確保流量地点を設けて流量管理を行っている。基準地点等の位置関係を図-1に示す。

放流量の決定にあたっては、ダム地点から各基準地点までの到達時間（図-1）、既得用水取水量の変動、ダム下流残留域の流量変動や降雨状況等による基準地点の流量変動を予測し、新庄発電所の効率的な運用や舟運などを考慮する必要がある。職員の操作経験と既存の流出予測システムを活用して放流量を決定していた。しかしながら、既存の流出予測システムは、主に高水管理の運用に構築されたものであり、低水管理への運用には、精度上の課題があった。

そのため、日々の低水管理における放流量の決定を支援し、職員の低水管理の習熟と業務の効率化を図り、更なる

有効的な利水補給を実現することを目的として、システムを構築した。

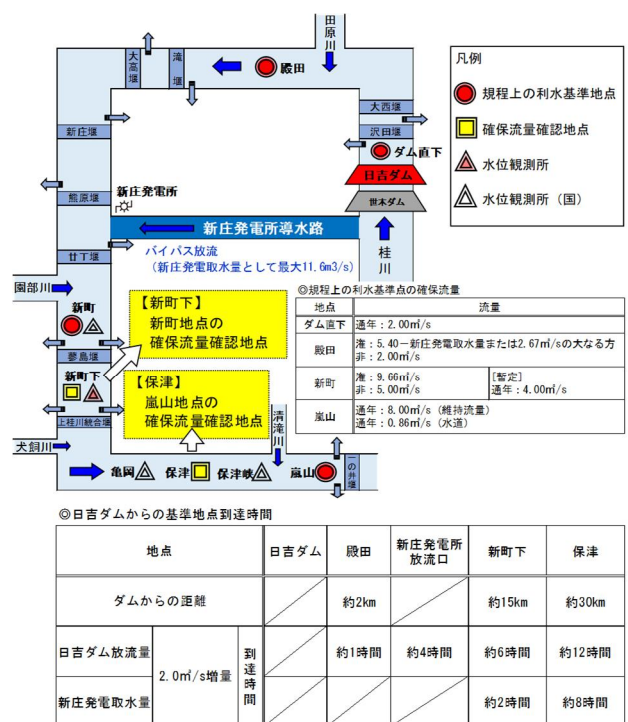


図-1 利水基準地点等の位置図と到達時間

2. システムの構成概要

(1) AI的予測手法の概要

システムは、時系列データなどの連続したデータ解析に特化し、過去の情報を引き継ぐ（記憶する）ことができるRNN（Recurrent Neural Network）を用いて実施した。RNNモデル概要を図-2に示す。

RNNとは、「再帰型ニューラルネットワーク」とも呼ばれ、入力データと出力データとする教師データの組み合わせを隠れ層を介して、その関係性を学習するモデル構造であり、洪水時の流入量予測などの時系列を考慮するタスクに再現性の高いモデルとして用いられている。

(2) システムの概要と計算フロー

日吉ダムの低水管理運用は、ダム下流の基準地点の流量を確保するように放流量（補給量）を決定することから、AI的予測手法を用いたシステムでは、目的変数を基準地点（殿田、新町下、保津）の河川流量、説明変数を低水時の河川流量に大きく影響される雨量、ダム放流量、新庄発電取水水量、支川からの流入量及び取水水量・還元水量とし、現時点から24時間先までの基準地点流量と日吉ダムからの放流量（補給量）を出力するシステムとした。システム概要を図-3に示す。

システムの計算は、日吉ダムの流入量予測と基準地点の流量予測に大別され、それぞれの予測結果を用いて、最適な放流量（補給量）を算出した。システムの計算フローを図-4に示す。

3. 水収支予測の検討

(1) 水収支の算出

日吉ダム下流の水収支を把握するため、取水施設のデータ収集を行ったが、取水口等に観測機器が設置されていない箇所も多く、取水量から水収支を算出することは困難であった。そのため、基準地点間の下流基準地点の河川流量から上流基準地点の河川流量を減じたものは、区間水収支（支川流入量と取水水量・還元水量の総和）として整理した（図-5）。

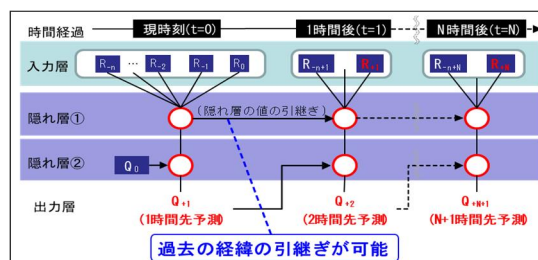


図-2 RNNモデル概要

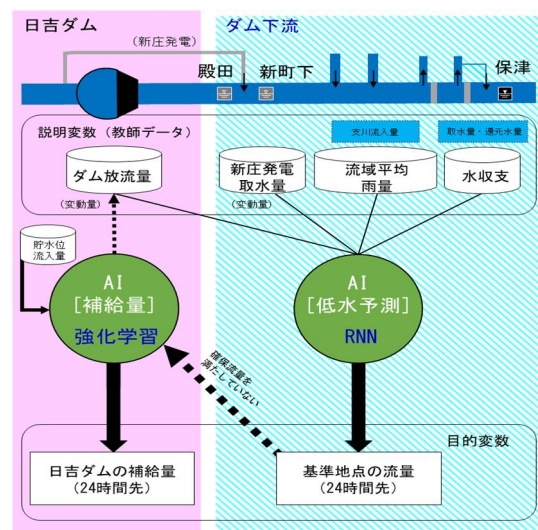


図-3 システム概要

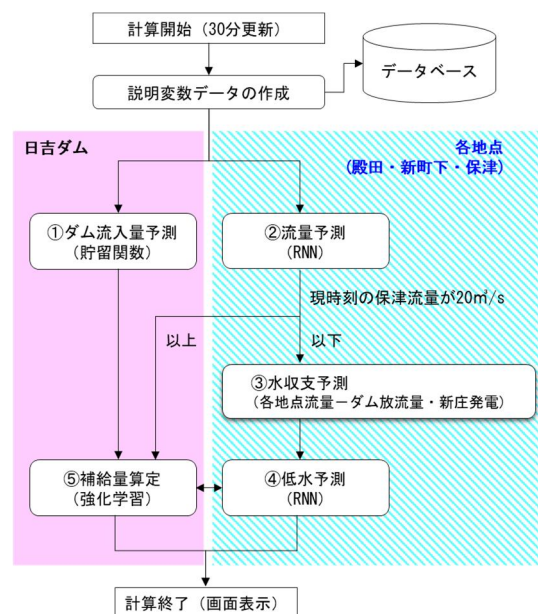


図-4 システムの計算フロー

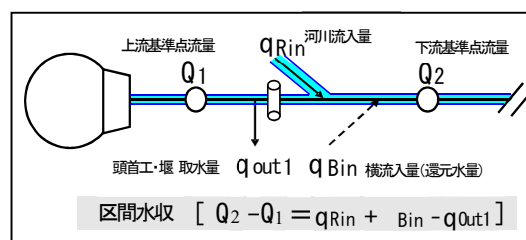


図-5 水収支模式図

(2) 水収支の予測

水収支の予測は、河川流量予測結果と減衰曲線による予測を組み合わせ、基準地点の水収支を予測するものとした。水収支の予測イメージと条件を図-6に示す。

現時刻までの水収支は、現時刻の基準地点の流量からダム放流量と新庄発電取水量を減じたものとして、実績値から算定した。一方、現時刻以降の予測では、降水量がない場合（10mm以下）は、現時刻の水収支を基に減衰曲線を用いて予測した。降水量がある場合（10mm以上）は、減衰曲線を用いると降雨による流出を再現できないため、河川流量予測結果を基に予測した河川流量と到達時間を考慮したダム放流量と新庄発電取水量の流量差を用いて予測するものとした。

4. 低水予測モデルの検討

(1) 説明変数の検討

RNNモデルを用いて、低水管理の基準地点のひとつである保津を目的変数とし、雨量、ダム放流量、新庄発電取水量を基に、水収支を説明変数に追加することで、低水時の河川流量を予測するのに適した説明変数を検討した。

検証期間は2018年の出水以降、下流河川の河道が変化したため、2018年から2021年とし、テスト期間は2021年のかんがい期と非かんがい期で河川流量の少ない期間を選定した。検討した条件を表-1に示し、検討した条件結果を以下に示す。

a) 全期間を対象とした検証結果(Case1)

雨量、ダム放流量及び新庄発電取水量を説明変数とし、全期間（2018年から2021年）を教師データとして計算した。その結果、降雨等による出水期間が含まれているため、常に河川流量が大きくなる予測となった（図-7）。

b) 平常時の期間を対象とした検証結果(Case2)

雨量、ダム放流量及び新庄発電取水量を説明変数とし、Case1の検証結果を踏まえて、降雨による出水の影響が少ないと考えられる平常時を教師データとするため、保津の流量が20m³/s以下の期間を教師データとして計算した。その結果、保津の流量を概ね再現することができたが、ダムからの放流（補給量）を再現できない予測とな

った（図-7）。

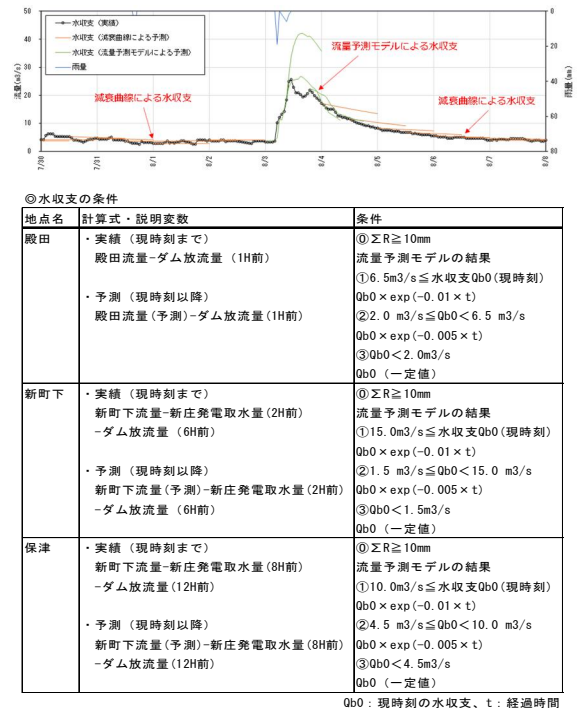


図-6 水収支の予測イメージと条件

表-1 各Caseの計算条件

Case	条件	説明変数	目的変数	備考
1	学習期間（学習：2018年～2020年、テスト：2021年） 雨量 ダム放流量、新庄発電取水量	雨量 ダム放流量、新庄発電取水量	保津流量	
2	学習期間（学習：2018年～2020年、テスト：2021年） ※保津流量20m ³ /s以下を対象 雨量 ダム放流量、新庄発電取水量	雨量 ダム放流量、新庄発電取水量	保津流量	
3	学習期間（学習：2018年～2020年、テスト：2021年） 雨量 ダム放流量、新庄発電取水量 水収支（保津流量-（ダム放流量・新庄発電取水量）） ※保津流量20m ³ /s以下を対象	雨量 ダム放流量、新庄発電取水量 水収支（保津流量-（ダム放流量・新庄発電取水量））	保津流量	採用

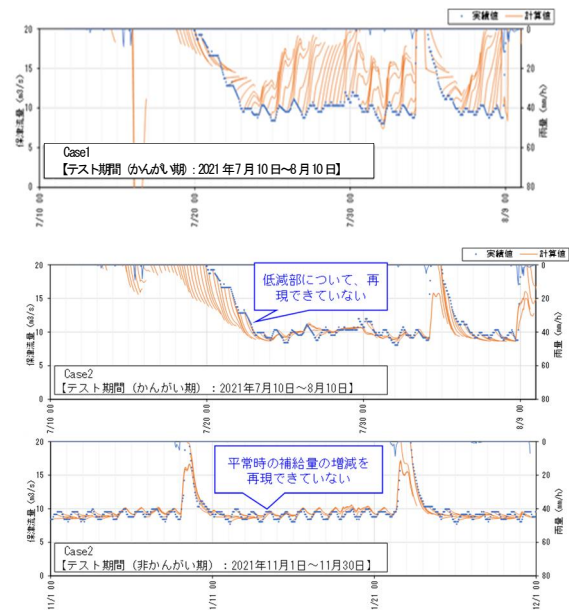


図-7 計算結果（Case1, Case2）

c) 水収支を説明変数に追加した検証結果(Case3)

Case2 の結果を踏まえ、基準地点の流量と到達時間を考慮したダムからの補給量の差は、支川流量や取水量・還元水量の影響による流量の変化（水収支）であり、これを説明変数に追加した。その結果、平常時においてダム補給量の増減や降雨による流量の増加、減少を再現できる予測となった（図-8）。

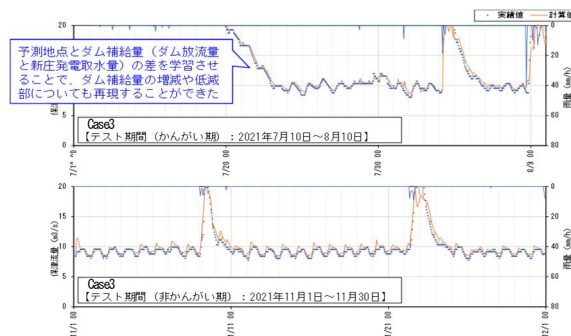
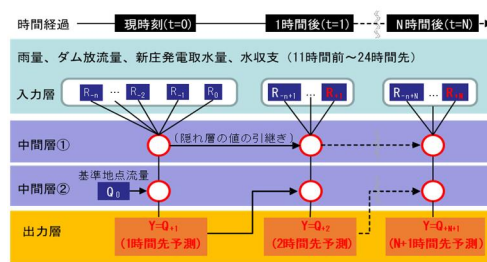


図-8 計算結果 (Case3)

(2) 低水予測モデルの構成

説明変数の検討結果より、降雨の影響が少ないと考えられる平常時の流量である保津の流量が 20m³/s 以下を対象として、基準地点（殿田、新町下、保津）の河川流量を目的変数、雨量、ダム放流量及び新庄発電取水水量に水収支予測モデルを説明変数に追加し、RNN を用いて、低水予測モデルを構築した（図-9）。



◎説明変数と目的変数

項目	設定
学習期間	・2018年～2021年（2018年～2021年で学習、2021年で検証）
説明変数	- 雨量 - 殿田：ダム流域平均雨量、新町下：園部、保津：園部 - ダム放流量 - 新庄発電取水水量 - 水収支 - 殿田：殿田流量-ダム放流量（1H前） - 新町下：新町下流量-ダム放流量（6H前）-新庄発電取水水量（2H前） - 保津：保津流量-ダム放流量（12H前）-新庄発電取水水量（8H前）
目的変数	・基準地点流量（殿田・新町下・保津）

図-9 低水予測モデル概略図と変数(RNN)

(3) 低水予測モデルの精度検証

2021 年を対象として、基準地点を計算した結果（図-10）と、RMSE・MAE を用いて精度評価した結果（表-2）を以下にまとめる。

○基準地点の流量を 24 時間先まで精度良く再現

○確保流量に対する基準地点流量の不足を再現

○降雨による基準地点流量の増大や減衰を再現

以上より、低水予測モデルが基準地点流量を精度よく計算できていることを確認した。

表-2 精度検証結果（保津流量 20m³/s 以下対象）

地点名	評価手法	6時間後	12時間後	18時間後	24時間後
殿田	RMSE	0.83	0.894	1.425	1.417
	MAE	0.199	0.222	0.452	0.489
新町下	RMSE	1.006	1.118	1.543	1.492
	MAE	0.332	0.371	0.601	0.552
保津	RMSE	1.204	1.38	1.918	1.869
	MAE	0.392	0.454	0.795	0.82

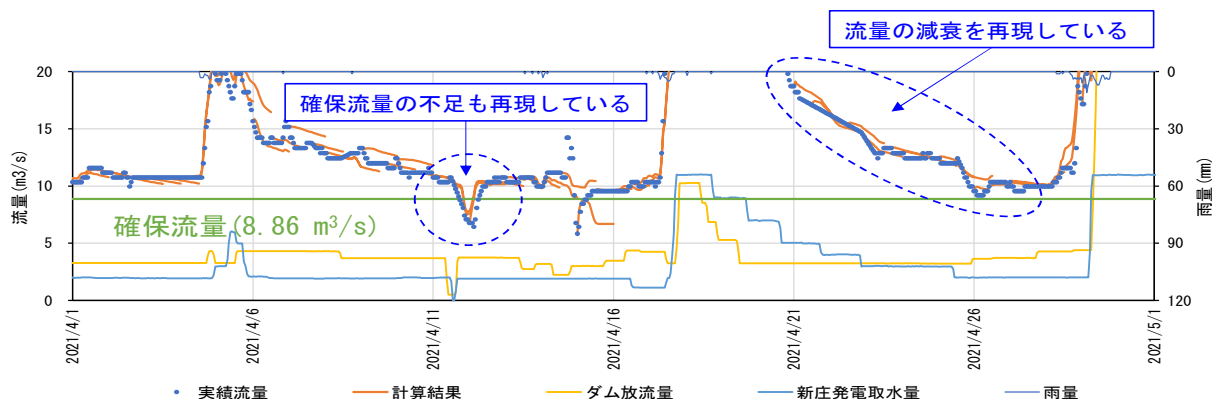


図-10 低水予測結果（保津）

5. 放流量（補給量）算定モデルの検討

これまでの予測を踏まえ、最終的なダムからの放流量を決定するため、放流量（補給量）を算定するモデルを構築した。

算定モデルは、動的計画法を採用し、管理目標（補給量のネックとなる保津地点河川流量や確保流量等）に応じて最適な放流量を算出した。算定例を図-11に示す。その結果、確保流量を満足する放流を行うことができた。しかしながら、放流量は毎時間変更する必要があるため、ダム操作の実状とかけ離れていた。そのため、低水管理時の放流量の変更操作は、ダム操作の実状と合わせて24時間先まで確保流量を常に満たすように放流量を算定した。放流量の算定方法を図-12に示す。

なお、動的計画法は、R. Bellman（1957）によって開発された数理計画法である。多段決定問題に適しており、全体の最適化問題を小さな部分に分割して、それぞれの解を組み合わせ、全体的な最適解を得る手法である。

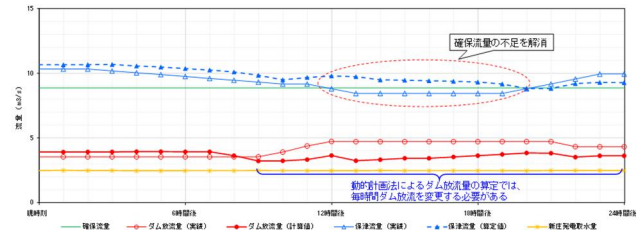


図-11 放流量の算定例

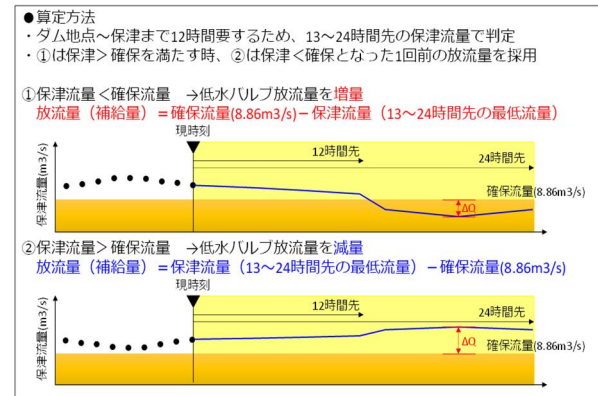


図-12 放流量の算定方法

6. システム画面

システム画面を図-13, 14に示す。ダムからの放流は基準地点に一定時間後に到達するため、到達時間後の結果がわかるように流域図を作成した。

また、到達予測では、AI的手法を用いた最適放流量と現時刻の放流量を継続した場合の継続放流量を切り替えて表示できるように作成した。

さらに、日吉ダムと基準地点（殿田、新町下、保津）を比較できるようにグラフ表示や数値表を作成した。

7. 2023年度のシステム活用

本システムを2023年度（令和5年度）より試行的に運用を導入し、日々の低水管理における職員のダム放流量を決定するための操作支援や利水補給の判断に活用した。

2023年度は9月、10月にかけての小雨傾向により、ダム下流への補給を行ったため、日吉ダムの管理開始以降、最も



図-13 システム画面（流況図）

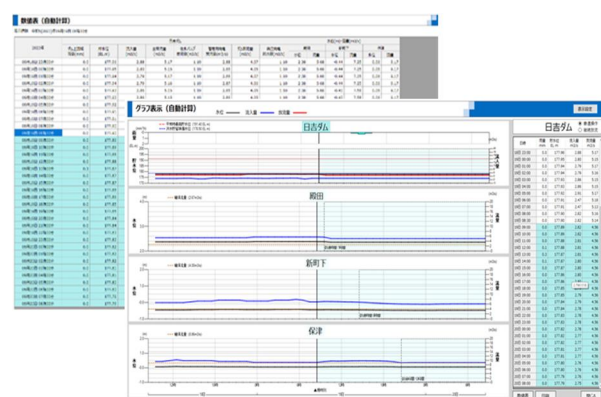


図-14 システム画面（数値表、グラフ）

低い水位まで到達した(図-15)。日吉ダムの貯水量の低下に伴い、11月4日から2月22日までの111日間、水道用水・かんがい用水の取水制限及びダム放流量制限などの渇水調整を行った(図-16)。渇水時についてもシステムを用いて放流量の決定を検討したが、本システムには、学習データに渇水時の流量データが含まれていなかったため、精度に課題があることがわかった。

8. まとめ

AI的予測手法(RNN)を用いて、基準地点の確保流量を満足させるように放流量(補給量)の決定を支援する低水管理支援システムを構築した。

低水予測モデルは、放流量を決定する因子(ダム流入量、河川流量及び水収支等)を明らかにした上で、基準地点流量を再現計算し、職員の操作支援と利水補給の判断に活用することができ、業務の効率化となった。

しかしながら、渇水時の基準地点の流量予測については、学習データに渇水時の流量データが含まれていなかったため、渇水時の予測精度に課題があることがわかった。

今後、渇水時の実績データや予測結果を検証し、更なる効率的な利水補給の実現と桂川の河川利用実態に応じた

システムの実装を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 日吉ダム低水管理支援システム構築業務報告書
(2023年3月)

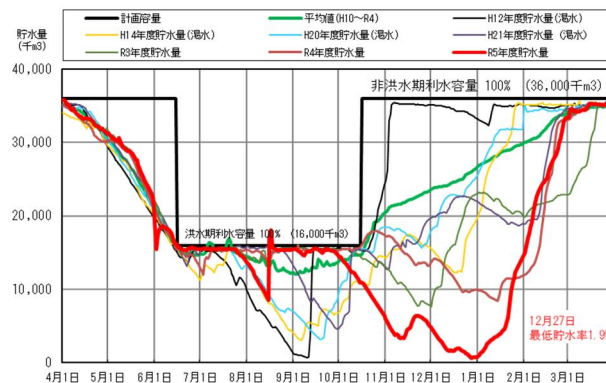


図-15 日吉ダム貯水量

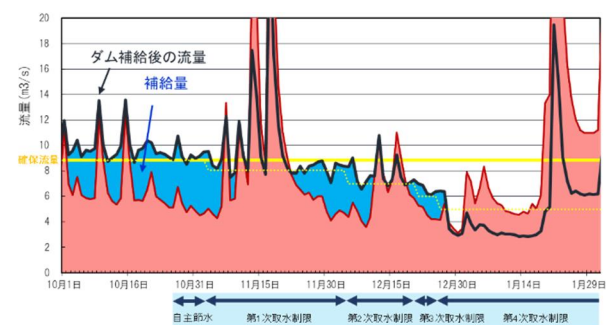


図-16 基準地点(保津)の流量

BIM/CIM導入・運用を支援する チャットボットの役割と展望

日誌 太郎¹・藤原 義教²・西藤 淳³

¹四国地方整備局 四国技術事務所 品質調査課 係長（〒7610121 香川県高松市牟礼町牟礼1545）

²四国地方整備局 四国技術事務所 品質調査課 課長（〒7610121 香川県高松市牟礼町牟礼1545）

³四国地方整備局 四国技術事務所 技術情報管理官（〒7610121 香川県高松市牟礼町牟礼1545）

本論文では、BIM/CIMの実装過程で直面するリテラシー不足や技術の定着困難といった実務レベルの課題に対して、効果的かつ効率的な学習支援システムを提案する。職員向け研修の実施とそのフィードバックを基にしたチャットボットの開発プロセスを詳述し、その特長やクラウド環境での学習手法の構築について論じる。

さらに、チャットボットと講義動画を組み合わせた学習システムや、生成AIの活用による将来的な展望を検討する。これらの取り組みを通じて、BIM/CIM運用のスキル向上と効率化を図り、デジタル化の促進に寄与することを目指す。

キーワード BIM/CIM, チャットボット, 業務改善, 省力化, 生成AI

1. はじめに

建設業界におけるデジタル化の進展に伴い、BIM/CIMの導入が加速している。2023年度より小規模を除く全ての公共工事へのBIM/CIMの原則適用が開始され、その重要性は増している。BIM/CIMは、設計・施工・維持管理の各段階で3次元モデルを活用し、建設プロジェクトの効率化と高度化を実現する手法（図-1）として注目されているが、その実装過程では様々な課題が浮き彫りになっている。

特に顕著な課題として、実務レベルでのリテラシー不足や技術の習得の遅れが挙げられる。多くの職員が概念の理解や業務プロセスの変更に苦慮しており、これがBIM/CIMの効果的な活用を妨げている。この状況を改善し、BIM/CIMの本格的な普及を促進するためには、効果的な学習支援システムの構築が不可欠である。

本研究では、これらの課題に対応するため、チャットボットを活用した学習支援システムを提案する。そして、職員向け研修の実施とそのフィードバックを基に開発したチャットボットを紹介し、その特長やクラウド環境での学習手法の構築について詳述する。さらに、チャットボットと講義動画を組み合わせた総合的な学習システムの構築や、生成AIの活用による将来的な展望についても検討を行った。



図-1 （参考）BIM/CIM原則適用に係る参考資料¹⁾

2. BIM/CIM導入における課題と対策

(1) BIM/CIM導入の課題²⁾

設計・施工・維持管理の各段階において、大幅な効率化や品質向上が期待されるBIM/CIMであるが、その導入には次のような課題が存在する。

a) 技術的な課題（専門知識・技術）

BIM/CIMを使いこなすためには、専用のソフトウェア操作スキルや3次元モデル作成スキルなど、高度な専門知識・技術が必要となる。また、それらに成熟した人材

を育成する観点からも、大きなコストが発生すると言える。

b) 組織的な課題（情報共有の体制）

BIM/CIMモデルを関係者間で共有するためには、情報共有の体制整備が必要となる。

c) 標準化の課題

BIM/CIMモデルを異なる組織間で共有するためには、データの標準化が必要となる。（標準化とは、「もの」や「事柄」の単純化、秩序化、試験・評価方法の統一により、製品やサービスの互換性・品質・性能・安全性の確保、利便性を向上するもの³⁾。）

d) 経済的な課題（導入コスト）

BIM/CIM導入には、ソフトウェアのライセンス料や導入コンサルティング費用など、初期導入コストが高額となる。

(2) 課題の対応策

BIM/CIMを促進するためには、前項で挙げた課題に対してそれぞれ解決策を示し、以下のように解消していく必要があると考える。

a) 「技術的な課題（専門知識・技術）」に対して

BIM/CIMに関する情報にいつでもアクセスできる環境を設けること。基礎知識から実践的なスキルまで、段階的に学習できる場が必要であり、かつ提供する側のリソースも考慮しなければならない。

b) 「組織的な課題（情報共有の体制）」に対して

BIM/CIMモデルを共有するためには、それを取り扱う担当者の知識レベルや技術を底上げし、適切にソフトウェアを取り扱う人材を育成及び確保することが求められる。

c) 「標準化の課題」に対して

BIM/CIMモデルを適切に使用するためには、組織を問わず、横断的にそのモデルを使用できることが条件となる。そのため、標準のモデルとなる形式を定め、それに沿った作成・編集を徹底しなければならない。

d) 「経済的な課題（導入コスト）」に対して

ソフトウェアのライセンス料といった固定費以外について、BIM/CIM全体のコンサルティング費用や導入支援に係るコストは、利用者の習熟度を向上させることで縮減することができる（あるいは不要となる）。

これらの課題解決策は、いずれも「利用者のBIM/CIMに関する習熟度を高めること」が共通しており、職員への体系的な教育環境の提供と継続的な支援が不可欠であることが見て取れる。

3. BIM/CIM研修とアンケートの実施

前章の課題と対策を踏まえ、当事務所では、発注者

（職員）がBIM/CIMを活用した事業に対応し活用意識を高めるために、職員向けの「BIM/CIM発注者技術研修」を実施した（図-2及び3）。

本章では、同研修のアンケート結果から、BIM/CIM導入や習熟に関する課題や不安を抽出し、その分析と改善に向けた考察を行った。



図-2 発注者向け研修の様子

四国地方整備局 企画部 / 四国技術事務所	
令和5年度 BIM/CIM 発注者技術研修	
プログラム	
1日目	
13:00 ~ 13:10	オリエンテーション・開講式 (10分)
13:10 ~ 13:20	BIM/CIM 概論 (10分)
13:20 ~ 13:30	新基準類の解説 (10分)
13:30 ~ 13:40	休憩 (10分)
13:40 ~ 15:30	設計者による BIM/CIM 設計データの作成 (110分)
15:30 ~ 15:40	休憩 (10分)
15:40 ~ 17:00	施工者による ICT データの編集・設計データの編集 (80分)
2日目	
9:00 ~ 9:20	発注者による設計データの確認 (20分)
9:20 ~ 10:00	発注者による納品データの確認 (40分)
10:00 ~ 10:20	最新 ICT ツールの紹介 (20分)
10:20 ~ 10:30	休憩 (10分)
10:30 ~ 11:10	意見交換・質疑応答 (40分)
11:10 ~ 11:30	アンケート (20分)
11:30 ~ 11:40	閉校式 (10分)
11:40 ~ 12:00	最新 ICT ツールの体験 (対面参加者のみ) (20分)

図-3 発注者向け研修のプログラム

(1) アンケート結果の抽出

当事務所にて、2023年度に実施したBIM/CIM発注者技術研修において取得した修了アンケートより、懸念点や不安要素を含む回答を以下のとおり選定した。

・「2次元図面の作成ばかりをやっていたので3次元へのハードルはやや高い。積極的に研修の機会を設けることは大事。」

- ・「まずは発注者がどこまで理解しておく必要があるのか明確にし、職場環境を整えてからだと思う。」
- ・「設計に関して発注者が作成・編集する機会は少ないと感じる。」
- ・「活用目的を明確にするための研修、評価基準をどうすればよいかを知りたい。」
- ・「設計データと施工データの活用が結びつく様な活用事例が体験できるとな良かった。」
- ・「発注者の設計データの確認についてもう少しじっくりと教えて貰いたかった。」

(2) 分析結果と考察

アンケートの回答から、発注者が抱える主な課題として以下の3点が抽出された。

a) 技術的・環境的ギャップ

2次元CADから3次元モデルへの移行に対する技術的な不安が強く見られた。また、職場におけるソフトウェア環境等のインフラ整備の遅れも指摘された。

b) 役割の不明確さ

BIM/CIMを運用する上で、発注者としての役割や求められる理解度の範囲が不明確であることへの懸念が示された。特に、設計データの作成・編集において発注者がどこまで携わるべきかという疑問が挙げられた。

c) 実務での活用方法

設計・施工データの具体的な活用方法や、成果品の評価基準について、明確な指針が求められていることが明らかになった。

これらの考察より、職員のための教育体制の整備と長期的な支援体制の構築は、組織内でのBIM/CIMの使用を促進するための最適解の一つであると考えられる。

そこで当事務所では、それを満足させる手段として、人的リソースを必要とせず、かつ適切な学習・知識習得の場を提供する「チャットボット」に着目した。

4. チャットボットについて

本章では、チャットボットの基本概念と主要な種類について解説する。

(1) チャットボットとは

チャットボットとは、チャット（会話）とボット（ロボット）を組み合わせた言葉で、ユーザーからの質問に自動で返答してくれるプログラム（自動会話プログラム）のことを指す。主にテキストベースでやり取りを行い、一般的には問い合わせに対する回答や情報提供を行う用途で使用される。

(2) チャットボットの種類

チャットボットは、その機能や目的に応じて様々な種類に分類される。本項では、主要な3種類のチャットボットについて、その特徴を解説する。

a) FAQ型チャットボット

FAQ型チャットボットは、事前に用意された質問と回答のデータベースを基に、ユーザーの問い合わせに対して適切な回答を提供するシステムである。定型的な質問に対して迅速かつ正確な回答が可能であり、回答の品質が一定で誤情報のリスクが低いという特徴がある。

なお、本チャットボットはこのFAQ型チャットボットに該当し、誤情報を与えないリスク回避や出典元の厳選などについても後述する。

b) 生成AI型チャットボット

生成AI型チャットボットは、機械学習や自然言語処理技術を用いて、ユーザーの入力に対して新しい文章を生成し、柔軟な対話を行うシステムである。多様な質問や状況に対して柔軟な応答が可能であり、人間らしい自然な会話を実現する。また、継続的な学習により時間とともに性能が向上する一方で、誤情報や不適切な回答のリスクがあることも特徴である。

c) 処理代行型チャットボット

処理代行型チャットボットは、ユーザーの要求に応じて特定のタスクや処理を実行するシステムである。単なる情報提供にとどまらず、実際のアクションを起こすことができる点が特徴である。特定の業務やサービスに特化した機能を提供し、ユーザーの要求に基づいて実際の処理を実行する。

5. BIM/CIM活用支援チャットボットの導入

(1) 導入とクラウド環境

当事務所では、BIM/CIMの活用を支援する手段として、チャットボットの検討・導入を行った。FAQの選定及び精査やテスト運用を経て、「BIM/CIM活用支援チャットボット（以下、本システムという。）」を組織全体へリリース、その後は蓄積された入力データをもとに更なる改良や精度向上に取り組んでいる。

また本システムは、クラウド環境（職員専用のMicrosoft Teams）を活用して構築されており、高い利便性とセキュリティを両立している。職員は日常的に使用しているTeams内で利用できるため、新たなツールの導入や別システムへのログインが不要となる。

セキュリティの観点からも、組織内限定のTeams環境に配置したことで、外部からの利用を制限し、組織内の機密情報や個人情報を保護している利点がある。また、Teamsの既存の認証システムを利用することで、追加的

なセキュリティ対策を講じることなく、高度なユーザー認証を実現している。

(2) 質問と回答の内容について

FAQの作成にあたっては、まず情報収集の方針を確立した。第一段階として、BIM/CIMポータルサイトの既存FAQ事例を調査し、関連する行政機関や団体のリンク先に掲載されている情報を確認した。次に、インターネット上の情報を効率的に収集するため、「BIM/CIM FAQ」「BIM/CIM 用語集」などのキーワードを設定し、体系的な検索を実施した。さらに、実務における具体的な疑問点を把握するため、立場や理解度の異なる担当者によるブレインストーミングを実施し、現場のニーズを反映した質問の収集を行った。

収集した情報は、その特性を明確にするため、三つの観点から整理を行った。まず、発注者と受注者という立場の違いに着目した分類を行い、それぞれの視点における特徴的な疑問点を整理した。次に、技術者のBIM/CIM理解度による分類を実施し、初級者と上・中級者それぞれに適した情報の分け分けを行った。さらに、質問内容を用語に関するものとそれ以外に分類することで、基礎知識と応用的な内容の整理を行った。

分析の結果、特筆すべき三つの特徴が明らかになった。第一に、FAQ全体の8割以上が発注者・受注者に共通する質問であり、BIM/CIMに関する基本的な疑問点は立場によらず共通していることが判明した。

第二に、全体の9割以上が初級者向けの質問として分類され、基礎的な知識の体系的な提供が重要であることが示された。

第三に、用語に関する質問は全体の3割程度を占め、これらは全て発注者・受注者に共通する基礎的な内容であることが確認された。

作成したFAQの品質を確保するため、全ての回答内容について照査を実施した。また、回答の作成にあたっては、国土交通省が発行する「BIM/CIM原則適用Q&A」や「BIM/CIM活用ガイドライン」など、表-1に示す8種類の文書を参考とし、実務での活用に即した正確な情報提供を心がけた。

表-1 チャットボットに登録したQ&Aの出典元一覧

名称	作成
3次元モデル成果物作成要領（案）（R4.3）	国土交通省
BIM/CIMモデル等電子納品要領（案）及び同解説（R4.3）	国土交通省
BIM/CIM活用ガイドライン（案）第1編 共通編（R4.3）	国土交通省
BIM/CIM原則適用Q&A（R5.4）	国土交通省
第10回BIM/CIM推進委員会 資料（R5.8）	国土交通省
発注者におけるBIM/CIM実施要領（案）（R4.3）	国土交通省
令和5年度 BIM/CIM発注者技術研修テキスト（R6.1）	四国地方整備局
BIM/CIM問い合わせ窓口へ寄せられたQ&A（R5.10）	JACIC研究開発部

(3) チャットボットの機能と使用方法

今回導入した本システムは、BIM/CIM実装における実

務レベルの課題に対応するため、直感的かつ効率的に回答に辿り着ける設計となっており、「複数階層からなる選択肢から選択する方法」と「自由入力欄への入力」の2つの主要な対話方式を採用している（図-4）。

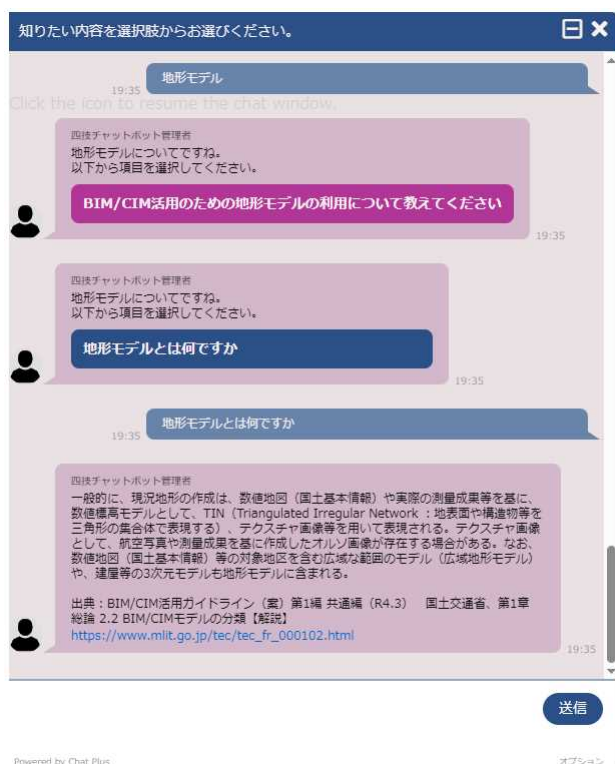


図-4 導入したBIM/CIM活用支援チャットボット

a) 選択肢方式

基本の対話方式は選択肢方式である。この方式では、ユーザーは複数階層から構成される選択肢を順次クリックしていくことで、求める情報に到達することができる。この階層構造は、BIM/CIMに関する270個のFAQを効率的に整理し、ユーザーが段階的に情報を絞り込めるようにしている。この方式の利点は、ユーザーが具体的な質問を言語化する必要がなく、提示された選択肢を辿るだけで必要な情報にアクセスできる点にある。

b) 自由入力方式

補完的な対話方式として、自由入力欄を設けている。この機能により、ユーザーは知りたい事柄を単語ベースで直接入力することができる。システムは入力された単語に関連する質問の候補を複数表示し、ユーザーはその中から最も適切なものを選択することで、対応する回答を得ることができる。この方式は、特定のテーマや用語に関する情報を素早く検索したい場合に特に有効である。

これら2つの対話方式を組み合わせることで、本システムは幅広いニーズに対応し、BIM/CIM関連の知識や情報への到達のしやすさ（アクセシビリティ）を大幅に向上させている。選択肢方式は初心者や体系的な学習を望むユーザーに適しており、一方で自由入力方式は特定の

疑問や問題に迅速に回答を得たいユーザーに適している。このように、ユーザーの習熟度や学習の目的に応じて柔軟に対応できる設計となっている。

(4) チャットボット導入後の活用状況と課題

本システムの運用開始から現在までの状況について、その成果と課題を報告する。

a) 利用状況

運用開始後、約100名（全技術系職員の約12%）の職員が本システムに登録している。また、本システムの活用促進を目的としたオンライン勉強会を開催し、約50名の参加があった（図-5）。これらの数値は、当初想定していた普及率には及ばないものの、BIM/CIMに関心を持つ職員の基盤として捉えることができる。

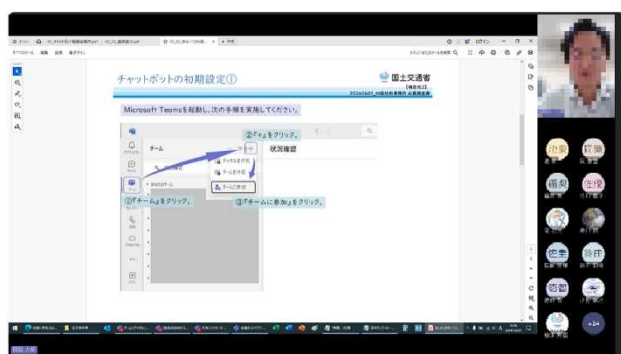


図-5 オンライン勉強会の様子

b) 現状の課題

本システムの導入から一定期間が経過したものの、当初の想定を下回る利用者数に留まっている。この背景には、本システムの存在自体が職員間で十分に認知されていないという根本的な問題がある。

c) 課題の対応策

利用を促進する取り組みとして、定期的なオンライン勉強会を実施するとともに、職員の理解を深めるため、既存の研修プログラムに本システムを活用する実習時間を組み込んだ。併せて、日々の業務で実際にシステムを使用する職員からのフィードバックを積極的に集め、それらの声を機能改善に反映させることで、より多くの職員が利用しやすい環境づくりを進めている。

6. 今後の展望

(1) e-Learningとの融合

BIM/CIM学習支援の新たなアプローチとして、映像教材とチャットボットを一体化した学習システム（図-6）を提案する。この学習システムは、従来の受動的な映像学習に対話型の要素を組み込むことで、学習効果の向上

を目指すものである。

a) 映像教材一体型チャットボットの特長

システムの主な特徴は、映像教材の字幕（テロップ）内のキーワードをクリック可能にし、選択された用語についてチャットボットが即座に詳細な説明を提供する点にある。この仕組みにより、学習者は「受動的な映像視聴」から「能動的な対話型学習」へと移行することが可能となる。また、学習の流れを中断することなく疑問点をリアルタイムで解決できるため、効率的な学習を実現し得る。



図-6 （参考画像）映像教材との連携イメージ

b) 映像教材一体型チャットボット導入に係る課題

一方で、システムを実現するためには、映像教材とチャットボットを連携させる仕組みづくりやe-Learningの教材として効果的な映像制作の専門的な技術や労力が求められる。併せて、映像教材の制作者とチャットボット開発者の連携が必要である点も課題として挙げられるだろう。

c) 課題の対応策

既存のe-Learning教材を段階的に移行し、各段階での動作確認や効果検証を行いつつ、慎重に展開することが有効である。プロトタイプ（叩き台）を作成しながら、映像作成とチャットボット整備を両立させ、横断的に開発することが重要であると考える。

(2) 生成AIの組み込み

a) 現行のチャットボットと生成AIについて

本システムには生成AIが組み込まれておらず、分析やFAQの追加・修正はすべて手作業で行わなければならない。また、一問一答形式となっているため、質問と回答の組み合わせに柔軟性を持たせられないという課題も抱えている。

生成AIは、膨大なテキストデータに基づいて、複雑な質問や指示を理解し回答を生成することができるため、従来のチャットボットでは対応が難しかった曖昧な質問や、複数のステップにわたる指示にも対応できるようになる。そうすることで、利用者の理解度や興味・関心に合わせた回答を生成することができ、より効果的な学習支援や情報提供が可能になる。また、回答が自動で生成されるため、手作業が発生する頻度を抑えることができ

る点もメリットである。

b) 生成AI導入に係る課題

一方、生成AIを使用するにあたり、以下の2点が重要な課題として挙げられる。

第一に、インターネットを介した生成AIの利用は、セキュリティ上のリスクを帯びている。特に、組織内の機密情報が外部に漏洩するリスクがあり、機密性の高いプロジェクトの情報や技術データの保護は極めて重要であると考えられる。

第二に、一般的な生成AIは、インターネット上から広範な情報を収集して回答を生成している。これは、膨大な情報源を活用できる反面、誤った情報を含む回答を生成する可能性がある。

c) 課題の対応策

前節で挙げた課題に対処するため、本研究では以下の対策を提案する。

まず、生成AIをイントラネット上の閉鎖的なサーバーに導入する。これにより、外部ネットワークとの接続を物理的に遮断し、情報漏洩のリスクを大幅に低減する。クローズドな環境での運用は、組織のセキュリティポリシーを厳格に遵守しつつ、生成AIの機能を活用することが可能となる。

次に、生成AIの情報源を厳密に制限する。具体的には、管理者が事前に選別し承認した文書ファイルのみをAIの学習データとして使用する。これにより、生成AIは与えられた文書の内容のみに基づいて回答を生成するため、BIM/CIMに関する正確で信頼性の高い情報提供が可能となる。外部の不確かな情報源を排除することで、チャットボットの回答品質を一定以上に保ち、誤情報の混入を防ぐことができると考えている。

7. おわりに

建設業界のデジタル変革が加速する中、BIM/CIMの本格的な導入は、もはや選択肢ではなく必須の課題となっている。しかし、その実装過程における最大の障壁は、

技術そのものではなく、それを使いこなす人材の育成にあることが、本研究を通じて明確となった。

本論文で紹介したBIM/CIM活用支援チャットボットは、従来の研修や教材による一方的な学習を超え、職員が必要な時に必要な知識にアクセスできる、新しい学習環境を提供している。この「学びやすさ」は、技術の受容と定着において極めて重要な要素である。

特に注目すべきは、本システムが単なる知識提供の手段を超えて、組織全体のデジタルリテラシー向上の基盤としての可能性を秘めている点である。今後、e-Learningとの融合や生成AI技術の活用により、より高度で柔軟な学習支援が実現可能となる。また、今回はBIM/CIMの学習を支援するツールとしてチャットボットを導入したが、システムの汎用性が高いことから、別の分野や他の学習手法など、新たな場面での活用も期待できるだろう。

最後に強調すべきは、BIM/CIMの導入における最大の課題が、システム基盤の構築と人材育成の両立にあるという点である。本研究で提案したチャットボットによる学習支援システムは、その一つの解決策であり、今後のデジタル時代における人材育成の新たなモデルケースとなることを期待している。

参考文献等

- 1) 国土交通省：BIM/CIMポータルサイト - BIM/CIM関連基準要領等（令和5年3月） - BIM/CIM原則適用に係る参考資料
(https://www.mlit.go.jp/tec/tec_fr_000115.html)
- 2) 国土交通省：BIM/CIMポータルサイト - 第1章 建設分野の課題とBIM/CIM
(<https://www.nilim.go.jp/lab/qbg/bimcim/bimcimtraining.html>)
- 3) 経済産業省：標準化・認証
(<https://www.meti.go.jp/policy/economy/hyokun-ki-jun/>)

山間部で DX 推進！

～砂防施設点検における長時間ドローン等の活用～

安田 真翔¹

¹国土交通省中部地方整備局 越美山系砂防事務所 工務課技官

近年、砂防施設点検において、ドローンの活用検討が進むものの、安価で一般的に流通しているドローン(以下「汎用機」という)は滞空時間が短く、十分な情報収集ができない場合がある。また、衝突回避センサー等により、目的物への接近・撮影が困難な場合がある。更に、汎用機に搭載されるカメラでは、遠くから施設の状況を確認できない場合もある。よって、点検が困難な事象に対応できる機能特化した機体「長時間飛行が可能な機体、近接撮影が可能な機体、望遠レンズを搭載した機体」を用いた砂防施設点検の実証実験を行い、今後の効率的な点検に資することを目的とする。

キーワード 作業効率化, ドローン, 安全性向上, 実証実験, 砂防施設点検

働き方を変革し、安全・安心で豊かな生活を実現すべくインフラ分野のDXを推進している。

1. はじめに

中部地方整備局越美山系砂防事務所の直轄砂防事業は、岐阜県本巣市の山間部および揖斐川町のほぼ全域で行っている(図-1)。事業区域には、標高約1,600mの能郷白山や1,300m級の冠山などの山地が連なる越美山地がある。ここでは、雨や雪が多く年間降水量は、3,000mmを超える年があり、地質は脆弱で土砂流出が多いことで知られている。

事業区域には約200基の砂防施設があり、機能・性能を的確に把握するため、定期点検を実施している。

定期点検は、施設の変状(漏水・湧水・洗掘・亀裂・破損等)および堆砂などの施設に直接影響を与える周辺状況の確認を行っている。

出水や地震後等には、施設の損傷や周辺状況の変化を確認する臨時点検を行っている。

砂防施設は、急峻な山地部に整備されているため、定期点検は徒歩により、4班×2人体制で約2ヶ月もの期間をかけて実施している。点検時には、危険生物(熊、蛇、蜂等)への準備・措置や斜面にロープを張る等のルート確保が必要となる。

このように点検は、徒歩移動に多大な時間を要することや、点検員の高齢化や担い手不足等が課題となっている。

また、危険生物や高所の移動、土砂発生後等の臨時点検時の二次災害のリスクなどがある。

国土交通省では、インフラ分野において蓄積データとICT技術を活用して社会資本や公共サービスを変革するとともに建設業や国土交通省の文化・風土や



図-1 事業区域位置図

2. 砂防施設点検におけるドローンの活用

現在、砂防関係施設の点検と健全度評価は、「砂防関係施設点検要領(案): 令和4年3月国土交通省砂防部保全課」に基づいて行われている。

この点検要領(案)には、ドローンを活用することで、効率的・効果的な施設点検を推進するため、定期点検等の基本的な方法として、目視による方法に加え、ドローンによる方法(UAV点検)についても同等に活用していくことが示されている。(図-2)

砂防施設点検でドローンを活用することによって、移動や点検に伴う危険性(高所、危険生物、災害発生箇所)が低減され、安全性向上が期待できる。加えて、

広域災害時の短時間での被災状況調査、各種センサー（レーザ計測、赤外線等）での計測・解析等による作業効率化等が期待できる。

当事務所では、汎用機を活用し、施設点検に着手した。ドローンの活用により、点検に要する移動時間・作業時間の削減、斜面や高所（施設天端）の移動などに伴う危険性が低減した。



図－2 砂防施設の点検状況

汎用機での点検は、飛行時間が短く、複数の施設を点検することが難しい。また、衝突回避センサー等により、目的物への接近・撮影が困難な場合があり、施設の変状を目視と同等の精度で確認できない場合がある。

実証実験では、汎用機の飛行時間が15分～40分程度であるのに対し、小型発電機により常時給電することで3時間以上の飛行が可能な「長時間飛行ドローン」、施設との距離5m未満に近接し撮影が可能な「近接撮影ドローン」、数百m先の施設を望遠ズームで撮影可能な「望遠撮影ドローン」を使用し、点検を行った。（図－3）

長時間飛行ドローン	
主な特徴	国産機、ハイブリッド式（1.クスターンによるバッテリー供給給電）
重量	8.8kg（バッテリー、燃料含まず）
最大搭載可能重量	3kg（燃料除く）
機体寸法	900×900×450 mm
通信方法	無線およびLTE
最大飛行時間	最長3時間
カメラ	使用するカメラの仕様等 1/2.8インチCMOS、画素数4,656×3,496
近接撮影ドローン	
主な特徴	Visual SLAM機能を搭載し、衝突回避能力に特化（作動距離を短く設定）
重量	775g
機体寸法	223mm×273mm×74mm
通信方法	無線
最大飛行時間	23分
カメラ	1/2.3インチCMOS、画素数4,056×3,040
望遠撮影ドローン	
主な特徴	交換式の一眼カメラやレーザスキャナなど、様々なセンサーを搭載可能。
重量	6.3kg（バッテリー含まず）
最大搭載可能重量	2.7kg
機体寸法	810×670×430mm
通信方法	無線
最大飛行時間	55分
カメラ	1/1.7インチCMOS、画素数5,184×3,888、焦点距離31.7～556.2 mm（35mm換算 約20倍）

図－3 使用した機体¹⁾

3. 実証実験の概要

「長時間飛行ドローンによる点検」は、これまで徒歩及び船移動により点検に丸1日を要していた、徳山白谷の砂防施設を対象とした。

表－1に示す条件を踏まえ、徳山ダム管理所から離陸し、5 km上流に整備された2基の砂防施設を目

視外飛行（レベル3相当、補助者付）により撮影・点検を行った。

「近接撮影・望遠撮影ドローンによる点検」は、汎用機では確認が難しい細かい施設の変状があり、直線的な河道に施設が連続して整備されているナンノ谷の砂防施設を対象とした。（図－4）

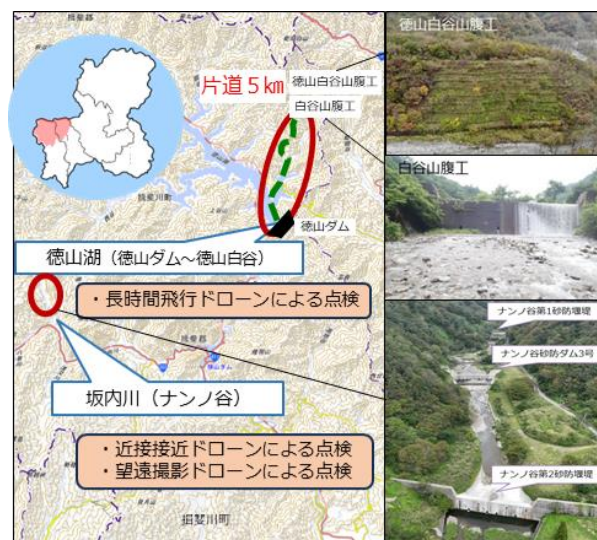
実験にあたっては、表-2に示す、関係機関の協力を得て実施した。実証実験の視察会場は徳山ダム管理所とし、各実証実験現場と視察会場、視聴応募のあったWEB会議視聴者とWEB会議システムで接続して、実験状況の配信を行った。

なお、実験を行った徳山白谷、ナンノ谷の飛行ルートはいずれの区域もモバイルデータ通信等の利用ができない環境であったため、衛星コンステレーションのインターネットを活用し、現地からリアルタイム配信を行った。（図-5）

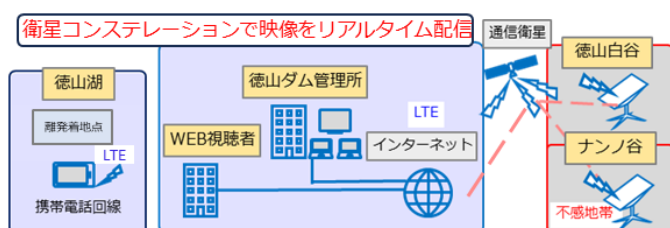
視察者は、約380名（来場者数約80名、Web 視聴者300名）であった。

表－1 飛行場所の条件（レベル3飛行、補助者付）

- 関係者以外立ち入り禁止区域にできること
「離発着：徳山ダム管理所、飛行ルート：湖上、徳山ダム、山林公有地化事業実施済の区域」
- 汎用機では飛行困難な長時間・長距離飛行の航行ができること
飛行時間：約2時間、飛行距離：往復10km
- 飛行ルート近傍に、建物、宅地、車や人の往来のある道路が無いこと
（橋梁近傍通過の際は、橋梁上空を避け、陸側のトンネル上空を飛行）
- 管理者の了承が得られたこと



図－4 砂防施設位置図(地理院地図に加筆)



図－5 衛星コンステレーションを活用した通信イメージ

表－2 開催概要（協力機関含む）

日時：2023年10月31日(火) 10:00～11:00
場所：徳山ダム管理所（岐阜県揖斐郡揖斐川町開田）
協力：岐阜県、本巣市、揖斐川町、（独）水資源機構 徳山ダム管理所、岐阜大学工学部附属インフラマネジメント技術研究センター、（一社）岐阜県建設業協会、（一社）日本建設機械施工協会中部支部（一社）、岐阜県建設コンサルタンツ協会、（一社）揖斐建設業協会、（一社）中部地域づくり協会、（一社）岐阜県測量設計業協会、砂防工事安全技術協議会他
取材機関：NHK岐阜、岐阜放送、大垣ケーブルテレビ、中日新聞
参加人数：約380人（実証実験会場 約80人 Web視聴 約300人）

4. 実証実験の結果

（1）長時間飛行ドローンによる点検

実験は、従来の人力による施設点検で、徒歩及び船移動により点検に丸1日を要していた「徳山白谷山腹工」、「白谷山腹工」（図-4, 6）を対象に、「長時間飛行ドローン」による目視外飛行（レベル3相当、補助者付）で施設を俯瞰的に確認し、点検時間を短縮することを目的に行った。

実験の結果、長時間飛行約2時間（燃料の残量より、カメラ搭載で約2.5時間の飛行が可能であったことを確認）、自律・長距離飛行（往復10km以上）、目視外飛行（レベル3相当、補助者付）による点検を行い、施設の状態を俯瞰的に確認することができた。（図-7, 8）

また、衛星コンステレーションを活用することで、モバイルデータ通信等の不感地帯における砂防施設の映像をライブ配信し、WEB 会議システム上で施設の状態を確認することができた。

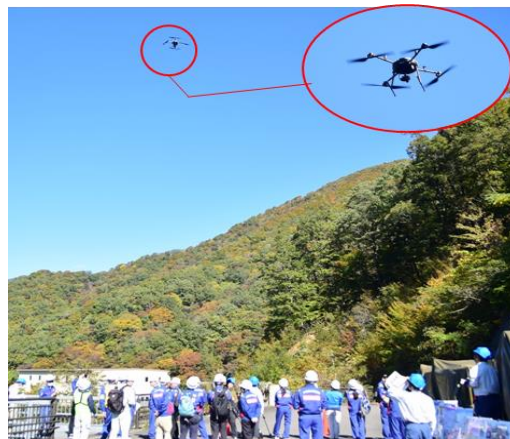
徳山白谷内の徒歩移動がなく、悪路移動や熊などによる点検員の怪我のリスク回避につながることを確認できた。



図－6 長時間飛行ドローン飛行ルート



図－7 5 km離れた徳山白谷配信映像



図－8 長時間ドローン飛行状況

今回は機体を監視する補助者付の条件で飛行を行ったが、補助者無しによる目視外飛行が可能となれば、さらなる作業の効率化と点検作業の安全性の向上等が期待できる。

（2）近接撮影ドローンによる点検

砂防堰堤の摩耗、ひび割れ等の点検では、施設に近づいて確認することが必要であるが、汎用機では、障害物センサーの作動により接近することができず、それらを確認することができない。

施設との距離5m未満に近接し撮影が可能な「近接撮影ドローン」を使用し、目視点検と同等の点検を行うことを目的に実証実験を行った。

実験の結果、衝突回避センサーを5m未満に設定することで、施設に最大80cm接近し、目視点検が危険な部位に対し、目視と同等のレベルで摩耗、ひび割れを確認することができた。（図-9）

近接撮影に特化したドローンを使用することで、汎用機よりも近接し、人力点検と同等の精度で細かい変状を把握できることを確認した。施設天端などの高所を点検員が移動する必要がないため、点検員の安全が確保できることに加え、堰堤水通し直下などの人力による確認が困難な部位も、目視と同等の精度で点検できることを確認した。近接撮影は、撮影に時間を要するため、必要な箇所に対して、スポット的に適用することが効果的である。

今後は汎用機と近接撮影に特化したドローンの組み合わせにより、効率性を確保しつつ、人力点検と同等の精度で、かつ安全に点検を実施することが可能となると思われる。



図－9 近接撮影ドローン飛行状況

(3) 望遠撮影ドローンによる点検

豪雨、地震直後の臨時点検では、アクセス路の寸断等により、施設近傍まで近づけない場合がある。数百m先の施設を望遠ズームで撮影可能な「望遠撮影ドローン」を使用し、俯瞰的に施設点検を行うことを目的に実験を行った。

実験は、操縦地点のナンノ谷第2砂防堰堤から、350m上流のナンノ谷砂防ダム3号、600m上流のナンノ谷第1砂防堰堤の3基を対地高度100mから、上流の施設を光学20倍ズームで撮影・点検した。

実験の結果、350m、600m先の施設状況や堆砂状況を望遠ズームで俯瞰的に確認することができた。

実験では、カメラを交換可能なドローンで望遠撮影することで、600m先の砂防施設の状況を確認することができた。(図-10) これにより、アクセス路寸断により施設近傍まで近づけない場合においても、施設概査を安全に実施することが可能になることを確認した。

しかし、機体が大型(810×670×430mm)であるため、豪雨や地震の規模が大きい場合のみ現地へ携行するなど、運用面での工夫が必要となる。今回の実証実験の結果は、施設点検の他に溪流点検(山腹崩壊、河道の土砂移動)にも適用可能であることから、汎用機と望遠に特化したドローンの組み合わせにより、施設点検および溪流点検の効率化ができると思われる。



図-10 望遠撮影ドローン撮影映像

5. インフラ分野における今後のドローンの活用

(1) 砂防施設点検での活用

越美山系砂防事務所では、ドローンによる点検で、アクセス時間・作業時間の短縮、作業の安全性向上、省人、省力化を図り、現在の定期点検期間約2ヵ月を約1週間に短縮することを目的としている。(図-11)

ドローンによる施設点検においては、航空法等の関係法令を遵守してドローンを飛行させる必要がある。現状の航空法に基づくレベル3飛行にあたっては、機体を監視する補助員を付けて実施する必要がある。約200基の砂防施設点検を行うには、補助員付きなどの制約条件のもとでは、点検数を増やすことは困難であり、航空法等の制約条件の緩和が必要となる。

2023年12月26日に航空局でレベル3.5飛行が新た

に定められた。デジタル技術(機上カメラ)を活用することで、補助者・看板の配置といった従来の立入管理措置を撤廃され、容易にレベル3飛行を行うことが可能となった。(図-12)

今後の技術開発により、LTEや衛星コンステレーション等でドローンをコントロールできれば、目視外飛行による点検が実現可能になると思われる。

また、目標の達成には、機体が人に代わる点検機能を備えていることが必要である。砂防施設点検に適したドローンとして備える機能等は、表-3のような機能が考えられる。

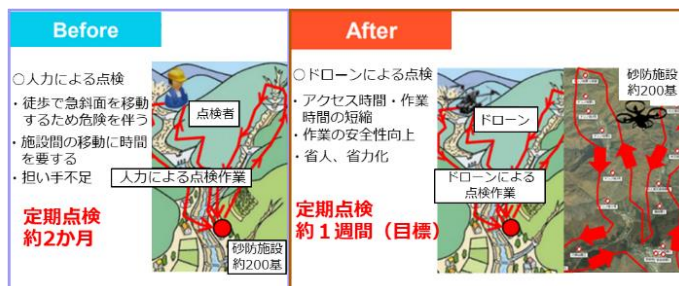


図-11 将来の施設点検イメージ

事業者の要望	改革の内容
従来のレベル3飛行の立入管理措置(補助者、看板、道路横断前の一時停止等)を緩和してほしい。	レベル3.5の新設 により、従来の立入管理措置を撤廃
(従来のレベル3) ○補助者・看板等の配置 ○一時停止	・操縦ライセンスの保有 ・保険への加入 ・機上カメラによる歩行者等の有無の確認
	○補助者・看板等不要 ○一時停止不要

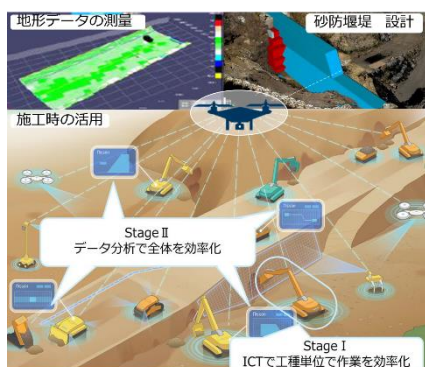
図-12 レベル3.5飛行の改革内容²⁾

表-3 施設点検に必要な機体性能

- 長時間飛行、施設近接、ズーム機能など人が点検する全項目が把握できる機体・センサー等を備えていること
- 機体コントロールが、LTEや衛星コンステレーション等で可能なこと
- 精度の高いGNSSを取得できること
- 気象条件に左右されないこと
- データ漏洩をしない、通信・推進・電源を自動制御システムコントロールできること
- ガソリン等を使用する機体は、不測の事態に燃料が流出しないこと

(2) 今後の砂防事業での活用

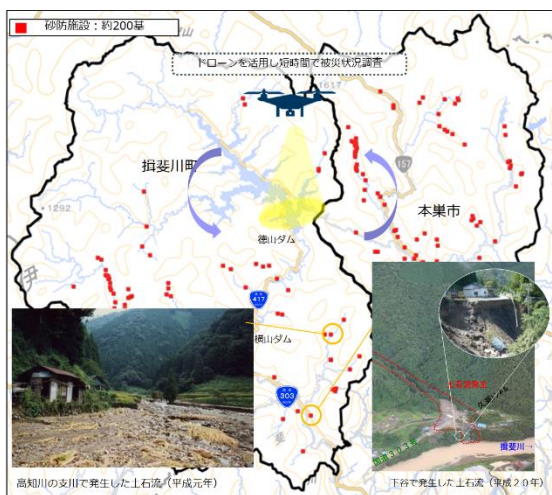
ドローンにより3次元点群データ取得し、施設設計を行うことで、測量・設計・施工・維持管理の各段階で作業効率化、生産性向上を図ることが可能となる。また、地形データを上空から常時取得することで、施工管理・工程管理を遠隔で実施できればDXにも寄与すると考えられる。(図-13)



図－１３ 砂防工事等における活用案

（３）災害時の活用

ドローンの活用により、短期間で被災状況調査や臨時点検が可能となれば、被災地域の早期の復旧・復興が可能となる。また、被災状況のリアルタイム配信による、即時の情報共有を行うことができれば迅速に被災自治体の支援が可能となると思われる。（図－14）



図－１４ 災害時における活用案

6. おわりに

今回の長時間飛行ドローン等を活用した砂防施設点検の実証実験により、砂防施設点検の作業効率化、

省人、省力化を図ることができることを確認した。

しかし、管内約200基の砂防施設点検を行うには、5.（1）で述べた、機体性能の向上や航空法等の制約条件の緩和が必要である。

機体性能の向上については、各異業種分野の企業が交流してイノベーションを促進する必要がある。越美山系砂防事務所では、施設点検や砂防工事等の生産性向上に向け、ドローンサービス企業や通信インフラ企業、ICT建機メーカーの関係者と意見交換を行っている。（図－15）

インフラ分野のDX推進のため、今後もドローンの活用やその他各分野の新技术・新工法等をいち早く取り入れながら、建設生産・管理システムの効率化・高度化を図って参りたい。

謝辞：この度の実証実験が実施できたのは、ひとえにご協力いただいた皆様のおかげです。感謝を申し上げるとともに、今後も意見交換等を重ねながら皆様とともにインフラ分野のDXを推進して参りますので、ご協力賜りますようお願い申し上げます



図－１５ ドローンサービス企業等との意見交換会

参考文献

- 1)株式会社 アミューズワンセルフ:GLOW. H
Skydio合同会社:Skydio 2
DJI JAPAN株式会社:MATRICE 300 RTK
- 2)国土交通省 航空局 無人航空機安全課: カテゴリーⅡ飛行（レベル3. 5飛行）の許可・承認申請について

吸い出しによる空洞陥没の二層フィルターを用いた復旧及び再発防止対策について

工代 健太¹・佐々 真志²・梁 順普³・和田 優希⁴

¹(国研) 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²(国研) 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 (同上)

³(国研) 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 (同上)

⁴(国研) 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 (同上)

護岸・岸壁背後の地盤の吸い出し抑止策として、裏込石と裏埋砂の間に二層フィルターを設ける手法を構築し実用化している。本研究では、吸い出しによる空洞陥没の復旧及び再発抑止対策への応用として、吸い出し口が低潮時地下水位より深い場合は、上層フィルターが下層フィルターを覆う形で二層フィルターを陥没孔に投入する方法を、吸い出し口が低潮時地下水位よりも浅い場合は、その間に陥没孔下側を掘削し、吸い出し口を塞ぐ形で二層フィルターを敷設する方法を考案した。一連の大型吸い出し可視化試験の実施を通じて、双方の手法とも適切な粒度及び層厚の二層フィルターは強い水理外力下で吸い出しの再発を抑止することを示した。

キーワード 吸い出し、空洞、陥没、二層フィルター、復旧方法

1. 序論

護岸や岸壁等の港湾施設の背後地盤において、水理外力の継続的作用により、防砂シートや防砂板の損傷などによる防砂機能の消失によって裏埋砂が吸い出され、それに伴う地盤内の空洞形成及び陥没が頻繁に発生し、吸い出し災害対策の重要性が全国的に高まっている。

筆者らは、護岸・岸壁などの新設の港湾施設における吸い出し抑止方法として、裏込石と裏埋砂の間に裏込石に対して安定性を保つ比較的大きい粒度の下層フィルターと裏埋砂の吸い出しを抑止するための上層フィルターを組み合わせた二層フィルター(図-1)を設ける手法について体系的に検討し、裏埋砂に対する碎石フィルターの吸い出し抑止指針を構築¹⁾³⁾・実用化⁴⁾している。

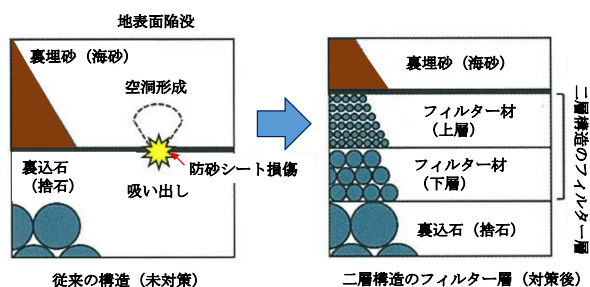


図-1 吸い出し抑止のための二層フィルターの概念図

フィルター材は石材であるため、敷設後、海域に流出する問題がなく、地震動や交通荷重が作用した場合でも変形追随性を発揮し、吸い出しを継続的に抑止することが可能である。したがって、フィルター材は、新設護岸・岸壁背後の吸い出しによる空洞陥没の抑止とともに、既設構造物の陥没被災後の復旧においても有効であると考えられる。しかし、二層フィルターの吸い出しによる空洞陥没復旧への適用方法を検討した研究事例はない。

以上を踏まえ、本研究では、二層フィルターを用いた吸い出しによる空洞陥没の復旧手法の確立を目的に以下の検討を実施した。低潮時地下水位に対する吸い出し口の深さに応じて、二層フィルターを用いた空洞陥没の復旧手法を2通り検討し、大型吸い出し可視化試験により再現した。さらに当該試験において、復旧後の多様な水理外力下における適切な粒度の上層フィルターの吸い出し再発の抑止性能及び下層フィルターと成す二層構造の安定性について詳しく検証した。

2. フィルター層を用いた空洞陥没復旧手法の概要

本研究で考案した復旧時の吸い出し抑止法の概要についてを用いて説明する。不飽和地盤の間隙にはサクショ

ンが働き、地盤を力学的に安定させることに鑑み、越波や雨水の浸透や地下水位の上昇により地盤中のサクシオンが低下する時間帯を避けるため、対象現場に越波・降雨の懸念がない好天候の低潮時に空洞陥没復旧を行うことを想定し、復旧手法の検討を行った。また、陥没孔に崩落した舗装版は事前に撤去することを前提に検討した。

吸い出し口が低潮時地下水位上に位置し、復旧作業中に吸い出し口以浅が常に不飽和地盤となる場合（図-2 (a)）は、空洞斜面の勾配の水平角が掘削により安息角以上となる条件下でもサクシオンの作用により空洞斜面が自立すると考えられる。そこで、空洞斜面を掘削し、そのスペースを利用して吸い出し口に直接二層フィルターを敷設し、その上から裏埋砂で埋め戻す手法が有効と考えられる。

一方、吸い出し口が低潮時地下水位下に位置する、もしくは潮位変動により、復旧作業中に地下水位が吸い出し口のレベルよりも上昇する場合（図-2 (b)）は、吸い出し口近傍の地盤が飽和地盤となり、サクシオンが働かないため、フィルター層敷設のための空洞下部の裏埋砂の掘削が困難である。この場合、二層フィルターを空洞内に充填する上で、下層フィルターを先ず吸い出し口に着底させる復旧手法をとる必要がある。この際、粒径が大きい下層フィルターが裏埋砂と接し、そこから吸い出しが再発することを防ぐため、下層フィルターを上層フィルターが取り巻く形で充填することが肝要である。

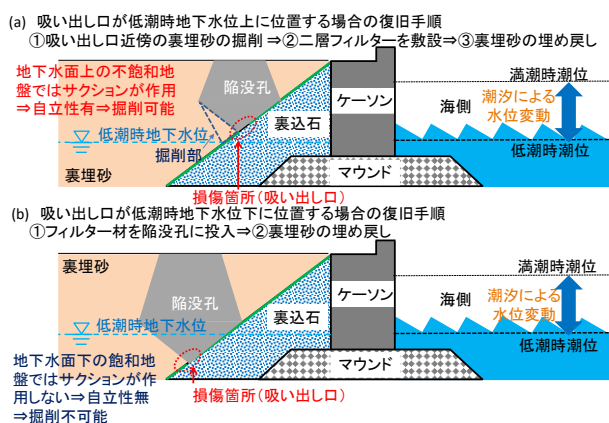


図-2 フィルター材による空洞陥没復旧の概要

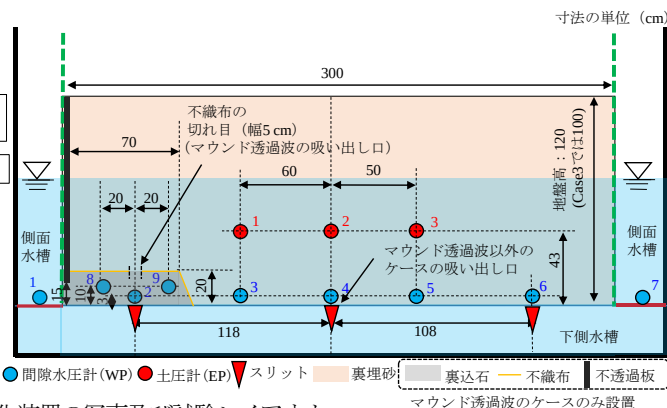
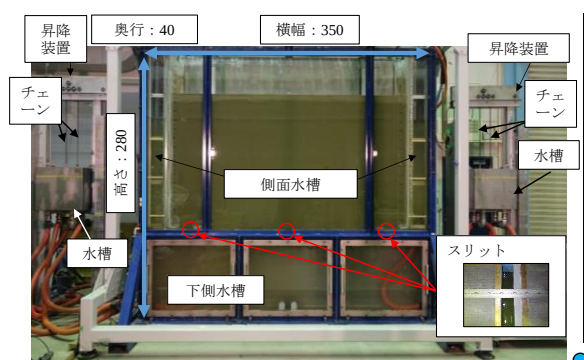


図-3 大型吸い出し可視化装置の写真及び試験レイアウト

3. 大型吸い出し可視化試験の概要

(1) 大型吸い出し可視化装置の諸元

大型吸い出し可視化装置の前面写真及びレイアウトを図-3に示す。当該装置の大きさは、高さ2.8 m、幅3.5 m、奥行き0.4 mである。土槽の前面はガラス製になっており、吸い出しによる空洞形成・陥没過程を実大規模で観察することが可能である。土槽内部の架台には、吸い出し口として用いる最大8 cmまで開放可能なスリットが3つ設けられており、任意の幅、地点で吸い出しを再現することが可能である。また、架台の下側には吸い出された裏埋砂を貯めるための高さ80 cmの下側水槽があり、土層の左右両側には地盤内の水位を調節するために設けられた幅25 cmの側面水槽がある。土槽と左右両側の側面水槽及び下側水槽との間は透過境界となっており、装置本体の左右に位置し側面・下側水槽と接続している2機の昇降装置の水槽を上下させることにより、土槽内の水位をコントロールし、地盤に様々な水理外力を作用させることができる仕組みとなっている。

(2) 大型吸い出し可視化試験の条件及びケース

前章で説明した大型吸い出し可視化装置を用いて、吸い出し・空洞形成・陥没の再現、二層フィルターによる復旧手法の適用、多様な水理外力下の吸い出し再発抑止効果の検証の順番で実大規模の吸い出し可視化試験を実施した。表-1に示すように、復旧手法、裏埋砂及びフィルター材の種類、水理外力を変化させた4ケースの試験を行った。Case 1は、吸い出し口上に砂が残留している吸い出し完了前に掘削無しの手法（図-2 (b)）で復旧する場合を、他3ケースは吸い出し完了後に掘削有りの手法（図-2 (a)）で復旧する場合を各々想定したものである。

試験レイアウトについて説明する。図-3に示す通り、間隙水圧計及び土圧計を装置背面から設置し、各値を経時的に測定した。地盤高については、本試験に使用可能な量に限りある海砂を用いるCase 3のみ1.0 mとし、他

表-1 大型吸い出し可視化試験ケース

Case No.	試験材料 中央粒径比	掘削 復旧 時点	水理外力条件 ({}:吸い出し口の開閉及び幅)
1	裏埋砂：日光珪砂6号 上層フィルター：C-40 下層フィルター：白碎石 中央粒径比：20.5	無 吸い出し 進行中	[空洞形成]一次元的な水位変動(初期水位10 cm 水位変動幅：10-100 cm, 速さ：50 cm/min) {}開3cm [陥没後]地下水位(55 cm) {}開3cm [復旧作業時]地下水位(30 cm) {}開 [着底時]一次元的な水位変動(水位変動幅：10-100 cm) {}開3→6cm [水理外力荷重]下記水理外力を上から順に荷重 {}開6cm ・引き波(水位変動幅：100→10 cmの水位低下, 荷重回数：10回) ・一次元的な水位変動(水位変動幅：10-100 cm, 速さ：50 cm/min, 荷重回数：10回) ・入射波(水位変動幅：15-100 cm, 周期：9.5s, 荷重回数：30波)
2	Case1と同様 中央粒径比：20.5	有 吸い出し 完了後	[空洞形成]一次元的な水位変動(初期水位10 cm, 水位変動幅：10-100 cm, 速さ：50 cm/min) {}開3cm [陥没後]地下水位(30 cm) {}開3cm [復旧作業時]地下水位(0 cm) {}開5cm [水理外力荷重]Case1と同じ3種類の水理外力 {}開5cm
3	裏埋砂：海砂 上・下層フィルター：岩ズリ 中央粒径比：26.7	有 吸い出し 完了後	[空洞形成～陥没後]地下水位(55cm) {}開5cm [復旧作業時]地下水位(20cm) {}開5cm [水理外力荷重]下記水理外力を上から順に荷重 ・マウンド透過波1(水位変動幅:15-120 cm 地下水位:67.5 cm, 周期:10s, 荷重回数100波) ・マウンド透過波2(水位変動幅:15-150cm, 地下水位:82.5 cm, 周期:14s, 荷重回数100波) {}開5cm
4	Case1と同様 中央粒径比：20.5	有 吸い出し 完了後	

ケースでは1.2 mに設定した。復旧後の吸い出し再発抑止検証において、マウンド透過波を作用させるCase 4では土層下端から15 cmより上の範囲で左側の側面水槽と土層の間に不透過版を設置した。当該ケースでは、土層左下の高さ20 cm, 幅70 cmの範囲に、マウンド上の裏込石を模した0.5~6 kg(最小径：50~150 mm)の碎石を2段で敷き詰め、その上に防砂シートを模した不織布を敷設した。また、左側スリットを5 cm分開き、その直上の不織布に幅5 cm分の切れ目を入れ、防砂シートの破損による吸い出し口を再現した。他ケースについては中央の吸い出し口から吸い出しを発生させた。

試験材料について説明する。各ケースで用いた裏埋砂及びフィルター材(種類は表-1参照)の物性と粒径加積曲線を図-4に示す。前述の通り、二層フィルターを用いた吸い出し抑止法の系統的な研究結果では、上層のフィルターの均等係数3以上、裏埋砂との中央粒径比20以下の条件で通常の裏埋砂の吸い出しを抑止可能で、粒形がいびつな海砂に対しては、上層フィルターの均等係数を

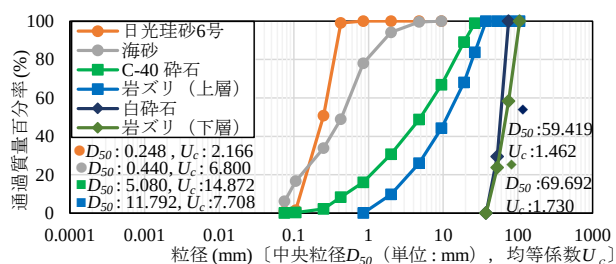


図-4 試験材料の粒形加積曲線及び物性

2.5に引き下げ、中央粒径比を25まで引き上げることが可能であることが分かっている⁹⁾。以上を踏まえ、吸い出し抑止の検証をより厳しい安全側の条件下で行うため、表-1に示す通り各ケースの中央粒径比を上記の各裏埋砂に対する吸い出し限界値を若干上回る値に設定した。下層フィルターの粒度は、港湾工事において護岸のマウンド及び裏込石には直径100~1000 mmの碎石が使用される⁹⁾ことから、裏込石と上層フィルターとの粒度の連続性を考慮し、37.5-106 mmに設定した(図-4)。

4. 空洞陥没復旧手法の適用方法及び結果

(1) 空洞陥没復旧手法の適用方法

本研究で考案した復旧方法の適用とフィルター層敷設断面について、図-5の模式図を用いて具体的に説明する。上層フィルター層の吸い出し抑止性能に関する既往研究¹⁹⁾では、新設現場での最小厚に相当する30 cmの半分程度の厚さで裏埋砂の吸い出しを抑止しうる粒度条件を検討している。以上を踏まえ、全ケースにおいて上層フィルターの最小層厚を15 cm分確保するようにフィルター層敷設断面を検討した。一方で下層フィルターの層厚は、上層フィルターの安定性を保つために必要な15~20 cmに設定した。

Case1(図-5(a))では前述の通り、吸い出し口の上に30 cm深さで砂が残留している時点を復旧開始時とした(i)。ここでは低潮時を想定し、地下水位を地盤下端から30 cmにまで低下させ、上層フィルター(緑色点線下側)、下層フィルター、上層フィルター(緑色点線上側)、裏埋砂の順で投入した(ii)。ここで緑色点線は下層フィルターの上面のレベルを示し、緑色点線上側の上層フィルターの層厚は上述の新設現場の最小厚と等しい30 cmとした。また最初に層厚15 cm分の上層フィルターを投入する目的は、図-5(a)に赤色点線で示す通り、フィルター層の着底時に裏埋砂が下層フィルターと接する箇所から吸い出されることを抑止するためである。最後にフィルター層が着底時まで下方に移動する過程で地表面変位が生じた部分を裏埋砂で埋め戻した(iii)。本手法で実施工を行う場合、空洞の規模から各フィルター材の重量を予め把握することが必要となる。他3ケース(図-5(b))では空洞下側が水平面に対して安息角になり、吸い出しが止まった時点(i)から地下水位が吸い出し口のレベルと等しい条件下で、復旧を開始した。地盤の安定性の保持の観点から、掘削量を最小限に抑え掘削後の空洞斜面が底面となす角度を小さくすることが望ましい。そこでCase2, Case3では図-5(b)の左列の(ii)に示す通り、地盤底部で上下フィルター層の最小厚として各15 cm分の幅を確保するため、空洞の左右端と土層下端の吸い出し

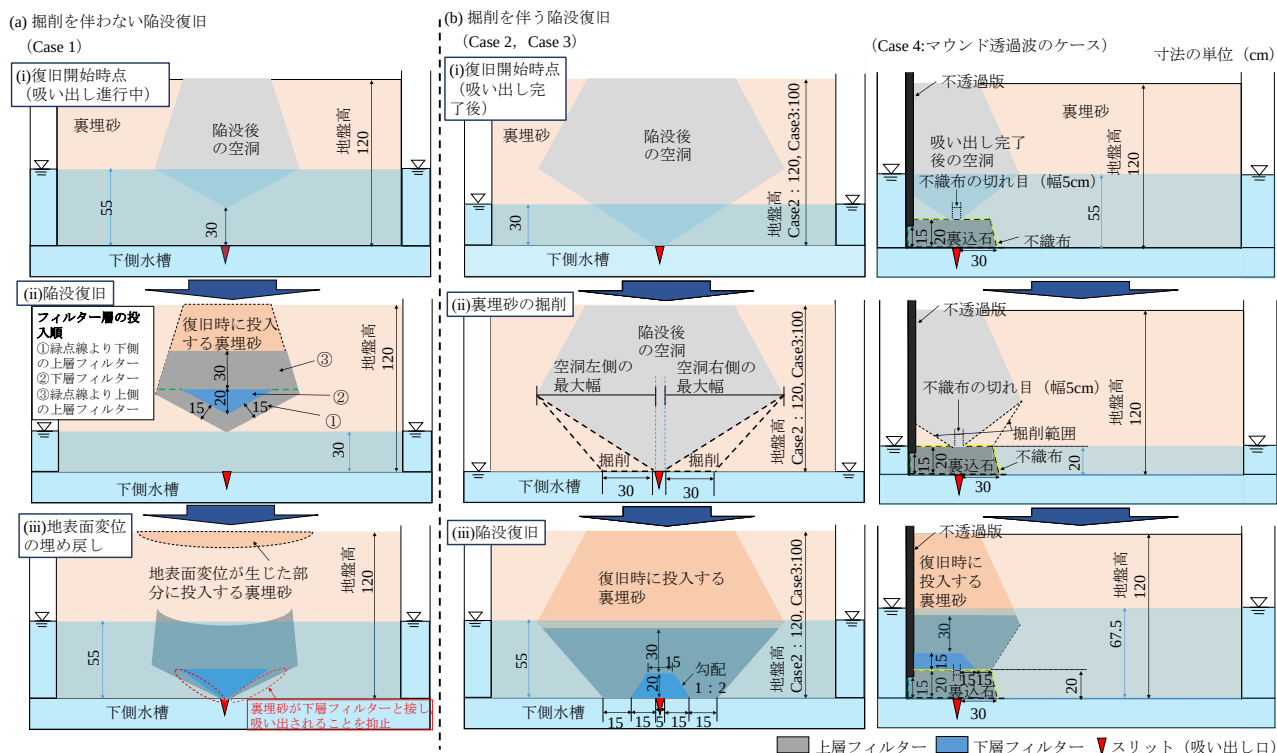


図-5 空洞陥没復旧の模式図

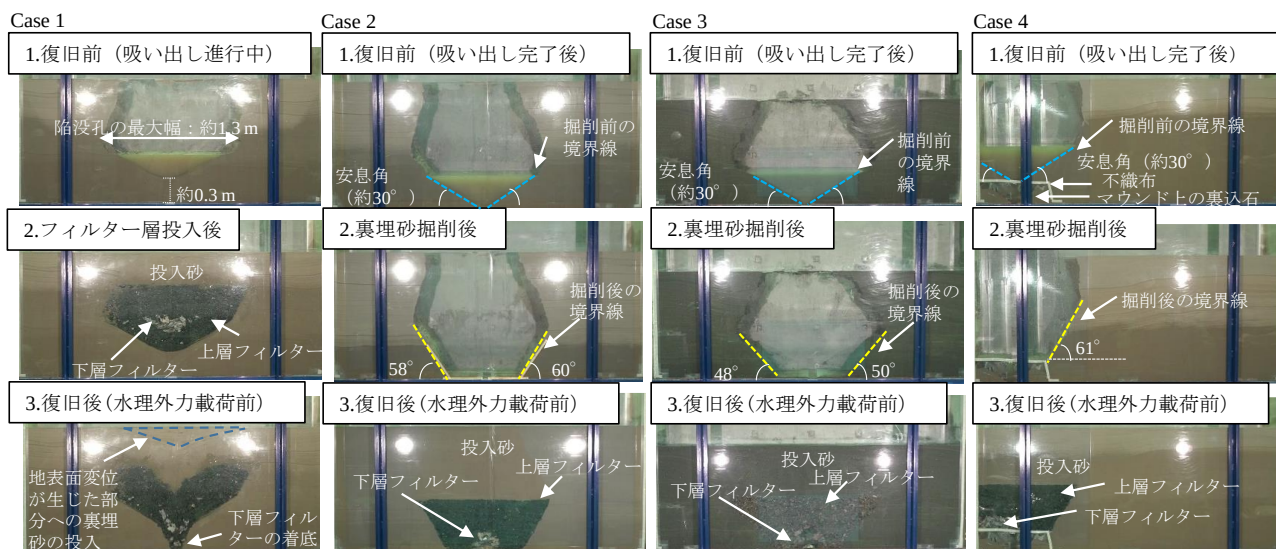


図-6 各ケースの空洞陥没復旧の諸過程の地盤前面写真

口から水平距離が左右30 cmの点を結ぶ直線の内側 (図-5 (b)の点線部の範囲) に存在する砂を掘削した。なお、本実験では土層上から、スコップを用いて掘削を行った。次に下層フィルター、上層フィルターの敷設と裏埋砂の投入を行った(iii)。Case 4では、図-5 (b)の右列に示すように左側の吸い出し口を用いて、本手法による復旧を半断面で適用した。

(2) 空洞陥没復旧手法の適用結果

図-5に掲げた二層フィルターによる復旧手法を図-6の空洞陥没復旧の諸過程の土層前面写真に示す通り適用し

た。図-6の「1.復旧前」から「3.復旧後」の写真はそれぞれ図-5の3つの段階 (i)～(iii)) の模式図に対応している。なお、「1.復旧前」の陥没孔は表-1に示すとおり、一次元的水位変動下での空洞形成・陥没により再現したものであり、各ケースで実大規模の陥没孔 (最大幅1.3 m (Case 1の場合)) が形成されていることが分かる。

Case 1では、「2.フィルター層投入後」に図-5 (a)で示した通り上層フィルターに覆われた形で空洞内に投入された下層フィルターが「3.復旧後」では吸い出し口部に着底している。表-1に示す通り復旧完了後に吸い出し口を開き、速度50 cm/minの一次元的水位変動を作用させた

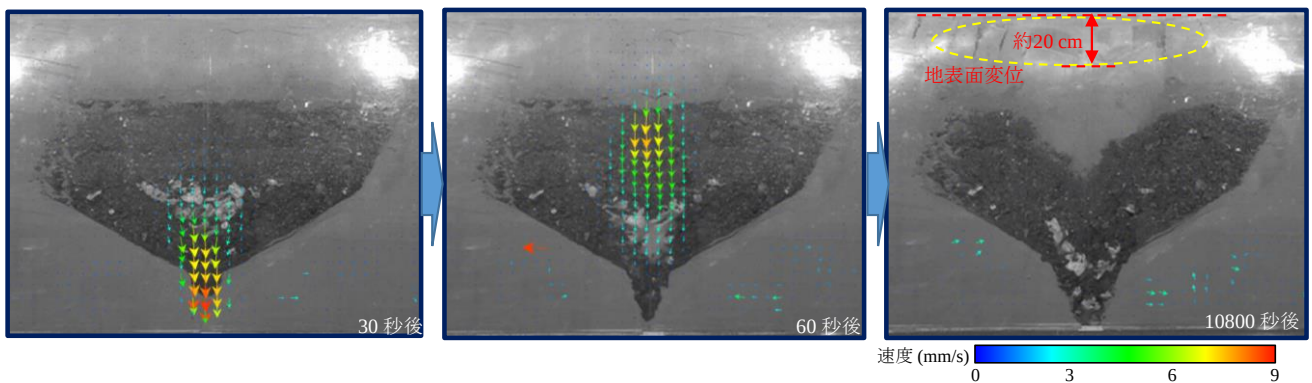


図-7 二層フィルターの着底までの挙動の PIV 解析結果

際に、二層フィルターが沈降し着底するまでの挙動を PIV 画像解析した結果を図-7に示す。復旧作業後の吸い出し再開から30秒後には、二層フィルター下側の砂の吸い出しに伴い、下層フィルターと最初に投入した層厚15 cm分の上層フィルターが下方に移動し、吸い出し口付近に達した60秒後では、下層フィルター上側の層厚30 cm分の上層フィルターの沈降が見られる。フィルター層上側の裏埋砂も下方に移動しているが、上層フィルターの速度を下回っていることから、フィルター層の移動時にフィルター層を通じた投入砂の流出は生じていないことが分かる。下層フィルターの吸い出し口部への着底後に上記の水理外力を継続的に载荷し、フィルター材の移動が完全に止まった10800秒後には、下層フィルターと裏埋砂との間に位置する上層フィルターが吸い出し口近傍の裏埋砂の流動を抑止していることが分かる。なお、この時点では、フィルター層の下方移動に伴い、最大約20 cmの地表面変位(図-7)が生じている。図-6のCase1「3.復旧後」の写真から、この部分は裏埋砂の埋め戻し領域(当該写真の青点線部)に対応している。

他3ケースでは、図-6の「2. 裏埋砂掘削後」において、掘削面が水平面となす角度は約50°~60°と砂の安息角(約30°)よりも大きい値であるにも拘わらず、サクシンの作用で周囲の地盤が安定的に自立している。また、「3. 復旧後」の写真に示す通り、図-5(b)で示した通り、掘削により確保したスペースに二層フィルターの敷設と裏埋砂の投入により陥没復旧を実施した。

5. 陥没復旧後の吸い出し再発抑止検証

表-1の右列の「水理外力载荷」の箇所に記した条件(水位変動幅、速度、波高、周期、载荷回数)で各種水理外力を载荷した。その際、計測された間隙水圧変動をCase 1(引き波、一次元的水位変動、入射波)とCase 4(マウンド透過波)を例に図-8に示す。なお、各外力再

現時の装置の操作方法は、著者らの既往研究⁹⁾²⁾と同様である。引き波では、フィルター層の周辺において、約3秒間で間隙水圧が約7 kPa変動している(図-8(a))。これはケーソン背面(陸側)の間隙水圧変動の観測記録として、有義波高4 mを超える高波浪時に福井県福井港で計測された結果⁷⁾と比較しても大きな水圧変動である。また、他の外力についても周期的な間隙水圧変動が地盤内で再現できていることが分かる。

各水理外力载荷前後の地盤前面写真を基に PIV 画像解析により得られた上述の各種水理外力载荷時の裏埋砂及

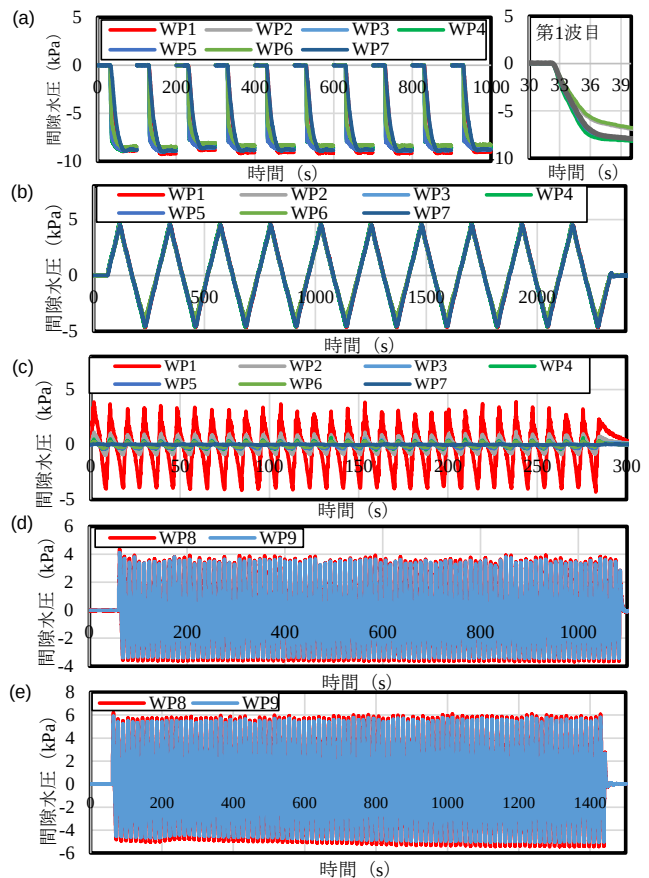


図-8 各水理外力再現時の間隙水圧の経時的な変動：(a)引き波；(b)一次元的水位変動；(c)入射波；(d)マウンド透過波1；(e)マウンド透過波2

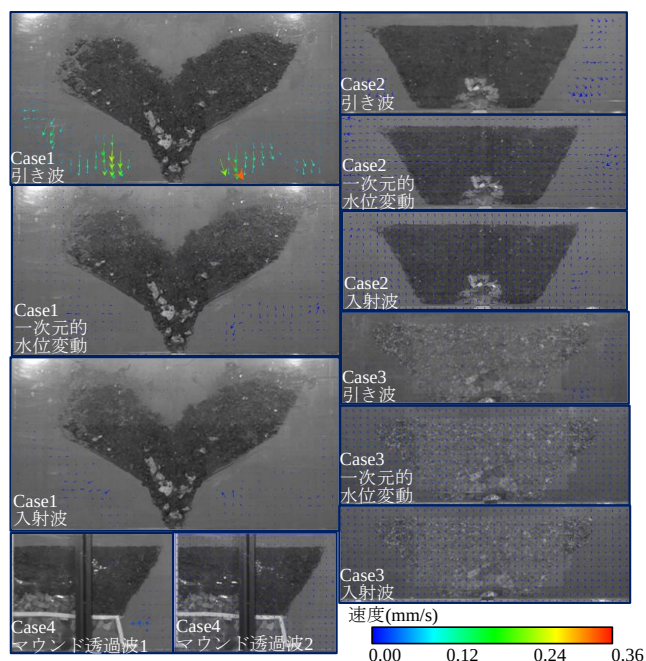


図-9 水理外力荷重時の二層フィルター近傍のPIV解析結果
(引き波は1波目載荷時の結果)

びフィルター材の粒子の時間平均速度ベクトルを各ケースについて載荷外力ごとに図-9に示す。Case 1では引き波作用下において裏埋砂内に最大で0.3~0.35 mm/sの速度ベクトルが見られる。一方で上層フィルターとの境界近傍の裏埋砂及び上層フィルター内部で吸い出し口に向かう方向の速度ベクトルの大きさは全ケースで実質的にゼロであることが分かる。以上から、復旧後の吸い出しの再発は上層フィルターにより抑止され、上層フィルターの下層フィルター内への流入によるフィルターの二層構造の不安定化も生じていないことが分かる。

以上の結果から、2通りの復旧手法において、適切な粒度の二層フィルターを用いることで、現実的に強い水理外力の継続的作用下でも二層フィルターの安定性を保ちつつ、裏埋砂の吸い出しを復旧後、安定的に抑止しうることを示した。

6. 結論

本研究では、大型吸い出し可視化試験により、二層フィルターを用いた吸い出しによる空洞陥没の復旧手法について検討し、以下の知見を得た。

- ・吸い出し口が低潮時地下水位より深い場合には空洞内

に上層フィルターが下層フィルターを覆う形で二層フィルターを充填し、その上から裏埋砂を投入する方法により、下層フィルターが吸い出し口に着底した後、強い水理外力下で吸い出しの再発抑止が可能である。但し、本手法は、下層フィルターの着底後に吸い出し抑止機能を発揮するため、それまでは空洞の発生・発達には抑制しつつも一定の地表面変位を許容する点に留意が必要である。

・吸い出し口が低潮時地下水位より浅い場合は、サクシオンによる空洞斜面の自立性を考慮し、低潮時に空洞下側の地盤を掘削し、二層フィルターを裏込石上に直接敷設する方法により、強い水理外力下においても直ちに効果を発揮し吸い出しの再発を抑止可能である。

・下層フィルターの粒度範囲を上層フィルターの最大粒径から裏込石の最小粒径までの範囲に定めることで、上記の双方の手法においてフィルターの二層構造が安定的に保たれ、高い吸い出し抑止性能が維持される。

以上から、吸い出しによる空洞陥没復旧における二層フィルターの高い適用性が示された。

謝辞：本研究の実施にあたっては、国土交通省港湾局のご協力を得ている。また、本研究で用いた海砂及び岩ブりは内閣府沖縄総合事務局から提供を受けたものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 工代健太, 佐々真志, 梁順普, 高田康平, 鈴木高二朗 (2020): 地盤及び水理外力の特性を考慮した吸い出し・空洞形成・陥没機構とフィルター材による抑止法の研究, 港湾空港技術研究所報告, Vol. 59, No. 3, pp. 1-20.
- 2) 工代健太, 佐々真志, 梁順普, 高田康平 (2021): マウンド透過波による吸い出しの機序・影響範囲及びフィルター材を用いた抑止法の研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 77, No. 2, pp. I_781-I_786.
- 3) Kudai, K., Sassa, S., Yang, S., and Takada, K. (2021): Influence of soil and hydraulic conditions on the processes of internal erosion, cavity formation and collapse behind coastal structures, *Coastal Engineering*, Vol. 170, 104013.
- 4) 国土交通省港湾局監修 (2018): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 2022年部分改定.
- 5) 梁順普, 佐々真志, 工代健太, 村田一城, 小林千紘 (2022): 臨海部の多様な外力と砂の粒子形状を考慮した吸い出し・陥没抑止法の研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 78, No. 2, pp. I_121-I_126.
- 6) 菊池喜昭, 新舎博, 河村健輔, 江口信也 (2011): 裏込めを有するケーソン式混成堤の安定性の検討, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 67, No. 4, pp. 474-487.
- 7) 高松恭文, 渡辺義, 石田道昭 (2007): 福井港海岸 (福井地区) 離岸堤および護岸 (改良) 検討調査-ケーソン式護岸背後の吸い出し現象に関する一考察, 新潟技調 report / 国土交通省北陸地方整備局新潟港湾空港技術調査事務所, pp. 36-39.

下新川海岸における離岸堤工事の ICT施工導入効果

大谷内 啓丞¹・吉田 和弘²・日下部 満¹

¹黒部河川事務所 工務課 (〒938-0042 富山県黒部市天神新173)

²黒部河川事務所 黒部流域治水出張所 (〒938-0801 富山県黒部市荻生大本7280-3)

ICT技術の活用により、海中部を可視部分として扱うことができるため、これまで実施してきた潜水士による現地確認・測量作業の省力化等を図ることができる。ICT技術を下新川海岸の離岸堤施工に伴い導入した効果について報告する。

キーワード 下新川海岸、離岸堤、ICT、3次元設計データ、ICT建設機械

1. はじめに

下新川海岸は、富山県の東部に位置し、黒部市～朝日町（新潟県境）27.9 km のうち、黒部市、入善町、朝日町（西部）の総延長 17.225 km の区間が直轄海岸保全区域となっている（写真-1）。当海岸は、生地海底谷をはじめとした多数の海底谷が形成されており、海岸線から遠くないところで海底勾配が急なため、富山湾特有の「寄り回り波」や冬期季節風による高波の発生時には波の勢いを減ずることなく海岸線に押し寄せる。

これにより下新川海岸では、度々、海岸保全施設や背後の住宅地等に多大な被害が発生している。



写真-1 下新川海岸位置図

(1) 富山湾特有の「寄り回り波」

「寄り回り波」は、富山湾特有の比較的周期の長いうねり性の高波である。暴風によって日本海北部で発生した波が伝播して周期の長い「うねり」となって富山湾に侵入する波である。

(2) 冬期季節風による高波

冬期の日本海を低気圧がゆっくりと移動し、北西方向からの強風が連吹することにより発達する、比較的周期の短い波浪である。（図-1）

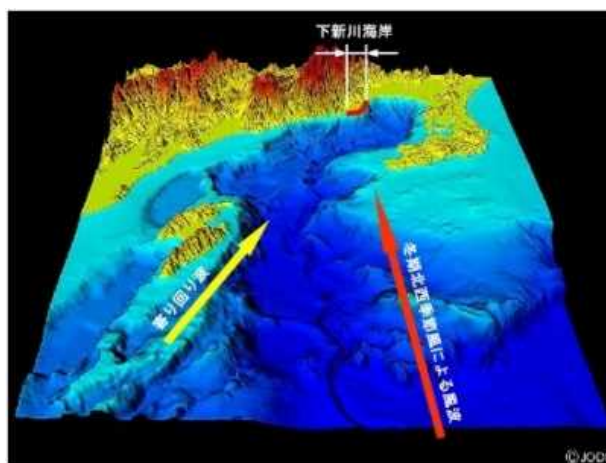


図-1 下新川海岸に襲撃する波浪

〔基図：海上保安庁 第九管区海上保安本部海洋情報部ホームページより
http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN9/sodan/kaiteitikei/toyama_wan.jpg〕

(3) 災害の事例

下新川海岸は、富山県内でも特に「寄り回り波」による越波の被害が大きく、住家の破壊や床上・床下の浸水被害が多数発生している。（写真-2）

また、過去には波浪により、堤体土砂の吸い出し（空洞化）による、直立堤の倒壊も発生した。このようなことから下新川海岸では、越波・侵食対策として、海上施設となる離岸堤、人工リーフ等の整備を進めている。



写真-2 過去の被災状況

(4) 海上工事へのICT施工導入のきっかけ

令和5年度から黒部流域治水出張所が新設され河川・砂防・海岸事業の工事監督を行う中で、海岸工事にもICT施工が導入されていないことが確認された。

海岸工事へのICT施工の導入が効果的である事から受注者（積極的な意向）と協議を行い実施することとした。

〔ICT施工が効果的な理由〕

海岸工事である離岸堤、人工リーフの大半が海中（水中）部となることから、これまでは不可視部分として扱ってきたが、ICT施工導入により可視部分として対応することができる。（写真-3）（図-2）



写真-3 離岸堤

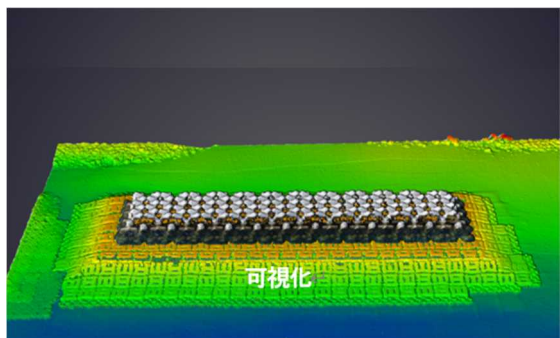


図-2 可視化した離岸堤（3次元点群データ）

2. ICT施工導入の目的

離岸堤の標準的な断面図と施工フローを図に示す。（図-3,4）工程の大部分は海域堤基礎工となっており、海中（水中）での作業となっている。

最新の測量技術の活用により、海中（水中）部を可視部分として扱うことができるため、これまで実施してきた潜水士による現地確認・測量作業を最新の測量技術に

て代替できる。また、GNSS（衛星測位システム）を活用したマシンガイダンスの活用により、海中部の据付作業の精度向上が期待できることから、工期短縮、安全性の向上、出来形の精度向上による工事全体の生産性向上を目指すこととした。

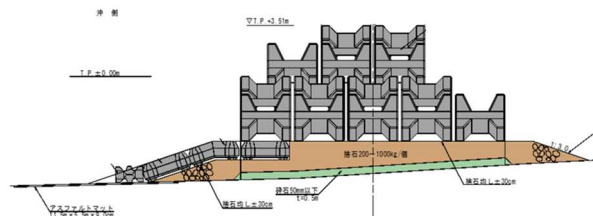


図-3 離岸堤標準断面

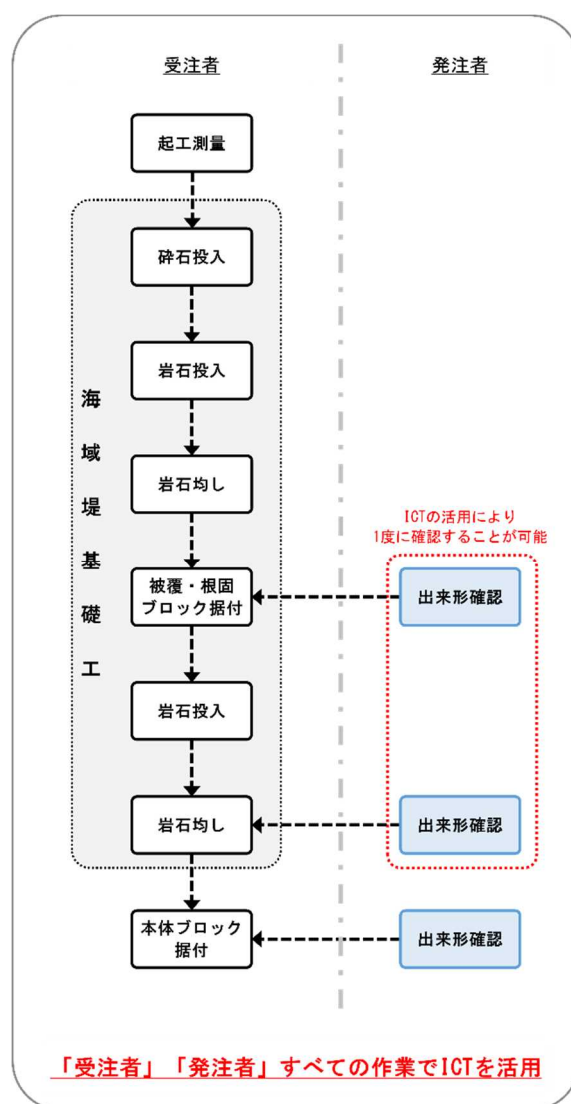


図-4 離岸堤標準施工フロー

3. ICT施工の実施内容と効果検証

令和6年度にICT施工を実施した副離岸堤工事を事例とする。

(1) 3次元起工測量

従来は、陸上に計測機器（トータルステーション、レベル）を設置し海上の船からスタッフ等を海底に伸ばして地盤形状を計測していた。

今回は、ナローマルチビーム測深（音響測深機）を測量船に積み込みのみ実施した。

なお、既設離岸堤の改良工事など測量船の喫水深が確保できない場合は、UAV（グリーンレーザ）による測量を併用する。

3次元起工測量を実施したことで、施工箇所全体を面的に確認でき、従来の測線管理では捉えることができなかった沖側の侵食状況を把握することができた。（図-5）

また、任意断面を取得することができるため、従来行っていた、基準測線に加えて断面変化点毎の潜水土による追加の測量作業が不要となり省力化を図れた。

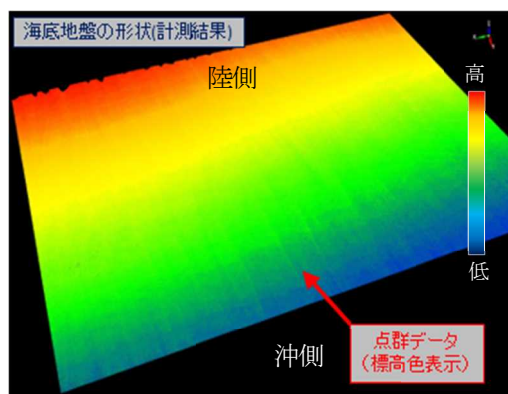


図-5 起工測量結果（ナローマルチ測量結果）

(2) 3次元設計データ作成

従来は、起工測量である測線間の海底地盤の起伏に合わせた横断形状により平均断面法で数量を算出していたため、数量算出に多くの人工を要していた。

今回は、起工測量結果を基に3次元点群データと3次元設計データを組み合わせた海域堤基礎工の3次元設計図を作成した。

3次元設計図を基に海域堤基礎工を求積することで、これまでの平均断面法よりも正確な数量把握を短時間に実施することができた。（図-6）

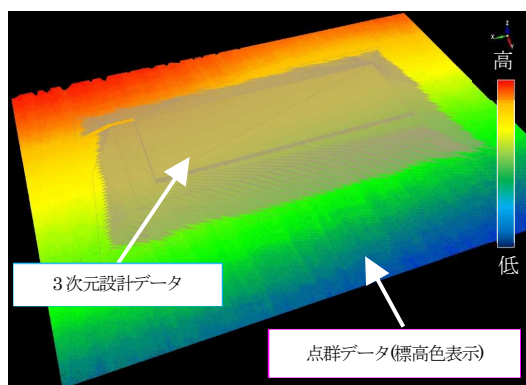


図-6 3次元設計図（海域堤基礎工）

(3) ICT建設機械による施工

従来の海岸工事では、海中部の施工位置となる要所に目印（ボンテン）を設置し、それを目安にクレーンによる据付作業等を実施していた。（図-7）

目印（ボンテン）の設置には多くの手間がかかる上、波による設置位置のズレが発生するため施工中における座標位置の再確認にも多大な手間を要していた。

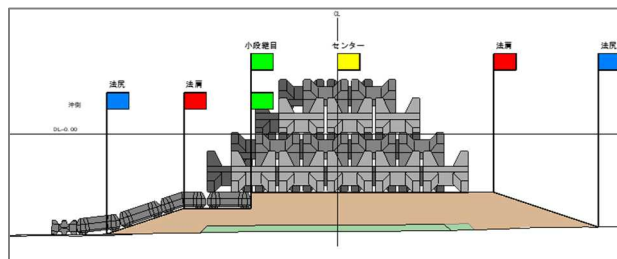


図-7 施工位置の目印（ボンテン）

そのため、今回は GNSS（衛星測位システム）を活用したブロック支援システム（マシンガイダンス）を活用することで目印（ボンテン）の設置を最小限にすることとした。（図-8）

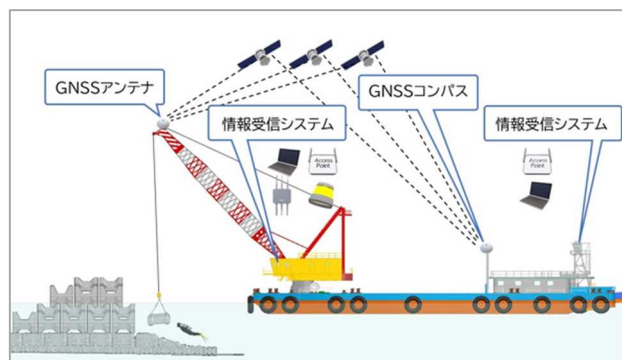


図-8 ブロック支援システム

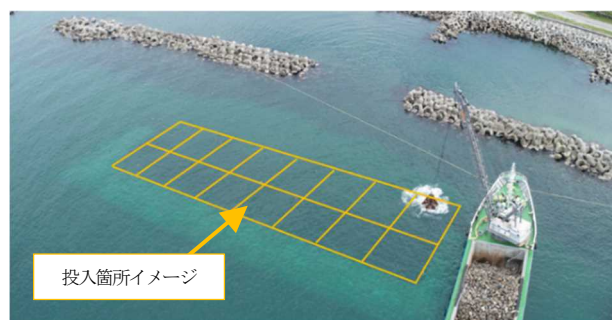


写真-4 「見える化」クレーン操作

a) マシンガイダンスによる投入位置の把握

作業台船のクレーン位置にカメラと GNSS を設置し水中部の岩石投入箇所やブロック据付位置を座標で管理する「見える化」を行った。(写真4)

クレーン運転手の操作は、マシンガイダンスにより目的位置(座標で設定)への誘導を高精度で行うことが可能となり、潜水士の水中作業が軽減された。併せて、クレーン運転手と潜水士との無線のやりとり、潜水士同士の合図による水中作業が少なくなり作業効率が向上した。

b) 岩石数量の把握

基礎マウンド全体をエリア分けし、エリアごとの岩石投入量を3次元設計図により算出した。(図-9)

これにより施工範囲が広域(約 30m×70m)となる岩石の投入において、各エリアの必要数量を的確に把握することができた。

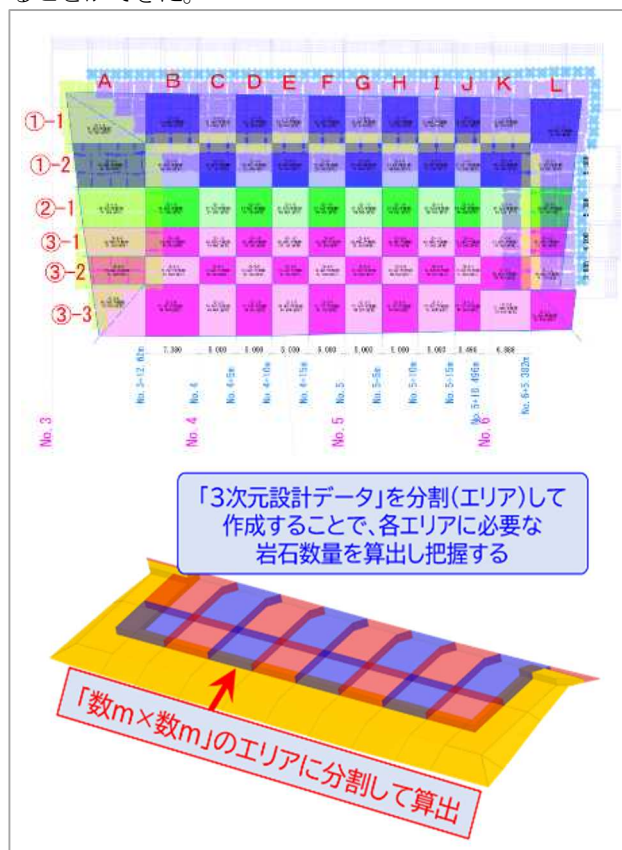


図-9 岩石数量の3次元設計図による把握

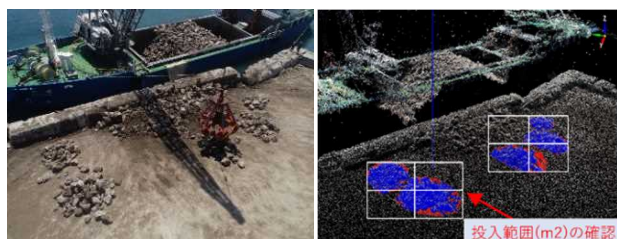


図-10 投入バケット1杯当たりの数量

また、岩石投入前に作業船のバケット1杯あたりの掴み数量(m³)と投入時の広がり範囲(m²)をUAV測量(点群データ)により確認した。(図-10)これにより投入位置の誤差が少なくなり、全体的に均等な岩石の投入が可能となったことで、投入後の海中での岩石敷均しの手間を大幅に削減することができた。(写真-5)



写真-5 岩石投入後の敷き均し状況

(4) 3次元出来形管理

ICT 施工導入により、これまで不可視部分としてきた箇所が可視部分となる事から、段階確認の方法を一新した。また、新たな取り組みとして、本体ブロックの据付精度を向上させるために、据付面のヒートマップによる面管理を導入した。

a) 海域堤基礎工の段階確認

従来は、被覆・根固ブロック据付完了時及び海域堤基礎工(本体ブロック据付マウンド)完了時に、潜水士が現地でリボンテープを使用した測量を実施し、撮影した写真を繋ぎ合わせ、机上で段階確認を実施していた。(写真-6)

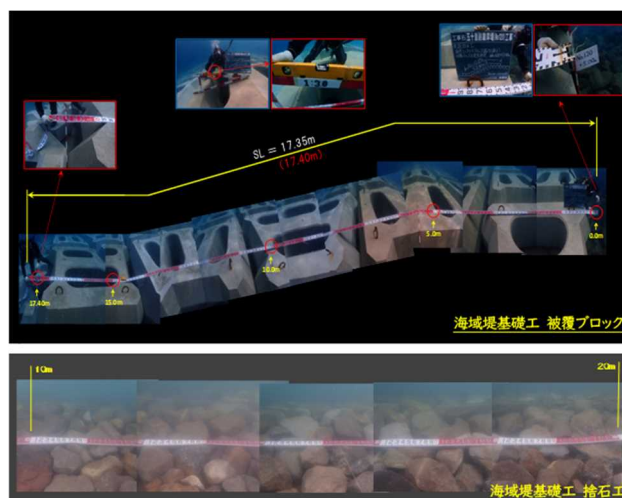


写真-6 従来の段階確認(海中部)

今回は、海域堤基礎工完了後に取得した3次元点群データを活用し、机上で段階確認を行った。(図-11)

従来の方法と比較して、段階確認の回数を減らせたうえ、潜水土による作業が不要となり、大幅に人工を削減できた。また、基準高・幅・延長などの出来形は、測線以外の任意箇所でも測定する事が可能となり、より精度が高い出来形確認を実施することができた。

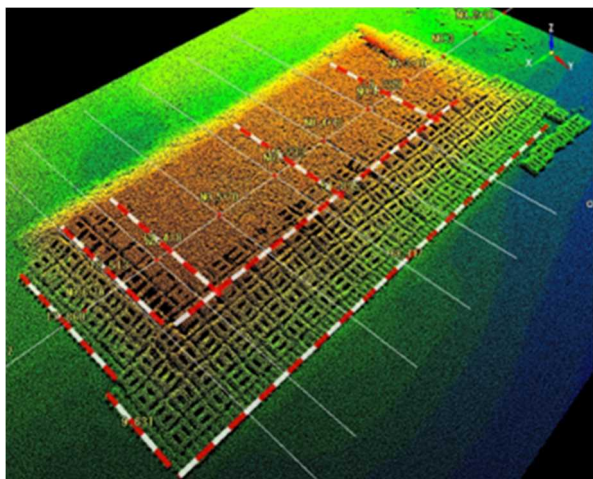


図-11 点群データによる段階確認(海中部)

b) 本体ブロック据付面の段階確認

本体ブロック据付面の精度は、本体ブロックの設置の施工性に大きく影響しており、据付面の平坦性が確保できていない場合、本体ブロック積み直しの手戻りが発生する恐れがある。

従来は、潜水土の目視により平坦性を確認していたが、今回は、本体ブロックの据付精度を向上させるため、据付面を対象としたヒートマップによる面管理(出来形評価)を実施した。(図-12)

従来の写真やビデオによる確認と比較して、捨石均し面全体の平坦性を視覚的に確認できるようになり凹凸のない綺麗な据付面を施工できた。(写真-7)

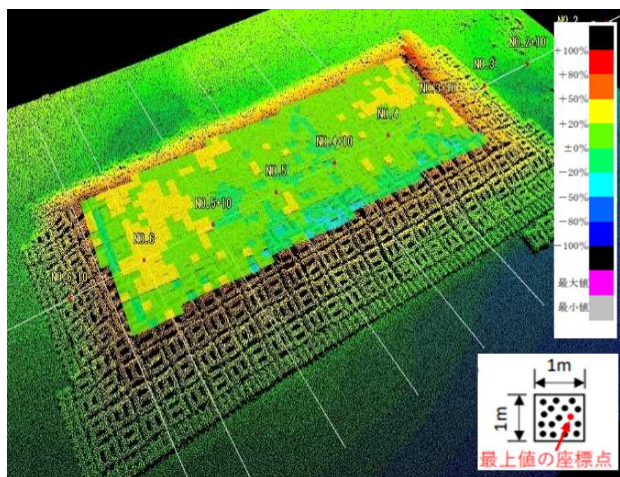


図-12 本体ブロック据付面管理(ヒートマップ)



写真-7 本体ブロック据付面の敷き均し状況

c) 本体ブロックの段階確認

従来は、リボンテープやレベル・スタッフを使用した測線毎の測定を行ってきた。足場が不安定なブロックに複数人で登り写真撮影を行い、その写真を繋ぎ合わせることで段階確認を机上で実施していた。(写真-8)

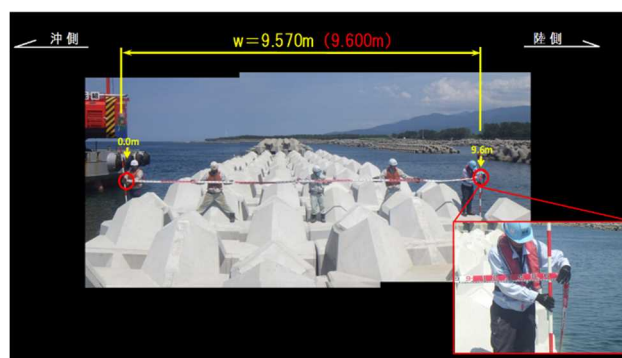


写真-8 従来の本体ブロック段階確認の様子

今回は、UAV 写真測量から3次元点群データを取得し、水上部の本体ブロック据付出来形の段階確認を机上で実施した。(図-13)

従来の方法と比較して、ブロック上での危険を伴う計測作業等が不要となり、大幅な人工の削減に繋がった。

また、ヒートマップによる本体ブロックの据付面管理を実施したことで、据付精度が向上し、側線以外の任意箇所においても全ての点で基準値以上の高さとなっていることが確認できた。

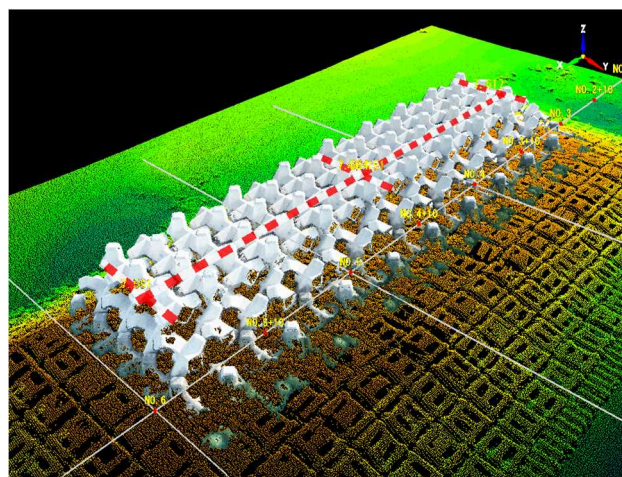


図-13 点群データによる段階確認(水上部)

4. 結果（ICT 施工による効果）

(1) 工期短縮・省力化

今回の事例である副離岸堤工事では、従来施工と比較し、短縮日数 19 日、作業人工 95 人工を削減できた。

今回の工事は副離岸堤 1 基の半分の施工であったため、副離岸堤 1 基の施工当たりに換算すると短縮日数 38 日、作業人工 190 人工の削減が期待できる。（図-14）

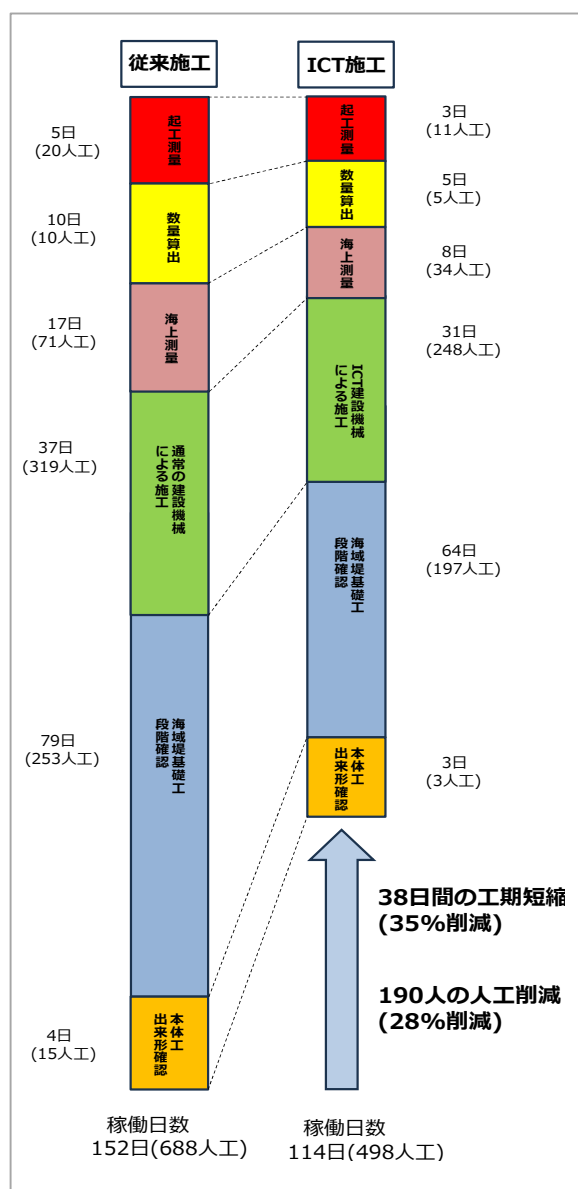


図-14 従来施工と ICT 施工比較（1 基当たり）

(2) 安全性の向上

ICT 建設機械の導入及び 3 次元点群データを活用した出来形管理を実施した事で、水中部では、潜水土による施工手間が大幅に削減されたうえ、水中における寸法測定や出来形写真の撮影が不用となった。また、水上部においては、足場が不安定なブロック上での寸法測定や、レベル・スタッフを使用した基準高測定が不要となったことから、施工や出来形測定における危険リスクが大幅に削減された。

(3) 出来形管理の精度向上

3 次元点群データを活用した出来形管理の実施により、従来の基準測線管理と比較して、任意箇所での測定も可能となったことから高精度の出来形管理となった。

また、水中部である海域堤基礎工の全体像は、従来「不可視部」とされていたが、3 次元点群データでの「可視化」により、全体の出来栄が一目で把握できることは非常に効果的であった。

ヒートマップによる面管理を導入したことで、本体ブロック据付面全体の平坦性を確認でき、次工程となる本体ブロック各層の据付精度が向上し、施工の手戻りがない安定した据付高を確保できた。

5. 今後の展望・まとめ

下新川海岸において、ICT を活用した結果、工期短縮と省力化を図ることができた。

また、3 次元データを活用することで、危険を伴う計測作業がなくなり安全性が向上した。さらに、水中の不可視部分が可視化されたことで、出来形管理の精度向上が図られた。

下新川海岸の ICT 活用事例は、建設業界におけるデジタル化の更なる推進を後押しし、災害に強いインフラ整備に貢献することが期待される。

今後も ICT を積極的に活用し、省力化、効率化を進め円滑な事業進捗を図りたい。

参考文献

- 1) 吉田 和弘(2024)：下新川海岸における ICT を活用した施工管理の取り組み～ICT 施工導入の効果、海岸 Vol.60 p27～31
- 2) 国土交通省 北陸地方整備局 黒部河川事務所(2024)：横山副離岸堤(No184)工事 令和 6 年度工事完成図書

海峡部低位置道路照明設備の導入と試験施工

堀川 峻¹・西野 晋二¹・玉津 和哉¹・三橋 直樹²

¹本州四国連絡高速道路株式会社 保全部 電気通信課（〒651-0088 兵庫県神戸市中央区小野柄通4-1-22）

²本四高速道路ブリッジエンジニア株式会社 施設部 施設課（〒651-0084 兵庫県神戸市中央区磯辺通3-1-7）

本四高速の海峡部道路照明設備は、整備後40年が経過し老朽化が進み設備更新時期を迎えている。現行の海峡部道路照明設備は、ポール照明方式を用いていたが、点検等のメンテナンスコストが大きく、老朽化、地震及び台風による落下リスクがあることが課題であった。課題解決のため、低位置照明方式による整備を行うこととし、現行と同等の取付間隔となる器具開発を目指した。また、海峡部の厳しい気象条件下においても、運転者に対して安全な走行環境を提供するための付加設備を実装し、周囲の気象状況に適した調光ができるものとした。

今回、開発した海峡部低位置道路照明を仮想環境試験場と実橋に設置し、一般参加者による評価試験を実施したので、その結果を報告する。

キーワード 低位置照明，プロビーム照明方式

1. はじめに

本四高速の海峡部道路照明設備は、古いところで整備から40年が経過し、老朽化が進んでおり設備更新時期を迎えている。現行の海峡部道路照明設備では、高位置から路面を照らすポール照明方式を用いていたが、点検等のメンテナンスコストが大きくなることや、老朽化、地震や台風による落下リスクがあることが課題であった。

課題解決のため、低位置照明方式による整備を行うこととし、現行と同等の取付間隔となる器具開発を目指した。そのほか、海峡部の厳しい気象条件下においても、運転者に対して安全な走行環境を提供するため、外側線照明と視線誘導照明を実装し、気象観測センサと即時に連動することで、自動的に周囲の気象状況に適した調光ができるものとした。

今回、開発した海峡部低位置道路照明を仮想環境試験場と実橋に設置し、一般参加者による評価試験を実施したので、その結果を報告する。

の中で、「一般国道等の長大な橋梁においては、原則として設置すること」とあり、本四高速では、同基準を参考に海峡部の厳しい気象環境や国立公園地域への光害を考慮した、「本州四国連絡橋照明設置基準(案)（以下「旧基準(案)」という。）」を定め、旧基準(案)によって海峡部道路照明設備の整備を行っている。

旧基準(案)では、以下の項目を目的に海峡部照明設備を整備するものとしている。

- ・視線誘導効果
- ・交通事故の防止
- ・走行車の周辺状況把握(橋上での事故や落下物の早期発見)

これらを基に、現行海峡部照明はポール照明方式にて整備されており、設置状況を写真-1に示す。



写真-1 現行海峡部照明設備

2. 本四高速の海峡部道路照明設備

(1) 現行の海峡部道路照明設備

道路照明設備は、道路構造令において交通事故の防止を図るための交通安全施設として設ける設備として位置づけられている。その内、道路照明設備を整備する際に適用される基準として、『道路照明施設設置基準・同解説』¹⁾（社団法人日本道路協会、2007）が定められている。



写真-2 老朽化した灯具筐体



写真-3 低位置道路照明設置イメージ

(2) 現行海峡部道路照明設備における課題

- ・従来のポール照明方式では、点検等のメンテナンス費用が高所作業車や交通規制費用により大きくなる。
- ・高位置に設備が設置されるため、老朽化（写真-2）、地震や台風等による器具落下や支柱倒壊のリスクがある。
- ・ポール照明方式では器具のほかに、照明柱の更新費用が必要である。

3. 課題に対応する低位置照明化

(1) 低位置道路照明の有効性

道路高欄部に設置し、低い位置から路面を照射する低位置照明方式は、一般的に以下のような有効性がある。

- ・照明器具が低位置にあることで、落下リスクが軽減される。
- ・照明柱の更新費用が不要である。
- ・近傍の誘導性が向上する。
- ・海面上及び後方への漏れ光がさらに抑制される。

(2) 低位置道路照明の課題

一方、低位置から照明を行うため、以下のような課題がある。

- ・低位置に設置することで照射範囲が狭くなるため、ポール照明方式と比べ設置間隔が短くなる。
- ・運転者の目線に近くなることで、設置位置や照射方向によってはまぶしく感じる。

4. 海峡部低位置道路照明設備の検討

2.(2)に示すポール照明方式の課題解決を目的に、低位置照明方式による設備更新検討を行うこととした。低位置道路照明の設置イメージを写真-3に示す。

(1) 照明方式

落下物や車両等の視対象物の視認方法には、シルエット視と逆シルエット視があり、シルエット視は、視対象物を路面等の背景よりも暗く視認する方法で、前方及び後方に照射する対称照明方式によって広く使用されている視認方法である（図-1）。一方、逆シルエット視は、視対象物を背景よりも明るく視認する方法で（図-2）、走行方向を照射するプロビーム照明方式による整備が主流で、採用例が増えている。

(2) 海峡部低位置道路照明設備の開発検討

海峡部低位置道路照明の整備を行うにあたり、照明メーカーに対して技術公募を行い器具選定を行った。技術公募参加メーカーによるフィールド試験を行い、海峡部の落下物等障害物の視認性向上を目指して、プロビーム照明方式を本線照明に採用し、遠方の誘導性を確保することと、海峡部の厳しい気象環境下での走行性の向上のため、外側線及び視線誘導照明を実装することとした。



図-1 シルエット視イメージ

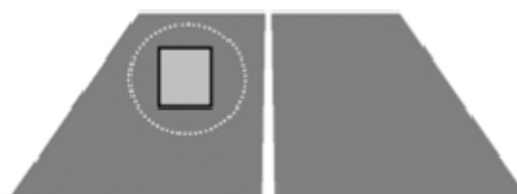


図-2 逆シルエット視イメージ

表-1 海峡部道路照明施設（広スパン低位置プロ
ビーム照明方式）設置基準（案）抜粋

照明性能	平均鉛直面照度	20 lx 以上
	鉛直面照度 総合均斉度	0.3 以上
	鉛直面照度 車線軸均斉度	0.5 以上
	グレア 1	25 lx 以下（外側線上, 器具 からの水平距離 2.5m 高さ 1.2m の走行方向 に対し VH90° の値）
	グレア 2	仰角-1.0° で 800cd 以下 仰角 0.5° 以上で 120cd 以下
	海面上照度	0.01 lx 以下
	上方光束比	5 %以下
その他	照度比	2.3 以上
	器具取付高さ	既設高欄上として 1.2m
	器具取付間隔	性能を満足する最大範囲 30m
	視線誘導照明	晴天時 30cd 以上, 悪天候時 80cd 以上
	外側線照明	外側線を目立たせる照明を 設ける

汎用器具による整備では,ポール方式照明の設置間隔(26~30m程度)に比べ設置間隔が狭く(10m程度),整備する器具数量が多くなることが課題となった.そのため,本四高速が求める設置間隔(26~30m)の実現に向けた技術検討,机上シミュレーション並びに仮想環境試験を実施し,各試験の結果から、『海峡部道路照明施設（広スパン低位置プロビーム照明方式）設置基準（案）』（以下,「新基準」という.)及び『海峡部道路照明施設（広スパン低位置プロビーム照明方式）器具仕様書（案）』を策定した.前述の新基準に規定する照明性能を表-1³⁾に示す.

5. 海峡部低位置道路照明設備の見え方評価

4.において検討した器具については,これまでにない照明性能の照明器具であることから,工事契約後,本施工の前に,見え方評価試験を行うこととし,照明学会等の学識者並びに国土交通省等の有識者からなる,「海峡部低位置道路照明見え方評価委員会」(以下,「委員会」という.)を立ち上げた.委員会において,屋内における仮想環境試験及び実橋の一部区間に試作器具を設置して,実橋試験を実施し,それぞれ一般の方を対象に見え方試験を実施することとした.

(1) 仮想環境試験概要

仮想環境試験については,降雨や濃霧の環境を再現可能な施設で実施し,4.(2)にある新基準を満足する試作器具を用いることとし,過年度の仮想環境試験により,晴天時と降雨時の見え方に相違がなかったことを踏まえて,晴天時と濃霧時の試験を行うこととした.

一般参加者については,20代から70代の運転免許保有者24名を対象として試験を実施した.なお,一部の評価項目においては,仮想環境の条件の安定性及び実走行時を考慮して12名による評価をおこなっている.試験環境条件は表-2に示す.

表-2 仮想環境試験実施環境条件

試験器具	広スパン低位置プロビーム照明器具 (外側線照明(緑色),視線誘導照明(橙色) 含む) 4台
設置方法	設置高さ 1.2m (標準部,器具中心) 設置間隔 30m
調光制御	・本線照明(プロビーム照明方式) 2段階(全光:100%点灯,調光:50%点灯) ・外側線照明と視線誘導照明 2段階 (外側線照明 全光:100%点灯, 調光:50%点灯) (視線誘導照明 全光:80cd, 調光:30cd)
試験車両	観測車両:普通乗用車 (カローラ・ツーリング) 2台 先行車両:普通乗用車(グレー)
試験器材	視標:20cm×20cmグレー色票($\rho=5, 10\%$) 視標位置:車線軸を挟み 0.5m 間隔,晴天時 100m (第1走行中央,1/4S 間隔)
天候	晴天時:観測距離 80m (先行車の配置は器具正面及び器具中間の2パ ターン) 濃霧時:観測距離 50m,視程 70m (先行車の配置は器具正面及び器具中間の2パ ターン)
評価方法	視標の見え方については,視認率を評価 それ以外の項目については,1~5の5段階評価 (運転席と助手席の合計)

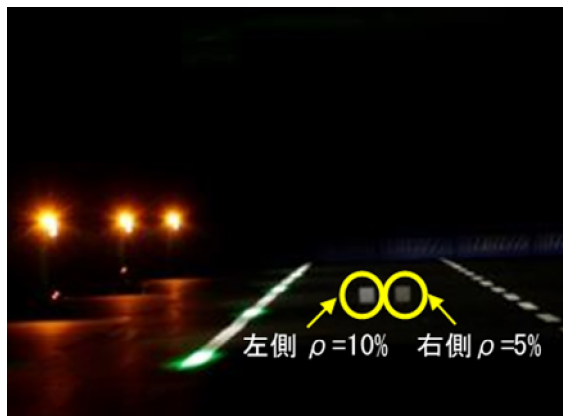


写真-4 視標の見え方試験図

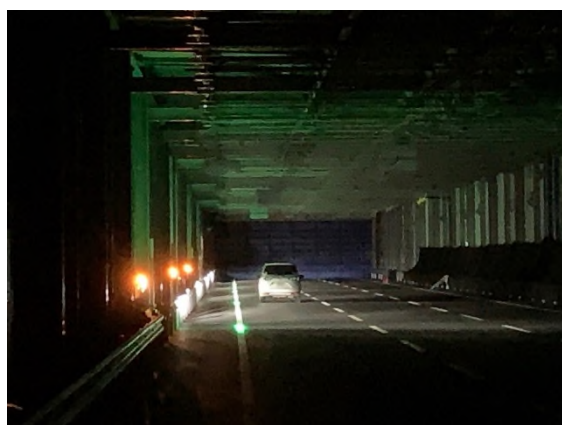


写真-5 仮想環境試験(晴天時)

表-3 仮想環境試験結果(晴天時)

点灯モード			位置	視標反射率	視標の視認率
本線	誘導	側線			
全光	全光	調光	器具中間	左側 (10%)	95.80%
				右側 (5%)	95.80%
点灯モード			路面の明るさムラ	外側線・視線誘導照明目立ち	照明全体の連続性
本線	誘導	側線			
全光	全光	調光	3.88	4.21	4.13
点灯モード			位置	先行車の視認性	まぶしさ
本線	誘導	側線			
調光	調光	調光	器具中間	4.42	4.46
点灯モード			走行性	まぶしさ	照明全体の連続性
本線	誘導	側線			
調光	調光	調光	4.25	4.33	4.54

(2) 晴天時の仮想環境試験結果

晴天時における仮想環境試験の結果の例を表-3に示す。なお、照明の調光制御については、本四高速における実際の点灯モードで照明評価を行うこととした。

晴天時の仮想環境試験の結果、プロビーム照明方式の採用効果から、低位置照明方式において懸念される、「まぶしさ」の評価項目において、静止及び走行の両試験で、5段階評価の内、評価値4点を上回る良好な評価となった。また、「視標の視認性」やその他照明性能の各項目においても良好な評価となり、晴天時におけるプロビーム照明、外側線照明並びに視線誘導照明の有効性を確認することができた。

(3) 濃霧時の仮想環境試験結果

濃霧時における仮想環境試験の結果の例を表-4に示す。なお、照明の調光制御については、実際の点灯モードで照明評価を行うこととした。

濃霧時の仮想環境試験の結果、評価数値は晴天時を若干下回るものの、全評価項目において、5段階評価の内、評価値3点を大きく上回る良好な評価が得られた。今回の仮想環境試験によって、新たな海峡部低位置道路照明設備は、濃霧時にあっても、予定していた通りの視線誘導効果が発揮されるものと確認できた。

(4) 実橋試験概要

仮想環境試験に続いて、明石海峡大橋（3車線）及び北備讃瀬戸大橋（2車線）において、一部区間に試作器具を設置しての実橋試験を行った。評価は一般利用者によるアンケート回答とし、近隣休憩施設へのポスター（二次元バーコード読み込み）掲示によるものとした。試験環境条件は表-5、アンケート内容については図-3に示す。

表-4 仮想環境試験結果(濃霧時)

点灯モード			路面の明るさムラ	外側線・視線誘導照明目立ち	照明全体の連続性
本線	誘導	側線			
全光	全光	調光	3.96	3.58	3.75
点灯モード			位置	先行車の視認性	まぶしさ
本線	誘導	側線			
調光	調光	調光	器具中間	3.25	4.29
点灯モード			走行性	まぶしさ	照明全体の連続性
本線	誘導	側線			
調光	調光	調光	3.54	4.25	4.21

表-5 実橋試験実施環境条件

試験 区間	明石海峡大橋 下り線 16.0kp～16.3kp 北備讃瀬戸大橋 上り線 27.6kp～27.3kp
試験 器具	広スパン低位置プロビーム照明器具 (外側線照明(緑色),視線誘導照明(橙色)含む) 10台/橋
設置 方法	設置高さ1.3m前後※(標準部,器具中心) 設置間隔26～30m※ ※現地設置場所条件による
調光 制御	・本線照明(プロビーム照明方式) 2段階(全光:100%点灯,調光:50%点灯) ・外側線照明と視線誘導照明 1段階(調光:50%) ただし,本線照明は既設ポール照明と同様の調光
評価 方法	SA・PAでのポスター掲示(二次元バーコード)による

- (1) 回答されている方の年齢を教えてください。(回答時の満年齢)
35歳以下/36～50歳/51～65歳/66歳以上/答えたくない
- (2) 照明器具が変わっている区間(低位置照明)があったことに気づきましたか?
気づいた / 気づかなかった
- (3) 照明器具が変わっている区間(低位置照明)の「運転のしやすさ」はいかがでしたか?
運転しやすかった/どちらともいえない/運転しにくかった/わからない
- (4) 照明器具が変わっている区間(低位置照明)の明るさの変化は感じましたか?
感じなかった/明るかった/暗かった/わからない
- (5) 照明器具が変わっている区間(低位置照明)において,前方に先行車は走っていましたか?
走っていた/走っていない/覚えていない
- (6) 照明器具が変わっている区間(低位置照明)において,普段と比べて前方の先行車の見え方に
変化は感じましたか?
感じなかった/見やすかった/見にくかった/わからない
- (7) 今回試験的に設置した「新たな照明器具(低位置照明)」の,よかった点や期待する点について,ぜひお聞かせください。(記述回答)

図-3 実橋試験アンケート画面

a) 明石海峡大橋

明石海峡大橋での実橋試験状況を写真-6に,試験結果を,表-6に示す。

明石海峡大橋での実橋試験の結果,約8割の方が運転しやすかったと回答した。また,「明るさ」と「先行車の見え方」について,いずれも約9割と約8割の方が既存の道路照明と同等以上であったと回答している。自由記述についても,普及拡大への期待が多数であったことも踏まえると,明石海峡大橋では想定した有効性を確認できた。



写真-6 明石海峡大橋実橋試験

表-6 明石海峡大橋試験結果

し や す さ の 運 転	選択肢	回答数	割合(%)
	運転しやすかった	192	78
	どちらともいえない	43	17
	運転しにくかった	5	2
明 る さ の 変 化	選択肢	回答数	割合(%)
	運転しやすかった	54	22
	どちらともいえない	163	66
	運転しにくかった	9	3
先 行 車 の 見 え 方	選択肢	回答数	割合(%)
	運転しやすかった	43	34
	どちらともいえない	66	52
	運転しにくかった	2	2
	わからない	15	12

※先行車なしは除外

b) 北備讃瀬戸大橋

北備讃瀬戸大橋での実橋試験の結果を,表-7に示す。北備讃瀬戸大橋での実橋試験の結果,約7割の方が運転しやすかったと回答した。また,「明るさ」と「先行車の見え方」について,いずれも約9割と約8割の方が既存の道路照明と同等以上であったと回答している。北備讃瀬戸大橋でも想定した有効性を確認できた。

表-7 北備讃瀬戸大橋試験結果

し や す さ の 運 転	選択肢	回答数	割合(%)
	運転しやすかった	172	73
	どちらともいえない	51	22
	運転しにくかった	5	2
明 る さ の 変 化	選択肢	回答数	割合(%)
	運転しやすかった	54	23
	どちらともいえない	146	62
	運転しにくかった	13	5
先 行 車 の 見 え 方	選択肢	回答数	割合(%)
	運転しやすかった	41	34
	どちらともいえない	58	49
	運転しにくかった	5	4
	わからない	15	13

※先行車なしは除外

6. まとめ

本稿においては、本四高速海峡部長大橋梁への新たな海峡部低位置道路照明の採用及び試験施工について、仮想環境試験と実橋試験による評価を行った結果、各試験とも良好な評価であった。

仮想環境試験においては、一般参加者のアンケートで視標の視認性や明るさのムラ等の各項目でポジティブな評価を得た。実橋試験においては、一般利用者へのアンケート結果から、運転のしやすさ、明るさ及び先行車の見え方の全ての項目において既存のボール照明方式以上の性能とのポジティブな評価を得て、低位置道路照明の有効性を確認した。

今後、実橋への本施工の際には、道路勾配等の影響による対向車線へのまぶしさ抑制を考慮した設置が必要となり、各種光学性能との両立には厳密な器具の設置角度調整が必要となる。

本四高速では、各道路構造要件によって、光学性能及びまぶしさを満足する器具設置角度が異なることに着目し、適切な照明性能を確保しつつ、施工性の効率化及び定量的な設置品質が可能となる、低位置道路照明設置マニュアルを策定する予定である。

最後に、今回の海峡部低位置道路照明を整備することによる効果を報告する。高所作業車や車線規制費用が不要となることと広スパンのLED照明となることから、表—8に示す効果が期待できる。本四高速では、新たな海峡部低位置道路照明の整備を通じて、維持管理の効率化とカーボンニュートラルに貢献していく所存である。

表-8 海峡部低位置道路照明整備による効果

項目	現行道路照明 (千円/年)	海峡部低位置道路照明 (千円/年)	削減率 (%)
維持管理費用 の削減	29,312	312	99
電力消費量 の削減※	10,709	3,937	64

※従来LED照明(ボール方式)と比較、電力料金は、中国電力(株)高圧TOUA参考)

謝辞：本報告は、学識者並びに国土交通省等の有識者からなる、「海峡部低位置道路照明見え方評価委員会」(座長：萩原 亨 北海道大学大学院 教授)の指導を受け、同委員会委員及び関係各位の献身的な協力により、海峡部低位置道路照明の照明性能及び走行視環境において有効性を確認した。謝意を表します。

今後は、効率的且つ適切に照明性能と走行視環境を構築できるよう設置マニュアル(仮称)を策定、令和7年度中の整備完了を目指して参りますので、関係の皆様におかれましては、今後ともご支援ご指導を賜りたく、よろしくお願い申し上げます。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：道路照明施設設置基準・同解説,2007.10
- 2) 谷口誠：本四道路海峡部長大橋における低位置道路照明設備の採用検討,第 32 回本四高速グループ技術発表会,2022.11
- 3) 本州四国連絡高速道路株式会社：海峡部道路照明施設(広スパン低位置プロビーム照明方式)設置基準(案),2022.3