

令和2年度

建設施工と建設機械シンポジウム  
論文集・梗概集

令和2年12月2日～12月3日

機 械 振 興 会 館

主催：一般社団法人 日本建設機械施工協会

後援：経済産業省 国土交通省 (国研)土木研究所



令和2年度

建設施工と建設機械シンポジウム  
論文集・梗概集

令和2年12月2日～12月3日

機 械 振 興 会 館

主催：一般社団法人日本建設機械施工協会

後援：経済産業省 国土交通省 (国研) 土木研究所



## 論文審査規定概要

### 1. 審査方法

論文の審査は、論文アブストラクト及び本論文の2段階で行い、アブストラクトについてはシンポジウム実行委員会委員が全編を審査し、本論文については1編あたり5名の委員が審査を行う。

下記の審査基準に基づき、実行委員会にて採択を決定する。

### 2. 審査基準

論文の完成度、有用性、新規性並びに本シンポジウムの主旨に合致するかどうかの視点で採否の判断を行う。

### 3. 審査委員名簿（委員五十音順・敬称略）

	委員名	機関名・会社名	所属
委員長	建山 和由	立命館大学 理工学部	教授
副委員長	高橋 弘	東北大学 大学院環境科学科	教授
委員	阿部 里視	コマツ 商品企画本部	商品企画室
委員	岩崎 辰志	国土交通省 関東地方整備局	企画部 施工管理課
委員	北山 孝	西尾レントオール（株）	通信測機営業部
委員	木下 洋一	鹿島道路（株）	生産技術本部機械部
委員	玉石 修介	（一社）日本機械土工協会	
委員	行川 恒弘	前田道路（株）	工事事業本部 工事技術部
委員	東谷 和巳	コベルコ建機（株）	技術開発本部 クレーン開発部
委員	福田 智之	（株）大林組	ロボティクス生産本部 企画管理
委員	藤島 一雄	日立建機（株）	事業戦略室 商品戦略
委員	本田 肇	（株）トプコン	スマートインフラ事業本部 スマートインフラ営業サポート部
委員	増 竜郎	国土交通省 総合政策局	公共事業企画調整課
委員	森川 博邦	（国研）土木研究所	技術推進本部 先端技術チーム
委員	山本 茂太	キャタピラージャパン(同)	販売促進部
委員	渡部 純	（株）カナモト	レンタル事業部 広域特需営業部
委員	伊藤 文夫	（一社）日本建設機械施工協会	施工技術総合研究所
委員	畑田 健	（一社）日本建設機械施工協会	
委員	西脇 徹郎	（一社）日本建設機械施工協会	



## 「建設施工と建設機械シンポジウム」論文集・梗概集

## 目次

○印 発表者

## I 論文集

1. 磁気マーカシステムを用いた除雪車走行支援ガイダンスに関する実験 . . . . . 1  
 (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 ○新保 貴広、舟橋 誠、久慈 直之
2. 軟弱地盤における建設機械の走破性に関する基礎的実験 . . . . . 5  
 (国研) 土木研究所 ○山田 充
3. ドローン撮影画像を用いた簡易な路面ひび割れ測定技術の開発 . . . . . 9  
 (株) NIPPO ○其田 直樹、相田 尚  
 (株) 構造計画研究所 高幣 玲児
4. 路面自走ロボットを活用した舗装工事の省人化技術 . . . . . 13  
 (株) NIPPO ○立花 洋平、梶原 覚、相田 尚
5. 路盤鉄筋コンクリート施工における出来形精度向上と品質確保、工程短縮の取り組み  
 九州新幹線(西九州)彼杵川橋りょう工事路盤鉄筋コンクリート施工報告 . . . . . 17  
 (株) 鹿島道路 ○野田 哲也
6. 2016年度からの土木業界における i-Construction における取り組みと建設機械技術の動向  
 . . . . . 23  
 日本大学 大学院理工学研究科 ○久保田 雄基  
 日本大学理工学部 関 文夫
7. 斜め往復撮影による標定点不要の造成地 UAV 写真測量手法の開発 . . . . . 27  
 (株) フジタ ○松岡 祐仁  
 山口大学 神野 有生、高田 雅也
8. RTK-GNSS 搭載型 UAV を用いた空中写真測量における標定点数削減に関する検討  
 . . . . . 31  
 国交省 国土技術政策総合研究所 ○木村 圭佑、山下 尚、小塚 清
9. 土工の出来高算出における動画を使う写真測量の精度確認手法と撮影条件 . . . . . 35  
 国交省 国土技術政策総合研究所 ○金森 宗一郎、小塚 清  
 (国研) 土木研究所 森川 博邦
10. 見える化技術を活用した建設現場の新たな取り組み  
 ー新名神枚方工事における「建設現場の見える化」技術の導入実績ー . . . . . 39  
 鹿島建設(株) ○大屋 満
11. 遠隔臨場による移動レス・接触レスな働き方改革 . . . . . 43  
 映像活用 CIM 研究会 ○柳瀬 ひろし  
 (株) 環境風土テクノ 須田 清隆  
 (株) 堀口組 漆館 直
12. 発注者への ICT 施工に関するアンケート調査について . . . . . 47  
 国交省 関東地整 関東技術事務所 ○河野 智一
13. 標準歩掛と情報理論を用いた新技術の生産性評価手法 . . . . . 51  
 国交省 関東地整 関東技術事務所 ○高津 知司

14. 市町村工事を対象とした ICT 施工の導入を目指した取り組みについて	55
国交省 近畿地整 ○武本 昌仁	
15. 電子制御を活用した HMT (Hydraulic Mechanical Transmission) ホイールローダの開発	57
(株) 小松製作所 ○竹野 陽、村本 卓也、講堂 康史朗	
16. 新型除雪グレーダ用可変幅型ブレードの開発	63
国交省 東北地整 東北技術事務所 ○田村 直樹、宇野 賢一	
17. 高強度モルタル供試体における多段型モデル掘削機の掘削性能についての実験的考察	67
呉工業高等専門学校 ○宮永 渚生、重松 尚久、杉原 綾乃	
18. 硬質地盤に対応した深層混合処理工法の開発と適用事例	71
(株) 不動テトラ ○永石 雅大、田中 肇一、梅田 洋彰、杉野 秀一	
19. 重機搭載レーザー計測システム (トンネル版) の開発	75
ICT 技術を使ったインバート掘削の出来形計測検証	
(株) フジタ ○中村 多聞、浅沼 廉樹	
ジオサーフ CS (株) 浮田 真樹	
20. トンネル工事の省力化について	81
ロックボルタを搭載した多機能機械「マルチジャンボ」	
(株) フジタ ○野正 裕介、浅沼 廉樹	
古河ロックドリル (株) 能代 泰範	
21. 磁界センサを活用した作業員検知警報・停止システム	87
ー3K (きつい・汚い・危険) からの脱却ー	
(株) アクティオ ○今関 政美、稲葉 誠一、安田 勇介	
22. ICT 技術を用いた人と重機の接触災害リスク低減システムの開発	91
ー人と重機の協調安全ー	
清水建設 (株) ○奥田 悠太、藤井 暁也、佐藤 有	
23. ミリ波レーダと可視カメラを組み合わせた周辺監視センサーの開発と評価結果	97
ーミリ波とカメラの融合による人検知性能の向上ー	
三菱電機 (株) ○八十岡 興祐	
(株) 熊谷組 畑本 浩伸、飛鳥馬 翼	
24. パーカッションドリル機を用いた高圧噴射攪拌の斜施工機械の開発	101
三信建設工業 (株) ○木田 匠紀、島野 嵐、萩原 耕太、大栗 雅明、鈴木 英文	
25. 立坑掘削土揚重の改善に向けたローラ付き底開きベッセルおよび円形架台の開発と使用実績	105
ー島根原子力発電所 2 号機地下連絡ダクト設置工事に係る作業立坑掘削工事ー	
鹿島建設 (株) 安彦 柳一、東原 秀明	
26. 小断面トンネル自動吹付機システムの開発	111
(株) 熊谷組 ○梶野 瑞基、宮川 克己、手塚 仁	
27. 積雪時におけるラウンドアバウトエプロン端部の可視化方法に関する検討	115
(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 ○久慈 直之、舟橋 誠、新保 貴広	
28. ICT 活用による除雪トラックのマシンコントロール化	121
国交省 北陸地整 北陸技術事務所 ○小浦方 一彦、小泉 倫彦	
29. ウェアラブルデバイスを用いた遠隔現場巡回システムの考察	125
清水建設 (株) ○佐藤 有、鈴木 正憲、奥田 悠太	

30. 施工現場でのリスク評価と映像を活用したリスク予知教育		
	ーアイトラッキング調査と VR の活用ー	127
	可児建設 (株) ○可児 憲生	
	トライポッドワークス (株) 渋谷 義博	
	(株) 環境風土テクノ 須田 清隆	
	(株) 堀口組 漆館 直	
31. インフラメンテナンス新技術・体制等導入推進委員会の取り組みについて		131
	国交省 総合政策局 公共事業企画調整課 ○東山 遼	
32. インフラ維持管理における AI・3次元モデルを用いたロボット技術の活用拡大に向けた取組		135
	国交省 総合政策局 公共事業企画調整課 ○川口 貴大、渡邊 賢一	
33. 排水機場の状態監視モニタリングシステム構築と異常データ検知 AI 手法に関する研究		139
	(国研) 土木研究所 ○須山 友貴、上野 仁士、黒田 浩章	
34. 高温域における煙突補修装置の開発 ー高温域煙突内部吹付装置ー		143
	(株) 奥村組 ○城井 光雄	
	日本製鉄 (株) 丸山 宣男、小林 淳二	
35. 既設コンクリート構造物のあと施工せん断補強に伴う		
	削孔作業に適用する自動削孔装置の開発	149
	(株) 奥村組 ○有川 健、三澤 孝史、西山 宏一、石井 敏之	
36. 現況路面データを基準に用いた GNSS 切削システム		
	ー評価結果と今後の運用についてー	155
	(株) トポコンポジショニングアジア ○平岡 茂樹	
	兵庫県 県土整備部 中田 和秀	
	(一社) 施工技術総合研究所 八木橋 宏和	
37. UAV を活用した橋梁点検の撮影方法に関する考察		161
	(国研) 土木研究所 ○下川 光治、森川 博邦、服部 達也、榎本 真美、二宮 建	
38. 水路トンネル調査ロボットの開発		
	ー自律飛行可能な飛行船型ロボットによる水路トンネル調査の適用性確認ー	167
	西松建設 (株) ○松浦 誠司、原田 耕司	
	長崎大学 山本 郁夫	
39. 写真計測 (SfM/MVS) を活用した低コストな路面損傷調査の試行報告		171
	(株) 環境風土テクノ ○本田 陽一	
	(株) 愛亀 黒河 洋吾	
	宮城大学 蒔苗 耕司	
40. 誰でも働ける現場を目指した「遠隔臨場」が作業効率に与える影響の研究		175
	コベルコ建機 (株) ○藤原 裕介、山崎 洋一郎、佐伯 誠司	
41. 自動運転油圧ショベルの現場実証		179
	(株) 安藤ハザマ ○武石 学	
	コベルコ建機 (株) 土井 隆行、野田 大輔	
42. モニター画像からの重機の状態推定と現場環境モデルの構築に関する研究		183
	芝浦工業大学 ○酒井 優、手塚 悠太、吉見 卓	
43. AI を用いて映像中の建設機械を自動的に検出するシステムの開発		189
	(株) 安藤ハザマ ○早川 健太郎、木村拓磨	
	富士ソフト 増田 裕正、寺原 勲	

44. 遠隔臨場を活用した多人数コミュニケーションの実験的報告	・・・・・・・・	195
	可児建設(株)	可児 純子
	立命館大学	横山 隆明
	(株)環境風土テクノ	○須田 清隆
45. 超大型建築現場における生産性向上を目指した資機材管理システムの開発と導入	・・・・・・・・	199
	鹿島建設(株)	○中澤 勇介、内田 佳親、犬窪 昭裕
46. 地理空間情報アーカイブ活用における航空レーザ点群の土工事への適用性検証	・・・・・・・・	205
	(株)安藤・間	○澤城 光二郎
	朝日航洋(株)	大伴 真吾

## II 梗概集

### II-1 ポスターセッション要旨

1. 地上写真測量（動画撮影型）土工の出来高算出要領（案）に対応  
－「Solution Linkage Survey」による現場計測－ . . . . . 209  
日立建機（株） ○ 田中 一博
2. 高所作業車における安全対策の提案  
（挟まれ防止装置や転倒防止装置等の安全対策の紹介） . . . . . 211  
（株）カナモト ○清水 亮、吉田 道信
3. 舗装工事におけるプッシュオフ式トレーラ導入による有効性の検証  
－材料運搬の側面から人手不足解消と舗装の品質向上を求めて－ . . . . . 213  
（株）NIPPO ○土肥 真也、梶原 覚  
トップアローズ（株） 矢崎 翔太
4. 現場第一主義が生み出す「生きた技術」－『TITRC 土木 ICT  
ソリューションシステム』クラウドによる土木事業全体の一括集中管理－ . . . . . 215  
タイトレック（株） ○山口 孝人、野中 浩平、村上 四季
5. 排水ポンプ車のポンプ設置作業の安全性向上 . . . . . 217  
国交省 中部地整 中部技術事務所 ○鶴田、勇、大坪 晋作
6. 作業効率化と安全性能の向上を両立した次世代の高所作業車  
－次世代高所作業車 建トウナー－ . . . . . 219  
（株）レンタルのニッケン ○湯島 一郎、研 次郎
7. ウェアラブルデバイスを用いた遠隔現場巡回システム . . . . . 221  
清水建設（株） ○佐藤 有、鈴木 正憲、奥田 悠太
8. 現場の清掃作業をロボットと協働  
－自動清掃車「e-madillo」－（自動運転で省力化） . . . . . 223  
西尾レントオール（株） ○佐藤 芳和、山口 秀樹
9. 橋梁点検の作業性向上について ～ 橋梁点検昇降装置の開発 ～ . . . . . 225  
国交省 九州地整 九州技術事務所 ○深町 真吾、福川 雅章
10. 小型マイコンを用いた建設現場計測用 IoT 機器の試作 . . . . . 227  
立命館大学 ○横山 隆明、建山 和由
11. 施工現場でのリスク評価と映像を活用したリスク予知教育  
－アイトラッキング調査と VR の活用－ . . . . . 229  
（株）建設 IoT 研究所 ○可児 憲生  
（株）環境風土テクノ 須田 清隆  
立命館大学 横山 隆明
12. しなやかだけど強靱！ポリウレアなのに簡単！常温型コンクリート舗装補修材「ニンジャシール」  
コンクリート舗装に発生する目地部分の角かけ、ひび割れ、段差、水の侵入を解決！  
. . . . . 231  
（株）ガイアート ○渡邊 大介、小川 登



# I 論文集



# 1. 磁気マーカシステムを用いた 除雪車走行支援ガイダンスに関する実験

(国研) 土木研究所 寒地土木研究所  
(国研) 土木研究所 寒地土木研究所  
(国研) 土木研究所 寒地土木研究所

○新保 貴広  
舟橋 誠  
久慈 直之

## 1. はじめに

近年、積雪寒冷地では極端な暴風雪に伴い、車両の立ち往生や長時間にわたる通行止め等が増えてきている。このため、暴風雪による視程障害時においても安全に除雪作業を行い、道路交通の早期解放を可能とする除雪車の開発に対する現場ニーズは高い。

視程障害時に安全に除雪作業を行うには、除雪車の自車位置を正確に測位し、車線内を走行させるための車線走行支援技術が必要である。自車位置推定には、GNSSによる衛星測位を用いることが基本となるが、衛星不感地帯では別の測位技術を用いる必要がある。そこで、気象の影響を受けにくく、自動運転技術にも活用されている磁気マーカを用いた自車位置推定システムによる車線走行支援ガイダンスを試作し、試験道路において測位精度及びガイダンス性能の検証実験を行ったので報告する。

## 2. 磁気マーカシステムを用いた自車位置推定の概要

磁気マーカシステムは、道路に埋設した磁気マーカを車両底部に設置した磁気センサで検知することで、自車位置を測位する技術である。同技術は、国土交通省が実施する「道の駅等を拠点とした自動運転サービス」における実証実験のうち、路車連携型の自動運転バスに利用されている<sup>1)</sup>。

車線走行支援ガイダンスには、愛知製鋼(株)製の磁気マーカシステムを使用した。また、磁気マーカシステムの位置情報と慣性計測装置(Inertial Measurement Unit 以下、「IMU」という)による自律航法を組み合わせた自車位置推定システムを新たに開発した。自車位置推定システムの概要図を図-1に示す。

自車位置推定システムは、IMUによる自律航法を主としているが、IMUは観測時間の経過とともに測位誤差が累積される。そこで磁気マーカシステム

の位置情報により測位誤差を補正する仕組みとなっている。

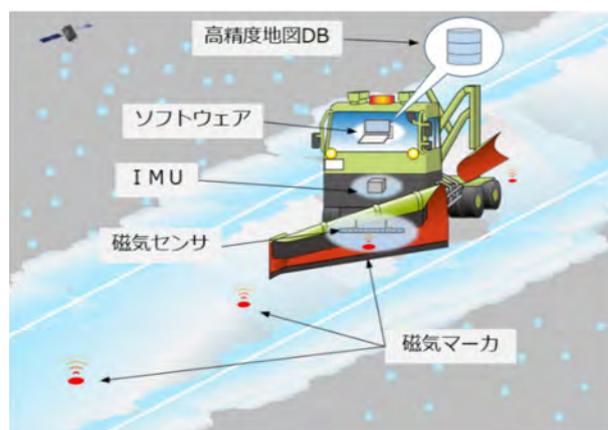


図-1 自車位置推定システム概要図

## 3. 磁気マーカシステムを用いた車線走行支援ガイダンスの検証実験

磁気マーカシステムとIMUを組み合わせた自車位置推定システムを用いた車線走行支援ガイダンスを試作し、自車位置の測位精度を検証するとともに、ガイダンス情報に従い車線を逸脱せずに走行可能か検証実験を行った。

### 3.1 ガイダンス試作機の作製

ガイダンス試作機は、ロボット用オープンソースソフトウェア「ROS」<sup>※1</sup>の可視化ツールである「RViz」をベースに新たに開発したものである。RVizは、ROSで通信されるデータであれば種類を問わず表示することができ、外部からのセンサ情報やロボットの形状モデル、地図、計画軌道などを三次元表示することができる。

実験を行った寒地土木研究所苫小牧試験道路の高精度三次元地図を作成し、ベクターマップにより区画線と走行車線の中心にガイダンス用の走行目安線を表示した。また、現在位置や道路周辺状況

を把握しやすいように、点群情報を基に道路や道路周辺の起伏・背景をカラー表示した。

ガイダンス画面はオペレータの運転操作のしやすさを考慮し、運転席からの視点（以下、「コックピットビュー」という）、後方からの鳥瞰的な視点（以下、「バードビュー」という）、カーナビゲーションのような二次元的な視点（以下、「2Dビュー」という）の3種類を設定した。図-2 にガイダンス画面例を示す。

なお、測位方法は、磁気マーカシステムと IMU の組み合わせによる自車位置推定（以下、「磁気マーカ方式」という）のほかに磁気マーカシステムの測位精度を検証するため RTK-GNSS（以下、「RTK方式」という）による測位も可能としている。



図-2 ガイダンス画面例（バードビュー）

### 3.2 実験概要

磁気マーカ方式による測位精度の検証は、磁気マーカを埋設した直線部 L=240m と曲線部 L=160m で行った。ガイダンス性能の検証は直線部から曲線部にかけて連続的に走行させるため、試験コースを半周させた。そのため測位方法は RTK 方式で行った。また、視程障害時における運転操作性を検証するため、フロントガラス全面の視界を遮断し、視程障害時を模擬的に再現した状況において、ガイダンス情報を頼りに車線を逸脱せずに走行する実験を行った。

実験場所平面図を図-3 に、除雪車外観を写真-1 に、運転室内状況を写真-2 に示す。

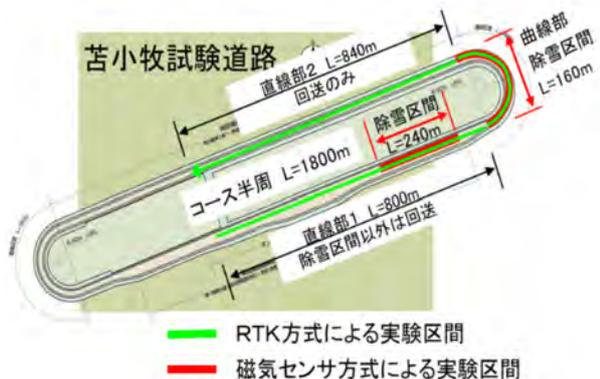


図-3 実験場所平面図



写真-1 除雪車外観



写真-2 運転室内状況

### 3.3 磁気マーカ方式による測位精度検証実験

磁気マーカ方式による測位精度の検証は、磁気マーカを埋設した直線部と曲線部において、設置間隔の違いによる測位精度を検証した。

磁気センサは、除雪トラックの前方底部にブラケットを取り付け、地上高 25cm の位置に設置した（写真-3）。磁気マーカは、直径 30mm、高さ 20mm の埋設型マーカを、車線中央部に深さ 3cm で削孔した穴に埋設し、表層 1cm を充填剤にて充填した（写真-4）。



写真-3 磁気センサ設置状況



写真-4 磁気マーカ埋設状況



実験はガイダンス種類毎に2回行い、実験結果は道路条件及び走行条件毎に分割し平均処理を行った。目標精度は磁気マーカ方式と同様に±50cmとした。

コックピットビューでは、直線部の除雪時においては目標精度を達成できたが、直線部の回送時と曲線部の除雪時では、左右方向の最大離隔距離が50cmを超える箇所があった。しかし最大離隔距離範囲では1m以内に収まっていることから概ね目標精度を満たしていると評価した。

バードビューでは、直線部の回送時と除雪時においては目標精度を達成できた。曲線部の除雪時では最大離隔距離範囲が1mを超えているため目標を達成できていない。

2Dビューはコックピットビューと同様の結果となった。一方、比較のため実施した目視による通常走行では、直線部の回送時と除雪時は目標精度内で走行できたが、曲線部では最大離隔距離範囲が1mを大幅に超える結果となった。

表-3 ガイダンス性能検証実験結果

ガイダンス種類	走行条件	道路条件	平均離隔距離(m)	最大離隔距離範囲(m)		評価
				左方向最大離隔距離(m)	右方向最大離隔距離(m)	
無し (通常走行) 視界遮断無	回送	直線	0.00	0.49		○
				-0.26	0.24	
	除雪	直線	0.16	0.39		○
				-0.03	0.37	
除雪	曲線	-0.23	1.28		×	
			-0.84	0.44		
コックピットビュー 視界遮断有	回送	直線	-0.36	0.71		△
				-0.61	0.10	
	除雪	直線	-0.08	0.40		○
				-0.32	0.08	
除雪	曲線	0.14	0.80		△	
			-0.23	0.57		
バードビュー 視界遮断有	回送	直線	0.02	0.60		○
				-0.30	0.30	
	除雪	直線	0.05	0.35		○
				-0.12	0.23	
除雪	曲線	0.10	1.13		×	
			-0.56	0.56		
2Dビュー 視界遮断有	回送	直線	-0.14	0.79		△
				-0.55	0.25	
	除雪	直線	-0.19	0.48		○
				-0.46	0.02	
除雪	曲線	-0.18	0.69		△	
			-0.53	0.16		

通常走行とガイダンス種類毎の平均離隔距離を比較すると、直線部の回送時及び除雪時では、通常走行とバードビューの平均値は小さく道路中心寄りに走行する傾向が見られた。また、コックピットビューと2Dビューは、左方向に偏る傾向が見られた。

曲線部では目視による通常走行でも左方向に偏る傾向があり、2Dビューは同様の傾向を示したが、コックピットビューとバードビューでは、緩和される傾向が見られた。通常走行では、路面状況が圧雪のため中央線や外側線が視認できなかったことから、道路中心より左寄りに走行したものと考えられる。一方コックピットビューやバードビュー

では、ガイダンス画面上に区画線や走行目安が表示されているため、バラツキはあるものの道路中心に沿って走行することができた。

オペレータへのヒアリングでは、除雪車モデルと3D地図との位置合わせに慣れが必要だが、慣れると走行に支障は無いことがわかった。また、3D地図に背景があるため位置関係を把握しやすい、特にバードビューは俯瞰のため道路の先を見通せ、距離感を掴みやすかった。

但し、バードビュー、コックピットビューともに曲線部の出入りではハンドル操作の遅れが生じる場合があるため、ある程度の習熟は必要と思われる。また、画面を見ながらの運転でも画面酔いをすることは無いことが確認できた。

ガイダンス性能の検証実験の結果、コックピットビュー及びバードビューでは、視界を遮断した状況においてもガイダンス情報に従って車線逸脱することなく除雪作業が可能ことが確認できた。また、オペレータへのヒアリングの結果、バードビューが最も高い評価を得た。

#### 4. まとめ

暴風雪による視程障害時でも安全に除雪作業が行える運行支援技術として、磁気マーカシステムとIMUを用いた自車位置推定システムの車線走行支援ガイダンスを試作し、除雪車の前方視界を遮断した状態でガイダンス情報に従って車線内を走行する実験を行った。

車線走行支援ガイダンスは、目標測位誤差(±50cm以内)で自車位置を表示し、車線逸脱することなく除雪作業が可能であることを確認した。

今後は、主たる測位方法である衛星測位(みちびき等)に関する一般道での検証試験を行う予定である。

※1 ROS (Robot Operating System: ロボット用ソフトウェアプラットフォーム)

#### 参考文献

- 1) 中山間地域における道の駅等を拠点とした自動運転ビジネスモデル検討会:道の駅を拠点とした自動運転サービス「中間とりまとめ」(案),平成30年

## 2. 軟弱地盤における建設機械の走破性に関する基礎的実験

国立研究開発法人 土木研究所 ○山田 充

### 1. はじめに

土砂災害等の2次災害の可能性のある危険な現場の災害復旧工事では、建設機械のオペレータが建設機械に搭乗せずに安全な場所からカメラ画像等により建設機械を遠隔操作する「無人化施工」が適用されることが多い<sup>1)</sup>。近年は、異常気象による水災害が急増し、無人化施工が水災害に適用されるケースも増加している。

水災害現場においては、地盤は軟弱である可能性が高く、車両がぬかるみにはまり走行不能におちいる、いわゆるスタックが特に懸念される。災害現場内で無人化施工機械がスタックすると、救出に侵入することが難しいため、機械の復旧作業は極めて困難となる。

スタックを回避するためには、走破性の高い新たな車両を開発することや、既存車両の走行可否を判定する手法を構築する等の方法が考えられる。これらを実現するためには、スタック現象の具体的な原理を解明することが重要と考えられる。スタック現象の具体的な原理を解明できれば、スタックに支配的な要素を抽出し、それに対応できる車両機構の開発や、それを測定することに適した測定機材、測定手法の構築を行うことができる。

車両のスタック現象に関する既往研究では、室内模型実験や、シミュレーションによる研究、乾燥した砂質土を対象とした研究が多い<sup>2)3)</sup>。スタック現象を解明するためには、実際の車両を用いた実験や、スタックリスクが高いと考えられる高含水状態での地盤で実験を行うことが重要と考えられる。そこで本研究では、実際の建設機械を用い、屋外環境において、高含水地盤で車両の走破性に関する実験を行うこととした。

車両走行の力学モデルである Bekker 理論では、スタック現象は、車両の「牽引力」が「推進抵抗」を下回ったときに発生するとされている<sup>4)</sup>。すなわち、「牽引力」と「推進抵抗」の二つの力がどのように発生するのか、詳細に調査することがスタック現象の解明に有効と考えられる。

Bekker 理論では、牽引力  $H$  は土の粘着力  $c$ 、および内部摩擦角  $\phi$  の値が影響することを示している<sup>4)</sup>。一般に  $c$ 、 $\phi$  は土の含水比の増加、および密度の低下により減少する。含水比の高い軟弱な地盤では、走行地盤の  $c$ 、 $\phi$  値が減少し、牽引力が低

下し、スタックに至ることが考えられる。本研究では具体的に、土の密度と含水比が牽引力にどのような影響を与えるのか、土の密度と含水比を変化させ車両の牽引力を測定し調査するものとした。

また、Bekker 理論では、推進抵抗の主要な要素として、締固め抵抗  $R_c$ 、および排土抵抗  $R_b$  の二つがあること、締固め抵抗  $R_c$ 、および排土抵抗  $R_b$  は車両の沈下量が影響することを示している<sup>4)</sup>。すなわち、車両沈下を調査することが推進抵抗の発生メカニズムの解明に有効と考えられる。本研究では、車両沈下量と走行回数、地盤支持力、含水比、密度との関係性を調査するものとした。

### 2. 実験方法

#### 2.1 車両牽引力の測定

実験は、茨城県つくば市の土木研究所構内において実施した。実験状況を図-1に示す。反力(12t級の油圧ショベル)とクローラダンプをワイヤロープでつなぎ、反力とワイヤロープとの接続部に50kNロードセル(TLB-50KNB)を設置し、動的ひずみ測定器(DRA-30A)を用い、100Hzでロードセルの荷重値を測定した。実験は、ワイヤロープがたるんでいる状態からスタートし、クローラダンプをゆっくりと走行させ静かにワイヤロープを緊張させたのち、急激にスリップが起こらないように可能な限り少ない量でアクセル開度を上げていくようにして実施した。スリップが起こった時点でアクセル開度を固定し、その後、約1回転クローラを空転スリップさせたのちアクセルを抜いて実験終了とした。アクセルのコントロールはオペレータが感覚で行った。実験は同じ場所で3回実施した。実験に用いたクローラダンプの主要諸元を表-1に示す<sup>5)</sup>。

幅3m、長さ6m、深さ1mのピットを造成し、底面に厚さ0.5mに実験材料を敷均し、実験地盤を作成した。実験地盤に用いた土材料の基本物性値を表-2に示す。実験では締固め施工方法と含水比を変化させた3ケースの実験地盤を作成した。表-3に各ケースの実験地盤の作成条件を示す。

コーンペネトロメータを用い、実験地盤のコーン指数を測定した。図-2にコーンペネトロメータの外観を示す。コーンペネトロメータは、ロッドの先端に円錐(コーン)を有する測定装置である。コ

ーンを人力で 1cm /秒の速度で垂直に測定地盤に貫入し、貫入抵抗を測定する。測定された貫入抵抗はコーン指数と定義される。コーン指数は車両の走破性、いわゆるトラフィカビリティの判定指標とされている<sup>6)7)</sup>。コーン指数は実験前後に3点測定した。実験後のコーン指数は車両の履帯の走行跡で測定した。

ビデオカメラにより実験の全体状況、およびクローラ付近の近接動画を撮影した。実験終了後に走行跡の深さをスケールで3点測定した。地盤表面からラグ(クローラ表面の突起)先端までの深さを測定した。



図-1 実験状況(牽引力測定)

表-2 実験に用いた土材料の基本物性値

項目	数値	
土粒子密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.754	
自然含水比(%)	73.7	
粒度分布	2mm以上(%)	10.8
	2mm~75 $\mu$ mm(%)	35.4
	75 $\mu$ mm以下(%)	53.8
地盤材料の分類記号	MH	
液性限界(%)	119.7	
塑性限界(%)	67.6	
最大乾燥密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.761	
最適含水比(%)	16.7	

表-1 クローラダンブ主要諸元

項目	数値
全長	3.2m
車幅	1.7m
高さ	1.8m
車両重量	2.1t
積載重量	2.5t
接地圧力	55.2kPa

表-3 実験条件一覧(牽引力測定)

	締めめ方法	含水調整	攪拌方法
ケース1	プレートコンパクタ	自然含水比	無し
ケース2	無し(敷均しのみ)	自然含水比	無し
ケース3	無し(敷均しのみ)	加水	バックホウ

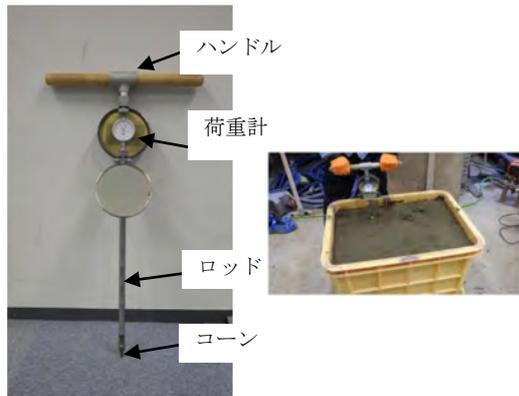


図-2 コーンペネトロメータ

## 2.2 車両沈下量の測定

実験は、茨城県つくば市の土木研究所構内において実施した。幅 3m、長さ 6m、深さ 1m のピットを造成し、底面に厚さ 0.5m に実験材料を敷均し、実験地盤を作成した。造成したピット内を、クローラダンブを一定速度(時速約 2km)で、直線走行で通過させた。実験状況を図-3 に示す。

締固め施工方法と含水比を変化させた 3 ケースの実験地盤を作成した。表-4 に各ケースの実験地盤の作成条件を示す。実験に用いた土材料、およびクローラダンブは「2.1 車両牽引力の調査」と同じである(表-1、表-2)。

走行回数 0, 1, 3, 5, 10 回で、車両の沈下量、およびコーン指数を測定した。車両通過後のコーン指数は車両走行跡で測定した。車両沈下量は、地盤表面からラグ先端までの深さとして測定した。走行回数 1 回目はスケールを用い測定し、それ以降はレーザ水準器を用い、車両中央付近に定めた一定の場所で沈下量の増減分を測定した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 車両牽引力の測定

図-4 に牽引力の測定結果を示す。牽引力の結果は測定 3 回目を典型例として示す。グラフ上の矢印はスリップ発生を示す。スリップ発生は撮影した動画より確認した。図-5 にコーン指数の測定結果を示す。コーン指数は貫入深さ毎の 3 点の平均値である。実験後のコーン指数は走行跡の測定結果の深さより測定データを示している。走行跡の深さの測定結果は、3 点の平均値で、ケース 1 で 0.10m、ケース 2 で 0.18m、ケース 3 で 0.22m であった。

図-4 よりケース 1、ケース 2 では、スリップ直前に最大牽引力が発生し、スリップ後に牽引力がやや低下し、波打つ傾向が見受けられた。一般に静止摩擦力にくらべ動摩擦力は小さい。最大牽引力



図-3 実験状況(車両沈下量測定)

表-4 実験条件一覧(車両沈下量測定)

	締めめ方法	含水調整	攪拌方法
ケース4	無し(敷均しのみ)	自然含水比	無し
ケース5	無し(敷均しのみ)	加水	無し
ケース6	無し(敷均しのみ)	加水	バックホウ

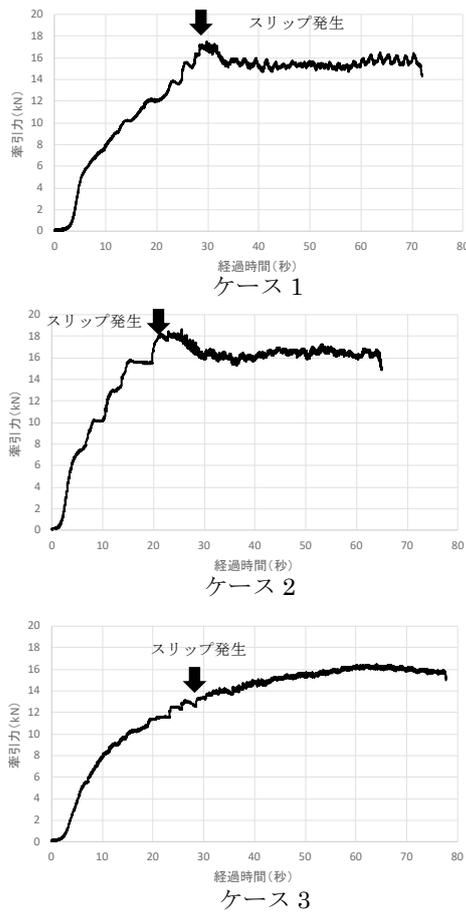


図-4 牽引力の測定結果

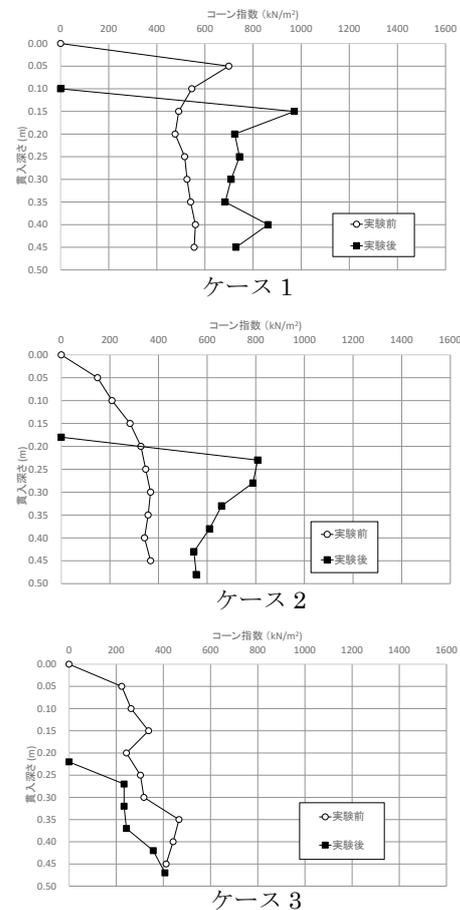


図-5 コーン指数の測定結果 (牽引力測定実験)

がスリップ直前に発生し、スリップ後に牽引力が低下するのは、地盤面とクローラの摩擦力が静止摩擦から動摩擦に変化したことが一要因と考えられる。スリップ後の牽引力の波うちは、スリップ後の空転により、ラグが新たに地盤面に接触するたびに発生したと考えられる。

図-4よりケース1とケース2の最大牽引力、およびスリップ後の牽引力にはさほど大きな差は見受けられなかった。ケース1とケース2は同じ自然含水状態の材料を用い、ケース1は締め固めを行い、ケース2は敷き均しのみで構築した。図-5より、ケース2において、実験前にくらべ実験後のコーン指数の値が大きくなり、ケース1の実験後のコーン指数の値に近づく傾向が見受けられた。実験前には地盤密度が低くコーン指数が小さかったが、車両重量により、実験地盤が締め固められ地盤の強度が増加し、牽引力がケース1と同程度となったものと考えられる。

図-4より、ケース3では、スリップ前後で牽引力が連続的に増加し、最大牽引力はスリップ中に測定された。図-5よりケース3では実験前後でコーン指数が最も小さく、地盤が軟弱だったと考えられる。スリップ前後で牽引力が連続的となったのは、軟弱な地盤条件ではクローラと地盤面の間にさほど摩擦力が働かず、スリップ前後の静止摩擦と動摩擦がいずれも小さかったことが考えられる。最大牽引力がスリップ中に発生したのは、実験地盤が軟弱だったため  $c$ 、 $\phi$  の値が著しく小さく、スリップ直前の牽引力が、スリップ後の牽引力より小さくなったためと考えられる。スリップ後の牽引力の主要な発生要因としてラグによる掘削抵抗が考えられる。ケース3は軟弱でスタックリスクが高い地盤条件と考えられる。ケース3の牽引力発生要因について引き続き詳細に検討する必要があると考えられる。

### 3.2 車両沈下量の測定

図-6に各ケースの走行回数毎の車両沈下量を示す。図-7には各ケースの走行回数毎のコーン指数を示す。コーン指数は3点の平均値である。ケース4のコーン指数は、走行3回目以降は貫入不可であった。また、ケース6は走行0回目のコーン指数の測定を行っていない。

図-6より、全てのケースで、車両の沈下量は走行回数3回以内で概ね一定の沈下量に収束する傾向が見受けられた。地盤の支持力と車両重量のバランスのとれるところまで沈下し、それ以上は走行回数に関わらず沈下が生じなかったと考えられる。

図-7より、コーン指数の値は、車両走行回数の増加により、若干増加するか、変化しない傾向が見受けられた。一般に軟弱地盤では、走行回数に伴い地盤の走行性は悪化すると考えられている。本実

験の地盤条件においては、走行回数に伴い車両走行性は悪化しなかったものと考えられる。今後、どのような地盤条件で走行回数に伴い走行性が悪化するのか、詳細に検討する必要があると考えられる。

図-7 より車両沈下量はコーン指数が最も小さいケース6で最大となり、コーン指数が最も大きいケース4で最小となった。コーン指数と車両沈下量に相関性があると考えられる。

ケース4、ケース5は、沈下量が比較体小さかった。沈下は車両重量による締固めで生じたと考えられる。ケース6では0.4m程度の大きな沈下が生じた。ケース6は地盤がかなり軟弱だったため、

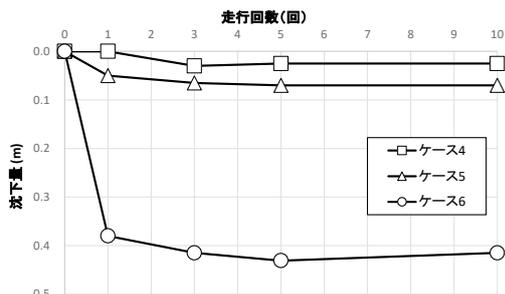
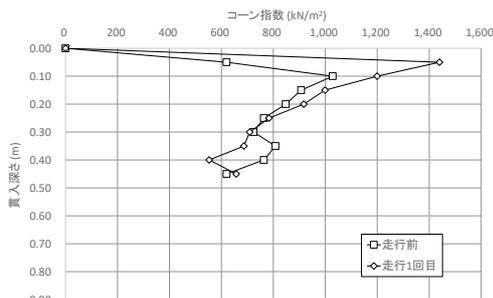
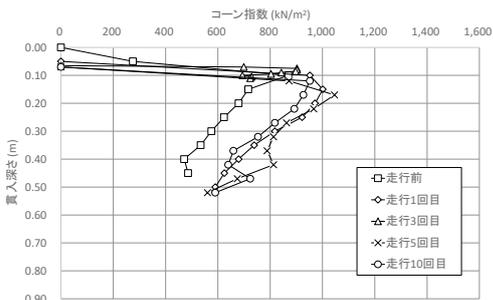


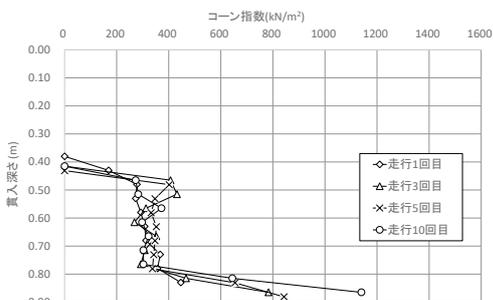
図-6 車両沈下量の測定結果



ケース4



ケース5



ケース6

図-7 コーン指数測定結果 (沈下量測定実験)

車両重量により地盤材料が流動し、比較的大きな車両沈下量を生じたものと考えられる。ケース6のように、比較的大きな車両沈下が生じると、車両底面が地盤に接地し、スタックリスクが高くなると考えられる。どのような地盤条件において、地盤材料の流動が起こり大きな車両沈下を生ずるのか、今後詳細に検討する必要があると考えられる。

#### 4. まとめ

本実験では、車両の牽引力と沈下量について、地盤の密度、含水比との関係性について調査した。その結果、以下の知見を得た。

- ・自然含水比の地盤では、最大牽引力がスリップ直前に発生し、スリップ発生後は牽引力が低下する傾向が見受けられた。
- ・高含水、低密度の地盤では、車両の牽引力がスリップ前後で連続的となり、最大牽引力がスリップ後に発生する傾向が見受けられた。
- ・繰り返し直線走行では、車両沈下量は一定の値に収束する傾向が見受けられた。
- ・コーン指数と車両沈下量に相関性が見受けられた。

#### 5. おわりに

本実験では、一種類の土材料のみでの実験にとどまっている。今後、様々な土材料で実験を行う必要があると考えられる。一般に履帯車両は曲線走行時に地盤表層を削るため、曲線走行ではより大きな沈下が生じる可能性がある。今後、曲線走行による車両沈下について、詳細に検討する必要があると考えられる。本実験結果はスタック現象解明のための極めて基礎的な知見に過ぎない。スタック現象解明のためには、引き続き様々な検討に取り組む必要がある。

#### 参考文献

- 1)建設無人化施工協会技術委員会：無人化施工の推移と展望，建設の施工企画，2006
- 2)江藤亮輔・山川淳也：路面形状が砂質土との相互作用に与える影響について，テラメカニクス第39号，pp.81-86，2019
- 3)堀江亮汰・平澤一暁：個別要素法を用いた履帯の所要動力の予測，テラメカニクス第39号，pp.67-72，2019
- 4)テラメカニクス研究会：履帯の設計工学，pp.31-36，2000
- 5) ヤ ン マ ー 株 式 会 社：  
[https://www.yanmar.com/media/jp/2015/catalog\\_old/c30r-2.pdf](https://www.yanmar.com/media/jp/2015/catalog_old/c30r-2.pdf)
- 6)日本道路協会：道路土工要領，pp.287，2009
- 7)地盤工学会：地盤調査の方法と解説，pp.290-295，2004

### 3. ドローン撮影画像を用いた簡易な路面ひび割れ測定技術の開発

(株)NIPPO 総合技術部 ICT 推進グループ ○其田 直樹  
(株)NIPPO 総合技術部生産開発センター 相田 尚  
(株)構造計画研究所次世代事業開発部 高幣 玲児

#### 1. はじめに

わが国の道路施設の維持修繕比率は、今後増加していくことが予測されている。道路施設の維持修繕は、道路施設を良好な状態に維持していくために必要であるが、維持・修繕に関わる予算には限りがあるため、道路施設の状態を的確に把握し管理することが重要である。

一般的に、舗装修繕の目安の一つとして、舗装路面のひび割れの数や幅、形状から舗装修繕実施の時期や規模を検討している。舗装路面の状態を把握するために行われるひび割れ調査の手法は、目視・スケッチによる人力での調査の他、路面性状測定車による調査がある。近年、路面性状測定車の普及により、供用車線のひび割れ調査は人力での調査と比べ短時間で広範囲の測定・評価が可能となっており、その有効性が証明されている。

しかしながら、路面性状測定車の適用範囲はあくまで車両が走行できる路面上に限定されている。例えば、自転車競技場をはじめとする車両走行が困難な路面では、未だに人海戦術による人力調査が実施されている。目視・スケッチによる路面のひび割れ調査は、人手と時間、さらには正確性の面で課題があることは周知の事実である。

路面性状測定車が走行できない路面を対象とした、ひび割れの延長や幅を簡易的に測定できる技術の開発を行い、人力による苦渋なひび割れ調査業務の生産性向上に取組んだ。本報告では、ドローンを活用した測定方法や解析方法の検討の考察と一部実路面の測定成果について述べるものである。

#### 2. ひび割れ調査に関する現状の課題と開発目標

##### 2.1 現状の課題

路面性状測定車が走行できないような、ひび割れ調査の省人・省力化が困難な路面では目視・スケッチによる路面のひび割れ調査が実施されているが、目視・スケッチによる路面のひび割れ調査には以下の課題がある。

①3~4人の人員を要する巡回作業は、労力と時間

を必要とする

- ②目視によるひび割れの幅や延長の測定は、個人ごとに測定精度にばらつきがある
- ③路面のひび割れをスケッチした図は、平面図への再現性が低い
- ④人力によるひび割れ調査は、炎天下の中、屈伸作業を継続するため苦渋作業となる



写真-1 目視によるひび割れ調査



図-1 ひび割れのスケッチ図

##### 2.2 開発目標

2.1 に示した課題を解決するため、路面のひび割れ測定技術の開発における目標を以下の通り設定した。

- ①ドローン等の最新技術の活用により、現地での測定作業を省力・省人化させる
- ②画像解析技術の活用により、ひび割れの抽出作業を自動化させる
- ③抽出対象とするひび割れの幅は1mm程度を上

- 限とし、段階的なひび割れ幅の区分けを行う。  
 ④自動抽出されたひび割れを積算し、平面図へ描写させる

### 3. ドローン飛行高度の検討

通常ドローンを用いた写真測量では、約 50m 前後の飛行高度で十分なラップ率を確保して撮影を行い、取得した画像を解析し、オルソ画像や点群データを作成している。しかしながら、この手法ではミリメートル単位のひび割れを認識することはできない。したがって、ミリメートル単位のひび割れを認識することが可能な飛行高度の検討を行う必要がある。

#### 3.1 飛行高度別のひび割れ認識試験

1mm のひび割れを対象に、ドローンの飛行高度別に路面を撮影した。路面には、撮像からひび割れの詳細寸法が計測できるように、基準物となる紙を張り付けている。図-2、3 にドローン飛行高度別の撮像とひび割れ特徴量を抽出した線分化図を示す。

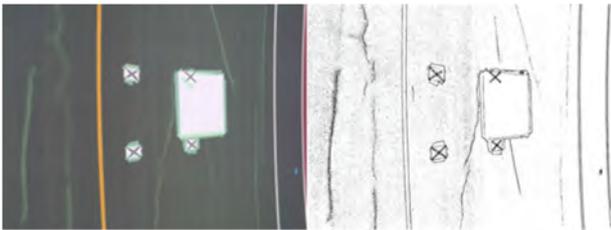


図-2 ドローン飛行高度 3m の撮像と線分確認

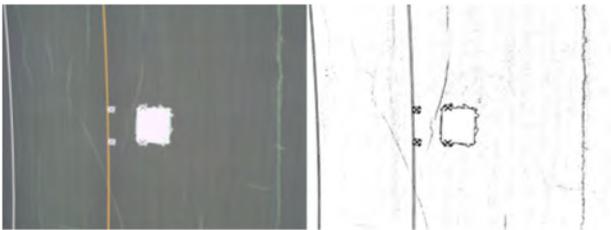


図-3 ドローン飛行高度 5m の撮像と線分確認

解像度あたりのピクセル数とドローンの最大画質（幅 5472、長さ 3684）から、ひび割れ幅 1mm をターゲットとした場合、 $1\text{mm}=1$ ピクセルと設定すると、高度 5m から撮影する必要があった。

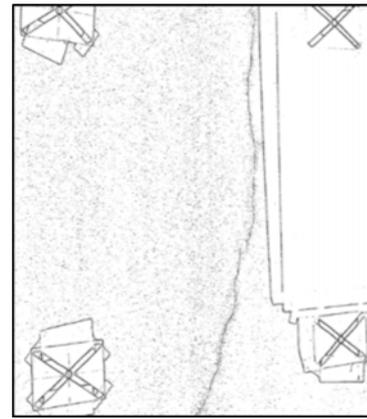


図-4 ドローン飛行高度 5m の線分図拡大

#### 3.2 最適高度の選定

ドローンの飛行高度を 5m とした場合、飛行計画経路を活用したドローンの自動航行やオルソ画像の生成が困難であるため、ドローンの飛行高度は 10m が最適であると判断した。また、十分な解析情報は無いが、ドローンの飛行高度 10m でも撮像に 1mm のひび割れらしき特徴が存在していたため、後述の AI モデルのトレーニング対象とした。

### 4. 処理フローの検討

本測定技術では、ひび割れの延長や幅を簡易的に測定することを目的としているため、ドローンにより撮影された大量の写真から生成されるオルソ図に映し出されるひび割れをコンピュータに推論させる AI 推論を処理フローに組み込んだ。処理フローを図-5 に示す。

また、オルソ図は通常の PC で扱えるようなファイルサイズには収まらないため、それらを分割して、劣化部を解析、解析結果をオルソ図に戻し、積算結果を出力するフローとした。

#### 4.1 オルソ生成

オルソ生成とは、ドローンが連続して撮影した静止画を画像の特長とメタ情報である緯度・経度情報をもとに幾何的に画像の位置関係を導き、上空から平面投影された画像を生成する処理である。本処理では精度をあげるため、先に触れたドローン飛行高度 10m の一定高さで撮影された画像を合成した。



図-5 本測定技術の解析処理フロー

## 4.2 分割処理

延長約 2km の路面をドローン飛行高度 10m の一定高さで撮影された画像から生成されたオルソ画像は、解像度長さ方向で 10 万ピクセルを超えるものとなった。この巨大なファイルを PC で AI 推論処理させることは、高性能なワークステーションですら難しい。よって、今回は画像を一定のピクセル幅に分割するツールを準備した。また、ひび割れ抽出した結果を全体画像に描写できるように、分割した画像と、元となる画像における分割画像位置を記した座標ファイルを出力できるよう準備した。本ツールの準備により、AI 推論処理を切れ目なくバッチ処理化でき、推論速度を向上させることができた。

## 4.3 AI 推論

AI 推論はひび割れ幅 1mm の正常な抽出有無の評価のほか、ひび割れ幅の大きさを段階分けした推論が可能か評価するため、既に構築していたひび割れ抽出用の AI モデルを基に新規の AI モデルデータを作成した。

推論エンジンは、性能面、処理速度面を重視し、パブリックドメインである YOLO V3 を採用することとした。採用理由は、ひび割れ形状の殆どが濃淡（暗く落ち込んでいる窪みがクラックである可能性が高い）で判別されることが多く、対象路面は平均的にグレーであるため、複雑な対象は存在しないと仮説定義した。本エンジンを活用することは推論にスピード面、性能面で有利と予測した。

モデル設計は、ひび割れがそこにあるか否かを判断させるため、撮影された写真と予測ひび割れ形状がどれほど重なって見えるかを示す指標「IoU」が高くなるよう AI モデルを作成した。そのうえで、推論結果を対象に形状に応じた幅を決め、認識位置を基に長さを求めた。

なお、推論した結果は、幅情報と長さ情報、画像における座標を出力している。画像に対してはどこをひび割れとして推論したかを矩形で括った合成画像も出力している（写真-3）。



写真-3 推論結果描画

## 4.4 推論結果再統合

推論した結果画像だけでは情報を俯瞰的に観察できないため、4.2 で分割する前のオルソ図に 4.3 で描画した画像を合成する手段を検討した。4.2 で

生成した位置関係を示す座標ファイルをもとに、オルソ図にひび割れの状態が描かれるように工夫した。この処理の実装にて、大量にある写真を再統合して描画することが可能となった。推論結果の再統合イメージを図-6 に示す。

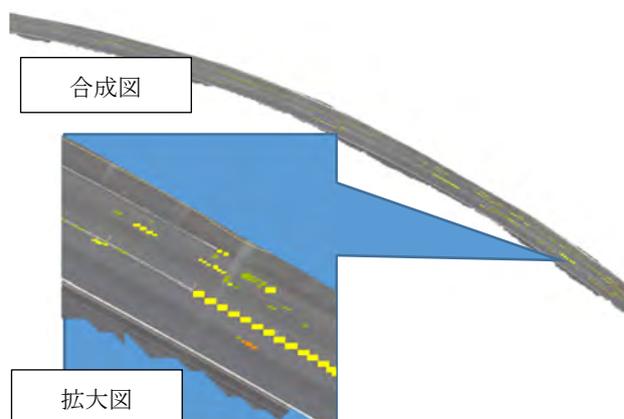


図-6 推論結果の再統合イメージ

## 4.5 積算

AI 推論した際に、クラックを矩形にてまとめ、そのピクセル長にて長さ・幅とした。その際に、路面に意図的に描いたスケール情報、あるいはセンターラインの長さを既知のスケールとし、ピクセル当たりの実距離を用いて、積算比率を計算、ピクセルをミリメートルに変換後、合成対象の積算結果を出力した。

## 5. 処理フロー内で発生した課題と克服手段

### 5.1 高精細かつ大量データのオルソ生成の課題

対象閾値をひび割れ幅 1mm としてオルソ図をファイル化するためには、メモリ空間として莫大な容量を必要とした。そのため、ディスク領域を仮想的にメモリにあてて、結果を出力させた。

しかし、ここで合成されたファイルをもとに分割画像を生成しようとしても、理論上は成立するコンピュータリソースも、計算結果があまりに遅く、現実的ではないため、入力画像数を複数に分割にして合成を行った。

### 5.2 AI 推論における重複積算課題と克服法

AI 推論で劣化診断を行うことで問題となることは、先に触れた「IoU」の高いものが同一個所に複数発生する場合は課題として残る点にある。この課題に対して、解析結果である場所情報を一度別領域として格納し、その領域を認識した結果の小さいものから大きいものまで重ね合わせて演算し、重複位置を小さいものから順に削除することで、重複カウントを回避した。

## 6. 試行

現地路面を目視によるひび割れ調査した結果と本測定技術が推論した結果を比較検証した。

## 6.1 検証内容

目視によるひび割れの幅と延長は、あらかじめ現地路面にチョーキングし、合成されたオルソ画像より手計算にてひび割れ数量を算出した。対して、本測定技術は、同じオルソ画像を AI 推論で抽出された結果をオルソ画像に描画し、ひび割れ幅毎に積算した。入力画像と推論結果を合成した画像の一部を図-7 に示す。

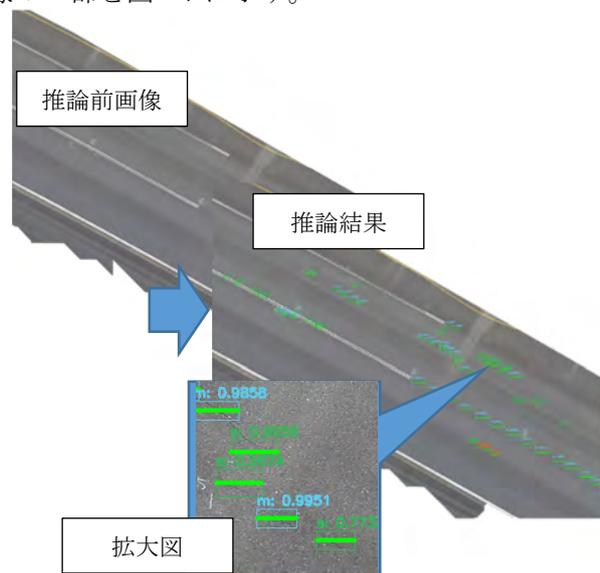


図-7 試行結果確認画面

## 6.2 検証結果

試行箇所の手計算によるひび割れ長は、約 20.8m となった。これに対し、本測定技術が推論した結果は、表-1 に示す結果となった。なお、本測定技術の推論において、絶対値 (mm 変換値) の導き方は、オルソ画像のピクセル当たりの幅を、路面の破線ラインの延長から導きだし、ピクセルをミリメートルに変換した。

表-1 試行箇所の測定結果

幅	長さ (単位:mm)
S(1-5mm)	7578
M(5-10mm)	13127
L(10mm<)	772
計	21477

本測定技術の推論結果は約 21.5m となり、手計算による算出結果よりもひび割れ長が約 0.7m 多く推論されたが、目視によるひび割れ調査の精度を鑑みれば、良好な結果が得られたと言える。

なお、図-6 に示した直線距離 210m の合成画像の本測定技術による推論結果は表-2 に示す通りとなり、おおよそ手計算による算出結果と一致することがわかった。

表-2 直線距離 210m の推論結果

幅	長さ (単位:mm)
S(1-5mm)	73291
M(5-10mm)	73753
L(10mm<)	73481
計	220525

ただし、表-1、2 の幅分類に関しては、AI 推論のための分類に利用しているだけであり、厳密にその幅が確かか否かまでは検証を行っていない。

## 7. まとめ

本測定技術の開発で得られた成果と知見をまとめると以下の通りである。

- (1) ひび割れ幅 1mm を測定対象とした場合、DJI 社製ドローンの飛行高度は 5m までが有効である。しかしながら、運用面と測定精度を鑑みると飛行高度は 10m が最適高度である。
- (2) AI 推論を解析に用いる場合、処理可能なコンピュータリソース (CPU 負荷、メモリ搭載量) を軽減するためと、解析処理速度を確保するために対象のオルソ画像を分割する必要がある。
- (3) AI 推論により生じる可能性があるひび割れの重複カウントを回避する機能を実装した。また、AI 推論により得られた結果はオルソ画像へ描写され、自動積算される。
- (4) 試行結果によると、目視・スケッチによる路面のひび割れ調査の結果と本測定技術が推論した結果は、誤差 1 割以内に収まっている。

また、ひび割れ調査にかかる測定人員および時間を比較すると、直線距離 210m を目視・スケッチによる人力調査を行った場合、人員 3 名で約 2~3 時間の時間要し、事務所作業は人員 1 名で約 1~2 日程度要する。対して、本測定技術は、人員 2 名でのドローン飛行撮影を約 30 分、取得撮像の PC 読込・演算作業を約 3~4 時間で処理可能であるため、人力作業を必要とする路面のひび割れ調査の生産性が大幅に向上することがわかった。

## 8. おわりに

本測定技術は、今まで人力でしか測定することができなかった路面を対象に、ひび割れ調査にドローンと画像 AI 技術活用することで、調査業務の生産性向上が期待できることがわかった。また、勾配のきつい斜面等の人近づくことが難しい場所での測定を回避することで、身体的な苦痛を軽減し、安全性向上へも寄与できることが確認できた。今後さらに、本測定技術を実路面で試用し、更なる測定精度の検証を行い、改良・改善に努める所存である。

## 参考文献

- 1) Joseph Redmon, Ali Farhadi : YOLOv3 An Incremental Improvement, arXiv, 1804.02767, 2018
- 2) 水産庁漁港漁場整備部整備課 : 無人航空機 (UAV) を活用した水産基盤施設の点検の手引き 03, 2019
- 3) 岩崎亘典 (OSGeo 財団日本支部), 水谷貴行 (パーズアイ・リサーチ研究会 株式会社エコリス) : Open dronemap ハンズオン 28, 10, 2017, 地理情報システム学会

## 4. 路面自走ロボットを活用した舗装工事の省人化技術

(株)NIPPO 総合技術部 ICT 推進グループ  
〃  
(株)NIPPO 総合技術部生産開発センター

○ 立花 洋平  
梶原 覚  
相田 尚

### 1. はじめに

i-Construction 施策の推進により、舗装現場においても ICT や IoT 技術が導入され、生産性および安全性の向上に向けた取り組みが盛んに行われている。今日では ICT を活用したマシンコントロールやマシンガイダンス、出来形管理などは一般的に使われるようになり、舗装現場は様変わりの様相を呈している。しかし、それはごく一部であり、舗装工事全体をマクロ的に見ると、従来から変わらない、身体的苦渋や危険性を伴う人力作業が依然多くある。

このような作業の一つに、路面切削や舗装の準備工で行う通り出し(路面マーキング)作業がある。この作業に着目し、作業環境を改善するべく検討を重ねてきた。

本稿では、当該作業に対する自動化技術の調査、開発の経緯、今般現場導入した自動走行ロボットならびに、国内メーカーと共同開発した自走式ロボットについて報告する。

### 2. 路面マーキング作業の課題

切削オーバーレイ工では、まず切削する境界にチョークライン(墨つぼ)などでラインを引く(写真-1)。その際、糸の両端を張る2名と糸を弾き路面に粉チョークを転写する1名、更に安全監視員の計4名が必要となる。



写真-1 従来の通り出し作業状況

また、一般的な舗装工事において広い面積を舗

装する際、施工機械や材料運搬車両の動線や施工機械の幅員に応じて舗装の区割りを決め、施工厚さに合わせた型枠を設置する。その型枠の位置出しも、同様に複数人数で幅や位置を測りながら、スプレーなどでマーキングする。

こうした舗装工事の準備として行われるマーキング作業では、次のような課題が挙げられる。

- ① 供用中の路線では、供用側の通り出しを行う際、一般車両が走行しており危険である
- ② 連続した中腰での作業や、しゃがむと立ち上がるを繰り返す作業であるため、体力的にも苦渋作業である

特に、高速道路の補修工事では、セーフティーコーンで侵入禁止を警告しているとはいえ、目の前を一般車両が100km/h程度で通過する上、大規模修繕工事では、この作業を事前に1,000m程度も行っている現状がある。

### 3. 課題解決に向けた検討

前述の課題解決に向け、マーキング作業の安全性向上と省力化に向けた検討を2017年度から開始した。基本的な要求事項は以下の3点とした。

- ① 基準に沿って自動的にマーキングする
- ② 1名もしくは2名でマーキングする
- ③ 現状の作業より3割以上、作業効率を向上させる

また、マーキング作業には基準を必要とするが、舗装工事の実態を踏まえ、舗装エリアの区割りでは座標が分かれば通り出しは可能であり、切削オーバーレイ工ではセンターラインや外側線を基準にし、現地合わせで通り出しを行っている。したがって、通り出しを行うための装置としてのコンセプトは二つの異なる方式を検討することとした。

- ① GNSSを基準としてマーキングする小型装置
- ② 基準となるものを検出し、それに沿ってマーキングする小型装置

#### 3.1 既存技術の調査

国内の様々な分野における技術調査を進めると、

道路標示を自動作図する装置や建築現場での墨出し作業を自動で行うロボットは存在している。しかし、縦長となる舗装工事の特性や装置の勾配限界、位置制御方法などの観点から舗装現場への導入は難しいことが分かった。

### 3.2 海外技術の調査

海外では目的が違うが、自動的にライン描画する様々な装置が存在する。特にサッカーやラグビーの盛んな欧州では、GNSSの位置情報やターゲットを基準とした自動制御によるラインマーキング装置が多い。それらの中で、市販の路面標示用スプレー缶を使用し、GNSSによる誘導で自動描写する自走式ロボットがあり、日本国内でも適用可能と判断し試験導入した。

## 4. GNSSを用いた自動走行ロボット

### 4.1 試験導入した自動走行ロボットの概要

当該ロボットは、VRS方式のGNSS測位にて自己位置を取得し、あらかじめ現場座標に合わせた線形データ(DXFデータ)を読み込み、その線形通りに自動走行しながらスプレーマーキングを行う機能を有している。写真-2に当該ロボットを示す。



写真-2 自動描写する自動走行ロボット

ロボットの操作は専用アプリがインストールされたタブレットで行う。そのアプリには、円や駐車枠などの基本的なテンプレートデータが既に内蔵されており、様々な描画がタブレットの操作で可能となっている。

また、アプリ内で線形のオフセットや延長などの編集も可能である。現場の形状にもよるが、基準となる線形データが1本あれば、アプリ内で編集することにより、施工幅に合わせたラインマーキングが可能となる。

### 4.2 現場への導入、試用

日本国内における使用環境を整え、現場試用を開始した。試用現場は、規制を伴わない広大な面積を有する現場を選定し、この現場における舗装区割り作業にて試用した。

### 4.3 実施例

2019年12月から2020年5月までの間に7現場にて試用した。施工面積が広大な民間工事、港湾ヤードの舗装工事、空港滑走路の舗装修繕工事などにて、路面切削の通り出しおよび舗装区割りのマーキング作業にて試用した。実施例として3現場の概要を表-1に、試用状況写真を写真-3に示す。

表-1 試用現場の概要

	I	II	III
場所	東海地方	関東地方	関西地方
工事概要	民間工事	港湾工事	空港工事
面積	60,000 m <sup>2</sup>	15,000 m <sup>2</sup>	65,000 m <sup>2</sup>
区割り数	40本	25本	8本×2層 (日当り)
最大延長	300m	120m	60m



写真-3 現場試用状況写真

### 4.4 効果

各工事における作業状況の比較と、その効果を表-2に示す。

表-2 作業状況比較

		I	II	III
人 力	人員数 (人)	4	4	6
	作業時間 (h)	28	6	0.8
ロ ボ ット	人員数 (人)	1	1	1
	作業時間 (h)	7.5	3.5	0.25
効率向上値 (人力：ロボット)		15倍	7倍	20倍

※、ロボット作業には、線形データ作成時間も含む

表の値は、同じ面積においてマーキング作業に掛かる人数と時間を実際に計測した値であり、人数に時間を乗じた値で効率比較したものである。

表-2 より、人力作業に比べ自動走行ロボットを使用すると 7~20 倍と格段に作業効率が上がることがわかった。当該ロボットの導入により、マーキング作業に掛かる人員が減るため別作業へ人員を回すことが可能となり、準備工に掛かる時間が減り、現場全体の進捗にも寄与することができる。

また、マーキング作業での特徴となる立ち体勢と中腰作業の繰り返し動作がないため、作業員の身体的負担がなくなり安全性も向上する。特に真夏の猛暑の中において、このような広大な面積を施工する現場では日陰も少なく、その負担がなくなることは熱中症予防にも寄与することになる。

#### 4.5 自動走行ロボットの応用, 展開

現場試用を重ね、その効果を確認することができた。そこで、更に付加価値を付けるべく、自動走行ロボットの応用例を以下に示す。

##### (1) 自動追尾 TS を併用した出来形確認

舗装工事では、下層の出来形結果から、上層材の数量を把握する必要がある。従来は測点ピッチ毎に水準測量を実施する場合や、設置された型枠を基準とし水系下がりにて舗設厚さを測定していたが、自動走行ロボットに TS 用プリズムを設置し、舗装型枠の通り出しと同時に TS にて簡易的に高さ(厚さ)を測定することで、測量手間を減らすことが可能になる(写真-4)。



写真-4 自動追尾 TS 併用例

##### (2) 埋設物検知センサの付加

前述したように、当該ロボットは現場座標に合わせた DXF データを基に自動走行する。いわば UAV にて航空写真を撮影する際に飛行ルートを編集するのと同じで、現場全域をカバーするように線形データを作成し、ロボットに埋設物検知センサを付加すれば、現場の埋設物の位置を面的に把握することが可能になる。

#### 4.6 今後の方針

規制を伴わない工事での試用は一通りの効果を確認できたため、規制工事にて試用を進める。当初のターゲットは高速道路の修繕工事におけるマーキング作業であり、当該作業での安全性の確保と

身体的苦渋を無くすことにある。実証試験を実施し、安全性向上効果、規制時間短縮への寄与などを検証する。

#### 5. 基準物を用いた自動走行ロボット

前述したように、当初の開発コンセプトは二つの異なる基準にて装置の検討を行うことである。

高速道路の切削オーバーレイ工における基準は既設の白線がほとんどであり、図面や座標を使わないケースが多い。そのような現場にて GNSS を基準とした場合、測量やデータ作成手間が増え、時間的制約のある規制工事においては、使用が敬遠される要因となる。そこで、GNSS を使用せず既設の白線を基準とし、それに沿ってマーキングを行う装置の検討を行った。

##### 5.1 道路白線認識による装置の検討

まず、カメラによる画像から道路白線を認識し、白線からのオフセット位置にマーキングする装置を検討した。

修繕工事における基準の取り方を調査したところ、車線センターの破線から外側に向かって幅を出す方法がほとんどであり、画像によりインターバル区間長の 8m 先にある白線を認識し、補完可能か否かが焦点となった。

シミュレーションの結果、小型カメラの性能や撮影位置などの条件を踏まえると、背景やノイズとの区別がつかないなどの影響で不可能と判断し、再検討の結果、基準物を画像により認識し、その基準物を目標としマーキングする方式に変更した。

##### 5.2 基準物認識型自動マーキングロボット

基準物を目標とし自動走行しながらマーキングするロボットのイメージを図-1 に示す。

現場において幅の基準となる位置に自発光マーカを設置し、そのマーカに向かって走行する。自発光マーカは、検知精度を上げるため太陽光に含まれない波長の不可視光 LED を使用し、可視光や外乱の影響を軽減できるもので検討を始めた。不可視光にすることで、一般車両への影響がないというメリットもある。

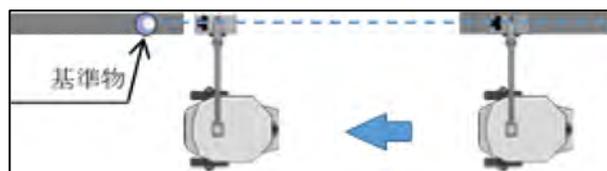


図-1 基準物認識型自動マーキングロボットのイメージ図

##### 5.3 マーカ検知の方法

マーカを検知するカメラは、不可視光を撮影可

能なカメラを選定した。要素試験を行った結果、太陽光のエネルギーが高く、背景の映り込みを完全には防止できないことが分かった。写真-5 に選定したカメラによる画像を示す。自発光マークは確認できるが、背景が映り込み同化しているのがわかる。



写真-5 選定したカメラによる画像

#### 5.4 自発光マーク検知の課題解決

この課題解決のため、マークの形状に特徴を持たせた。最終的に決めたマークの形状を図-2 に示す。

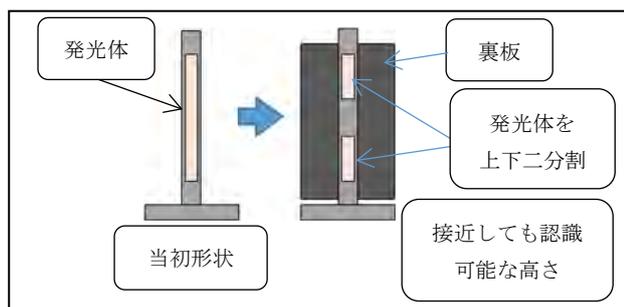


図-2 自発光マークの形状

更にカメラの露光時間を調整し、可能な限りマークのみが映るようにした。以上の処理を施し、得られた画像を写真-6 に示す。

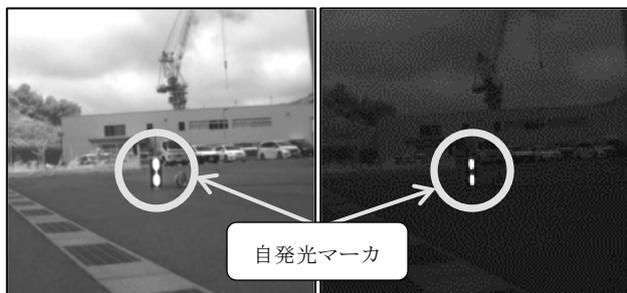


写真-6 マーク検知画像（左：処理前、右：処理後）

この画像内の発光体中央を認識することで、マークに向かって自動走行しながらマーキングするロボットの試作機が完成した。

#### 5.5 試作機の概要

写真-7 に画像解析により自動走行するロボット試作機、写真-8 に改良型自発光マークによるマーキング試験状況を示す。

当該ロボットは、有線でのコントローラを装備しコントローラの自動ボタンを押下している間のみ自動走行するロボットである。また、マーク付近に到達すると自動停止する機能も付加している。

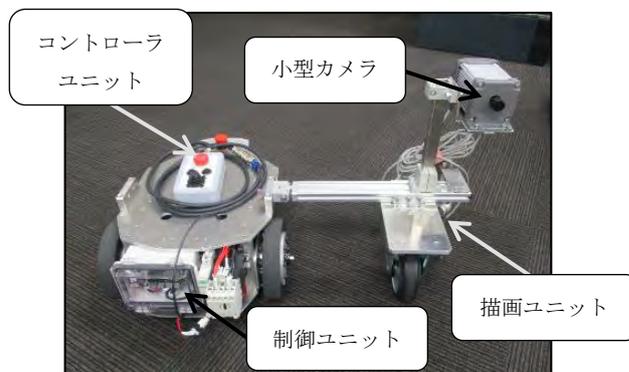


写真-7 画像解析により自動走行するロボット試作機



写真-8 改良型自発光マークによるマーキング試験状況

#### 5.6 今後の方針

試作段階ではあるが、自発光マークの認識、自動走行性能、直進性などは確認することができた。今後は、実際の現場にて試用し、その有効性を検証する。

#### 6. おわりに

今回導入および開発した二つの小型ロボットにより、舗装工事の準備工で行われていた通り出し作業を自動化することが可能となった。その効果は大きく、生産性だけでなく安全性の向上にも寄与できるものである。

今後は両ロボットの更なる実証を重ね、舗装工事の生産性向上に向けた手法として広く展開を図り、業界のイメージアップにつなげていきたいと考える。

# 5. 路盤鉄筋コンクリート施工における出来形精度向上と品質確保, 工程短縮の取組み

## 九州新幹線(西九州) 彼杵川橋りょう工事路盤鉄筋コンクリート施工報告

鹿島道路(株) 鈴木 泰  
○ 野田 哲也

### 1. はじめに

九州新幹線(西九州) 彼杵川橋りょう工事では三ノ瀬トンネル 855m, 彼杵トンネル 2,075m の路盤鉄筋コンクリート・突起コンクリートの施工を行うこととしている。路盤鉄筋コンクリート(図-1)は、インバートコンクリートと軌道スラブの間にあり、仕上がり精度向上と曲線区間のカント部を形成するために設けられているもので、高い出来形精度が要求される重要な構造物である。

本工事では曲線カント部の多い路盤鉄筋コンクリートの施工にスリップフォーム工法を採用し、出来形精度の向上及びカント部の仕上がり精度向上及び連続施工による工期短縮を図った。

本稿は当工種において出来形精度の確保, 品質確保を念頭に置きながら, 工程短縮を達成するために実施した様々な取組みについて報告するものである。

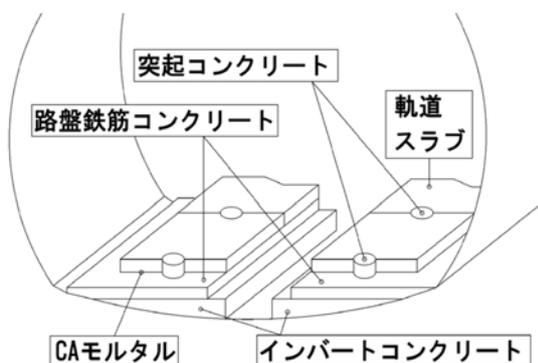


図-1 新幹線軌道構造(トンネル部)

### 2. スリップフォーム工法の特徴

スリップフォーム工法とはコンクリートの締固め装置(バイブレータ)と成形装置(モールド)を備えた施工機械を用い、コンクリートを所定の形状に締固め、成形しながら同一断面を連続してコンクリート路盤・構造物を構築する型枠が不要な工法である。従来的人力施工と比較すると、高さに関する出来形精度の向上, カント部の精度向上, 仕

上げ面の平坦性向上が可能となる。

連続的に施工するスリップフォーム工法の採用により断面全体を同時施工することが可能となり、弱点のコールドジョイント等が少ないこと、自動制御による精度向上に加え、省力化・工事期間の短縮等を図ることが可能となる。

### 3. 施工方法の検討に向けての課題

施工方法の検討にあたって、様々な課題が浮上したので下記に記載する。

#### 3.1 トンネル内空断面が狭い

当施工箇所はカントが大きく3トラック(脚)仕様のコンクリートスリップフォームペーパー(以下CSP)では機械の走行安定性を確保することが難しく、自社で保有している4トラック(脚)仕様のCSP(GOMACO社製Commander III)を採用した。しかしトンネル内空断面が狭く、トンネル内をアジテータ車と離合することが困難であり、他にもトンネル延長約500m間隔に設置してある器材坑の側壁(写真-1)をかわして通過しなければならない等の条件下での施工にあたって自社機械の改造が不可欠であった。



写真-1 器材坑側壁

#### 3.2 カント部(最大横断勾配12.8%)の肩ダレ

カント部側面のコンクリートのエッジスランプ

(肩ダレ)の防止対策が必要となる。その対策としてダレにくいコンクリート配合の検討が重要である。スリップフォーム工法は、側面整形版が機械に直角固定されており、角度補正ができないため、カントが大きいと薄層側は出来形不足、厚層側は側面テーパで余剰断面が増大し5%程度の材料のロスとなる。(図-2参照)

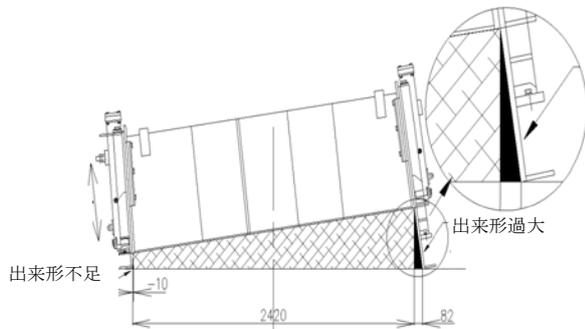


図-2 標準整形版での課題

### 3.3 新幹線の高速走行安定性の確保

新幹線の高速走行安定性の確保のために、基準高はもちろんのこと、軌間や通りの精度も求められる。インバートコンクリートの仕上がり基準高の精度が設計値から-30 mmの範囲内であるのに対して、路盤鉄筋コンクリートの仕上がり基準高は設計値±10 mmを求められており、精度を確保するためにはリアルタイムに出来形補正を行うことが重要である。また突起コンクリートの基準高は設計値+10 mmの範囲内であり、平面位置のズレ量の規格値は設計値から±10 mmとなっており、鉄筋のかぶり量の確保と突起コンクリートの設置精度についても求められている。仕上がり、品質面においてコンクリートの性状のバラツキ、更に材料待ちによる性状変化をなくすことを考え、コンクリートの品質の安定化と材料の連続供給が重要となる。

### 3.4 作業効率の向上

所定の期日内に路盤鉄筋コンクリートを完成させる必要がある。先行施工した三ノ瀬トンネルは計画通りの施工とはならず、作業効率が低下した。本施工に向けて作業サイクルの見直しと工程短縮による日施工量の向上が重点課題となった。

## 4. 課題への対策

### 4.1 トンネル内空断面に適応したCSPの改良

鉄道トンネル内空断面は道路断面より狭く、一般道路断面に対応したCSPの本体ではアジテータ車との坑内離合が困難である課題に対し、本体フレームを切断し本体幅を標準仕様よりも縮める改造を行った。さらにトンネル内器材坑の突出した側壁部分(写真-1)を通過させる課題に対して、本

体フレームを切断しただけでは対応できず、器材坑通過側のクローラ部をハイドライブトラック(写真-2)という標準クローラよりも幅が狭いクローラ(図-3)を採用することにより器材坑の側壁部の施工が可能となった。



写真-2 器材坑脇を通過するハイドライブトラック

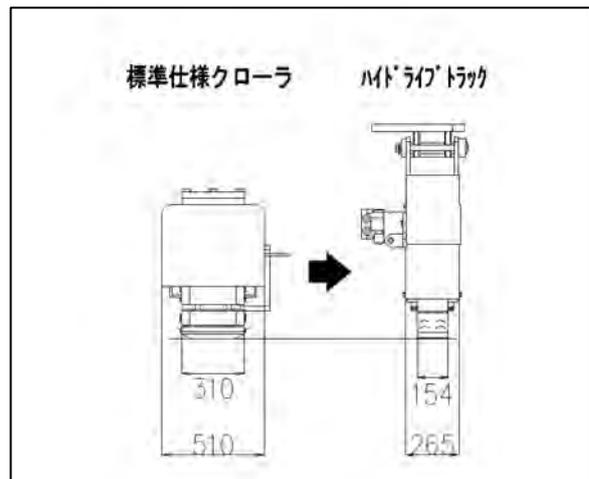


図-3 標準仕様クローラとハイドライブトラックの比較

### 4.2 カント部の対策

カント部のエッジスランプ防止の対策として、コンクリートの呼び強度を24N/mm<sup>2</sup>から27N/mm<sup>2</sup>に設定することで、粘性を高めエッジスランプの防止を図った。さらに単位セメント量と細骨材率を調整し、道路用のコンクリート配合と比較して粘性が高く空気量に富むコンクリート配合としてエッジスランプが生じにくい配合(表-1)とした。

側面整形版が機械直角固定されており、カント部での角度補正ができないという課題に対しては、側面整形版が直角に下りないように、あらかじめ角度をつけたブラケット(図-4)を製作し、懸念された課題の対策とした。さらに、横断勾配が12.8%と急勾配となり、機械も同一横断勾配に設置するとクローラ部への負担が大きく、施工時の走行安定

性が損なわれるため、モールドの吊り具の改善を行い、機械本体の勾配を5%以内に納まるようにした(写真-3)。

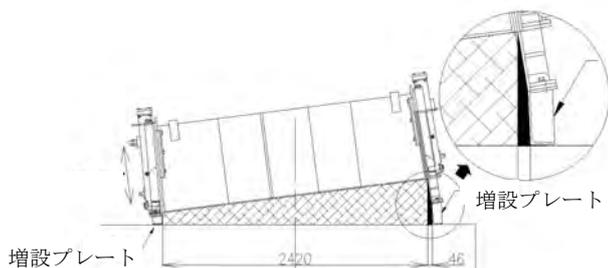


図-4 角度補正ブラケット図

表-1 コンクリート配合表

コンクリートの種類		普通27-4.0-20N	
呼び強度 (N/mm <sup>2</sup> )		27	
最大粒径 (mm)		20	
スランプ (cm)		4	
空気量 (%)		5.5	
水セメント比 (%)		53	56
細骨材率 (%)		46.5	46.5
単位量 (kg/m <sup>3</sup> )	水	150	150
	セメント	283	268
	細骨材①	599	603
	細骨材②	253	255
	粗骨材	996	1003
	混和剤	2.83	2.68

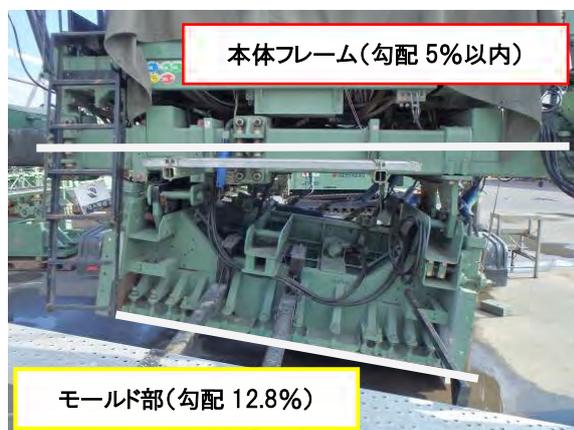


写真-3 モールド傾斜補正

#### 4.3 高速走行安定性確保の対策

仕上がり精度向上のために、高さおよび走行位置の自動制御をリアルタイムに補正が行える三次元マシンコントロールシステム(以下3D-MC)での施工を採用した。CSPでの3D-MCは高さの自動制御と走行の自動制御も同時に行なえるため、基準高精度の確保はもちろんのこと、幅員や通りの精度も得ることが可能となった。また仕上がり品質の向上のためコンクリート品質確認の専任者を配置して検査頻度を増やして品質の安定化を図ることとし

た。さらにコンクリートの連続供給を実現させるために、打設サイクルタイム表を作成して工場出荷管理を実施し、コンクリート材料待ちによる性状変化をなくす対策をとった。

#### 4.4 作業効率の向上

施工着手中である彼杵トンネル施工時に挙げた課題なので「6. 本施工」の方で対策と効果を記載する。

#### 5. 試験施工

課題への対策の効果を見極めるために試験施工を行って評価した。試験施工では本施工を考慮し、幅員、厚み、横断勾配、曲率を本施工時と同条件で行った。本施工の断面を図-5に示す。

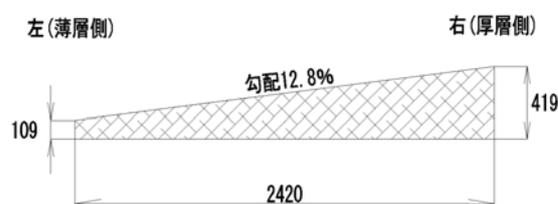


図-5 本施工断面図

#### 5.1 仕上がり精度の確認

試験施工での仕上がり精度は、敷均し位置で左側(薄層側)端部位置と設計との誤差は-2mm~+5mmとなっており、規格値内であった。右側(厚層側)端部敷均し位置は+3mm~+10mmで規格値内であったが、施工幅員は+4mmから+12mm広がっており、モールドの幅2,420mmより広がっている状態であった。これは敷き均し直後にモールドに拘束されていたコンクリートが側方に押し広げられていることが考えられ、スランプによりこの値は変動するものと考えられる。敷き均し高さに関しては、±5mmで敷き均しが規格値を満足した。以上のことより、12.8%の急勾配施工、R4,200mの曲率の施工においても3D-MCでの施工が可能であることを確認した。

#### 5.2 締固め度、圧縮強度試験結果

コンクリートの締固め度を確認するため、採取コアの密度を測定した。当該試験施工では採取コアを深さ方向で4等分にカットし、それぞれの密度と基準密度から締固め度を求めた。層毎に多少のばらつきは見られたが、全供試体において締固め度が100%を満足しており、下層まで十分に締め固まっていることが確認できた。圧縮強度はいずれのコアにおいても呼び強度27N/mm<sup>2</sup>を満足しており、コンクリートの締固め性に問題ないことを確認した。

### 5.3 中性化試験結果

切取りコアの中性化深さを計測するために、一定期間、中性化促進環境下にコアを暴露した後にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、中性化深さを計測した。中性化深さは暴露 13 週で 14.4 mm となった。既往の中性化の研究結果と今回得られた結果を比較した結果、今回採取したコアの促進中性化深さは、既往の研究において室内で作製された供試体と大きな差異はなかった。今回のスリップフォーム工法で施工したコンクリートの表面は、室内供試体と同程度に密実に施工できていることを確認した。

### 5.4 試験施工結果まとめ

試験施工において、路盤鉄筋コンクリートの機械施工を想定し条件の最も厳しい曲率 R4, 200m, 横断勾配 12.8% で実施した。機械の制御は高さ、走行位置共に 3D-MC により幅 0 mm 以上、高さ ±10 mm 以内を十分にクリアする精度の高い敷き均しを実施することができた。本施工においても横断勾配が 12.8% の施工に対応できるものと考えられた。

配合については、水セメント比 53% と 56% の 2 配合で敷き均しを実施したが、表面性状に大きな差異は見受けられず、敷き均し後のダレもほぼ見られなかった。これらより端部のエッジスランプをより防止できる水セメント比 53% を採用することとした。締固めに関しても、バイブレータで流動化させたコンクリートをスクリュ内では抱え込んだ材料荷重によりモールド下部に押し込み、圧入することで、コンクリート内のエアが抜けて高い締固め効果が得られた。また、切取りコアによる試験結果からも上層から下層まで十分に締固まっていることが確認できた。以上の結果を踏まえ、本施工に臨んだ。

## 6. 本施工

### 6.1 トンネル内空断面に適応した CSP の改善効果

機械の本体フレームを切断し、標準仕様よりも脚間を短縮したため、アジテータ車との離合は難無く行えた。器材坑の通過に関しても標準のクローラよりも幅が狭いハイドライブトラックを採用したことで問題なく施工できた。クローラ部に掛かる負担を軽減するために、モールドを傾けたことによりクローラは地面全面に密着しており、クローラには無理な力は掛からなかった。写真-4 にアジテータ車との離合時の写真、写真-5 及び写真-6 に施行状況の写真を載せる。



写真-4 アジテータ車との離合



写真-5 施工時写真：正面モールド



写真-6 施工時写真：敷均し仕上げ

### 6.2 カント部への改善効果

カント部におけるコンクリートのエッジスランプの防止のために通常の道路用のコンクリート配合と比較して粘性が高く空気量に富むコンクリート配合とした。フレッシュ性状は出荷時のスランプを変更することで対応し、締固め性、変形抵抗性に関してもこれまでの舗装用スリップフォームコンクリートで良好な施工が行われた実績の範囲内

に収まる結果となった。また、懸念されていたエッジランプは見られず、今回のコンクリート性状であれば良好な施工が可能であることが確認できた。写真-7 に敷均し後の仕上げ状況の写真を載せる。

### 6.3 高速走行安定性確保への改善効果

#### (1) 出来形精度

出来形精度に関しては、敷均し高さ、走行ラインの制御に 3D-MC を採用した事で基準高、幅のどちらも目標値を満足することが確認できた。出来形検測に関しては、トータルステーションを用いて敷均し直後の面をリアルタイムに検測した。路盤鉄筋コンクリートの出来形精度についてヒストグラムでまとめたものを図-6 に示す。図から分かるように、数値のバラつきはあるものの、全て基準高規格値の設計値±10 mmを満足できた。3D-MC 制御に用いたトータルステーションを写真-8 に示す。



写真-7 敷均し後の仕上げ施工



写真-8 3D制御用トータルステーション検測

また、突起コンクリートの平面位置出来形精度のヒストグラムを図-7 に示す。

突起コンクリートの平面位置のズレに関しても規格値を満足する事ができた。以上の結果から基準高、位置共に規格値を満足する精度の高い施工が可能となることが確認できた。

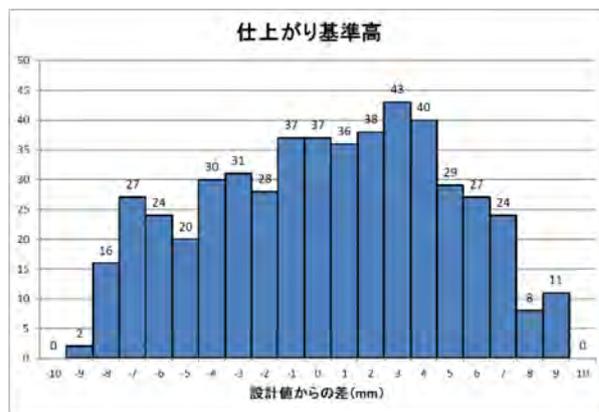


図-6 路盤鉄筋コンクリート  
仕上り基準高出来形精度 (ヒストグラム)

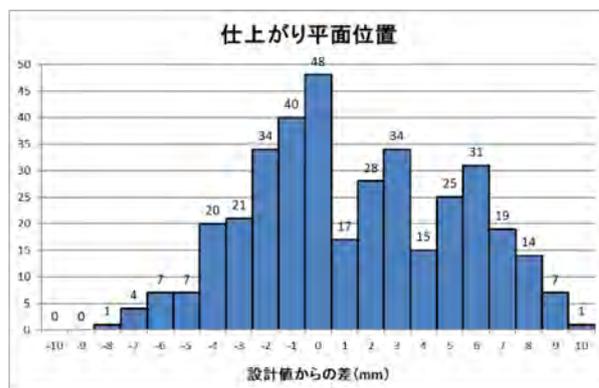


図-7 突起コンクリート  
仕上り平面位置出来形精度 (ヒストグラム)

#### (2) 地上型レーザースキャナでの計測結果

地上型レーザースキャナを用いて、面的に計測を行った測定結果を以下に報告する。計測場所は延長 100m、幅員 2.42m、横断勾配が 10.53~12.07% に変化する勾配変化区間であった。

##### ① 横断形状評価

計測した点群データをもとに横断方向に描いた近似直線と、各点群の高低差を比較した。また、施工端部は先行コンクリートが既に打設されており、3D-MC で施工した際に現況に擦り付けている可能性が高いため、出来形評価対象として設定されている点から内側の範囲を対象とした。計測延長 100m のうち、20m 毎の 5 測点で評価を行うこととし、突起コンクリート施工測点では正確な評価ができないため、それ以外の測点を対象とした。図-8 に点群データと設計データとの標高差の評価イメージを、表-2 に計測結果を示す。

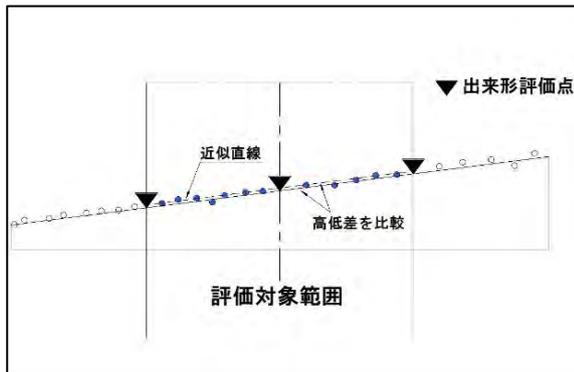


図-8 近似直線に対する点群評価 (イメージ)

表-2 各測点における近似直線に対する高低差

測点	計測結果		標準偏差
	MIN	MAX	
20+802	-1.4	1.1	0.6
20+822	-1.0	1.7	0.7
20+842	-1.3	1.4	0.8
20+862	-1.3	2.1	0.8
20+882	-1.5	0.8	0.6
全箇所平均	-1.5	2.1	0.7

## ② 横断近似直線と設計勾配の比較

①にて算出した横断近似直線と、設計勾配との差を比較した。表-3 に比較結果を示す。

表-3 近似直線勾配と設計勾配の比較

測点	計測結果		
	設計勾配	近似勾配	勾配の差
20+802	12.07	11.77	-0.30
20+822	11.79	11.59	-0.20
20+842	11.42	11.21	-0.21
20+862	11.00	10.94	-0.06
20+882	10.53	10.42	-0.11
平均			-0.176

レーザースキャナでの計測結果から、横断近似直線との高低差、近似直線勾配と設計勾配の差ともに小さく、管理測点だけではなく面的に精度を確保できる 3D-MC の優位性が確認できた。

## 6.4 作業効率の向上への改善効果

先行して施工を行った三ノ瀬トンネルでは現場条件や進入路の関係でアジテータ車が一方通行できず、トンネル内での U ターンを余儀なくされたため連続打設ができなかった。そのため彼杵トンネルでは工程短縮のため施工サイクルの向上が重要となった。

前述したような各課題に対する改善策を実施した結果、施工サイクルが向上し、日当たりの最大施

工量 280m を達成でき、所定の期日内に彼杵トンネルの路盤鉄筋コンクリートの施工を終えることができた。写真-9 は上下線の路盤鉄筋コンクリートの仕上がり状況である。



写真-9 上下線の路盤鉄筋コンクリート施工完了

## 7. おわりに

本工事における路盤鉄筋コンクリートは、スリップフォーム工法によって施工したが、機械の改造やコンクリート配合を調整することで、新幹線のトンネル内の路盤鉄筋コンクリート施工への高速施工の実績ができるとともにスリップフォーム工法の優位性が確認できた。また、3D-MC を採用したことで高精度な出来形が確保でき、新幹線の高速走行安定性の確保に貢献した。なお、CSP の運搬に関して、今回は重量 20 トン超の大型機械を運用するため、運搬用車両を入念に検討し、施工計画に反映した。

今後同種工事に対応していく場合には、より確実な施工が実現できるよう、今回得られた知見を活かすとともに、得られた情報を水平展開できるように整理していく必要もあると考えている。

最後に、今回このような機会をいただき大変有意義な取組みであったと考えている。関係各位に感謝申し上げる次第である。

# 6. 「2016年度からの土木業界における i-Construction における 取組みと建設機械技術の動向」

日本大学大学院理工学研究科 ○ 久保田 雄基  
日本大学理工学部 関 文夫

## 1. はじめに

新たな社会を指す、第5期科学技術基本計画において我が国が目指すべき未来社会の姿として、2016年1月内閣府は「Society5.0」<sup>1)</sup>を提唱した。国土交通省は建設現場における生産性向上を目的とし、測量、設計、施工、検査、維持管理に至る全ての事業プロセスで、情報化を前提とした新基準「i-Construction」<sup>2)</sup>を2015年12月より導入した。建設業の就業者は年々減少の傾向にあり、高齢層の割合が増加している傾向にある。2019年の建設業就業者の年齢構成は、55歳以上の高齢層が176万人で全体の35.3%を占めた。高度経済成長期に建てられた構造物は老朽化され、補修や建て直しの構造物が増えてきている。今後建設業においては、ICT技術を用いて生産性の向上が迅速に求められてくる。

本研究では、ICT関連技術が土木工事現場においてどのように発展を遂げてきたかの調査を行い、今後の動向を分析する。

## 2. ICT技術のニーズ及びシーズ

2013年に国土交通省の建設ロボット懇談会「提言」とりまとめについて(案)の「ニーズ・シーズ調査結果について」<sup>3)</sup>より、i-Construction導入前にICT技術が要求されていた分野を分析することで、i-Construction導入時に求められていたICT技術の動向の検討を行った。

ニーズ調査は、発注者36名、施工業者8社に対して実施。シーズ調査は、懇談会委員8名、建設機械メーカー5社、機械・電気メーカー5社に対して実施していた。

表-1よりニーズに関しては、建設機械関連、墜落・転倒、点検作業、簡易型遠隔装置の4つの項目に対して高い関心が寄せられている。少子高齢化問題や労働生産性の向上に関してよりも、安全性の向上に関しての関心が強いことが分かる。

シーズに関して、メーカーからは収益面からの見た魅力があまりないことが分かる。企業は収益性も考慮し生産台数を検討するため、収益性の魅力がないと思われる技術は後回しになってし

まう。BIM/CIMなどのICT関連の部署は出世の妨げになってしまうとの声も上がる中、国の政策によって意識改革が行われなければ、ICT技術普及の妨げになると考えられる。

また、技術面の評価に関しては、道路修繕、鋼橋上部、建設機械関連、簡易型遠隔装置の4つの項目に対して技術的に可能、確実性が高いことが分かる。建設機械関連、簡易型遠隔装置の2つに関してはニーズもあり、今後さらなる新技術が求められ、開発が進められると想定される。

表-1 ニーズ・シーズ調査結果について<sup>3)</sup>

項目	ニーズ調査結果			シーズ調査結果					
	関心の高さ			技術面の評価			収益面から見た魅力		
(1)少子高齢化(熟練者不足)	a	b	c	a	b	c	a	b	c
鉄筋工	33%	56%	10%	31%	62%	8%	9%	64%	27%
型枠工	28%	51%	21%	15%	46%	38%	0%	50%	50%
左官工	16%	56%	28%	23%	31%	46%	0%	50%	50%
(2)労働生産性の向上	a	b	c	a	b	c	a	b	c
道路修繕	26%	63%	11%	50%	40%	10%	14%	71%	14%
舗装	27%	62%	12%	17%	33%	50%	0%	44%	56%
道路改良	31%	49%	20%	21%	71%	7%	27%	64%	9%
トンネル(NATM)	22%	56%	22%	21%	71%	7%	17%	50%	33%
築堤・護岸	20%	60%	20%	21%	71%	7%	27%	55%	18%
道路維持	30%	31%	37%	27%	55%	18%	0%	63%	38%
管渠工	11%	68%	21%	18%	64%	18%	0%	50%	50%
鋼橋上部	8%	62%	31%	67%	17%	17%	0%	44%	56%
河川維持工	5%	68%	27%	10%	70%	20%	0%	67%	33%
橋梁下部	16%	42%	42%	25%	58%	17%	11%	56%	33%
コンクリート橋上部	12%	46%	42%	27%	55%	18%	13%	50%	38%
(3)施工現場の安全確保	a	b	c	a	b	c	a	b	c
建設機械関連	49%	49%	2%	64%	29%	7%	25%	58%	17%
墜落・転倒	54%	34%	12%	10%	70%	20%	0%	50%	50%
倒壊・土砂崩落	39%	55%	5%	25%	50%	25%	11%	44%	44%
自動車関連	37%	56%	7%	36%	57%	7%	0%	82%	18%
雨来・落下	33%	59%	8%	21%	57%	21%	0%	70%	30%
(4)社会資本の老朽化	a	b	c	a	b	c	a	b	c
点検作業	62%	32%	5%	25%	67%	8%	11%	78%	11%
補修作業	35%	38%	26%	10%	70%	20%	14%	57%	29%
更新工事	25%	46%	29%	14%	43%	43%	20%	40%	40%
(5)地球温暖化問題	a	b	c	a	b	c	a	b	c
	14%	57%	29%	--	--	--	--	--	--
(6)国際展開	a	b	c	a	b	c	a	b	c
	12%	71%	18%	--	--	--	--	--	--
(7)多発する災害	a	b	c	a	b	c	a	b	c
状況把握	41%	53%	6%	42%	50%	8%	0%	89%	11%
応急復旧	43%	51%	6%	8%	83%	8%	0%	78%	22%
簡易型遠隔操作装置	50%	46%	4%	62%	31%	8%	10%	70%	20%
乗用・破壊構造物撤去	40%	52%	8%	23%	46%	31%	10%	70%	20%

赤太文字：最も値が高い項目

\* ニーズ調査は、発注者36名、施工業者8社に対して実施  
シーズ調査は、懇談会委員8名、建設機械メーカー5社、機械・電気メーカー5社に対して実施

【凡例】関心の高さ 【凡例】技術面の評価 【凡例】収益面から見た魅力  
a. 非常に重要 a. 技術的に可能、確実性も高い a. 技術開発を行う魅力がある  
b. 重要 b. 技術的には可能であるが、確実ではない b. 他の条件次第  
c. あまり重要でない c. 技術的に困難 c. 魅力がない

## 3. i-Constructionの動向

日経コンストラクションの建設テック掲載の「ニュース i-Construction」<sup>4)</sup>より、2016年度から2019年度における175件のi-Constructionに関する

記事を調査し、適用分野（10分野）、工程（5工程、全体）、企業種（12種類）を定義付け、各記事をそれぞれ分類することで ICT 技術の動向を分析した。



図-1 年度別掲載件数

2016年から本格的に「i-Construction」が本格的に開始したため、2017年度に前年度から倍増し、55件の記事が確認された。

### 3.1 適用分野

表-2の通り10分野（土工、橋梁、水道・河川、港湾、道路、トンネル、ダム、事故防止、災害復興・対策、その他）に分類し、調査を行った。「その他」に関しては、複数分野に跨る内容やコンクリート工などの分野が多い結果だった。掲載件数としては土工、トンネル、橋梁の順になった。また、2017年度の掲載記事が一番多く、2016年度から本格的に i-Construction の運用が開始され、多くの ICT 技術が開発・商用される流れになったためと推測できる。

表-2 ICT技術適用分野調査結果

適用分野	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
土工	5	7	6	7	25
橋梁	2	5	7	11	25
水道・河川	2	2	3	1	8
港湾	2	3	1	2	8
道路	1	4	2	3	10
トンネル	3	12	4	10	29
ダム	2	4	1	2	9
事故防止	1	1	4	2	8
災害復興・対策	1	3	2	0	6
その他	9	14	14	10	47
合計	28	55	44	48	175

### 3.2 工程

工程に関しては5つの工程（測量・現況把握、設計・施工計画、施工・出来高管理、出来形管理・検査、維持管理・点検）と工程全体に分類し、調査を行った。「施工・出来高管理」と「維持管理・点検」に関する ICT 技術が多いことが分かった。

「施工・出来高管理」は作業員の減少や高齢化問題を抱えており、「維持管理・点検」は高度経済成長期の建設された老朽化の構造物が多い問題が、この2工程における技術が多い傾向になったと推測できる。

表-3 ICT技術適用工程調査結果

工程	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
測量・現況把握	3	3	3	5	14
設計・施工計画	2	6	5	2	15
施工・出来高管理	7	20	11	16	54
出来形管理・検査	3	3	1	5	12
維持管理・点検	4	14	18	16	52
工程全体	9	9	6	4	28
合計	28	55	44	48	175

### 3.3 企業種

企業種は12種類（建設業、ソフトウェア、測量機器メーカー、道路会社、測量会社、国・地方自治体、大学、研究所、重機メーカー、部品、材料、建設コンサルタント、その他）に分類した。建設業とその他で50%を超える結果となった。国・地方自治体は2016、2017年度の掲載件数が多く、2018年度以降は i-Construction も定着し、民間企業の技術提案が増加したため減少したと推測できる。その他企業種は電気会社やロボット会社など多種多様な分野が確認できた。BIM/CIM や i-Construction を推進するには多くの分野の技術が必要なので、年々増加傾向にあると推測できる。

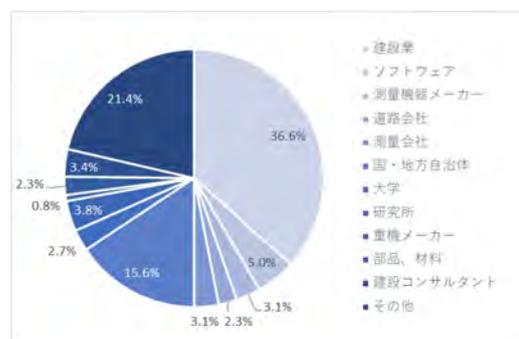


図-2 企業種別割合

表-4 ICT技術企業種別掲載件数

	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計	割合
建設業	11	33	24	28	96	36.6%
ソフトウェア	1	5	3	4	13	5.0%
測量機器メーカー	2	1	2	3	8	3.1%
道路会社	0	3	0	3	6	2.3%
測量会社	1	4	2	1	8	3.1%
国・地方自治体	15	15	7	4	41	15.6%
大学	0	0	3	4	7	2.7%
研究所	0	4	4	2	10	3.8%
重機メーカー	0	1	0	1	2	0.8%
部品、材料	0	1	1	4	6	2.3%
建設コンサルタント	0	3	3	3	9	3.4%
その他	5	16	17	18	56	21.4%
合計	35	86	66	75	262	100.0%

#### 4. 測量技術の動向

測量技術は年々進化を遂げている。建設業においてとても重要な役割を持っており、構造物の計画から完成後の調査まで幅広く用いられる。本研究では、国土交通省が掲載している2017年「ICT土工事例集」<sup>5)</sup>より、各工程における適用技術の調査を行った。

##### 4.1 調査内容

「ICT土工事例集」に掲載している104件の事例より、起工測量と出来形計測に適用された測量技術の調査を行った。

起工測量に関しては、空中写真測量(UAV)と地上型レーザースキャナー(TLS)の2つの技術が適用されていた。

出来形計測に関しては施工管理・自主管理の点で用いられている技術もあったが、起工測量と比較し、多くの計測方法が適用されていた。起工測量に適用された技術のUAVとTLS測量の技術は、出来形計測においては全体の約60%で、その他の計測方法も多く適用されている結果となった。(表-5参照)

表-5 起工測量及び出来形計測における計測方法の比較

計測方法	適用件数(回)		平均施工数量(m <sup>3</sup> )	
	起工測量	出来形計測	起工測量	出来形計測
UAV	66	21	31,707	38,871
TLS	40	19	32,699	30,598
締固め回数管理		15		39,886
TS		2		19,700
GNSS		4		5,825
施工履歴データ		4		16,238
ステレオカメラ		1		42,900
合計	106	66	-	-

##### 4.2 起工測量

起工測量において、平均施工数量がUAV測量に関しては約31,700m<sup>3</sup>、TLS測量に関しては約32,700m<sup>3</sup>という結果になった。UAVとTLSを用いる施工数量の条件はあまりなかった。TLSは施工範囲が広い場合、据替の手間があるが、UAVは気候や施工場所によって飛行が不可能なことがあるので、UAVとTLSの平均施工数量の差異がほとんどないと推測される。

##### 4.3 出来形計測

出来形計測においては、すべての事例に対しての適用が確認できなかった。また、自主管理としての出来形計測も数件確認された。そのため「出来形管理要領(案)」には掲載がない計測方法も確認された。

盛土の締固め作業が含まれる工事内容については、締固め回数管理が15件確認された。また、バックホウの爪先施工履歴データの管理も切土工に対して4件の実績があった。今後の出来形管理要領案の検討内容に含まれているが、施工中にデータ取得できることは、工事完了後の測量の工程を省くことが可能となり、生産性の向上につながる技術となる。

トータルステーション(TS)やGNSSによる点の管理も合計6件確認されたが、従来の点の管理より、面での管理が主流になってくると推測される。

#### 5. ICT建機の動向

施工においてICT建機の活用は年々増加傾向にある。建設業の高齢化は深刻な問題で、法面整形などの高い技術を持つ職人は減少傾向である。ICT建機の活用はオペレータ歴が浅くとも、熟練の技術を持つ職人と同等レベルの施工が可能となるので、今後の建設現場において多く導入されることが推測される。

##### 5.1 ICT建機の導入

上記の測量技術の調査と同様に、「ICT土工事例集」よりICT建機の適用台数を調査した。

表-6 ICT建機の適用台数

ICT建機	適用台数(台)
ICTバックホウ	86
ICTブルドーザ	31
転圧管理ローラ	13

表-6より、ICTバックホウが104件の事例の内、86台の適用が確認できた。また、出来形計測において締固め回数管理を行う現場も複数確認され、ICTブルドーザ及び転圧管理ローラの適用現場も増加傾向にあると推測される。締固め回数管理に関しては、自主管理にも適用している現場も複数件確認された。

##### 5.2 ICTバックホウの市場変遷

上記で記した通り、ICTバックホウが建設機械市場では先行している。本調査では、ICT建機の市場導入の傾向を調査する。

ICTバックホウは大きく別けて2DMG(マシンガイダンス)、2DMC(マシンコントロール)、3DMG、3DMCの4つの機能に分類される。MCは油圧の制御がかかるが、MGはオペレータの技術は必要となる。3Dに関しては3次元設計データが必要となる。

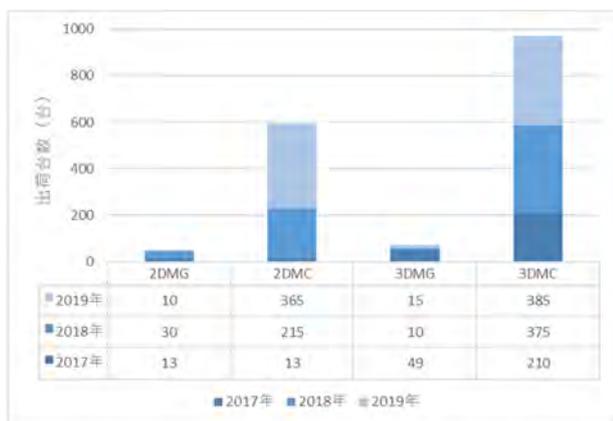


図-3 ICTバックホウ 2D/3D 別出荷台数推移

図-3は「ICT建機市場の将来展望」<sup>6)</sup>より建設機械メーカー主要5社（コマツ、住友建機、日立建機、コベルコ建機、キャタピラー）の合計出荷台数の推移である。各社ともMC機能のICTバックホウの出荷台数が多い傾向である。

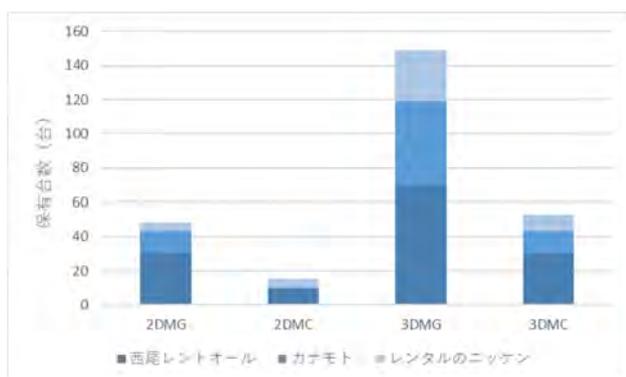


図-4 広域レンタル会社 ICTバックホウ保有台数

図-4は広域レンタル会社の主要3社（西尾レントオール、カナモト、レンタルのニッケン）の合計保有台数である。レンタル市場では、建設機械メーカーの出荷傾向とは逆にMG機能の保有台数が多い傾向である。

この保有台数の傾向より、実際に現場で使用される機能がMGで、現状では丁張り等の工程を行い熟練のオペレータの補助の役目を果たしていると推測できる。

## 6. まとめ

i-Constructionの動向に関しては、「施工・出来高管理」と「維持管理・点検」に関連した技術が全体の60%以上を占めた。企業種では、その他業種の技術が年々増加傾向にある。ニーズ・シーズは、建設機械関連および簡易型遠隔装置において、関心の高さや技術面の評価が高く、施工工程においての技術が求められていることが分かる。起工測量においてはUAVとTLSの技術のみであった。

施工数量に関しては大きな違いはないことが分かった。出来形計測はUAV、TLSだけではなく、転圧管理などの面管理とTSやGNSSの点管理も採用されていた。ICT建機は重機メーカーと広域レンタル会社の間で、MC機能とMG機能の普及において販売・普及戦略の乖離がみられた。

## 7. おわりに

ICT建機の普及もあり、安全性向上や生産性向上の視点から「施工・出来形管理」の技術が増えた。また「維持管理・点検」も高度経済成長期に建設された構造物の老朽化より、新技術の開発が進んでいる。ニーズ・シーズは建設機械関連において、オペレータの人材不足や高齢化の問題が関心の高さと技術面の評価が高いと推測できる。また昨今のコロナ禍において、テレワークの推進が急増する中、遠隔装置システムはさらに技術開発が進むと見込まれる。測量技術は出来形計測において、多様な技術が用いられており、中でも転圧締め管理や施工履歴データといった、施工中の計測技術が求められていることが分析結果から分かる。ICT建機は測量機器メーカーなどからもレトロフィットの製品の開発が進んでおり、今後も急速に拡大していくと推測できる。

建設業界もICT化が進み、他業種の参入が多くなってきている。建設業から他業種への人材の流出も見られる中、建設業界の人材不足は今後も問題となると予想できるが、ICT技術の更なる発展で生産性及び安全性の向上を期待する。

## 参考文献

- 1) 内閣府, Society 5.0 :  
[https://www8.cao.go.jp/cstp/society5\\_0/index.html](https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html)  
(閲覧日: 2020.6)
- 2) i-Construction :  
<https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html>  
(閲覧日: 2020.7)
- 3) 国土交通省, 建設ロボット懇談会「提言」とりまとめ  
について(案), pp.3, 2013.3
- 4) 日経クロステック, 建設テック「ニュースi-Construction」:  
[https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00107/?ST=ch\\_contech](https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00107/?ST=ch_contech) (閲覧日: 2020.8)
- 5) 国土交通省, ICT土工事例集:  
[https://www.mlit.go.jp/tec/tec\\_tk\\_000028.html](https://www.mlit.go.jp/tec/tec_tk_000028.html)  
(閲覧日: 2020.7)
- 6) 株式会社富士経済, 「ICT建機市場の将来展望」—「i-Construction」動向とICT建機(2D/3D)の方向性と普及拡大策一, pp.30~85, 2019.12

# 7. 斜め往復撮影による標定点不要の造成地 UAV 写真測量手法の開発

株式会社フジタ  
 山口大学  
 山口大学

○ 松岡 祐仁  
 神野 有生  
 高田 雅也

## 1. はじめに

UAV 空中写真測量は、国土交通省が推進する「i-Construction」において、広範囲を効率的に計測できる手法として広く普及している。しかし、事前に設置する標定点の測量、工事進捗による標定点更新に膨大な労力を要しており、タイムリーかつ有効に活用する上で現場実装の隘路となっていた。

近年、高精度 GNSS 測位が可能な自己定位型 UAV が低廉な価格で導入可能になり、写真測量の更なる効率化・高精度化が期待される。令和 2 年 3 月改訂「空中写真測量（無人航空機）を用いた出来形管理要領（土工編）（案）」では、SfM の利用においてカメラ位置を直接計測できる手法（自己定位 UAV）を併用する場合の標定点設置は任意 1 点となった。しかし、標定点を全く設置しない場合、従来から行われている鉛直直下向き撮影では、鉛直方向に系統誤差が生じる課題があり、標定点の設定や調整点での誤差のオフセットが必須であった。

本報は、標定点を完全に省略して作業の省力化を可能にした上で、鉛直誤差を抑制して計測の高精度化を図ることのできる造成地を対象とした「斜め往復撮影」手法を開発した経緯、及び本手法の現場検証の結果について報告する。

## 2. 標定点設置作業の省力化・削減の取り組み<sup>2)</sup>

当社では、2017 年に簡易 UAV 測量システム「デイリードローン<sup>®</sup>」を開発した。GNSS 搭載対空標識による標定点設置作業の省力化や独自の飛行・

解析設定により事前準備～解析までの作業時間を従来比 1/3 となる即日測量を実現したものである。

2018 年末、高精度 GNSS 測位方式に対応する自己定位型 UAV 「Phantom 4 RTK<sup>®</sup>」（以下、P4RTK と称す）を導入した。写真撮影位置の高精度測位により、SfM 時の外部標定要素推定の高精度化が期待できる。2~4ha での当社実験では以下の結果を得た。

- ・ 工事測量（起工測量、岩線・出来高計測等）  
 領域中央 - 標定点 1 点（計測精度±100mm）
- ・ 出来形計測  
 領域隅部 - 標定点 4 点（計測精度±50mm）

標定点を従来に比べ大幅に削減した上で計測精度を確保できることから、標定点設置に多大な労力を要していた広大な造成土工現場や高低差の大きい現場を中心に運用を進めている。

## 3. 多様性飛行撮影の導入

### 3.1 鉛直誤差発生の原因

自己定位型 UAV による標定点削減の取り組みでは、標定点の完全省略時、高い水平精度が確保できているが、鉛直方向に一律の大きな誤差が生じることがしばしば起こる。SfM では、カメラのレンズ特性や撮像面との位置関係等の幾何学構造の校正作業である内部標定が行われる。一律に生じる誤差は、完全に鉛直直下向きの画像セットのみでは、内部標定要素の内、焦点距離に代表される奥行き方向のスケールが幾何学的に求まらず誤差推定されることに起因した系統誤差<sup>3)</sup>である（図-1）。

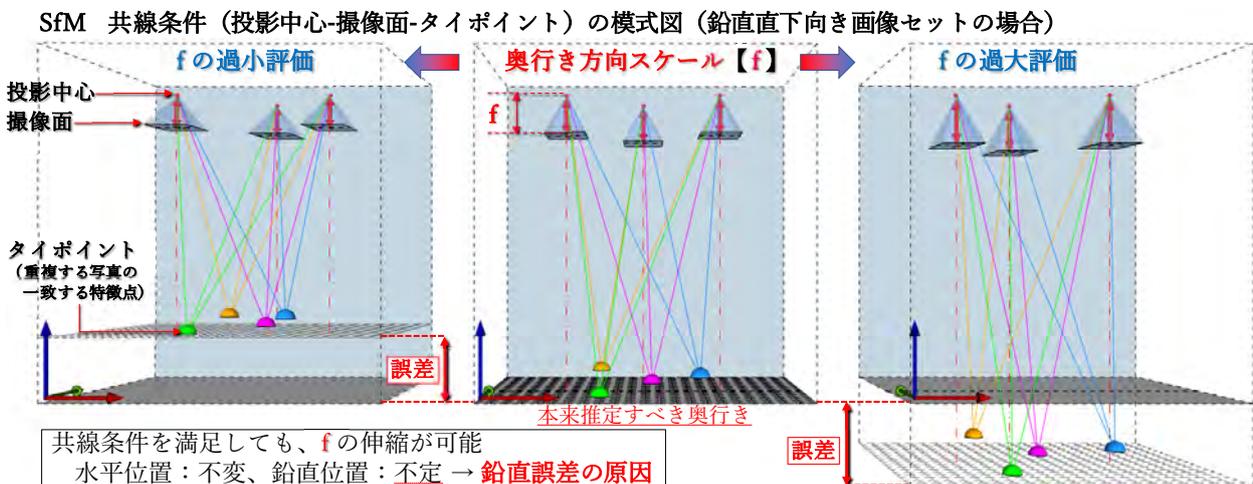


図-1 奥行き方向のスケール誤差推定

鉛直直下向き撮影でも目標鉛直精度を得られるケースがあるが、風による急激な機体の揺れ、ジンバルの制御誤差等で撮影画像の向きに微小なばらつきが生じて奥行き方向の誤推定が抑制されていると考えられる。しかし、偶発的事象に期待することは、運用上現実的でない。このため、奥行き方向のスケールを表すパラメータを幾何学的に安定して求めて鉛直精度の改善を図るため、鉛直直下向き画像セットに別高度や斜め向き画像を加える多様性（多視点）飛行撮影に取り組むこととした。

### 3.2 多様性（多視点）飛行撮影 検証実験<sup>4)</sup>

図-2に、対象領域と検証点14点の配置を示す。撮影にはP4RTK（RTK-GNSS測位）を用い、対地高度73m（地上画素寸法GSD20mm/pix）から鉛直直下向き撮影を進行方向80%、隣接コース間60%のオーバーラップ率で行った（基本ケース122枚）。

次に基本ケースとは別に多様性飛行として、以下の別高度鉛直直下向き、及び斜め向き撮影画像取得のため追加撮影を行った。

- ① 高度55m（鉛直直下向き）…………… 1枚
- ② 高度73m（天底角30°斜め向き）…… 26枚



図-2 多様性飛行撮影 検証領域

### 3.3 検証点誤差

表-1に基本ケース122枚、及び基本ケース+多様性飛行撮影画像（①，②：ケース1～6）を追加してSfM解析（Pix4D mapper使用）を行った場合の検証点誤差の最大値（絶対値）、RMSを示す。

表-1 多様性飛行撮影画像追加時の検証点誤差

ケース	基本+追加(枚数)		X誤差(m)		Y誤差(m)		Z誤差(m)	
	①鉛直	②30°	最大	RMS	最大	RMS	最大	RMS
基本	-	-	0.021	0.009	0.017	0.008	1.127	1.097
1	1	-	0.034	0.012	0.019	0.008	0.052	0.028
2	-	26	0.037	0.013	0.015	0.008	0.079	0.060
3	-	6	0.035	0.012	0.018	0.008	0.083	0.065
4	-	3	0.037	0.013	0.020	0.008	0.046	0.031
5	-	1	0.035	0.012	0.018	0.008	0.024	0.011
6	1	1	0.037	0.012	0.018	0.008	0.025	0.011

いずれのケースにおいても、水平誤差は小さく高精度の結果を得られている。しかし、基本ケースの場合、鉛直成分は全体的に約1.1m オフセットされた結果となり系統誤差が確認できる。

ケース1～6の鉛直誤差は、基本ケースに別高度や斜め向き撮影画像を加えることにより、標定点の設定なしで工事測量要求精度100mmを確保した。ただし、別高度の鉛直直下向き撮影1枚（ケース1）や斜め向き画像全26枚（ケース2）を加えるだけでは、出来形計測要求精度50mm以下にはならない。そこでSfM解析の過程でノイズとなり、画像間マッチング、内部標定要素の推定に悪影響を与える可能性がある領域周辺の植生が写る割合の大きな画像、抽出タイポイント数が少ない画像を段階的に除去して解析を行った。結果、ケース4～6では、1～3枚と少数の多様性飛行撮影画像を加えることで鉛直誤差が50mm以内となった。

以上より、鉛直直下向き撮影画像セットに多様性飛行撮影画像を加えることにより、鉛直成分の誤推定を大幅に抑制する効果が得られたと考える。一方、多様性飛行撮影画像は、単に枚数を加えるだけでは、十分な効果が得られない可能性があり、少数でも画像同士のマッチングに有利な画像の追加が重要であることが示唆された。

### 4. 斜め往復撮影

多様性飛行撮影画像追加の検証実験では、鉛直誤差の抑制効果を得ることができたが、有利な画像を取得するためには、対象領域に応じて事前検討された適切な位置、高度・角度からの撮影が必要となることが示唆された。多数の画像を撮影してSfM解析時に有利な画像を選定する方法も考えられるが、実運用では、追加飛行、解析回数・時間を要することになり、手法としての一般化は難しい。

そこで、従来の鉛直直下向き撮影の軌跡は変えず、カメラ角度を進行方向に対して一定角に固定した斜め向き重畳画像を取得する手法（図-3、写真-1）を試行することとした。本手法であれば、隣接コース間の計測領域は2方向から撮影され、多様性飛行撮影による鉛直誤差抑制効果が期待できる。

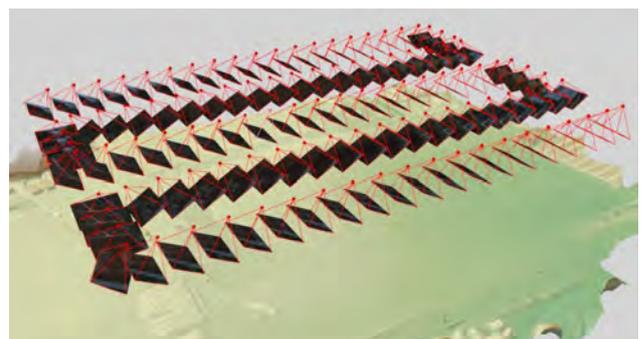


図-3 斜め往復撮影 飛行経路・軌跡



写真-1 斜め往復撮影 カメラ角度

#### 4.1 斜め往復撮影 飛行実験

図-4 に飛行実験対象領域と検証点 9 点の配置を示す。対象領域は、一部植生が分布しているものの大半は裸地の造成地である。撮影には P4RTK (RTK-GNSS 測位) を用い、以下の組み合わせで計 30 ケースの飛行実験を実施した。

- ・対地高度…73, 55, 36m (3 種類)
- ・撮影角度…天底角 0, 10, 20, 30, 40° (5 種類)
- ・ラップ率…80%×60%, 80%×75% (2 種類)

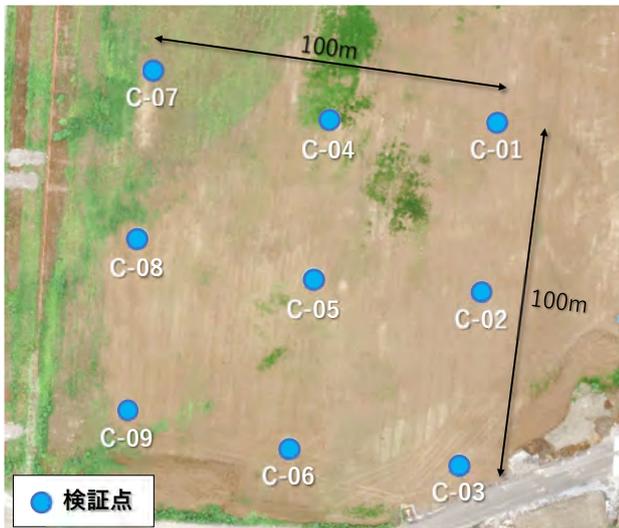


図-4 斜め往復撮影 検証領域

#### 4.2 検証点誤差

表-2 にラップ率 80×60% 設定時の鉛直直下向き撮影 (天底角 0°), 及び斜め往復撮影 (天底角 10°~40°) において、飛行高度を変化させた時の検証点誤差の最大値 (絶対値), RMS を示す。いずれのケースも天底角 0° の場合, 50mm 以上の鉛直誤差が生じている。高度 73m, 天底角 10° ケースで最大 62mm の鉛直誤差が生じているが、それ以外のケースも含め、斜め往復撮影では鉛直精度の改善が確認できる。

表-3 にラップ率 80×75% にした場合の検証点誤差の最大値 (絶対値), RMS を示す。隣接コース間の重複を大きくすることで画像間のマッチングに有利になると考えられるため実験項目として実施したが、今回の実験ではラップ率 80×60% と比較して位置精度への大きな影響は見られなかった。

高度 36m, 天底角 0° では、鉛直 RMS 誤差が 22mm となった。しかし、前項で述べたとおり、何らかの要因により鉛直直下向きではない画像が混入して鉛直誤差が抑制されたことが要因として推測され、偶発的で再現性の難しい結果と考える。

表-2 検証点誤差 (ラップ率 80×60%)

高度 73m						
天底角 (°)	X誤差(m)		Y誤差(m)		Z誤差(m)	
	最大	RMS	最大	RMS	最大	RMS
0	0.016	0.009	0.034	0.022	0.072	0.046
10	0.017	0.012	0.027	0.021	0.062	0.046
20	0.029	0.020	0.024	0.017	0.028	0.016
30	0.020	0.011	0.028	0.017	0.014	0.008
40	0.013	0.008	0.024	0.015	0.017	0.012
高度 55m						
0	0.030	0.021	0.034	0.023	0.077	0.060
10	0.026	0.017	0.027	0.017	0.040	0.028
20	0.019	0.011	0.026	0.018	0.029	0.018
30	0.017	0.011	0.020	0.013	0.044	0.034
40	0.023	0.012	0.026	0.018	0.041	0.035
高度 36m						
0	0.018	0.011	0.029	0.021	0.055	0.047
10	0.018	0.013	0.027	0.021	0.021	0.013
20	0.019	0.012	0.028	0.019	0.014	0.008
30	0.012	0.007	0.025	0.018	0.032	0.020
40	0.017	0.010	0.025	0.020	0.032	0.019

表-3 検証点誤差 (ラップ率 80×75%)

高度 73m						
天底角 (°)	X誤差(m)		Y誤差(m)		Z誤差(m)	
	最大	RMS	最大	RMS	最大	RMS
0	0.023	0.014	0.033	0.024	0.633	0.624
10	0.031	0.019	0.025	0.016	0.048	0.043
20	0.026	0.019	0.023	0.015	0.014	0.007
30	0.030	0.021	0.028	0.017	0.025	0.017
40	0.028	0.019	0.023	0.017	0.037	0.031
高度 55m						
0	0.024	0.017	0.025	0.018	0.099	0.082
10	0.022	0.016	0.026	0.018	0.037	0.024
20	0.035	0.025	0.024	0.016	0.032	0.023
30	0.025	0.016	0.027	0.018	0.040	0.035
40	0.028	0.020	0.023	0.017	0.041	0.035
高度 36m						
0	0.031	0.020	0.027	0.018	0.028	0.022
10	0.029	0.018	0.027	0.018	0.034	0.022
20	0.026	0.016	0.024	0.015	0.038	0.028
30	0.029	0.021	0.028	0.018	0.040	0.036
40	0.023	0.016	0.025	0.018	0.033	0.029

表-4 各ケースの焦点距離 f 標準偏差 (pixel)

天底角 (°)	ラップ率80×60%			ラップ率80×75%		
	高度 (m)					
	73	55	36.5	73	55	36.5
0	6.552	4.649	2.028	4.611	3.894	3.039
10	0.510	0.433	0.467	0.413	0.513	0.511
20	0.182	0.155	0.180	0.137	0.181	0.240
30	0.104	0.084	0.108	0.082	0.099	0.129
40	0.067	0.059	0.079	0.062	0.077	0.128

### 4.3 焦点距離 標準偏差

表-4 に、全 30 ケースの SfM 解析により推定された奥行き方向のスケールを表す主要パラメータのひとつである焦点距離 f (focal length) の標準偏差を示す。値が大きいほど焦点距離 f の推定において不確実性が増すが、鉛直直下向き撮影 (天底角 0°) では、鉛直誤差 50mm 以内のケースも含め数画素程度の大きな値となった。斜め往復撮影では、全てのケースで 1/2 画素程度以下となり、天底角の増加に比例して焦点距離 f の推定が安定的になり、本手法の導入効果が顕著に表れたといえる。

一方、鉛直誤差と焦点距離 f の標準偏差の関係は完全に比例していない。斜め往復撮影は、天底角が大きくなるほど鉛直方向の情報が多くなり、奥行き方向のスケール推定に有利になると考えられる。半面、撮影画像の地上投影形状が進行方向に広がる台形となり、画像前方ほど画素当たりの密度が小さくなり、特徴点の形状自体も変形することから、画像間のマッチングに不利になると考えられる。このトレードオフの関係が、天底角の大きさと鉛直精度が比例しない可能性のひとつと考えられるが、今後の検証項目としたい。

今回の対象領域では、検証した各高度において天底角 20° 以上の斜め往復撮影であれば、鉛直精度 50mm の安定的な確保が確認できた。

## 5. おわりに

「斜め往復撮影」は、自己定位型 UAV による外部標定要素推定の高精度化と併せて、斜め向き重畳画像セットにより内部標定要素の内、奥行き方向のスケールを高精度に推定し、標定点を不要とした造成地等の土工を対象とする空中写真測量手法である。その特徴を以下に示す。

- ① 従来の鉛直直下向き撮影の飛行経路はそのままにカメラを進行方向に傾けることで、多様性飛行撮影画像セットを取得できる。
- ② 斜め往復撮影画像セットの SfM 解析により、鉛直方向の誤推定が大幅に抑制できる。
- ③ 従来の鉛直直下向き撮影での GSD20mm/pixel に相当する高度からの斜め往復撮影でも、i-Construction の出来形計測要求精度に相当する

50mm の計測が標定点不要で達成可能である。標定点が不要となり飛行撮影前の準備工程が大幅に軽減されることは、運用上大きなメリットである。この特徴を活かして、人の立ち入りが困難な場所での測量、例えば近年頻発する災害発生時の初動調査への展開が期待できる。

一方、本手法では、これまで標定点や調整点に依存していた位置精度の確保が、撮影画像の情報のみとなる。裸地が多くを占める造成地では良好な位置精度を得ているが、計測対象の植生被覆などの地表面状況、撮影画像の質等の状況に大きく依存することに留意が必要である。これまでの蓄積データの検証では、従来標準設定で行われることの多かった SfM 解析において、解析設定の変更が精度に大きく影響することが明らかになっている。計測対象の状況に大きく依存する本手法が、より安定して精度を確保するために適した解析設定について継続して詳細検討を行う予定である。

現在、本手法は、主に造成現場での着工前等の現況測量、土量変化率の把握による土配計画での運用、及び検証実験により、事例を蓄積しているところである。今後は、斜め向き撮影で光軸が傾くことによる飛行高度と GSD、ラップ率の関係を明確にして ICT 基準類との整合性を図ることや、カメラ角度等撮影条件の最適化を行い、現場の生産性向上に資する技術として発展させていく所存である。

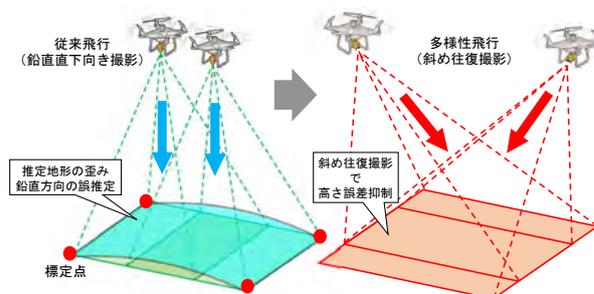


図-5 斜め往復撮影手法 概念図

### 参考文献

- 1) 国土交通省：空中写真測量（無人航空機）を用いた出来形管理要領（土工編）（案），p35，2020
- 2) 松岡祐仁・野末晃・上原広行：切盛土の日々の出来高管理に簡易UAV測量を適用，日本建設機械施工協会 令和元年度建設施工と建設機械シンポジウム，2019
- 3) 神野有生・宮崎真弘・八田滉平・福元和真：UAV写真測量のSfMにおける斜め撮影の導入に関する基礎的シミュレーション，日本写真測量学会 平成30年度秋季学術講演会，2018.
- 4) 高田雅也・水津佑輔・松岡祐仁・野末晃・神野有生：造成地のGCP不使用型UAV写真測量のSfM段階における撮影方法・解析設定の影響，日本写真測量学会 令和2年度年次学術講演会，2020

## 8. RTK-GNSS 搭載型 UAV を用いた

### 空中写真測量における標定点数削減に関する検討

国土技術政策総合研究所 ○ 木村 圭佑  
 国土技術政策総合研究所 山下 尚  
 国土技術政策総合研究所 小塚 清

#### 1. はじめに

国土交通省では「ICTの全面的な活用」等の施策を建設現場に導入することによって、建設生産システム全体の生産性向上を図り、魅力ある建設現場を目指す取り組みであるi-Constructionを平成28年度より進めており、必要となる出来型管理・監督・検査等の要領および基準類の整備を行っている(図-1)。

整備を行うにあたり、公共工事の工種は多種にわたること、またICTの進歩が速いことから、令和元年度よりICTを活用する立場にある関係業団体から、

- ① 新たなICTを活用する提案
- ② 既存ICTの活用対象を広げる提案
- ③ 既存基準類の改定(カイゼン)

の3点を対象とした提案(以下民間提案とする)を募集し、本年度は22件の提案・要望を受け付けた(図-2)。

本報では、民間提案の中から土工における無人航空機(以下UAVとする)を用いた空中写真測量の標定点設置に対する提案・要望を対象とし、それに関連した検証実験について述べる。

#### 2. 研究目的

空中写真測量を実施するには、測量対象の内外に標定点と検証点を設置する必要がある。標定点は写真測量により得られた3次元データに座標を付与するために用いる点で、検証点は3次元データに付与した座標の精度を確認するために用いる点である。標定点や検証点は計測器精度の関係から現在の要領では、中心座標をトータルステーション(以下TSとする)等により測量する必要がある。その設置数は測量範囲の大きさに比例して増加し、それに伴って測量に関する作業時間は増加する。このことから標定点や検証点の測量作業は現場作業の省力化についての課題となっている。そのため、標定点数を削減することで作業時間を軽減させる技術開発が行われており、例えばプリズムを取り付けたUAVをTSで追尾しカメラ位置を正確に測量することで、標定点なしで所定の精度(検証点誤差が±0.05m以内)を確保できる技術が登場した。この技術は、カメラ位置を直接計測できる手法として標定点の設置が不要とすることができると出来形管理要領で規定している。その後、RTK(リアルタイムキネマティック法)-GNSS等を用いて、カメラ位置を高精度に得られるUAVが登場し、このたびこの技術を用いることで標定点不要とすることは出来ないが削減することができるという民間提案をいただいた。

基準適用年度				
平成28年度	平成29年度	平成30年度	令和元年度	令和2年度
<b>ICT土工</b>				
	ICT舗装工(アスファルト舗装)			
	ICT浚渫工(港湾)			
	ICT舗装工(コンクリート舗装)			
	ICT浚渫工(河川)			
	ICT地盤改良工(浅層・中層混合処理)			
	ICT法面工(吹付工)			
	ICT付帯構造物設置工			
	ICT地盤改良工(深層)			
	ICT法面工(吹付法特工)			
	ICT舗装工(修繕工)			
	民間等の要望も踏まえ 更なる工種拡大			

図-1 i-Construction基準類の整備状況

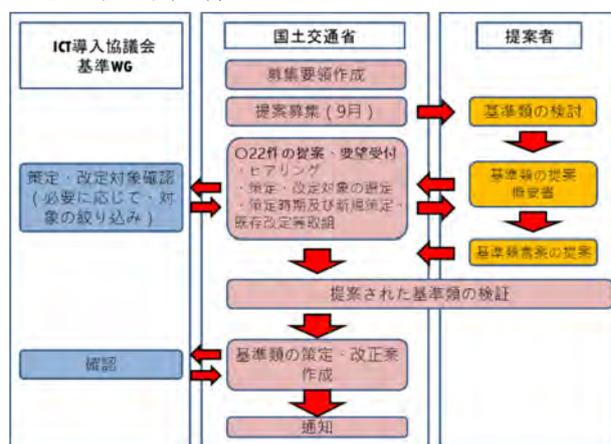


図-2 基準類民間提案のフロー

表-1 RTK-GNSS 搭載型 UAV で使用できる測位技術

	RTK 方式	ネットワーク型 RTK 方式	PPK 方式
説明	既知点設置の基準局による補正情報で座標を決定する	電子基準点からの補正情報を通信回線により取得する RTK	UAV で取得した位置座標とタイムスタンプから、後処理で電子基準点の補正情報により座標を求める
長所	通信回線不要	基地局不要	基地局不要 通信回線不要
短所	基地局必要 既知座標上に設置	携帯回線が使えないと使用不可 月額料金必要	後処理なので撮影時に良い結果が得られるか不明

表-2 検証条件

使用 UAV	DJI Phantom4 RTK
撮影高度および地上画素寸法	36.5m (0.01m/画素) 73m (0.02m/画素)
カメラ位置を直接計測する手法	① GNSS 単独測位 ② RTK-GNSS ③ ネットワーク RTK-GNSS ④ PPK-GNSS
標定点	① 従来手法 (5 点) ② 四隅 (4 点) ③ 中央 (1 点) ④ なし
写真のラップ率	進行方向 90%, 隣接コース間 60%
SfM ソフトウェア	Pix4D Mapper
検証方法	検証点 (8 点) 中心座標の較差

本報は、RTK-GNSS 搭載型 UAV を用いた空中写真測量に関して、民間提案で提供されたデータを基に、この技術が土工の出来形管理に使える技術であるかどうか検証を行い、その結果を示すものである。

### 3. 研究方法

本報では、RTK-GNSS 搭載型 UAV を用いて検証実験を実施した。研究に用いた UAV では RTK-GNSS 方式以外にも、ネットワーク型 RTK-GNSS 方式 (VRS 方式) や、PPK-GNSS (後処理キネマティック) 方式も実施可能である (表-1)。これらの測位技術は現場条件に応じて使い分けることで利便性が向上すると考えられるため、全ての方式で検証を行うこととした。

検証条件を表-2 で示す。地上画素寸法は 0.01m/画素と 0.02m/画素の 2 パターンで、それに応じた



図-3 標定点と検証点の配置

飛行高度を設定する。写真のラップ率は進行方向 90%、隣接コース間を 60%である。標定点および検証点は図-3 で示す配置とし、中心座標の測量は TS を用いて実施した。また、標定点数と検証点誤差の関係を求めるために、使用する標定点数を 0 点、1 点 (中央)、4 点 (四隅)、5 点と変えてそれぞれ解析を行った。

検証方法は、TS で測定した座標を真値とし、SfM (Structure from Motion) 解析で得られた検証点中心座標との較差を測量誤差とし、この大きさが出来形管理要領に規定している  $\pm 0.05\text{m}$  以内であることを確認することで行った。なお機体個体差による影響を防ぐために、カメラ位置を直接計測する手法毎に、同型別機体を用いて 2 回ずつ撮影を実施した。

#### 4. 研究結果

検証の結果を以下に示す。XY 軸方向（平面方向）の測量誤差については全ての計測パターンにおいて、出来形管理要領で規定している $\pm 0.05\text{m}$ 以内に収まっていたため、Z 軸方向（高さ方向）について述べることにする。

図-4 から図-7 は、それぞれ標定点を 0 点、1 点（中央）、4 点（四隅）、5 点（従来手法）設置した場合における、各カメラ位置を直接計測する手法で、地上画素寸法  $0.01\text{m}/\text{画素}$  の場合の測量誤差の最大値・最小値（白箱部の上下）および測量誤差の平均（ $\mu$ ）と標準偏差（ $\sigma$ ）から求めた  $\mu \pm 3\sigma$ （上下のヒゲ部）を示したものである。測量誤差が正規分布に従うと仮定するならば、その分布は  $\mu \pm 3\sigma$  の間に 99.7% が収まる。

地上画素寸法が  $0.01\text{m}/\text{画素}$  で、標定点が 0 点（無し）の場合、いずれのカメラ位置を直接計測する手法においても、測量誤差の最大値・最小値および  $\mu \pm 3\sigma$  が  $\pm 0.05\text{m}$  を満たしておらず、所定の精度を確保できないことがわかる。地上画素寸法  $0.02\text{m}/\text{画素}$ 、標定点無しの場合は、さらに条件が悪くなるため、同様に精度を確保できていない。

標定点が 1～5 点の場合、RTK・VRS・PPK 方式では、最大値・最小値および  $\mu \pm 3\sigma$  が  $\pm 0.05\text{m}$  の

範囲内を満たしていることがわかる。また、これら 3 つの方式では、地上画素寸法が  $0.02\text{m}/\text{画素}$  の場合においても同様に所定の精度を確保できることが確認できた。

GNSS 単独測位については、標定点数が増加することで検証点の誤差が減少するが、いずれの場合においても所定の精度（ $\pm 0.05\text{m}$ ）を確保できていないという結果が得られた。これは、従来手法では UAV から取得した GNSS 測位による座標を用いず、標定点の座標を用いて SfM 解析により得られた 3 次元点群データに座標を与えるからであると考えられる。また、RTK・VRS・PPK については標定点数の増加と検証点の誤差に関連は見られなかった。

図-8 および図-9 はそれぞれ地上画素寸法が  $0.01\text{m}$  と  $0.02\text{m}$  で、RTK・VRS・PPK 方式における、標定点を中央 1 点とした場合での標定点と検証点の平面距離と検証点の Z 方向の誤差の関係を示したものである。

図から平面距離と Z 方向の誤差に相関関係が見られず、誤差は標定点と検証点の直線距離に依存しないと考えられることから、標定点を 1 点とする場合において、設置する位置は検証対象エリアの中央でなくても良いことが示唆される。

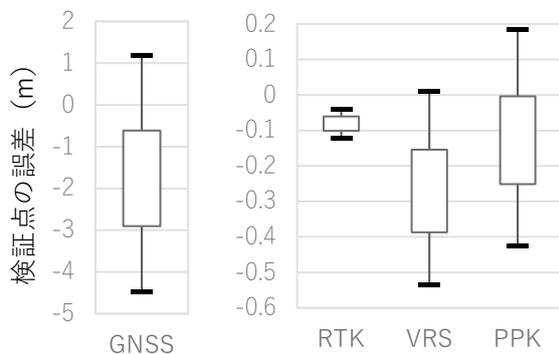


図-4 標定点0点の場合の誤差 (0.01m/画素)

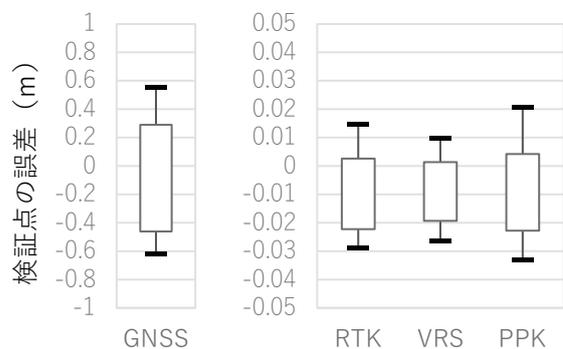


図-5 標定点1点の場合の誤差 (0.01m/画素)

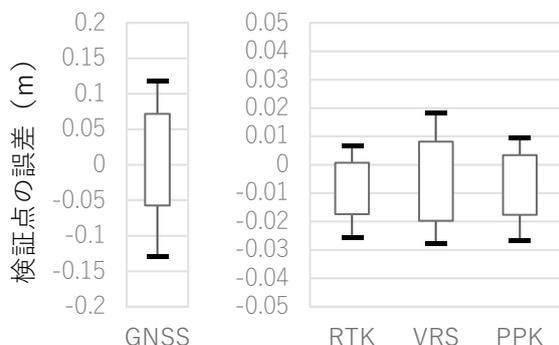


図-6 標定点4点の場合の誤差 (0.01m/画素)

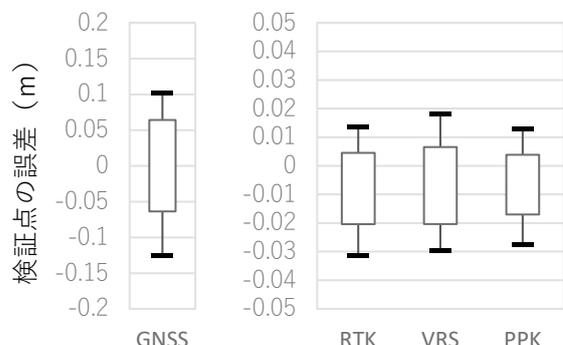


図-7 標定点5点の場合の誤差 (0.01m/画素)

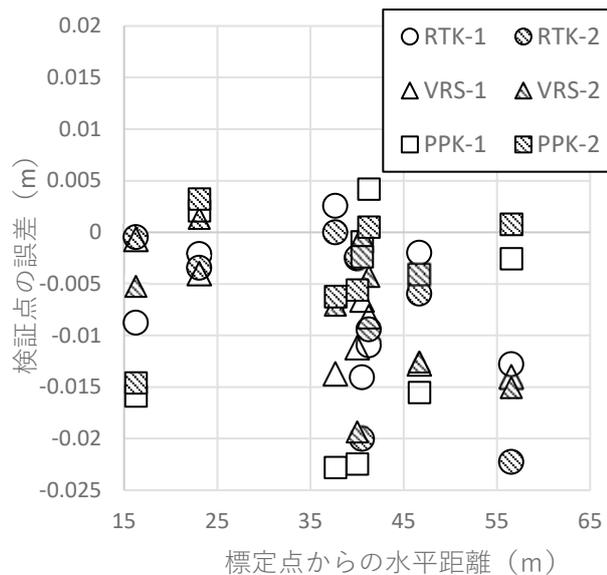


図-8 カメラ位置を直接計測する手法ごとの  
標定点-検証点間距離と測定誤差 (0.01m/画素)

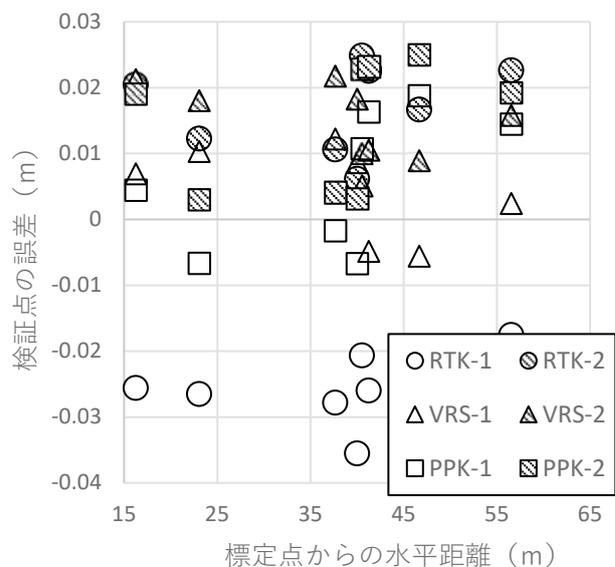


図-9 カメラ位置を直接計測する手法ごとの  
標定点-検証点間距離と測定誤差 (0.02m/画素)

## 5. 結論

検証結果から、RTK-GNSS搭載型UAVを用いた、RTK・ネットワーク型RTK(VRS)・PPKの各手法を用いたカメラ位置を直接計測する技術を用いた場合、標定点なしの時では、出来形管理要領に規定されている検証点精度を確保することができないが、1点以上設置すれば精度を確保できることが確認できた。

また、現行の要領では出来形計測において地上画素寸法0.01mを満足する条件を付していたが、カメラ位置を直接計測する手法を用いることで地上画素寸法0.02mとした場合でも所定の精度を確保できることが結果として得られた。

加えて、検証点の誤差は、標定点と検証点間の距離に依存しないことが示唆された。これは、RTK-GNSS等を用いてカメラ位置を直接計測した場合、XY軸方向の計測精度は高いがZ軸方向(高さ方向)は低いため、標定点を用いて高さ方向の座標を合わせていると考えられる。そのため、標定点の設置位置とXY軸方向の計測精度には関連がみられなかったと推測される。

今回の検証では、標定点を1点とした場合について、その設置位置が測量対象の中央の場合にのみ、標定点と検証点間の距離とその測定誤差について検証を実施したが、他の4点のうち1点を標定点として使用した場合での精度検証を追加で実施することで、標定点の配置場所の制約条件等を調査することができると思われる。

本報ではRTK-GNSS搭載型UAVを用いて検証を行った。今後は、本検証結果の妥当性を検討するために、現行の要領で使用可能と記載されているTS追尾型UAVを用いて、今回の検証と同条件で追加検証を行い、その結果の比較・検討の実施を予定している。

## 参考文献

- 1) 空中写真測量(無人航空機)を用いた出来形管理要領(土工編)(案), 2019
- 2) UAVを用いた公共測量マニュアル(案), 2017
- 3) 第11回 ICT導入協議会資料, 2020

## 9. 土工の出来高算出における動画を使う写真測量の 精度確認手法と撮影条件

国土交通省国土技術政策総合研究所  
国土交通省国土技術政策総合研究所  
国立研究開発法人土木研究所

○ 金森 宗一郎  
小塚 清  
森川 博邦

### 1. 背景と目的

#### 1.1 出来高部分払方式への ICT 活用

我が国では、公共工事代金の支払方法として前金払および完成払の2回払、もしくは前金払、中間前金払、完成払の3回払が一般的である。前金払は工事契約締結直後に請負代金額のうち最大40%を支払うものであり、中間前金払は出来高および工期が半分をこえた後に請負代金額の最大20%を支払うものである。

このような支払方式においては、工期の後半や増額変更の際に、請負業者が工事資金調達による金利負担を負ったり、下請業者への支払が遅れたりする可能性がある<sup>1)</sup>。

そこで、国土交通省では3ヶ月に1回程度の頻度で出来高に応じて工事代金の部分払を行う出来高部分払方式を実施している。これにより、請負業者の財務状況の改善や、下請業者への工事代金の支払の迅速化といった効果が得られることが報告されている<sup>2)</sup>。

このような状況を受け、国土交通省では ICT を用いた出来形管理要領において、レーザスキャナや UAV 写真測量といった技術を、出来高部分払方式における出来高計測にも使用することができるように定めている<sup>3)4)</sup>。このように出来高部分払方式における出来高計測に使用可能な技術の選択肢を増やすことで、請負業者が出来高部分払方式を使用しやすくなることが期待される。

請負業者が出来高部分払方式をさらに使用しやすい環境を構築するためには、より多くの技術を出来高部分払方式における出来高計測に使用することができるように、要領を整備していくことが望ましい。

#### 1.2 動画を使う写真測量による出来高計測

本研究が実施された令和元年当時、開発が進んでいた一方で、要領が策定されていなかった技術の一つとして、動画を使う写真測量による出来高算出が挙げられる。

この技術の原理を以下に記す。まず、人が盛土などの計測対象の周りを歩行しながらスマホやデジカメで動画撮影を行う(図-1)。このとき、スマホやデジカメには GNSS アンテナを取付け(図-2)時間と位置を記録する。得られた動画から写真を切り出し、SfM という技術により点群データを取得する。得られた点群データと起工面データを使用し、出来高を算出する。

レーザスキャナや UAV 写真測量が広範囲の計測を短時間で行えるが高価な機器が必要になるという特徴を持つ一方で、本技術は広範囲の計測には向かないが安価な機器のみで計測を行えるという特徴を持つ。

動画を使う写真測量による出来高算出の要領が策定されていない理由は以下の3点が挙げられる。

- ・必要な精度を得るための計測条件を、要領において厳密に規定する必要があるか不明であること。
- ・動画を使う写真測量による出来高算出を行うある製品の精度確認において、レーザスキャナや UAV 写真測量で用いられている基準値を適用可能か不明であること。
- ・本技術を使用することで生産性が向上する効果が得られるか不明であること。

#### 1.3 本研究の目的

以上のことから、本研究では、動画を使う写真測量による出来高算出について、以下の3点を達成することを目的とした。

- ・必要な精度を得るための計測条件を厳密に規定することの可否を明らかにすること。
- ・レーザスキャナや UAV 写真測量での出来高計測で用いられている基準値を適用可能か確かめること。
- ・従来法と比較して生産性が向上するか明らかにすること。

上記を達成する方法として、実機を用いた現場検証を行った。

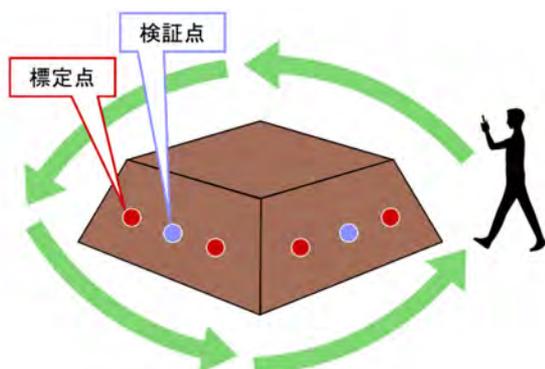


図-1 盛土撮影の概略図



図-2 GNSS アンテナを取り付けた撮影用スマートフォン

## 2. 検証方法

### 2.1 計測条件と基準値の検討

写真測量においては、測量精度を確保するために座標が既知である点を撮影範囲内に設置し、測量の基準とすることが多い。設置された点は標定点と検証点に分けられる。標定点は、写真測量の座標計測において基準とするための点である。一方、検証点は座標計測においては使用されず、計測後に計測誤差を評価するために使用される。

標定点は数が多いほど測量精度が上がるのが期待できるが、設置時に TS 等で座標を計測する必要があり手間がかかる。そのため、出来高部分払方式に必要とされる出来高計測の精度を満足するために設置しなければならない標定点の数を明らかにすることは、作業量を最小限に抑えつつ求められる精度を確保するために重要である。

必要な標定点の数を明らかにするために、以下の手順で標定点の数を変えて SfM および出来高算出を行った。

#### <測定手順>

- i 盛土施工前の起工面データを作成する。
- ii 図-1 のように、計測対象の盛土の法面に標定点と検証点を設置し、TS で座標を計測する。隣り合う標定点の間隔は 25 m とする。

iii 図-1 のように、計測対象の盛土を徒歩で一周しながら GNSS つきスマートフォンで盛土の法面を動画撮影する。

iv 得られた動画から写真を切り出し、SfM により点群データを作成する。この際、同じ写真を使い、以下の3条件でそれぞれ点群データを作成する。

- ・標定点すべて (25 m 間隔) を使用する。
- ・標定点の半分 (50 m 間隔) を使用する。
- ・標定点の 4 分の 1 (100 m 間隔) を使用する。

v 得られた出来形面データと起工面データから出来高を算出する。

3 条件の計測結果についてそれぞれ以下の 2 点を満たすか調べた。

① SfM で得られた点群における検証点座標の計測値と真値との較差が、既存の技術において定められた値 (x, y, z 方向の較差がそれぞれ 200 mm 以下<sup>34)</sup>) を下回っていること。

② SfM で得られた点群から作成した出来形面データより算出した出来高が、真値 $\pm 10\%$ に収まっていること。

①における検証点座標の真値としてはトータルステーション (以下 TS) で計測した値を用いた。②における出来高の真値としてはレーザスキャナで計測して得られた出来形面データより算出した値を用いた。これらの技術は比較的高精度で座標の計測が行えることから、真値に十分近いと仮定できると考えたためである。

また、②において基準を真値 $\pm 10\%$ としたのは以下のような理由による。出来高部分払方式では計測した出来高の 9 割分の工事代金を支払うこととされている。よって、算出した出来高が真値 $\pm 10\%$ に収まっていれば、実際の出来高を超えて工事代金を支払うといった事態を防ぐことができる。

### 2.2 作業に要する時間の検討

従来法による出来高算出と、本技術を用いた出来高算出に要する時間を比較した。

従来法として、巻き尺及びトータルステーションによる計測により盛土の図面を作成し、幾何的に土量算出を行った。

なお、2.に記した実験の全ては日本建設機械施工協会に業務委託して行った。

## 3. 結果と考察

### 3.1 標定点間隔と検証点座標の計測誤差の関係

標定点間隔を 25 m または 50 m とした場合、SfM によって点群データを得ることができた。一方で、標定点間隔を 100 m とした場合、SfM によって点群データを生成することができなかった。

表-1 動画を使う写真測量で計測した検証点座標と真値 (TS で計測した検証点座標) の較差  
(東を x 軸正方向、北を y 軸正方向、鉛直上向きを z 軸正方向とする。較差が 200 mm 以下であれば、既存の技術で出来高部分払方式の出来高計測を行う際に必要とされる計測精度を満たす。)

標定点間隔 [m]	検証点 1			検証点 2			検証点 3		
	$\Delta x$ [mm]	$\Delta y$ [mm]	$\Delta z$ [mm]	$\Delta x$ [mm]	$\Delta y$ [mm]	$\Delta z$ [mm]	$\Delta x$ [mm]	$\Delta y$ [mm]	$\Delta z$ [mm]
25	37	25	-19	86	8	15	-34	-25	25
25	-2	-15	2	-28	12	-1	29	-16	4
25	-39	-22	-4	-39	41	1	-9	6	4
50	-22	-48	-31	-20	15	112	-57	-3	58

これは標定点の数が足りず、座標を算出する条件が不足したものと考えられる。

表 1 に標定点間隔を 25 m または 50 m としたときの SfM で算出した検証点座標と、TS で計測した検証点座標の較差を示す。全ての検証点の全ての方向の較差が 200 mm を下回っており、レーザスキャナや UAV 写真測量で出来高部分払方式の出来高計測を行う際に必要とされる計測精度を満たしている。

以上の結果から、動画を使う写真測量において、点群データを生成可能であれば、標定点間隔によらず既存の技術で出来高部分払方式の出来高計測を行う際に必要とされる精度を満たすことができると分かった。

### 3.2 出来高の計測誤差

動画を使う写真測量による出来高計測で算出した土量と、レーザスキャナによる出来高計測で算出した土量の比較を表 2 に示す。なお、写真測量からの算出には 3.1 において生成に成功した点群データを使用したものであり、従って、検証点座標の測定誤差が 200 mm を下回っているものである。

写真測量の場合はレーザスキャナと比較して 3.8% 多い値が得られた。これは、2.1 で設定した真値 $\pm 10\%$ という基準を満たす値である。

以上の結果は、写真測量で算出した検証点座標と、TS で計測した検証点座標の較差が 200 mm を下回っていれば、真値 $\pm 10\%$ の精度で出来高の算出が可能であることを示唆する。

### 3.3 出来高の計測精度を確保できる盛土高さ

写真測量の座標計測誤差の大きさは、計測地点の座標の値に追従して変化するものではなく、常に一定の範囲の値で与えられると考えることができる。従って、盛土の高さが低くなるほど座標計測誤差は相対的に大きくなり、出来高算出の相対誤差も大きくなることが予想される。

そこで、真値 $\pm 10\%$ の精度を確保できる最低限の盛土高さについて検討を行った。メッシュ法を使用する場合、土量の真値  $V_T$  と土

表-2 動画を使う写真測量で算出した土量とレーザスキャナで算出した土量の比較

	写真測量	レーザスキャナ(真値)
土量 [m <sup>3</sup> ]	6000.0	5790.1
割合(対レーザスキャナ)	103.8%	100%

量の計測値  $V_M$  は式 (1) のように表すことができる。ただし、 $h_{Ti}$  はあるメッシュにおける出来形の起工面からの高さの真値、 $h_{Ei}$  はあるメッシュにおける出来形の起工面からの高さの計測誤差、 $S_i$  はあるメッシュの鉛直方向の投影面積をそれぞれ表す。

$$V_T = \sum_i^n h_{Ti} S_i, \quad V_M = \sum_i^n (h_{Ti} + h_{Ei}) S_i \quad (1)$$

$S_i$  が全てのメッシュにおいて一定であると仮定すると、算出した土量の相対誤差  $\epsilon_R$  は式 (2) のように表すことができる。

$$\epsilon_R = \frac{V_M - V_T}{V_T} = \frac{nS \sum_i^n h_{Ei}}{nS \sum_i^n h_{Ti}} = \frac{\overline{h_E}}{\overline{h_T}} \quad (2)$$

$$(\overline{h_T} = \frac{1}{n} \sum_i^n h_{Ti}, \overline{h_E} = \frac{1}{n} \sum_i^n h_{Ei})$$

すなわち、算出した土量の相対誤差は、z 軸座標計測誤差の平均値を真の起工面から出来形までの高さの平均値で除した値に等しい。

ところで、表 1 に示す z 軸方向の計測誤差から 99% 信頼区間を算出すると、 $14 \pm 34$  [mm] である。これは、動画を使う写真測量で任意の回数だけ座標計測をしたとき、それらの計測誤差の平均値が 99% の確率で  $14 \pm 34$  [mm] に収まると言うことを示している。

ここで、z 軸座標計測誤差の平均値を算出した 99% 信頼区間における最大値 48 [mm] とおくと、相対誤差  $\epsilon_R$  が 10% 未満となるような  $\overline{h_T}$  の最小値は式 (2) より 480 [mm] と求められる。

この結果は、動画を使う写真測量を用いる場合、盛土の平均高さが 480 [mm] を越えていれば、真値

±10%の精度での土量算出が行える確率が99%を越えるということを示す。ほとんど全ての盛土は1~10[m]オーダの平均高さを有するため、本技術は平均高さ1メートル以上の盛土の土量算出に十分有効であると考えられる。

### 3.4 計測条件の規定および基準値の提案

3.1の結果より、点群データを生成可能であれば、その点群データは既存の技術において定められている計測誤差200mm以下を満たす精度での座標計測が可能であることが分かった。また、3.2の結果より、計測誤差200mm以下を満たす精度で得られた点群データを使用すれば、真値±10%以内の精度で出来高算出が可能であることが分かった。

これらのことから、十分な精度で出来高算出を行えるための条件は、点群データが生成できていること、および計測誤差200mm以下であることの2点である可能性がある。そうであれば、標定点の数などの撮影条件を要領において厳密に規定する必要は無く、検証点を用いた精度確認のみを行うように定めるべきである。また、精度確認においては、既存の技術と同様、3軸全てにおいて計測誤差200mm以下であることを確認するべきである。

ただし、本研究においては、標定点を設置していない場合の検討は行っていないため、標定点を設置せずに点群データを作成できた場合に、十分な精度で出来高計測を行えることを直接的に支持する根拠はない。

### 3.5 作業に要する時間

図-3に巻き尺及びTSを使う従来法による出来高計測に要した時間と、動画を使う出来高計測に要した時間を比較するグラフを示す。

従来法では90分を要する一方で、動画による写真測量では35分を要した。従来法と比べて半分以上の所要時間で計測を行える事が分かった。特に、計測に要する時間が著しく短縮された。

この結果から、動画を使う写真測量による出来高計測を使うことは生産性向上に有効であると言える。

## 4. 結言

動画を使う写真測量による出来高計測について、実機を用いた現場検証を行った。その結果、以下のことを明らかにした。

- ・撮影条件を厳密に規定せずとも、検証点を用いた精度確認を行えば、十分な精度で出来高算出を行うことが可能であること。ただし、標定点の不要であるかについては更なる検討を必要とする。
- ・精度確認では、レーザスキャナやUAV写真測量

での出来高計測で用いられている基準値を適用可能であること

- ・従来法と比較して計測の所要時間が半以下になる場合があること。

また、一般的に見られるどんな高さの盛土に対しても有効であることを統計的に示した。

ただし、本研究は可能なあらゆる動画を使う写真測量システムについて検証したものではない。また、あらゆる現場において検証を行ったものでもない。したがって、ここで得られた結論が異なる構成の動画を使う写真測量システムや、異なる特性を持つ現場に適用可能か検討することは、今後の課題である。

また、今後、動画を使う写真測量の座標計測精度が向上すれば、出来高計測だけでなく出来形管理にも使用できるようになる可能性がある。その際には、出来形管理に必要な精度を満たすための計測条件の既定の要否や、精度確認手法について検討を行っていくことが必要である。

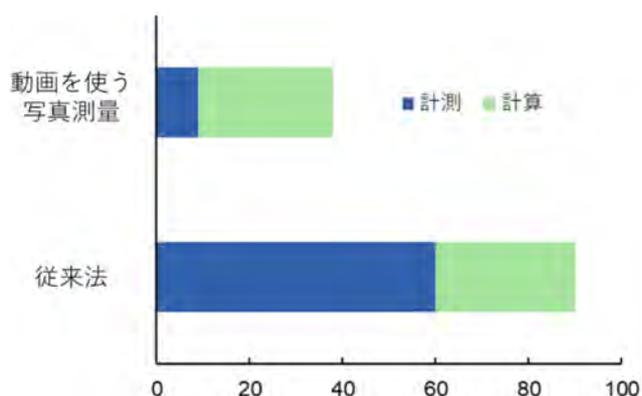


図-3 動画を使う出来高計測に要した時間と、巻き尺及びTSを使う従来法による出来高計測に要した時間の比較

## 謝辞

本研究の現場検証は日立建機株式会社の協力のもと、円山川鶴岡地区河道掘削工事現場で、同社所有の機器を用いて実施した。記して謝意を示す。

## 参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所: 出来高部分払方式検討報告書, 2002
- 2) 溝口 宏樹: 我が国における出来高部分払方式の試行を通じた効果・課題と改善策に関する考察, 建設マネジメント研究論文集, Vol11, pp.1~13, 2004
- 3) 国土交通省: 空中写真測量(無人航空機)を用いた出来形管理要領(土工編)(案), 2020
- 4) 国土交通省: 地上型レーザスキャナーを用いた出来形管理要領(土工編)(案), 2020

## 10. 見える化技術を活用した建設現場の新たな取組み

### 新名神枚方工事における「建設現場の見える化」技術の導入実績

鹿島建設株式会社

○ 大屋 満

#### 1. はじめに

近年、建設業の働き手は減少の一途を辿っており、深刻な人手不足に陥っている。建設業界では、担い手の確保・育成に向け、働き方改革を進めるとともに、IoT技術を積極的に取り入れた生産性の向上が求められている。こうしたなか、当社では2018年8月に「鹿島スマート生産ビジョン」を策定し、建設現場の生産性向上に取り組んできた。

これを受け、新名神枚方工事では「建設現場の見える化プロジェクト」として技術の更なる高度化を目指し、様々なIoT技術を導入した生産性向上と安全管理活動を進めている。また、新たな取組みとして、「バイタルセンサを活用した熱中症予防管理」の試行に取り組んでいる。本稿では、その概要と実績について報告する。

#### 2. 見える化プロジェクトについて

##### 2.1 プロジェクトのコンセプト

見える化プロジェクトでは、建設現場の工場化を目指し、「施工」と「管理」を2つの切り口と4つのアプローチで技術導入を計画している。

施工では機械化・自動化、プレハブ化等を取り入れ、管理ではICTツールの導入とIoT技術による一元管理で管理の高度化を目指す（図-1）。

##### 2.2 モニタリングを活用した見える化

現場で発生する問題・課題をタイムリーに発見し、正確な原因の特定を行うため、本工事では、ウェアラブルカメラをはじめとする各種モニタリング技術を活用して現場の見える化に取り組んでいる（図-2）。

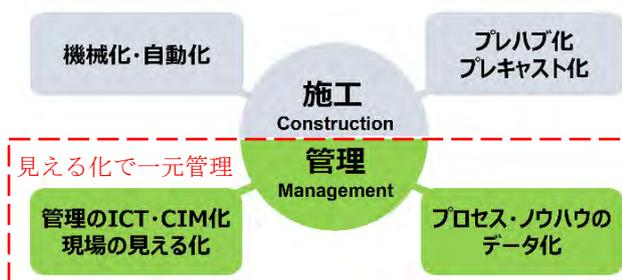


図-1 建設現場の工場化への取組み



図-2 モニタリングを活用した見える化

#### 3. 導入技術の概要

##### 3.1 多機能カメラによる現場監視

従来のカメラは監視カメラを通して「人が監視」をしており、逆に言えば人が見ていない時は監視ができていなかった。本工事では、画像認識、アラート発信などの機能を有する多機能カメラを導入し、「カメラ自身が監視」するシステムを構築して現場管理の高度化を検証している。

現在は、長期間現場を閉所する時に動体検知機能を活用した現場無人監視を行っている（写真-1）（表-1）。

##### 3.2 ウェアラブルカメラによる双方向通信

これまでの安全管理に加え新たなアプローチとして、ウェアラブルカメラによる現場の見える化を実施している。導入しているクラウド型ウェアラブルカメラは、可搬式でヘッドセットを使用して同時通話ができるという利点を生かし、現場の安全巡視などに活用している。

安全巡視を行う際には、ウェアラブルカメラを装着し、事務所と双方向通話をしながら配信される画像を確認することで、質の高い安全巡視が可能となる。また、可搬式のため当日の重点作業場所や重機運転室などに設置することで、日々の安全管理活動を充実させている。

配信される画像は、多人数同時視聴が可能で、本支店と現場の双方向通信に役立っている。

録画した画像はタイムラプス機能により施工サイクルや作業手順の確認などに活用が可能である（図-2）（表-2）。



写真-1 多機能カメラによる動体検知画像

表-1 多機能カメラの概要

機能の概要	通常のカメラ機能に加え 動体検知, アラート機能, 車両ナンバー検知, サーマル機能などがある
効果	現場の無人監視 (省力化)

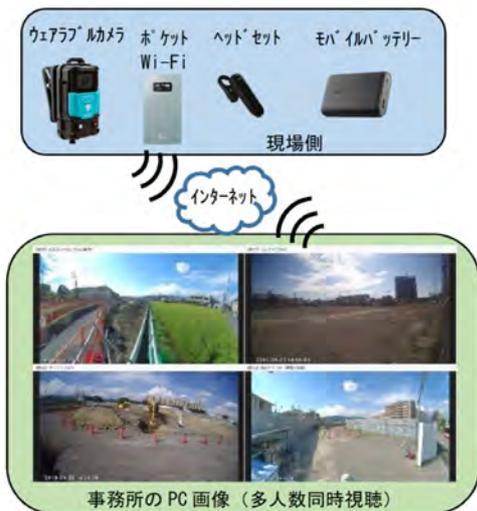


図-2 ウェアラブルカメラのシステム概要図

表-2 ウェアラブルカメラの概要

機能の概要	画像のクラウド保存 スナップショット, タイムラプス 赤外線機能 ヘッドセットを使用した双方向通話
効果	現場管理の死角を補完, 災害発生時の検証 現場緊張感の醸成, 作業ワンサイクルの確認 遠隔立会への拡張

### 3.3 重機稼働情報システム, バイタルセンサ

工事目的物ではなく、それを造る側すなわち、作業員や機械のデータを活用して生産性の向上につながる試行として、IoT 技術を取り入れた重機稼働情報システムとバイタルセンサを導入している。

重機稼働情報システムは、GPS トラッカーと呼

ばれるセンサーを重機のシガーソケットに差し込み、稼働情報や位置情報を取得する(図-3)(表-3)。一方、作業員には、腕時計型のバイタルセンサを装着することで、位置情報に加え、心拍、体表面温度などのバイタル情報を取得するとともに、緊急時には自ら SOS 発信を行うことが可能となる(図-4)(表-4)。

得られた情報は、クラウドサーバを介して地図上に位置情報としてリアルタイムに表示される(図-5)。

機械については、帳票として稼働表を出力でき、稼働率の低い機械の返納や、稼働時間による施工機械の評価に活用できる。車両の走行履歴は、ダンプの運行ルート確認や運搬回数、サイクルタイムの確認に活用可能である。

バイタルセンサは、IoT 時代の通信システムである LPWA (Low Power Wide Area) の通信規格の一つである LoRa 通信を採用している。

LPWA 通信は、省電力で広い範囲をカバーできる通信規格である。特徴は、通信速度は低速だが、数キロメートル程度の長距離伝送が可能な省電力無線方式という点にある。

今回導入したバイタルセンサのように、通信速度に依存しなければ、現場にインターネット環境を整備するより早く設置でき、かつ安価であるため、本工事では、バイタルセンサの通信システムに採用した。



図-3 重機稼働情報システム概要図

表-3 重機稼働システムの概要

機能の概要	GPS トラッカーにより重機の位置情報と稼働情報をクラウドサーバに記録
効果	重機をリアルタイムに把握 場外運行車両の見える化 稼働表によるレンタル機械継続使用の検討

—6)。



図-4 バイタルセンサシステム概要図



写真-2 タブレット端末による顔認証

表-4 バイタルセンサの概要

機能の概要	GPS 機能, SOS 機能, 転倒検知機能, 歩数, 接触式心拍センサ (光学式), 皮膚温度センサによりバイタル情報をリアルタイムに取得し事務所モニターで履歴まで一元管理
効果	社員・作業員の位置確認 心拍異常・SOS アラートによる熱中症予防 緊急時の連絡先社員の確定

表-5 顔認証システムの概要

機能の概要	顔認証による作業員の労務管理
効果	正確な入退場管理 延べ労働時間集計の省力 リアルタイムに従業員数を把握



図-5 地図上に表示される位置情報と走行履歴

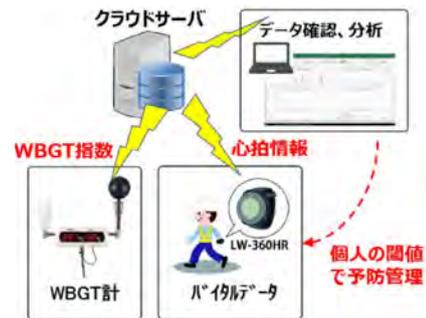


図-6 熱中症予防管理のイメージ

### 3.4 顔認証システム

顔認証入退場システムは、国土交通省主導で2019年4月から開始した「建設キャリアアップシステム (CCUS)」の導入を見据えて、顔認証によって作業員の入退場管理を行う新しい現場労務管理システムである。

事前に作業員情報の登録を行い、入場時はタブレット型端末で作業員の顔を撮影すれば入場完了となる。退場時と同じように、タブレット型端末で顔認証を行うことで、一日の入退場管理が完了となる (写真-2) (表-5)。

## 4. 生体データを用いた安全管理の試行

### 4.1 心拍数による熱中症予防管理

熱中症予防の新たな取り組みとして、バイタルセンサから得られる心拍データと WBGT 計の値を用いた熱中症予防管理を試験的に実施した (図

### 4.2 心拍数の閾値設定

国際標準化機構 ISO では、作業中の1分間の持続心拍数は180-年齢を超えてはならないとしている。

現場では、作業員一人ひとりに心拍数の閾値を設定することが難しいことと、心拍センサの精度が最大±10bpmあることを考慮し、心拍130bpm (10回以上/日)を心拍の閾値として心拍データの収集を行った (表-6)。

表-6 熱中症予防のための心拍閾値

年齢	30	35	40	45	50	55	60	備考
最大心拍数 (bpm)	150	145	140	135	130	125	120	180-年齢

← 閾値130bpmとした場合の心拍センサの精度範囲 (120~140bpm) →

### 4.3 心拍データの調査実績

表-7は心拍データの調査実績である。心拍データ取得者数、延べ323人の内、閾値（心拍130bpm 10回以上/日）を超えた作業員は43人。調査期間中、熱中症発症者はゼロであったが、熱中症に至らずとも「いつもより疲れた」と疲労報告を受けた作業員は4名であった。現場では、WBGT計の値を参考に熱中症対策を実施しているが、ほぼ全日に渡って閾値超過が発生している（図-7）。

要因の一つとして、心拍数はWBGT計の値以上に、作業内容（心拍負荷の強度）の影響を強く受けていることが考えられる。

### 4.4 管理方法について

上述のとおり、心拍のピーク値（心拍130bpm 10回以上/日）だけを捉えた管理では、熱中症の予防管理として不十分であることから、疲労報告のあった作業員4名について、作業中（8:30～17:00）の心拍データを集計し、その値を日平均心拍数として心拍の傾向を分析したところ、4名とも疲労報告の発生した日は、前日と比べ日平均心拍数が急激に上昇していることが分かった（図-8）。

表-7 心拍データの調査実績

項目	計
作業日数(日)	29
心拍データ取得者数(人)	323
心拍130bpm以上(10回以上/日)の人数(人)	43
疲労報告者数(人)	4

このように、心拍数の傾向を日常的に把握し、「見える化」することで、今まで感覚的に捉えていた疲労の度合いを、定量的に捉える有効的な判断材料になると考えられる。更に、WBGT計の情報と組み合わせることで、「心拍数」と「暑さ」の双方から、より作業ストレスの高いシチュエーションを特定し、個々の作業員に対し、作業負荷の軽減や、声掛け、あるいは当該作業環境の改善など、事前に有効な熱中症予防措置を講じることが可能となる（図-9）。

### 5. おわりに

本稿では、見える化プロジェクトとして導入した技術の概要とバイタルセンサを活用した新たな安全管理の取り組みについて報告した。

本稿が、建設現場の見える化の参考となれば幸いである。



図-9 心拍数を用いた熱中症予防管理



図-7 心拍130bpm（10回以上/日）とWBGT値

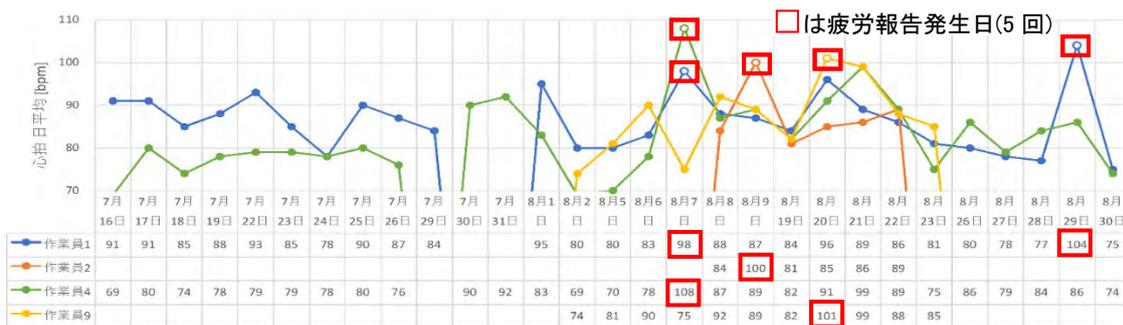


図-8 日平均心拍数と心拍130bpm以上の回数

# 11. 遠隔臨場による移動レス・接触レスな働き方改革

映像活用 CIM 研究会 ○ 柳瀬ひろし  
 株式会社 環境風土テクノ 須田 清隆  
 株式会社 堀口組 漆館 直

## 1. はじめに

国土交通省では、建設現場の生産性向上を目指す i-Construction と、統合イノベーション戦略 (H30.6.15 閣議決定) を受け、「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」を進めている。

本論文では、上記プロジェクトに採択された『一般国道 239 号苫前町霧立峠改良外一連工事』『一般国道 231 号増毛町大別荘トンネル補修外一連工事』<sup>1)</sup>での、映像を活用した ICT/IOT 化の取組についてまとめている。

ICT/IOT 化の取組としては、リーンマネージメントの発想で無駄を削ぎ落とす視点で、山間部の通信環境が良くない立地での、遠隔臨場を用いた施工現場の無駄と思われる待ち時間の解消、移動時間の解消や、撮影した映像の振り返りによるコミュニケーション齟齬が原因とする手戻り時間の解消などによる働き方改革による施工の生産性効率化を提案している。

## 2. 施工現場の課題抽出

リーンマネジメント (無駄の解消) の考え方を土木工事の建設プロセスに適用している。建設業ではムリ・ムダ・ムラの解消は以前から行われているが、IT 化が急激に進む社会では、特に中小建設業においては従来の固定観念がボトルネックになっている現状がある。現在では技術のコモディティー化が進み、映像機器、各種センサー、エッジコンピュータ、AI 推論ソフトウェアおよびハードウェア、通信機器等の導入コストは大幅に低下してきている。中小の建設業においても、汎用的かつ低価格な IT 化により施工過程を映像による仮想臨場化することが容易になってきている。

本報告では、スマートフォンなど使いなれた道具を利用して映像技術を活用した無駄の排除を行い施工の生産性向上を図ろうとしている。

リーンマネージメントの発想で、ブレインストーミングによる無駄の抽出を以下に示す。

表-1 ブレインストーミングによる無駄の抽出

作業 分類	ブレインストーミング
----------	------------

無駄	60 km以上の移動時間 遠隔地での定期的な現場監視 コミュニケーション齟齬による手戻り時間 不注意な事故 (ヒューマンエラー) 必要以上の資材の在庫
付帯 作業	狭い工事区域での施工管理 交通誘導による交通障害の改善行動 安全確保のためのパトロール・記録簿作成 ICT 工事のための準備 IT を理解して使えるまでの手間 通信環境の整備に関する手間 電源の確保の手間 IT 化へのための投資までの社内手続き 会議開催の時間調整 コンクリート仕上げ測量 施工検査など膨大な書類作成
正味 作業	重機接触事故の懸念 コンクリートの打設・仕上げ 土留め矢板の打ち込み管理と変位管理 配筋の設計データとの精査及び結果報告 型枠の立ち上げと仕上げ コンクリートの出荷から打設までの時間管理 による品質維持

### <現状分析>

- ① 人材難による ICT/IOT 化対応の困難
- ② 技術が個人に依存、高齢技術者の退職は技術の消失に繋がる
- ③ 一人現場が多い小規模工事では、本社や現場の技術者の移動に手間が掛かる
- ④ 小規模工事が多く情報化環境の整備が困難
- ⑤ 現場管理の主体が膨大な書類作成を強いられている
- ⑥ 経験主義が強く技術継承 (コミュニケーション) が苦手である

## 3. 映像 IOT の検証事業

映像 IOT の効果は、須田等の研究で取り組んできた映像 CIM の研究成果<sup>2)</sup>を応用し、中小企業連携で応募した国土交通省『建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト』の堀口組コンソーシアムにおいて、平成 30 年北海道開発局発注『一般国道 239 号苫前町霧立峠改良外一連工事』、平成 31 年発注『一般国道 231

号増毛町大別荊トンネル補修外一連工事』(visual-constructionによる労働生産性改革)を通して検証した。

**a. 立地条件と通信環境**

遠隔臨場により、発注者事務所や堀口組本社と現場事務所や現場での日常的に行えるリアルタイムなコミュニケーション環境の整備により、施工者、発注者共に移動時間の解消を目指した(図-1)。



図-1 事務所、現場の地理的条件



図-2 遠隔臨場システム構成

ネットワークカメラシステムは一般に普及しているLTE経由でインターネットサービスを使用するとともに、セキュリティの確保が重要な遠隔コミュニケーションと大量のデータ伝送を必要とする4Kマルチセンサーカメラは閉領域ネットワークサービスとMVMO (Mobile Virtual Network Operator, 仮想移動体通信事業者) サービスを利用している(図-2)。コミュニケーションでは、一般に通信事業者のサービスにおいて通常は上り下りの通信速度は対称(同じ速度)になっているが、本試行では上り速度を広帯域化(最大4Mbps)し下りを狭帯域化(最大256Kbps)した非対称通信サービスを活用した。これ

により、上りの現場映像を高品質で送信することを可能にしている(図-3)。

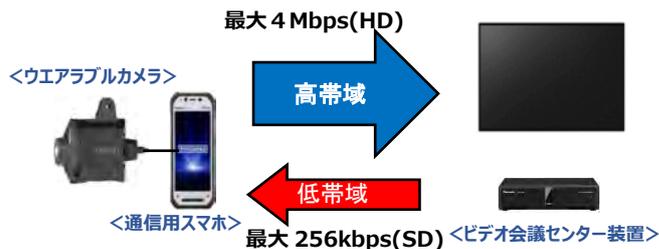


図-3 モバイル映像伝送システム構成 (非対称通信)

**b. 現場移動における無駄の解消**

遠隔臨場による施工管理では、発注者事務所や堀口組本社と現場事務所や現場での日常的に行えるリアルタイムなコミュニケーション環境の整備により、移動時間の解消と映像利用によるリスクの相互理解を2年間にわたり実現している。

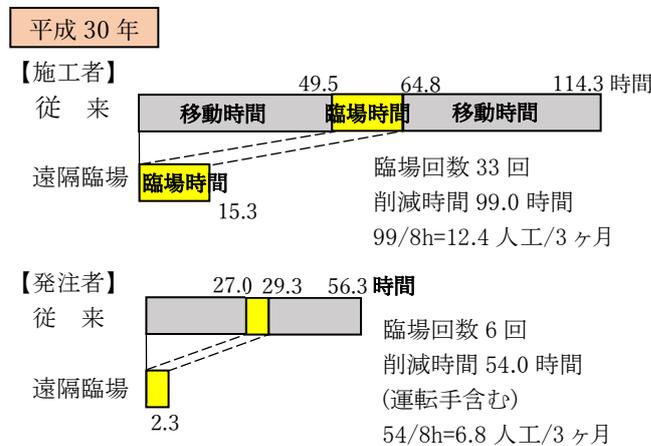


図-4 遠隔臨場による時間削減効果(平成30年)

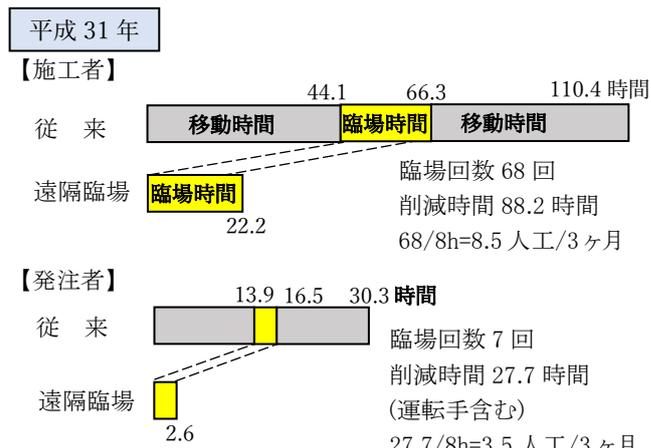


図-5 遠隔臨場による時間削減効果(平成31年)

施工者においては遠隔臨場を行うことで1年目99時間、2年目88時間の削減(図-4)(図-5)を行った。

1回当たりの臨場時間は、1年目0.46h→2年目0.33hと遠隔臨場を繰り返すことで臨場自体の習熟

と無駄の削減が見られた(写真-1)(写真-2)。

発注者においては1年目54時間、2年目28時間の時間削減と、複数人での移動のため削減効果が高くなっている。一方、1回当たり臨場時間には0.38h→0.37hと大きな変化はない。これは発注者においてはすでに検査内容のルール化、マニュアル化が進んでいるためと考えられる。

施工者においては、今後、継続的に遠隔臨場を繰り返すことで効率化が現れ無駄の削減が進むと考えられる。



写真-1 堀口組本社での臨場



写真-2 映像による検査

### c. 施工管理における無駄の解消

現場の法面崩壊発生において、24時間撮影のネットワークカメラ画像を設計者が遠隔で確認し、応急対策を現場に指示、札幌から約200kmの移動時間を活用して現場映像を確認しながら対策案を作成することで迅速な現場対応が可能となった(写真-3)。

このように、遠隔かつリアルタイムに現場映像を確認し把握できるため、緊急の場合も施工における意思決定の及ぼす待ち時間が短縮され、現場を止めるリスクが低減できた。



写真-3 法面崩壊状況と現地確認



写真-4 遠隔現場指導



写真-5 映像を活用した検討会

遠隔臨場により、本社常勤の管理者や熟練技術者の知見や経験知が同時に複数現場で多面的継続的に活用され、施工指導や工程管理等の迅速化とコミュニケーションのしやすい環境ができ、若手技術者の働きやすさ、技術・経験不足による手戻り時間の解消と、管理者の生産性向上につながった(写真-4)。

また、記録映像により工事過程での施工の振り返り検証が容易となり、施工課題の認識の共有化、改善の迅速化につながった(写真-5)。

### d. 書類作成における無駄の解消

現場映像そのものが作業の手順を表しているため、映像を使用し手順教育を行うことで、作業手順の理解度が高まった(写真-6)。



写真-6 映像による作業手順打合せ

このように、現場打合せに使用する書類を映像で代替することで、書類作成に要する時間を削減でき、現実の映像を使うことで現場空間の共有による認識の一致が容易となった。

また、元請下請間で必要な出来高認定も、従来は図面から数量計算し行っていたが、映像による出来形・歩掛の確認と、後述する3次元モデルによる数量把握が可能となり、書類作成時間が削減される。

さらに、現場写真は映像での代替が可能であり、不可視部分の確認に関しては連続的な映像を記録することで現場技術者の撮影手間、整理手間を大きく省くことができる。

その他、書類作成に関しては、現場技術者の大きな負担となっていて、映像で代替できる可能性のあるものが多いことより、今後書類の在り方の議論が必要となる。

### e. 不安全行動の解消

現場映像をタイムラプス化して安全活動(KY活動, 安全教育)および、安全パトロールに使用した。

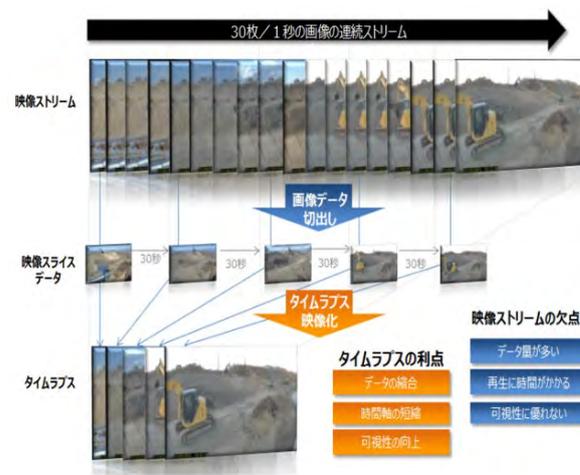


図-6 タイムラプス映像の活用

タイムラプスは、一定間隔で記録された静止画から動画を作るもので、長時間の現場の変化を短時間で表現でき、作業のふり取りや手順の確認が容易にできる(図-6)。言葉だけでなく実際の映像を見ながら不安全行動や危険個所の指摘が可能で、施工経験

の少ない作業員にも臨場感のある説明ができ、不安安全行動の解消につながった(写真-7)。

さらに、安全パトロールの指摘事項等を映像としてクラウドに上げることで、個人の経験に頼っていたヒヤリハット等、安全に関する情報の社内共有を図ることができた(写真-8)。



写真-7 映像を活用した安全教育

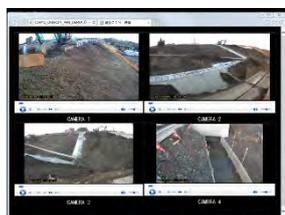


写真-8 安全情報の共有

#### f. 段階検査における無駄の解消

前述したように、発注者においては段階検査等で複数人での移動が基本となり、1回当りの臨場の時間削減効果は施工者よりも大きく、従来の90%以上に及ぶ。さらに、遠隔臨場においては検査準備が整ってからオンラインで検査を開始できるため、従来あった検査官の到着待ち時間、移動後の準備待ち時間がなくなり受発注者双方の無駄時間解消につながった(写真-9)(写真-10)。

また、記録された映像をふり返ることで、動きのある作業の確認や不可視部分の確認が可能となる等、時間をさかのぼった検査が可能となり検査の質が変わる可能性がある(写真-11)。

発注者側の省力化効果と、音声でリアルタイムな指示に対応できる映像の持つ信頼性、リアルタイム性が評価されている。



写真-9 映像による段階検査



写真-10 映像による法枠検査



写真-11 遠隔臨場による圧縮強度試験

#### g. 映像解析技術を使った無駄の解消

スマートフォンとクラウドによる写真撮影の簡素化と、過不足のない写真撮影位置を自動指示するソフトウェアの開発、少数の写真撮影から始めて追加撮影を反復するモデルの逐次改善プロセスの効果検証を『一般国道231号増毛町大別荊トンネル補修外一連工事』の豊浦工区において行い、撮影から0.5~1日で3次元モデルの生成が可能となった(図-7)。

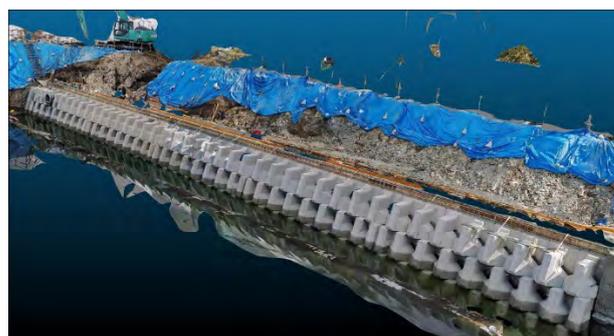


図-7 豊浦工区での写真映像による消波ブロックの高密度3次元モデル

施工途中の3次元モデルが短時間で生成可能となることで、出来上がり構造物の把握が容易となり担当者ごとの認識のズレがなくなる。

また、手間をかけずに細かい部位までの確認管理が可能となり、現場の出来形と出来高確認において測量や数量計算の手間を大幅に省くことができる。

また、時系列で3次元モデルを作成することで施工記録としての写真の代替や、テクスチャーを表現することで仕上がり品質を検査することができる。

さらに発注者においては、設計の3次元モデルと重ね合わせることで、任意の段階で出来形精度の確認が容易となる。

#### 4. まとめ

本試行は、中小建設業を対象としたICT/IOT化の取組として、映像を活用した遠隔臨場を柱として、リーンマネジメントの発想で無駄を削ぎ落とし生産性の向上を図ったものである。2年間の試行において実証された無駄の削減効果と、今後取組を継続することで期待される効果についてまとめた。

- ①遠隔臨場により施工者、発注者とも移動時間が削減され、『非常駐管理』の可能性が確認できた。
- ②ネットワークカメラによる遠隔での常時現場確認により、状況把握、情報共有の迅速化が図られた。
- ③映像記録の共有化により熟練技術者のノウハウの伝承、若手技術者の能力向上につながった。
- ④技術者の大きな負担となっている書類作成は、映像による代替の可能性が確認できた。今後、書類の在り方の議論を進めることで、更なる生産性向上へつながると思われる。

中小建設業の生産活動において、リーンマネジメントの発想で映像技術を活用し日常的に無駄を排除する活動が生産性の向上につながることが検証された。今後も継続して活動することでより一層の生産性向上効果が期待できる。

#### 参考文献

- 1) 西川他「Visual - construction の導入で施工生産性の向上を実現」建設機械 Vol. 56 No. 4 5P-10P 2020. 4
- 2) 須田他「中小零細建設業を対象にする映像を活用したCIMの開発」日本機械化協会平成27年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集

## 12. 発注者への ICT 施工に関するアンケート調査について

国土交通省関東地方整備局  
関東技術事務所

○ 河野 智一

### 1. はじめに

これまでの ICT 施工の普及展開に関する取組は、施工に関する手引き書の提供、ICT 建機や TLS 等 3 次元測量機器などを使用した施工管理の実習など、主に工事施工者等を対象としたものが多く、監督職員等発注者に向けたものが少ない現状にある。また、ICT 施工、i-construction、生産性向上と言われて久しいが、現時点においてはまだ一般化したとは言いがたい状況である。

そこで、上記のように発注者への取組が手薄であるとの視点から、監督職員等発注者を支援する取組を検討するために、ICT 施工が行われることによって監督職員等発注者の負荷がどのように増減しているかに着目し課題整理を行った。

### 2. 従来施工と ICT 施工の比較

監督職員等の負荷がどのように増減したかという観点で、工事の各工程で行う作業が従来施工と ICT 施工でどう違うかについて、施工数量の多い土工に着目し、特記仕様書や出来形管理要領、監督・検査要領等に基づき比較整理したものを表-1～2 に示す。

比較整理した結果、施工計画書作成から試験施工までの準備工段階において負荷が増え、まき出しから検査までの施工・検査段階では負荷が減っているのではないかと推定された。しかし現場の実態把握に関する調査がこれまで行われていなかったため、監督職員等の負荷の増減についてアンケート調査により明らかにしたいと考えた。

表-1 土工における従来施工と ICT 施工の比較（準備工段階）

	従来の施工	ICT活用工事の施工 (負荷が増えた点:実線, 減った点:破線)	監督職員の実施, 確認項目 (ICT施工)
施工計画書作成	現場確認後, 施工計画書を作成	現場確認後, 施工計画書を作成 <u>具体的なICT活用工事の内容や範囲について受発注者で事前に協議が必要</u>	適用工種の確認 出来形計測箇所, 出来形管理基準及び規格値・出来形管理写真基準等の確認 使用機器・ソフトウェアの確認 撮影計画の把握(UAV)
3次元設計データ作成		<u>発注者から貸与された設計図書等を基に3次元設計データを作成</u>	設計図書の3次元化の指示 3次元設計データチェックシートの確認
起工測量	平板測量, 中心線測量, 縦横断測量	使用機器の <u>精度確認試験が必要</u> TLS・UAV等を使用して <u>3次元の点群データを収集</u>	精度確認試験結果報告書の把握
配土計画	起工測量図面, 設計図書により必要土量, 発生土量を算出	<u>出来形管理ソフト</u> により必要土量, 発生土量を算出	
使用建機の選定	作業内容や作業規模に応じ, 使用する建設機械を選定	<u>締固め管理システムの適用の可否, 条件を確認</u> . 作業内容や規模に応じ使用建機を選定. <u>TS・GNSSの精度確認</u>	事前確認調査結果資料の確認
試験施工	施工仕様の把握, 過転圧となる締固め回数の把握	施工仕様の把握, 過転圧となる締固め回数の把握, <u>締固め管理システム作動確認</u>	土質試験・試験施工結果資料の確認

表-2 土工における従来施工と ICT 施工の比較（施工・検査段階）

	従来施工	ICT 活用工事の施工 (負荷が増えた点:実線, 減った点:破線)	監督職員の実施, 確認項目 (ICT 施工)
まき出し	200m に 1 回の頻度で写真によるまき出し厚管理	締固め層厚分付図の提出により, <u>写真管理を省略</u>	出来形管理状況の把握
締固め	締固め回数を目視やカウンター等で管理。施工後に現場密度試験	締固め回数を車載モニターで管理。 <u>現場密度試験は省略</u>	締固め施工状況の把握
出来形管理	施工延長 40m につき 1 箇所測定	測定密度 1 点/0.01m <sup>2</sup> 以上 (平面投影面積) で <u>面的に測定</u>	品質管理資料の受理
出来高管理	起工測量, 出来形測量の結果を基に算出	<u>点群データ処理ソフトウェア等</u> を使用し算出	出来形管理状況の把握
検査	200m につき 1 箇所以上	<u>1 工事につき 1 断面</u>	

### 3. アンケート調査

#### 3.1 調査対象

ICT 土工の実績が複数ある関東地方整備局管内の 4 出張所 (河川 2, 道路 2) において, 調査時点で ICT 土工の工事を工事着手から完成まで複数監督した実績のある監督職員等 (主任監督員, 監督員, 工事監督支援業務の現場技術員) の計 9 名を対象に実施した。また, アンケートの回収時に回答内容などに関するヒアリングを実施した。

#### 3.2 調査時期

令和元年 11 月 1 日から 11 月 29 日まで

#### 3.3 調査内容及び調査結果

##### (1) 各施工プロセスにおける ICT 施工と従来施工との比較

ICT 土工を行うことにより, 作業内容の各段階 (施工計画書作成・提出, 3 次元設計データ作成, 起工測量, その他の準備工段階, 出来形管理, 品質管理, 出来高管理, その他の施工段階, 検査, その他) において, 従来施工と比べて発注者における作業の難易, 作業量及び作業時間がどう変化したかについて, 負荷の増減を 5 段階評価 (かなり難しい・増えた, 少し難しい・増えた, ほぼ変わらない, 少し易しい・減った, かなり易しい・減った) で回答を求めた。なお回答者個人の主観によるが, 従来と比較して概ね 50%以上変化した場合は「かなり」, それより変化量が少ない場合は「少し」として回答を求めた。また「3 次元設計データ作成」については従来施工では行わない作業なので, 作業内容の難易についてのみ, 工事全般との比較とした。

結果を図-1~3 に示す。「施工計画書作成・提出」, 「その他の準備工段階」で難しい, 増えたという回答が多かった一方, 「出来形管理」, 「品質管理」, 「出来高管理」, 「その他施工段階」, 「検査」で易しい, 減ったという回答が多かった。全体を通じて, 準備工段階が従来と比較して作業内容がより難しく, 作業量, 作業時間がより増えたが, 実施工以降は作業内容がより易しく, 作業量, 作業時間がより

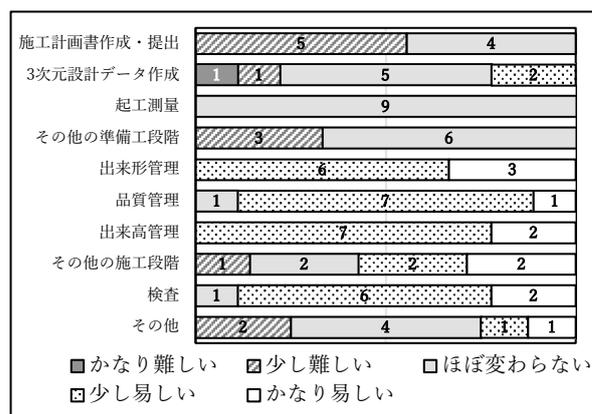


図-1 ICT 施工と従来施工との比較(作業の難易)

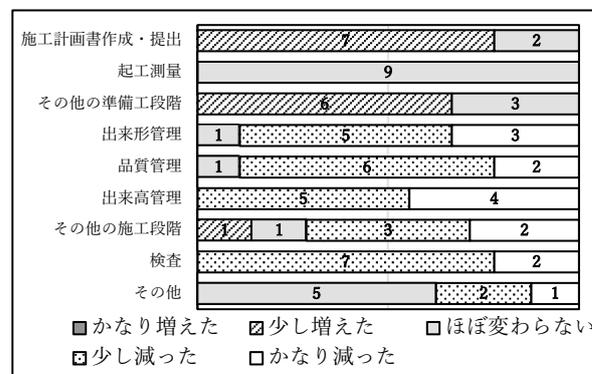


図-2 ICT 施工と従来施工との比較(作業量)

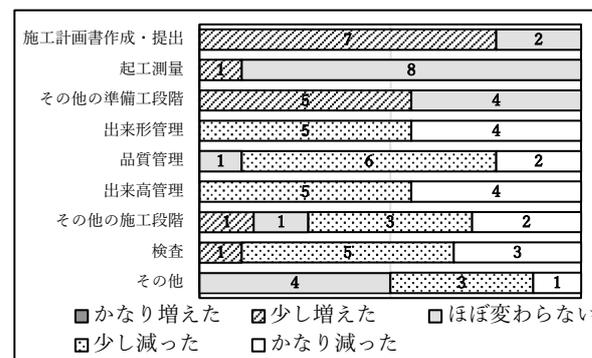


図-3 ICT 施工と従来施工との比較(作業時間)

減ったという、当初予想されていたとおりの結果を得た。

また要因や改善方策について、自由記述による回答やヒアリングにより得られた主な意見として、施工計画書作成から準備工までの段階においては、ICT 施工の要領や特記仕様書などで規定されている作業により負荷が増えたという回答や、受注者が作業を内製化出来ないことで生じるデメリットについての回答、作業の簡素化が伺える回答があった。代表的な回答は次のとおりである。

●施工計画書作成・提出

- ・施工者希望型の場合は ICT 施工のための協議が必要で、事務所上申の手続きが増えた。
- ・工事全体が ICT 施工とならないため、ICT 施工と従来施工の両方の施工計画書が提出され、確認作業が増えた。

●3次元設計データ作成

- ・3次元設計データを外注している受注者が多く、内容を問い合わせると回答に時間がかかる。
- ・受注者の3次元設計データ作成に非常に時間がかかるが、監督業務としてはほぼ皆無。
- ・受発注者ともにソフト面だけでなくハード面の整備が必要ではないか。

●その他の準備工

- ・ICT 施工の施工計画書は関連機器の構成や精度など確認事項が多く、その分だけ立会が増えた。

また、施工管理から工事検査までの段階においては、作業が簡素化されたという回答や、作業の可視化により管理が容易になったという回答など ICT 施工の導入目的に合致する回答を多数得られたが、一度作成した3次元設計データの修正が容易ではないことに起因する回答を得た。また、ICT 施工に慣れていない事に起因する回答もあった。代表的な回答は次のとおりである。

●出来形管理、品質管理

- ・ヒートマップによる出来形確認や現場密度試験の省略により立会回数が減った。それに伴い出来形書類が少なくなり確認作業時間が大幅に減った。
- ・合否判定総括表等で判断され、作業量は大幅に減った。
- ・GNSS 転圧管理により締め管理が目に見えるようになり管理しやすくなった。
- ・データ化され出来形のばらつき度等の確認が容易になった。

●その他の施工段階

- ・重機との接触の危険性が減ったので、安全面に対してかなりの効果が見込める。
- ・概略発注等により設計図面と現地に違いがある時や施工中形状の変更が生じた時は、2次元図面の修正とそれを基に3次元設計データの作成が再度必要となりかえって手間がかかる。

- ・電子納品について、格納ファイル名を LS または UAV を用いた出来形管理資料の特定ができるように記入するようになってるが、すぐにファイル名の特定が難しい場合もある。

●検査

- ・検査時に計測機器の設置等で時間を要することがある。

(2) 各施工プロセスの全体に対する割合

作業内容の各段階が、それぞれ全体に対してどれほどの割合を占めているかについて、3段階評価（大きい、中くらい、小さい）で回答を求めた結果を図-4に示す。「施工計画書作成・提出」、「3次元設計データ作成」は全体に占める割合が大きい、「出来形管理」、「出来高管理」、「その他の施工段階」、「検査」、「その他」は全体に占める割合が小さいという回答が多かった。

また、全体に占める割合が最も大きいと感じる作業から3位までの順位を聞いた結果を図-5に示す。「施工計画書作成・提出」については全員が、「3次元設計データ作成」、「その他の準備工段階」については過半数が上位3位までに挙げた。全般を通じて、前述で負荷が増えたという回答が多かった準備工までの各項目について、全体に占める割合も大きいと回答された。

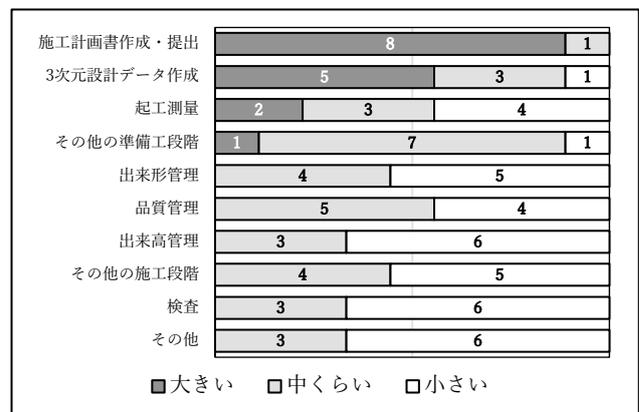


図-4 各作業の全体に占める割合

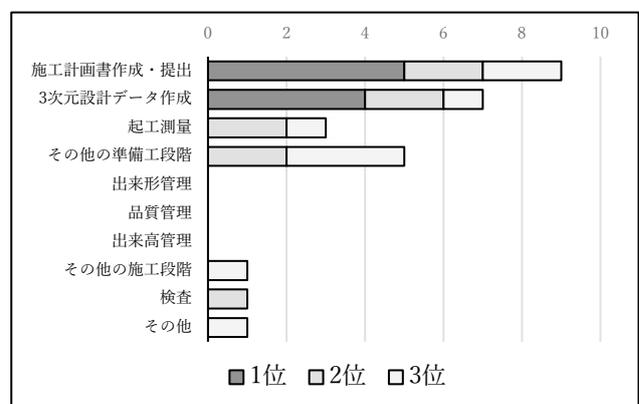


図-5 全体に占める割合の大きい作業

### (3) 不要、無駄と感じる作業

ICT 施工による作業内容の中で不要、無駄と感じる作業について聞いた結果、「特でない」という回答が多かったなか、アンケート回収時のヒアリングで、「業者が ICT 施工を希望した時、3次元設計データが出来た時にそれぞれ行う協議、事務所への上申を1回にまとめられないか。」といった手続の簡素化に関する意見、「測量機器自体の性能も向上しており、校正記録の確認も行うのに、現地でその都度精度確認を行う事に疑問である。」「受注者に品質証明員がいる場合は、転圧回数を決定する試験盛土や ICT 建機のキャリブレーションは書面確認で良いのではないか。」といった機器の信頼性に委ねても良いのではないかという趣旨の意見が得られた。

### (4) その他意見、要望等

上記以外や ICT 施工全体を通して自由記述によるアンケートの回答やアンケート回収時のヒアリングにより、多くの回答を得た。3次元設計データについては、ICT 施工のメリットを挙げる回答もあったが、主に3次元設計データの作成が容易ではない事に起因する回答も多く得られた。代表的な回答は次のとおりである。

- ・3次元設計データにより完成イメージが立体的に見られるので、仕上がり形状がよくわかる。
- ・細部において3次元設計データがイメージしていた形状と異なることがしばしばあるが、3次元設計データのチェックで見抜けないこともある。従来施工で行われていた現場合わせでの施工がより困難となったため、おかしいと思っても施工業者は3次元設計データどおりに施工しなければならず、完成品が変な形状になることもある。
- ・ICT 施工ではすべて3次元設計データに縛られるため、図面に手戻りがあると従来施工よりリカバリーに時間や手間がかかる。ICT 施工はイレギュラーに弱い。
- ・発注段階での3次元データがあれば、確認作業が容易になる等、負担が減るのではないか。
- ・従来の図面のように当初と変更の色分けが統一されておらず、様々な色で出てくる。

その他 ICT 施工全般については、ICT 施工を実感しての回答や ICT 施工が施工業者の間に徐々に普及、浸透している事が伺える回答が得られた一方、施工上の懸念や費用対効果に関する回答、執務環境の整備が施策に追いついていない事に起因する回答が得られた。代表的な回答は次のとおりである。

- ・堤防としては ICT 施工の方が、見た目も良く、強度も高いものが仕上がると思う。
- ・施工当初に従来施工とした部分の一部について、

3次元設計データを自ら作成して MG・MC 建機により施工承諾で行った事例もある。(変更する手間を考慮して)

- ・自社で3次元設計データを扱える受注者は端部の構造物付近も ICT 施工を行うところもある。このような業者は徐々に増えていると感じる。
- ・ICT 施工では最初に密度試験を行ったら締固め回数などの管理となるので、搬入土の粒度分布をより厳しく管理していないとばらつきが生じることも懸念される。
- ・規模の大きな工事では ICT は有効だと思うが、規模が小さく複雑な地形では従来工法のほうが良いと思う。
- ・3次元データを確認できる端末が出張所には無いので、提出されたデータを半ば信用するしかない。

## 4. まとめ

本調査では、土工について従来施工と ICT 施工を比較して監督職員の負荷がどのように変化したかを、河川・国道事務所の出張所で工事監督を行っている職員等に対しアンケート調査およびヒアリングを行った。その結果監督職員等の負荷は、ICT 施工の導入により施工管理等の作業が簡素化されることで現場施工の開始から完了検査までの段階で減少しているが、事前の協議・確認事項が新たに設けられたため施工計画書作成から準備工の段階で増加しているという、当初考えられたとおりの結果を確認した。また3次元設計データについては、出来形管理等を確認する作業の軽減に寄与するものの、その作成や修正が容易ではないことによりデータ作成を行う施工業者のみならず監督職員等にも負荷がかかっているなど、本調査を行うことで把握できた事もあった。

## 5. 今後に向けて

関東地整では ICT 施工の実績が無い工事受注者を支援する取組として「3D チャレンジ型(試行)」を昨年12月から実施しているが、今後は上記結果に加え、このような取組で情報収集を行うことで、監督職員等の負荷軽減に資する方策について検討していきたいと思う。

# 13. 標準歩掛と情報理論を用いた新技術の生産性評価手法

国土交通省関東技術事務所 ○ 高津 知司

## 1. はじめに

平成 28 年から始まった i-Construction は副題に「建設現場の生産性革命」とあり、第 1 章では「今こそ生産性向上に取り組むチャンス」と生産性向上を掲げている。それを受けて、ICT 活用を始めとする種々の生産性向上が報告されている<sup>2)</sup>。さらに、「働き方改革」が推進されており、あらゆる場面での生産性向上が求められている。また、生産性の向上を実現するための施策として、DX (Digital Transformation) も進められている。この DX に関しては、昨今の COVID-19 対策の有効な手段としても注目されつつある。

生産性向上には、作業手順等の改善や新技術の導入が不可欠である。一方、新技術の導入に際しては、従来技術に対してその優位性を客観的に示さなければならない。その際に課題となるのが、評価の視点、評価指標、比較対象および比較方法である。

過去の取り組み<sup>3)</sup>においては、工場生産で用いられていた IE (Industrial Engineering) を発展させた CE (Constructive Engineering) 等の手法が提案されている。これらの手法は、課題の発見から解決策の評価まで、すなわち、評価の視点から比較方法まで網羅している。評価の視点と評価指標は参考文献 3)に譲り、本論文では比較対象と比較方法を中心に考察する。

## 2. 評価手法

### 2.1 評価の視点

評価の視点は参考文献 3)では、「生産性の向上」「苦渋性の低減」「安全性の向上」「品質向上」「環境保全」が与えられている。今回対象とする「生産性の向上」に関しては、表-1 のように時間短縮と省力化に分類されている。

### 2.2 評価指標

生産性の向上などの視点で新技術の評価する場合は、その指標は定量的に表現できる必要があり、参考文献 3)では表-2 のように示してある。

計測方法は機械運行や工事工程の記録等の帳票のような業務上残される記録を利用する方法や、ビデオメモーションや IC カード利用などの現場計測が紹介されている。

表-1 生産性向上における改善の視点

改善の視点		施工改善の内容
生産性の向上	時間短縮	目標品質等を確保しながら目標とする施工量(全施工量、日・週・月・年単位施工量)を消化する野に要する時間を可能な限り短縮する。
	省力化	投入労働力を効率的に分配したり、一人当たりの作業量を上げることにより、目標とする施工量(全施工量、日・週・月・年単位施工量)に対する投入労働力の総量を減少する。

「CEマニュアル」より抜粋

表-2 生産性向上の評価指標

改善目的	評価項目	評価指標
生産性の向上(時短)	作業時間	作業単位(工程、単位作業、要素作業、動作)別の時間
	作業効率	出来高/作業時間、工程数、動作数、工程・動作の構成比
	作業方法	協同作業時間の割合
	作業工程	工事全体に対する時間短縮の寄与の割合
	作業内容	稼働率、作業内容の構成
生産性の向上(省力化)	出来高	出来高
	作業員数	作業単位別の必要要員数
	工数	人工、作業工数
	作業効率	出来高/工数
	作業方法	工程数、動作数、工程・動作の種類別の構成比、協同作業時間の割合
作業内容	稼働率、作業内容の構成	

「CEマニュアル」より作成

### 2.3 比較対象

新技術の評価する場合、比較対象となる従来技術を定める必要がある。その後、新技術と従来技術とで評価指標を計測する<sup>3)</sup>。多くの場合、新技術では評価指標の計測が可能であるが、新技術の現場との施工条件が揃わない等の理由で、従来技術で

の計測が困難な場合がある。

一方、新技術の導入では、スケールメリットを考慮して多くの現場で利用できるものが効果的である。さらに、そのような新技術には、それに対応する従来技術に標準的な歩掛が存在することが期待できる。歩掛では想定される施工条件を幅広く網羅している場合があるので、その場合は試験施工の自由度が増す。また、歩掛からも現場計測からも日施工量が得られるので、それを評価指標にする。

## 2.4 評価方法

評価指標の日施工量を新技術での計測値と従来技術での計算値とで比較して、生産性の向上を判断する。日施工量の差による比較も考えられる<sup>5),6)</sup>。すなわち、標本 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ を次式で与えて、新技術と従来技術との生産性を比較する。

$$x_i \begin{cases} \text{新技術での評価指標(日施工量)} \\ \text{一歩掛からの評価指標(日施工量)} \end{cases} \quad (2.1)$$

ここで、 $i = 1, 2, \dots, n$ 、および $n$ は標本数(試験施工現場数)である。

これら $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ を処理対象とすると、統計学や情報量統計学の手法を適用できる。

## 3. 評価の具体例

### 3.1 事例

今回評価指標に採用した日施工量に関して、新技術を採用した現場での計測値と標準歩掛から算出したと計算値を入手する必要がある。マイクロジョイントパイル工法(MJP工法)においては、その建設技術審査証明報告書<sup>4)</sup>には21現場での日施工量を計測したデータと各現場条件で標準歩掛から求めた日施工量とが掲載されているので、対象事例とした。

MJP工法では、杭の連結部の工夫と工場作業の工数増で現場作業の効率化を図っている(詳細は参考文献4)を参照)。

### 3.2 統計学による評価方法

統計学における検定は、

- ① 帰無仮説と対立仮説の設定
- ② 有意水準の設定

の順に進めていく。なお、今回利用したデータは、分散が未知で小標本( $n < 100$ )であるので、t検定を実施する<sup>5),6)</sup>。

帰無仮説と対立仮説は、次のように設定する。

- a) 帰無仮説： $\mu = 0$  (従来技術と差が無い)
- b) 対立仮説： $\mu > 0$  (新技術の方が施工能力が高い)

さらに、標本 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ に対する検定統計量 $T$ は、次式で与えられる。

$$T = \frac{\bar{x} - \mu}{\sqrt{\frac{s^2}{n}}} \quad (3.1)$$

ここで $s^2$ は標本の不偏分散(標本分散)、 $\bar{x}$ は標本平均、 $\mu$ は母平均である。

今回は、新技術が従来技術より日施工量が多いか否かを検定するので、片側検定となる。現場計測値と歩掛からの計算値より $T = 7.927$ となる。自由度 $20 (= 21 - 1)$ の片側1%の臨界値が2.528なので、危険率1%で帰無仮説は棄却され、「新技術は従来技術と比べ、生産性が向上している」と言える。

建設技術審査証明報告書に記載されているデータとt検定による評価結果は、次節の情報量統計学の手法による評価結果と共には表-3に示す。

表-3 評価結果

現場番号	新技術実測値(m/日)	従来技術計算値(m/日)	差 a-b	モデル1	モデル2	
	a	b	$x_i$	$(x_i - \mu)^2$	$(x_i - \hat{\mu})^2$	
1	3.484	1.444	2.040	4.162	96.694	
2	18.219	4.309	13.910	193.488	4.148	
3	30.842	6.018	24.824	616.231	167.720	
4	24.100	4.983	19.117	365.460	52.471	
5	23.850	5.514	18.336	336.209	41.766	
6	18.609	4.759	13.850	191.823	3.907	
7	30.627	7.926	22.701	515.335	117.238	
8	24.615	5.318	19.297	372.374	55.111	
9	10.509	5.410	5.099	26.000	45.892	
10	5.386	5.000	0.386	0.149	131.959	
11	16.941	3.981	12.960	167.962	1.181	
12	17.867	5.858	12.009	144.216	0.018	
13	11.275	5.694	5.581	31.148	39.593	
14	13.622	6.726	6.896	47.555	24.774	
15	19.971	5.160	14.811	219.366	8.630	
16	15.132	4.957	10.175	103.531	2.884	
17	13.716	5.280	8.436	71.166	11.815	
18	13.830	4.963	8.867	78.624	9.038	
19	7.714	5.895	1.819	3.309	101.090	
20	23.200	6.237	16.963	287.743	25.905	
21	15.750	4.487	11.263	126.855	0.373	
標本平均			11.873	0	11.873	
不偏分散(標本分散)			47.110			
自由度			20			
検定統計量			7.927			
片側1%点			2.528			
分散(最尤推定値)			185.843			44.867
最大対数尤度			-84.659			-69.737
自由パラメータ数			1			2
AIC値(AIC(1), AIC(2))			171.318	143.473		
BIC値(BIC(1), BIC(2))			172.363	145.562		

マイクロジョイントパイル工法建設技術審査証明報告書よりデータを引用

### 3.3 情報量統計学による評価方法

情報量統計学とは、次の赤池情報量規準(AIC)

$$AIC = -2 \times \text{最大対数尤度} \\ + 2 \times \text{未知パラメータ数}$$

に代表される情報量規準を用いて、数理統計学の諸問題を見直す学術分野である<sup>7,8,9)</sup>。ここで、未知パラメータ数とは、未知数の個数から未知数に関する拘束条件数を減じたものである。AIC 以外に、ベイズの法則を基に導出された次式のベイズ型情報量規準(BIC)<sup>8)</sup>もよく用いられる。

$$BIC = -2 \times \text{最大対数尤度} \\ + \text{未知パラメータ数} \times \log_e \text{標本数}$$

BIC と同型の MDL(Minimum Description Length) が土木分野へ応用されている事例<sup>10)</sup>があるので、本論文では AIC と BIC を用いる。

ここで、最大対数尤度は対象とする数学モデル(以下、モデル)の尤もらしさ(実現象とモデルとの近さ)を測る尺度で、それが大きいほど「現象を尤もらしく表現しているモデル」とされている。それに対して未知パラメータ数が小さい方が「簡潔で良いモデル」とされている。概して未知パラメータ数が大きく複雑なモデルの方が尤もらしいので、情報量規準の値が小さいモデルが「尤もらしさ」と「簡潔さ」とのバランスがとれた良いモデルとなる。このことより、情報量規準は、簡潔に物理現象を表現するモデルを探す指標であると言える<sup>7,8,9)</sup>。

まず、新技術と従来技術との間で日施工量の差が無い、すなわち、その差が 0(既知)である場合をモデル 1、日施工量に差がありその差が未知である場合をモデル 2 と設定する。双方とも分散は未知とする。

<モデル 1>

標本 $x_i(i = 1, 2, \dots, n)$ が平均値 $\mu_1 = \mu (= 0)$ (既知)、分散 $\sigma_1^2 (> 0)$ (未知)の正規分布に従う母集団から抽出されたと仮定すると分散の最尤推定値は、

$$\hat{\sigma}_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \quad (3.2)$$

となり、最大対数尤度 $MLL_1$ は

$$MLL_1 = -\frac{n}{2} (\log_e 2\pi + \log_e \hat{\sigma}_1^2 + 1) \quad (3.3)$$

となる。未知数が $\hat{\sigma}_1^2$ と 1 つでそれに関する拘束条件はなく未知パラメータ数は 1 で、AIC 値 $AIC(1)$ と BIC 値 $BIC(1)$ はそれぞれ

$$AIC(1) = -2MLL_1 + 2 \times 1 \\ = n(\log_e 2\pi + \log_e \hat{\sigma}_1^2 + 1) + 2 \quad (3.4a)$$

$$BIC(1) = -2MLL_1 + 1 \times \log_e n$$

$$= n(\log_e 2\pi + \log_e \hat{\sigma}_1^2 + 1) + \log_e n \quad (3.4b)$$

となる(詳細は付録参照)。

<モデル 2>

標本 $x_i(i = 1, 2, \dots, n)$ が平均値 $\mu_2$ (未知)、分散 $\sigma_2^2 (> 0)$ (未知)の正規分布に従う母集団から抽出されたと仮定すると、平均値と分散の最尤推定値は

$$\hat{\mu}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.5)$$

$$\hat{\sigma}_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{\mu}_2)^2 \quad (3.6)$$

となり、最大対数尤度 $MLL_2$ は

$$MLL_2 = -\frac{n}{2} (\log_e 2\pi + \log_e \hat{\sigma}_2^2 + 1) \quad (3.7)$$

となる。未知数が $\hat{\mu}_2$ および $\hat{\sigma}_2^2$ の 2 つでそれらに関する拘束条件はなく未知パラメータ数は 2 で、AIC 値 $AIC(2)$ と BIC 値 $BIC(2)$ はそれぞれ

$$AIC(2) = -2MLL_2 + 2 \times 2 \\ = n(\log_e 2\pi + \log_e \hat{\sigma}_2^2 + 1) + 4 \quad (3.8a)$$

$$BIC(2) = -2MLL_2 + 2 \times \log_e n \\ = n(\log_e 2\pi + \log_e \hat{\sigma}_2^2 + 1) + 2\log_e n \quad (3.8b)$$

となる(詳細は付録参照)。

(3.2)~(3.8b)式に表-3 の具体的な数値を代入すると AIC 値および BIC 値はそれぞれ

$$AIC(1) = 171.318 > 143.473 = AIC(2)$$

$$BIC(1) = 172.363 > 145.562 = BIC(2)$$

となり、AIC 値および BIC 値が共に小さいモデル 2 が「良いモデル」として選択され、有意水準を決めなくても t 検定と同じ結果を得る。

#### 4. まとめ

本調査研究においては、評価の視点、評価指標、比較対象、比較方法の一連の手順を示した。本報告で新たに導入した考え方は、

- i) 評価指標を計測可能な日施工量とする
- ii) 従来技術の日施工量を歩掛から求める
- iii) 評価(比較)を数学的手法で実施する

の 3 点である。標準歩掛を用いることで従来技術での計測を標準的な施工法でシミュレートしたことになる。さらに、情報量統計学的手法を用いることで、評価が(3.2)式~(3.8b)式を計算するだけで自動的かつ簡便に実施できる。

よって、本研究では、簡便で客観的な新技術の生産性評価手法を提案できた。

## 参考文献

- 1) 国土交通省：i-Construction報告書，平成28年4月
- 2) 国土交通省：ICT活用工事の実施状況（H30年度）
- 3) 一般財団法人先端建設技術センター：CEマニュアル，1996年3月
- 4) 一般社団法人日本建設機械施工協会：建設技術審査証明報告書 建設機械施工技術（建審証第1901号）マイクロジョイントパイル工法，2019年7月
- 5) 東京大学教養部統計学教室：統計学入門，東京大学出版会，1991年7月
- 6) 上田拓治：44の例題で学ぶ統計的検定と推定の解き方，オーム社，2009年5月
- 7) 坂元慶行・石黒真木夫・北川源四郎：情報量統計学（情報科学講座A・5・4），共立出版，1983年1月
- 8) 鈴木義一郎：情報量規準による統計解析入門，講談社サイエンティフィク，1995年4月
- 9) 小西貞則・北川源四郎：情報量規準（シリーズ<予測と発見の科学>2），朝倉書店，2004年9月
- 10) 長健次・高津知司・橋本信仁：含水比の低い土砂の管路圧送における圧送特性の向上法，土木技術資料，31・10，p519-523，1989年10月

## 付録

### A1. モデル1のAICとBIC

標本 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ が平均値 $\mu_1 = \mu$ （既知），分散 $\sigma_1^2 (> 0)$ （未知）の正規分布に従う母集団から抽出されたものと仮定すると，その確率密度関数 $p(x|\mu, \sigma_1)$ は

$$p(x|\mu, \sigma_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2}} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma_1^2}\right\}$$

なので，対数尤度 $LL_1$ は，

$$\begin{aligned} LL_1(x_1, x_2, \dots, x_n|\mu, \sigma_1) &= \sum_{i=1}^n \log_e p(x_i|\mu, \sigma_1) \\ &= -\frac{n}{2} \log_e 2\pi - \frac{n}{2} \log_e \sigma_1^2 - \frac{1}{2\sigma_1^2} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \end{aligned}$$

となり，分散 $\sigma_1^2$ の最尤推定値 $\hat{\sigma}_1^2$ を最尤方程式より

$$\hat{\sigma}_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \quad (A.1)$$

を得て，最大対数尤度 $MLL_1$ は次式となる。

$$MLL_1 = -\frac{n}{2} (\log_e 2\pi + \log_e \hat{\sigma}_1^2 + 1) \quad (A.2)$$

以上より，このモデルでは未知パラメータ数が1なので，AIC値 $AIC(1)$ とBIC値 $BIC(1)$ は

$$\begin{aligned} AIC(1) &= -2MLL_1 + 2 \times 1 \\ &= n(\log_e 2\pi + \log_e \hat{\sigma}_1^2 + 1) + 2 \quad (A.3a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} BIC(1) &= -2MLL_1 + 1 \times \log_e n \\ &= n(\log_e 2\pi + \log_e \hat{\sigma}_1^2 + 1) + \log_e n \quad (A.3b) \end{aligned}$$

で求まる。

### A2. モデル2のAICとBIC

標本 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ が平均値 $\mu_2$ （未知），分散 $\sigma_2^2 (> 0)$ （未知）の正規分布に従う母集団から抽出されたものと仮定すると，その確率密度関数 $p(x|\mu, \sigma_1)$ は

$$p(x|\mu_2, \sigma_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_2^2}} \exp\left\{-\frac{(x-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right\}$$

なので，対数尤度 $LL_2$ は，

$$\begin{aligned} LL_2(x_1, x_2, \dots, x_n|\mu, \sigma_1) &= \sum_{i=1}^n \log_e p(x_i|\mu_2, \sigma_2) \\ &= -\frac{n}{2} \log_e 2\pi - \frac{n}{2} \log_e \sigma_2^2 - \frac{1}{2\sigma_2^2} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_2)^2 \end{aligned}$$

となり，平均値 $\mu_2$ と分散 $\sigma_2^2$ の最尤推定値 $\hat{\mu}_2$ および $\hat{\sigma}_2^2$ は，それぞれは最尤方程式より

$$\hat{\mu}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (A.4)$$

$$\hat{\sigma}_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{\mu}_2)^2 \quad (A.5)$$

を得て，最大対数尤度 $MLL_2$ は次式となる。

$$MLL_2 = -\frac{n}{2} (\log_e 2\pi + \log_e \hat{\sigma}_2^2 + 1) \quad (A.6)$$

以上より，このモデルでは未知パラメータ数が2なので，AIC値 $AIC(2)$ とBIC値 $BIC(2)$ はそれぞれ

$$\begin{aligned} AIC(2) &= -2MLL_2 + 2 \times 4 \\ &= n(\log_e 2\pi + \log_e \hat{\sigma}_2^2 + 1) + 4 \quad (A.7a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} BIC(2) &= -2MLL_2 + 2 \times \log_e n \\ &= n(\log_e 2\pi + \log_e \hat{\sigma}_2^2 + 1) + 2\log_e n \quad (A.7b) \end{aligned}$$

で求まる。 ■

# 14. 市町村工事を対象とした ICT 施工の導入を目指した 取り組みについて

～ さらなる ICT 施工の普及に向けて ～

国土交通省 近畿地方整備局 ○ 武本 昌仁

## 1. はじめに

国土交通省では、建設現場における生産性を向上させ、魅力ある建設現場を目指すために、「ICT 技術の全面的な活用」、「規格の標準化」、「施工時期の平準化」、「受発注者間のコミュニケーションによる施工の円滑化」を進める i-Construction の取り組みを推進している。

なお、i-Construction の取り組みを円滑かつ効果的に推進・普及させるため、近畿地方整備局では地方公共団体及び関係業団体等の産学官による i-Construction 推進連絡調整会議や発注者協議会等を通じて、実技研修・講習を実施するなどの普及・促進を行っている。

本稿では、近畿地方整備局が実施している「ICT 技術の全面的な活用」における ICT 施工の普及の取組について紹介する。

## 2. ICT 技術の全面的な活用について

調査、測量、設計、施工、検査等のあらゆる建設生産プロセスにおいて ICT 技術を全面的に活用する ICT 活用工事については、平成 28 年度に土工から始まり、舗装工、浚渫工へと工種を拡げ、今年度から地盤改良工（深層）、法面工、舗装工（修繕）へと展開しているところである。

平成28年度	平成29年度	平成30年度	令和元年度	令和2年度
ICT 土工				
ICT 舗装工 (平成29年度:アスファルト舗装、平成30年度:コンクリート舗装)				
ICT 浚渫工 (河川)				
ICT 地盤改良工 (浅層・中層:社会施設)				
ICT 法面工 (牧村工)				
ICT 付帯構造物設置工				
ICT 地盤改良工 (深層)				
ICT 法面工 (河川)				
ICT 舗装工 (修繕工)				
民間等の要望も踏まえ 要する工種拡大				

図-1 ICT 施工の工種拡大

近畿地方整備局における ICT 活用工事（土工）の実績としては、毎年度 6 割以上の現場で実施されているところである。

なお、府県においても、年々 ICT 活用工事の実施件数は増加している。

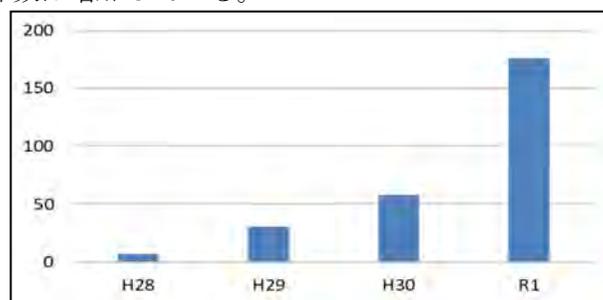


図-2 近畿地方整備局の ICT 活用工事契約実績

一方、市町村においては維持修繕的な小規模な工事が多く、ICT 施工のメリットは少ないと思われる。取組が進んでいない状況がある。

建設業における公共工事全体に占める割合を見ると、国発注工事の割合は 2 割に過ぎず、府県・市町村発注工事が 5 割、残り 3 割は都市再生機構などの政府関連企業などとなっている。

そのため、府県及び市町村発注工事において、ICT 施工に取り組まることが必要不可欠であり、普及を促進する必要がある。

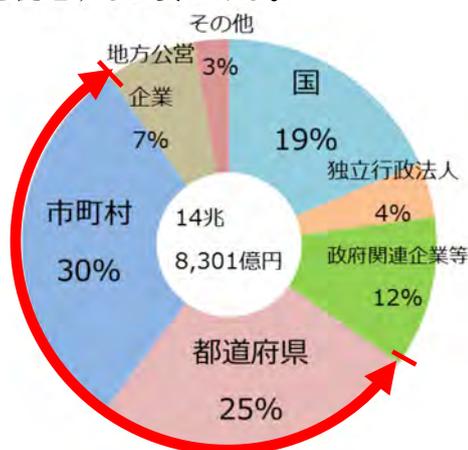


図-3 発注者別の工事請負割合

3. 地方公共団体への ICT 施工の普及について  
 前述の課題を受け、近畿地方整備局が実施している地方公共団体への ICT 施工の普及の取組を紹介する。

府県へは ICT 施工導入への技術支援や講習会の開催を行うとともに、府県発注工事に対して、国から ICT 専門家を派遣する「地方展開モデル事業」を実施している。

モデル事業の支援を契機に県内の関係団体含めて ICT 施工への情報共有を行う協議会を立ち上げたり、ICT 活用工事の発注が増加するなど府県の ICT 施工への取り組みは広がりを見せている。

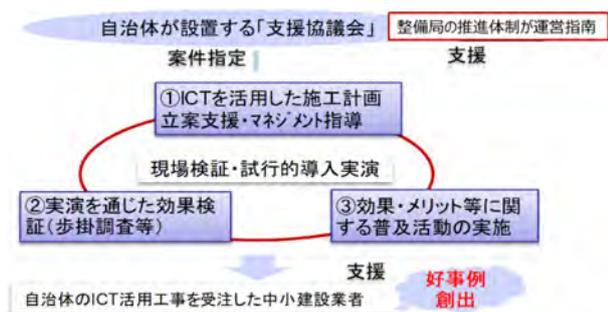


図-4 地方展開モデル事業

一方、近畿地方整備局管内における市町村での ICT 施工発注実績は非常に少なく、今後の ICT 施工及び ICT 技術の導入に向けた裾野を広げるためにも、府県への支援とは異なった方法で普及に向けた取組を行う必要があると考えている。

そのため、令和元年度は、兵庫県宝塚市の協力のもと、市発注工事において測量から設計、施工、出来形検査までの一連の工程での技術支援を実施した。



<b>工事概要</b>	
発注者	兵庫県宝塚市
工事種別	道路改良工事
工事内容	掘削 130m <sup>3</sup> 盛土200m <sup>3</sup> 舗装 1,100m <sup>2</sup> など
契約額	約3,500万円

図-5 技術支援工事の概要

技術支援の内容としては、3次元データ作成や ICT 施工を含めたソフト、ハード面での支援を実施した。

#### 4. 技術支援実施内容

一連の過程における技術支援は下記のとおりである。

- ①測量：TLS（地上型レーザースキャナー）による点群データの取得
- ②設計：3次元データの作成実習  
 難しいと思われていた3次元データの作成においては、意外と簡単に作業ができることを確認。
- ③施工：外渠誘導及びミニバックホウによる盛土（敷均し）  
 街渠誘導においては、従来の水系の代わりとして、3次元データを活用し、街渠設置を実施。  
 なお、盛土工においては、ミニバックホウの排土板がマシンコントロールで制御可能な機器を現場に導入し、何度も前後することなく、均一な施工ができることを確認。
- ④出来形管理：ヒートマップによる出来形管理及びTSによる出来形管理を実施。

今回、技術支援を行ったことで、規模が小さく導入が難しいと思われている工事においても上手く ICT 機器を導入することが現場の生産性向上への一助をなることが理解した頂くことが出来たと考えている。

ICT 機器の進歩が進む一方で、現場への ICT 導入が進まないのは、ICT 導入に際して、「費用が高い」「難しい」などの先入観や慣れた従来施工でも工事が実施できることもあり、導入に踏み切れない部分もあると感じられた。今後はこういった先入観を払拭するような取組が重要であると考えている。

#### 5. おわりに

市町村工事への取組を実施したが、令和2年度からは、ICT 活用工事にも ICT 活用工事のうち、起工測量、ICT 施工を受注者の希望により実施を選択し、設計データ作成、出来形管理等の施工管理を必須とした「簡易型 ICT 活用工事」も取り入れ、3次元データの重要性が更に高まっている。

今後も近畿地方整備局では、ICT 施工を基本とし、さらなる ICT 技術の全面的な活用について、継続して普及・推進に取り組む所存である。最後になりましたが、ご協力頂いた府県及び兵庫県宝塚市の担当者、受注者の皆様、また施工技術総合研究所の皆様にご挨拶申し上げます。

## 15. 電子制御を活用した HMT(Hydraulic Mechanical Transmission)

### ホイールローダの開発

株式会社小松製作所

村本 卓也

講堂 康史朗

○ 竹野 陽

#### 1. はじめに

ホイールローダは採石場や建設工事現場などにおいて積込機として使用され、ダンプトラックとの距離に応じて、アクセルペダル、ブレーキペダル、作業機レバーを連携させた複合的で高度な操作が必要とされる。しかし現在、高齢化による熟練オペレータの減少が問題となっており、運転操作の容易化が強く求められている。

そこで、無段変速機能を有するコマツハイドロリックメカニカルトランスミッション(KHMT)を搭載した中型ホイールローダ WA470-10 を開発した(図-1)。本機では、電子制御を積極的に活用し、エンジン、油機、トランスミッションが最適に制御されることにより、アクセルペダルは車速、作業機レバーは作業機速度と、それぞれ独立して操作することが可能となった。その結果、直感的な操作の実現により非熟練オペレータでも容易にホイールローダを扱うことが可能となり、従来機に比べ操作性を大幅に向上させた。

本稿では、WA470-10 に搭載されたこれらの新機能について紹介する。



図-1 WA470-10

#### 2. 従来機の変速機構

従来ホイールローダはトルクコンバータ+機械式トランスミッション方式または Hydrostatic transmission(HST)方式により構成された。

トルクコンバータ+機械式トランスミッション方式は、トルクコンバータのロックアップ機構や機械式の減速機構により高い伝達効率を発揮する

が、複数段からなる異なる減速比の歯車をクラッチにより切替えるため、作業負荷に応じた変速が発生し、牽引力が段階的に変化する特性がある。

一方で HST 方式は油圧ポンプと油圧モータの組み合わせにより構成され、機械式のトランスミッションと比べ、伝達効率は劣るが、油圧により無段変速機能が実現され、牽引力が途切れることなくなめらかに変化するため操作性に優れる。

従来コマツでは使用用途が主に碎石・鉱山現場などでの積込作業となる中型～大型のホイールローダには高効率なトルクコンバータ+機械式トランスミッション方式を採用し、除雪や農畜産分野など用途が多岐にわたり、非熟練オペレータが運転する頻度が高い小型のホイールローダには操作性に優れる HST 方式を採用してきた。

#### 3. KHMT システムについて

##### 3.1 開発の狙い

高い作業効率が求められる中型のホイールローダにおいて、トルクコンバータ+機械式トランスミッション方式の効率の高さと、HST 方式が持つ操作性の高さの両立を実現するためコマツハイドロリックメカニカルトランスミッション(KHMT)を搭載した中型ホイールローダ WA470-10 を開発した。KHMT は機械・油圧の2系統でのトルク伝達により、HST 方式同様の無段変速機能を有し、オペレータの操作性向上を図りながら高効率化を実現した。

##### 3.2 システム構成

KHMT のシステム構成を(図-2)に示す。KHMT は遊星歯車にサイズの異なる2つの油圧モータを組み合わせた構成となっており、機械と油圧でトルクを伝達している(図-3)。コントローラはアクセルペダルや作業機レバーなどのオペレータ操作、作業機負荷や車速などの車両状態を認識しトランスミッション内の油圧モータやエンジンを電子制御する。

### 3.3 遊星歯車による無段変速のメカニズム

KHMTは遊星歯車と2つの油圧モータの組み合わせにより無段変速を行う。遊星歯車はリングギア、キャリア、サンギア、プラネタリギアから構成され、動力はリングギア、キャリア、サンギアから外部に伝達される。KHMTはキャリアにエンジン、リングギアに油圧モータ(B)、サンギアに油圧モータ(A)と車軸が接続される(図-4)。実際には遊星歯車とそれぞれのコンポーネント間は減速されて接続されているが、ここでは簡略化のためそれらの減速は省いた状態で説明を進める。

遊星歯車のリングギア(油圧モータ(B)), キャリア(エンジン), サンギア(油圧モータ(A), 車軸)の回転数[rpm]をそれぞれ $\omega_r$ ,  $\omega_c$ ,  $\omega_s$ また、リングギアとサンギアの歯数をそれぞれ $Z_r$ ,  $Z_s$ で表すと、遊星歯車の回転関係は以下のように表される。

$$Z_s \times \omega_s + Z_r \times \omega_r = (Z_r + Z_s) \times \omega_c \quad \dots\dots(1)$$

また、二つの油圧モータは閉回路で接続されていることより、それぞれの容量[cc/rev]を $Q_A$ ,  $Q_B$ で表すと油圧閉回路における流量のつり合いは以

下のような関係式で表される。ただし、簡略化のため油圧モータの容積効率 $\eta_v$ は1とする。

$$Q_A \times \omega_s - Q_B \times \omega_r = 0 \quad \dots\dots(2)$$

$$Q_A/Q_B = \omega_r/\omega_s \quad \dots\dots(2)'$$

式(2)'は油圧モータの容量比を調節することにより、リングギア(油圧モータ(B))とサンギア(油圧モータ(A), 車軸)の回転数比が制御されることを示す。つまり、式(1)と合わせると、油圧モータの容量比を調節することでトランスミッションとしての減速比(エンジン(キャリア)回転数/車軸(サンギア)回転数)が制御可能であることが示される。

(図-5)に、式(1)における遊星歯車の回転の関係と式(2)'における油圧モータ容量の関係を図示し、エンジン回転数一定下においてトランスミッションの無段変速機能により車両が加速する過程を示す。

式(1)より、 $\omega_c$ は $\omega_r$ と $\omega_s$ を $Z_s:Z_r$ に内分する回転数であることに着目し、各回転数の横軸を内分比に合わせて図示すると直線上に表される(左軸)。また、 $Q_A$ を $\omega_r$ ,  $Q_B$ を $\omega_s$ と同じ横軸上の位置に棒

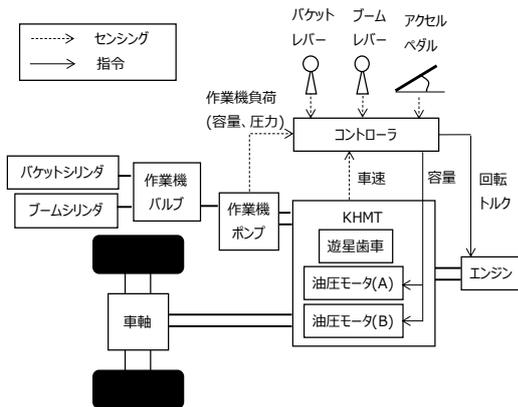


図-2 KHMT システム構成

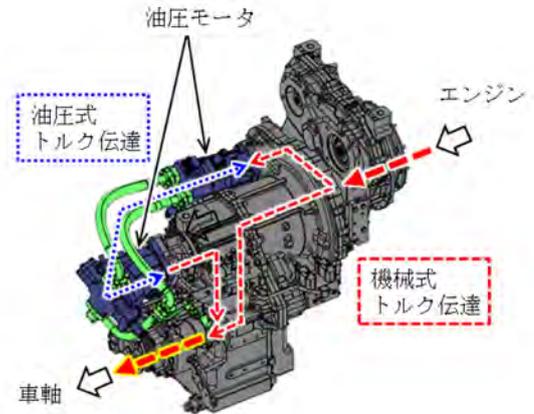


図-3 KHMT 外観

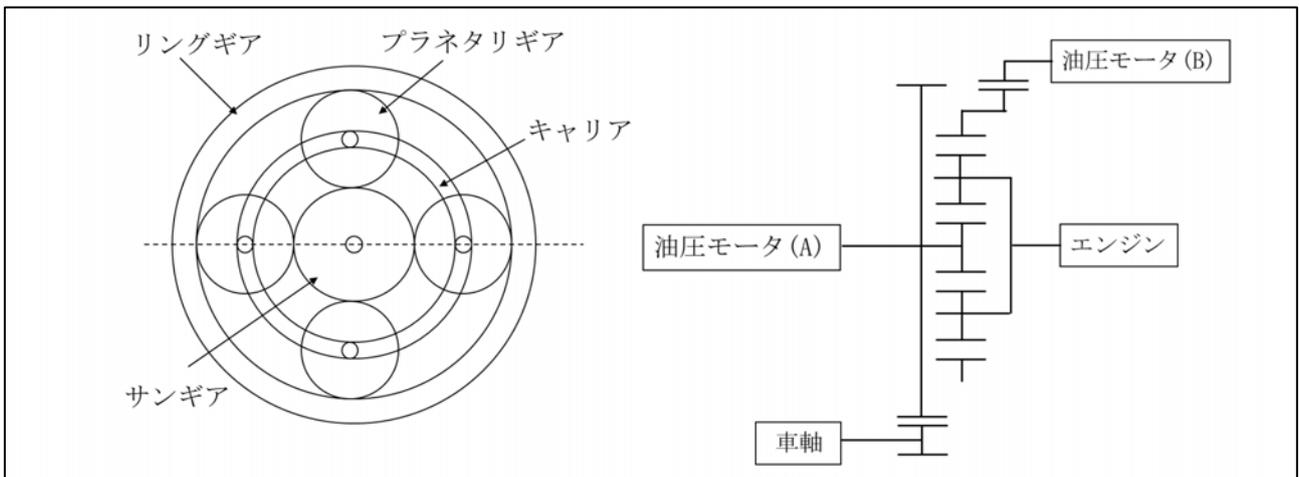


図-4 遊星歯車接続

グラフで図示する(右軸)と、 $Q_A/Q_B$ を調節することにより $\omega_r/\omega_s$ が制御される様を読み取ることができる。

(図-5)の状況において、KHMTはエンジン回転数一定の下、 $Q_B$ を大きく、また $Q_A$ を小さく電子制御することで車軸( $\omega_s$ )を加速させている。このとき油圧モータ(A)は車軸に駆動力を伝えるためにモータとして働き、油圧モータ(B)は油圧モータ(A)へと油を送るためにポンプとして作動する。

KHMTは走行に必要な目標エンジン回転数やオペレータ操作による車速要求をコントローラ内で演算し、2つの油圧モータを電子制御することでトランスミッションとしての減速比を作り上げる。

#### 4. KHMT化による操作性改善

##### 4.1 従来機における操作性の課題

ここではトルクコンバータ+機械式トランスミッション方式の中型ホイールローダにおけるダンプトラックへの積込作業時の操作性について課題を示す。

積込作業においては作業機に土砂を積んだ状態から、排土先であるダンプトラックまでの短い距離において作業機を素早く上げる必要がある。作業機速度はポンプの流量に比例するため、積込に必要な流量を確保するためにオペレータはアク

セルペダル操作によりエンジン回転数を上昇させる。

しかし、トルクコンバータ+機械式トランスミッション方式の車両は変速作業をオペレータが実施しない限り減速比が変わらないため、エンジン回転数上昇に伴い車体は加速する。

オペレータはダンプトラックとの距離を意識し、エンジン回転数をアクセルペダルで、作業機速度を作業機レバーで、車速をブレーキペダルで調節する必要がある、高度な複合操作が要求される。

車両の効率的な稼働は現場の生産能力に影響するため、複雑な複合操作の解消は若手オペレータのみならず、現場オーナーやすべてのオペレータの悩みの種であり改善が求められていた。

##### 4.2 KHMTの作業機・走行独立制御について

KHMTは無段変速機能の特性を生かし、エンジンの回転数制御とアクセルペダル操作を切り離している。これにより、作業機速度は作業機レバーのみ、車速はアクセルペダルのみで操作する作業機・走行独立制御を実現した。

本節では作業機・走行独立制御の仕組みを解説するが、これは制御フローを厳密に表すものではなくコンセプトを示すことが目的であることを付け加えておく。作業機・走行独立制御の概念図を(図-6)に示す。

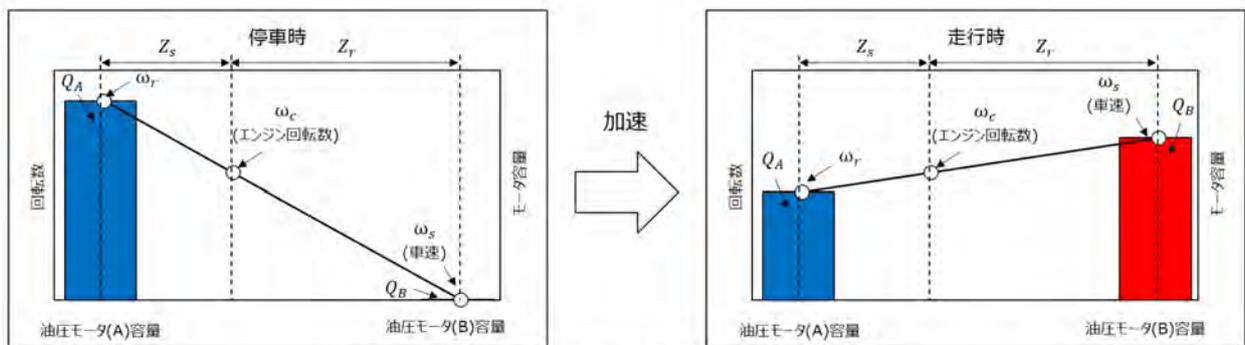


図-5 遊星歯車と油圧モータで無段減速する仕組み

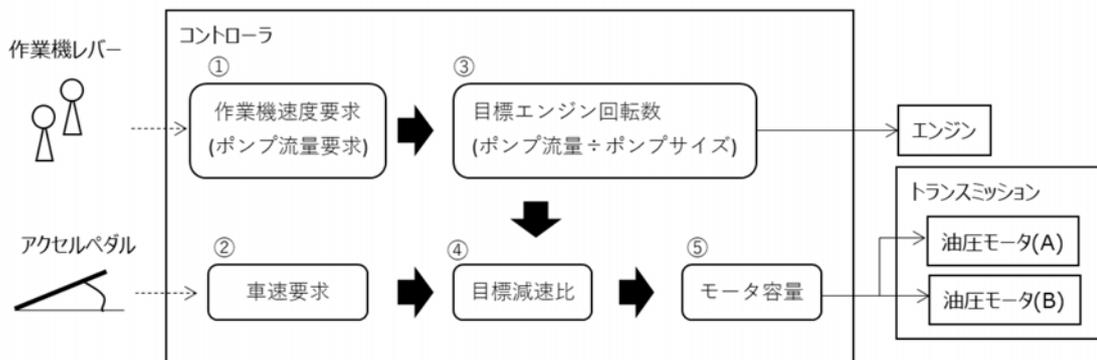


図-6 作業機・走行独立制御概念図

コントローラは作業機レバーとアクセルペダルの情報を取得する。作業機・走行独立制御ではこれらの情報をそれぞれ、作業機速度要求、車速要求と認識する。

オペレータが作業機を素早く動かす目的で作業機レバーを操作した際、コントローラは必要な作業機速度を出すためのポンプ流量を演算し、搭載する作業機ポンプのサイズより、目標とするエンジン回転数を算出する。エンジンはこの目標回転数を元にアクセルペダル操作とは関係なくコントローラから制御される。これはつまり、作業機レバー操作によりエンジン回転数が自動で制御されることを示す。

一方でコントローラはアクセルペダルにより認識した車速要求を実現するため、トランスミッションに必要とされる減速比を演算する。これは作業機レバー操作により決まるエンジン回転数とアクセルペダル操作により決まる車速要求の比を演算することで得られる。KHMT は目標の減速比を実現するため2つの油圧モータを電子制御することでオペレータの車速要求での走行を可能としている。

作業機・走行独立制御により作業機速度と車速を独立して操作可能となり、シンプルで直感的な操作性が実現した。(図-7)にダンプトラックへの積込作業における従来機との操作性の違いを示す。

ダンプトラックへの積込作業は土砂を積んだ状態で作業機を上げる作業から始まる。この時、従来機は作業機を上げるために作業機レバー(右手)を

操作するが、作業機速度を速める際にはエンジン回転数を上げるためアクセルペダル(右足)操作が必要となる。一方で WA470-10 はエンジン回転数が自動で制御されるため作業機レバー(右手)操作のみで作業機速度が調節可能である。

次にダンプトラックへ近づくために車両は走行を始めるが、この時ダンプトラックとの距離を意識して作業機速度と車速を調節する必要がある。従来機では作業機速度を作業機レバー(右手)とアクセルペダル(右足)操作で、また、車速をアクセルペダル(右足)とブレーキペダル(左足)で調節する必要があり高度な複合操作が要求される。一方で WA470-10 は作業機速度を作業機レバー(右手)で車速をアクセルペダル(右足)でそれぞれ独立して操作可能である。

ダンプトラックへの積込は減速しながら作業機速度を調節する必要がある。減速のためにはブレーキペダル(左足)を操作するが、従来機は作業機速度を調節するため、車速の挙動に反してアクセルペダル(右足)操作が必要であり感覚と異なる操作が求められる。一方で WA470-10 は作業機速度を作業機レバー(右手)のみで操作できるため、車速の調節は減速のためのブレーキペダル(左足)操作のみに集中することができる。

WA470-10 は作業機・走行独立制御を採用することにより、従来機において発生していた、作業機レバー(右手)、アクセルペダル(右足)、ブレーキペダル(左足)の高度な複合操作をなくし、より直感的で容易な操作性を実現している。

運転操作		作業機上げ操作	作業機、走行 同時操作	ダンプトラック積込操作
動作イメージ				
従来機	作業機操作	 作業機レバー(右手)  アクセルペダル(右足)	 作業機レバー(右手)  アクセルペダル(右足)	 作業機レバー(右手)  アクセルペダル(右足)
	走行操作		 アクセルペダル(右足)  ブレーキペダル(左足)	 ブレーキペダル(左足) <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center; margin: 5px 0;">車速に影響</div>
WA470-10	作業機操作	 作業機レバー(右手)	 作業機レバー(右手)	 作業機レバー(右手)
	走行操作		 アクセルペダル(右足)	 ブレーキペダル(左足)

図-7 積込作業時の操作性比較

### 4.3 操作性改善の効果確認

作業機・走行独立制御の操作性向上効果を確認するため、碎石・鉱山現場で一般的に行われる V シェープ作業にて従来機との比較試験を実施した。V シェープとは砂利などの製品をダンプトラックに積込む際に行う作業で、その走行軌跡からこのような名前が付けられている。V シェープ作業の流れを(図-8)に示す。

社内試験の結果、V シェープ作業 1 サイクル当たりのペダル操作頻度はアクセルペダルが 22%低減、ブレーキペダルが 75%低減という結果が得られ、操作性の大幅な向上が確認できた。(図-9)

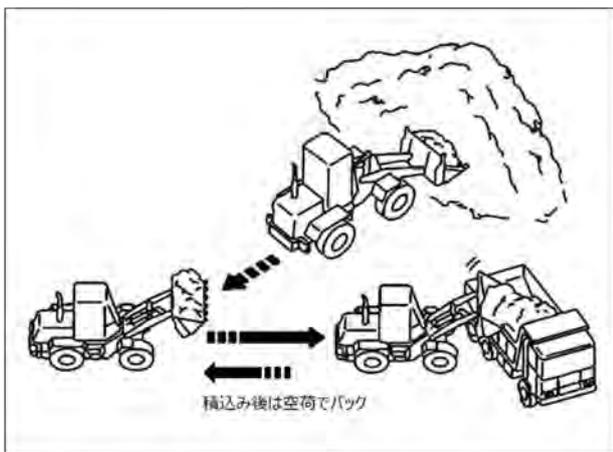


図-8 V シェープ作業

### 5. 従来機からの燃費向上

操作性向上に加え、KHMT 化に伴い従来機にはなかった、燃費性能を向上させる制御を織り込んだのでここで述べる。

#### 5.1 エンジン低回転マッチング制御

KHMT の制御システムはオペレータの操作に対して車体の状況や負荷を総合的に判断し、エンジンが最適な出力となるよう制御されている(図-10)。これはコントローラがオペレータのアクセルペダル操作(車速要求)と作業機レバー操作(作業機速度要求)に対して必要なパワーのみエンジンに出力するよう指令することにより実現されている。

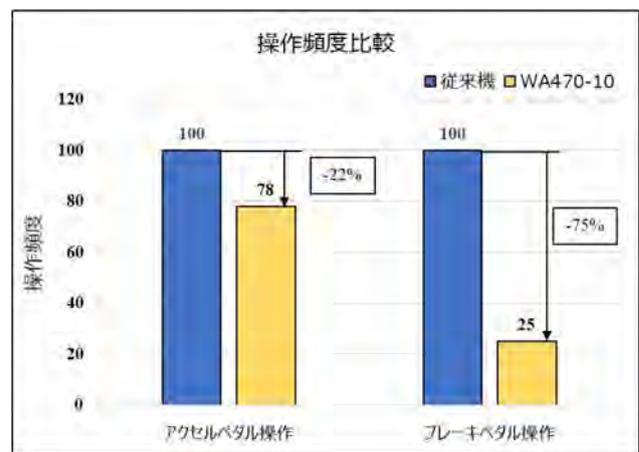


図-9 V シェープ作業における操作頻度比較

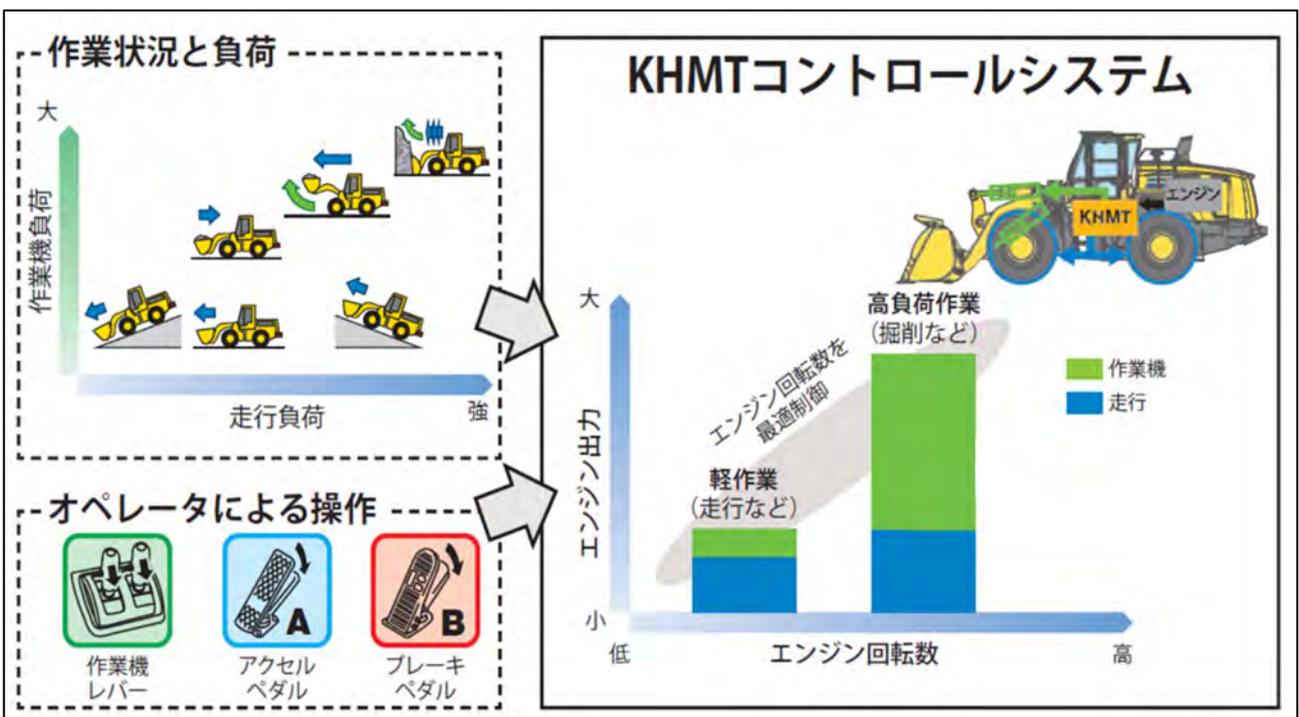


図-10 エンジン低回転マッチング制御

エンジンは掘削や坂道走行など大きな出力が必要とされる局面においては高いエンジン回転数で制御され、低速での平地走行など小さな出力しか必要とされない局面においては低いエンジン回転数で制御される。

一般的にエンジンは回転数が高いほど内部のフリクションが高く効率が悪いとされている。KHMTは無段変速機能の特徴を生かし、従来機と同じ車速で走行する際にエンジン回転数を低く保つエンジン低回転マッチング制御を織り込み燃費向上を図った。(図-11)に平地走行時におけるエンジン回転数の比較結果を示す。比較対象の従来機はWA470-10モデルチェンジ前の現行機種WA470-8を選定した。

(図-11)はWA470-8を各走行速度段での最高車速で走行させた際のエンジン回転数とWA470-10を対応する車速で走行させた際のエンジン回転数を比較した結果を示す。

WA470-10はエンジン低回転マッチング制御により、どの車速域においてもWA470-8よりも低いエンジン回転数で走行が可能である。

社内試験の結果、燃費は12%改善することを確認した。これはエンジン低回転マッチング制御によるエンジンの効率な使用や作業機・走行独立制御による操作性向上が寄与した結果である。

## 6. おわりに

KHMTの採用により、長年ホイールローダにおける課題であった高度な複合操作という操作性の問題を大幅に改善することができた。熟練オペレータの減少は今後も進行すると考えられ、運転容易化・操作性向上技術のさらなる普及が求められる。

当社はさらなる操作性・燃費性能を実現する建設機械を開発していく所存である。

## 参考文献

- 1) 村本卓也・講堂康史朗：中型ホイールローダ WA470/475-10, コマツテクニカルレポート, Vol.65 No.172, pp.50～56, 2020年3月31日発行

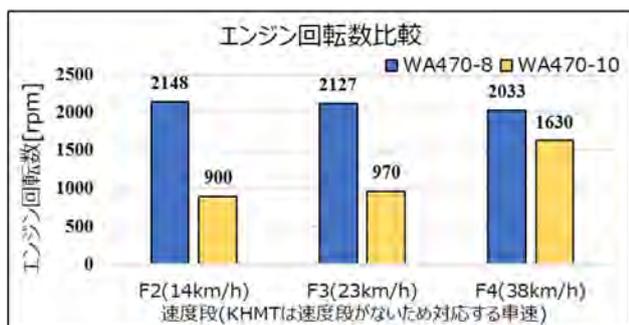


図-11 エンジン回転数比較

## 5.2 燃費試験結果

社内標準における従来機との積込作業燃費の比較結果を(図-12)に示す。前節同様比較対象の従来機はWA470-8を選定した。試験結果は時間当たりの燃料消費量(L/h)についてWA470-8の試験結果を100として無次元化した値で示す。

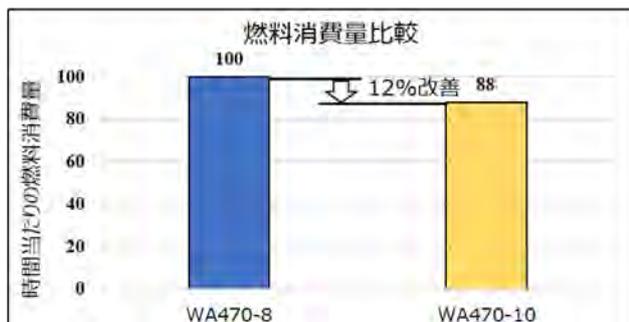


図-12 燃費試験結果

## 16. 新型除雪グレーダ用可変幅型ブレードの開発

国土交通省 東北地方整備局 東北技術事務所 宇野 賢一  
国土交通省 東北地方整備局 東北技術事務所 ○田村 直樹

### 1. はじめに

従来の2人乗り除雪グレーダ（以下、「従来型」）は、昨今の排ガス規制の強化により生産中止となり、平成27年度から土工用の1人乗りモーターグレーダ（以下、「新型」）をベースにしたものが、除雪グレーダとして導入され始めた。

この土工用モーターグレーダは、排ガス規制に対応した世界標準の機種であり日本独自の除雪専用機種ではなく、従来より導入していた道路幅の変化に対して作業幅員を拡大できる、可変幅型ブレード（以下、「VB」）が搭載できなくなり、除雪作業効率の低下が懸念された。

このため、従来型VBと同等程度の作業能力を確保し、さらに1人乗りでも安全に除雪作業を行うことができる、新型VBを開発した。

本稿では、実際に使用するオペレータや製作メーカーへのヒアリングを実施し、その結果から改善点を探り、開発機を完成・現場導入させるまでの取組について紹介するものである。

### 2. 可変幅型ブレード（VB）とは

ブレード長を標準的な4mから最大6mへと拡大することができるブレードであり、最大の6mまで拡大した場合の作業幅員は約5.2m（推進角60度時）となり、1台で1.5車線分の除雪が可能となる装置である。

バリエブルブレード、作業幅員可変型ブレード、可変伸縮型ブレードなど、複数の呼び名が存在する。



写真－1 従来型VB 作業状況（伸ばした状態(L=6m)）

### 3. 開発のねらい

除雪作業は、一般交通の中で安全かつ迅速に行わなければならない、特に除雪グレーダにおいては、圧雪除去や路側のきめ細かな作業を求められ、特有の視界領域、複雑な操作方法などの理由から、操作に高い特殊性・専門性を要する。

更に、従来型は2人乗りであったが、新型からは1人乗りとなり、助手が担っていた安全確認などもオペレータ1人で行わなければならない。

これらの要求を満足するために、従来型VBと同等程度の作業能力を確保することはもちろん、次世代人材の育成も考慮し、開発にあたっては、オペレータの意見を最大限反映することを第一に「つかいやすく安全なもの」を目標として検討した。

### 4. 開発の流れ

開発の流れは次のとおり3ヶ年での計画とした。

- 1年目 ①オペレータヒアリング
- ②メーカーヒアリング
- ③仕様の決定
- 2年目 ④試作機製作
- 3年目 ⑤現地適用性試験

#### 4. ①オペレータヒアリング

従来型VBの改良要望などを確認するため、オペレータを対象としたヒアリングを実施した。

東北地方整備局管内においては、12工区に23台のVBが配備（H29調査時点）されており、このうち、D I D区間が含まれない1工区を除く11工区をヒアリングの対象とした。

主な意見は次のとおり。

- ・常に、構造物との接触に注意している。
- ・従来の4.0m～6.0mで問題ない。
- ・6.0mでの作業時、雪の抱え込み量が多くなると車体が浮いたり不安定となる。また、線圧が低下することで圧雪除雪に対応できない。
- ・伸縮に時間が掛かる。
- ・片側のみ、左右同時の場合の伸縮速度を同じに。
- ・操作レバーや切り替えスイッチが使いづらい。
- ・オートブレードが欲しい。

#### 4. ②メーカーヒアリング

開発に必要な性能と、オペレータヒアリングの要求を提示し、開発の可能性について、各メーカーに対しヒアリングを実施した。

オペレータヒアリング結果に対するメーカー側の主な回答は次のとおり。

- ・従来型VBと同様であれば開発は可能。
- ・圧雪に対応できるVBは、現時点では不可。
- ・伸縮速度については詳細な検討が必要。
- ・操作性については改良可能。
- ・メーカー単独での開発予定はない。

#### 4. ③仕様の決定

メーカーヒアリングの結果から、開発可能と判断し、主要仕様を決定した。

##### A, 「基本構造、基本寸法」

従来型と新型において、グレーダ独特の車体構造が変更されていないことから、基本的な構造や材質は、従来型に準拠するものとした。

##### B, 「伸縮幅、ブレード長さ」

「6.0m以上伸びればよい」といった意見も一部の工区から上がったものの、ブレード幅を伸ばすことで線圧が下がること、一般車両・道路構造物等との接触リスクが上がること、ブレード端が目視できなくなること等の理由により、従来型VBに準拠するものとした。

##### C, 「ブレード線圧」

「線圧をもっと高くしたい」といった意見も一部の工区から上がったものの、設計上の基準値(26kN/m)を満足する計画であることと、仮に基準値を上回る設計とした場合、カウンターウエイトの増設により車体バランスが崩れることが想定されたことから、従来型VBに準拠するものとした。

##### D, 「ブレード高さ・寸法、切削角、推進角」

従来型VBに対して特段の意見等が無かったことから、従来型VBに準拠するものとした。

##### E, 「伸縮速度」

「伸縮速度が遅い・バラバラ」といった意見への対応として、伸縮速度を全体的に向上させ、かつ、一定化する方向で見直すものとした。

これは、後方からの追い越しや対向車両を回避する場合や、構造物へのブレード端の接触回避など、急な回避操作に有効であり安全上重要であると考えられた。

##### F, 「操作性向上」に対する対応

「操作レバー等が使いづらい」といった意見への対応として、ハンドル等から手を放さずに操作が可能となるよう配置や動作を見直すものとした。

これは、走行中の安全確保、誤操作防止、オペレータの負担軽減といった点から重要であると考えられた。

#### 4. ④試作機製作

新型への搭載試験及び現地適用性試験用として試作機を製作した。製作にあたっては4. ③Aのとおり、従来型に準拠するものとした。

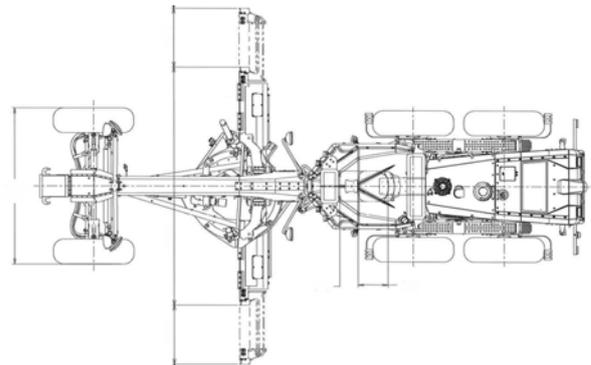


図-1 新型 外観図



写真-2 新型VB 縮めた状態(L=4m)



写真-3 新型VB 伸ばした状態(L=6m)

#### 4. ⑤現地適用性試験

現地適用性試験は、国道13号、尾花沢国道維持出張所の管内において実施した。

試験当初は、「JCMAS T005 除雪グレーダ性能試験方法」に準じた新型VBの除雪量計測や、従来型と新型の作業状況比較なども計画していたが、記録的な小雪のため実施が困難となったことから、オペレータヒアリングとドライブレコーダ画像等を用いた比較検討までとした。

オペレータヒアリングの結果、主な意見は次のとおり。全般的に良好な印象が得られた。

##### 【VB関係】

- ・交差点部及びバス停等の除雪が迅速に行えた。
- ・伸縮速度が向上し操作しやすく安心感もある。
- ・現在の伸縮速度が適切。現在より遅くても早くても操作しづらくなる。
- ・一般車両が追い越しをかけてきた際に接触する不安が軽減した。
- ・通常の車両系建設機械と同様に、どちらかのジョイスティックに操作スイッチを集約したほうが良い。

##### 【車両関係】

- ・ジョイスティックに不慣れで操作しづらい。
- ・慣れていない若手や新人であれば、ジョイスティックの方が使いやすい可能性はある。

ドライブレコーダ画像等を用いた比較検討の結果、時間当たりの除雪量は、従来型VBを1とした場合、新型VBは0.96～1.09と同程度であり、従来型VBと同程度の能力を確保していることが確認された。

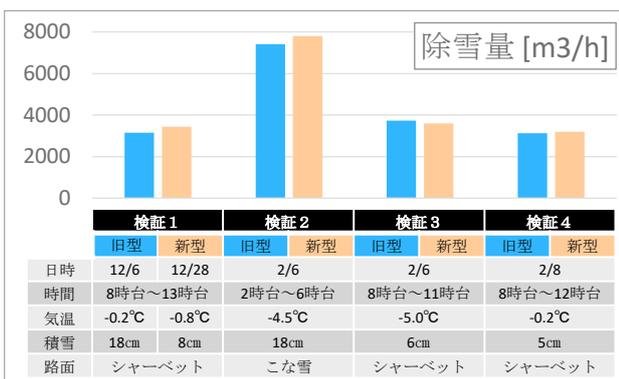


表-1 従来型VBと新型VBの除雪量比較

#### 5. 従来型VBからの大きな変更点

##### ①伸縮速度

ブレードの伸縮には一般的な油圧シリンダが用いられており、油圧シリンダ特有の構造上「伸」と「縮」で伸縮速度が異なる。

従来型VBは、これに加え、1つの油圧バルブ

から2本（左右）のVB用油圧シリンダに分岐する油圧回路となっており、「伸」と「縮」に加え、「片側のみ」と「左右同時」においても伸縮速度が異なる。

これに対し新型VBでは、従来型VBより吐出量が多い2つのバルブを使用し、左右それぞれの油圧シリンダに独立して油圧を供給する回路とした。

これにより、伸縮速度が全体的に向上し、片側の場合と左右同時の場合に発生していた伸縮速度の変化も解消された。

ブレード伸縮速度の比較

項目		旧型		開発装置
片側のみ	(伸)	18cm/秒	→	0～22cm/秒
	(縮)	26cm/秒	→	0～33cm/秒
両側同時	(伸)	9cm/秒	→	0～22cm/秒
	(縮)	13cm/秒	→	0～33cm/秒

表-2 従来型VBと新型VBの伸縮速度

なお、新型VBの伸縮速度を決定するにあたっては、実際に行われている回避行動（＝サークルの回転）から決定しており、「伸」より「縮」を優先し、サークル回転による回避所要時間に近い感覚で伸縮するよう設計している。

回避方法	従来型VB	新型VB
 サークル回転	ブレード長 6,000 mm → 6,000 mm 推進角 60度 → 40度 車幅 約5,200 mm → 約3,800 mm  旋回速度 12.5度/s 回転角 20度 所要時間 1.6秒	旋回速度 8度/s 回転角 20度 所要時間 2.5秒
 ブレード縮	ブレード長 6,000 mm → 約4,400 mm 推進角 60度 → 60度 車幅 約5,200 mm → 約3,800 mm  縮速度130mm/s(両) 縮距離 800mm(片) 所要時間 約6.1秒	縮速度330mm/s(両) 縮距離 800mm(片) 所要時間 約2.4秒

表-3 伸縮速度の決定

##### ②操作方法

従来型VBの操作方法は、「左右切替スイッチ」にて動かす側のブレードを選択した後、「レバー操作」によりブレードを伸縮させる2アクション式を採用していた。

この場合、操作の際にハンドルから手を放す必要があり、また、手の動作距離も長いことから、急な回避操作などで不向きな操作方式である。

これに対し新型VBでは、「左右切替スイッチ」を廃止し、右ブレードは右ジョイスティック、左ブレードは左ジョイスティックで、左右それぞれを独立して操作できるよう、各ジョイスティックにダイヤルレバーを設けた。

これにより、ハンドル（ジョイスティック）から手を放す必要がなくなり、あわせて、2アクション式から1アクション式へと動作点数を減らし、手の動作から指先の動作へと動作距離を短縮することにより、安全かつ直感的な操作が可能となるよう配慮している。

## ■旧型機

左右切替スイッチ + レバー操作

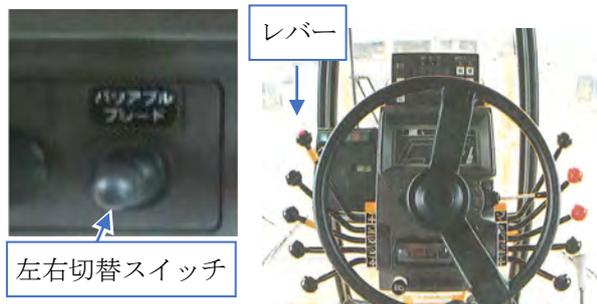


写真-4 従来型VB操作装置

## ■新型機

左右独立した操作スイッチ



写真-5 新型VB操作装置

## 7. まとめ

今回開発したブレードは、従来型VBと同程度の作業能力を有し、伸縮速度の向上と操作スイッチの変更により、使いやすく、1人乗りでも安全に除雪作業を行うことができることが確認された。

しかし、「一つの機構（操作）を左右のジョイスティックに振り分ける」という、一般的な車両系建設機械にはないスティック配置としてしまったことに対して、少数だが改善要望も頂いている。

今後は、より多くの状況下での操作性等を検証し、改良について検討を実施していく予定としている。

# 17. 高強度モルタル供試体における多段型モデル掘削機の掘削性能についての実験的考察

呉工業高等専門学校  
 呉工業高等専門学校  
 呉工業高等専門学校

○ 宮永 渚生  
 重松 尚久  
 杉原 綾乃

## 1. はじめに

岩盤を掘削する手段として最も効率的で安価な方法である発破工法は、騒音や振動問題によって採用できない事例が多くなってきている。機械化工法のなかで油圧を用いた機械では岩盤に設けたボーリング孔に差し矢を油圧で貫入する割岩機があるが、自由面がない岩盤では効率が著しく低下する。打撃により圧壊する機械として油圧ハンマーやブレーカなどが挙げられるが能力が低いうえ騒音が大きいなどの課題がある。また、推進工事の需要が山間部などの未整備部分に移行するにつれ、岩盤対応のセミシールドマシンの開発依頼も増加してきている。現在多くの機械に採用されている岩盤を破碎する方式としては、カッタを押し付けて強引に破碎する掘削方式があげられる。そこで、騒音や振動問題を軽減することが可能とされている端面掘削方式<sup>1)</sup>に着目した。図-1 に平面掘削方式と端面掘削方式の概略図を示す。平面掘削方式は、1自由面を有する部分を掘削する方式である。一方で端面掘削方式は、平面掘削方式が行われた後に行われ、自由面を増やしながら岩石の端部を削孔する工法である。また平面掘削方式との比較実験では、比エネルギーが約 1/10 に減少する<sup>2)</sup>ことが明らかになっている。また、モルタル供試体とコンクリート供試体においての多段型モデル掘削機を作成し荷重により、掘削速度とトルクを制御できる<sup>3)</sup>ことが分かっている。

本研究の目的は、騒音や振動などの厳しい環境問題を十分に満足し効率的に掘削を行うことができる多段型モデル掘削機を考察し、実用化するための設計指針を提供することである。そこで、高強度モルタル供試体を用い、ディスクカッタを用いた新たな多段型モデル掘削機を作り連続的に掘削実験を行った。そして、実験により、掘削時間  $t$  に対する垂直力  $F_v$ 、トルク  $T$ 、掘削深さ  $z$ 、掘削土量  $m$  を測定した。また、今回の実験では、多段型モデル掘削機の掘削に必要な荷重を把握する為に一定

の変位を与えて掘削する変位制御として、5つの設定速度  $V_{set}$  を設けそこから得られる実験データから考察を行った。

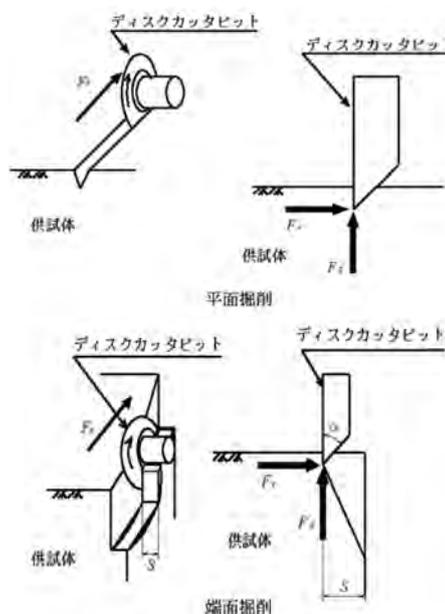


図-1 平面掘削方式と端面掘削方式の概略図

## 2. 実験概要

### 2.1 モデル掘削機

図-2 にモデル掘削機の断面図、写真-1 にモデル掘削機の概略図を示す。モデル掘削機の構成は4枚のカッタで構成されている。カッタ 1, 3, 4 は直径 100mm でカッタ 2 は 90mm である。まずカッタ 1, 2 が同時に当たり (第1段階)、その後カッタ 3 が当たり (第2段階)、最後にカッタ 4 が当たる (第3段階) 仕組みになっている。カッタ 3 が当たると芯取れという現象が起こる。また、カッタ 2 と 4 は周面摩擦が大きくなるように斜めに配置している。

図-3 に芯取れの概略図<sup>4)</sup>を示す。芯取れとは掘削を進めていくとディスクカッタビットから生じる亀裂が生じ、その亀裂が繋がることによって岩

片が剥離する現象である。本実験ではカッタ 3 が当たると芯取れが起こるようになっている。また、図-4 に芯残りの概略図<sup>4)</sup>を示す。芯残りとは最小半径  $r$  が大きくなると、供試体内側で亀裂が繋がりにくくなり、芯取れが起こらず刃より内側の供試体が残る現象である。

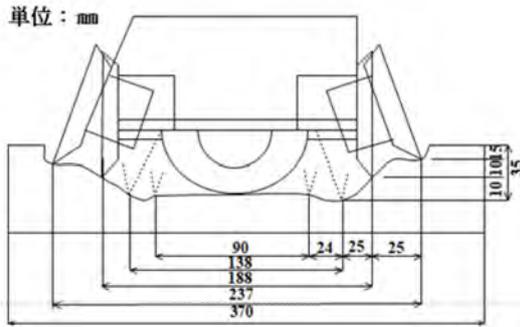


図-2 モデル掘削機の断面図

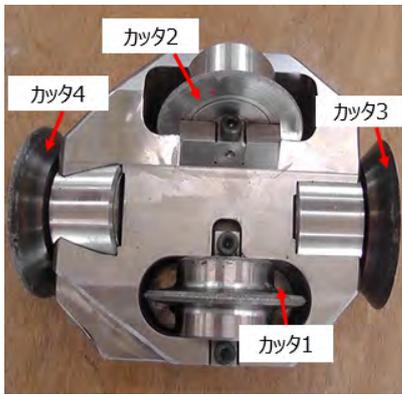


写真-1 モデル掘削機の概略図

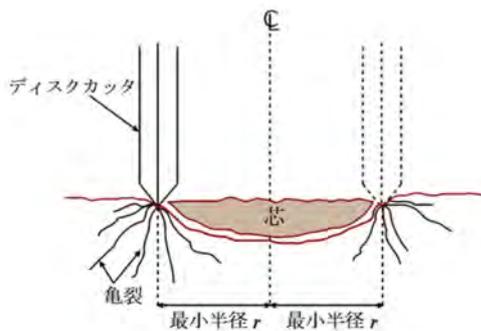


図-3 芯取れの概略図

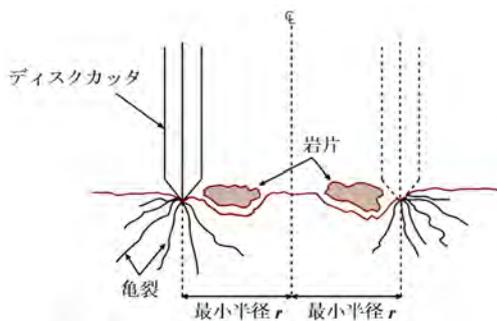


図-4 芯残りの概略図

## 2.2 実験装置

図-5 に実験装置の概略図を示す。実験装置は高さ 1750mm, 幅 700mm, 奥行き 700mm である。直径 400mm, 厚さ 10mm の鋼製円盤のターンテーブル, ターンテーブルを 2r.p.m で回転させるためのモーター, 上部フレームに設置した最大推進力 50kN を有するウォームジャッキ, 垂直力  $F_z$  と転がり抵抗  $F_x$  を測定するロードセル(許容垂直力 50kN, 許容トルク 2kN・m), および横方向  $F_y$  を測定するロードセル(許容横方向力 10kN), 下部には電動モーター, チェーン, 減速機があり, この減速機によって回転速度を調整できるようになっている。なお, 実験装置は幅 1370mm, 奥行き 1100mm の鋼板の上に乗っており横に設置されている油圧シリンダーを伸縮させることで実験装置を横転することができる。横転させた供試体の真下に広範囲にわたって掘削土を回収するための受け皿を設置し, その下に荷重計を設置することで掘削土量  $m$  の測定を行う。

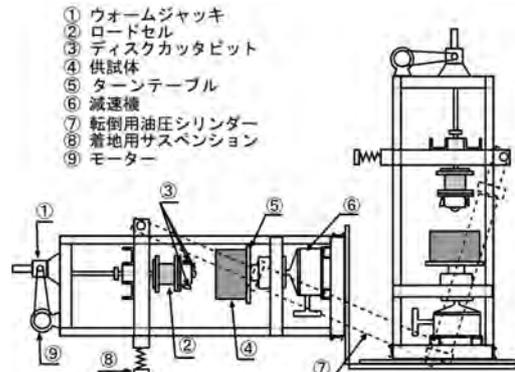


図-5 実験装置の概略図

## 2.3 供試体

供試体は水結合材比  $W/B=17\%$  の円柱状の高強度モルタル供試体(一軸圧縮強度  $153.5\text{N/mm}^2$ )を使用した。寸法は掘削径の外側が割れる現象を抑制するため高さ 172mm, 直径 370mm として作成した。また, 硬化後水温約  $20^\circ\text{C}$  で 90 日間の水中養生を行った。

## 2.4 実験方法

時間あたりの掘削深さ  $z$  を一定にして掘削する変位制御で実験を行った。実験では実験装置を横転させた状態で行い, ターンテーブルに据え付けられた供試体を 2r.p.m で回転し, モデル掘削機を一定の速さで押し当て掘削深さ  $z=35\text{mm}$  に到達するまで掘削した。供試体の固定については鋼製の外枠をはめて六角ボルトで固定した。また, 一定の貫入量を設定するウォームジャッキで, 設定速度  $V_{set}$  を 0.0223, 0.0302, 0.0380, 0.0459, 0.0537mm/sec の 5 パターンを設定した。実験回数は各 3 回ずつ ( $V_{set}=0.0537\text{mm/sec}$  のみ 2 回)行った。そして, 掘削時間を  $t$  とし掘削しているときに作用している垂

直力  $F_z$ 、トルク  $T$ 、掘削深さ  $z$ 、掘削土量  $m$  を 0.02 秒で 1 点を記録するデータ収集装置によって測定した。

### 3. 実験結果と考察

ここでは、変化が顕著にみられた設定速度  $V_{set}=0.0223\text{mm/sec}$  の 1 回目の実験結果を例に考察を行う。

#### 3.1 掘削時間 $t$ と垂直力 $F_z$

図-6 に掘削時間  $t$  と垂直力  $F_z$  の関係を示す。この図を見ると、垂直力  $F_z$  の値が徐々に上昇し急激に下降する場面が 3 回あるように見える。これはビデオ映像を見た結果、1 回目の垂直力  $F_z$  の値の急激な下降が終わったタイミングでカッタ 3 が接触し、その後 2 回目の垂直力  $F_z$  の値の徐々な上昇が始まった。同じように、2 回目の垂直力  $F_z$  の値の急激な下降が終わったタイミングでカッタ 4 が接触し、その後 3 回目の垂直力  $F_z$  の値の徐々な上昇が始まった。

また、1 回目の垂直力  $F_z$  の上昇は平面掘削方式であることが分かった。そして平面掘削方式の後から起こる端面掘削方式は、2 段階に分けることができる。まずは大きな剥離を生じさせて掘削していく初期端面掘削が起こる。これは垂直力  $F_z$  が急激に下降している時間帯に見えた。その後小さな剥離を生じさせ掘削していく定常端面掘削が起こる。これは垂直力  $F_z$  が上昇している時間帯に見えた。

このような結果が見られた原因として実験開始直後では、カッタが供試体に切り込んでいき 2 自由面を形成していく上で掘削面が不安定になりやすいことが考えられる。これらの傾向はほかの実験条件においても同様にみられた。

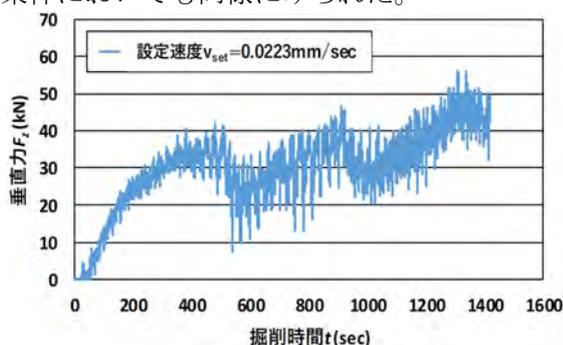


図-6 掘削時間  $t$  と垂直力  $F_z$

#### 3.2 掘削時間 $t$ とトルク $T$

図-7 に掘削時間  $t$  とトルク  $T$  の関係を示す。この図を見ると、3.1 で示したのと同様にトルク  $T$  についても、トルク  $T$  の値が徐々に上昇し急激に下降する場面が 3 回あるように見える。また、トルク  $T$  の値の変化の仕方と掘削方式の移り方も同様な傾向が見られた。そしてビデオ映像を見ると芯取れが起

こった直後に、トルク  $T$  の値が減少することが分かった。

実験開始直後は、トルク  $T$  の値が急激に増加している。これはカッタが供試体に切り込んでいくため掘削面が安定しないことが考えられる。また、トルク  $T$  の値の増減と垂直力  $F_z$  の増減は同様な傾向がみられる。一例として図-6 の掘削時間  $t=430(\text{sec})$  付近で垂直力  $F_z$  が減少する区間に伴い、トルク  $T$  の値も同様に減少している。考えられる要因として掘削の進行とともにカッタが十分に切り込み、掘削面が安定したことが考えられる。また、グラフの傾向についてはどの条件にも同様な傾向がみられた。

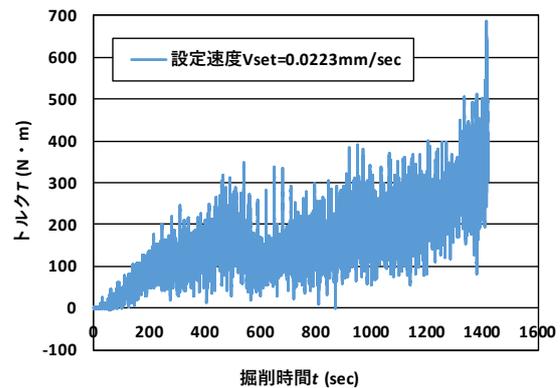


図-7 掘削時間  $t$  とトルク  $T$

#### 3.3 設定速度 $V_{set}$ と実測速度 $V$

実験条件の掘削深さ  $z=35\text{mm}$  で実験終了すると、掘削時間  $t$  と掘削深さ  $z$  の関係から近似線の傾きで実測速度  $V$  を求めることができる。図-8 に設定速度  $V_{set}$  と実測速度  $V$  の関係を示す。設定速度  $V_{set}$  が大きくなるにつれて、分かりやすく比較するために引いた  $45^\circ$  線から遠ざかっていく傾向がみられた。 $45^\circ$  線は設定速度  $V_{set}$  と実測速度  $V$  を 1 対 1 で表すために引いている。つまりこれは設定速度  $V_{set}$  が大きくなるにつれ垂直力  $F_z$  が大きくなることにより反力も大きくなり、 $45^\circ$  線から離れていった。また、設定速度  $V_{set}$  ごとでのずれは少なかったためある程度の掘削速度  $V$  の予想も可能である。

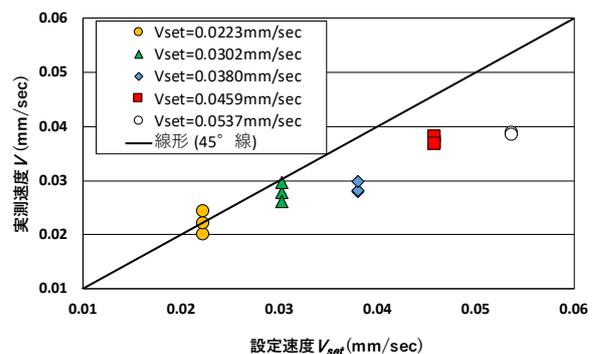


図-8 設定速度  $V_{set}$  と実測速度  $V$

### 3.4 掘削時間 $t$ と掘削土量 $m$

掘削時間  $t$  と掘削土量  $m$  の関係から、1 回転あたりの掘削量  $V_{round}$  を求めることができる。図-9 に設定速度  $V_{set}$  と 1 回転あたりの掘削量  $V_{round}$  の関係を示す。設定速度  $V_{set}$  が大きくなるにつれ、1 回転あたりの掘削量  $V_{round}$  の数値のばらつきが小さくなる傾向が見られた。

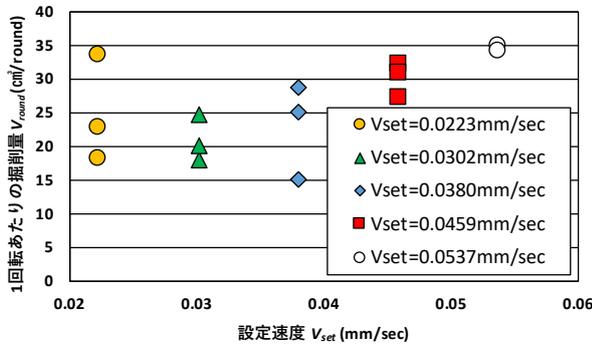


図-9 設定速度  $V_{set}$  と 1 回転あたりの掘削量  $V_{round}$

### 3.5 掘削段階ごとの最大垂直力 $F_{zmax}$

図-10 に設定速度  $V_{set}$  に対する掘削段階ごとの最大垂直力  $F_{zmax}$  を示す。ただし、最大垂直力  $F_{zmax}$  は掘削段階ごとに複数ある数値のうち平均値をとっている。すべての段階で、設定速度  $V_{set}$  が大きくなるにつれて最大垂直力  $F_{zmax}$  が大きくなるわけではなかったが、3 段階目の際には設定速度  $V_{set}$  が大きくなるにつれて最大垂直力  $F_{zmax}$  も大きくなっていった。全体的な傾向をみると設定速度  $V_{set}$  の小さい順から 3 つと、大きい順 2 つでまとまっているようにみえた。また、掘削段階が増えるごとに最大垂直力  $F_{zmax}$  の差が顕著にみられるようになった。

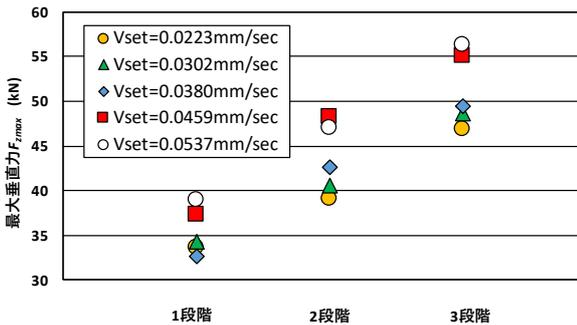


図-10 掘削段階ごとの最大垂直力  $F_{zmax}$

### 3.6 掘削段階ごとの最大トルク $T_{max}$

図-11 に設定速度  $V_{set}$  に対する掘削段階ごとの最大トルク  $T_{max}$  を示す。ただし、最大トルク  $T_{max}$  は掘削段階ごとに複数ある数値のうち平均値をとっている。実験回数の少なさが影響したのか 3.5 の掘削段階ごとの最大垂直力  $F_{zmax}$  のようにはっきりとした傾向を把握することはできなかった。

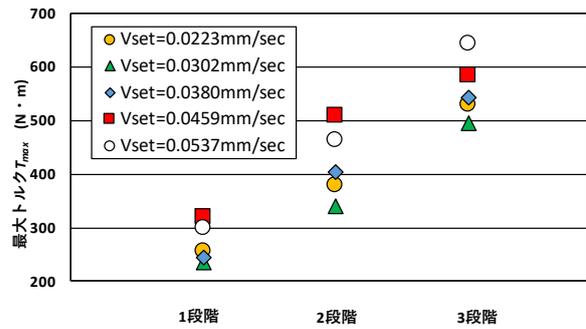


図-11 掘削段階ごとの最大トルク  $T_{max}$

## 4. 結論

- 掘削時間  $t$  との関係について、垂直力  $F_z$  は平面掘削では急激に増加し、その後垂直力  $F_z$  が増加することで初期端面掘削に移り、垂直力  $F_z$  が低下することで定常端面掘削になることが確認された。また、トルク  $T$  についても同様の傾向がみられ、ディスクカッタからの水平力により亀裂が生じて、その亀裂が供試体の中心部でつながり岩片が剥離する芯取れが発生した際にトルク  $T$  は急激に減少した。
- 変位制御について、どの設定速度  $V_{set}$  についてもグラフの形状は同じ傾向がみられ予想が可能である。また、モルタル供試体についてもモデル掘削機による変位制御での実験は力の把握ができたため、荷重制御実験も可能である。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(C)17K06525の補助を受けて行われた。

## 参考文献

- 花岡尚, 重松尚久, 室達朗: 道路建設における環境に優しい硬質岩盤剥離掘削技術の開発, 平成20年度建設施工と建設シンポジウム論文集, pp.107-110, 2008.
- Snowdon, R.A. Ryley, M.D. and Temporal, J: A study of disc cutting in selected British rock. Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstrs.19, 107-121, 1982.
- 重松尚久, 北岡一成, 室達朗, 小田登, 河村進一: 多段型端面掘削方式を用いた深礎掘削機の性能に関する室内実験, 土木学会論文集F1(トンネル工学), Vol.69, No.2, pp.121-128, 2013.
- 河相拓真, 重松尚久, 小田登: 室内試験におけるTBMセンターカッタビットの配置間隔に関する基礎的研究, 令和元年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.43-46, 2019.

# 18. 硬質地盤に対応した 深層混合処理工法の開発と適用事例

株式会社 不動テトラ ○ 永石 雅大  
 " " 田中 肇一  
 " " 梅田 洋彰  
 " " 杉野 秀一

## 1. はじめに

深層混合処理工法は、固化材と軟弱土を地盤中の原位置で攪拌混合し、両者の化学的な結合作用を利用して軟弱地盤を改良する工法である。その中で、高品質かつ大径の改良体を造成することを目的として、固化材スラリーにエアを混合して霧状に吐出するエジェクター吐出方式深層混合処理工法（以下、CI-CMC 工法）が開発され、適用されている。CI-CMC 工法では「エジェクター吐出」機構により貫入・攪拌時の負荷が低減し、従来よりも硬質地盤に対応することが可能である。

しかしながら、近年では、これまで改良が不要とされていた硬質地盤でも改良が必要となる場合や、構造物によっては改良体を堅固な支持地盤へ確実に根入れすることが求められるケースが増加している<sup>2)</sup>。このような硬質地盤では、貫入不能や施工に多大な時間を要するなどの問題があり、より効率的な施工を実施するため硬質地盤に適用できる工法の開発が求められてきた。

これらの現状を踏まえ、筆者らは CI-CMC 工法の貫入能力をより高める施工機能を導入し、幅広い硬質地盤への適応可能な工法の開発ならびに実用化に向けた実験工事を実施してきた<sup>3)-5)</sup>。本論文では、新たに開発した硬質地盤対応工法（CI-CMC-HG 工法）について概説するとともに実際の施工により貫入能力を整理・分析した結果について報告する。

## 2. 硬質地盤対応工法（CI-CMC-HG 工法）の概要

### 2.1 貫入能力

本工法では、図 1 に示す従来のオーガの約 2 倍のトルクを有する高トルクインバータモータを搭載した硬質地盤対応オーガを採用している。これにより同じ出力モータで軟弱層では従来の高速回転施工による品質確保、硬質層では低速回転による高トルク施工で貫入力の向上が可能となった。表 1 に従来工法との機械仕様様の比較を示す。また、攪拌翼からのエジェクター吐出による固化材スラリーに加え、先端ビットから圧縮エアや固



図 1 施工状況

表 1 従来工法とのモータの比較

	従来工法	硬質地盤対応工法
オーガ	90 KW	90 KW
発電機	600 KVA	600 KVA
最大トルク	50 kN・m	104 kN・m
回転数	18~36 min <sup>-1</sup>	3.3~29.5 min <sup>-1</sup>



図 2 先端吐出機構とエジェクター吐出

化材スラリー等を噴射する先端吐出機構（図 2 参照）を併用することも可能で、通常施工に比べ開発試験工事では貫入時間あたりの回転トルクを約 3 割低減できることを確認している。これらのことから、従来では硬質地盤が介在する地盤への深層混合処理工法の適用では、アースオーガによる

先行削孔が必要であったが、本工法では先行削孔の併用が不要なため、コストの低減ならびに工期の短縮が期待できる。

## 2.2 見える化施工への対応

本工法では、地盤改良技術の BIM/CIM に対応した施工管理システム「Visios-3D」<sup>9)</sup>を搭載することが可能である。地盤改良の施工状況をアニメーション表示することにより、改良状況の見える化を実現した。さらに、改良後の 3 次元モデルの作成も可能であり、地盤改良の信頼性向上、より確かな品質の確保に寄与している。

## 3. 施工事例

### 3.1 道路改良工事での事例

長野県において道路横断 BOX 基礎の沈下及び液状化対策として硬質地盤対応工法 (CI-CMC-HG 工法)の施工を実施した。当該地区では N 値 17~100 とばらつきの大きい砂礫層が介在する地盤であり、軟弱層以外の平均 N 値は 63 と硬質地盤であった。改良仕様は図 3 に示すように、改良径  $\phi$  1.6 m (2 軸施工)の接円配置であり、改良深度 GL-16.1 m、設計基準強度は $q_{uck}=1,100 \text{ kN/m}^2$ であった。図 4 は施工記録図ならびに地盤柱状図を示している。同図より N 値 2 程度の軟弱層 (GL-1m~11m)の施工

速度と同等の速度で硬質地盤 (GL-11m 以深)の施工が出来ていることが分かる。これは、回転数を変化させることで硬質地盤に対しても軟弱地盤と同様に貫入が可能であり、一定の施工速度を確保できることから、機械負荷が少なく安定した施工が可能であるとともにコストや工程の管理が容易となることを示唆している。図 5 は当現場における、ある改良地点の平均貫入トルクと N 値をまとめたものである。図より、N 値の増加に伴って貫入トルクが増加しており、従来の工法では不可能であったトルク値  $50 \text{ kN}\cdot\text{m}$ を超える高トルク施工が可能であることが確認できた。

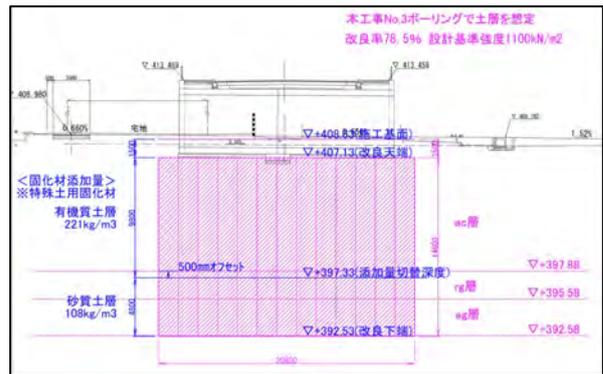
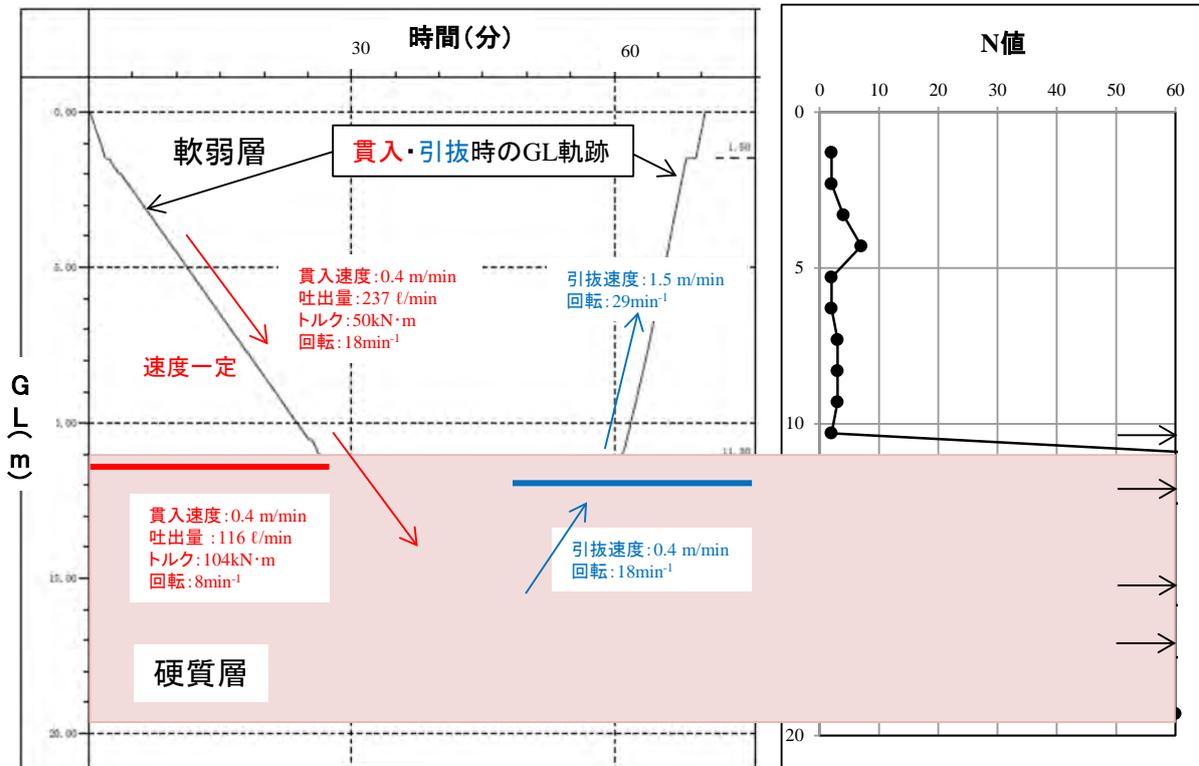


図 3 改良仕様



(a) 施工記録図

(b) ボーリング柱状図

図 4 施工記録図ならびにボーリング柱状図

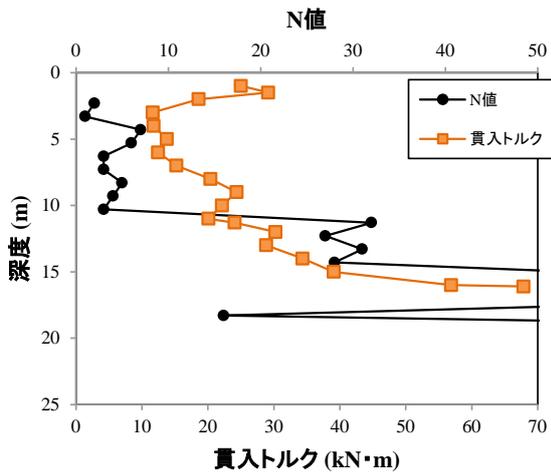


図5 貫入トルクならびにN値と貫入深度の関係

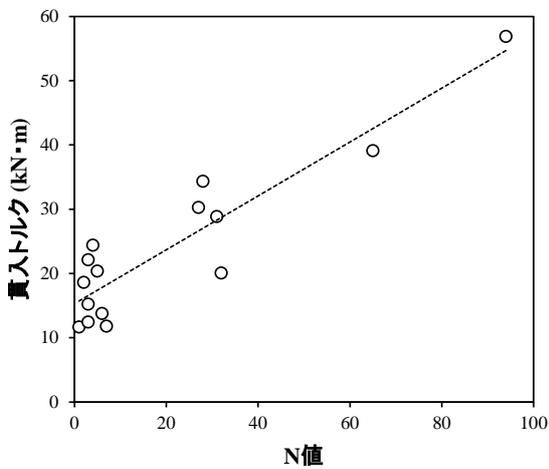


図6 N値と貫入トルクの関係

さらに、N値と貫入トルクの関係プロットしたものを図6に示す。図より、N値と貫入トルクには一定の相関があると推察される。

また、事後調査により、改良体の連続性ならびに一軸圧縮強度 $q_{uf}=1,153\sim 3,068\text{ kN/m}^2$ を確認しており、品質面においても要求性能を満足していることが確認できた。

### 3.2 河川堤防工事での事例

埼玉県内河川における堤防盛土の安定対策として本工法が採用された。当該地区では当初CI-CMC工法が採用されていたが、試験施工を実施したところ通常施工が困難であった。そこで追加ボーリング調査を行った結果、同工法では標準施工が困難な硬質層が厚く堆積していることが確認され、硬質地盤対応工法(CI-CMC-HG工法)に変更となった。

改良仕様は図7に示すように、改良径 $\phi 1.6\text{ m}$ (2軸施工)の接円配置であり、改良深度GL-29m、設計基準強度は $q_{uck}=1,000\text{ kN/m}^2$ であった。前項と同様に、当現場における2地点の平均貫入抵抗とN値をまとめたものを図8に示す。図より、N値の増加に伴う貫入抵抗の増加が見受けられ、従来の工法では不可能であった貫入トルク値が $50\text{ kN}\cdot\text{m}$ を超える施工が出来ている。また、N値と貫入トルクのプロットしたものを図9に示す。図より、当該地区においても各地点でN値と貫入トルクには一定の相関があり、若干の誤差があるものの概ね比例関係にあることが分かる。これらのデータを参考にすることで、施工機の最大トルクから貫入可能なN

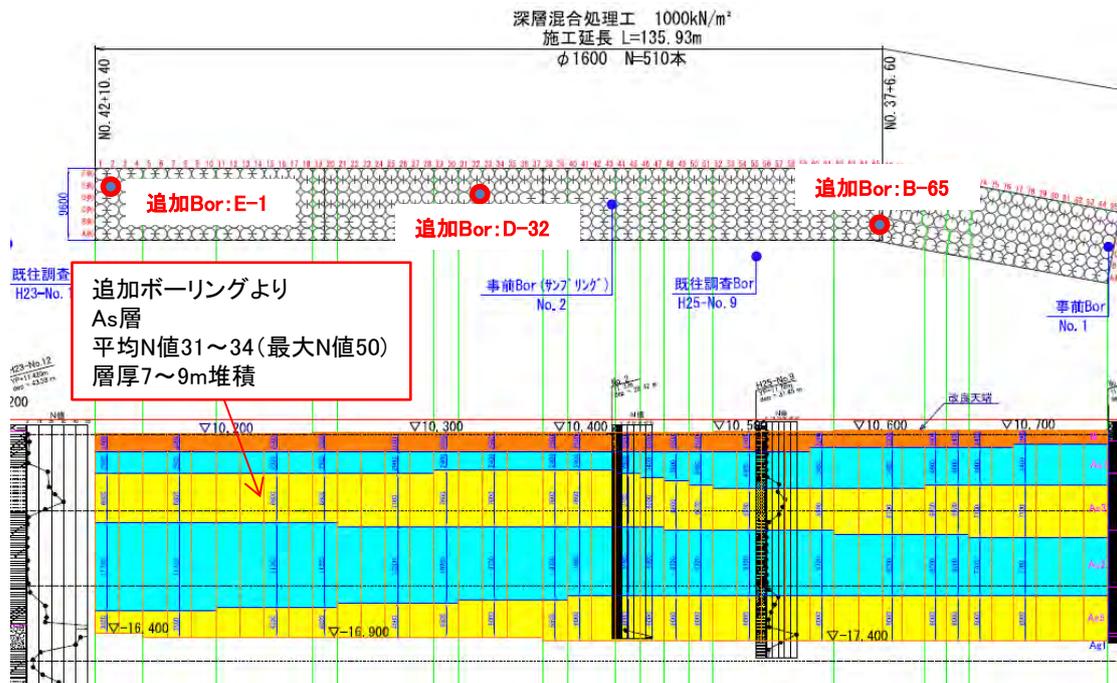


図7 改良仕様

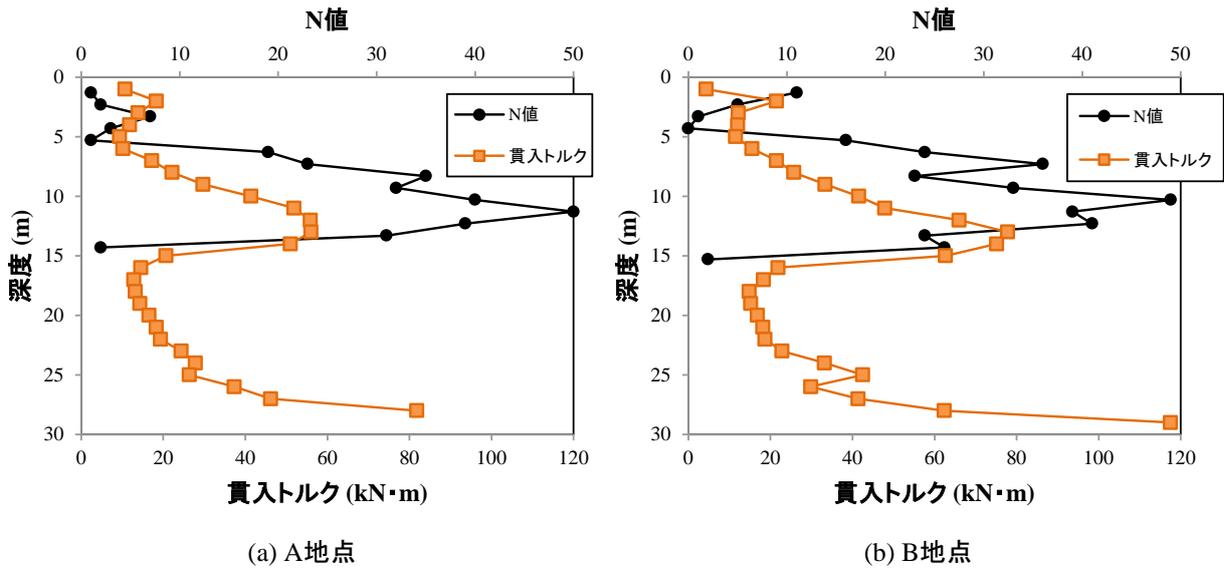


図8 各地点における貫入トルクならびにN値と貫入深度の関係

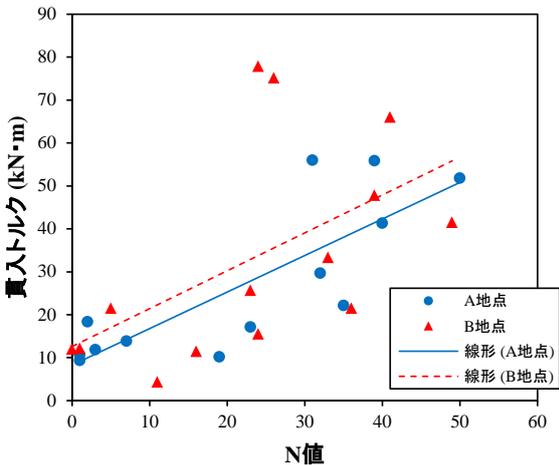


図9 N値と貫入トルクの関係

値の範囲をおおよそ推定することが可能となる。

前項と同様、事後調査結果からは改良体の連続性ならびに一軸圧縮強度 $q_{uf}=2,558\sim 4,641$  kN/m<sup>2</sup>を確認しており、品質面に問題はないことを確認した。

#### 4. 結論

本論文では、新たに開発した硬質地盤対応工法(CI-CMC-HG工法)について説明するとともに、実際の施工現場における貫入能力について整理・考察した。本工法では、従来の工法に比べ貫入能力が大幅に向上し、N値が50を超える硬質地盤にも十分適応が可能であることが実際の施工により確認できた。さらに、硬質地盤においても軟弱地盤と同等の速度で施工できることから、コストや

工程の管理もしやすく、施工後の事後調査からは品質面においても要求性能を十分満足することが確認できた。また、N値と貫入トルクには一定の相関が見受けられ、貫入トルクからある程度のN値を推定することが可能となった。

今後は改良径の違う実績や他工事の実績を積み重ね、本開発工法を積極的に適用したいと考えている。

#### 参考文献

- 1) 村上恵洋：エジェクター吐出機構を採用した深層混合処理工法と新しい施工管理システム，基礎工，Vol.45，No.6，pp.44~47，2017。
- 2) 財団法人 土木研究センター：陸上工事における深層混合処理工法 設計・施工マニュアル，pp.184~185，2004。
- 3) 田中肇一・伊藤竹史・武田尚也：超硬質地盤に適応した深層混合処理工法の開発，建設機械工，Vol.71，No.10，pp.37~40，2019。
- 4) 武田尚也・村上恵洋・田中肇一：深層混合処理工法における攪拌翼先端吐出の硬質地盤への効果，土木学会全国大会，2020（発表予定）。
- 5) 武田尚也，田中肇一，伊藤竹史，田中隼矢：硬質地盤に対応した深層混合処理工法の開発，第55回地盤工学研究発表会（京都），2020。
- 6) 菅章悟・鈴木克彦・伊藤竹史：ICTを活用した地盤改良工法の新施工管理システム，建設機械工，Vol.71，No.3，pp.1~5，2019。

# 19. 重機搭載レーザー計測システム（トンネル版）の開発

## ICT 技術を使ったインバート掘削の出来形計測検証

株式会社フジタ

○ 中村 多聞

浅沼 廉樹

ジオサーフ CS 株式会社

浮田 真樹

### 1. はじめに

トンネル工事では、GNSS（全球測位衛星システム）を使えないことや狭隘な作業環境であることから、日常の施工管理は専門員による測量が主流となっている。しかし、この測量作業は作業エリア内に重機と人が混在するため、接触事故防止に十分配慮する必要がある。また施工機械を止めて計測作業をするサイクルは、施工効率の向上を妨げていた。

近年では、3Dレーザースキャナを用いた計測が行われているが、精密機器かつ操作に専門的な知識が必要なことや、盛り替えに時間を要するという難点があった。そのため、簡易に自己位置を計測でき、移動しながら測量できる技術の開発が望まれていた。

重機搭載レーザー計測システム トンネル版（以下 重機LS-TS）は、トンネル重機に計測ユニットを搭載して、移動しながらトンネル内の任意の位置で、面的な出来形座標を取得するシステムである。この技術を、国土交通省関東地方整備局発注の国道17号（仮称）新三国トンネル工事のインバート掘削工にて、検証した結果を報告する。

### 2. システムの概要

#### 2.1 技術の概要

本システムは、トンネル内で運用可能なマシンガイダンス、重機LS-TS、自動追尾TSで構成され、トンネル内インバート部の計測を行う。システム構成を図-1に示す。

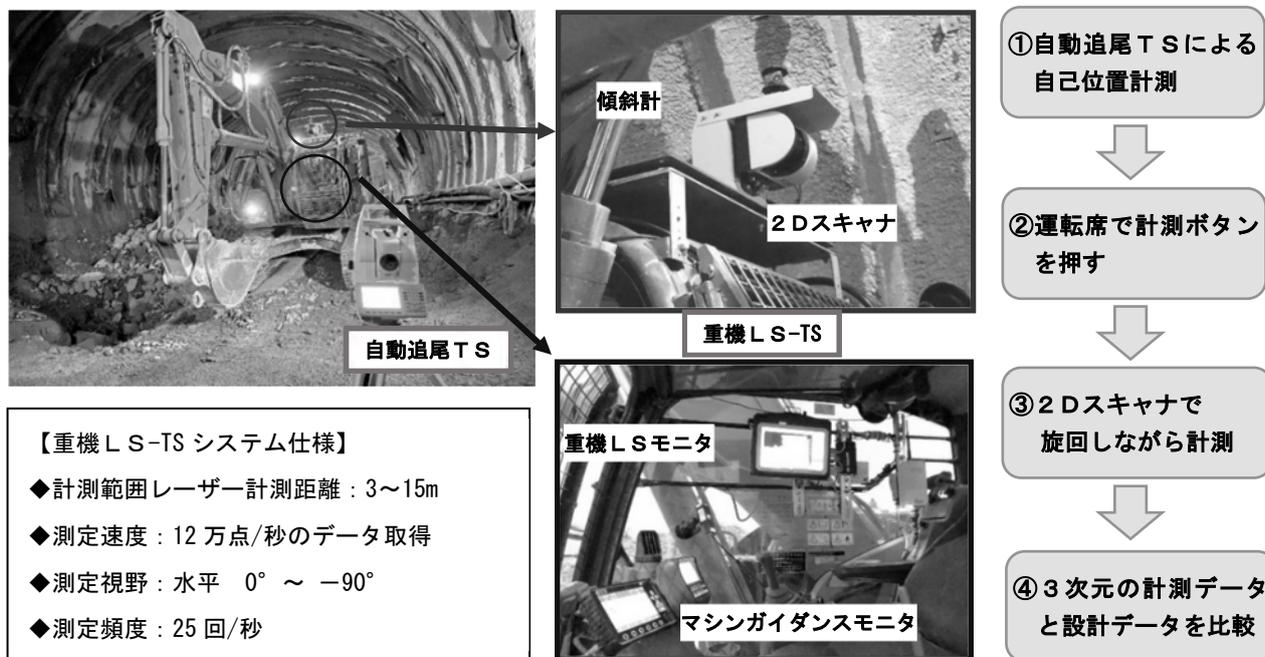


図-1 重機LS-TSシステム構成及び計測フロー

## 2.2 システムの特徴

本システムの特徴を以下に示す。

- ・GNSSが利用できないトンネル空間においても、明かり工事と同様にICT施工が適用できる。
- ・計測器に屋外用の安価な2Dのレーザースキャナを使い、重機を回転させて計測することで容易に3Dデータを取得できる。
- ・高価かつ耐久面で課題のある3Dレーザースキャナと比べて、汎用性と普及性が高い。
- ・重機に後付で搭載が可能である。
- ・計測結果は、重機運転席の重機LSモニタで閲覧ができる。
- ・重機が回転スキャンする事で取得したインバート施工面の現状データを、3D設計データと重ね合わせ、差分を色分けしたヒートマップで運転席のモニタに表示される。
- ・バックホウの爪先位置が重機LSモニタ上に表示され、計測後に掘削箇所のガイダンスができる。
- ・計測から解析までを短時間で行い、測量作業が大幅に省力化され、生産性向上が可能となる。

## 3. トンネル現場における試行プロジェクト

### 3.1 現場試行の概要

本技術は、内閣府が推進している官民研究開発投資拡大プログラム(PRI SM)を活用した国土交通省の「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」に選定された試行業務である。トンネルのインバート工事における日常の計測時間を、3D計測データ等を活用することで施工の労働生産性の向上を図り、従来工法と比較して作業時間20%短縮を目標とした。以下に試行業務の概要を示す。

#### <試行現場>

- ・工事名：国道17号(仮称)新三国トンネル工事
- ・概要：全長1283.8m, 内空断面積約58.5m<sup>2</sup>  
インバート工の延長987m
- ・発注者：国土交通省関東地方整備局
- ・工期：2016年2月～2021年2月

#### <試行業務>

- ・概要：データを活用して土木工事における施工の労働生産性を図る技術
- ・検証範囲：図-2参照(全22BL)
- ・委託者：国土交通省関東地方整備局
- ・コンソーシアム：(株)フジタ、ジオサーフCS(株)
- ・試行期間：2019年9月～2020年3月

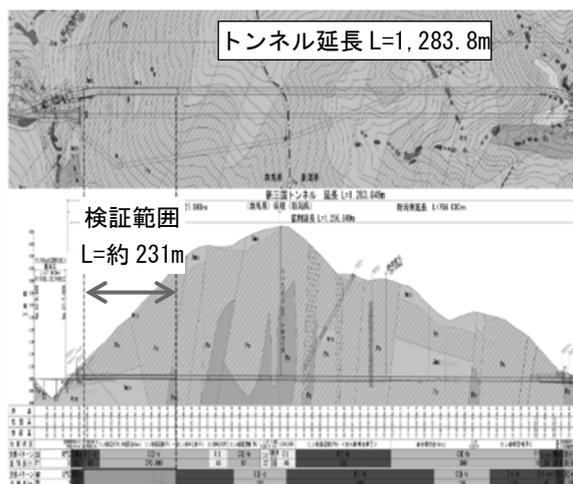


図-2 計測箇所平面図・縦断面図

### 3.2 事前の精度確認

試行業務は、事前に機械工場の平地で精度検証を行った。精度確認状況を図-3に示す。重機LS-TSの精度確認は、「国土交通省 地上移動体搭載型レーザースキャナを用いた出来形管理要領(土工編)(案)」に準じた。検証点において、TSの計測値と、重機LS-TSの計測値の差分が基準値50mm以内であることを確認した。検証点は標高差を付けて2箇所設置した。計測結果を表-1及び表-2に示す。これにより、重機LS-TSが要求精度を満たすことを確認した。



図-3 機械工場における精度確認状況

表-1 機械工場における精度確認計測結果(左パネル)

左パネル	X	Y	Z
TS計測値	-16770.655	-46352.618	106.101
重機LS-TS計測値	-16770.643	-46352.631	106.082
Δ差分	0.012	-0.013	-0.019
判定	合格	合格	合格

(単位[m], 出来形計測のため評価基準は±0.050[m]以内)

表-2 機械工場における精度確認計測結果(右パネル)

右パネル	X	Y	Z
TS 計測値	-16777.126	-46343.543	107.784
重機 L S-TS 計測値	-16777.146	-46343.522	107.769
Δ差分	-0.020	0.021	-0.015
判定	合格	合格	合格

(単位[m], 出来形計測のため評価基準は±0.050[m]以内)

### 3.3 トンネル現場での検証結果

#### (1) 精度確認

重機 L S-TS は現場搬入後に計測機器やセンサーの固定の確認を行った。また事前キャリブレーションの結果、異常がないことを確認してから検証を開始した。トンネル現場で行った精度検証状況と結果を図-4、表-3 及び表-4 に示す。



図-4 検証点設置状況(左)と3D点群データ(右)

表-3 トンネル現場における精度確認計測結果

左パネル	X	Y	Z
TS 計測値	85883.930	-90900.399	1078.755
重機 L S-TS 計測値	85883.955	-90900.405	1078.747
Δ差分	0.025	-0.006	-0.008
判定	合格	合格	合格

(単位[m], 出来形計測のため評価基準は±0.050[m]以内)

表-4 トンネル現場における精度確認計測結果

右パネル	X	Y	Z
TS 計測値	85888.920	-90891.436	1078.459
重機 L S-TS 計測値	85888.953	-90891.440	1078.486
Δ差分	0.033	-0.004	0.027
判定	合格	合格	合格

(単位[m], 出来形計測のため評価基準は±0.050[m]以内)

#### (2) 出来形計測結果

重機 L S-TS で取得した点群データと設計面の TIN サーフェスを合成し、標高較差を比較した。比較結果をヒートマップで示したものを図-5 に示す。白く表示されているところは、設計高さよりマイナスであることを示し、インバートの掘削状況を設計面と比較が可能となった。

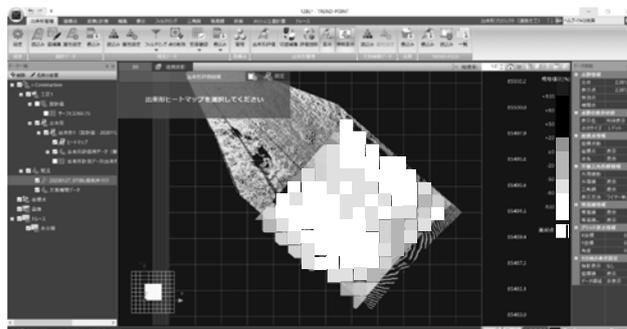


図-5 インバート掘削床付け完了時

インバート掘削工は、次工程の吹付け工・インバート工で施工するコンクリート巻厚確保のため、設計面よりマイナス側で掘削管理がされる。今回計測した範囲を従来工法で掘削出来形を確認したが、図-5 と同様に標高が設計面から 50~100mm 程度マイナス側で管理されていることを確認した(図-6 参照)。



図-6 従来工法による掘削出来形管理(水糸からの下がりによる確認)

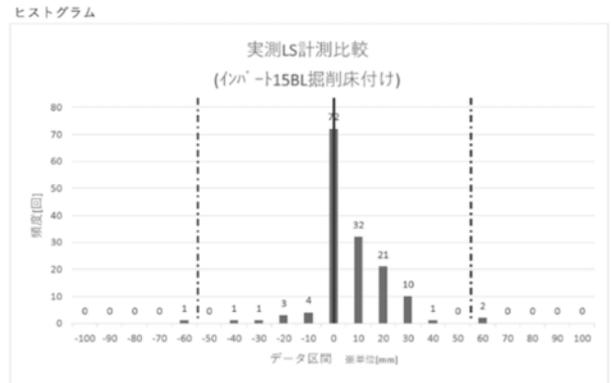
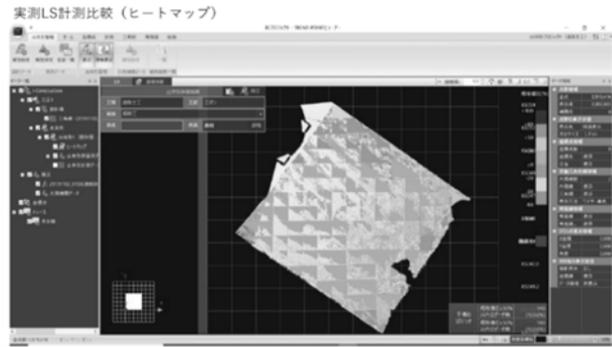
先のデータ合成では、重機 L S-TS で取得した点群データが計測断面において相違がないことを確認した。しかし、計測したデータが施工面全体で精度が確保できるかは判定できない。そのため、次節で 3 次元データとしての精度検証方法とその結果を述べる。

### 3.4 3次元データとしての精度検証

重機LS-TSで計測した施工面を、定置式3Dレーザースキャナ(Leica社製MS50)で計測を行い、標高較差を確認した。なお、3Dスキャナで計測した点をTINサーフェスに変換したものを設計面、重機LS-TSで取得した点群を評価対象とした。インバート掘削の計測状況を図-7に、結果の一覧表と評価シートを表-5、図-8に示す。



図-7 重機LS-TS及び定置式3Dレーザースキャナにおける掘削面の計測状況



全データ数	148
平均値 [mm]	3.5
標準偏差 [mm]	13.6
最大値 [mm]	60
最小値 [mm]	-64

図-8 精度評価シート

表-5 3次元データとしての精度評価一覧

番号	計測日時	施工箇所	評価データ数 [個]	平均値 [mm]	標準偏差 [mm]
1	10月31日	14BL	132	-1.6	18.3
2	11月2日	15BL	148	3.5	13.6
3	11月6日	16BL	144	-8.2	22.1
4	11月7日	17BL	138	0.3	14.8
5	11月11日	18BL	142	-17.0	19.3
6	11月13日	19BL	141	4.8	14.2
7	11月14日	20BL	142	-13.4	17.5
8	11月18日	21BL	148	-2.6	21.5
9	11月19日	22BL	153	2.1	21.6
10	11月21日	23BL	122	-3.0	16.3
11	11月22日	24BL	140	1.4	22.5
12	11月30日	25BL	132	5.0	31.1
13	12月13日	13BL	138	2.4	17.7
14	12月16日	12BL	144	-13.3	17.8
15	12月18日	11BL	141	-4.8	15.8
16	12月20日	10BL	141	-10.5	19.2
17	12月23日	9BL	141	-0.2	13.8
18	12月25日	4BL	145	1.5	18.0
19	12月26日	5BL	148	6.0	27.7
20	1月8日	6BL	134	-0.8	22.7
21	1月9日	7BL	144	-4.5	27.5
22	1月10日	8BL	143	3.8	17.5

表-5 より施工箇所毎の標準偏差が 20mm 前後で推移していることを確認した。また、図-8 のヒストグラムでは、重機LS-TSの計測値と定置式3Dレーザースキャナの計測値の差は、全体の半数近くが誤差 0~10mm に収まっていることを確認できる。以上の結果から本試行業務で計測したデータは、任意の点だけでなく施工面全体において精度が確保されていると判定できる。

## 4. 試行の成果

### 4.1 サイクルタイムの短縮

計測で取得した3次元点群データは、トンネルの3次元設計データと重ね合わせ、ヒートマップで表示される(図-9参照)。重機オペレータは、画面上のバックホウの爪先位置を確認しながら、設計面まで達していない箇所を確認し、ガイダンス機能により掘削する。また爪先位置は、設計面からの高さに合わせて色が変わるため、数値よりも瞬間的に認識しやすい表示となっている。

トンネル断面方向に張った水系から掘削面までの下がり計測する従来の確認方法から、重機オペレータが自ら作業しながら出来形の良否を確認できるようになり、インバート掘削工全体のサイクルタイムが約 20%短縮された(表-6及び図-10参照)。

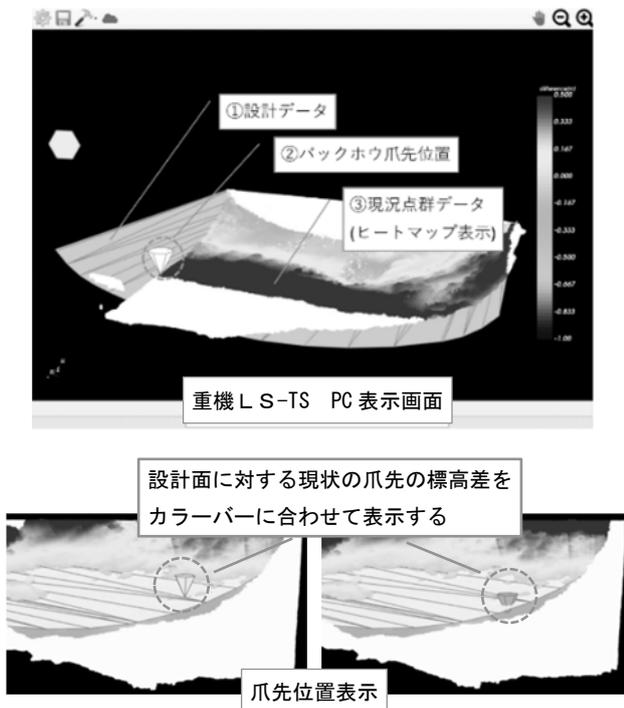


図-9 計測結果表示画面

表-6 1BLあたりの平均施工時間(全22BLの平均)

作業内容	従来工法	重機LS-TS
岩掘削・ずり積込み	8.58	8.58
確認測量	1.33	0.00
出来形測量	1.09	0.15
合計時間	11.00	8.73

(単位[h])

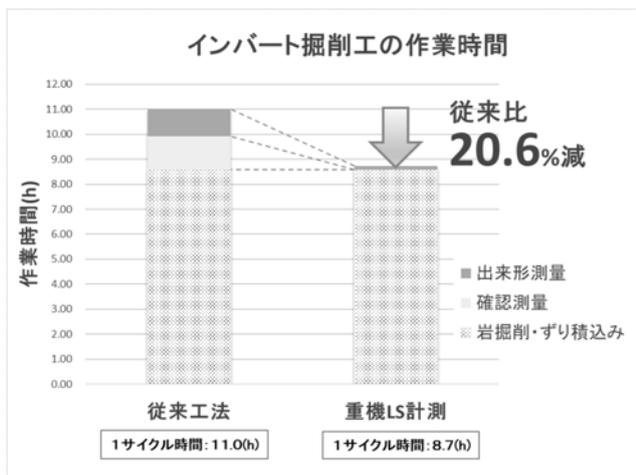


図-10 サイクルタイム比較

#### 4.2 出来形計測における人工の低減

従来のインバート掘削では、掘削時の床付け確認として出来形計測時に専門の測量員が作業ヤードに入り計測作業を行っていた。重機オペレータは、この計測結果を専門の計測員から確認し再掘削等の判断を行っていた。重機LS-TSでは、重機オペレータが自ら作業しながら出来形の良否を判定できるため、床付け確認の専門の測量員が不要となった(図-11参照)。

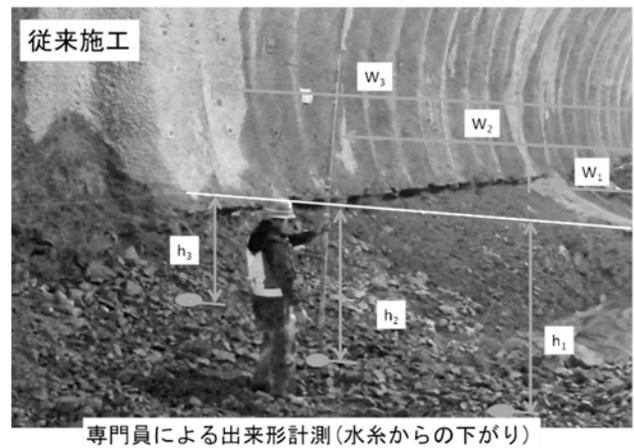


図-11 出来形計測方法の違い

これによりインバートの掘削確認や出来形計測時には、専門の測量員を配置することなく重機オペレータのみで施工可能となり、従来の2人工から1人工での施工を可能とした(図-12, 図-13参照)。

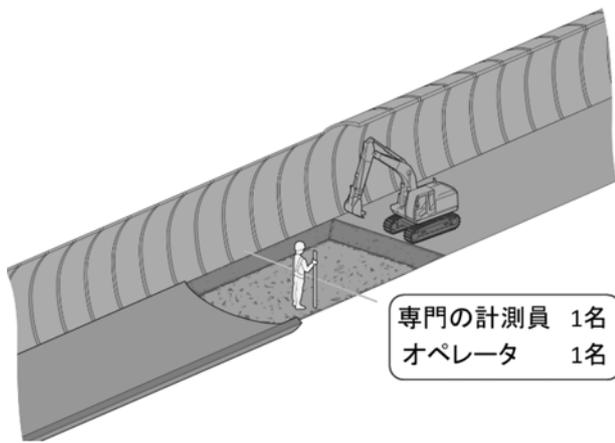


図-12 従来工法による計測時の必要人工(2 人工)

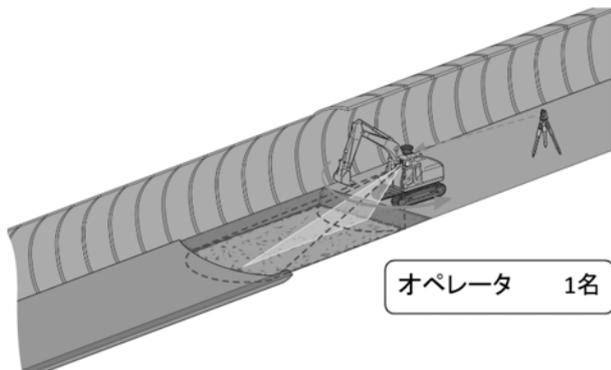


図-13 試行技術による計測時の必要人工(1 人工)

### 4.3 安全性の向上

今回の試行により、従来のインバート掘削での掘削や床付け確認の計測作業に対し、以下の事が確認された。

- ・重機オペレータが掘削毎に確認の為の重機運転席への昇降動作が不要となり、転倒によるケガの危険性がなくなりオペレータの安全性が確保される(図-14 参照)。
- ・インバート掘削面確認時に専門の測定者が重機近傍まで近づく為、作業エリア内に重機と人が混在することになり、重機と人の接触事故防止に十分配慮する必要があったが、本システムでは測定時に専門の測定者が不要となった(図-15 参照)。

### 5. おわりに

重機LS-TSによるインバート掘削工の出来形計測を実現することで、従来の人力作業と比較して省人化と生産性向上が図れたことを確認した。

安全面において、重機旋回範囲内に計測の専門員が立入ることがなくなったため、重機と人が接触する危険要因が排除された。また床付け確認作業で、オペレータが運転席から頻繁に乗り降りする必要が無くなった。

今回の検証は、インバートの全断面掘削で行ったが、今後はその他のトンネル工の出来形計測にも展開が可能であると考え。本技術が建設現場へのICT導入に対する更なる普及促進につながれば幸いである。

本技術の開発と現場試行にあたり、多岐にわたりご指導を賜りました関係者各位に深く感謝を申し上げます。



図-14 従来インバート掘削(重機足場状況)



図-15 従来インバート掘削(掘削高さ確認)

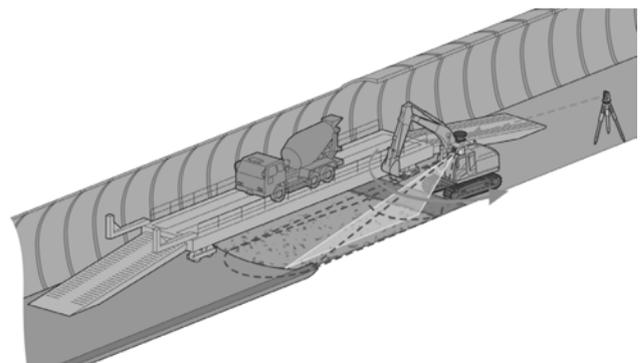


図-16 トンネルインバート棧橋での計測イメージ

## 20. トンネル工事の省力化について

### ロックボルトを搭載した多機能機械「マルチジャンボ」

株式会社フジタ ○野正 裕介

浅沼 廉樹

古河ロックドリル株式会社 能代 泰範

#### 1. はじめに

トンネル工は特殊技能を要し、狭い坑内で地質の変化、湧水による落盤や重機と人との接触等、常に危険と隣り合わせの作業となっている。近年では、これらの課題を掘削技術や坑内設備の発達により改善がなされているが、熟練技能員の高齢化による離職で人手不足は深刻であり、省力化と新規人材の育成、現場状況に応じた計画は今後の課題となっていた。

そこで株式会社フジタでは、これらの問題を解決するべく古河ロックドリル株式会社と共同でロックボルトを搭載した多機能機械(以下、マルチジャンボ)の開発を行った。本稿ではマルチジャンボの開発から現場導入の成果及び今後の課題について報告する。

#### 2. マルチジャンボの開発検討

##### 2.1 現状のトンネル工のサイクル課題

山岳トンネルの切羽作業は、掘削方式によって若干異なるが、

- ① 掘削・削孔装薬
- ② ズリ出し
- ③ 吹付け・支保建込み
- ④ ロックボルト打設

上記作業の繰り返しが基本作業となっている。

この時に使用される施工機械は各作業により異なっており、機械入替えによる手間や施工方法の複雑化の要因となっていた。図1に施工サイクルによる機械配置を示すが、機械掘削では自由断面掘削機を使用する為、施工サイクル上で同一の機械を使用する事はない。発破掘削ではこれらの作業の中で④ロックボルト打設作業と次施工サイクルでの①掘削・削孔装薬作業が、同一施工機械のドリルジャンボを使用した連続作業となっている。

しかし、この2つの作業は施工機械の据付位置が異なる事から④と①の作業毎に施工機械の盛替えが必要となり、個々に独立した作業と認識されていた。また、④のロックボルト打設は、ロックボルト挿入孔穿孔作業をドリルジャンボによる機械作業で行い、定着モルタル充填やロックボルト挿入は、切羽近傍でドリルジャンボのチャージングゲージ等を使用した人力作業となっており、掘削面から岩石落下により作業者が被災するリスクがあり、切羽作業時の安全性の確保の更なる対策が求められていた。

これらの対策として、ドリルジャンボの多機能化の検討を行い、センターブームにロックボルト打設専用ブーム「ロックボルト」を装着することでロックボルト打設と装薬穿孔を同時施工可能とした多機能機械「マルチジャンボ」の開発を行った。

	①	②	③		④	
作業内容	掘削・削孔装薬	ズリ出し	一次吹付け	支保建込み	二次吹付け	ロックボルト打設
発破掘削	ドリルジャンボ	ホイールローダ バックホウ 重ダンプorベルコン	吹付け機	エレクタ台車 or エレクター付き吹付け機	吹付け機	ドリルジャンボ
機械掘削	自由断面掘削機		エレクター付き吹付け機			

図-1 施工サイクルによる機械配置

## 2.2 マルチジャンボに求められる機能

マルチジャンボを開発するにあたり、

- ① 施工サイクルの短縮
- ② 作業者の安全性確保

上記を基本方針として開発を行った。

### (1) 施工サイクルの短縮

施工サイクル短縮に求められる機能条件を以下に示す。

#### マルチジャンボの固定位置での施工

ロックボルトを打設後、施工機械であるマルチジャンボを次工程の装薬孔穿孔の為に移動せずに行う。

#### ロックボルト施工の機械化

チャージングゲージを使用し、作業員が行っていた定着モルタル充填作業を、マルチジャンボのみで行う。同じくチャージングゲージに可搬・穿孔ドリフタにて挿入していたロックボルトを、機械にて保持することでロックボルトを挿入できるようにする。(図-2, 図-3 参照)

### (2) 作業者の安全を確保する

安全性の確保として、ロックボルトの挿入孔穿孔後、作業員が切羽近傍に入っていた人力作業を少なくし、掘削面から岩石が落下することで作業員が被災するリスクを排除する。



図-2 定着モルタル注入作業



図-3 ロックボルト挿入状況

## 3. 基本仕様の検討

2.2 より求められた機能より、マルチジャンボ設計条件を以下のように決定した。

#### 同時穿孔可能なブーム配置

ロックボルトの挿入孔穿孔と、次断面の装薬孔穿孔をマルチジャンボの切羽への据付位置を変更しないブーム配置とする。

#### ロックボルト動作を連動する

ロックボルトの挿入孔穿孔、定着モルタル充填、ロックボルト挿入の一連作業を連続して行う機械。

#### ロックボルトのストック化

ロックボルトをチャージングゲージで運搬していたが、専用のロックボルトフォルダを複数本保持して運搬する。

#### マルチジャンボにて注入操作を行う

定着モルタルポンプの運転操作をマルチジャンボオペレータが自ら行う。

## 4. 概略設計

基本仕様検討により、鉱山機械にて使用されているロックボルト打設専用機「ロックボルタ」に着目。(図-4 参照)

マルチジャンボのセンターブームに「ロックボルタ」を搭載するに再設計を実施し、装置の構成を要素の異なる次の3つに分けて検討し、各ユニットの開発を行った。

- ・ロックボルト格納マガジン
- ・切替え式セントラライザ
- ・遠隔式モルタルホース注入ユニット

以下に個々の機能を説明する。



図-4 鉱山用ロックボルタ

### 4.1 ロックボルト格納マガジン

通常トンネルのロックボルト打設は、ドリルジャンボによるロックボルト挿入孔穿孔を行い、チャージングゲージにてロックボルト本体の運搬、穿孔ドリフタにてロックボルトの挿入を行う。ロックボルト格納マガジン(以下、ターレ

ット)は、このロックボルトを複数本ストックすることで、運搬時間の短縮と重量物運搬による作業員の作業負担を軽減する。

#### 4.2 切替え式セントラライザ

ロックボルト打設は、挿入孔の穿孔・定着モルタルの注入・ロックボルト本体の挿入という流れで施工を行う。しかし、同一の穴位置に施工を行うには全て目視による位置合わせが必要であり、機械操作時には合図者による誘導が必要であり施工サイクルの低下となっていた。

この為、挿入孔穿孔を行う穿孔用ドリルと定着モルタル注入ホース、ロックボルトをターレットから引き出し挿入する挿入用ドリルを、同一挿入孔にロックボルト打設可能な切替え式セントラライザの開発を行った。本装置の採用により、ロックボルト打設作業を連続的に行う事が可能となり、施工時間の短縮だけでなく切羽近傍に合図者を入れる必要がなく安全性の向上を図る。(図-5 参照)

#### 4.3 遠隔式モルタルホース注入ユニット

定着モルタルの注入作業は、穿孔ドリフタにて挿入孔を開けたあとにモルタルホース挿入者とモルタルポンプ操作者が合図を行い注入作業を行う。この時、切羽機械の死角や騒音から合図が視認できず定着モルタルのロスや誤操作が多

かった。

この操作を先の切替え式セントラライザに装備した注入ホースユニットとモルタルポンプへの遠隔操作ユニットを組み込むことで、機械オペレータ単独での操作を可能とする。遠隔式モルタルホース注入ユニットの採用により、人力で行っていた定着モルタル充填作業を機械オペレータ操作と連動することが可能となり、定着モルタルのロスや切羽作業の削減が図れる。

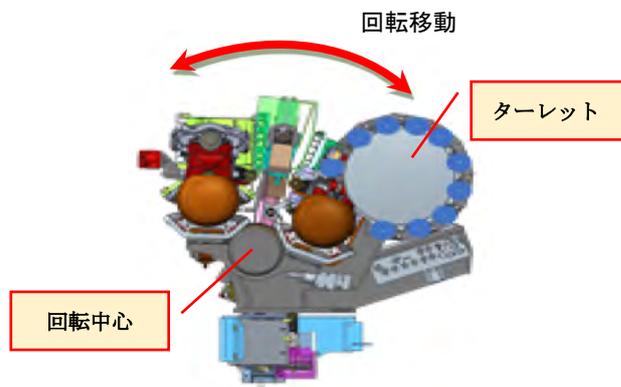


図-5 切替え式セントラライザ(正面)

以上の設計条件をもとに、山岳トンネル用「ロックボルト」を開発。(図-6,図-7 参照) マルチジャンボへの搭載を行った。

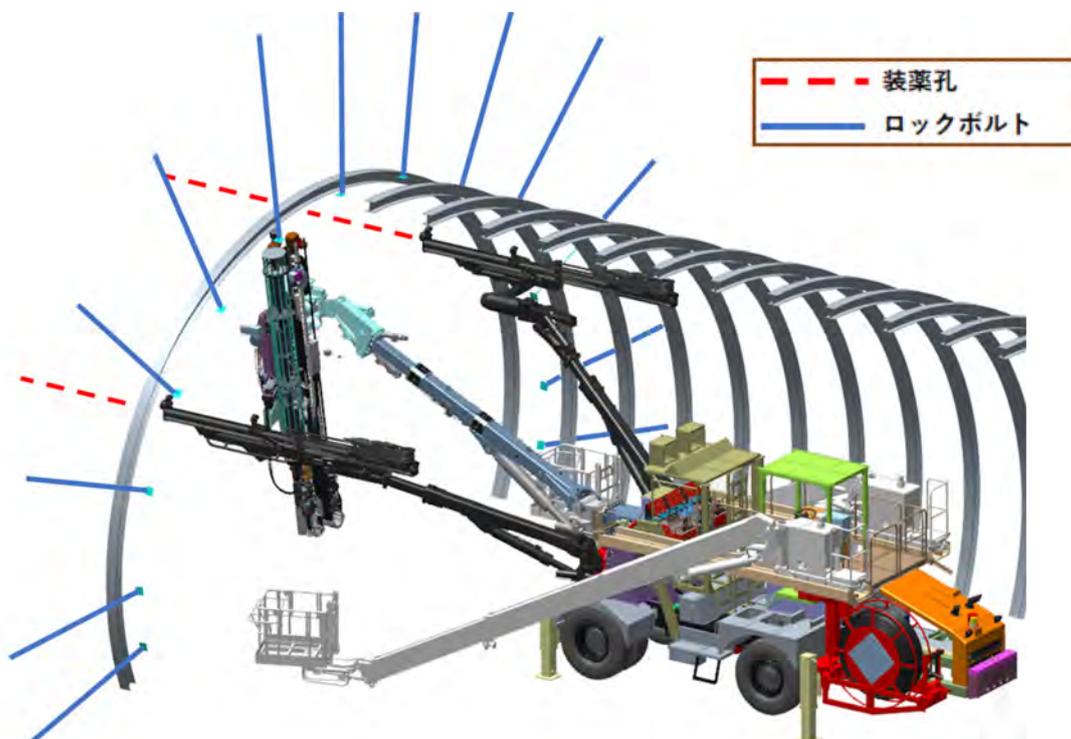


図-6 マルチジャンボ施工イメージ図

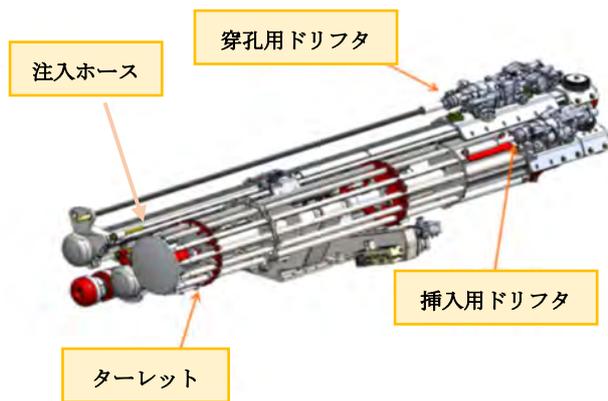


図-7 切替し式セントラライザ（当初）

## 5. 機械仕様

マルチジャンボの機械仕様を以下に示す。

（図-8 参照）

全長：16,720 mm/全幅：3,140 mm

全高：4,190 mm/質量：49,000 kg

油圧ドリフタ：2×HD220/1×HD90

1×HD30



図-8 マルチジャンボ全景

## 6. 現場導入の成果

マルチジャンボ完成後、現場導入状況と実施工における施工結果を以下に示す。

導入現場は以下の通りとなる。

現場名：国道17号(仮称)新三国トンネル工事

発注者：国土交通省関東地方整備局

工事場所：群馬県利根郡みなかみ町永井  
～新潟県南魚沼郡湯沢町三国

導入期間：2019年4月～2019年9月

工事概要：トンネル延長 L=1,283.8m、  
トンネル仕上がり内空断面積 約 58.5 m<sup>2</sup>

### 6.1 現場搬入・組立

マルチジャンボは、汎用のドリルジャンボと同様に分割されて現場搬入される為、本機械も現

地にて組立調整を行った。

組立・調整日数：約3日

（内訳）本体組立・調整 2日

ロックボルト NAVI 調整 1日

現場搬入状況を図-9、組立完了した状況を図-10に示す。



図-9 ロックボルト用ブーム搬入状況



図-10 坑内組立完了

### 6.2 実証実験

組立完了後、実証実験を運用開始前に行った。

（図-11、図-12 参照）。

実施内容は以下の項目であり、個々に①の項目を解決したあとに②③の項目を行った。

<実施項目>

- ① 各ユニットの単独動作確認
  - ・穿孔ドリフタ運転
  - ・定着注入ホース運転
  - ・ターレット及びロックボルト挿入確認
- ② 総合動作確認
- ③ 装薬孔穿孔とロックボルト打設の同時穿孔確認



図-11 施工状況 1



図-12 施工状況 2

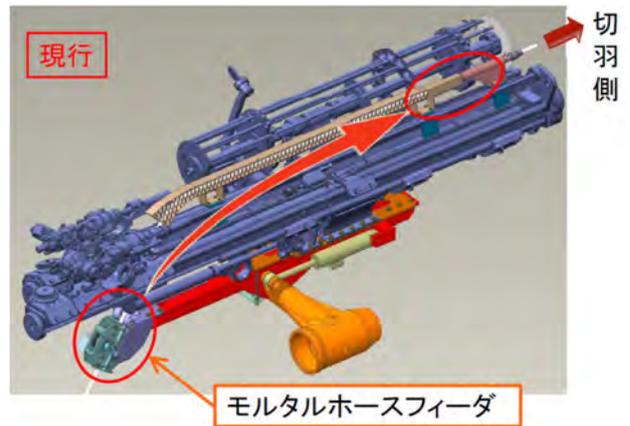


図-13 モルタルホースフィーダ位置変更



図-14 ホースガイド変更



図-15 モルタルホース視認窓増設

### 6.3 実証実験結果

実証実験を実施した結果、以下の問題点が生じ改良を行った。

#### (1)モルタルホース送り装置の不具合

定着モルタル注入作業では、挿入孔穿孔を行った後、定着モルタルを充填する為に注入ホースの挿入孔への送り出し・注入しながらの引き出しを行う。この注入ホースがホース送り装置からスムーズに出ず、挿入途中で止まる事が頻繁に発生した。また、注入ホースの送り出し状況が、オペレータから見えづらく注入完了の視認が困難だった。

#### <対策>

当初、定着モルタルホース送り装置の駆動部（モルタルホースフィーダ）をロックボルトユニット後部に設けていたが、駆動部を前方へ移設し、ホースガイドを現状の下向きから真っすぐにする事で改善を行った。（図-13 図-14 参照）

モルタルホースの視認性の向上としては、ホース先端部の形状変更やホース視認窓の増設にて対応を行った。（図-15 参照）

#### (2)ターレットからの送り出し不良

ターレットからのロックボルト挿入用ドリフタへのロックボルトの送り出しは、ターレット自体が旋回する事で装着が可能となっているが、挿入孔穿孔時にターレット下板に穿孔ズリが堆積する事や挿入用ドリフタへの押込みガイドが短い事から、施工当初にロックボルトの装着不良や脱落が発生した。（図-16 参照）



図-16 ターレット下板ズリ堆積状況

<対策>

ターレット下板への穿孔ズリ堆積は、ロックボルト天端施工で頻繁に発生しており、下板ガイドレール部を塞いでいた為、下板底部にズリ抜け用の開口を設け、合わせてガイドレール端部の拡張を行った。また押し込み不良に関しては、挿入用ドリフトと押し込みガイドを延長する事でロックボルトの装着不良や脱落を改善した。

7. マルチジャンボ導入結果

実証実験を経て、マルチジャンボの現場運用を行った結果、以下の事が確認された。(図-17 参照)

<マルチジャンボの特長>

- ・ロックボルトの収納マガジン(ターレット)にロックボルトを最大8本装填し、遠隔でロックボルト打設が可能。
- ・穿孔、モルタル充填、ロックボルト挿入の一連動作を作業員が切羽近傍に入ることなく施工が可能になり**安全性が向上**。
- ・マルチジャンボの左右のブームを使用し、次工程の発破孔の同時削孔が可能になり**生産性が向上**。

<導入結果>

トンネル掘削(支保パターン:D I)で1回の掘削当たり、13本のロックボルト(L=4.0m)を安全で正確に打設できることを確認された。また、ロックボルト打設と装薬孔穿孔を同時穿孔で行うことにより、20%の省人化(5→4人編成に変更)と10%の作業時間削減を実現し、生産性の向上につながった。(図-18 参照)



図-17 改良後のユニットの施工状況  
(左右:穿孔ブーム, 中央:ロックボルトブーム)

8. おわりに

トンネル熟練技能員の高齢化による離職で人手不足は深刻であり、省力化が求められる中、マルチジャンボの開発を行った。

その結果、20%省力化と10%の作業時間の短縮、切羽に作業員が立ち入らなくなったことによる安全性の向上が可能となった。更なる改善を行うことにより、省力化・安全性がさらに向上すると考えられる。今後、当社トンネル現場に投入し、更なるブラッシュアップを実施していく。

最後にマルチジャンボ開発に当たり、多くの助言・ご指導をいただいた関係各位の方々に心から感謝いたします。本当にありがとうございました。

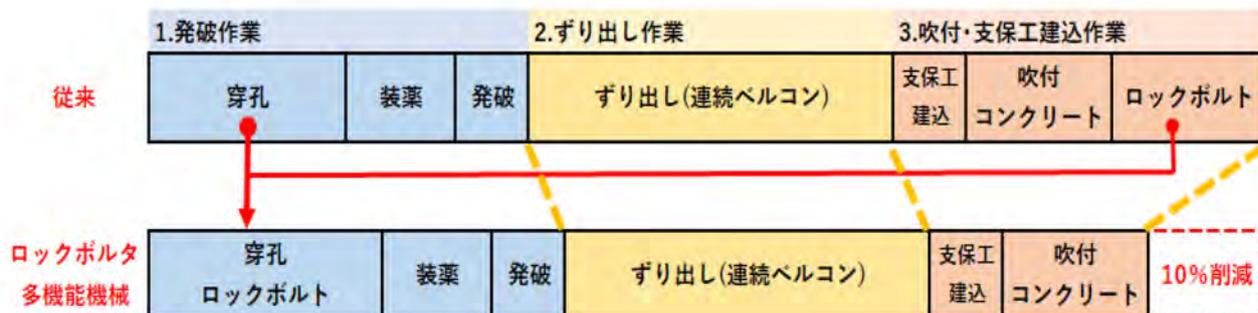


図-18 1サイクル当たりの作業時間比較

## 21. 磁界センサを活用した作業員検知警報・停止システム

### －3K（きつい・汚い・危険）からの脱却－

株式会社 アクティオ ○ 今関 政美  
 株式会社 アクティオ 稲葉 誠一  
 株式会社 アクティオ 安田 勇介

#### 1. はじめに

従前より建設業は3K（きつい・汚い・危険）と言われており、現在では新3K（給与・休暇・希望）の実現を目指して、国土交通省がi-Constructionの施策を打ち出し、ICTの全面的な活用による生産性の向上に取り組んでいる。

ひとたび事故が発生すれば、被災者及びその家族の生活は一変し、現場は事故原因の追究と対策に追われ、一定期間施工を止めざるを得ず、生産性は落ちることとなる。事故を未然に防ぐことが生産性向上への第一歩であると考えます。

本稿では、過去の重機災害事例から見えた課題に対して、レンタルという切口で重機に後付けできる安全補助装置について紹介する。

#### 2. 重機災害発生状況

平成29年度における建設業の死亡者数は、全産業978人のうち323人で、約33%を占めておりワースト1となっている。（図-1）

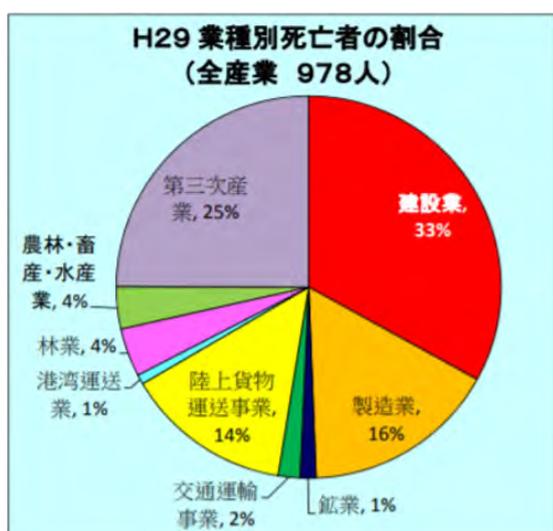


図-1 業種別死亡者の割合  
 ※資料：厚生労働省 労働災害統計より

建設工事では作業員と重機との近接作業が多いため、バックホウ等の重機と作業員との接触が56.5%と最も多い状況である。災害形態で見ると、轢かれ・挟まれで6割を占め、その際の重機の動きは走行と旋回で8割を占めている。作業員が無意識に重機の死角に入ってしまうケースが考えられ、死角を体験させるなどの安全教育を実施しているが、平行して、作業員を検知し警報を発する装置による対策が取られてきた。

#### 3. センサの変遷

##### 3.1 みはり組

みはり組は、重機後方に設置された赤外線センサ本体と作業員が装着するヘルメットセンサが、一定距離において反応し、オペレータには音で、作業員には音と振動で注意を促す警報装置である。みはり組の検知範囲を図-2に示す。

検知距離は約5mと10mの2段階で切替えが可能で、幅約2.8m、高さ約2.5mの範囲に作業員が入ると発報する。重機は停止しない。本商品は重機の後方のみ検知する警報装置あり、左右の検知と、作業員を検知した際に重機の動作を停止させられないか？との現場の声があった。

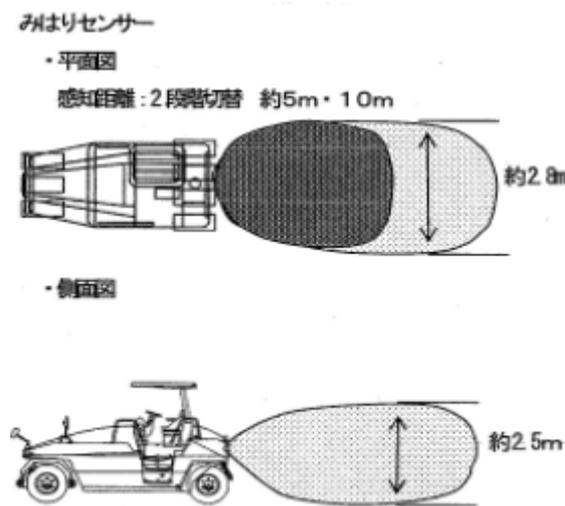


図-2 みはり組 検知範囲

### 3.2 スリーエスバックホウ

みはり組の課題を解決すべく、バックホウの左右及び後方に計8個の赤外線発行器を装着し、ヘルメットセンサを付けた作業員を検知すると、走行・旋回・掘削作業の全ての動作を停止するシステムとした。みはり組同様に、オペレータには音で、作業員には音と振動で知らせるようにした。設定距離内に作業員が滞在している間は停止を続け、設定距離より離れると5秒後に動作を開始する。

スリーエスとは、Safety・Sensor・Stopの3つのSから命名した。システムの概要を写真-1に示す。



写真-1 赤外線発光器と受光器

更に、重機災害における作業員の状況別の分析(図-3)から、重機の『後方』で『重機に背を向けての作業』が26.1%で、重機の『前方』で『重機の方向に向けて作業』している場合が33.0%と多いことがわかった。



図-3 被災者と重機の位置関係

そこで磁界センサを活用し、前方を含めた全方位360度を検知するシステムを検討することとした。

### 4. 磁界センサを活用したフォーエスバックホウ

フォーエスとは、スリーエスにSignalを追加し4つのSから命名し、当事者のみならず、外部の人にも気づいてもらえるよう見える化した。機器の構成を以下に示す。

#### 4.1 検知器本体 (写真-2)



検知器本体は最大検知距離12m版とミニバックホウ用の最大8m版の2種類。仕様は以下の通り。

検知方式	磁界式
設定範囲外側	3m/4m/6m/8m/10m/12m 3m/4m/6m/8m (8m版)
設定範囲内側	外側に対し 1/3・1/2・2/3・3/3
保護等級	IP65 相当
電源	DC12V/24V
電波周波数	315MHZ (受信)
磁界送信周波数	125KHZ
動作温度	-20℃~75℃

#### 4.2 タグ (写真-3)



振動警報タグ

ヘルメット用タグ

### 4.3 積層灯 (写真-4)



キャブ内

キャブ外

### 4.4 非検知エリア設定装置 (写真-5)



### 4.5 システムの特長

写真-2 の検知器本体をバックホウのキャブに設置し、12m版は6段階、8m版は4段階で外側エリアを設定し、内側エリアは外側にエリア対し4段階で設定する。例えば外側を8mに設定し、内側を1/2に設定すると、外側8mで警報を発してオペレータ及びタグを所持した作業員に危険を知らせ、更に内側4m内に入ると停止する。

スリーエスでは設定距離内に入った作業員を検知すると即停止するのに対し、フォーエスでは設定距離を外側・内側の2段階の設定を可能にし、警報から停止となることで安全性を確保した。

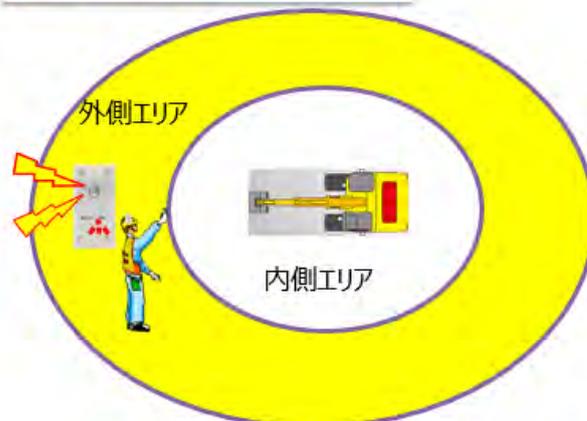
作業員が所持するタグ (写真-3) は、振動警報タグとヘルメット用タグの2種類があり、ヘルメット用は振動しない。振動警報タグはポケット等に入れていても検知するが、外部から所持していることが見えないため、腕章タイプの専用ホルダも用意している。

キャブ外の積層灯は正常時の緑色から、外側エリアに入ると黄色、内側エリアに入ると赤色が点灯し、外部の人にも機械の状況が見える。また、キャブ内の積層灯は正常時の青色から外側エリアで黄色、内側エリアで赤色となり、音と色でオペレータに注意喚起をする。

また、スリーエスでは複数のバックホウが近距離で作業をする場合、オペレータがヘルメットセンサを装着していると、そのセンサを検知した別の重機が停止するという事象が発生したため、フォーエスでは運転席の空間を非検知エリアに設定できるようにした。このようにすることでタグを所持しているオペレータを検知せず重機が停止しなくなり生産性を下げることなく作業ができる。

以上の特長を図-4 に示す。

#### 1. 外側エリアに作業員侵入



#### 2. 内側エリアに作業員が侵入

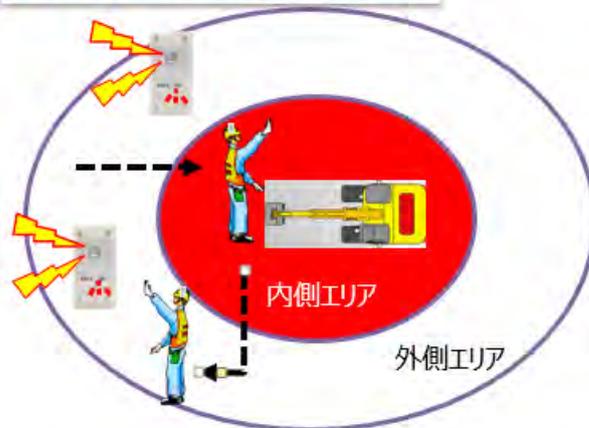


図-4 イメージ図

作業員が内側エリアから離脱した約5秒後にバックホウの動作は開始されるが、外側エリア内では警報は鳴り続け、外側エリアから離脱すると正常の状態に戻るというシステムである。

### 4.6 検証結果

12m版は外側6段階に対し内側4段階で設定できるので24パターンを検証したが、その一部を紹介する。バックホウ0.7m<sup>3</sup> (20t級) の中央部でH約2mのエンジンルーム上部に検知器本体を設置し、タグに反応し外側で警報、内側で停止した距離を前後左右で測定した。(図-5・6・7・8)

(1) 外側 12mの内側 1/3 (4m) に設定

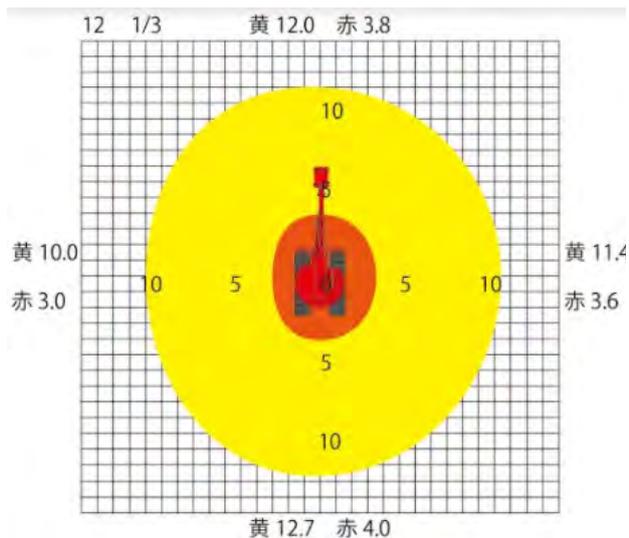


図-5 内側 4m

(4) 外側 12mの内側 3/3 (12m)

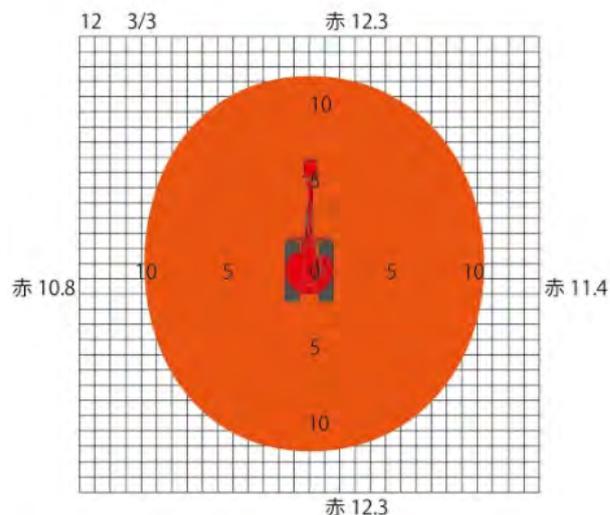


図-8 内側 12m

(2) 外側 12mの内側 1/2 (6m) に設定

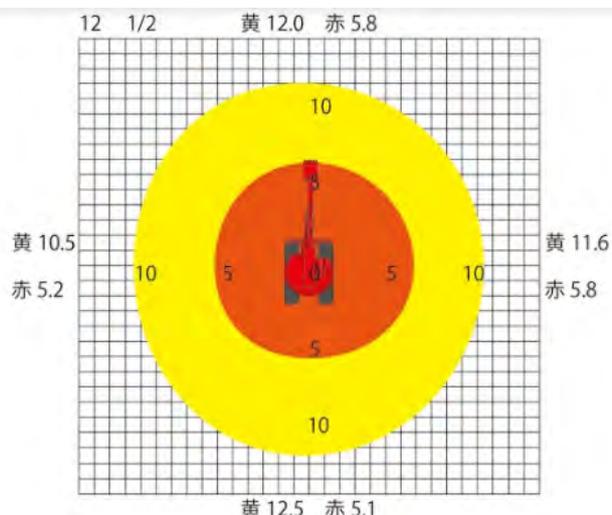


図-6 内側 6m

検証結果を以下の表-1 に示す。(単位：m)

	外 12m	内 4m	外 12m	内 6m
前	0	-0.2	0	-0.2
後	+0.7	0	+0.5	-0.9
右	-0.6	-0.4	-0.4	-0.2
左	-2.0	-1.0	-1.5	-0.8

	外 12m	内 8m		内 12m
前	0	+0.4		+0.3
後	+0.5	+0.4		+0.3
右	-0.6	+0.2		-0.6
左	-1.2	-0.5		-1.2

(3) 外側 12mの内側 2/3 (8m) に設定

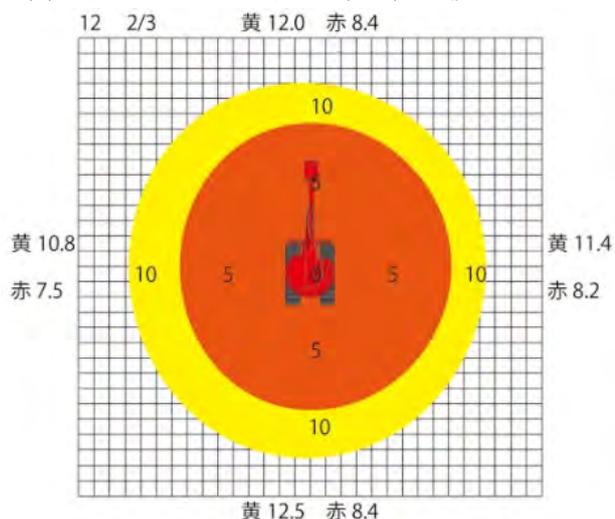


図-7 内側 8m

左側の検知距離が短くなる傾向があるが、その他は概ね良好な結果となった。使用前点検にて検知範囲を確認した後、使用することをお勧めする。

## 5. おわりに

今回紹介したセンサは後付けが可能なレンタル品であり、現場にとって利便性が高い商品であると自負しているが、あくまで補助装置である。従来通り、立入禁止措置をするなどシステムを過信せず、安全対策を講じていただきたい。

今後も現場の声を形にし、重機災害の撲滅により、建設現場の生産性向上に微力ながら貢献していきたいと思う。

## 22. ICT 技術を用いた人と重機の接触災害リスク低減システムの開発

### 人と重機の協調安全

清水建設（株）

○ 奥田 悠太  
藤井 暁也  
佐藤 有

#### 1. はじめに

情報を得るためのセンシング技術、情報を運ぶための無線通信技術、情報を分析するための AI やクラウド技術の発展は目覚ましく、現実世界の様々な情報を収集して解析し、現実世界にフィードバックすることで安全性や生産性を向上させるデジタルツインの実現が現実となりつつある。

そこで、建設現場においても、人と機械が同じ領域で協働する環境において、ICT・IoT・AI 技術などを用いて人・機械・環境が情報を共有しながら安全を確保しようという協調安全という考え方<sup>1)</sup>に基づいた安全システムの導入を目指した。

本稿では、2019 年に熊本 57 号滝室坂トンネル西新設（一期）工事（工事延長＝2679m、掘削断面積＝107m<sup>2</sup>）に導入したトンネル掘削工事のずり出し作業における、人と重機の接触災害リスク低減システムの構成と、導入にあたっての課題、導入効果について報告する。

#### 2. 開発の背景

我が国における建設業の死傷労働災害の発生件数は、横ばいで推移し下げ止まりの状況にある。建設業の現場では、人と重機が同じ領域で協働して作業することが一般的で、製造業では一般的な「隔離の原則」や「停止の原則」の実現は難しい。そのため、指差呼称やゲーパ合図といったルールの周知徹底、安全教育の実施による安全意識の向上などに取り組んでいるが、これらは人の注意力に依存し、人の安全意識の差や現場経験量・集中度・疲労度によっても安全レベルにばらつきが生じる。以上の理由から新たな安全管理手法の導入が望まれていた。

#### 3. 開発コンセプト

トンネル掘削工事のずり出し作業における人と重機の接触災害を防止するために、以下 4 つのケースを想定した。

- ①人の切羽エリア侵入時の重機との接触。
- ②重機オペレーター降車時の他の重機と接触。
- ③重機が人の存在に気付かず接触。
- ④人が重機の接近に気付かず接触。

これらの接触のリスク低減を実現するために以下のシステムの開発を行い、現場に導入した。

- a)ビーコンを用いた位置情報管理システム（図-1）
- b)警告照明システム（図-2）
- c)ホイールローダー制御システム（図-3）
- d)バックホウ制御システム
- e)AI 搭載人検知カメラシステム（図-4）



図-1 位置情報管理システム



図-2 警告照明システム



図-3 重機制御システム



図-4 AI 搭載カメラシステム

#### 4. システム構成

システムブロック図を（図-5）に示す。まず、位置情報により人と重機の位置を把握し、ずり出し作業時にオペレーター以外の人や作業に関係のない車両が切羽エリアに侵入しようとした場合、警告照明システムが作動し、異常を知らせる。これにより①人が侵入し、重機と接触するリスクを低減している。また、重機オペレーターがずり出し作業中に切羽エリア内で降車した場合には、ビーコンにより降車を検知し、重機に設置した警告灯で周囲に異常を知らせることで、②重機オペレーター降車時の、他の重機と接触するリスクを低減する。万が一、ビーコンの故障などで侵入者がいた場合には、重機に設置したAIカメラにより重機オペレーターに人の接近を知らせることで、③重機が人の存在に気付かず接触するリスクを低減している。④の人が重機の接近に気付かず接触するリスクは、指向性ライトや、シーケンシャルライトにより重機の接近を周囲の人に知らせることでリスクを低減する。

##### 4. 1 ビーコンを用いた位置情報管理システム

トンネル坑内では GNSS 等の位置測位システムを利用することはできない。そこでビーコンシステムを採用した。ビーコンシステムとは、BLE(Bluetooth Low Energy)信号を発する EXTx（以下 発信機）と、受信する EXBeacon（以下 受信機）により位置情報を測位するシステムである。故障や電池切れなどに対してロバスト性を確保するために、人や重機に発信機を 2 個ずつ装着した（写真-1）。トンネル坑内には 10m 間隔で受信機を設置し（写真-2）、EXGateway（以下 中継機）と現場無線 LAN ネットワークを経由して EXCloud（以下 サーバー）へ情報が送信される。サーバーでは受信した情報と、あらかじめ設定された地図を照合して人や重機の位置を特定し、マッピングする（図-6）。また、クラウドに登録する情報には所属会社や所属グループの情報が付与されてお

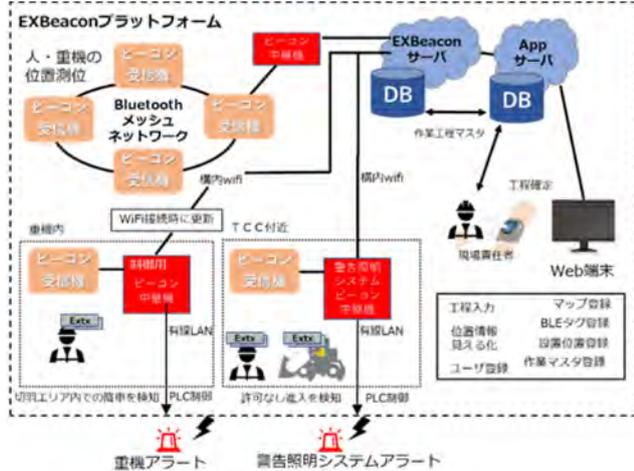


図-5 システムブロック図

り、入退許可を管理することができる。

ビーコンシステムはBluetooth信号の受信強度によりどの受信機の近傍にいるかを判定しているため、測位位置に 10m 程度の誤差がある。そこで切羽エリアと駐機エリアの境界には指向性アンテナを設置すると共に、越境判定ラインを切羽エリアから 10m 程度後方に設定することで、侵入前に確実に捕捉できるようにした。

##### 4. 2 警告照明システム

ビーコンを用いた位置情報システムにより、人及び車両の進入を検知した場合、作業中の重機オペレーターと侵入者に対し、迅速かつ確実に異常を伝達する必要がある。そこで、防爆カーテンの架台に白色と赤色の高照度 LED 照明を設置し、点灯方法を一括で制御可能な警告照明システムを導入した。通常時は白色 LED 照明のみ点灯しており、切羽近傍で 200 lx の照度を確保することで、作業の安全性向上を図った（写真-3）。



写真-1 発信機



写真-2 受信機

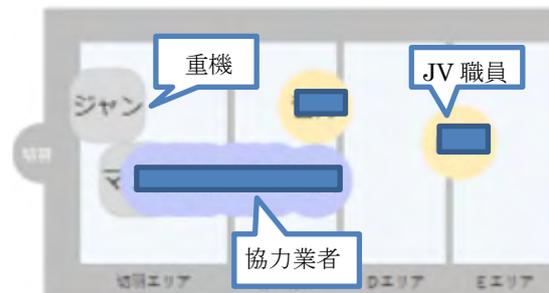


図-6 見える化マッピング



写真-3 防爆カーテン及び警告照明システム

位置情報管理システムで侵入者を検知すると、アラート信号を受信して赤色 LED 照明が点灯し、大音量スピーカーでアラートを発することで、作業中のトンネル坑内でも確実に危険を認識することができる（写真-7）。

本システムは発報の原因となった侵入者が、切羽エリア外に出るまで発報を停止できないプログラムになっており、侵入者が完全に退場するまで重機作業を再開できない。

#### 4. 3 ホイールローダー制御システム

重機オペレーターの降車検知はビーコンシステムで実施した。着座スイッチなど物理的に運転席への着座・離席を検知する方法もあるが、作業員が重機の周囲の状況を確認するために腰を浮かせて前のめりになっただけでも降車と検知し、発報してしまう可能性があるため、ビーコンシステムを採用した。

本システムは、ビーコンの受信機を重機の運転席内に設置し、重機オペレーターの発信機の電波強度からオペレーターの降車を検知する。降車を検知すると、重機に設置した警告灯が点灯（写真-4）し、周囲にオペレーターの降車を知らせる。

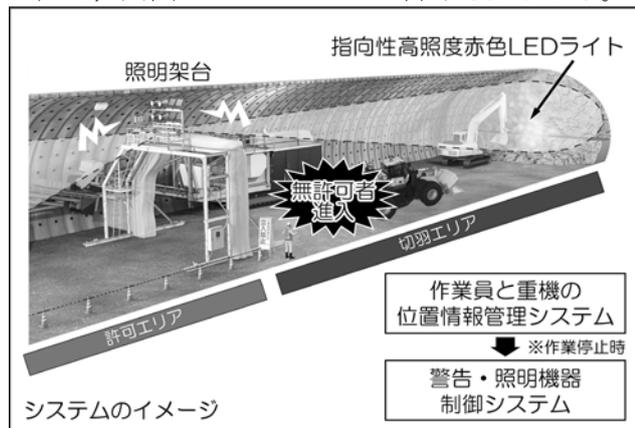


図-7 警告照明システム

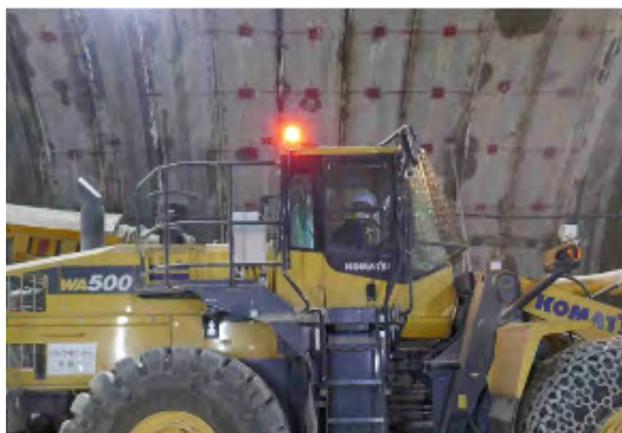


写真-4 警告灯点灯状況

また、車体の前後には、重機の前後進に合わせて点灯する指向性赤色 LED ライトを設置した（写真-5）。これにより騒音の大きなトンネル坑内においても、視覚的に重機の動きを察知することができる。

#### 4. 4 バックホウ制御システム

ホイールローダー制御システムと同様のシステムをバックホウにも搭載し、重機オペレーターの降車をビーコンシステムにより検知する。降車を検知すると、警告灯が点灯するとともに、シーケンシャルライトが赤色で点滅し、周囲に異常を知らせる（写真-6）。重機の前後進に合わせてシーケンシャルライトが外側から内側に向けて青く発光（写真-7）し、周囲に重機の移動を知らせる。



写真-5 指向性赤色 LED ライト



写真-6 警告灯及びシーケンシャルライト点灯



写真-7 シーケンシャルライト（走行時）

#### 4. 5 AI 搭載人検知カメラシステム

位置情報管理システムでは、発信機を一人（一台）につき2個設置し、受信機も複数台設置することでロバスト性を確保しているが、機器の故障などにより侵入を検知できない場合、侵入した人に重機オペレーターが気付かず接触する可能性がある。そこで、オペレーターの死角となる重機後方と左右にAIを搭載した人検知カメラを設置した（写真-8、写真-9）。本システムは、カメラに内蔵されたAIによって、図-8に示す検知エリアへの人や車両、重機の進入を検知し、運転席に設置したモニターの発光とブザーによりアラートを発する。

### 5 導入プロセスでの課題と解決策

#### 5. 1 現場運用体制の確立

新しいシステムを現場に導入するには、実際にシステムを活用する現場職員・作業員の理解を得ることが重要である。

解決策として、協調安全とは何か、システム構成、運用イメージ等について、アニメーション動画を積極活用した勉強会を複数回実施することで、システムへの理解を得ることができた（写真-10）。

導入後は、作業員に対して運用ルールや機器の使いしやすさ、要望などのヒアリングを1カ月間毎日実施することで、ソフト・ハード両面で様々な要望を得ることができた。それらを加味した運用ルール・機器の設置を行うことで、現場の理解を得ることができ、継続運用が可能となった。



写真-8 人検知カメラ



写真-9 モニター

カメラ設置位置

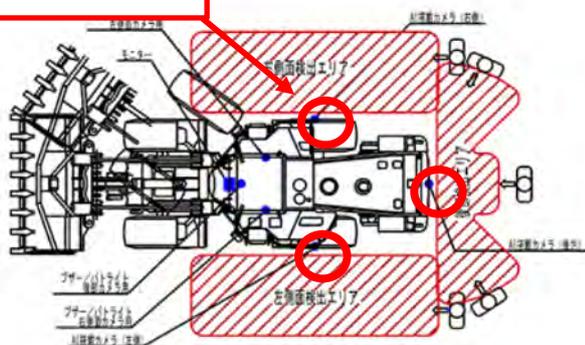


図-8 AI 搭載カメラの検知エリア

#### 5. 2 位置測位精度向上

トンネル坑内は円筒形の空間が直線または緩やかな線形で連続しているため、電波が遠方まで到達しやすい環境である。一方で支保工や重機、ベルトコンベヤーなどの鋼材が存在するため、電波が乱反射しやすい環境でもある。試験運用中には、切羽エリア外で作業していたにもかかわらず、切羽エリアに侵入したと誤検知し、警告照明が発報する誤作動が多発した。これは、越境ライン付近が、クラッシャーやテールピース台車により電波の反射状況が特に複雑な上、ホイールローダーがクラッシャーにずりを投入する際に、写真-11に示すように照明架台とホイールローダーの車体により、切羽方向の見通しが悪くなり、Bluetooth信号の乱反射が増長されるためだと推測された。そこで、Bluetooth信号の受信回数と電波強度の関係性を見直すとともに、越境を検知するための指向性受信機の設置位置を50cm単位で移動して検証を繰り返した結果、誤検知が発生しなくなった。



写真-10 勉強会



写真-11 誤検知多発状況

## 6 導入効果

本システムの導入により、下記3点の効果が得られた。

### 6.1 接触災害リスクの見える化

位置情報管理システムと警告照明システムの導入により坑夫以外の侵入を常に監視し、迅速かつ正確にリスク伝達が可能となった。これまでの人による監視では、常時監視が難しいうえ、現場職員や切羽監視責任者が作業を停止させたい場合、レーザーポインターやジェスチャーなどで停止指示を出しており、重機に接近する必要がある上、全重機を停止させるまで時間を要していた。警告照明システムの導入により、重機オペレーターからも「重機を停止させるか迷うことがなくなった」との評価を得た。

### 6.2 作業員の主体的な安全行動

これまではルール違反を犯しても自らが警告を受けるだけであった。しかし、本システムの導入により、切羽エリアに侵入すると警告照明システムが作動するため、掘削作業全体に支障をきたす。そのため、オペレーター以外の作業員はざり出し中の切羽エリアに近づかなくなった。また、重機オペレーター側は、侵入者によって作業が止められないように、自ら他の作業員に注意を行うようになった。切羽エリア近傍での安全通路に関する注意回数について調査したところ、導入当初は3回/一方であったが、システムの定着と共に減少する結果が得られた(図-9)。

### 6.3 作業効率化に向けた自主的な取り組み

補助工法で施工した鏡ボルトの鋼材などは、ざり出し中に重機から降車して回収する必要がある。本システムの導入により、降車して作業する場合には警告照明システムを意図的に発報させ周りの重機を停止させるルールとした。図-10に示すよう

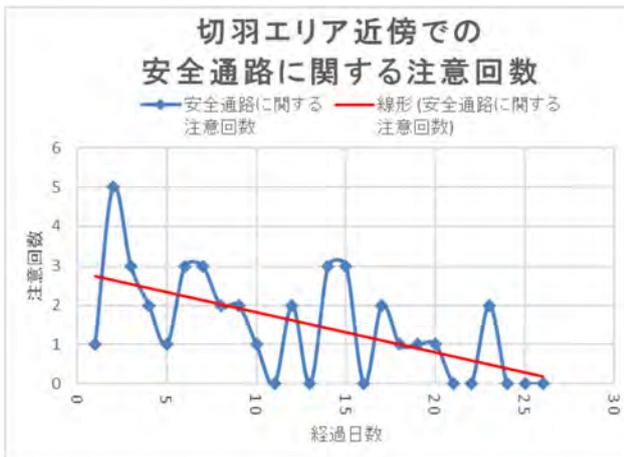


図-9 安全通路に関する注意回数

に、導入当初は平均で2.6回/一方の発報があったが、統計開始後26日目には1.9回/一方に減少した。現場職員から作業員に対し、発報回数や停止時間などについて指示は行っておらず、作業員が自主的に停止回数を減らすための取り組みを行っていると考えられる。

これらの結果から、ざり出し作業時の人と重機の接触災害リスクの低減という本来の目的に加え、安全装置の導入により一時的に生産性が低下するが、システムの浸透が進むにつれて作業員の自主的な行動変化によって生産性が回復することが確認できた。

## 7 今後の開発

今回実施した熊本57号滝室坂トンネル西新設(一期)工事での本システムの現場実装により以下の要望・課題が明確になった。

### 7.1 切羽エリアへの入場権限の付与について

去年度導入した位置検知管理システムでは、重機・クラッシャーオペレーターが日替わりで交代し、入場を許可する人の限定が難しく、掘削作業に携わる坑夫は入場可能、それ以外の後向き班や現場職員は不可で区別をしていた。今後は、重機・クラッシャーオペレーターを特定し、対象となる人にだけ都度入場許可を付与するシステム(図-11)を構築することで、更なるリスク低減を目指す。

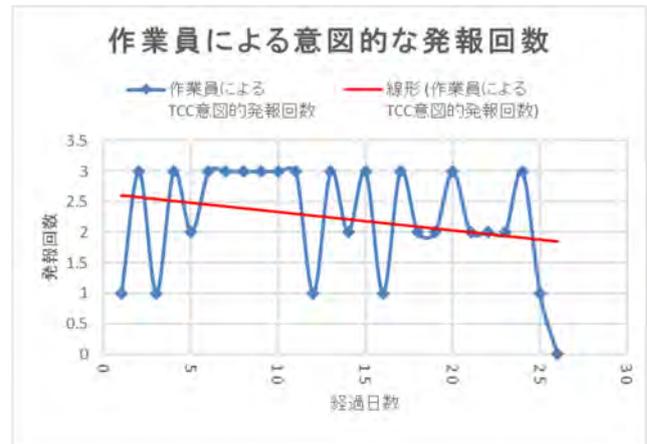


図-10 作業員による意図的な発報回数



図-11 オペレーターへの入場許可



図-12 システムの連動

## 7. 2 システムの連動

現システムでは、重機制御システムと警告照明システムは連動しておらず、重機オペレーターの降車を検知すると、重機に取り付けた警告灯が点灯する。しかし、警告照明システムと比較すると視認性に劣り、他の重機オペレーターが気付かない可能性がある。そこで、現場に整備された無線LANネットワークを経由して各システムの制御盤同士が情報を共有できるようにアンテナの増設を行い、重機オペレーターの降車を検知すると警告照明システムが自動で作動するシステムへの改造に取り組む(図-12)。

## 7. 3 位置測位、降車検知精度の向上

切羽エリアへの入場権限の付与や、システムの連動を実施する場合、重機に乗車しているオペレーターの未検知や判定ミス、降車誤検知は、警告照明システムの誤発報につながる。警告の誤発報が頻発すると、作業員からのシステムに対する信頼度の低下を招き、本システムの継続利用にとって大きな障害となる。先に述べた通り、ビーコンシステムは10m程度の測位誤差を持っており、詳細な位置を把握するためには受信機を検知したい場所ごとに設置する必要があり、費用とメンテナンスの面で増設は難しい。そこで、着座スイッチや通行検知ゲートなど、物理的に人を検知可能な機器とビーコンシステムを組み合わせることで、検知精度を確保できないか検討を行う。

## 7. 4 AI搭載カメラシステムの高度化

本システムで採用したAI搭載人検知カメラは、単眼カメラを採用しており非常に低コストではあるが、距離推定が行えない。一方でステレオカメラを用いたAI搭載人検知カメラはカメラと人の距離を推定することができるが、非常に高価であり、現場のすべての重機に搭載するにはコストがかかる。そこで、単眼カメラで人との距離推定が可能なカメラシステムを開発し、現場実装に向けて現場検証をすすめている<sup>2)</sup>(写真-12)。

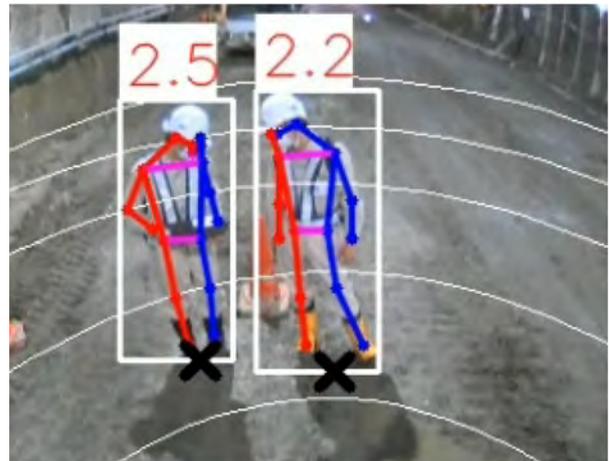


写真-12 単眼カメラにより距離推定

## 8 おわりに

本システムについて、ビーコンシステムとカメラによる現場状況の取得、Bluetooth信号や現場無線LANネットワークによる情報の運搬、クラウドサーバーやAIでのデータの解析、警告照明システムによる情報のアウトプットを1つのシステムとして現場に導入したことは大きな成果といえる。また、協調安全の考え方は建設現場ではまだ普及していないものであったが、開発部署と作業所、協力業者が協議を重ねて運用方法などの検討や運用責任者の選任、運用マニュアルの整備を行った結果、safety2.0に適合する技術<sup>3)</sup>としてセーフティーグローバル推進機構<sup>4)</sup>が認定する「safety2.0」の適合認証を取得することができた。ICT, IoT, AI, 無線通信技術の発展は目覚ましく、将来的にはオートメーション化によって人と機械を時間的・空間的に分離することで安全を確保することが望ましい。しかし、建設現場におけるフルオート化にはまだ壁が多い。そこで、人と重機の協調安全「Safety2.0」に基づいた安全管理手法と技術を広く普及展開する必要がある。今後は、本システムの改良に加えて、トンネル以外の工種への適応に向けて取り組んでいく。

### 参考文献

- 1) 向殿政男:安全学からみた建設業に関する安全について, No. 777, pp9-14, 2019.11.
- 2) 谷口俊一・平原大暉・園田亜斗夢・岡澤岳・奥田悠太・鳥海不二夫:建設機械による災害防止のための対人距離推定手法の研究
- 3) 有山正彦:safety2.0(協調安全)の社会実装化に向けて, 安全と健康, 2019.8.
- 4) セーフティーグローバル推進機構  
労働災害防止の観点から協調安全「safety2.0」を推奨社会への普及を目的に「safety2.0適合審査登録制度」を運用している。

## 23. ミリ波レーダと可視カメラを組み合わせた 周辺監視センサーの開発と評価結果

### ミリ波とカメラの融合による人検知性能の向上

三菱電機株式会社  
株式会社熊谷組  
株式会社熊谷組

○ 八十岡 興祐  
畑本 浩伸  
飛鳥馬 翼

#### 1. はじめに

建設業界では無人運転化、障害物検知のためのセンサーの導入を推進中であり、油圧ショベルの運転席後方などの死角領域については監視センサーによる安全性向上が求められている。

現在、有力な監視センサーとしてカメラが採用されているが人がしゃがんで認知不可能な状態や砂ぼこりなどの視界不良の環境により誤検知が発生している。

自動車の安全運転支援システムではカメラのほかにミリ波レーダが使用されている。当社では2003年より継続しているミリ波レーダの量産実績を活かしつつ、そのミリ波技術を応用したレーダを開発中である。また、防衛・宇宙で培った最新レーダ技術や画像認識技術などについても研究開発を実施している。

今回、建設フィールドにおいてミリ波レーダの評価試験を実施するとともに、ミリ波レーダとカメラの両方のセンサーを使用した場合の検知性能についても検証したので評価結果について述べる。

#### 2. ミリ波レーダ

##### 2.1 モジュール構成

ミリ波レーダモジュールはアンテナ、送受信回路及び、送受信回路の制御と信号処理を扱うMCU (Micro Control Unit) で構成される。図1にミリ波レーダモジュールのブロック図を示す。

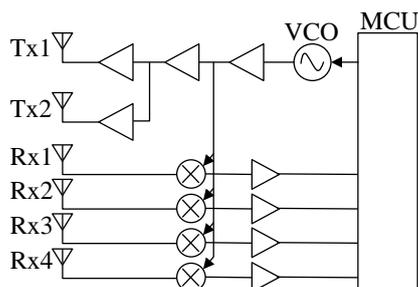


図-1 ミリ波レーダモジュールのブロック図

送受信回路のVCO (Voltage Controlled Oscillator) から発振された77GHzの高周波信号はアンテナから送信され、ターゲットにて反射した信号をアンテナで受信し信号処理部のMCUへ送られる。

##### 2.2 原理

ミリ波レーダの原理について説明する。図2に示すようにミリ波レーダの送信周波数は高速チャープで変調している。送信波と受信波の差分をFFT (Fast Fourier Transform) 演算することにより、ビート周波数が得られる。ビート周波数は距離に相関しているのでビート周波数よりターゲットまでの距離が算出される。FFT 演算では位相情報も一緒に得られ、この位相情報より速度ドップラが求められるのでターゲットとの相対速度も算出される。複数の反射物環境下でも短時間に正確な計測が可能である。

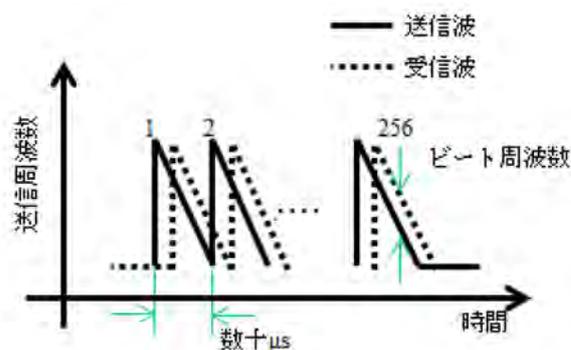


図-2 ミリ波レーダの変調波形

##### 2.3 ミリ波レーダの特長

###### (1) 各センサーとの比較

表1にミリ波とカメラとLiDARの比較を示す。ミリ波の分解能性能は他センサーよりも劣るが、速度の即時検出性能が優れている。電波の直進性が強いので遠くまでの距離検出が可能という点も優れており250m先の自動車を検出する評価結果が

得られている。また、降雨や降雪時の悪天候下や砂ぼこりの視界不良の環境でも検出が可能という耐環境性に優れている。また、トンネル出入り口等の照度が急激に変化する環境や夜間でも明るさに左右されずターゲットを検出することが可能である。

表 1 各センサの特長

	ミリ波	カメラ	LiDAR
測速度（自動追従）	◎	○	○
測距離	◎	○	◎
分解能（物体認識）	×	◎	○
耐環境（降雨）	◎	○	○
耐環境（夜間）	◎	○	◎
サイズ	◎	○	×
コスト	○	○	×

### (2) ミリ波レーダによる人識別方法

ミリ波レーダはターゲットまでの距離を正確に測定できるだけでなく、同時に相対速度を検出することも可能である。この相対速度情報を利用することにより、周囲の静止物と比較して人を識別することが可能である。

図 3 に人が 5m の位置で手を動かしている時の評価結果を示す。

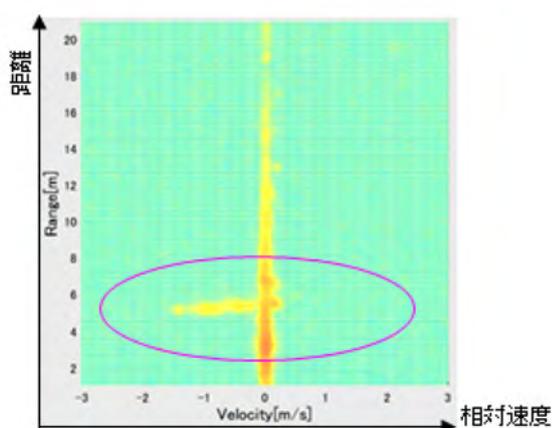


図-3 相対速度情報による人の検出

グラフは相対速度と距離を示し、ミリ波信号の反射強度が高い物体は赤や黄色の表示となっている。周囲の壁や地面などは静止物であるので相対速度 0m/s における反射強度は高くなり赤や黄色となる。グラフにおいて距離 5m の位置に相対速度がある物体があることがわかる。しかもこの物体は相対速度が 0~1.5m/s まで速度方向に広がりを持っている。もしこの物体が車であれば相対速度は広がることなく 2m/s などの 1 か所だけが検出される。このように速度方向に広がりを持っている理由として、人が歩く時は進行方向の速度成分

以外に手や足の動きによる異なる速度成分が数多く発生するためである。従って速度方向に広がりを持っている物体は人である可能性が高いので、人を識別して検知性能の向上に有効となる。

## 3. ミリ波レーダとカメラのフュージョン

### 3.1 フュージョン説明

建機周囲の人や障害物を検知する有力な監視センサとしてカメラが使用されており分解能が優れているため物体認識が容易である。しかし降雨や砂ぼこりによる視界不良や人が後ろ向きになっている場合などではカメラだけでは認識困難な状態となるので誤検知する場合がある。

一方、ミリ波レーダは耐環境性があるだけでなく、人の動きによる相対速度の発生によって人を認識することが可能である。

そこで、これら両者の特長を利用したミリ波レーダとカメラのフュージョン処理を実施した。これにより人の検出性能向上が可能となる結果が得られた。

### 3.2 構成

図 4 にカメラとミリ波レーダをフュージョン処理するシステムブロック図を示す。

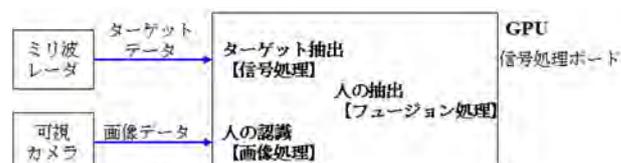


図-4 カメラとミリ波レーダを用いたシステムブロック図

カメラからは画像データが転送されてGPUの画像処理により人の認識を実施する。この時、人物の深層学習により人の様々な姿勢や角度などの画像においても人を識別可能な処理を実施する。

ミリ波レーダからはターゲットデータが出力され 2 項で述べたように信号処理により人や障害物などの複数ターゲットデータが抽出される。ターゲット情報としては距離・方位・相対速度・受信信号強度が得られる。

それぞれの処理結果から得られたデータは同期を取って、同時刻におけるデータについて照合している。カメラの画像情報から人の方位を算出し、ミリ波レーダのターゲット情報の方位と照合させたフュージョン処理をすることにより人の検出性が向上する。

### 3.3 フィールド試験概要

キャタピラー製油圧ショベル（320E）の後上部

にカメラとミリ波レーダを搭載し、周辺監視センサとして建機周辺における人などの検知性能を評価することを目的としてフィールド試験を実施した。図5に示すように搭載場所は高さ2.5m、斜め下の方向にカメラとミリ波を向けた。試験内容は人が直立状態、人が接近してくる状況、建機が旋回している状態について実施した。図6と図7に構成図を示す。



図-5 搭載状況



図-6 人の直立または接近の構成図



図-7 建機旋回の構成図

### 3.4 フィールド試験結果

#### (1) 人の直立状態

図6に示すように建機から5m離れた場所に人が直立した状態で評価実施した。図8にフュージョン処理した結果を示す。緑枠はミリ波とカメラの両方とも検知していることを示す。緑枠の範囲は人の体格範囲のみに絞れている。また、8mの位置には金属製の反射物標(コーナリフレクタ=図8中の左青枠内)を置いている。反射物標は人ではないのでカメラでは人として検知しないが、ミリ波レーダでは障害物があると検知することが可能である。図8では青枠となっており、これはミリ波

のみが検知していることを示す。

図8の下半分はバードビューを示しており、上空から見た状態である。中心がミリ波レーダとカメラの周辺監視センサを設置した位置であり、5m前方の位置に緑の四角(人を検知した場所)、8m前方やや左側の位置に青い四角(反射物標を検知した場所)を方位とともに示す。

図8では人は直立しているがしゃがんだ状態でもカメラとミリ波の両方で検知している結果が得られている。

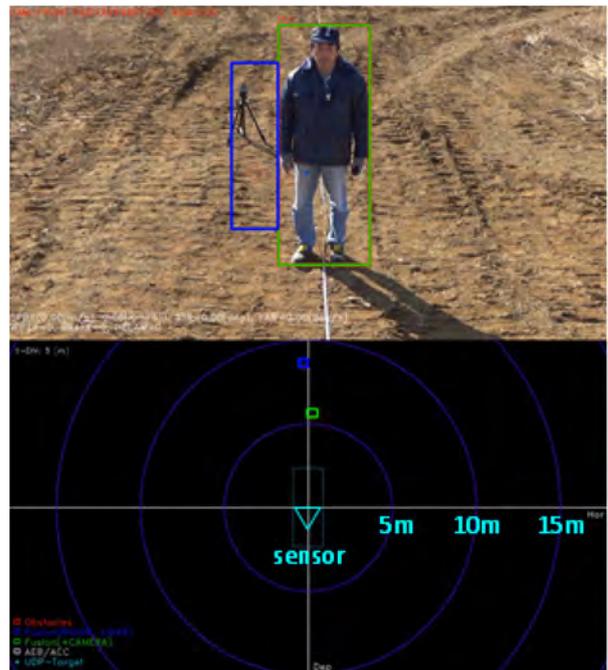


図-8 人の直立状態

#### (2) 人の接近

図6に示すように建機から15m離れた場所から建機に向かって人が歩いてくる評価を実施した。図9にフュージョン処理した結果を示す。接近する人を連続的にカメラとミリ波で検知していることを確認した。検知可能距離はミリ波の場合は～12m、カメラは～10mであった。ミリ波は地面等に対しても反射してターゲットとして検知をする。図10はミリ波レーダが検出した反射物を全てプロットしたものである。ところで地面等の反射物標の速度ドップラは0m/sであるが、接近する人は速度ドップラが発生する。この速度ドップラの違いにより地面と人を分離することは可能である。図11はミリ波レーダが検出した反射物について速度ドップラのある反射物のみをプロットしたものである。この結果より、ミリ波だけでも人が接近していることを認識可能であり、カメラの画像情報と合わせることにより更に人の検出精度は向上する。



図-9 人の接近



図-12 建機の旋回

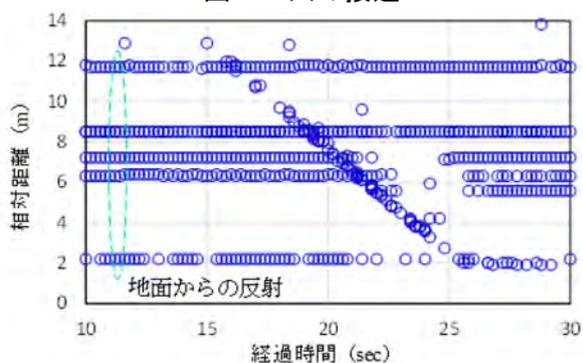


図-10 検出点を全プロット  
(ミリ波レーダのみの検出結果)

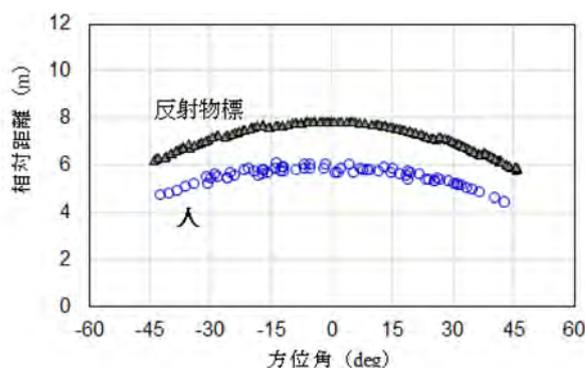


図-13 旋回時における検出結果  
(ミリ波レーダのみの検出結果)

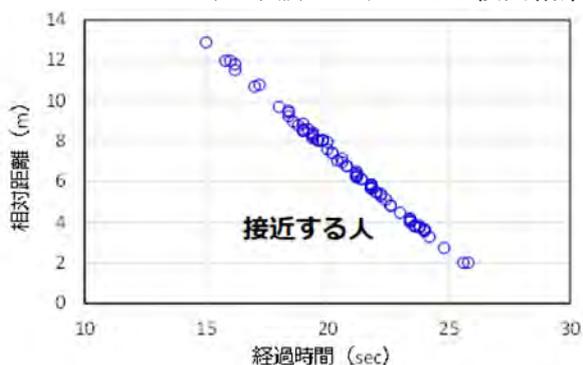


図-11 相対速度のある反射物のみを抽出  
(ミリ波レーダのみの検出結果)

### (3) 建機の旋回

図 7 に示すように建機を旋回させた場合の周囲の検知状況について評価を実施した。図 12 にフュージョン処理した結果を示す。人を建機から 6m 位置で直立, 反射物標を 8m の位置に置いた状態において, 人はミリ波レーダとカメラで検知していることを確認した。反射物標についてはミリ波で検知していることを確認した。図 13 は旋回時における検出結果をミリ波レーダのみについてプロットしたものである。ミリ波レーダだけでも人や反射物標を検知することが可能であり, カメラ画像情報と合わせることでより更に検出精度は向上する。

### 3.5 追加検討

#### (1) ミリ波レーダ検出性の向上方法

ミリ波レーダは特に金属物の反射について優れており, 自動車の検出は人に比べて容易である。ターゲットが人の場合には検知距離は 20m 程度であれば可能だが, ヘルメットや反射ベストにアルミテープを貼ることでミリ波による検出性はさらに向上する。

#### (2) 人以外の障害物検知

本検討では, 人の検知についてカメラとミリ波のフュージョン処理にて実施した。建設業界では人および障害物との接触事故防止が求められており, 障害物としては三角コーンや大型ブロックなどが挙げられる。これらの物体についても学習させると原理的には検出は可能である。但し, 相当数の画像データが必要となり, 正解付け作業も必要となる。

### 4. むすび

未舗装路におけるフィールド試験場において, 建機にカメラとミリ波を搭載して, フュージョン処理による人の検知性能を述べた。今後は様々なシチュエーションにおける評価試験の実施や最適なアンテナ設計や搭載方法などの開発を実施していく計画である。

## 24. パーカッションドリル機を用いた

### 高圧噴射攪拌の斜施工機械の開発

三信建設工業株式会社 ○木田 匠紀

島野 嵐

萩原 耕太

大栗 雅明

鈴木 英文

#### 1. はじめに

都市土木における地盤改良工事は、地下には多くの埋設物があり地上部は道路や構造物があり、制約条件が厳しい場所で施工する必要がある。また、近年では深度 50 m を超える地下空間構築技術が向上したことにより、地盤改良工事でも硬質な洪積土層を対象とする事例が増えてきた。

一方、高圧噴射攪拌工法は小型なボーリングを使用して  $\phi 100\sim 200$  mm 程度の削孔径で施工を行うことから地下埋設物を避けた施工には有利であるが、大深度の施工では硬質地盤の削孔や、埋設物を避けた斜めボーリングの必要があり、この場合、作業能率や安全性が悪く、現場条件によっては適用が困難な場合がある。

我々はこれらを鑑み、硬質地盤で斜めボーリングを安全に施工できる高圧噴射攪拌工法の施工機械の開発を行った。

#### 2. 高圧噴射攪拌工法の概要

今回施工機の検討を行った V-JET 工法<sup>1)</sup>は、図-1 に示すように、硬化材に高い圧力を与えて得られる強力なエネルギーによって地盤を切削し、硬化材と土とを攪拌混合して円柱状の改良体を造成する地盤改良工法である。

V-JET 工法は従来の高圧噴射攪拌工法と異なり、先端の特殊噴射装置と硬化材の噴射量を使い分けることにより、改良径の異なる 4 つのタイプ (V0,V1,V2,V3) が用意されていて施工条件に合わせて 1.0~6.0m の幅の広い改良径の選択が可能である。これらのタイプ以外でも、現場の条件に対応する特殊仕様を設定し、試験施工等により有効な改良径を確認した上で施工仕様を設定することも可能である。

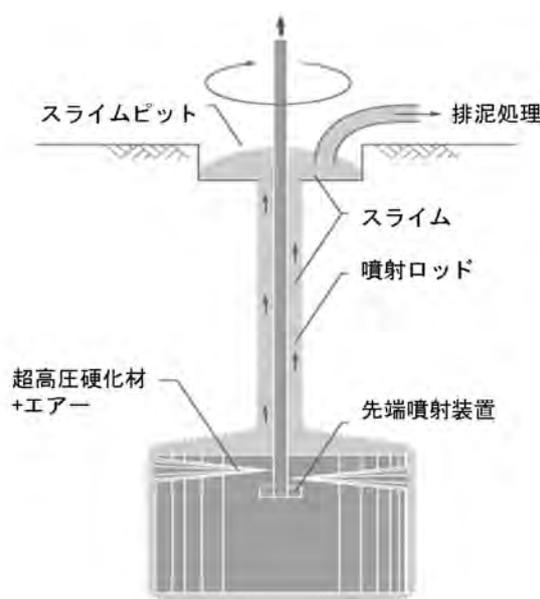


図-1 高圧噴射攪拌工法概念図

#### 3. 施工機械の概要

V-JET 工法における標準施工で使用する従来施工機は写真-1 に示す小型のボーリングマシンであり、改良体の配置計画において斜施工が必要となる場合には、重量物である削孔ケーシングや噴射ロッドの脱着時の作業員における安全性を考慮し、表-1 および図-2 に示すよう鉛直に対し、小・中口径改良で  $10^\circ$ 、大口径改良で  $5^\circ$  の角度を限界角度として設定している<sup>2)</sup>。地盤強度に対しては N 値 200 程度の砂質土や砂礫土の削孔が可能であるが硬質地盤の層が厚い場合、削孔時間が長くなるためロータリーパーカッションドリルや大口径ボーリング等を削孔機として使用する場合がある。これらより、採用実績のあるロータリーパーカッションドリル式削孔機をベースとした施工機の開発と、削孔ケーシングや噴射ロッドの安全な脱着

手法の確立をすれば、従来施工機より作業効率や安全性が向上すると考えた。斜めボーリングが可能な高圧噴射攪拌工法の施工機を開発することが出来ると考えた。



写真-1 従来施工機

表-1 従来機斜施工適用可能角度

施工タイプ	改良径	施工設備	限界角度
V0	2.0 m	小	10°
V1	3.0 m	中	10°
V2	4.0 m	中	10°
V3	6.0 m	大	5°

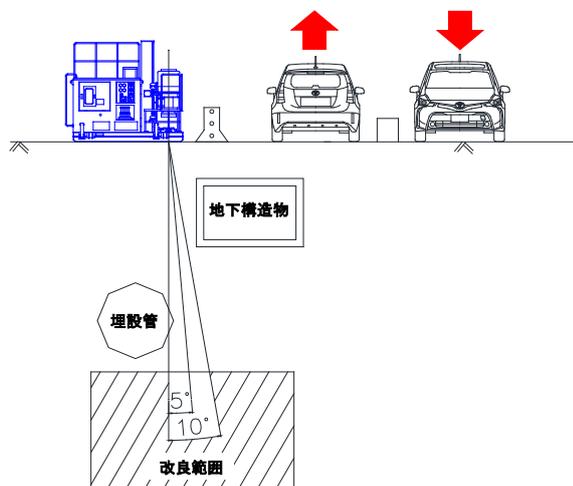


図-2 斜施工概要図

#### 4. ロータリーパーカッションドリルの改造

ロータリーパーカッションドリル施工機を高圧噴射攪拌の造成に使用するに当たり、「二重管スイベルの製作」および「自動ステップ装置の搭載」を行った。「二重管スイベルの製作」は、従来の施工機の回転動力がスイベルの下部であるのに対しロータリーパーカッションドリル施工機の回転動力がスイベルの上部にあることから構造の検討・新規製作を行った。「自動ステップ装置の搭載」につ

いては、従来施工機に搭載の自動ステップ装置を取り付け、任意の時間・ステップ距離の設定を可能とした。開発したロータリーパーカッションドリル（以下、開発施工機とする）の全景を写真-2に示す。なお、従来使用している噴射ロッド等の施工ツールのせん断力は、開発施工機の最大トルク値以上であることを確認し標準の施工ツールを使用することとした。



写真-2 開発施工機の全景

#### 5. ツール脱着時のマニピュレータ導入検討

削孔ケーシングや噴射ロッドおよび先端噴射装置などの施工ツールは重量物であり、最大で230 kgである。これらの施工ツールの脱着時には移動式クレーンを用いた吊り作業となるが、斜施工の場合、鉛直の施工と比較し手指の挟まれや吊り荷の振れによる挟まれ等のリスクが高い。これらのリスクを回避し作業員の安全性を向上させるため、海外では既に実現場で用いられているマニピュレータ（機械式ロッドチェンジャー）の導入検討を行った。マニピュレータは表-2に示す機械仕様のもを採用し、バックホウ装着型およびクレーン装着型の2タイプを用い施工配置・作業性・コストを指標に実機を用い比較検討した。それぞれのマニピュレータの全景を写真-3および写真-4に示す。また、上述の指標を基にした比較試験結果を以下に示す。

**施工配置**：バックホウ装着型が施工機の横に配置する必要が有るのに対しクレーン装着型は配置に自由度がある。

**作業性**：鉛直施工時には差異は無いが、斜施工時にバックホウ装着型が斜めに取り付けられるのに対し、クレーン装着型は介錯ロープ等を用い作業員の補助が必要である。

**コスト**：バックホウ装着型の方が作業員の数も減るためクレーン装着型と比較し安価である。

以上より総合的に判断しバックホウ装着型マニピュレータを採用することとした。

表-2 マニピュレータ機械仕様

項目	諸元
寸法L×W×H	1.75 m×1.1 m×1.3 m
重量	375kg
クランプ幅	60~225 mm
最大クランプ重量	1t (0.5t/箇所×2箇所)
旋回角度	0~90°
回転モーメント	10kN



写真-3 バックホウ装着型マニピュレータ



写真-4 クレーン装着型マニピュレータ

## 6. 実現場での適用確認

実現場において開発施工機を用い安全性・施工性・削孔精度の確認を行った。

### 6. 1. 安全性の確認

開発施工機を用いて安全性の確認を行った。開

発施工機ではバックホウ型マニピュレータを用いるため、機械主体の施工となり従来施工で課題となった手指の挟まれや吊り荷の振れによる挟まれ等のリスクの危険がなく、安全性が向上した。

### 6. 2. 施工性の確認

従来施工機と開発施工機を用いて施工性の確認を行った。表-3に施工性の比較結果について示す。限界角度は従来施工機が5° に対して開発施工機は22.4° であった。

また、平均削孔時間は主な対象土細砂および玉石混じり砂礫(50<N≤150)で、従来施工機が14 min/mに対して、開発施工機は5 min/mであり約3倍に向上した。

さらに、従来施工機では、作業員の数は4名(従来施工機のオペレータ1名、クレーンのオペレータ1名、介錯ロープや玉掛のため手元2名)であったが、開発施工機では、作業員の数は3名(開発施工機のオペレータ1名、マニピュレータ1名、手元1名)であり省人化を図ることができた。

表-3 施工性の比較

項目	従来施工機	開発施工機
限界角度	5°	22.4°
平均削孔時間	14 min/m	5 min/m
作業員数	4名	3名

### 6. 3. 削孔精度の確認

開発施工機を用いて削孔精度の確認を行った。削孔精度の確認はジャイロを用いた孔曲がり計測装置(多摩川精機製:TUG-NAVI)を用い削孔管路位置の確認を行った。削孔精度は1/250を目標値として実施した。

#### 6. 3. 1 孔曲がり計測装置の概要

管路計測装置の概要を図-3に示す。

ジャイロセンサが設置されたセンサプローブにより、造成杭の削孔や改良径確認技術の計測管などの対象管の管路位置(孔曲がり)を測定することが可能である。測定方法は以下の通りである。

- (1) センサプローブを対象管の上端に設置し、x軸、y軸、z軸の基準点の設定を行う。
- (2) 所定の深度(削孔完了深度)までセンサプローブを挿入する。
- (3) センサプローブを巻取り装置で引上げながら、センサプローブに内蔵されたジャイロセンサにて傾きを測定する。

また、出力データは、事前に設定した平面位置のx軸、y軸および深度のz軸で計測用PCに表示され、各深度での管路位置(孔曲がり)が出力される。

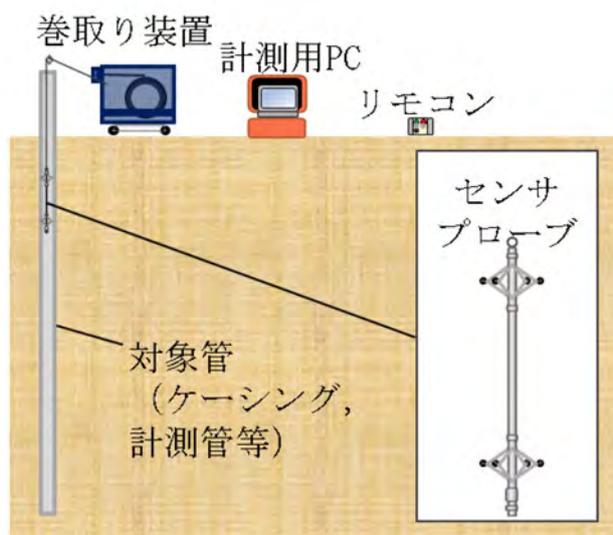


図-3 管路計測装置の概要

### 6. 3. 2. 計測結果

削孔精度の計測結果は目標値1/250に対して、1/100~1/2208の範囲であり平均値として1/521の精度であった。計測結果例を図-4に示す。この値はロータリーパーカッションドリルの削孔精度1/100<sup>3)</sup>、従来の高圧噴射施工機の削孔精度1/200~1/250<sup>4)</sup>と比較し遜色のない結果であった。また、全体の施工本数52本に対して20%程度が削孔精度の目標値1/250を満たさなかったが、これらを含む全施工本数について3DCADを用いて削孔管路位置を確認し、改良目的を満たせるか(未改良部が無い)を確認後に施工を行った。

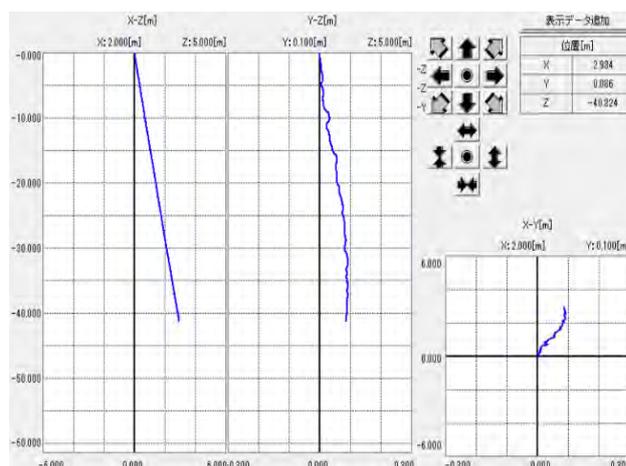


図-4 削孔精度計測事例

## 7. まとめ

ロータリーパーカッションドリル機を改造し、硬質地盤で斜めボーリングが可能な高圧噴射攪拌工法の施工機械の開発をした。バックハウ装着型のマニピュレータを用いることにより施工ツール脱着時における安全性の向上および作業の効率化、省人化を図ることができた。また、実現場で確認した削孔精度は、従来の高圧噴射施工機の削孔精度と比較し遜色のない結果であった。

### 参考文献

- 1) V-JET 協会：V-JET 工法技術・積算資料(第7版)，p. 1, 2019.
- 2) 前掲載 1), p. 11
- 3) (一社)日本アンカー協会：グラウンドアンカー設計施工マニュアル，p. 113, 2013.
- 4) 日本ジェットグラウト協会：JET GROUT Q&A 平成26年1月.

# 25. 立坑掘削土揚重の改善に向けたローラ付き底開きベッセル および円形架台の開発と使用実績

## 島根原子力発電所 2号機地下連絡ダクト設置工事に係る作業立坑掘削工事

鹿島建設株式会社 東原 秀明  
鹿島建設株式会社 ○安彦 柳一

### 1. はじめに

本工事は中国電力株式会社島根原子力発電所構内において、東西 2 か所の立坑とそれらを繋ぐトンネルである地下連絡ダクトを構築するもので、トンネルの坑口となる作業立坑を先行して掘削した。施工位置を図-1 に示す。

従来の立坑掘削揚土設備としては「底開きベッセル」と「矩形架台」の組合せが一般的であるが、人の介錯が必要で施工性が悪い。そこで「ローラ付き底開きベッセル」および「円形架台」を開発し、揚土作業における安全性向上と効率化を目指した。

開発にあたっては、事前に想定される不具合を洗い出し対策を施したので、施工に際しては大きなトラブルもなく円滑に作業することができ、安全性と施工性の大幅な向上を図ることができた。

本稿では開発の経緯、設備の特徴、開発時の検討内容、使用実績、不具合と対策等について報告する。



図-1 施工位置

### 2. 工事概要

#### 2.1 全体工事概要

工事名：島根原子力発電所 2号機地下連絡ダクト  
設置工事に係る作業立坑掘削工事

発注者：中国電力株式会社

施工者：鹿島建設株式会社

場 所：島根県松江市鹿島町片匂

工 期：2018.4.27～2019.9.30

立坑平面を図-2、立坑断面を図-3、施工数量を表-1 にそれぞれ示す。

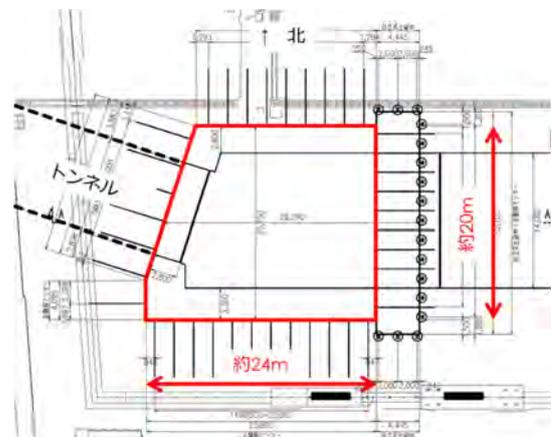


図-2 立坑平面

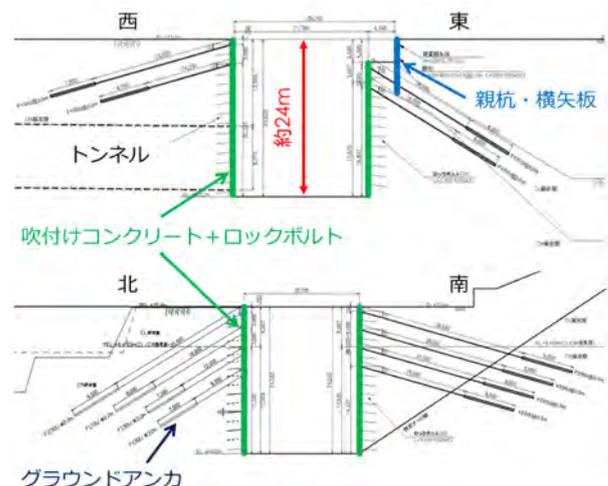


図-3 立坑断面

表-1 施工数量

工 種	数 量	単 位
掘 削	11,005	m <sup>3</sup>
親 杭	17	本
吹付けコンクリート	1,820	m <sup>3</sup>
ロックボルト	734	本
グラウンドアンカ	112	本

## 2.2 仮設配置・施工条件

所定のヤード条件から、図-4に示すように立坑南側に200tクローラークレーン、立坑東側にずり仮置き場を配置し、円形架台およびローラ付き底開きベッセルにて掘削ずりの揚重および放出を行った。立坑の施工方法として、立坑内を南北半分ずつに区切り、南北各エリアにて掘削工およびグラウンドアンカ工を交互に並行して行う方法を取った。従って立坑内の重機配置やずり積込み場所は施工状況に応じて日々変化したため、揚土作業におけるベッセルの揚重巡回ルートについては、ベッセル直下に重機が入らないルートを都度選択する必要があった。また立坑外においても、他業者が本工事ヤード内にて作業を行うことが度々あったため、揚土作業におけるクレーンの巡回方向は固定することができず、立坑内外の作業状況や重機配置によって日毎に決定する必要があった。

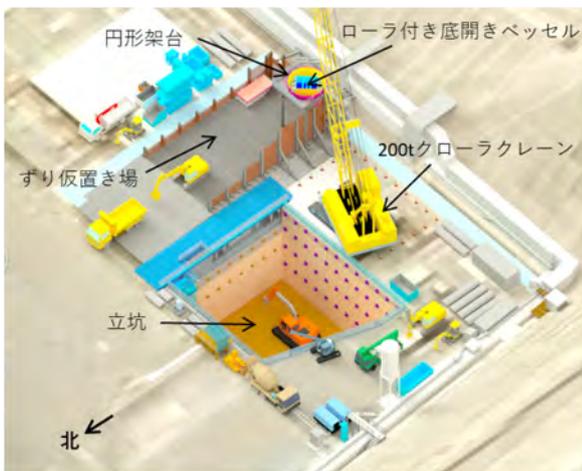


図-4 仮設配置

## 3. 揚土設備

### 3.1 開発の経緯

立坑掘削土の揚重計画において、表-2に示すように舟型、底開き型、転倒型の3種類のベッセルの比較検討を行った。必要ヤード広さを抑えられることや排土時の安全性を確保できること、手元作業員を削減できることから、本工事では底開き型ベッセルを選定した。従来の底開きベッセルは写真-1に示すようにベッセル本体を矩形架台の所定の位置に向きを合わせて接地させた後、クレーンの巻下げ操作を行うことで底のゲートが開く構造である。そのため人力での介錯または矩形架台に位置合わせ用の当て壁が必要である。人力での介錯は安全性に欠け、壁当てによる位置合わせでは若干の時間ロスが生じるという懸念があった。そこで揚土作業の安全性と効率性を向上させることを目的として、従来の底開きベッセルおよび矩形架台を改良した、ローラ付き底開きベッセルおよび円形架台を開発した。

表-2 ベッセル選定表

	舟型	底開き型	転倒型
①必要ヤード広さ	○	○	△
②任意箇所での排土	○	×	×
③排土時の安全性	×	○	○
④手元作業員の削減	×	○	○
⑤価格	○	△	△
総評	△	◎	△



写真-1 従来の底開きベッセルと矩形架台

### 3.2 設備の特徴

開発した揚土設備の概要を表-3に示す。円形架台は図-5に示すように間口の広いすり鉢状の構造とし、内側円周にベッセル受け部を設けた。ベッセルは図-6に示すように側面下部にローラを取り付け、ローラが円形架台のすり鉢面を転がりベッセル受け部に接地した後、クレーンの巻下げ操作を行うことでワイヤの緩みに連動して底のゲートが開く構造とした。これらにより排土時に人が介在せずに済むため安全性を確保することができる。上、ベッセルの細かい位置や向き合わせが不要となり、ベッセル本体が360度どの向きであってもスムーズに円形架台中央へ降下することが可能となることで作業性が向上すると考えた。

表-3 揚土設備

名称	仕様	重量
円形架台	上部径φ5,200、下部径φ4,250、全高2,850	5.5t
ローラ付き底開きベッセル	8㎡、全長4,250、全幅2,218、全高1,564	3.9t
吊治具	全長3,624、全幅650、全高981	0.8t

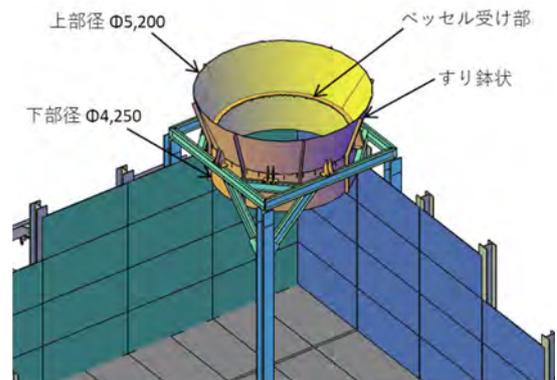


図-5 円形架台

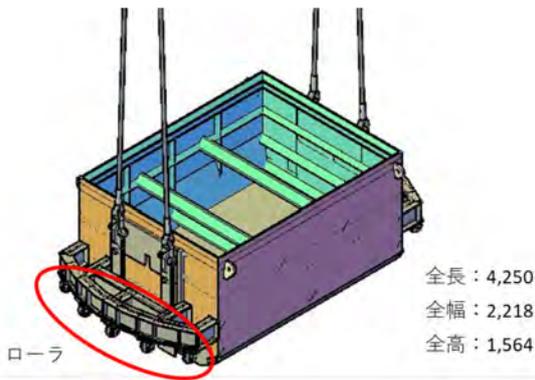


図-6 ローラ付き底開きベッセル

### 3.3 開発時の検討内容

#### (1) ベッセル容量

ベッセル容量の選定においては、下記事項について検討を行った。

- ① 揚土サイクルタイム
- ② クレーン最大作業半径
- ③ 立坑内重機配置
- ④ 機械掘削能力
- ⑤ 製作費用

計画時点では、1回の揚土サイクルにおけるずり積込み後のクレーン操作にかかる時間はベッセル容量に関係なくクレーンの性能によって一定として考えた。揚土1回あたりではベッセル容量が大きいほど積込みに時間がかかりサイクルタイムは遅くなるが、揚土作業全体での総揚土量は定量であり、総積込み時間は一定であるため、ベッセル容量が大きいほど揚土回数が減りサイクルタイムは向上すると考えた。しかしクレーン最大作業半径や立坑内重機配置（ベッセル定置可能範囲）を考慮すると、容量が大きいほど作業性が悪くなることが懸念された(図-7参照)。そこで掘削能力(時間あたりのずり発生量)に主眼を置いて検討することとした。本工事では掘削方法として機械掘削を計画していたため、機械掘削能力を考慮し上記①～⑤を総合的に検討した結果、ベッセル容量は8m<sup>3</sup>が妥当と判断した。

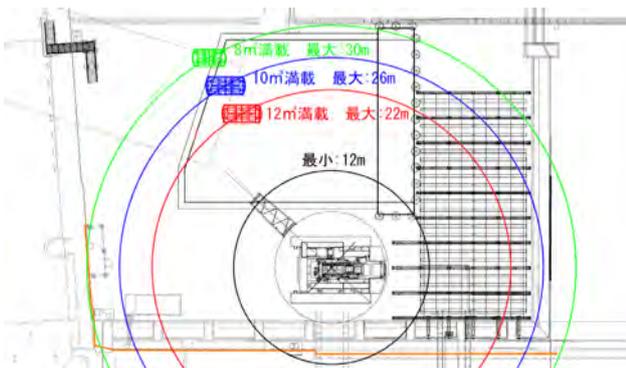


図-7 ベッセル容量によるクレーン最大作業半径

#### (2) ベッセル吊治具ワイヤ長さ

揚土サイクルタイムの向上と安全性を考慮し、ずり積込み時のベッセルの玉外しおよび積込み後の玉掛け作業を無くすように計画した。吊治具上部ワイヤは2点吊りで吊り角度によるワイヤ強度低下を考慮し、吊り角度60度以内となるように長さを2.5mとした。吊治具下部ワイヤはバックホウによる積込み作業の支障とならないように長さを4mとした。吊治具の概要を図-8、ずり積込み状況を図-9にそれぞれ示す。

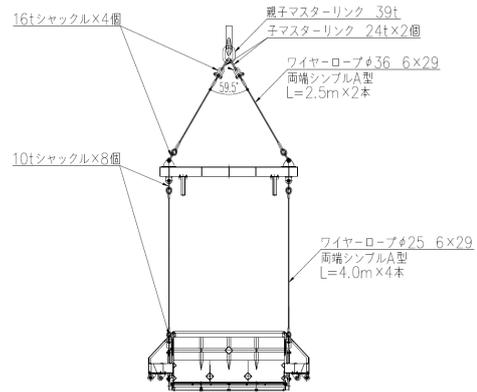


図-8 吊治具

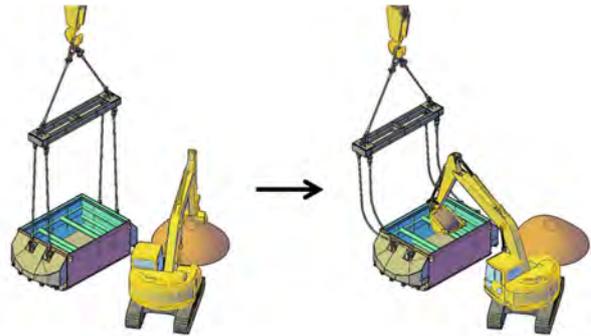


図-9 ずり積込み

#### (3) ベッセル損傷・変形・ずり堆積防止

ずり積込みによるベッセルの損傷や変形を防止するため、図-10に示すようにベッセル内部に補強角パイプを取り付けた。排土時にずりが堆積して残らないように上部に2本、下部に1本をひし形状に取り付けた。ローラを取り付けたベッセル側部は図-11に示すように、積込み時にずりが堆積したり、ローラやゲート稼動部にずりが噛み込むのを防止するため、ゲート開閉の機構に必要な最低限の開口を除いた全範囲を鉄板で覆った。

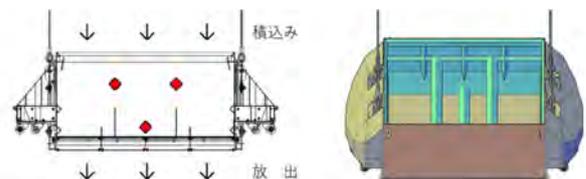


図-10 補強角パイプ

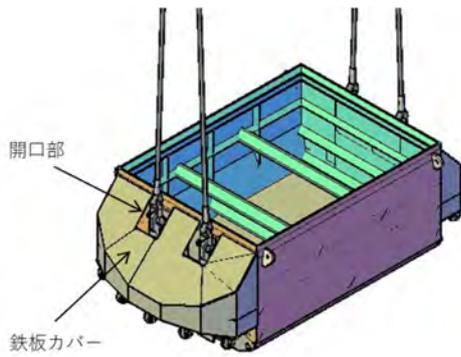


図-11 ローラ部カバー

#### (4) ベッセル底部

ベッセル底部の構造を図-12に示す。ベッセル内部の底板は摩耗時に交換できるように溶接ではなくボルトで固定することとし、ずり積込み時や放出時の摩耗を軽減するため、普通ボルトではなくボルト頭が飛び出ない皿ボルトを使用した。ベッセル外部の底板は立坑下着底時のずり噛み込みを防止するためフラットな構造とした。またゲートが完全に閉まり切らず僅かに隙間が生じることを想定し、ベッセル揚重中のずり落下を防止するため、片側のゲート底に左右のゲートがラップするようにこぼれ防止板を取り付けた。

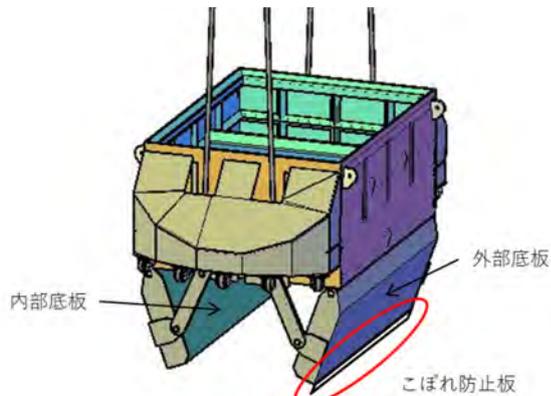


図-12 ベッセル底部

#### (5) ローラ仕様・取付位置

ローラを選定において、当初はベアリング仕様を考えたが下記①～④の懸念があった。

- ① オイルを切らすことができない
- ② オイルを注入するためにフランジを設ける等のスペースを確保する必要があり構造が大きくなる
- ③ オイルシールが破損すると交換が必要となる
- ④ 構造が大きくなることで損傷リスクが上がる  
そこでベアリング仕様ではなくメンテナンス手間の少ないオイレス仕様のローラを選定することとした。ローラは円形架台のすり鉢面をスムーズに転がるように、可能な限り外側に配置した。選定したローラを写真-2に示す。



写真-2 ローラ

#### (6) 円形架台上部径

すり鉢状円形架台の上部径の設定にあたり、ローラ付き底開きベッセルをスムーズに吊り下ろすにはベッセルとのクリアランスがどの程度であれば適切であるかを考え、クレーンオペレータにもヒアリングを行い、クリアランスを500mmに決定した(図-13参照)。

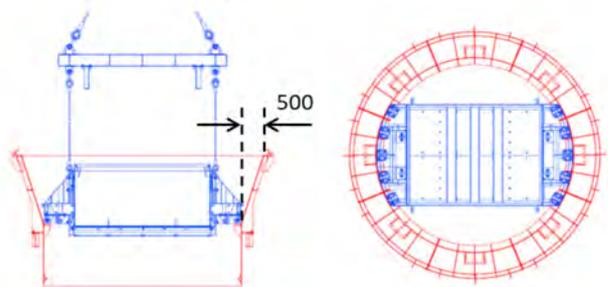


図-13 円形架台上部径

#### (7) 模型製作・動作確認

考案した設備の動作機構の確認と実製作、実運用に向けたその他懸念事項を漏れなく洗い出すため、事前に1/10スケールの模型を製作した。これによりローラがすり鉢面を転がることでベッセルが自然に円形架台中央へ降下する状況や、吊治具ワイヤの張力に連動してゲートが開閉する状況を確認した(写真-3参照)。



写真-3 模型による動作確認

### 4. 使用実績

#### 4.1 事前検討内容に対する評価

##### (1) ベッセル容量

計画時点において、揚土作業全体ではベッセル容量が大きいほど揚土回数が減るため、揚土サイクルタイムは向上することが見込まれた。しかし重量が増えることでクレーン最大作業半径が小さくなり、サイズが大きくなることで定置可能範囲

に制限が生じる懸念があった。前述の通り本工事では立坑内でのずり積込み場所は施工状況に応じて日々変化することを想定していたため、立坑内の全範囲で揚重が可能となる8 m<sup>3</sup>を選択したことで揚土作業に支障が生じることはなかった。掘削作業全体で考えても揚土作業がクリティカルになることはなかったため、選定したベッセル容量は適切であったと考える。ベッセル揚重状況を写真-4に示す。



写真-4 ベッセル揚重状況

### (2) ベッセル吊治具ワイヤ長さ

バックホウによるずり積込みにおいて、吊治具ワイヤが積込み作業の支障となることはなく、円滑な積込みを実施することができた(写真-5参照)。



写真-5 実際のずり積込み状況

### (3) ベッセル損傷・変形・ずり堆積防止

ベッセル内部に補強角パイプを取り付けたことで立坑掘削完了まで大きな損傷や変形もなく運用することができた(写真-6参照)。ベッセル側部については、ほぼ全範囲を鉄板で覆ったことでゲート開閉機構の点検が実施しづらくなってしまったため、写真-7, 8に示すように現場で開閉式の点検窓を設置した。これにより開口部から進入した細かいずりの清掃も容易となった。



写真-6 使用後のベッセル内部



写真-7 点検窓



写真-8 点検窓内部

### (4) ベッセル底部

内部底板は摩耗が少なく交換することはなかった。外部底板については、排土後にゲート間に20mm程度の隙間が見受けられることがあった(写真-9, 10参照)。計画当初より各部の僅かな製作誤差や駆動上必要な余裕代などの要因から、ゲートが完全に閉まり切らず隙間が生じることを想定しこぼれ防止板を取付けていたため、ベッセル揚重中に隙間からずりが落下することはなかった。隙間が広がっていないか都度確認を行っていたので、追加の対策を施すことなく運用することができた。



写真-9 正常なゲート



写真-10 ゲート間隙間

### (5) ローラ仕様・取付位置

使用後のローラを写真-11に示す。オイレス仕様のローラを選定したことで日々の点検と清掃を確実に実施する程度で修理や交換を行うことなく比較的容易に維持管理を行うことができた。円形架台へのベッセル吊り下ろしにおいて、すり鉢面の途中で競るようなことは発生しなかったため、ローラの取付位置も適切であったと考える。



写真-11 使用後のローラ

### (6) 円形架台上部径

円形架台へのベッセル吊り下ろし作業においてクレーンオペレータは目視とブーム先端カメラの映像によって操作を行った(写真-12参照)。設定した円形架台上部径は状況を確認しながらベッセルを吊り下ろすのに十分な広さであった。

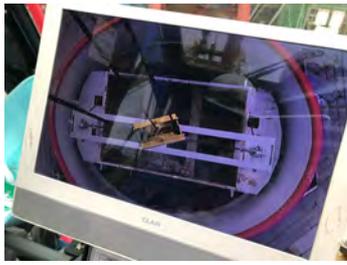


写真-12 クレーン運転席モニタ

## 4.2 揚土実績

今回開発した設備を使用し、累計 1,753 回にわたり約 8,970 m<sup>3</sup>の地山土量を揚重した。

開発した設備の効率性を評価する上で、ベッセル容量、積込み機械、クレーン仕様、揚程、旋回角度など同一条件下における従来設備の使用実績がないため、従来設備と揚土作業全体のサイクルタイムを比較することはできない。そこで揚土作業全体のサイクルのうち、従来設備と異なる点として「架台へのベッセル吊り下ろし・接地」が挙げられるため、その作業に要する時間のみに絞って考える。社内の過去の類似工事における従来式底開きベッセル（10 m<sup>3</sup>）および矩形架台の使用実績と比較すると、上記作業に要する時間はほぼ同等であったが、これについてもクレーンの仕様やオペレータが異なるため厳密には比較することができない。

本工事における立坑深さ 17.5m 地点での揚土サイクルタイムの内訳を表-4 に示す。揚土作業の効率性の評価において、上記の理由から従来設備との比較は難しいが、1 回あたりのサイクルタイム 10 分 6 秒のうち、③円形架台へのベッセル吊り下ろし・接地に要する 21 秒の作業を、より安全に、容易に行うことが可能となったため、安全性と施工性が向上したと言える。架台を円形にしたことで排土時のベッセルの向きを気にする必要がなくなり、ベッセルを円形架台上の大体の位置にさえ持っていけばローラによって自然に架台中央へ誘導されるため、慎重を要する揚土・排土作業においてクレーンオペレータの負担を軽減することができた。

従来式底開きベッセルの矩形架台への位置合わせにおいては、人力での介錯は安全性の面から現実的ではないため壁当てによる位置合わせが一般的と考えられるが、壁とベッセル接地位置の関係からクレーンの旋回方向は必然的に一方向に限定される。前述の通り本工事では旋回方向を限定することができなかつたため、円形架台およびローラ付き底開きベッセルを採用したことで左右どちらの旋回方向からでも排土が可能になったことも大きな利点であった。

表-4 揚土サイクルタイム内訳

No.	内 訳	時 間
①	ずり積込み	6分06秒
②	巻上げ・起伏・旋回	1分39秒
③	円形架台へのベッセル吊り下ろし・接地	21秒
④	ゲート開放・ずり放出	8秒
⑤	巻上げ・起伏・旋回・巻下げ	1分40秒
⑥	立坑下でのベッセル位置決め・着底	12秒
⑦	合 計	10分06秒

## 5. 不具合と対策

図-14 に示すようにベッセルのゲート側面部にずりが噛み込むことがあった。これは排土時にずりがゲート側面部に噛み込み、そのままゲートが閉じたことで発生したと考えられる。ずりが噛み込むことでゲート開閉機構に支障が生じたり、揚重中に噛み込んだずりが落下する恐れがあったため、対策として図-15 に示すようにベッセル内部に鉄板を設置し、側面部へのずりの噛み込みを防止した。これによりずりの噛み込みは発生しなくなり、安全に運用することができた。

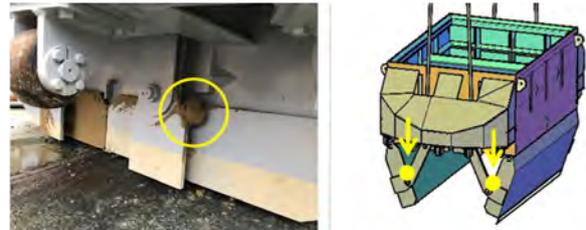


図-14 ずり噛み込み状況

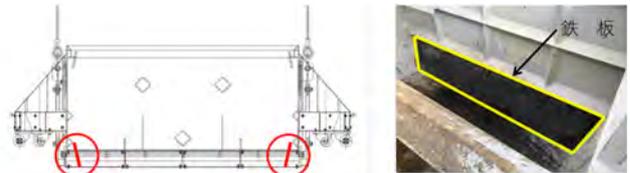


図-15 ずり噛み込み対策

## 6. おわりに

設備の開発に当たり、排土方法として電気制御による仕様も検討したが、不具合発生時の対応軽減を考慮し、機械的でシンプルな構造とした。従来設備を改良したことにより、揚土作業全体のサイクルのうち「架台へのベッセル吊り下ろし・接地」作業をより安全に容易に行うことが可能となった。またクレーンの旋回方向に制限を受けず、左右どちらの方向からでも同じように排土することが可能となったことも大きな利点であり、今後の類似工事への適用に有効であると考えられる。今後、クローラクレーンの運転自動化やオペレータの運転を補助するような機能を実用化することができれば、更なる生産性の向上に繋がるものと考えられる。

## 26. 小断面トンネル自動吹付機システムの開発

(株)熊谷組  
(株)熊谷組  
(株)熊谷組

宮川 克己  
手塚 仁  
○ 梶野 瑞基

### 1. はじめに

わが国では「再生可能エネルギーの固定買取制度」(以下FIT制度 Feed-in Tariff)が2012年に法施行され制度が開始した。FIT制度により再生可能エネルギーによる発電量は大きく伸びてきている。再生可能エネルギーの中で小水力発電は用途の関係上断面積が10㎡程度の導水路トンネルを用いる場合が多数を占める。当社では小断面トンネルにおけるNATM施工機械群の開発プロジェクトを行っておりこの内の吹付施工での自動吹付機システムを開発したので報告する。

### 2. 自動吹付機システムの概要

#### 2.1 背景

小断面トンネルでの吹付作業は、換気をおこなうものの狭隘な作業空間であるため粉塵による苦渋作業となる。そこで遠隔で吹付機を操作する自動運転技術を導入することとし、開発した自動吹付機システムを試作機に搭載し各種確認を行った。

#### 2.2 自動吹付機システム概要

開発した自動吹付機システムは小型バックホウをベースに自動吹付ロボット機能を搭載し、オペレーターの吹付作業を忠実に再現できる教示(ティーチング)システムである。(写真-1)

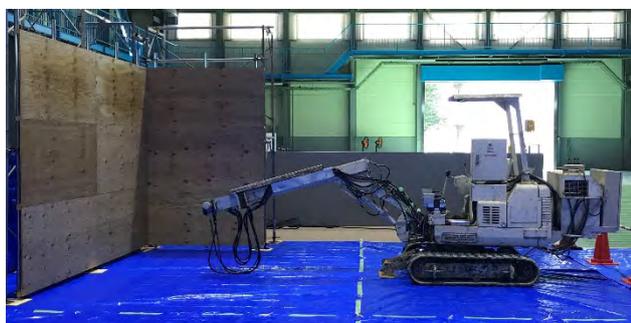


写真-1 自動吹付ロボット

#### (1) システム

吹付ロボットの可動部にセンサーを取り付けて、

各可動部の移動量を計測することで吹付ノズル先端の現在位置と姿勢をCPUユニットにより把握できるようにしている。

#### (2) 教示機能

様々な断面形状や距離に対応したオペレーターの吹付動作を記録し、PLC(Programmable Logic Controller)により再現するため微妙な吹付制御が反映され、自動で人と同様の吹付が何度でも行うことができる。

### 3. 自動吹付機システム搭載試作機

#### 3.1 ロボット移動量の計測

今回使用した試作機のベースマシンは竹内製作所製ミニショベル1.6t級で可動部分各所にセンサーを設けた。センサーは、吹付ノズル(左右、前後)、ブーム(上下、左右、伸縮)、上部旋回体の各6軸に取り付け、各軸の移動量を計測、記録する。

#### (1) 吹付ノズル

吹付ノズルの左右と前後のスイング動作には、各々絶対値式ロータリーエンコーダーで計測し、計測範囲は、左右各179°、前後各114°である。

#### (2) ブーム

ベースマシンのミニショベルのブームは上部旋回体とブームスイングシリンダーによる左右動作とブームシリンダーによる伸縮動作となる。従って、ブームの上下動作はワイヤー式ポテンシオメーターを使用し、計測範囲は上方54°、下方18.5°。伸縮(スライド)動作も同様にワイヤー式ポテンシオメーターで0mmから1,000mm。左右動作は絶対値式ロータリーエンコーダーで左右各50°としている。

#### (3) 上部旋回体

上部旋回体もワイヤー式ポテンシオメーターを使用し、計測範囲は360°とした。(図-1)

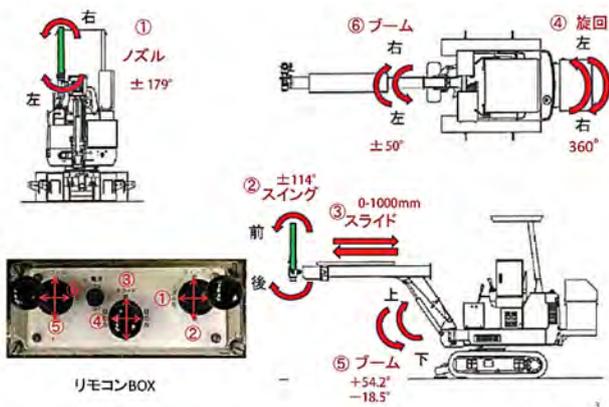


図-1 可動部動作範囲

### 3.2 油圧制御

吹付ロボットの動作開始位置を決め原点とし、自動運転の終了時は必ず原点へ自動復帰させる。原点復帰では比例電磁式制御弁を利用して油量を制御し精度よく円滑に動作させている。また、原点復帰時は、各センサーの計測値を基に移動量を算出して原点位置に戻す。

### 3.3 自動制御

自動運転での再現（ティーチングプレイバック）機能は、油圧の油量を一定にして教示操作での油圧弁開閉時間を記憶し、自動運転時にこの記憶した開閉時間で油圧を制御して再現性を図っている。（写真-2）



写真-2 操作画面

## 4. 自動吹付機システムの検証

### 4.1 システムの動作検証

自動吹付機システム搭載の試作機での再現性動作の確認を行った。

#### (1) 定量的測定による再現性動作検証

最初に吹付機ノズルにレーザーポインターを取り付け単独動作における移動量の実測値測定を行い教示と自動の移動量の誤差を定量的に測定してシステムとしての可否の判断をしたところ実用

耐えうると判断したので、次に複合動作における移動軌跡経路と自動運転経路の測定をした。測定は、原点位置から計測停止位置を任意の4点として教示経路に対して4回の自動運転経路での誤差を測定した。この測定結果より油圧シリンダーでの移動量誤差は小さく最大誤差も僅か96mmであった。（表-1）

この検証で得られた結果は、ノズルに関して、油圧モーターが油圧回路閉状態にかかわらず重量負荷等外力に負けて動いてしまう。アームに関して左右動作のアクチュエーターのあそび（ガタ）が移動動作に影響を与えるという機械的課題と、繰り返しの再現機能は、原点復帰の誤差量（ズレ量）が僅かだが漸次増加する傾向があることが判明した。

また、実吹付での荷重負荷を想定してノズルに10kgの負荷を載荷させ同様の測定も行ったが、油圧シリンダー動作に関しては大きな影響は認められなかった。（表-2）

表-1 複合動作誤差測定

単位mm	部位動作	平均誤差	最小誤差	最大誤差
原 点		16.2	11.2	21.2
中間点1	下、右	25.1	18.6	37.6
中間点2	伸、上、右	43.9	16.0	72.2
中間点3	伸、縮、下、右	55.4	24.9	96.1
最終点	伸、上、左	58.7	22.2	95.4

※) 1. 油圧モーター以外の油圧シリンダーでの動作確認とした

2. 測定回数4回で2度行った結果

表-2 ノズルに10kgの荷重負荷を載荷させた誤差測定

単位mm	部位動作	平均誤差	最小誤差	最大誤差
原 点		17.8	10.0	25.8
中間点1	下、右	29.5	20.0	40.3
中間点2	伸、上、右	33.4	26.9	39.0
中間点3	伸、縮、下、右	42.0	23.8	58.8
最終点	伸、上、左	42.7	26.9	55.1

※) 測定回数4回で行った結果

#### (2) 塗装吹付による動作比較検証

吹付機ノズルにエアースプレーガンを取り付け2色の塗料を用いて吹き付けを模した教示軌跡の再現性の視認確認を行った。この検証では、教示運転での塗装跡を自動運転で塗装がほぼ同一に重なる結果が見られ再現性は高いとの確認ができた。(写真-3)



写真-3 塗装吹付による動作比較検証

(3) 実吹き付けによる再現性動作検証  
 模擬トンネルを使用して実際の吹付作業と同条件で吹付が可能であるか検証を行った。(表-3)

表-3 実吹付検証仕様

項目	仕様
模擬トンネル	内空幅 5.2m、高 4.4m
コンクリートポンプ	湿式 MKW-25SNT 5-25 m <sup>3</sup> /H
	乾式 アリバ 280 12 m <sup>3</sup> /H
急結剤添加装置	液体急結剤ポンプ
粉体助剤圧送装置	ナトムクリート PAC150
コンプレッサー	エンジン式 100ps 2台
コンクリート強度	18N/mm <sup>2</sup> W/C 50% s/a 60%
急結剤	クリアショット
	ナトミック Z

吹付は乾式と湿式の両方で確認した。検証は、教示吹付エリアと自動吹付エリアに分けそれぞれ基準点釘を9点設置して吹き付け厚さの差異を計測、比較した。(写真-4)

教示と自動の巻厚差測定結果は、最大 74 mmであった。実用上この程度の厚差は作業的に問題は無いと判断した。(表-4)



写真-4 模擬トンネルによる実吹付検証  
 (左：教示 右：自動再生)

この検証で得られた結果は、単独動作検証でも課題となったノズル部油圧モーターが、ホース重量並びに空圧変動に影響され位置の誤差が大きくなった。また、巻厚の誤差は、ロボットの動作差だけではなく吹付自体の吐出量の変動も要因の一つであることが解った。

表-4 計測点吹き付け厚さ測定 単位mm

点位置	教示運転	自動運転	巻厚差	
上段	左	80	74	6
	中	102	99	3
	右	99	25	74
中段	左	76	59	17
	中	133	170	-37
	右	128	80	48
下段	左	57	97	-40
	中	71	138	-67
	右	108	99	9

## 4.2 検証結果の考察

この自動吹付機システムを搭載した新規機械開発に向けた種々の検証より、多少の不具合や課題が判明したが、システムとしての有意性は有ると確認できた。新規開発においては、検証結果の最大の課題であった吹付ノズル部の油圧モーター駆動を荷重負荷に耐えうるアクチュエーターに変更することとした。また、制御に関して回転部エンコーダーの0°角度識別不良が発生したので単回転式エンコーダーから多回転式エンコーダーに変更することとした。

## 5. 新規開発機械の計画仕様

新規機械計画では、吹付材料を湿式と乾式の両タイプに対応できる本体ベースで設計し、現状は乾式吹付仕様で製作を行っている。(表-5)

表-5 計画仕様

本体関係	全 長	12,555 mm
	全 幅	1,600 mm
	全 高	1,990 mm
	重 量	8,600 kg
	ブーム	スライド 500 mm 旋回 左右 30°
	アーム	スライド 3,000 mm 旋回 左右 40°
	アウトリガー	油圧式 2本
	車輪	φ350 mm
搭載物	コンプレッサー	37KW
	吹付機	乾式：アリバ
		湿式：コンクリートポンプ
急結剤添加装置	1式	

を進めていく所存である。

## 6. おわりに

試作機を用いた自動吹付機システムの検証により実用化の目途がついた。現在はシステムの改良、調整を行い再現性の精度向上を図っており、並行して吹付の巻厚測定システムの開発も進め、吹き付けの自動化に向け更なる完成度を高めている。これらのシステムを搭載した新規機械は、完成した後当社つくば技術研究所内の模擬トンネル（写真-5）に搬入し動作確認、調整を行い2021年の現場導入に向け製作を進めている最中である。運用が開始されるとオペレーターの切羽作業の軽減が期待でき作業環境の改善並びに品質の向上に寄与できると期待しており、更には遠隔操作室からの操作も視野に入れている。



写真-5 つくば技術研究所内模擬トンネル

また、将来的には吹付パターンのデータ収集と機械学習による最適パターンの抽出を行い、自動巻厚測定システムと連携することで吹き付けの完全自動化を目指し施工効率の向上と安全性の確立

## 27. 積雪時におけるラウンドアバウトエプロン端部の 可視化方法に関する検討

(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 ○久慈 直之  
(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 舟橋 誠  
(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 新保 貴広

### 1. はじめに

ラウンドアバウトは、円形の平面交差点形式の一つで、環道を走行する車両が環道へ進入しようとする車両に対し優先権を持ち、環道交通流が信号機や一時停止などにより中断されない交差点制御方式である(写真-1)。一般的な無信号交差点と比較すると、車両どうしの交錯点が少なく、安全性に優れた交差点で欧米では広く普及している。

日本においても、近年、道路交通法の改正により、環状交差点の通行方法が定められたことから、徐々に普及し、今後、更なる導入が期待されている。



写真-1 ラウンドアバウト(北海道ノ国町)

しかし、積雪寒冷地域では、道路管理者がラウンドアバウトの導入を検討する際には、除雪に関する課題やその対応策の検討が必要である。

本稿では、除雪作業時に除雪装置がエプロン端部への接触による損傷を抑制するため、環道とエプロンの境界にある段差を、視覚的に認知できる技術の検討を行ったので報告する。

### 2. ラウンドアバウトのエプロン

ラウンドアバウトの幾何構造は、環道、エプロン、中央島、分離島、流入部、流出部等で構成されている(図-1)。

環道は、小型自動車等が通行可能な幅員であり、エプロンは環道のみ幅員では通行が困難な牽引

車両等が、環道と合わせた幅員として通行して良いエリアで、環道の内側の中央島寄りに設置する。ラウンドアバウトは、このエプロンがあることで、利用者に対して走行速度の抑制ができる交差点である。

しかし、利用者がエプロンと環道の違いを認知できなければ、小型自動車等がエプロン上を走行して交差点内を直線的に通行する状況が生じる。

この状況を抑制し、通行車両の走行位置を安定させ走行速度の抑制効果を発揮するには、環道とエプロンの境界に段差を設けることが有効とされており、段差の高さを5cmとすることで、通行の抑制効果が高い評価事例もある<sup>1)</sup>。

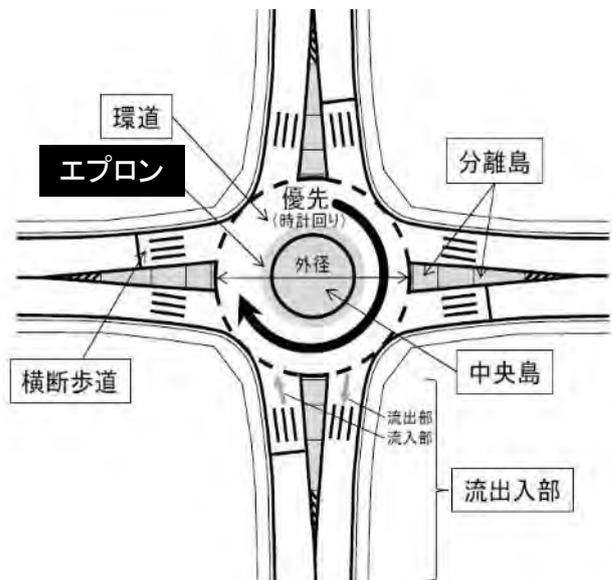


図-1 ラウンドアバウト標準図<sup>2)</sup>

### 3. エプロン端部可視化試験

#### 3.1 ラウンドアバウトの除雪に関する課題

積雪寒冷地域では、エプロン端部の段差は、積雪時に埋没するため、段差位置の把握は難しくなり、除雪の際に除雪装置の接触による損傷が懸念される。過年度の試験では、エプロン端部の段差が鉛直形状において、除雪装置による損傷が確認されている<sup>3)</sup>(写真-2)。また、エプロン端部をコンクリート製のすりつけ形状(図-2)にすること

で、すりつけの角度と除雪機械の種類によっては、損傷を軽減できることが確認されている<sup>3)</sup>。しかし、すりつけ形状で5cmの鉛直形状と同等の乗り上げ抑制効果を発揮するには、エプロン高さが5cm以上必要であることも確認されている<sup>4)</sup>。

そこで、積雪で埋没してもエプロン端部の位置を把握でき、除雪装置のエプロン端部への接触を防げる方法を検討し、除雪車による試験施工を行った。



写真-2 除雪車によるエプロン端部損傷試験<sup>3)</sup>

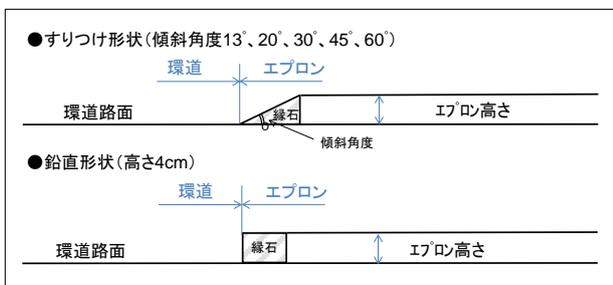


図-2 エプロン端部形状（過年度試験）<sup>3)</sup>

### 3.2 試験概要

試験は、寒地土木研究所苫小牧寒地試験道路のラウンドアバウト（以下、「試験道路」という）に中央島の半径が6m、エプロンの幅が2mになるようにコースを作成し、その上に国道における一般的な除雪出動基準である10cm程度の雪で覆い、エプロン端部が認識できない状態で実施した。

試験は、積雪によりエプロン端部が確認できない状態をレーザー照射による方法でカバーできるかを検証するため、除雪車でエプロン周りの除雪を実施する際の作業性や視認性、安全性の評価を行った。

### 3.3 試験条件

試験に使用した機器の選定条件としては、極力商用電源を用いないもの、除雪車側の加工を必要としないものとした。今回は、電源の供給は電池で、ラウンドアバウトに設置可能なレーザー照射による可視化方法とした。

レーザーによる可視化は、色の違いによる比較のため、緑と赤の2色のレーザーを使用した。使用した機器は、車両の追突防止用として市販されている赤色レーザーと、道路の視線誘導標に用いられている緑色レーザーを用いた。試験の実施に

当たっては、周辺照度におけるレーザーの視認性を確認し、視認可能な照度（時間帯）で行った。

試験に使用する除雪車は、主に国道の除雪に使用している除雪トラックと、交差点等の間口処理に使用している除雪ドーザとした。また、一般ドライバーからの視認性や安全性を検証するため乗用車も使用した（写真-3）。



写真-3 試験車両

### 3.4 試験方法

#### 3.4.1 試験及び機材設置方法

試験は、レーザーによる視認性や作業性を検証するため、レーザーの他、無対策及び赤色のスプレーマーキングによる試験も実施した（写真-4）。



写真-4 無対策試験（左）とマーキング試験（右）

無対策試験では、エプロンの幅をオペレータに伝えるのみとし、マーキング試験では、雪面の赤色マーキングに沿っての除雪とした。

レーザー照射試験は、レーザー照射口を中央島とエプロン境界部1mの高さに設置して行った。照射口は、エプロン端部から10cm外側の雪面上を照射し、円弧状の照射エリアを形成できるように複数台(2.5m長/1ブロック)配列した。また、レーザーの色による視認性の違いを検証するため赤色と緑色の2色を並べて設置した。照射位置には、除雪の精度を測るための計測用マーカを取り付けた（図-3）。

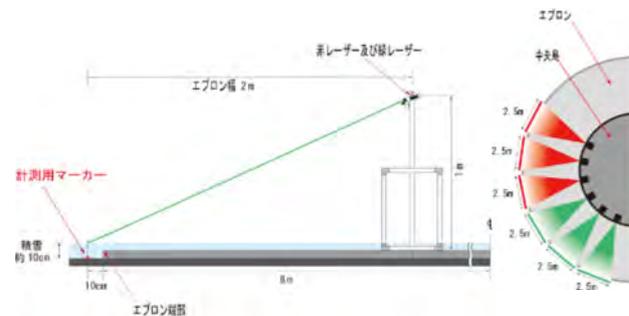


図-3 レーザー機器設置方法

#### 3.4.2 車両走行方法

除雪トラック及び除雪ドーザの走行ルートは、

流入部からラウンドアバウト内に侵入しエプロン端部を除雪しながら反対側へ流出する（往路）ものとし、その後、Uターンし同様に走行した（復路）。赤色と緑色のレーザーは、往路と復路で配置順を逆にして設置した（図-4）。

除雪方法は、除雪ドーザはバケットで、除雪トラックはグレーダ装置でエプロン端部を目標にしながら走行した。

乗用車の走行に関しては、ラウンドアバウトを走行する上でレーザーの視認性や安全性を確認するため、環道を走行した場合と、エプロンに乗り上げて走行した場合を想定して実施した。



図-4 車両走行方法

### 3.4.3 評価方法

一般的な除雪作業は、交通量が少なく、通勤・通学の時間帯を避けた早朝に行うことが多い。また、冬季間であるため、夜明け前の薄暗い時間帯でもある。そこで、日没後の薄暗い時間帯から試験を実施した。

なお、試験を行う前には、周辺の明るさの違いによるレーザーの視認性を確認するため、照度試験を実施した。

走行試験の評価方法としては、視認性及び安全性は、レーザーが除雪作業中のオペレータに与える影響について、アンケート及びオペレータ目線の動画撮影により検証した。

作業性は、試験走行後の計測用マーカの位置から除雪跡との距離を測定し正確さの評価を実施した。

## 4. 試験結果

### 4.1 照度試験

照度試験は、周辺照度の影響により積雪面に照射したレーザーが、どの程度視認できるか確認した。

試験方法は、照射したレーザー付近に照度計を設置し、周辺照度を一定時間観察することにより、照度とレーザーの見え方を主観的な評価で整理した。

その結果、緑色レーザー・赤色レーザーともに、周辺照度が3,500lx前後から視認できることを確認した（表-3）。

日の出1時間後の照度でも概ね2,000lx程度である<sup>5)</sup>ので、早朝の除雪作業時には、照射したレーザーは、十分に視認できると考えられる。

表-3 照度試験結果

時間	周辺照度 (lx)	レーザー照射状況
16:20	14,300	
16:30	8,400	
16:40	3,500	
16:50	1,600	
17:00	700	

(試験日の日没時間) 令和2年2月13日 17:01:27

### 4.2 無対策走行試験

エプロン端部の無対策走行試験は、除雪トラック（往路）及び除雪ドーザ（復路）ともにエプロン端部に沿った除雪走行ができなかった（図-5、図-6）。特に除雪ドーザは、エプロン上に除雪装置がはみ出した除雪走行となった。事前にエプロンの幅を情報として得た上での試験走行であったが、

目視により除雪の目標位置が確認できないため（写真-4）、エプロン端部に沿った除雪走行は、難しいと考える。

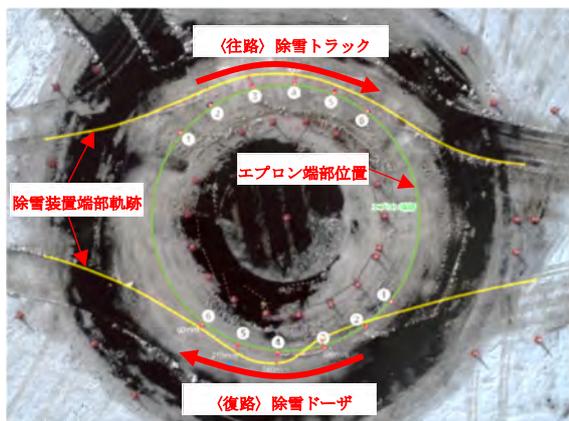


図-5 無対策試験の除雪走行軌跡

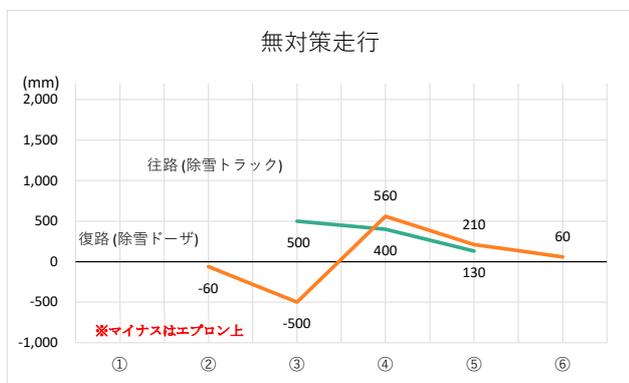


図-6 無対策試験の除雪精度の計測



写真-4 無対策試験の除雪走行状況

### 4.3 マーキングによる走行試験

カラスプレーでエプロン端部をマーキングした場合の走行試験は、除雪トラック及び除雪ドーザともに往復走行で行った。

除雪トラック及び除雪ドーザともにマーキングに沿った除雪走行ができた（図-7, 8）。しかし、除雪ドーザは、除雪トラックに比べると除雪の精度が低い結果となった（図-9, 10）。

これは、除雪トラックの除雪装置は、オペレータがミラー越しにマーキング位置と除雪装置の端部を視認できるのに対して、除雪ドーザは、マーキング位置が除雪装置の影となり直接視認することができなかったためと推測する（写真-5）。

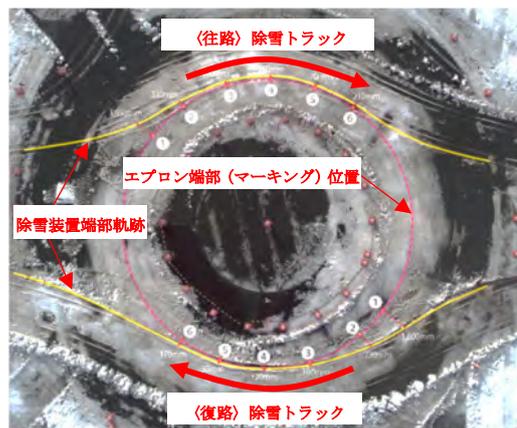


図-7 マーキングによる試験の除雪トラック走行軌跡

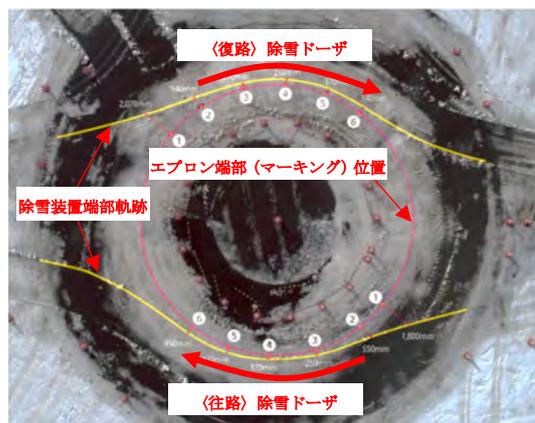


図-8 マーキングによる試験の除雪ドーザ走行軌跡

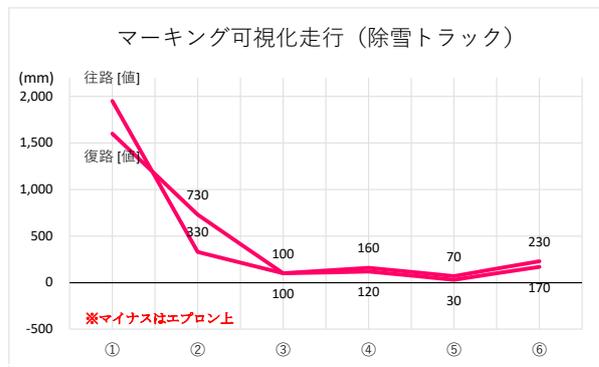


図-9 マーキング試験の除雪精度の計測 (除雪トラック)

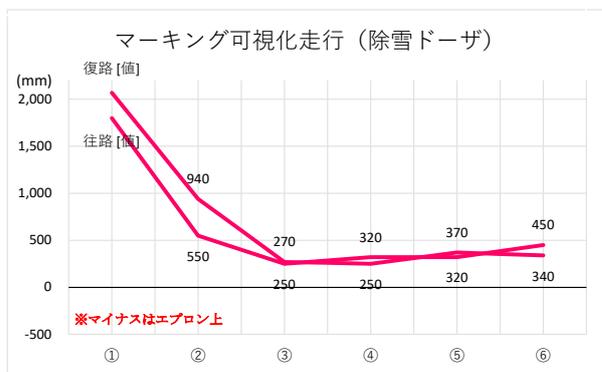


図-10 マーキング試験の除雪精度の計測 (除雪ドーザ)



写真-5 マーキング試験の除雪走行状況

#### 4.4 レーザーによる走行試験

レーザー照射によりエプロン端部を可視化した場合の走行試験は、除雪トラック及び除雪ドーザともに往復走行で行った。

除雪トラックは、往路の走行で、緑→赤の順、復路の走行では、赤→緑の順で走行し、除雪ドーザでは、除雪トラックとは逆で、往路の走行では、赤→緑の順、復路の走行では、緑→赤の順でそれぞれ走行した。

結果は、マーキングでの試験走行と同様にレーザー照射したエプロン端部に沿った除雪走行ができた(図-11, 12)。

また、除雪ドーザの走行試験は、前述のマーキングによる走行試験と同様に、レーザーにより可視化されたエプロン端部が除雪装置の影となったが、マーキングによる走行試験の実施後であったため除雪トラックに比べ精度の低下は低かった(図-13, 14)。

レーザー色の違いによる試験結果は、オペレータのアンケートの結果、緑色レーザーは赤色に比べて、ラウンドアバウトの流入部付近からでもよく視認できた。そのため、除雪開始位置への移動がスムーズに行うことができ、除雪走行開始時の除雪装置とエプロン端部との距離が近くなっている(図-13, 14)。

また、今回使用した除雪トラックの除雪装置の塗装が赤色であるため、赤色レーザーは視認しづらいとの意見もあった。よって、赤色レーザーより緑色レーザーの方がよく視認できる結果となった。

レーザーによる除雪作業への影響としては、除雪車両の運転位置が比較的高い位置にあるため、作業中の眩しさは感じなかった(写真-6)。

今回使用した試験機1基のレーザー照射幅は、2.5m程度であり、この試験機を複数台並べて、レーザーを直線的に繋いでエプロン端部の曲線部を可視化した。試験の際は、大まかな目安程度として認識していたので、作業をする上での支障とはならなかった。

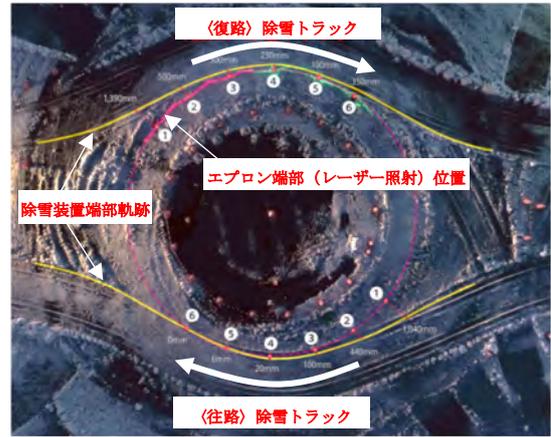


図-11 レーザーによる試験の除雪トラック走行軌跡

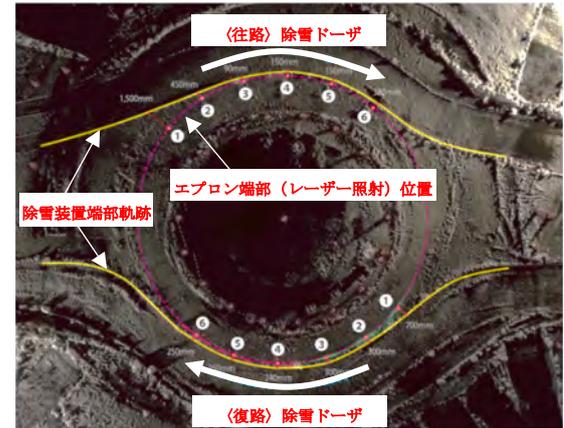


図-12 レーザーによる試験の除雪ドーザ走行軌跡

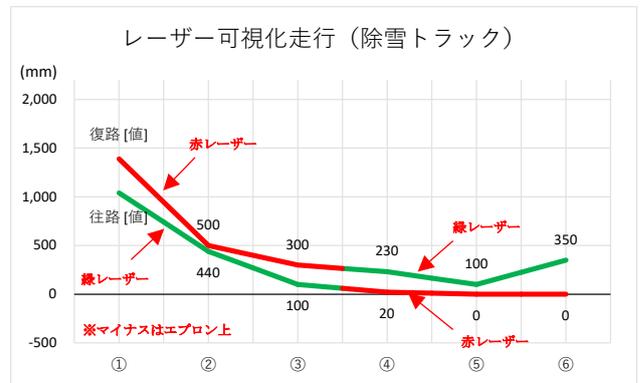


図-13 レーザー試験の除雪精度の計測 (除雪トラック)

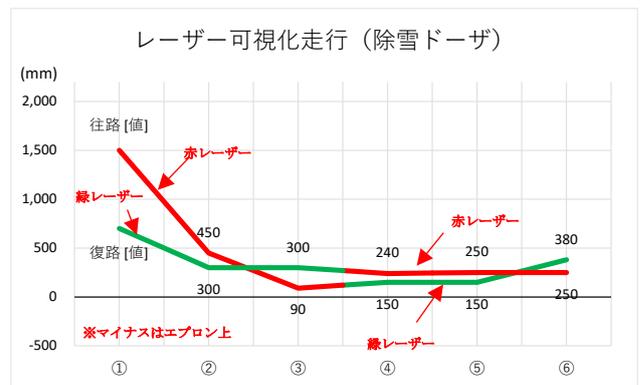


図-14 レーザー試験の除雪精度の計測 (除雪ドーザ)



写真-6 レーザー試験の除雪走行状況

#### 4.5 乗用車による走行試験

最後にレーザー照射によりエプロン端部を可視化した状態で、除雪車よりドライバーの目線が低い乗用車に対して、レーザーが与える影響を検証した。また、乗用車がエプロン部の走行を想定した試験も実施した。

その結果、乗用車のドライバーは、レーザーの照射位置が、除雪車のオペレータよりも近い位置にあるが、走行の支障となることはなかった（写真-7）。また、エプロン走行時には、レーザーが車両側面へ照射されたが、ドライバーへの影響はなかった（写真-8）。

ドライバーへのアンケートの結果、エプロン端部をレーザーにより可視化することで、道路の外側線のイメージがあり、心理的にエプロン部を走行することを躊躇するとの意見があった。



写真-7 レーザー試験の乗用車走行状況  
(環道走行)



写真-8 レーザー試験の乗用車走行状況  
(エプロン走行)

### 5. まとめ

今回は、積雪により埋没した環道とエプロンの境界にある段差位置を視覚的に認知するため、レーザーを用いた可視化による除雪走行試験を行った。その結果、以下のことがわかった。

#### 5.1 視認性

試験に用いたレーザーは、一般的な除雪作業の時間帯である早朝時の照度で十分に視認可能であ

ることがわかった。また、色の違いでは、緑色レーザーは、赤色に比べ視認性が良く、レーザーにより可視化することでエプロン端部の位置を把握できることがわかった。

ラウンドアバウトの一般利用者を想定した乗用車での走行は、除雪車に比べるとドライバーの目線は低いですが、走行の支障とはならなかった。

#### 5.2 安全性

レーザーでエプロン端部を可視化した状態での除雪作業について、除雪車オペレータの視点が高い位置にあるためレーザーの眩しさの影響はなく、安全な除雪作業や走行が可能であることがわかった。

また、ラウンドアバウトの一般利用者に対しては、エプロン端部をレーザーで照射することでエプロンへの乗り上げ抑制効果も期待できる可能性があった。

#### 5.3 作業性

レーザーを用いた可視化は、除雪装置でエプロン端部を正確に捉えられたことから、作業性の向上につながると考える。

レーザーの色による比較は、緑色レーザーの方がエプロン端部に近い位置を除雪できたことから、緑色レーザーの方が赤色レーザーに比べ作業性が高いことがわかった。

### 参考文献

- 1) ラウンドアバウトマニュアル, 平成28年4月28日一般社団法人交通工学研究会
- 2) 国土交通省道路局通知: 望ましいラウンドアバウトの構造について 2014
- 3) 佐藤信吾・高本敏志・牧野正敏: 除雪作業と乗り上げ抑制効果を考慮したラウンドアバウトのエプロン端部形状に関する検討, 寒地土木研究所月報, No.774, pp.40~46, 2017
- 4) 久慈直之・山口洋士・飯田美喜: ラウンドアバウトにおける除雪を考慮したエプロン端部形状の一般車乗り上げ抑制効果, 令和元年度建設施工と機械シンポジウム
- 5) こよみハンドブック, 2006.4~2008.4, 大阪市立科学館

## 28. ICT 活用による除雪トラックのマシンコントロール化

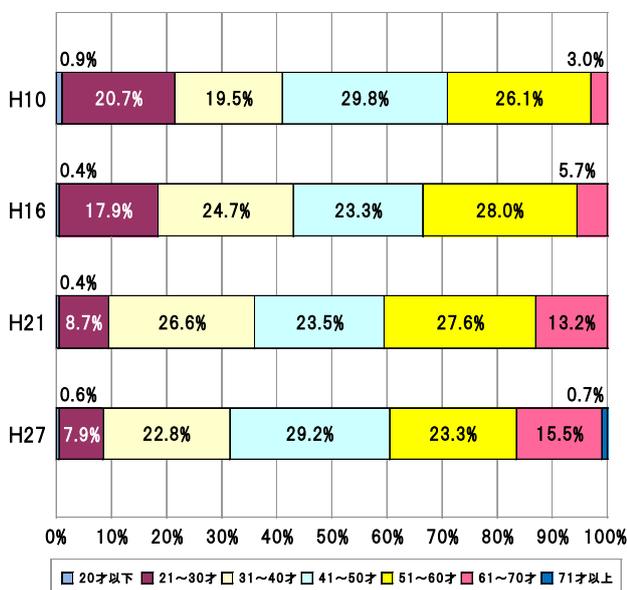
国土交通省 北陸地方整備局 北陸技術事務所 ○ 小浦方 一彦  
 国土交通省 北陸地方整備局 北陸技術事務所 小泉 倫彦

### 1. はじめに

北陸地方整備局では、管内（新潟県・富山県・石川県）の直轄国道管理区間14路線、合計約1,076kmの冬期道路交通を確保するため、約500台の除雪機械を配備し、除雪作業を実施している。

除雪機械の運転は、作業装置を路面状況、道路構造の変化に応じて操作する必要があり、経験と熟練した技術が必要であるが昨今、熟練技能を持つオペレータの高齢化に伴う引退や新規入職者の減少により、担い手の確保が重要な課題となっている。（表-1）

表-1 除雪機械オペレータ年齢構成  
 （新潟・富山・石川）直轄及び地方公共団体



（一社）日本建設機械施工協会北陸支部調べ<sup>1)</sup>

このような背景のもと、北陸技術事務所ではICT（情報通信技術）を活用した除雪機械の作業装置自動化に取り組んでおり、現在、除雪トラックのマシンコントロール（以下「MC」という）化の検討を進めている。

本稿では、2019年度までの除雪トラックMC化の検討状況について、報告するものである。

### 2. 除雪トラックのMC化検討

#### 2.1 検討方針

除雪トラックの作業装置は、交差点や乗り入れ部といった雪を置いてはいけない区間において、一時的に雪を抱え込む「サイドシャッタ」、新雪除雪を行う「フロントプラウ」、圧雪などの路面を整形する「グレーダ装置」で構成される。

（写真-1）



写真-1 除雪トラックの作業装置

作業装置は、8本のレバーと20個のスイッチによる操作を除雪トラックの運転と並行して行っており、それら作業装置の操作（動作）について、MC化を目的として検討に着手したものである。

（写真-2）



写真-2 除雪トラック作業装置操作レバー

## 2.2 検討スケジュール

MC化を行うためには、次の技術を組み合わせたシステムを構築する必要がある。(表-2)

表-2 MC化に必要な技術

No.	要素技術	候補技術	要素技術から得られる情報	要素技術による操作制御
1	精度の高い自車位置情報	VRS受信機 準天頂衛星システム 「みちびき」 慣性計測航法 (INS) 等	自車及び作業装置の位置情報の把握	車両位置情報での作業装置制御 (誤差は数cm)
	精度の高い地図データ	MMSデータ ダイナミックマップ 除雪作業用地図データ		
2	センサー技術	傾斜計 ストローク計 等	路面積雪量 雪抱え込み量 作業装置の状況等の把握	雪の量に合わせた作業装置の角度、押付力等の動作制御

精度の高い自車位置情報、精度の高い地図データ (No.1)、センサー技術 (No.2) は既存技術の組み合わせで対応可能と推察されることから、各技術を組み合わせたMC化の検討を行うこととした。(表-3)

表-3 検討スケジュール

開発技術・作業装置	検討年度			将来
	H30 (2018)	R1 (2019)	R2 (2020)	
① 位置情報と合わせたマシンコントロール化				自動 運 転 化
	サイドシャッタ			
	フロントプラウ			
	グレーダ装置			
② センサー技術を融合したマシンコントロール化	数年後に実用化の可能性			

## 2.3 「サイドシャッタ」のMC化検討

サイドシャッタは、グレーダ装置で除雪した雪を交差点内などに残さないようシャッタを閉めることで一時的に雪を抱え込む装置である。

(写真-3)

交差点等、特定の区間における開閉動作であれば位置情報のみで制御が可能であるほか、動作時の安全性等も考慮し、表-2に示した技術のうち、精度の高い自車位置情報、精度の高い地図データを使用し、MC化に取り組んだ。

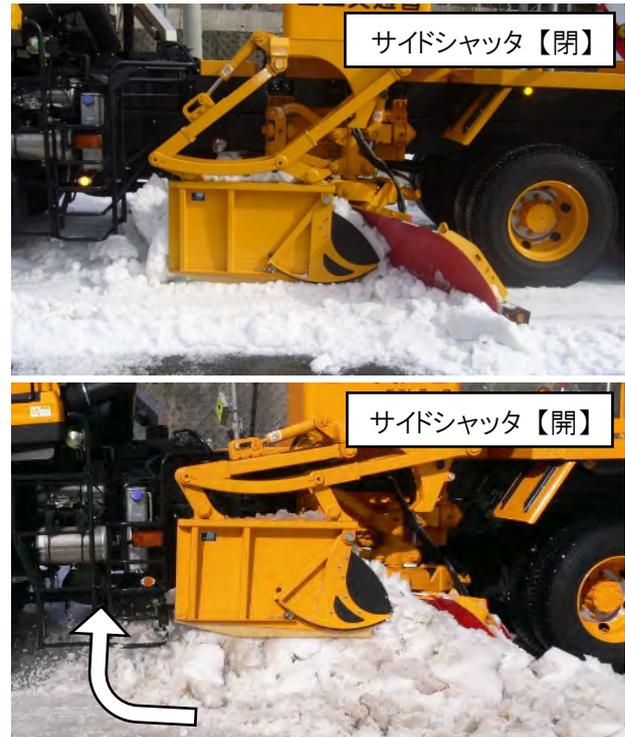


写真-3 サイドシャッタ動作状況

### (1) 自車位置情報

MC化の検討に際し、自車位置情報の取得に関しては、精度、費用等を考慮した結果、2018年11月より運用が開始された準天頂衛星システム「みちびき」のセンチメートル級測位補強サービス (CLAS) を採用することとし、その公称精度は水平誤差 12cm、垂直誤差 24cm である。

衛星受信機の精度を検証するため、一般国道49号福島・新潟県境から新潟県新潟市までの片道68kmについて、「みちびき」の受信機とRTK-GNSS (VRS方式) とを搭載した試験車両で走行した結果、誤差30cm以下が走行した区間の6割程度という結果であった。

上空が開けた平野部では公称精度内に収まるがトンネル等の上空遮蔽物、山間部や樹木が密生しているような衛星を捕捉しにくい区間においては誤差が生じていた。

また、トンネル出口から衛星を捕捉するまでに数十秒を要する場合もあり、常時、精度の高い自車位置情報を取得するために準天頂衛星システムを補完する技術の検討が課題として残った。

## (2) 地図データ

MMS（モバイル・マッピング・システム）で取得したレーザ一点群データから、除雪トラックの作業装置の制御に必要な地物等の情報を抽出し、地図データを作成した。（図-1）

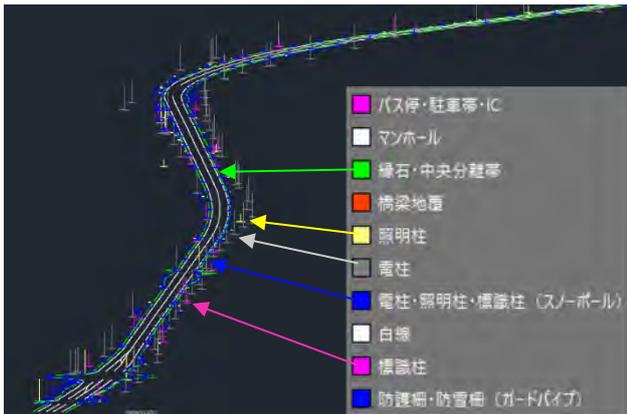


図-1 MMS から作成した地図データ

MMS の公称精度は、水平・垂直誤差ともに 25cm であるが、今回作成した地図データは水平誤差 5cm、垂直誤差 6cm となった。

## (3) 運転技術データ

サイドシャッタの自動制御を行うため、ドライブレコーダー、データロガーといった記録機器を除雪トラックに搭載し、実際の除雪作業におけるオペレータのサイドシャッタ操作等、運転技術データを収集、解析した。

解析したデータを MMS から作成した地図データに反映させ、除雪作業用地図データを作成した。（図-2）

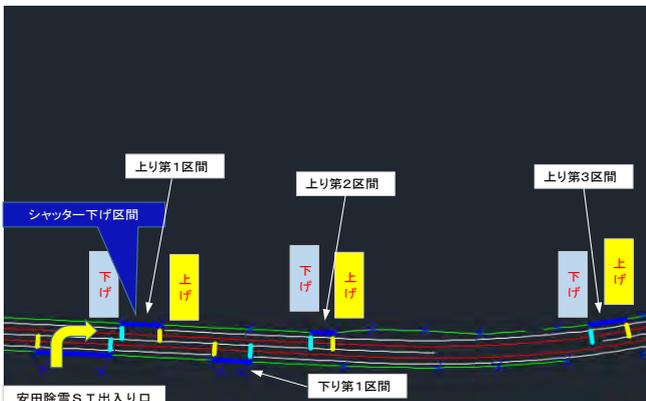


図-2 除雪作業用地図データ

「みちびきの受信機」「MMS から作成した地図データ」「除雪作業用地図データ」を組み合わせることで遮蔽物等が無い区間においては、MCに必要な精度の高い自車位置情報を取得することが可能となった。

## (4) 制御ユニット

サイドシャッタを MC するための制御ユニットは、MMS から作成した地図データと除雪作業用地図データをインストールしたタブレット端末（図-3 ①）、「みちびき」の受信機（図-3 ②）、制御装置（サイドシャッタへ動作信号を出力する機器）（図-3 ③）で構成されており、各機器を LAN 通信で交信することで制御を行い、自車位置と地図の基準点が一致した際に動作信号を出力する仕様で製作した。（図-3）

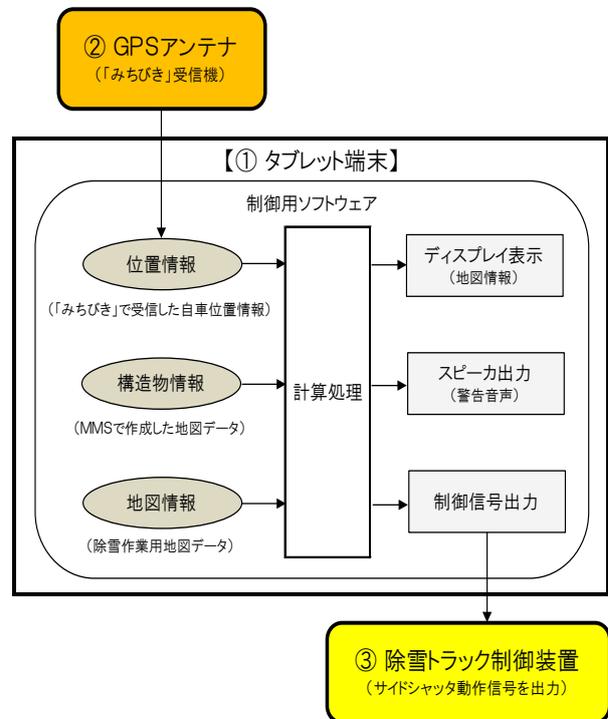


図-3 制御ユニットイメージ

## (5) サイドシャッタ現道試験

除雪トラックに制御ユニットを搭載し、実際の除雪作業と同様にサイドシャッタが開閉することを確認するため、現道に設定した試験区間において動作確認試験を行った。

サイドシャッタの動作位置は、除雪作業時に操作するオペレータ（助手）からの聞き取りに基づき、乗り入れ部（サイドシャッタを閉める区間）の始まりまでに全閉、通過後に全開となるよう設定した。試験の結果、ほぼ設定どおりの位置で動作していることを確認したほか、除雪トラックを担当するオペレータ（助手）同乗のもと、動作状況を確認

してもらったところ、実際の操作と違和感のない位置で開閉しているとの評価をいただいた。また、2020年2月7日夜間の降雪に際し、一般国道49号において、MCを使用した除雪作業を行い、実際の除雪作業にも問題なく使用できることを確認した。(写真-4)



写真-4 サイドシャッタ MC の動作状況

### 3. まとめ

これまでの検討結果から、サイドシャッタのMCは実用域に達したと判断する。

2020年2月20日には、報道機関、関係機関、除雪作業従事者を対象に現道での公開試験を開催するなど、除雪トラックMCの現状を報告(広報)したところである。(写真-5)



写真-5 報道機関による取材状況

ただし、衛星の不感帯における自車位置情報の測位等について課題が残るなど、他の作業装置のMC化と合わせて、課題解消に向けた検討の継続が必要であると考えられる。

### 4. おわりに

引き続きフロントプラウ、グレーダ装置について検討することで除雪トラックの作業装置MC化を進める。

また、ICT(情報通信技術)は日進月歩であることから、将来的には市場の技術開発動向等を踏まえ、自車位置情報以外の要素を取り入れた作業装置の高度なMC化の検討を進め、除雪作業の安全性、施工性、生産性のさらなる向上に努めていきたい。

### 参考文献

- 1) 一般社団法人日本建設機械施工協会北陸支部  
道路除雪オペレータの実態調査報告、2018年3月

## 29. ウェアラブルデバイスを用いた遠隔現場巡回システムの考察

清水建設株式会社  
清水建設株式会社  
清水建設株式会社

○ 佐藤 有  
鈴木 正憲  
奥田 悠太

### 1. はじめに

本稿では、先行論文である「ウェアラブルデバイス活用による建設現場の施工管理業務支援に関する考察」<sup>1)</sup>において報告したウェアラブルデバイスを用いた施工管理支援を基に、当社建設現場にて実施したウェアラブルデバイスによる遠隔現場安全品質巡回に関する取り組み事例とその有効性について報告する。

昨今建設業においては業務繁忙・新型コロナウイルス対策・国内外の遠方現場の増大から、現場巡回の頻度低下が懸念されており、通信機器を用いた TV 会議を活用した現場巡回の実施が進んでいる。当社も iPad などのタブレット端末を用いた遠隔による現場巡回を導入してきたが、端末操作時に両手が塞がってしまう・手袋をとる必要がある・防塵マスクを着用していると顔認証ができない、といった安全性・利便性の課題があった。そこでハンズフリー・音声のみで操作可能なウェアラブルデバイスの現場巡回での活用を試行した。

### 2. 建設現場での試行内容

#### 2.1 システム構成・機器詳細

ウェアラブルデバイスは、巡回者が頭部に着用可能なウェアラブルデバイス HMT-1（以下 HMT-1）を使用した。使用したウェアラブルデバイスの仕様と外観を表-1、表-2、図-1 に示す。ウェアラブルデバイスを用いて視覚を共有した TV 会議（以下視覚共有 TV 会議システム）は Microsoft 社の Teams（以下 Teams）を使用した。システム構成は図-2 に示す通りである。

表-1 ウェアラブルデバイス機能一覧

1. 視覚共有TV会議	視覚を共有しデスクから現場へリアルタイムに情報共有可能
2. 図面閲覧	本体に図面を保存、ハンズフリーで閲覧可能
3. 写真撮影	ハンズフリーで写真撮影可能
4. 動画撮影	ハンズフリーで動画撮影可能
5. データをクラウドへ送信	撮影した写真・動画をクラウドへアップロード

表-2 ウェアラブルデバイスの仕様

製造会社	RealWear, Inc.
製品名	HMT-1
防水防塵規格	IP66
重量	370 g
落下性能	2m
解像度	854x480 (WVGA)
カメラ性能	16メガピクセル
動画解像度	最大1080p@30fps
通信方法	Wi-Fi : 802.11 a/b/g/n/ac Bluetooth : BT 4.1 LE
GPS	GPS/GLONASS/BeiDou/Qualcomm Izat
電池容量	3,250 mAh（最大8+時間稼働）



図-1 ウェアラブルデバイス本体



図-2 視覚共有 TV 会議システムの構成

## 2.2 視覚共有 TV 会議機能の試行結果

今回のウェアラブルデバイスを用いた現場巡回の試行では、建設現場と清水建設本社間にて視覚共有 TV 会議システムを用いて接続した。巡回者が建設現場にて HMT-1 を着用し、本社では監督者が PC から Teams に接続し現場状況を確認した。

試行では、リアルタイムに鮮明な現場映像を共有することができ、双方の音声も途切れることなく円滑なコミュニケーションのもと巡回を実施することができた。本社側の監督者からは、「遠方現場まで移動時間を削減する事ができた、映像もクリアでタイムラグもなかったため実際の現場巡回と同様に現場を確認し安全上の課題を現場と共有する事ができた」との評価を得た。現場で対応した巡回者からも、「視覚を共有する事で通常の現場巡回と同様に、現場の状況を本社安全部門に報告する事ができた」と評価を得た。この巡回者は以前モニターの無い形式のウェブカメラを用いて遠隔現場巡回を実施したことがあったが、その際遠隔現場巡回では相手の状況を確認する事ができず、監督者の指摘箇所を正確に理解する事ができなかった。今回使用した視覚共有 TV 会議システムは、「ヘルメットに装着したカメラに本社の状況を映し出すことができ、監督者の指摘箇所を正確に理解する事ができた」との評価も得た。

課題としては、今回使用したカメラには手振れ補正機能がついていなかったため、カメラ装着者の歩行状況により映像にブレ（不鮮明な映像）が発生し、長時間画面を見続けることができない事が挙げられた。

## 3. 今後の展開

### 3.1 不鮮明な画像の改善

株式会社ザクティが製造している CX-WE100（図-3、表-3）ウェアラブルデバイスの導入により円滑に遠隔現場巡回の実施を可能にし、全国の現場への普及を行う。現在使用しているウェアラブルデバイス HMT-1 による視覚共有 TV 会議機能には手振れ補正機能が無く、会議室側の画面が大きく揺れることで、現場を確認している職員が長時間画面を見続けることができないという課題があった。この課題を解決するため CX-WE100 を用いた視覚共有 TV 会議の試行を検討している。本機器には高度な手振れ補正機能が搭載されており、HMT-1 を用いた視覚共有 TV 会議と比較して画面を見続けることによる負担が少ないという特徴がある。



図-3 遠隔現場巡回専用ウェアラブルデバイス本体

表-3 遠隔現場巡回専用ウェアラブルデバイスの仕様

製造会社	株式会社ザクティ
製品名	CX-WE100
防水防塵規格	IP65
重量	140 g
イメージセンサ	1/2.3型 CMOSイメージセンサ STARVIS™
総画素数	約1230万画素
記録	本体記録なし
防塵/防水性能	IP65
動作保証温度	-5°C~+50°C
電源電圧	DC5V ±5% (USBより給電)

## 3.2 ウェアラブルデバイスの多機能化

遠隔現場巡回機器としてだけでなく、次の様な機能の拡充を行う。

- ①音声入力のみで現場写真を撮影し現場内での情報共有に活用する
- ②多言語翻訳アプリの導入により外国人労働者とのコミュニケーションの円滑化に活用する。

## 4. おわりに

今後は、遠隔巡回においては手振れ機能補正を持つ CX-WE100 を、言語翻訳・帳票作成機能等施工補助用途として、HMT-1 を全国の工事現場に展開していく所存である。

## 参考文献

- 1) 清水建設株式会社 佐藤 有・清水建設株式会社 鈴木正憲・清水建設株式会社 奥田 悠太：「ウェアラブルデバイス活用による建設現場の施工管理業務支援に関する考察」, 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会

# 30. 施工現場でのリスク評価と映像を活用したリスク予知教育

## －アイトラッキング調査とVRの活用－

可児建設(株) 可児憲生 トライポッドワークス(株) 渋谷義博  
 (株)環境風土テクノ 須田清隆 (株)堀口組 漆館直

### 1. はじめに

地域を支える中小建設業は、地域のインフラの整備・維持の担い手であると同時に、地域社会の安全・安心の確保を担う守り手として、なくてはならない存在である。一方、それらを取り巻く状況としては生産年齢人口の減少や高齢化による労働力の大幅減少が見込まれ、施工ノウハウや経験を保有する熟練技術者の高齢化による退職や転職による建設ノウハウの喪失は、事業継続上の緊急な課題となっている。

本報告は、技術者のリスク判断が視覚情報を基に経験的、感覚的に行われることから、アイトラッキングを使った調査を実施し、施工現場空間におけるリスク注視度の高かった箇所やリスク抽出の視線動向などから、リスク発生確率の高い空間を対象に、数台の定点カメラを設置してその実効性をまとめている。同時に、定点カメラの設置では、リスクの緊張感を共有することができる 360° カメラを配置し空間緊張感を仮想体験し、技術者や作業員教育のリスク予知力を高める VR の有効性を報告するものである。

### 2. 経験知の差によるリスク認識特性

技術者の経験や立場によって異なる施工現場の品質面、安全面の着眼点をアイトラッキング調査で分析し、効果的な撮影ポイントや撮影範囲の決定により、施工現場での迅速なリスク管理を試行している。

眼球運動 瞳孔・角膜反射法 / 暗瞳孔法 / 角膜反射法  
 瞳孔 暗瞳孔法

### c. 被験者選定

	総数	調査適正数
若年者	9名	8名
経験知が高い	10名	7名

### 3. 検証結果

#### a. 法面作業(高所作業のリスク認識)

図-1 の経験 1~2 年の技術者は、足元の不安から階段付近を中心に視線が注視するなど、視野が狭い傾向にあった。一方、図-2 の経験 20 年熟練技術者は、法面作業の危険個所に視線が注視するなど広い視野であった。法面作業の危険予知を共有するために、熟練技術者の視点で注視度の高かった中段に 360° カメラを設置している。



図-1 若年技術者の高所作業のリスク着眼点



図-2 熟練技術者の高所作業のリスク着眼点



写真-1 アイトラッキング装置



写真-2 調査における装着状態

a. 計測装置仕様 (製品名: EMR-9)

b. 検知方法:

**b. 車両運転におけるリスク認識**

大別荊トンネル補修外一連工事に向かう道路での交通事故予防を目的に、運転経験が1~2年の技術者(図-3)と運転経験が20年の技術者(図-4)に対して、運転中の注視特性を確認している。図-3は、視線注視度が不安定で、かつハンドル(またはメータ)と目先に視線が集中し、周辺への認知が弱い傾向があるのに、図-4の熟練技術者は、視線に安定感があり、かつ視野範囲が広い傾向にあることが確認された。工事関係車両としての工事付近での事故予防から、若年技術者への運転許可を控える処置をとっている。



図-3 運転経験が少ない運転者の空間認知



図-4 熟練運転者の空間認知

**c. ICT 重機**

ICT重機(MG)のオペレータ教育において、熟練オペレータ(図-6)と未熟練オペレータ(図-5)の、注視傾向を確認している。明らかに熟練技術者は、ショベルのアームの位置関係を捉えているのに対し、若年オペレータはショベル刃先位置を注視する傾向が強いことが確認されている。また、作業時間(一回の掘削)においても、若年オペレータの方が、躊躇している分、手間取っていることが確認できる。



図-5 未熟オペレータの作業確認点



図-6 熟練オペレータの作業確認点

**d. 結果のまとめ**

検証結果から熟練技術者と経験が浅い技術者において、空間に存在するリスクやチェックポイントについて、説明がし難い暗黙知があることが確認できる。

**4. 映像臨場によるリスク緊張感の共有**

Visual-Constructionは、映像CIMの研究成果(国土交通省平成29年度政策課題解決型技術開発「中小零細建設業を対象にする映像を活用したvalueCIMの開発」)を活用し、映像や画像の活用によるスマートな建設工法を提案するものである。その中で、定点カメラによる映像は、時間経過で変化する空間的な特徴や輻湊する作業の様子など統合的な情報が得られる<sup>1)</sup>。しかし、通常のカメラでは、撮影範囲が限定されることから死角が生じてしまい、複数台のカメラが必要となることや、カメラ設置方法が課題になっていた。

本試行ではこれらの課題を解消する為に、全天候型の360°カメラを開発した。さらに、撮影した映像からリスクポイントのVR映像を生成しリスク緊張感の共有を図っている。

**a. 全天候型360°カメラの構成**

コンシューマー向け製品として全天球カメラの利用が

広まっているが、建設現場で要求される天候が変化することに対する防水防塵性能、長期連続稼働、録画データの大容量化など現場での長期的な定点撮影が困難である。そこで全天候で長期稼働が可能なネットワーク型魚眼カメラ(図-7)を2台組み合わせ、画像処理が可能な録画装置を使用することによりこれらの課題を解決している。2台分のカメラの視野は水平方向360°、垂直方向180°と全方位確保され、従来カメラのように高い設置場所の確保や画角の調整が無くなり、死角の少ない、設置空間上の記録を長期間撮影することができる。

### b. 360°カメラの構造、取り付け

360°カメラは背面の取り付け用の台座が2台対象となることを利用し、カメラの光軸がずれないようにネジ固定している。その際カメラの間に薄い取り付け金具を挟み込むことによって、カメラ三脚や工事現場の足場など構造物への取り付けが容易となっている。(図-7)



図-7 カメラ取り付け例

### c. 正距円筒画像への変換、VR映像の生成

カメラから取得される映像は、2つの円形な魚眼レンズ画像で取得される(写真-3)。

まず初めに2台のカメラ間で生じるフレームの時間的ズレとカメラが製造過程で生じてしまう位置的ズレを補正する。



写真-3 2台のカメラから取得される映像

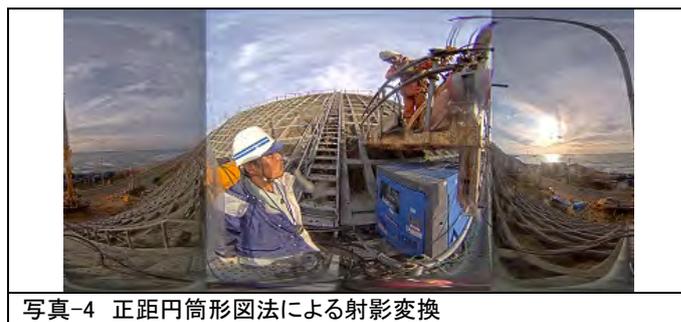


写真-4 正距円筒形図法による射影変換

次に2つの魚眼画像に対し正距円筒図法で透視射影変換する(写真-4)。正距円筒図法に変換する際の射影方式には、等距離投影法を用いており画像上の像高 $y$ (ピクセル)が次式で表せる。

$$y = f\theta \dots\dots\text{式(1)}$$

$f$ : 焦点距離

$\theta$ : 投射線がレンズの光軸となす角

最後に、これらの変換した画像から全天球イメージに再生可能なVR映像及び、VRタイムラプス映像を生成する。生成した映像は、VRゴーグル、スマートフォン、PCアプリによるインタラクティブな操作に連動した再生が可能となり、臨場映像を体験することができる。VR映像からは、高低差のあるクレーン作業の様子も把握でき、通常の定点カメラでは撮影が難しいアングルでの映像も確認できる(図-8)。

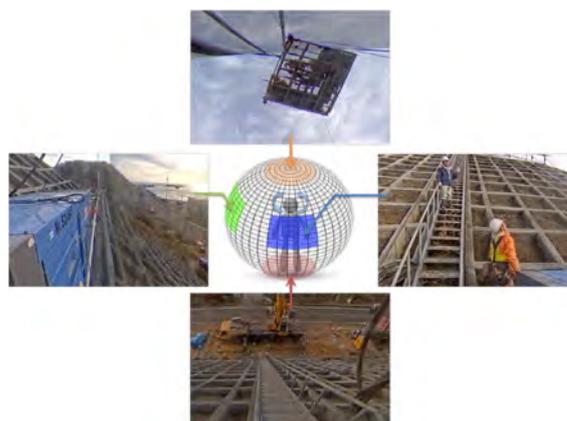


図-8 視点変更による全天球イメージの確認

## 5. 建設現場での試行

本工事は、(株)堀口組による留萌開発建設部発注「一般国道232号 苫前町力昼法面補修外一連工事」の法面補修工事であり、作業員の墜落事故防止策など安全対応が必要である(写真-5)。これらの安全対応に必要な作業(KY活動、安全教育)にVRによる緊張感を体験させ、社内の安全意識の共有を図った。



写真-5 高所作業の状況

具体的には、技術者や作業員への作業環境(状況)に対するリスクの捉え方を、事前にアイトラッキング調査にて確認し、双方の陥りやすいリスクポイントの危険回避行動を取らせた(写真-6)。



写真-6 アイトラッキングによるリスク着眼点



写真-7 リスク着眼点での作業内容(機材吊り込み作業)

## 6. 結果のまとめ

アイトラッキングの結果を踏まえた 360° カメラを活用した映像臨場によるリスク認識の試行の効果と課題を以下にまとめる。

① 建設事故が多い高所作業や玉掛作業などのリスク認識については、アイトラッキング結果を活用した 360° カメラの映像をVRで表すことで、一段とリアルなリスク緊張感を技術者、作業者に体験させることで、言葉では伝えにくい暗黙知の理解を以て工事の危険予知力を高めることが出来た。

② 本 360° カメラによる映像の振り返りにより、全方位かつ工事期間の始終を撮影できたことで、事故や生産性阻害要因の外的要因を踏まえた分析を可能にした。

③ 高解像度における撮影においては、データ転送によるネットワークの通信負荷の増大が要因で、映像転送に遅延が発生している。第5世代移動通信システム(5G)の活用が可能になれば、より臨場感のある仮想臨場に繋がると考える。

④ 映る対象物が増える為、映像確認の効率化が必要となる。AI による重要シーンの識別等、映像情報の圧縮技術が必要になる。

⑤ 本試行が実験的な要素もあり、2 台のカメラ映像の補正を手動で行っているが、今後は画像認識を利用した自動補正機能を使用し、映像処理の効率化を図る事が必要になる。

## 謝辞

本研究は、国土交通省「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」の助成を受けたものです。本論文に関しご協力頂きました関係者各位に感謝申し上げます。

## 参考文献

1) 渋谷義博: タイムラプス映像から読み取れる施工属性情報に関する検討, 土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集, VI-233, 2015

# 31. インフラメンテナンス新技術・体制等導入推進委員会 の取り組みについて

国土交通省 総合政策局 公共事業企画調整課

○東山 遼

## 1. はじめに

自治体では、限られた予算や人員等の制約条件の上でインフラメンテナンスを行う必要があり、その中で「新技術」の導入を推進することにより効率的にメンテナンスを行い生産性向上に寄与することが考えられる。国土交通省では、「インフラメンテナンス国民会議」（2020年2月時点：会員数1,949者）において、自治体のニーズ・企業のシーズのマッチングによる現場試行・導入に取り組んでおり、「インフラメンテナンス国民会議」を通じて紹介された技術の社会実装数は着実に増加している（2019年3月時点：6技術、71件）が、導入に向けて課題がある状況である。

自治体における新技術導入に向けた課題として主に「自治体側でのニーズ抽出上の課題」、「ニーズとシーズのマッチング上の課題」、「自治体内部の合意形成上の課題」の3つが考えられる。

（表-1）

表-1 自治体における新技術導入に向けた課題

<p>① 自治体側でのニーズ抽出上の課題 自治体の課題把握が漠然としており、解決策のイメージがないため、自治体側でニーズの抽出が適切にできていない場合がある。</p> <p>② ニーズとシーズのマッチング上の課題 「インフラメンテナンス国民会議」が主体となったマッチングでは、マッチングの場に技術的なコーディネートをを行う者が不在のため、自治体の漠然としたニーズに対して適切なシーズの組み合わせがなされていない場合がある。</p> <p>③ 自治体内部の合意形成上の課題 自治体に従来の技術と比較しながら、わかりやすく新技術のメリットを説明できる者が不在のため、自治体内部の合意形成が図りにくい場合がある。</p>
---

この様な課題の解決を目指し、自治体における新技術の導入支援を実施することを目的に「インフラメンテナンス新技術・体制等導入推進委員会」（委員長：岩波光保 東京工業大学 環境・社会理工学院 教授）を設置した。

## 2. 施策概要

本委員会は、内閣府の「官民研究投資拡大プログラム（PRISM）」を活用し「インフラメンテナンス国民会議」の加速施策として実施している。本委員会では、「新技術導入の手引き（案）」の策定に向けてモデル自治体における現場試行等を行い、新技術導入における課題抽出・整理を行っている。

既存の取組であるインフラメンテナンス国民会議が自然発生的なマッチングに対して、本委員会のモデル自治体での現場試行は、ニーズ・シーズのマッチングのコーディネート、現場試行、自治体内部の合意形成支援等を加えることで、自治体の新技術導入加速化に寄与するものである。（図-1）

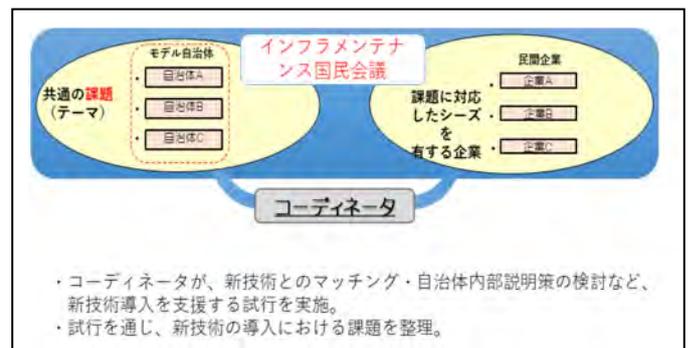


図-1 本施策によるモデル自治体での取り組み

なお、平成31年度のモデル自治体の公募は、インフラメンテナンス国民会議地方フォーラム・ニーズ調査より抽出された複数自治体での共通課題となっており、モデルケースとして新技術の導入が望まれているニーズを抽出することで、自治体のニーズを抽出した。（表-2）

その中から、対象施設が複数分野に跨っており、特に新技術導入への発展、導入によるメンテナンスの効率化やコスト縮減効果が期待される2つの応募テーマを選定した。（表-3）

応募テーマにてニーズ（テーマに関する悩み・課題を抱える自治体（施設管理者）あるいはそれらで構成される団体）およびシーズ（企業等の応募資格テーマに関する悩み・課題の解決手段（新技術）を有する民間企業や団体）を同時に公募し（公募期間：平成31年2月14日（木）～平成31年3月1日（金））、ニーズ11者、シーズ30者の応募があった。（表-4）

応募された自治体の中から、自治体横断的なニ

ーズや社会実装の実現性, マッチングの実現性を踏まえて「応募自治体が共有・活用可能なテーマ(課題)」, 「マッチングの実現性」, 「社会実装の有効性」, 「広域的な導入の展開」の4つの観点(表-5)でモデル自治体(テーマ1: 静岡県、テーマ2: 徳島県)を決定した。なお、シーズ技術については、モデル自治体の詳細なニーズを周知した上で参加意向確認を行い、参加希望者はモデル自治体におけるWGにおいてプレゼンを行った上で、マッチングを図ることとした。

表-2 モデルニーズ選定の考え方

選定の手順	考え方
① 自治体ニーズの収集・整理	インフラメンテナンス国民会議地方フォーラム・ニーズ調査より自治体のニーズを抽出
② 自治体横断的なニーズの一次抽出	収集されたニーズから全国に広く展開できる複数自治体に共通するニーズを選定
③ 社会実装の実現性を踏まえた絞り込み	技術を取り巻く環境を整理
④ マッチングの実現性を踏まえた絞り込み	ニーズに対するシーズ(技術開発)の動向を整理

表-3 応募テーマの詳細

<p><b>【応募テーマ1】</b>            点群データを活用した施設の管理効率化に資する技術(道路や河川管理施設等に関する点群データの活用技術等)</p> <p>○テーマの詳細            点群データの計測技術の進展や3次元モデルでの設計・施工の普及に伴い、点群等の3次元データの蓄積と多分野での有効活用が期待されている。これらの取得された3次元データを用いてインフラ維持管理に活用するための技術。</p> <p><b>【応募テーマ2】</b>            常時没水している構造物等を可視化し施設の管理効率化に資する技術(道路橋脚、ダム施設及び港湾施設等の没水部の可視化技術等)</p> <p>○テーマの詳細            常時没水しているダム上流面のゲート設備や橋梁基礎の洗掘などの点検・調査を目的として、水中を可視化する技術が開発されている。これらの水中可視化をするための技術。</p>
---

表-4 募集結果

テーマ	自治体	技術提供企業
テーマ1	神奈川県川崎市 神奈川県藤沢市 静岡県 長崎県 熊本県玉名市	18者 (24技術)
テーマ2	山形県 茨城県 岡山県 徳島県 愛媛県八幡浜市 沖縄県	12者 (13技術)
合計	11者	30者 (37技術)

表-5 選定の考え方

<p>① 応募自治体が共有・活用可能なテーマ(課題)            新技術の導入にあたって、応募自治体の多くが共有し、参考とすることができるテーマであること。</p> <p>② マッチングの実現性            新技術の導入を推進する仕組みを検討するにあたって、有効なニーズ・シーズマッチングの形成が期待できるテーマであること。</p> <p>③ 社会実装の有効性            新技術導入によるテーマ(課題)の解決が、社会的に大きな影響(効果)を与えるものであること。</p> <p>④ 広域的な導入の展開            新技術の導入について、特に単独での検討が難しい小規模自治体などを含めた広域的・自治体横断的な導入の展開が期待できるテーマであること。</p>
--

### 3. モデル自治体(第1サイクル)における現場試行

#### (テーマ1)

静岡県をモデル自治体として、4技術の現場試行を行った。なお、モデル自治体におけるWGでは、今井龍一准教授(法政大学)と、関谷浩孝室長(国土技術政策総合研究所)にコーディネートをお願いした。また、オブザーバとして、中部地方整備局企画部・神奈川県川崎市・神奈川県藤沢市・長崎県・熊本県玉名市に参加いただいた。13者から提案をいただき、そのうち4者(表-6)において現場試行を実施した。(表-7)

表-6 静岡 WG 現場試行参加者

○大阪経済大学・摂南大学・関西大学・(株)日本イン シーク・日本工営(株) ○(株)日立ソリューションズ ○日本電気(株) ○(株)パスコ
---

また、WGにおける現場試行の取組を、広く業界関係者に周知し、横断的に展開することを目的に、広報活動を実施しています。今後も引き続き実施していく予定である。(表-10)

表-8 徳島 WG 現場試行参加者

○(株)アーク・ジオ・サポート
-----------------

表-7 静岡 WG 実施状況

<ul style="list-style-type: none"> <li>・第1回WG (6/11) 現場試行実施候補の選定について議論(13者から提案)現場試行内容について、県と企業等で調整(図-2)</li> <li>・第2回WG (8/23) 現場試行実施計画について議論(現場試行を実施する4者を選定)</li> <li>・現場試行</li> <li>・第3回WG (2/25) 現場試行結果報告</li> </ul>
---

表-9 徳島 WG 実施状況

<ul style="list-style-type: none"> <li>・第1回WG (7/31) 現場試行実施候補の選定について議論(3者から提案)</li> <li>・現場試行内容について、県と企業等で調整</li> <li>・第2回WG (11/20, 11/22) 現場試行実施計画について議論(現場試行を実施する1者を選定)</li> <li>・現場試行 (12/10, 12/11) (図-3)</li> <li>・第3回WG (2/21) 現場試行結果報告</li> </ul>
---



図-2 第1回WG開催状況

表-10 広報活動の実施状況

<ul style="list-style-type: none"> <li>・国交省HPでの会議資料(各社の技術提案資料含む)の掲載</li> <li>・「建設技術フェア in 中部(10/16)」における講演(国交省)</li> <li>・「インフラテック展 2019(12/4~6)」における講演(静岡県、徳島県)(図-4)</li> </ul>
--

(テーマ2)

徳島県をモデル自治体として、1技術(表-8)の現場試行を行った。なお、モデル自治体におけるWGでは、中野晋 環境防災研究センター・センター長(徳島大学)と、加藤絵万グループ長(港湾空港技術研究所)にコーディネートをお願いした。(表-9)



図-3 現場試行状況

試行を終えてモデル自治体からは、「限られた期間の中で自治体が新技術導入の可否まで判断するのは難しかった。」「現場試行参加者には検討や検証のため多くの作業が発生したため負担をかけた。」等のご意見をいただきました。解決策としては、現場試行に際して、共同研究や協定など実装に向けた検討のための期間や予算を確保すること等が考えられ、現場試行時の安全管理に要する費用の負担や、テレビ会議の推進など、第2サイクルの取り組みに反映していきます。



図-4 インフラテック展 2019 講演状況

#### 4. 新技術導入の手引き（素案）

モデル自治体におけるSIP技術等を活用した現場試行結果や新技術を活用している先進的な自治体へのヒアリング、SIP成果等を踏まえ、導入検討の流れに沿った「新技術導入の手引き（素案）」を策定した。（表-11）想定読者としては、自治体において各種インフラの維持管理業務を担う職員と、インフラ維持管理における新技術を有する企業を想定している。（表-12）

表-11 記載項目例

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. インフラ維持管理における課題の明確化</li> <li>2. 新技術等に関する情報収集</li> <li>3. 入手情報から導入可否及び導入方法を判断</li> <li>4. 導入の意思決定及び予算獲得に向けた説明</li> <li>5. 共同開発・現場試行</li> <li>6. 調達</li> <li>7. 新技術の実導入</li> <li>8. 導入後の評価</li> <li>9. 技術自体や運用面の改善・改良</li> </ol>
---

表-12 想定読者

<ul style="list-style-type: none"> <li>・自治体において各種インフラの維持管理業務を担う職員 （新技術の導入に対してニーズを持つ現場職員が、本手引きを参照し、新技術導入を検討）</li> <li>・インフラ維持管理における新技術を有する企業 （新技術を保有しているが、自治体の活用実績が伸び悩んでいる企業が、本手引きを参照し、自治体との適切な関係性の構築方法を把握）</li> </ul>
---

また、自治体職員にとって読みやすいように、記述内容は簡潔にし、各内容が1ページで完結するように（図-5、図-6）すると共に4つの観点で作成した。（表-13）

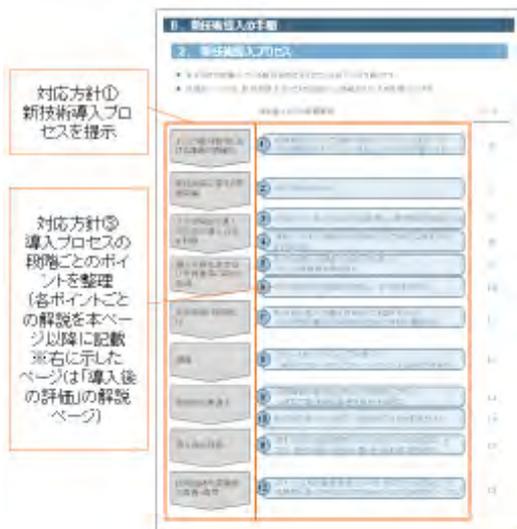


図-5 手引きのページ構成

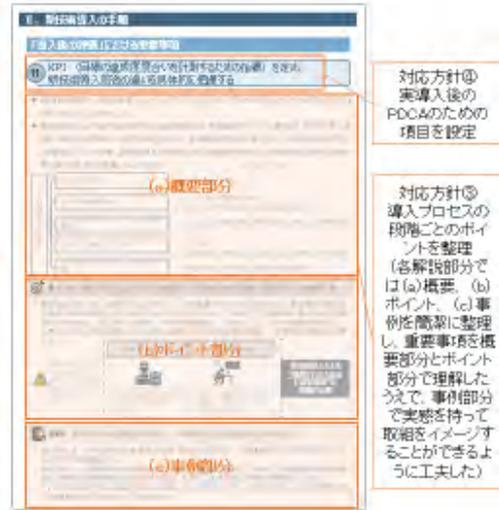


図-6 手引きの記載イメージ

表-13 手引きのポイント

<ol style="list-style-type: none"> <li>①手引きに新技術導入プロセスを提示 （新技術導入の一般的なプロセス図を示すことで新技術導入に向けたイメージを具体化）</li> <li>②手引きへの優良事例の追加（予定） （今後、新技術を活用した優良事例が、多様な領域で一定程度生まれた段階で、それらの効果を事例として取りまとめることを検討）</li> <li>③導入プロセスの段階ごとのポイントを整理 （新技術の導入に向けて留意する必要があるポイントや実際の取組事例を示すことで導入に向けた検討を円滑化）</li> <li>④手引きの導入プロセスに実導入後の PDCA のための項目を設定（PDCAのために留意すべきポイントを整理し、新技術導入以降も継続的に運用改善がされるように工夫）</li> </ol>
---

#### 5. モデル自治体（第1サイクル）における現場試行

第2サイクルの現場試行に向けて、公募を実施した。（募集期間：令和2年7月14日～8月11日）

本公募の特徴としては、インフラ技術総覧に掲載されたSIP技術の活用を希望する自治体を優位に評価すること、第一サイクルでは県を対象としたことから、今回は市町村を対象とする（2箇所を予定）ことが挙げられる。なお、複数の自治体が連携して応募する場合は都道府県も可とし、優先的に採択することとしている。

#### 6. おわりに

本取り組みにおきましては、委員の皆様、関係自治体や現場試行参加者等の皆様にご協力を頂き、感謝申し上げますとともに、R4年度の「新技術導入の手引き（案）」策定に向けて、引き続きご指導の程、よろしく願いいたします。

## 32. インフラ維持管理における AI・3次元モデルを用いた ロボット技術の活用拡大に向けた取組

国土交通省総合政策局 公共事業企画調整課

○ 川口 貴大  
渡邊 賢一

### 1. はじめに

我が国の社会インフラの維持管理をめぐっては、老朽化の進行、現場の担い手不足等が喫緊の課題となっている。国土交通省では、より効率的なインフラ点検を実施するための社会インフラ用ロボットの活用手法等を示すマニュアルを整備し、現場導入を推進してきた。

一方、点検支援技術等から得られる膨大な写真の整理作業や、構造物の変状等を抽出する作業には時間を要するため、これら作業の効率化が求められている。

効率化を実現する手法として、点検写真から構造物の3次元モデルを自動生成し、変状等を把握出来るビューアを用いて膨大な写真を管理することや、AIを用いて変状等を自動抽出することが有効であると考えている。

これまで、現場で取得したデータから3次元モデルを生成する試行や、AI開発に必要な教師データを作成し、開発者による教師データ品質の確認・AI性能評価手法の検討等を行ってきたため、本稿ではこれらの取組を紹介する。

### 2. 社会インフラ用ロボット現場導入の経緯

国土交通省及び経済産業省では、社会インフラの現場ニーズに基づき、国内外の異分野も含めた産学の技術シーズを踏まえ、「維持管理・災害対応」に関するロボットの活用化に向けた方策を検討するため、「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入検討会」を平成25年7月に設置し、「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入重点分野（5つの重点分野）」を同年12月に策定した（図-1）。

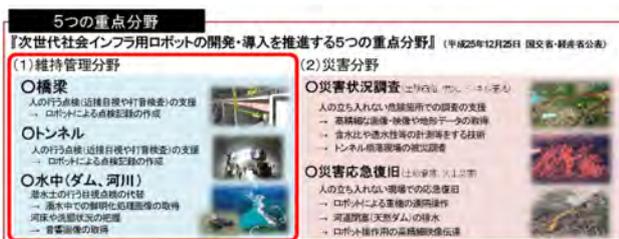


図-1 5つの重点分野

これを受け、国土交通省では社会インフラの維持管理や災害対応分野におけるロボットの開発・導入を促進し、現場実装を支援することを目的に「次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会<sup>1)</sup>」（以下、現場検証委員会とする）を平成26年2月に設置し、技術の現場検証・評価を行うこととした。

H26、H27年度は現場検証委員会を通じて5つの重点分野に関する様々な技術を公募し、検証・評価を通じて実用性を高めるための技術改良を促進した（H26年度：67技術、H27年度：70技術）。災害分野においては2年間の取組を通じて現場での導入が可能となった一方、維持管理分野においては、点検を支援し効率化を図るために必要な点検精度や作業の効率性について課題が残る技術も多く、H28年度以降も検証を引き続き行うこととした。

H28、H29年度はH27年度に検証・評価を受けた一部の技術に対して、ロボットによる点検支援の位置付け（ユースケース）を想定した上で、実用化に向けて達成すべき要求性能を設定し、精度検証や作業時間の短縮に伴う経済性等の検証を実施した（H28、29年度：16技術）。検証を行ったロボットの例を図-2に示す。



図-2 社会インフラ用ロボットの例

以上の取組を通じて、H30年度には維持管理分野の水中構造物（ダム）及び道路構造物（橋梁、トンネル）の領域において技術を活用する手法をマニュアル等にとりまとめ、実現場において技術を活用できる環境を整備した。

ロボットを用いた点検はロボットにより撮影した映像・画像を中心に行うこととなるため、水中構造物については、ロボット活用の適否・調査対象等の選定を行う上でダム総合点検等の目的を十分理解するとともに、ロボットの特性を踏まえて判断

する必要がある。このため、ロボットによる水中部点検の対象選定手法や点検手法等を「水中部点検におけるロボット活用マニュアル（案）【ダム堤体編／ダム放流設備編】平成31年2月」にとりまとめた<sup>2)</sup>。

道路構造物については、平成30年度に行った定期点検要領の改正までの過程の中で、インフラ点検用ロボット等「点検支援技術」は「点検に必要な知識及び技能を有する者」が点検の対象部位・部材・範囲や使用目的を判断した上で定期点検に活用するという方向性が示された。このため、点検支援技術の性能を示す性能評価項目を策定した上で、その開発者から現場検証等を通じて提出された性能値を「点検支援技術 性能カタログ（案）平成31年2月」にとりまとめるとともに、定期点検業務等において受発注者が点検支援技術を活用する際に、技術を選定し点検業務内で活用するまでの業務プロセス等を「新技術利用のガイドライン（案）平成31年2月」にとりまとめた<sup>3)</sup>。

これら現場検証委員会の取組を通じて様々な社会インフラ用ロボットが導入され、インフラ維持管理の効率化の実現に至った。

### 3. 更なる点検業務の効率化に向けた取組

社会インフラ用ロボットの中でも維持管理において活用されるインフラ点検用ロボット等（以下、点検支援技術等とする）は、ひび割れ等の損傷が判読可能な高精細な写真を撮影できるため、点検技術者は写真を基本として損傷図を作成することが出来るようになる。これにより、現地でのチョーキングやクラックスケールを用いた計測等を簡略化でき、人の作業を効率化するとともに、交通規制による損失時間を削減することが期待される。

一方で、点検支援技術等によって高精細な写真を撮影するには、構造物の近傍に寄って撮影する必要があるため、撮影された写真は画角が狭く単体では撮影場所を理解しにくく、単純に撮影した写真を蓄積していくだけでは膨大な写真の整理だけに内業の工数を要する恐れがある。また、帳票作成に必要な、構造物の損傷を判読し損傷情報を記録する作業は、点検写真と過去の点検成果等をもとに人手で行う必要があり、この作業の効率化には至っていない。

まず、膨大な写真を整理する手法の一つとして、点検写真から構造物の3次元モデルを作成し、損傷の経時的な変化を把握出来るビューアを用いて管理する手法が考えられる。また、点検写真をもとに損傷情報を記録する作業を効率化する手法としては、人工知能（AI）を用いた損傷の自動判読技術が有効であると考えられる。

以下、現在国土交通省にて検討を進めている道路構造物に適用可能な上記二つの手法を紹介する。

#### 3.1 3次元モデルを活用した損傷表現

点検業務においては、点検にて損傷が認められた箇所の写真や損傷情報等を帳票等によって記録を残せば、点検支援技術等によって撮影した写真の全てを納品する必要はない。

しかし、点検支援技術等によって撮影した高精細かつ膨大な画像から3次元モデルを生成し、正確な損傷位置を3次的に記録・蓄積することが出来れば、損傷の経年変化を容易に比較することが可能となり、診断等を行う技術者の判断への貢献も期待される。

これを実現するためには、3次元モデルの生成を可能とするデータ項目や仕様の標準を規定し、これらが成果品として納品される仕組みが必要である。

そこで、国土交通省では3次元モデルの作成に必要なデータに関する共通のデータ項目や仕様を規定し、点検支援技術等により取得した点検写真から、3次元モデルを生成するアプリケーション等を介して成果品を作成し納品する方法（図-3）を示す「点検支援技術（画像計測技術）を用いた3次元成果品納品マニュアル（トンネル編／橋梁編）（案）平成31年3月」を作成した<sup>4)</sup>。

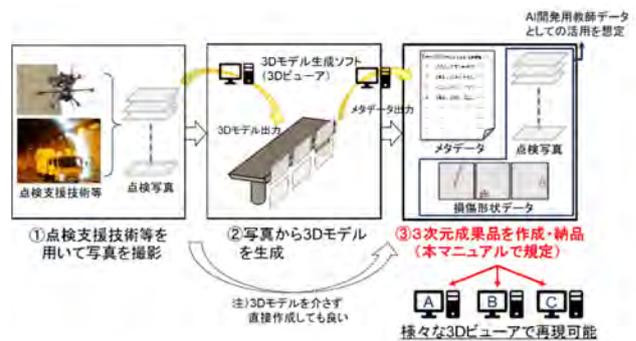


図-3 3次元成果品の納品までの流れ

これに基づく納品を行うことで、3次元モデルを生成し損傷を管理するアプリケーションに依存しない、互換性・継続性のあるデータを蓄積することが可能となる。

なお、本マニュアルで規定している納品物は、点検時に撮影した「点検写真」、損傷の位置や形状等を撮影した写真や3次元モデルに付加した「損傷形状データ」、撮影した写真に関する位置情報等を記載した「点検写真のメタデータ」の3種類であり、それぞれの詳細を以下に示す。

##### (1) 点検写真

点検支援技術等により撮影した写真の生データを示すものであり、3次元モデルを作成するためには、損傷部のみの写真だけでなく、損傷部以外の写真も必要であるため、損傷部以外も撮影対象となる。

点検写真は、その精度を適切に担保するため、点検写真の撮影条件を定めて、これに基づき適切に精度管理を実施する必要がある。本マニュアルでは、撮影した写真を後述するAIの技術開発に必要な教師データ作成のための写真として納品する場合の撮影条件を参考に示している（表-1）。

表-1 橋梁用教師データ作成用写真の撮影条件

仕様		留意点
カメラ機種	ミラーレス一眼カメラまたは同等以上	安定した高画質を確保するために必要 センサーサイズは、APS-C以上 コンタクトAFは使用しないこと 感度深度を確保するために必要
ISO感度	ISO200以下	ISO感度を上げてしまうと画像が平滑化してしまいひび割れが検出できない場合がある
ラップ率	オーバー・サイド30%以上を確保	平面展開図への合成処理時に必要となる
撮影角度	正対を原則とする	環境条件によるが、概ね10度までとする

(2) 損傷形状データ

損傷形状データは、損傷の概略、損傷の位置・形状、損傷の範囲などの情報であり、3次元モデルまたはレイヤ構造図画ファイル(2D)のいずれかの方法から選択してデータを作成することとなる。3次元モデルによる損傷形状データは、損傷を示す3次元のポリライン(ひび割れ等)、ポリゴン(腐食、遊離石灰等)を3DCAD等によって図示し、作成する。また、レイヤ構造図画ファイル(2D)による損傷形状データは、点検写真と分離可能なレイヤ構造を持たせて重畳された2次元図面上に損傷を示すポリライン、ポリゴンを図示し、作成する。

これは、従来の点検調書では損傷図として納品されていたデータに相当する。

(3) 点検写真のメタデータ

点検写真のメタデータとは、対象となる構造物が位置する座標系情報、点検写真またはカメラの位置座標・角度情報等を記載したテキストデータ(CSVファイル)のことである。

特に、位置座標・角度情報については撮影した写真が3次元空間上のどの位置、角度に存在するかを表現するために必要な情報であり、この表現方法には①点検写真の中心位置座標・角度②カメラの中心位置座標・角度③点検写真の四隅座標等が考えられる。

本マニュアルでは、これらメタデータの表現方法を規定しており、その一例を表-2に示す。

表-2 点検写真のメタデータ項目の一例

項目	入力条件	説明
位置座標記入方法	必須	位置座標の記入方法が、写真中心位置座標であれば0、カメラ中心位置座標であれば1、写真四隅座標であれば2を記入する。
位置座標	必須(位置座標記入方法「0」の場合)	・点検写真の中心位置を表すXYZ座標(x, y, z) ・点検写真の傾きを表すオイラー角(a, B, γ)または四元数(q0, q1, q2, q3)
	必須(位置座標記入方法「1」の場合)	・カメラの中心位置を表すXYZ座標(x, y, z) ・カメラの傾きを表すオイラー角(a, B, γ)または四元数(q0, q1, q2, q3)
	必須(位置座標記入方法「2」の場合、3点以上)	・点検写真四隅(右上, 左上, 右下, 左下)のXYZ座標(x <sub>UR</sub> , y <sub>UR</sub> , z <sub>UR</sub> ; x <sub>UL</sub> , y <sub>UL</sub> , z <sub>UL</sub> ; x <sub>DR</sub> , y <sub>DR</sub> , z <sub>DR</sub> ; x <sub>DL</sub> , y <sub>DL</sub> , z <sub>DL</sub> )

今後、定期点検業務等を通じて撮影した写真を

用いた3次元モデル作成の検証を行い、3次元モデルの活用場面の検討等を行い本マニュアルの見直しを図ることで、このような3次元モデルを活用した点検業務の高度化を目指す。

3.2 人工知能(AI)を用いた損傷の自動判読

また、現在は点検支援技術等を用いて取得した大量の写真から、人手により損傷を判読しているが、将来的には人工知能(AI)を活用して損傷を自動判読することにより、点検記録作成に要する人の作業を支援することが出来ると考えている。点検フローの将来像について、図-4に示す。



図-4 点検フローの将来像

従来点検では、人が構造物を近接目視し、その視覚情報(入力)を頼りに点検要領(ルール)に基づき点検記録(結果)を作成していた。この流れをAIで実現する場合、まず、点検で取得した写真(入力)と点検技術者が判断した点検記録(結果)を基に、その判断のポイントをAIが学習するための教師データが必要となる。教師データを用いてAI(学習モデル)が学習することで、AIは入力から結果を推論できるようになり、損傷の自動判読を行う。

このようなAIの開発を行い、自動判読の精度向上を実現するためには、AIに学習させるための教師データを大量に準備する必要がある。教師データ作成に必要な作業自体は、点検写真のどこに損傷があるかを写真上にタグ付け(アノテーション)するだけであるが、納品された点検写真は施設管理者の所有物であること、また、損傷箇所を示すアノテーションの精度管理には点検技術者の知識や技能を必要とするため、AI開発者のみでは開発が

困難であることなどから、教師データの整備をまずは協調領域として国が行うことで、民間のAI開発を支援することが出来ると考えている。AIの開発や活用の流れを図-5に示す。

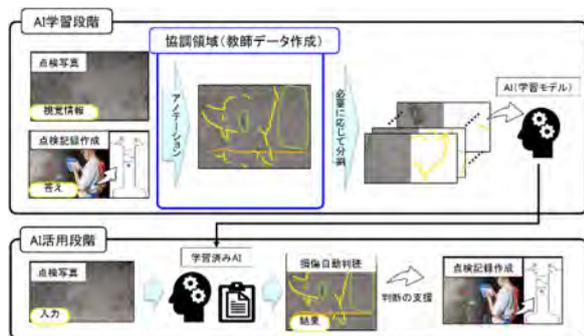


図-5 AI 学習に必要なデータと AI 活用のイメージ

そこで、国土交通省では、教師データを作成し、これをAI開発者へ提供しAI開発を支援するとともに、開発されたAIの性能評価等を行うことを目的に「AI開発支援プラットフォーム」の設立を検討している(図-6)。

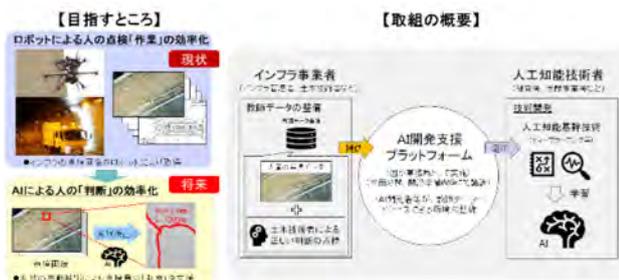


図-6 AI 開発支援プラットフォームの全体像

本プラットフォームの設立に先立ち、良質で効率的な教師データ整備のあり方や、点検に関するデータの取得・保存・分析・活用を円滑に行うデータ基盤のあり方の検討等を行うために「AI開発支援プラットフォームの開設準備ワーキンググループ」(以下AI-PF準備WG)を設置<sup>6)</sup>し、検討を進めている。

平成30年11月2日に第1回のAI-PF準備WGを開催し、教師データとする元写真に求める仕様やアノテーションの仕様を検討してきた。令和元年7月に第2回を、令和元年11月に第3回を開催し、試作した教師データに対する意見聴取を通じて、今後協調領域として整備する教師データの仕様の見直しを行った。

令和2年度以降は、過年度整備した教師データを用いて試作されたAIの性能評価試行や、AIを実現場に導入した際の活用効果の検証を行う予定である。AIの性能評価試行は、過年度整備した教師データの内、WGの会員に公開していないデータを用いて実施する試験であり、統一された条件下

で定量的に検出率を評価することで、現状のAI性能を明らかにするとともに、実装に向けて現状のAI技術が解決すべき課題を明らかにすることが出来る。また、AIの活用効果の検証は、通常の内業作業と比較してAIを活用した際にどの程度の負担軽減がなされるか、作業時間の測定や作業員へのヒアリング等を通じてその効果を明らかにすることで、点検技術者がAIを活用するインセンティブを高めることが出来る。

このように、今後はAIの実装や活用推進に向けて取組を進めることが重要となってくる。

#### 4. おわりに

建設技能労働者数が減少し、老朽化が進むインフラを数多く抱える我が国においては、既存のインフラを効果的、効率的に維持管理していくことが重要である。

様々な点検支援技術等が市場に現れ、インフラ点検における人の作業の支援が図られる中、本稿で紹介した点検業務の更なる効率化を目指すロボット技術に関する取組が、更なる点検支援技術等の開発・導入を後押しし、インフラ維持管理全体の更なる効率化・高度化につながることを期待している。

本取組を推進する中だけでなく、その先の施策を検討する際にも、常に民間の技術シーズや現場ニーズの動向に注目しながら、国の役割や着手すべき協調領域を適切に見極め、新しい技術の社会実装による建設現場の生産性向上に貢献して参りたい。

#### 参考文献

- 1) 次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会  
[https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei\\_constplan\\_fr\\_000024.html](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei_constplan_fr_000024.html)
- 2) 指針・ガイドライン等(水管理・国土保全局)  
[https://www.mlit.go.jp/river/shishin\\_guideline/index.html](https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/index.html)
- 3) 道路の老朽化対策(道路局)  
<https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobohozen.html>
- 4) ICTの全面的な活用  
[https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei\\_constplan\\_tk\\_000031.html](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei_constplan_tk_000031.html)
- 5) AI開発支援プラットフォームの開設準備WGの設置(平成30年7月27日記者発表)  
<https://www.mlit.go.jp/common/001247205.pdf>

# 33. 排水機場の状態監視モニタリングシステム構築と異常データ検知

## AI 手法に関する研究

(国研) 土木研究所

○ 須山 友貴  
上野 仁士  
黒田 浩章

### 1. はじめに

河川に設置している排水機場は、洪水被害防止が目的である極めて重要な社会インフラである。従って、確実な稼働が要求される。公共事業予算は、平成 24 年度頃まで削減の傾向が続き、その後多少増加に転じた。最近約 6 年間は、当初予算約 6 兆円で推移している。一方、国土交通省所管の排水機場では、設置後 40 年を経過する設備は全体の半分を超え、今後も急速に増加していく。

排水機場は、老朽化によって故障発生リスクが増大している。従来技術では、故障検知・予兆検知が難しく、時間計画保全を実施していた。しかし、時間計画保全の実施には余計なコストが生じている。

従来技術のままでは、限りある維持管理予算で全国の排水機場を整備しきれなくなる恐れがある。従って、限られた予算で、効率的かつ効果的な維持管理を行うことが求められている。

具体的な解決策として、状態監視技術が挙げられる。これは、設備の状態を正確に診断し、的確な整備時期を判断する技術である。

そしてゆくゆくは、状態監視保全のための診断技術の研究を進め、現場導入を図る。異常検知率・診断精度の向上、診断者不足への対処も必要である。

本発表では、状態監視モニタリングシステムの構築と、その蓄積データを活用した異常検知・自己学習型の AI 検知モデル開発に関する研究について述べる。

### 2. 本研究のロードマップ

本研究のロードマップを図 1 に示す。“モニタリングシステム 基本部構築”、“モニタリングシステム コア部構築”は昨年度までに実施した<sup>1),2),3)</sup>

本研究の対象である排水機場は、豪雨・洪水時など、必要時のみに稼働する“非”常用設備である。従って、運転時計測データの収集が困難なのが特



図 1 本研究のロードマップ

徴である。本運転(定格高負荷運転)のデータは計画的に収集出来るものではないため、月一回程度実施される管理運転時のデータを収集し、それを基に診断を行わなければならない。管理運転は本運転と異なり、低負荷・短時間であるので、診断は困難である。

また、異常検知出来る範囲が限定的でもあるのが課題である。つまり、機器不具合症状が進行して

からでないとは検知出来ない。そこで、原動機機器、主ポンプ機器などにセンサを取付けて、異常予知を自己学習する AI 検知モデルの開発を行うことで、重大故障に至る前に保全を実施することが可能になる。

### 3. 状態監視モニタリングシステムの構築について

全国にテストベッドとして選定した排水機場の運転データを収集、研究所のサーバに送信するシステムを構築した。システムのイメージを図 2 に示す。

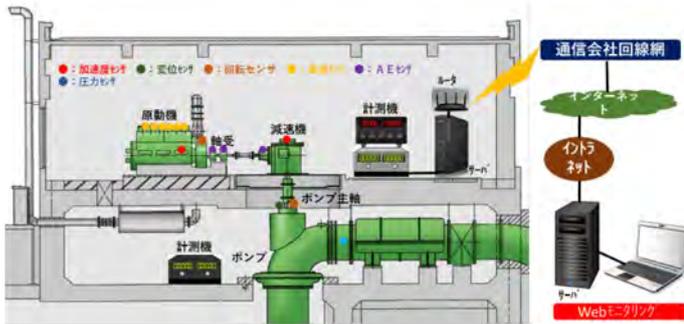


図 2 状態監視モニタリングシステムのイメージ

各種センサを常設型として、常時モニタリングを出来るシステムを検討した。各センサと計測パラメータ、及び検知できる故障との関係を表 1 に示す。各センサの概要を表 2 に示す。

これらの故障は、全国設備故障調査結果で、発生件数の多いものを選定した。異常検知 AI 検証項目としているものである。ポンプ主軸変位振動・ポンプ本体加速度振動・原動機本体加速度振動・原動機排ガス温度（一部の機場のみ）は、運転時に自動的に計測データを収集・記録する。

運転計測データを収集・記録するテストベッドは、全国に 3 地域・4 機場・8 台設けている。今年度、更に 2 地域・1 機場・3 台追加する計画である。

地域は、北海道・東北・関東、今年度追加する排水機場が九州というように、地域での偏りを無くすよう配慮している。排水機場の稼働パターンなどが地域によって異なる場合があるからである。また、原動機についても、ディーゼルエンジンだけでなく、ガスタービンのデータ収集も行っている。

データ収集・送信システムが、ある程度構築できたので、今後このシステムに異常予知・自己学習型の AI 検知モデルを実装して、テストベッドで AI モデルの効果を検証する。

表 1 各センサ等、計測パラメータ、検知する故障

対象機器	設置部位	センサ等の種類	計測パラメータ	検知する故障
原動機	原動機本体側部	加速度計(X,Y,Z)	3方向の加速度	転がり軸受の異常
		アコースティック・エミッションセンサ	弾性波	
	原動機本体下部	潤滑油採取	鉄粉濃度	機器内部の摩耗傾向
	排ガス管出口	排ガス温度	温度	エンジン燃焼状態
排ガス組成		CO,CO2,NO,NO2	エンジン燃焼状態	
主ポンプ	主軸軸受周辺部	渦電流変位計(X,Y)	変位	アンバランス(軸曲がり) ミスアライメント(芯ずれ) 水中軸受の緩み・がた インペラの摩耗
		アコースティック・エミッションセンサ	弾性波	
	主軸	回転計	回転パルス	(データ収集開始トリガー)
	吐出管	主ポンプ圧力計	吐出圧	
減速機	減速機本体	加速度計(X,Y,Z)	3方向の加速度	転がり軸受の異常 歯車の異常

表 2 各センサの概要

渦電流変位計(X,Y)	加速度計(X,Y,Z)	アコースティック・エミッションセンサ
センサ内のコイルに高周波電流を流すことにより、高周波磁束が発生する。この磁界内に測定対象物(金属)を置くと、対象物表面に渦電流が発生する。この渦電流が、コイルと測定対象物との距離が近いほど大きくなる性質を利用して変位を計測する。	圧電素子に変形を加えると、電荷が発生する原理を利用して、振動体に固定して、振動加速度を測定するセンサ。X, Y, Zの3次元を計測できる。	圧電素子を用いた高感度型センサ。振動体に固定して、材料にき裂が生じる際に発生する弾性波を測定する。

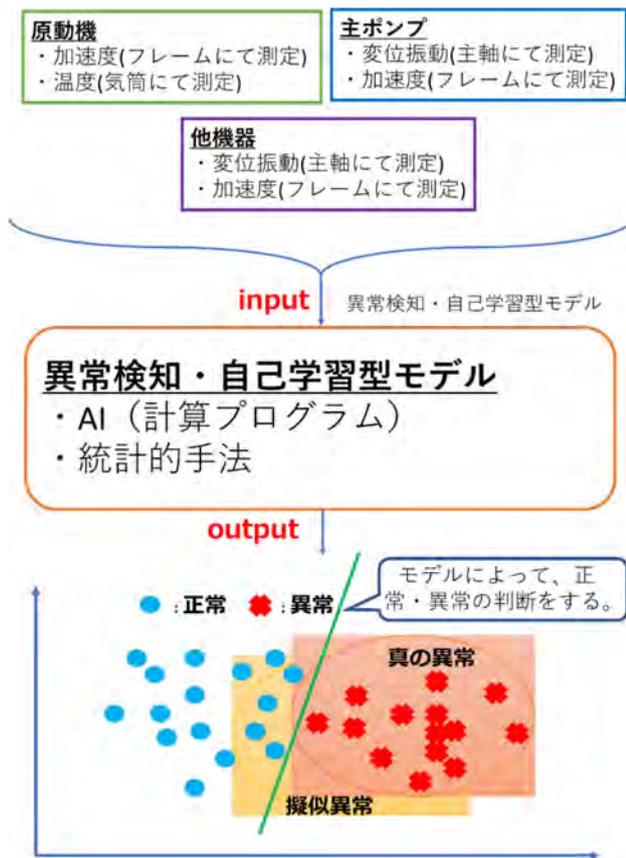


図 3 異常検知・自己学習型の AI 検知モデルのイメージ

#### 4. 異常検知・自己学習型の AI 検知モデルの開発について

##### 4.1 概要

状態監視モニタリングシステムから得られるデータに基づいて、いち早く異常を察知して、修理費用が大きくなる前に必要最低限の費用での整備が可能となるよう、AIによる早期異常検知に取り組んでいる。

常用設備の故障診断技術は、一定程度確立しているが、排水機場のような“非”常用設備については未確立である。振動解析等による従来技術では必ずしも充分でないことから、異常検知・自己学習型の AI 検知モデルを開発し、運転不能や停止の解消、重大事故による修理費増大、修理期間長期化の回避、現場技術者の負担軽減を図ることを目指す異常予知・自己学習型の AI 検知モデルのイメージを図 3 に示す。

##### 4.2 これまでの成果

異常検知・自己学習型の AI 検知モデルの判定精度向上を目的として、既存の AI アルゴリズムについて、試行検証を行い、判定精度について、評価・取りまとめをした。対象はテストベッドとした全国 3 地域 4 機場 8 機の排水機場である。

テストベッドの 4 機場から得られた状態監視データについて、既往研究で、ある程度の有効性が確認された AI アルゴリズム(OCSVM(One Class Support Vector Machine)、LOF(Local Outlier Factor)、MT (Maharanobis-Taguchi System))による異常検知モデルを構築した。

昨年度までの研究で、定期的な管理運転時データを基にしても、ある程度の AI 診断が可能であることが分かった。具体的には、主ポンプ主軸変位振動・ディーゼルエンジン加速度振動・ガスタービンエンジン加速度振動について、OCSVM・LOF 及び MT については、正常データのみを学習した教師無しモデルで異常データの判別が出来ることが分かった。

更に、テストベッドの 4 機場から得られた状態監視データを、逐次 AI 研究用サーバに送信・蓄積することにより、実運用に近い環境で異常検知モデルの検証・改善を可能にした。このデータの蓄積は、継続することによって、後々ビッグデータとなっていくことを想定している。

排水機場は、月一回程度の管理運転時のデータしか、通常採れない上、この時に採れるデータは正常データである。従って教師無しモデルとなる。

AI アルゴリズムのうち、OCSVM と LOF について検証した。これは、ガスタービンエンジンの加速度振動についての異常検知試行である。原動機については燃焼振動を、減速機については歯車異常のデータを収集した。教師無しモデルにおける AI 検知モデルの結果を図 4 に示す。OCSVM、LOF とともに正常・異常を検知出来ている。

ディーゼルエンジンについては、教師ありモデルの検証を実施できた。これは、機器更新時のタイミングに、あえて様々な異常が生じる運転を行い、意図的に故障データを採ったものである。教師ありモデルを構築し、異常パターンの分類を試みた。

OCSVM による異常パターン分類結果を図 5 に示す。これは、排ガス成分濃度データについて異常パターンを分類したものである。OCSVM の正答率は 98.0%であり、十分な故障パターン分類が出来ていると考えられる。

##### 4.3 今後の計画

まず、異常検知・自己学習型の AI 検知モデルが、異常検知支援ツールとしてより有用なものになることを目的として、既存のアルゴリズムについて、試行検証を行う。そして、正常・異常の判定精度向上の評価・取りまとめを行う。今後の計画を表 3 に示す。

表 3 今後の計画

<p>◆ <b>状態監視モニタリングシステムの検証・改良</b></p> <p>モニタリングシステムから得られたデータを収集分析し、異常検知AIモデルの観点からデータの有効性を検証する。</p>
<p>◆ <b>異常検知AIモデルの検証・改良</b></p> <p>異常兆候データについて、技術者による精密診断を実施し、AIモデルの結果と比較検証する。</p>
<p>◆ <b>他排水機場の状態監視データの収集</b></p> <p>昨年度までに構築したテストベッド以外の排水機場においても、教師データとなる状態監視データを取得する。</p>

追加するテストベッドは、老朽化が著しく、かつ運転頻度が高く、運転時間が長い排水機場を対象にして選定する。

今後、オーバーホール結果などと比較して、教師データの一部とする予定である。

5. 期待される効果

異常検知・自己学習型のAI検知モデルを導入することによって、下記のような効果が期待できる。

- ・故障による運転不能や運転停止を回避でき、内水氾濫から住民の生命・財産を確実に守る。
- ・故障の早期発見による重大故障の回避・設備修理費の低減・修理期間長期化の回避ができるようになる。
- ・自己学習で故障管理値を設定できるようになり、技術者の負担軽減・技術者不足への貢献・異常検知精度向上に資する。

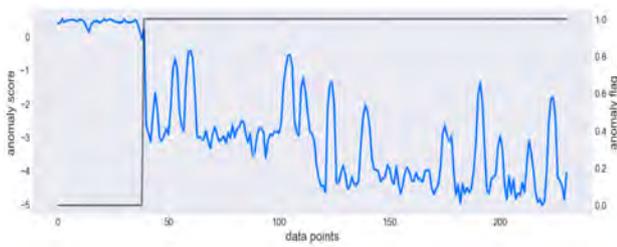
謝辞

テストベッドのご提供、及び各種計測等へのご協力を頂いた各地方整備局・事務所の方々に、この場を借りて、厚く御礼申し上げます。

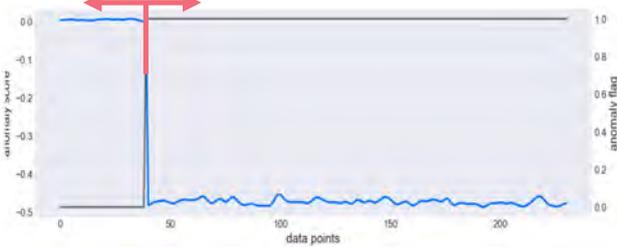
参考文献

- 1) 中島淳一・梶田洋規・藤野健一：河川ポンプの多様な診断技術，土木技術資料59-8，pp.22～25，2017
- 2) 吉田潔・上野仁士・中島淳一・新田恭士：モニタリングシステムとAI技術による河川ポンプ設備の異常の検出，土木技術資料62-4，pp.34～37，2020
- 3) 新田恭士・上野仁士・吉田潔・中島淳一：排水機場ポンプ設備のAI異常検知の取り組み，ぽんぷNo.62，pp.10～13，2020

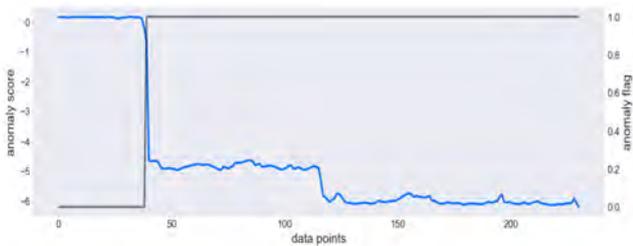
減速機



Healthy Anomaly



原動機



Healthy Anomaly



図 4 教師なしモデルにおける AI 検知結果 (上段：LOF、下段：OCSVM)

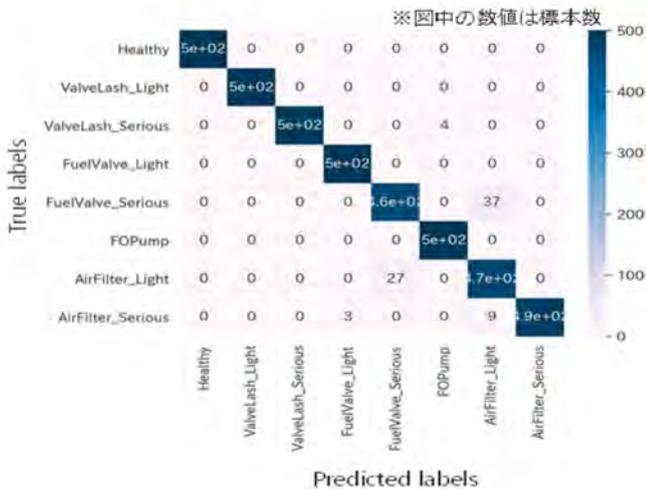


図 5 OCSVMによる異常パターン分類結果

## 34. 高温域における煙突補修装置の開発

### －高温域煙突内部吹付装置－

○(株)奥村組 城井光雄  
日本製鉄(株) 丸山宣男  
日本製鉄(株) 小林淳二

#### 1. はじめに

製鉄所施設の鉄筋コンクリート造煙突は、燃料の燃焼にともなう熱風および排出ガスの影響からコンクリートを保護するために、内側に空気層を挟んで耐火レンガ層が設けられている。この耐火レンガ層は、熱風および排出ガスに直接接触するため、目地の亀裂やレンガの脱落などの損傷を受けやすく、放置すれば、躯体コンクリートが直接熱風等に晒されて、強度低下やひび割れ、鉄筋腐食が進行することになる。対象となる煙突は高さ50m以上のものが多く、地震や台風により大きな被害が発生することが考えられる。

煙突の機能維持のため定期的に耐火レンガ層の劣化状況を診断し、改修を行う必要がある。一般的に用いられる改修方法として、耐火レンガの張替えや耐火材の吹付けが挙げられるが、どちらも施設の稼働を停止する必要がある、長期間稼働を停止できない施設では、改修を実施することができないのが現状である。

このような現状から、抜本的な改修を行うまでの応急対策として、施設の稼働を停止することなく、煙突内部調査に併せて耐火レンガの劣化部を吹付補修する装置の開発を目指した。

本開発は、コンクリートの劣化進行を抑制して、改修時期を延ばすため「無線操作による遠隔操作での吹付補修を実施する装置」を開発することを目的とする。

本報では、開発におき実施した要素試験の結果および実煙突での実証試験結果について報告する。

#### 2. 装置の開発方針

本装置は、吹付機械、吹付材料、動力、無線通信装置等を搭載した耐熱容器を、クレーンで煙突頂部から吊り込み、煙突内部を昇降させながら吹付けを行う。吹付け時は、装置に搭載したネットワークカメラの画像をモニターで見ながら、遠隔操作を行う。また、高温度域(200℃)に適用可能とするため、容器を断熱材で被覆し、冷却材を内蔵している。さらにメンテナンスを考慮し、3分割できる構造としている。装置の概略構成を図-1に示す。

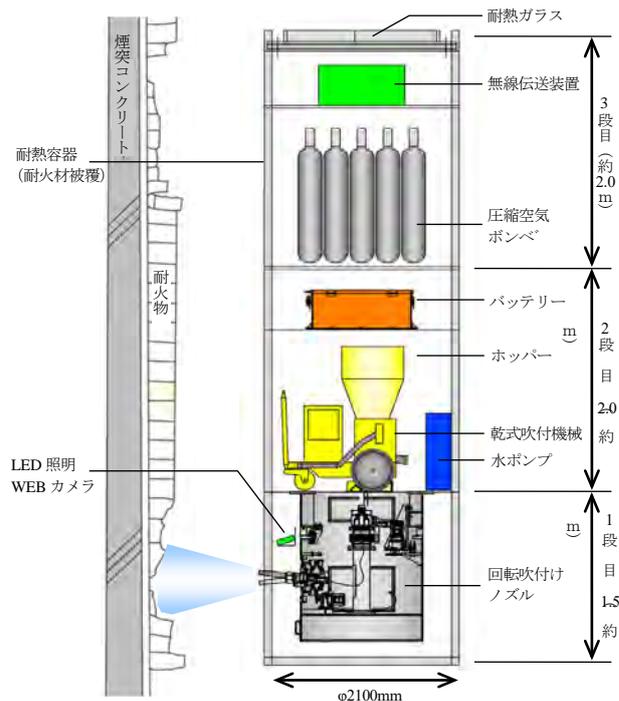


図-1 装置の概略構成

#### 3. 装置構成資器材の要素試験

本装置に搭載する資器材の仕様を決定するため、高温度域(200℃)における装置適用上の問題点を検討し、要素試験を実施した。

本装置の吹付け方式は、煙突の吹付補修で実績の多い乾式吹付とし、吹付機械は汎用機の中から選定した。

##### 3.1 電源システムの構成と動作確認

本装置は、高温度域での使用を想定しているため、引火性のある軽油等を燃料とした発動発電機の搭載はできない。発動発電機に代わりバッテリーロコで採用されている技術を応用した電源システムの構築を行った。電源システムの概略構成を図-2に示す。

本電源システムは、交流200Vの吹付機械のモーターを動作させるため、直流電源であるバッテリーを使用した。バッテリーによる直流電源96V(2V×48個)をアップバータ(DC/DCコン

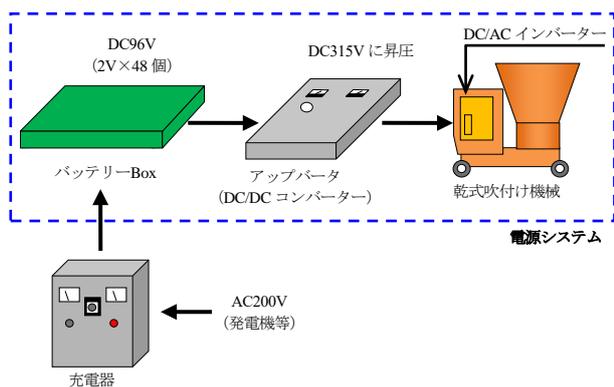


図-2 電源システムの概略構成

バータ)により 315V に昇圧させて、200V 以上の一定電圧を供給し DC/AC インバーターで交流 200V に変換する装置をパッケージング化して搭載した。

要素試験では、上記システムにより、吹付機械の動作確認を行った。一定時間吹付機械を稼働させ、ローター回転数の測定により、発動発電機と同様に正常に稼働することが確認できた。

### 3. 2 窒素ボンベによる機械構成と動作確認

本装置による吹付け時は、吹付機械へ圧縮空気を供給する必要がある。前項の発動発電機と同様に軽油を燃料とするコンプレッサーを搭載することはできない。コンプレッサーに代わり、不活性ガスである窒素ガスを使用し、エア供給のパッケージング化と所定流量の確保を行った。窒素ボンベによる吹付け時の概略構成を図-3 に示す。窒素ボンベを連結した集合装置に、高压充填 (14.7MPa) された窒素ガスを減圧する圧力調整器を接続し、吹付機械に窒素ガスの供給を行う。集合装置を写真-1 に、圧力調整器を写真-2 に示す。

要素試験では、上記の構成での吹付け動作確認とともに、気体流量および吹付け作業に必要な空気ボリュームの供給可能時間の測定を行った。

試験の結果、以下の点が確認できた。

- ・必要な気体流量に適した圧力調整器を選定すれば、窒素ボンベによる吹付けが可能
- ・バルブ解放時には、一次側圧力 (容器内) の低下によって二次側圧力 (調整圧力) が降下するため、圧力降下を考慮して調整圧力を設定する必要がある
- ・材料吐出量を 0.5m<sup>3</sup>/h とした場合、窒素ボンベ 1 本当たり 1 分間の吹付けが可能
- ・断熱膨張による窒素ガスの温度低下により、集合装置の銅連結管等が凍結する可能性がある

### 3. 3 ノズル回転装置の機構と動作確認

本装置では、吹付仕上がり精度に対応するため



写真-1 集合装置

写真-2 圧力調整器

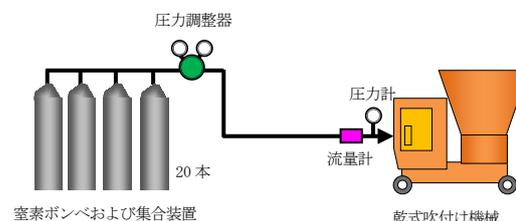


図-3 窒素ボンベによる吹付け時の概略構成

人手による吹付けを行う際のノズルの動きを再現し、円運動をさせながら吹付けを行う機構とした。ノズル回転部に、球面接触をする滑り軸受けである球面ブッシュを設けてノズルを回転させ、装置上部からの材料・水等を供給する配管部にスィベルジョイントを設けてドラムを周方向に回転させる構造とした。

ノズル回転装置の概略図を図-4 に示す。

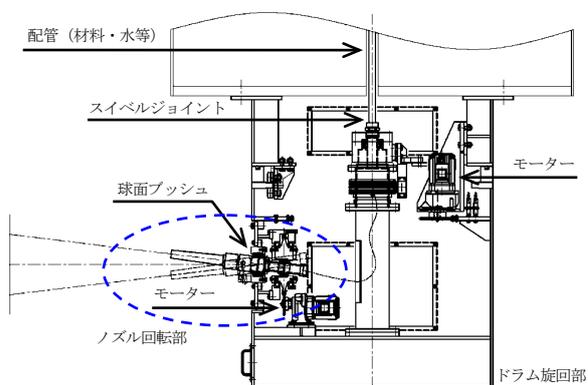


図-4 ノズル回転装置

### 3. 4 高温環境下における断熱構造の確認

本装置では吹付機械を制御するために電子機器を使用している。電子機器が正常に動作する温度を 60℃とし、煙突内部吹付時間内はそれ以下に保つことを目標とした。本装置の断熱構造は、耐熱容器外周に断熱材を設置し、装置内部にドライアイス円筒状に配置する構造とした。内部温度を均一に保つための構造検討に、熱流体シミュレーションソフトウェア STREAM による装置内部の温度変化の解析を実施した。

要素試験では、200℃を保持した加熱炉の中に耐熱容器を設置し、断熱構造で装置内部温度を 60℃以下に保つことができることを確認した。断

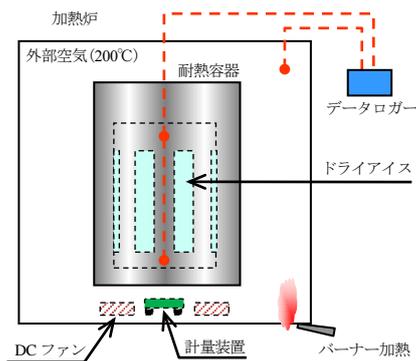


図-5 断熱構造試験の概略

熱構造試験の概略を図-5 に示す。

試験の結果、以下の知見が得られた。

- ・ドライアイス (12kg) を耐熱容器内部に円筒状に配置することで十分な冷却効果が得られる
- ・ドライアイスの昇華ガスは空気より重く耐熱容器下部に滞留するため、DC ファンにより容器内部温度を均一にする必要がある
- ・装置内部温度が低下しすぎるため、水槽、ホッパー、ノズル駆動部の周囲には断熱材を配置し、冷気の伝達を抑制する必要がある

### 3. 5 煙突内における吹付装置の姿勢と変位

稼働中の煙突では、燃焼による上昇気流（ドラフト）が発生する。上昇気流による装置への影響を解析と実験により把握した。また、本装置に姿勢制御装置を設ける必要性を検討した。

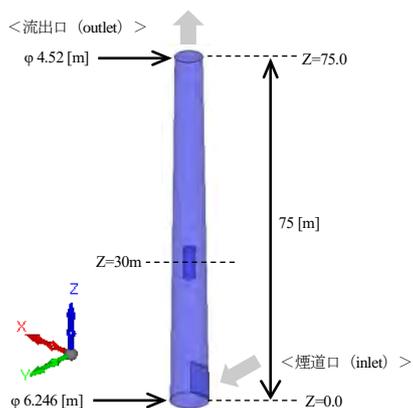


図-6 解析モデル

煙突全体のモデルと装置周辺の詳細解析モデルの2種類のモデルを用いて、上昇気流による装置の変位および周辺の流速を求めた。解析には熱流体シミュレーションソフト SCRYU/Tetra を用いた。実煙突を適用対象とした全体解析モデルを図-6 に示す。排ガス温度 200°C、装置重量 2 t、煙突流出口における風速 11.9m/s の条件で解析を行った。

解析結果の流速の大きさを図-7 に、装置重心位置の軌跡を図-8 に示す。装置の挙動は、装置側面が煙突内面から 1m 離れた位置にあるとき、軌跡は最大 30cm の変位 (両振幅) となった。

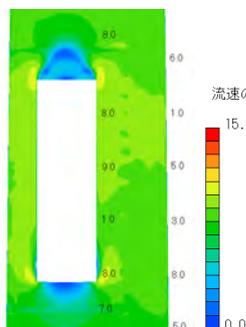


図-7 流速の大きさ (X-X 断面)

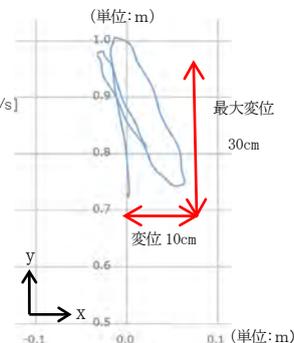


図-8 装置重心位置の軌跡

風洞実験では、1/10 スケールの模型を用いた実験を行った。風洞実験装置概略を図-9 に示す。吹付装置模型を写真-3 に、実験状況を写真-4 に示す。実煙突の排ガス温度 30°C、装置重量 2.2t、実風速 5~20m/s の範囲で実験を行い、風速と装置模型の変位を計測した。



写真-3 吹付け装置模型



写真-4 実験状況

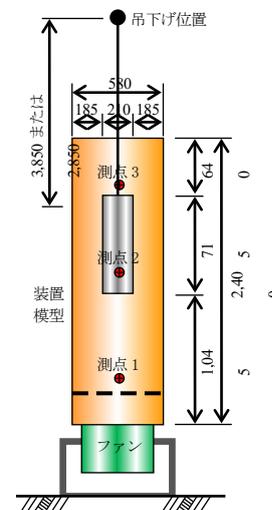


図-9 風洞実験装置概略

風洞実験の結果、実煙突換算で、風洞中央部風速 8~14m/s の範囲では、実装置で 1~30cm の最大変位 (両振幅) に収まって安定した状態を維持するが、風洞中央部の風速が 16.7m/s を超えると壁に吹き寄せられるような大きな変位が観測された。実煙突の風速は排ガス温度 200°C でドラフトの風速 11.9m/s、排ガス温度 30°C の条件で換算値は風速 7.6m/s になり、壁に衝突するような大きな変位を示す風速は、実煙突のドラフトの風速 7.6 m/s の倍以上の 16.7m/s であることが確認できた。

熱流体解析および風洞実験の結果から、上昇気流による吹付装置の変位により、煙突に損傷を与える可能性は非常に低いことが確認でき、姿勢制御装置の必要性はないと判断した。また、吹付時の反力による装置の振れ幅は 2cm（両振幅）以下であり小さい。また、作業時の風によるクレーンブームの揺れは、装置の振れと共振することはないが、外気の風速により変動し、装置の位置制御に影響を与える。

#### 4. 高温度域における吹付け材の品質確認

本装置の吹付補修では、耐火性骨材と水硬性セメントまたは化学結合材を混合した耐火物であるキャストブルを使用する。吹付時の施工温度域は 200℃程度であるが、市場に流通するキャストブルの調査では、仕様として使用可能な材料は確認できなかった。そのため、常温硬化型のキャストブルを 200℃環境で吹付けを行い、材料試験により常温硬化時との力学特性を比較した。

##### 4.1 品質確認試験項目

吹付材料メーカーで実施されている品質管理項目を参考にして選定した。試験は（財）岡山セラミックス技術振興財団に委託し、JIS 規定に準じて実施した。試験項目を表-1 に示す。

表-1 試験項目、試験方法

試験項目	試験方法：名称
曲げ強さ	JIS R 2213：耐火れんがの曲げ強さの試験方法
圧縮強さ	JIS R 2206-2：耐火れんがの圧縮強さの試験方法
かさ比重	JIS R 2205：耐火れんがの見掛気孔率・吸水率・比重の測定方法

##### 4.2 試験方法

200℃環境下で吹付けを行うため製作した加熱炉を図-11 に示す。加熱炉はロックウールによる断熱構造とし、バーナー差込口を 4 か所設け、バーナーの本数と火力調整で炉内温度を 200℃に管理した。吹付ノズルは挿入口から、内部に設置した供試体型枠（30cm×30cm）に向けて吹付ける構造とした。吹付け状況を写真-6 に示す。

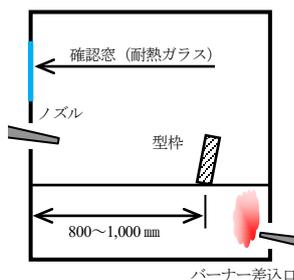


図-11 加熱炉概略図



写真-6 吹付け状況

吹付時の添加水量は、材料メーカー推奨の標準添加量を基に、本装置で使用する乾式吹付機の機械設定で試し吹きを実施し、添加水量の決定を行った。乾式吹付機の機械設定を表-2 に、添加水量を表-3 に示す。

表-2 乾式吹付け機械 機械設定

項目	単位	設定
回転数	r.p.m	6.0
材料ライン圧力	MPa	0.05
水圧	MPa	0.7
エア圧力	MPa	0.6

表-3 添加水量

		単位	材料A	材料B	材料C	材料D	材料E	
施工使用量	kg/m <sup>3</sup>		1,850	1,800~1,900	1,830	2,000	2,000	
		標準	%	12~13	15	15	10~12	12~13
添加水量	L/min	標準	1.8~2.0	1.8~2.0	2.3	1.7~2.0	1.9~2.1	
		設定	%	12	13	15	10	10
		値	L/min	1.8	2	2.3	1.7	1.6

##### 4.3 試験結果

品質確認試験結果を表-4 に示す。表中の代表値は常温で硬化させたものの値である。

表-4 品質確認試験結果（200℃環境下）

試験項目	単位	材料A		材料B		材料C		材料D		材料E	
		代表値	測定値	代表値	測定値	代表値	測定値	代表値	測定値	代表値	測定値
かさ比重	-	2.02	2.04	1.85~2.0	1.89	1.83	1.93	-	2.06	-	2.04
曲げ強さ	N/mm <sup>2</sup>	3.90	6.90	7.85	8.10	1.30	0.60	-	9.80	7.00	12.00
圧縮強さ	N/mm <sup>2</sup>	20.10	28.40	-	56.40	4.20	5.90	-	57.70	45.00	48.80
熱伝導率	W/(m·K)	0.71	1.18	0.64	1.20	-	測定不可	-	0.90	0.84	1.18

※材料Dは、断面修復材のため、耐火材の試験方法に準拠した試験を実施しておらず、代表値は不明

200℃環境で吹付けた試験体の値は、材料 A、B、E では代表値よりも大きな値が得られている。一般的な吹付材料であり、高温時の代表値のない材料 D も他材料と同様な値が得られている。材料 C では圧縮強さは代表値よりも大きいものの、曲げ強さは代表値の半分程度の値となった。曲げ強さの低下原因は、圧縮強度が他の材料より 1/10 と小さいことによる熱影響が考えられた。かさ比重については、どの材料も代表値とほぼ同じ値が得られた。

上記の結果より、常温硬化型のキャストブル材であっても、200℃環境施工時において常温硬化時と同等の機械的性能を有しているものを選択できることが確認できた。

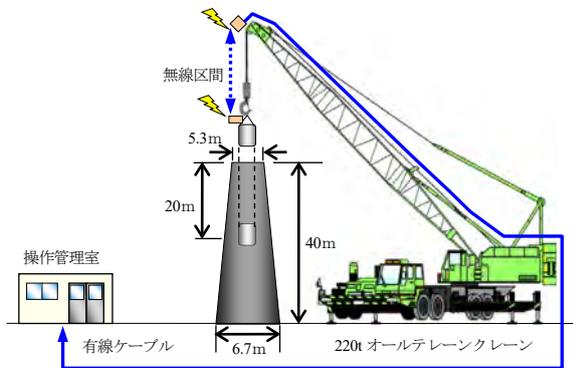
## 5. 実煙突での実証試験

運転を休止し解体予定の煙突において、本装置を用いた吹付けの実証試験を行った。運転休止のため、常温環境下での実験であるが、以下の項目について確認を行った。

- i) 吹付け作業のサイクル
- ii) 装置組立・解体時の作業性
- iii) 無線遠隔操作における操作性
- iv) ノズル回転装置による吹付けの仕上がり状態

### 5.1 実証試験概要

実証試験では、吹付け機械、吹付け材料、動力、無線伝送装置等を搭載した耐熱容器を 220 t クレーンで煙突頂部から吊り込み、煙突部を昇降させながら遠隔制御により吹付けを行った。また、本装置組立時は 25 t ラフタークレーンを使用した。実証試験の概要を図-12 に示す。



※操作管理室にカメラモニター・高さ表示器・監視モニター・操作盤を設置

図-12 実証試験概要図

本装置の仕様は、3章に記載した各要素試験結果を基に選定した。本装置の仕様を表-5 に示す。

表-5 装置仕様

吹付け機械	使用ベースマシン	アリバ吹付け機 (型式: Aliva237V)
	吐出能力	0.5m <sup>3</sup> /h (max1.1m <sup>3</sup> /h)
	所要空気圧力	0.6MPa
圧縮ガス供給量・吐出量		7m <sup>3</sup> ×20本 (2m <sup>3</sup> /min)
添加水水槽・ポンプ		タンク90L、ポンプ3L/min (MAX)
材料ホッパー容量		0.262m <sup>3</sup> (14袋)
耐熱容器	外径、寸法	φ2,100, H:2.2m×2基, H:1.47m×1基
	自重	8.91 t
	耐熱構造	ドライアイス、ファインブラケット、マイクロサーム

### 5.2 実証試験結果

#### i) 吹付け作業サイクル

吹付け作業サイクルを表-6 に、組立・解体実績を表-7 に示す。吹付け作業のサイクルは計画時のものを上まわり 1.38 時間であった。

#### ii) 装置組立・解体時の作業性

装置の組立・解体は、施工ヤードの広さや煙突

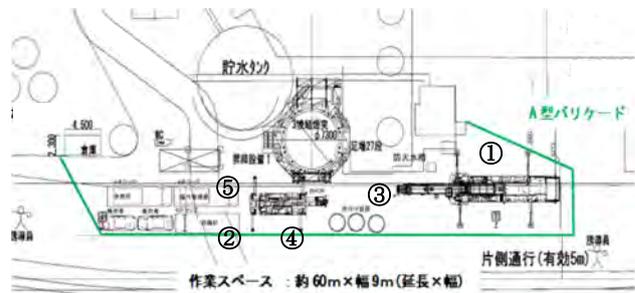
の高さによるクレーン仕様の選定により変化するが、本実証試験では 30.6 時間を要した。施工箇所位置図および資機材配置状況を図-13 に示す。

表-6 吹付け作業サイクル

	作業内容	計画(分)	実績(分)
①	窒素瓶カードル入れ替え	30	10
②	耐火材料投入	20	21
③	吹付け装置投入	30	20
④	吹付け時間	30	27
⑤	吹付け装置取出し	30	5
吹付けサイクル合計		140 (2.33 時間)	83 (1.38 時間)

表-7 組立解体実績

作業内容	実績(分)
機器搬入	90
吹付け装置組立	330
220tCR 組立、機器設置	470
試験吹き、アリバ調整	170
煙突内部吹付け前状況撮影	10
煙突内部吹付け後状況撮影	25
220tCR 解体、搬出	160
吹付け装置解体	160
資機材搬出	420
合計	1,835 (30.6 時間)



- ①: 220t オールテレーンクレーン
- ②: 材料、工具
- ③: 吹付け装置(仕様は表 3.1 参照)
- ④: 25t ラフタークレーン
- ⑤: ハウスカー(吹付け操作室)

図-13 施工箇所・資機材配置状況

#### iii) 無線遠隔操作における操作性

実証試験においては、懸念されていた煙突内部環境での吹付け装置の操作信号および映像信号の不具合もなく、操作・撮影および録画ができた。

吹付け作業におけるモニターの視認性も良好であり、6 台のカメラで全周囲を確認することができ、煙突内高さを指定しての吹付け作業も可能であった。無線操作および監視状況を写真-7 に示す。



⑤：ハウスカー(吹付操作室)  
写真-7 無線操作および監視状況

モニターによる吹付作業は、煙突上部と下部が開放による空気の流動の効果もあったが、吹付材料のリバウンドが煙突内部に滞留することはなかった。また、カメラへの吹付材料のリバウンドの付着もなく、カメラ映像の視認性は良好であった。

iv) ノズル回転装置による吹付けの仕上がり状態  
吹付け時にはクレーンブームの揺れによって、吹付装置に最大 50cm (両振幅) の振れが生じたため、一定の吹付距離を保てない状況があった。また、モニター映像による吹付厚の確認も、目視と異なり十分な立体感を掴むことの不慣れもあった。しかし、仕上がり状態は目標 50mm に対して、均一な厚さにするための不陸の修正は難しかったが、ノズル回転装置により 50~100mm の吹付厚さを確保して施工することができた。吹付試験結果を表-8 に示す。吹付試験結果(2日目)を写真-8 に示す。

表-8 吹付試験結果

日時	規定高さ	吹付作業時間	天候、気温	風速	装置の振れ	吹付面積 (m <sup>2</sup> )
1日目	20m	14:10~14:38	晴れ6.0℃	0~5m	20~30cm	3.76
2日目	0m	10:44~11:11	晴れ4.8℃	5~10m	50cm	2.26



写真-8 吹付試験結果  
(①：幅 1.9m×高さ 1.1m)

## 6. まとめ

本開発の目的である「煙突内部調査時に併せて、無線操作による遠隔操作での吹付補修を実施する装置」を開発することができた。吹付装置の無線操作による吹付の仕上がり状態の向上に課題は残されているが、モニターによる吹付作業の習熟により、改善されると考えられる。

## 7. あとがき

既設煙突は、今後も増大が見込まれる社会資本の老朽化と同様に維持・更新の到来を迎えている。ただし、煙突を補修するには、操業を停止する必要があり、生産性に大きな影響を及ぼす課題が残されていた。

本装置の適用は、煙突を使用したまま補修することで、操業を停止することなく、延命に寄与することが可能となる。

煙突補修装置の全体構成は開発することができたが、外気風速によるクレーン本体の揺れに影響を受けることなどもわかり、荷ぶれ制御や、モニター技術の改善による吹付出来形の向上など、今後の課題も残されている。

本研究の遂行にあたり、日本製鉄㈱の辻本恭平氏には多大の協力を賜った。この場を借りて心より謝意を表します。

## 35. 既設コンクリート構造物のあと施工せん断補強に伴う 削孔作業に適用する自動削孔装置の開発

株式会社奥村組  
株式会社奥村組  
株式会社奥村組  
株式会社奥村組

○ 有川 健  
三澤 孝史  
西山 宏一  
石井 敏之

### 1. はじめに

既設コンクリート構造物の補強方法として、あと施工せん断補強工法<sup>1),2)</sup>や壁等の増設工法等が用いられる。その際、せん断補強鉄筋や新設コンクリートとの一体性を高めるためのアンカー筋を既設コンクリートに挿入するための挿入孔の削孔は、通常、削岩機や電動ハンマードリル等を用いて人力で行われる。補強工事によっては削孔数が数千本以上と多大な労力を要する施工となるため、作業の省力化、効率化が求められていた。

今回、あと施工せん断補強工法における削孔作業の機械化・自動化に取り組み、せん断補強鉄筋の挿入孔を自動で削孔する装置（以下、自動削孔装置）を開発した。

開発した自動削孔装置は、壁状のコンクリート構造物を対象とした。削孔方法として空圧削岩機を使用し、セットした位置における削孔計画（削孔位置、削孔深さ、削孔数）に従って、削岩機を削孔位置に移動し、削孔深さまで削孔する。これを削孔数まで自動的に繰り返し、計画孔数の削孔が終われば装置を移動させ、次のエリアの削孔を行う。なお、削孔中に生じる粉塵は、集塵機と集塵カバーにより飛散を防止する。

また、自動削孔中に既設コンクリート中の鉄筋等に接触した場合は、削孔速度の変化により自動判定し、その削孔を中止し、次の孔を削孔するように制御しており、既存鉄筋への損傷を極力抑えることができる。

開発した自動削孔装置の性能を確認するため、RC壁試験体を使用した性能確認実験を実施し、所定の性能を有することを確認した。本稿では、自動削孔装置の概要を示した後、性能確認実験結果について述べる。



写真-1 自動削孔装置

### 2. 自動削孔装置

#### 2.1 自動削孔装置の概要

自動削孔装置を写真-1に、主な仕様を表-1に示す。

自動削孔装置は、あと施工せん断補強工法のせ

ん断補強鉄筋の挿入孔（最大削孔径φ40mm程度）を対象とし、空圧削岩機を用いて自動削孔する装置である。削岩機を削孔方向に最大1,200mmフィードでき、上下方向の昇降ストローク1,750mmおよび左右方向のスライドストローク500mmのエリア内の移動が可能である。各移動量は、装備したレーザー距離計により計測管理する。自動削孔装置本体は、ペンダント操作によりレール上を走行させる。

可動範囲内を予め設定した削孔計画（削孔位置、削孔深さ、削孔数）に従って自動で削孔し、削孔位置、削孔深さ、削孔数、削孔時間等の施工結果データも自動的に記録する。なお、削孔計画および削孔結果は、パソコンと本装置の制御装置間を無線LANで伝送することができる。

また、真空圧によりコンクリート表面に吸着するバキュームパッドを自動削孔装置上部に2基装備しており、必要に応じてバキュームパッドを使用することで削孔時の反力を確保することもできる。

削孔中に生じる粉塵は、削岩機の先端部に装備した集塵カバーをコンクリート表面にエアシリンダにより押付け、集塵機により吸引することにより飛散を防止する。

## 2.2 自動削孔時の動作フロー

図-1に自動削孔時の動作フロー図を示す。

自動削孔装置本体を削孔エリアに移動させ、自動削孔の事前準備として削孔エリア内の原点位置まで削岩機をスライド・昇降させた後、以下の手順により自動削孔するように制御している。そのエリアの削孔が終了したら、自動削孔装置本体を次の削孔エリアに移動させ、同じ手順で自動削孔させる。なお、バキュームパッドを使用する場合は、自動削孔前にバキュームパッドを壁表面に吸着させ、反力を確保する。

- ①削岩機を稼働させずに、壁にビットが当たるまで前進させることにより壁までの離隔を自動計測する。
- ②削岩機を前進させると共に、集塵カバーを壁面に押し付け、削孔を開始する。
- ③計画の削孔長までフィードする。
- ④削岩機を引き戻し次の削孔位置までスライド・昇降移動する。
- ⑤計画した全孔数の削孔が終了するまで、②～④を繰り返す。

なお、削孔速度が設定値以下となった場合、鉄筋等の障害物に接触したものと自動判定し、その孔の削孔を中止し、次の削孔位置に移動させる制御としている。

表-1 自動削孔装置の仕様

項目	仕様
最大寸法	横 1742×縦 2215×高さ 2593mm
質量	980kg
昇降範囲	1750mm
スライド範囲	500mm
走行速度	6.79m/min
昇降速度	2.88m/min（高速）
スライド速度	1.5m/min（高速）

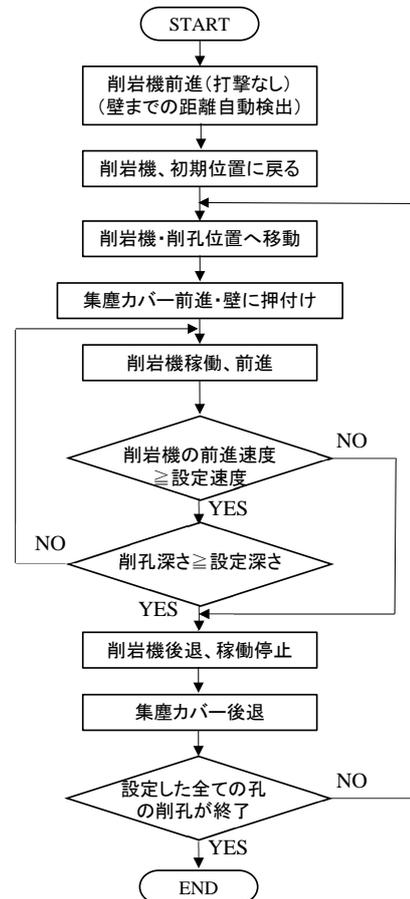


図-1 自動削孔時の動作フロー

## 3. バキュームパッドの吸着性能確認実験

必要に応じて削孔時の反力を確保するために、真空圧によりコンクリート表面に吸着するバキュームパッドを自動削孔装置に装備している。この反力装置について、事前に、コンクリートブロックを用いた要素実験により、選定したバキュームパッド単体の吸着力を確認した。

### 3.1 吸着性能確認実験の概要

#### (1)バキュームパッド

選定したバキュームパッドは、TAIYO社製TVP-R20Sである。外観を写真-2に示す。また、真空ポンプユニット(TAIYO社製TVU-M06AN)は、真空圧-73.3kPaに達すると停止し、-64kPa以下になると起動するように設定されている。仕様を表-2に示す。



写真-2 バキュームパッド

表-2 バキュームパッドおよび真空ポンプユニットの仕様

バキュームパッド (型式: TVP-R20S)		
有効面積 (mm <sup>2</sup> )	吊上荷重 (N) (安全率 2)	備考
30,660	1130 (真空圧-73kPa)	パッドゴム材質: クロロプレンスポンジ
真空ポンプユニット (型式: TVU-M06AN)		
設定真空圧 (kPa)	理論ポンプ排気量 (L/min)	タンク容量 (L)
-64.0~-73.3	575/685 (50Hz/60Hz)	150

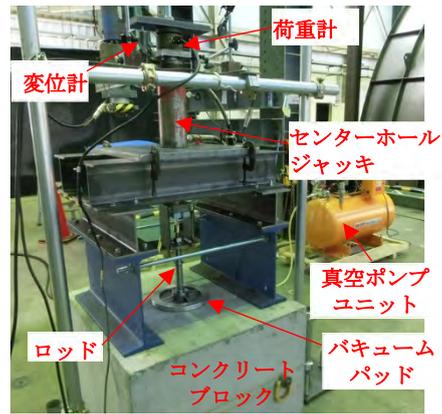


写真-3 実験状況

表-3 実験ケース

ケース No.	表面条件	
1A	滑面	0.01% <sup>注1)</sup>
2A	粗面	0.24% <sup>注1)</sup>
3A	溝面	0.5-2.0mm <sup>注2)</sup>
3B		1.0-2.0mm
3C		3.0-2.0mm
3D		5.7-2.8mm

注 1) 斜長比=斜長(凸凹長)/測定長

注 2) 溝深さ mm-溝幅 mm

## (2) 実験方法

実験は、写真-3 に示すように自己釣り合い方式で、バキュームパッドをセンターホールジャッキで引っ張ることによって最大吸着力を測定した。

実験手順は、バキュームパッドをコンクリート面に真空ポンプユニット(真空圧:-73kPa)で吸着させ、バキュームパッドと連結させたロッドをセンターホールジャッキで、バキュームパッドが剥離するまで載荷した。載荷方法はステップ載荷とし、1kN までは 0.5kN ピッチ、それ以降は 0.2kN ピッチで行った。また、各ステップで、荷重を 10 秒間保持させた。

実際の既設コンクリート構造物では、コンクリート表面が、必ずしも健全な状態ではない場合も想定されるため、実験パラメータは、コンクリート表面の状態とした。コンクリート面の状態は、仕上げ面(滑面)、ジェットタガネで研掃した面(粗面)

および、ひび割れを想定してディスクサンダーにより溝 1 本を形成した面(溝面)の 3 種類とした。溝は、深さおよび幅もパラメータとした。計測は、引張り荷重(吸着力)とバキュームパッドの変位とし、サンプリング周波数 10Hz で収録した。実験ケースを表-3 に示す。実験は各ケースで 2~3 回実施した。

### 3.2 吸着性能確認実験の結果

実験時のバキュームパッドの設置状況を写真-4 に、表面条件の粗面を写真-5、溝面(溝深さ 5.7mm-溝幅 2.8mm)を写真-6 に示す。

最大吸着力の測定結果一覧を表-4 に、バキュームパッドの荷重(吸着力)と変位の関係を図-2~図-4 に示す。

滑面での最大吸着力は、2.79kN であり、製品の仕様である最大吊上荷重 1.13kN×2 (安全率)=2.26kN より大きな値を示した。粗面での最大吸着



写真-4 バキュームパッド設置状況



写真-5 粗面(ケース 2A)



写真-6 溝面(ケース 3D)

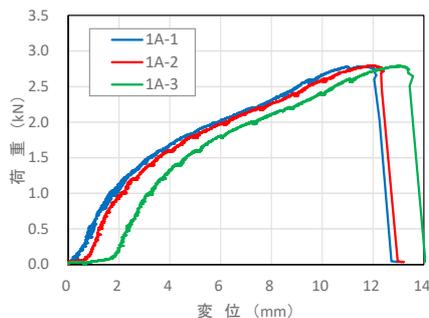


図-2 荷重-変位関係(ケース 1A)

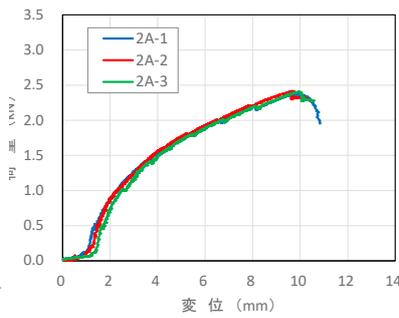


図-3 荷重-変位関係(ケース 2A)

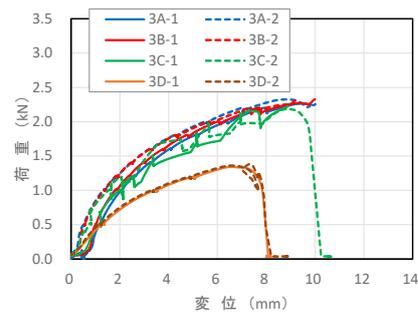


図-4 荷重-変位関係(ケース 3A~3D)

表-4 各ケースの最大吸着力

ケース No	表面条件		最大荷重 (kN)
1A	滑面	0.01%	2.79
2A	粗面	0.24%	2.39
3A	溝面	0.5-2.0mm	2.30
3B		1.0-2.0mm	2.33
3C		3.0-2.0mm	2.21
3D		5.7-2.8mm	1.36

力は 2.39kN と滑面の場合に比べ 14%低下した。溝面での最大吸着力は、同じく滑面の場合と比較して、溝深さ 1.0mm で 2.3kN となり 18%低下、溝深さ 3.0mm で 2.2kN となり 21%低下、溝深さ 5.7mm では 1.36kN となり 51%と大きく低下した。

溝深さ 3.0mm では、溝により安定した真空状態を維持できず、実験中に真空ポンプユニットの起動と停止が繰返され、他のケースと比べ荷重の変動が大きい。溝深さ 5.7mm では真空ポンプユニットが常時起動状態であった。

以上の実験結果より、最大吸着力は、今回の粗面や 3.0mm 以下の溝面で 2kN 以上が確保されており、バキュームパッドを2台使用することにより、想定する削孔反力(事前の実験より 3kN と想定)を担保できると考える。

#### 4. 自動削孔装置の性能確認実験

##### 4.1 実験概要

開発した自動削孔装置の性能を確認するために RC 壁試験体を用いた性能確認実験を行った。

##### (1) 実験方法

鋼製架台の上に 3 基の RC 壁試験体 (寸法: 縦 800×横 2000×高さ 2200mm) を設置し、レールとして敷設した山形鋼上に載せた自動削孔装置で削孔した。RC 壁試験体の設置状況を写真-7 に示す。RC 壁試験体の実験時のコンクリート圧縮強度は 27.6N/mm<sup>2</sup>であった。

RC 壁試験体の配筋図を図-5 に示す。自動削孔装置は、鉄筋等に接触時には、自動的に削孔を停止し、次の削孔位置を削孔するように制御している。



写真-7 RC 壁試験体設置状況

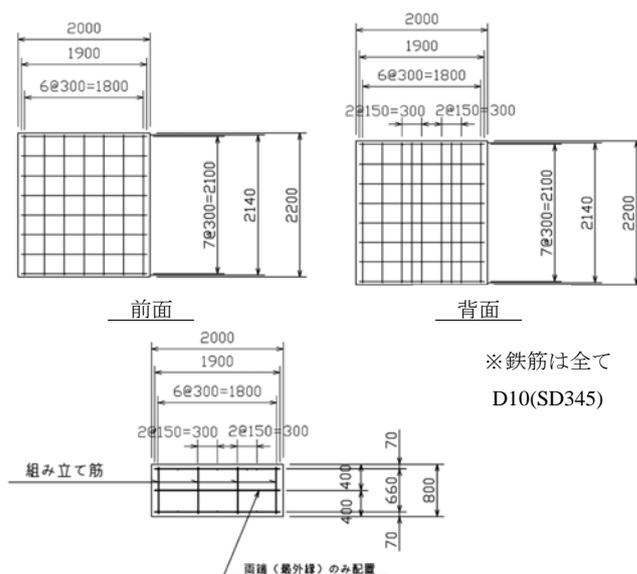


図-5 RC 壁試験体・配筋図 (単位: mm)

この機能を確認するために、試験体の前面と背面で配筋のピッチを変え、削孔時に背面側の鉄筋に接触した場合を模擬できるように図った。

##### (2) 実験ケース

実験はφ40mmのビットを用いて削孔した。実験パラメータは、削孔深さ、バキュームパッド使用の有無、単孔および連続削孔とした。また、鉄筋接触時に計画した通りに挙動するかを確認するために鉄筋に接触させるケースも行った。最終的には 100 孔以上の削孔を行った。削孔深さは 400~1000mm まで行った。なお、削孔深さを 1000mm とした場合は、奥行き (削孔方向) が 2000mm となる

ようにRC壁試験体の配置を変えて実験を行った。

## 4.2 実験結果

### (1) 削孔径

実験状況を写真-8に示す。削孔中は、集塵カップおよび集塵機により粉塵の飛散は防止された。

削孔後、ノギスにより削孔径を計測した結果、削孔径の平均（孔数：109孔）はφ41.03mmであり、ビット径φ40mmより若干大きい程度である。また、バキュームパッド使用の有無による削孔径の差異はみられなかった。

### (2) 削孔深さ

図-6に、設定削孔深さと削孔後にスケールにより計測した削孔深さの関係を示す。表-5に、設定削孔深さに対する計測値の差を示す。

全体の平均では、設定値に対し4mm深く削孔しているが、実施工において問題のない範囲と考える。バキュームパッド使用の有無による削孔深さに顕著な差異はない。

### (3) 削孔速度および削孔時間

図-7に、設定削孔深さごとの削孔速度を示す。削孔深さが700mmまでは、全てのデータが5mm/s以上の削孔速度を示した。削孔深さが1000mmでは、若干、削孔速度が低下し、平均で4.3mm/sであった。これは、削孔深さが深くなることにより孔壁とビットとの摩擦抵抗が増加したために削孔速度が低下したと考えられる。

図-8に、8孔を連続削孔したケースの削孔順序を示す。横方向の孔間の間隔は200mm、上下方向は150mmとした。設定削孔深さは1000mmとし、このパターンの連続削孔を2回行った。削孔後の試験体を写真-9に示す。

各孔への移動も含めた計8孔の全削孔時間は、平均で約33分間であった。その内、各孔への移動時間の合計は平均で約1分間であり、削孔位置へ効率的に移動している。

### (4) 鉄筋接触時の挙動

自動削孔時は、設定した削孔速度以下になると鉄筋等に接触したと自動判定し、その削孔を中止して次の孔を削孔するように制御ソフトを設定し

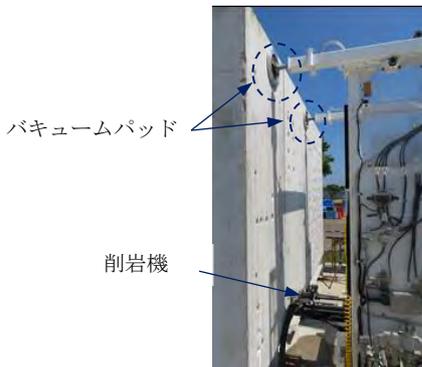


写真-8 実験状況（バキュームパッド使用時）

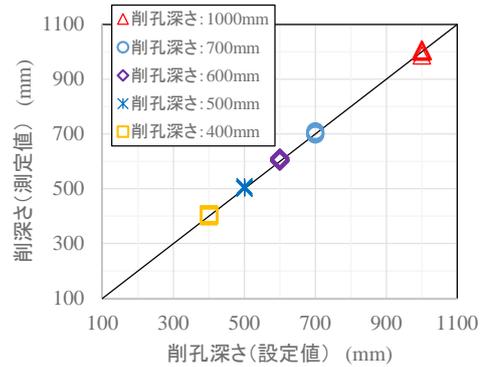


図-6 削孔深さの設定値と計測値の関係

表-5 削孔深さの設定値と測定値（出来形）の比較

削孔深さの設定値に対する測定値の差(平均値) (mm)		
全体	バキュームパッド 使用あり	バキュームパッド 使用なし
4	4	5

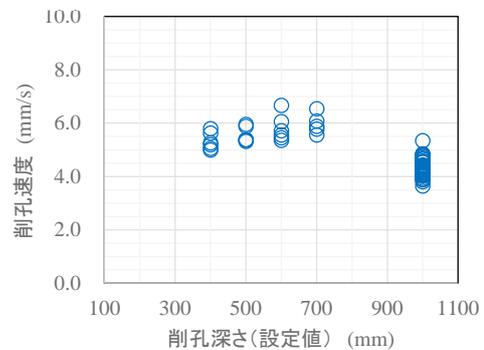
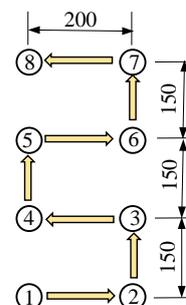


図-7 削孔速度と設定削孔深さの関係



※1→8の順番で削孔 単位：mm

図-8 連続削孔実験時の削孔順序

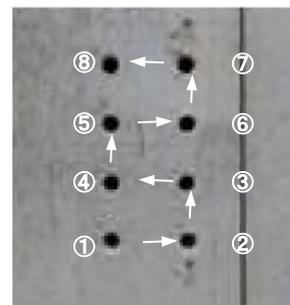


写真-9 連続削孔後の状況

ている。これを実際に確認するために、鉄筋に接触させる実験ケースを数ケース行った。一例として、手前側の鉄筋と奥側の鉄筋に接触させるように図った削孔パターンを図-9に示す。鉄筋中心位置は、壁表面から70mmと730mmである。設定削孔深さを750mmとして削孔した。

壁の奥側の鉄筋に接触する位置を削孔した孔内をCCDカメラで撮影した。写真-10に孔内状況を示す。鉄筋表面には少し傷が見られ、ビットが接触したことがわかる。

手前側および奥側の鉄筋に接触して削孔を自動で中止し、次の鉄筋に接触しない孔位置に移動し、設定深さまで削孔することを確認した。

今回の実験条件では、バキュームパッド使用の有無により、削孔径、削孔深さや削孔速度に大きな差異はみられなかった。従って、コンクリート強度等の施工条件が今回と同程度であれば、バキュームパッドを使用しなくても実施工において削孔可能であると考ええる。

## 5. おわりに

あと施工せん断補強工法における削孔作業の省力化、効率化を目的として機械化・自動化を図り、自動削孔装置を開発した。開発した自動削孔装置は、RC壁試験体を用いた性能確認実験により、所定の性能を有することを確認できた。今後、実適用を図るとともに、本装置のブラッシュアップを図っていきたいと考える。

本装置の開発に当たっては、奥村機械製作株式会社の山田純一氏、明智茂樹氏、大野 誠氏に多大な協力を受けた。ここに改めて謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 山口治, 松本恵美, 三澤孝史, 廣中哲也: 六角ナット定着型せん断補強鉄筋を用いた後施工せん断補強工法の開発, 土木学会第71回年次学術講演会概要集, pp. 1017-1018, 2016. 9
- 2) 三澤孝史, 廣中哲也, 山口 治, 宇治公隆: 定着板を片側に配置したせん断補強鉄筋を用いる後施工せん断補強に関する研究, コンクリート工学会論文集, Vol. 29, pp. 111-123, 2018. 11

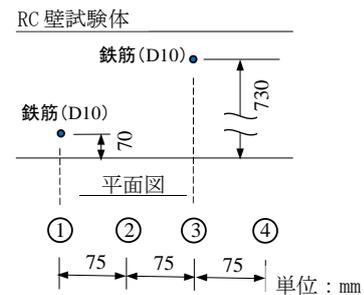


図-9 鉄筋接触時の削孔パターン



写真-10 孔内状況  
(鉄筋接触位置を削孔)

# 36. 現況路面データを基準に用いたGNSS切削システム

## 評価結果と今後の運用について

株式会社トプコンポジショニングアジア ○ 平岡 茂樹  
兵庫県 県土整備部 技術企画課 中田 和秀  
(一社) 施工技術総合研究所 八木橋 宏和

### 1. はじめに

国土交通省では、2020年4月よりICT舗装工(修繕工)の実施要領が策定され運用された。これに先立ち、兵庫県で発注する工事において、路面切削工におけるICT建設機械の施工(以下ICT切削工)とスキャナによる精度検証を実施した。

これまでもトータルステーション(以下TS)を利用した3D-MCシステム(以下3D-MC)が活用されているが、今回は、GNSSを使った現況路面データを基準に用いた厚み制御が出来る新技術RD-MCシステム(以下RD-MC)を用いて検証を実施した。

### 2. 「RD-MC」について

本システムは、切削オーバーレイ工にICTを適用し、切削準備の効率化、作業の省人化と安全性の向上を図るシステムである。従来の3D-MCがTSを使い、3次元の設計面を使用して制御するシステムであるのに対し、RD-MCでは現況面と設計面の高低差(厚さ)をもとに制御している。GNSSで切削機の平面位置計測し、その点の設計切削深さ(設計厚さ)を計算し、その厚さになるように切削機の切削ドラムを自動制御する新しいロジックのICT切削システムである。(図-1)

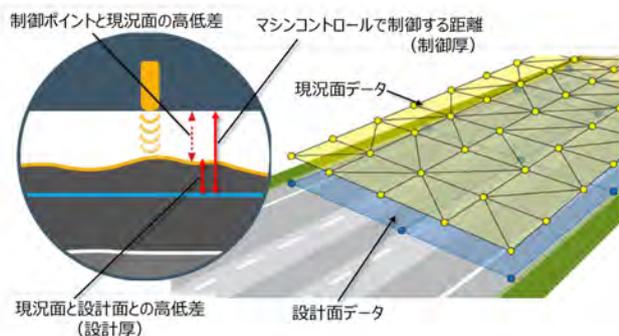


図-1 現況面と設計面の活用イメージ

TSを使用するICT切削工に比べ、本システムでは制御にTSを使わないため、TS設置場所の確保

が不要となり、TSがターゲットをロストしたり誤追尾したりするリスクもない。

橋梁部での切削にも活用可能のため、ICT切削工の活用範囲を大きく広げるシステムである。

### 3. 検証工事-1 県道 志筑郡家線(淡路市井出地内)

#### 3.1 検証項目

- ・RD-MCの現場適用の確認と効果
- ・スキャナによる出来形検証 (ICT切削工の精度検証)

#### 3.2 検証状況

- ・検証日：2020年3月5日
- ・幅3.35m 延長435m 1,500㎡ 5cm切削しAS舗装5cm(図-2)
- ・センターから2.05mの部分切削後残り1.3mを両側揃い(ならい)制御で実施。つまり、センター側切削時左側(路肩側)のラインを本システムRD-MCによる自動制御。(その他は切削機に搭載されている揃い制御を実施)(図-3)
- ・現況面計測は、地元測量会社(外部委託)で実施。地上型レーザースキャナで計測し、25cmメッシュで間引いたものを使用。

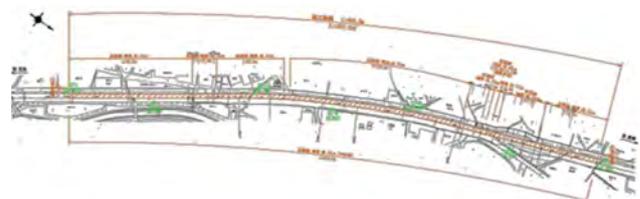


図-2 平面図

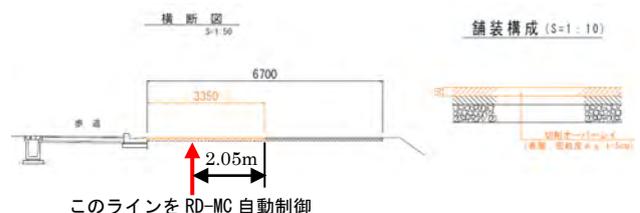


図-3 横断面図

### 3.3 検証結果

#### 3.3.1 本システム現場適用の確認と効果

地元測量業者で本システムの3次元データ、設計データを作成できることが確認できた。

地上型レーザースキャナで既設路面を計測した25cmメッシュの現況面データと、現況面データをもとに縦断方向に5mピッチで作成した設計面データで問題無く自動制御できたことを確認した。(図-4、図-5)

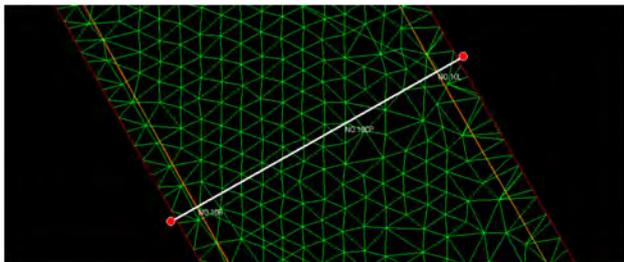


図-4 NO. 10 付近の3D平面図

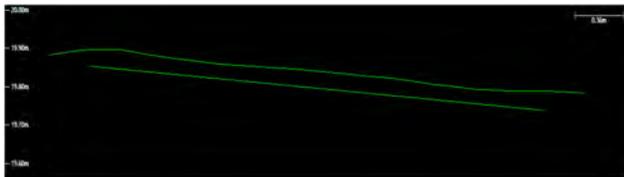


図-5 NO. 10 付近の横断図 (上：現況，下：設計)

RD-MC 活用による施工日数の縮減効果は、マーキング作業の省力化により17%縮減。地上型レーザースキャナによる3Dデータ活用効果を含むと従来施工45日から28日と約38%の施工日数縮減効果を確認した。(図-6)

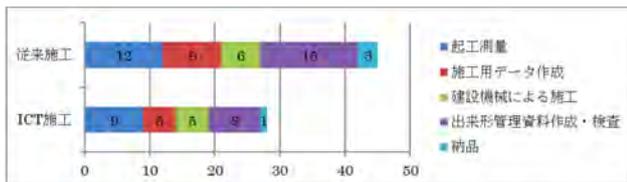


図-6 施工日数の比較 (単位：日) \*出典:兵庫県

のべ作業工数の比較によると、RD-MC 活用による建設機械のべ作業工数の縮減効果は、44%。地上型レーザースキャナによる3Dデータ活用効果を含むと従来施工のべ82人・日から47人・日と約43%の縮減効果を確認した。(図-7)

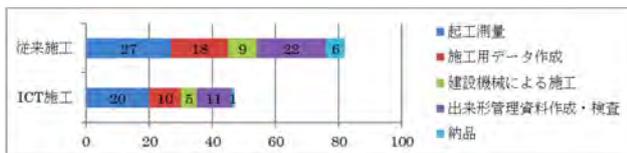


図-7 のべ作業工数の比較 (単位：日) \*出典:兵庫県

#### 3.3.2 スキャナによる精度検証

切削後地上型レーザースキャナで切削面の一部NO.11+5 - NO.13+15 (50m分)を計測し、設計面との比較を検証した。(図-8)

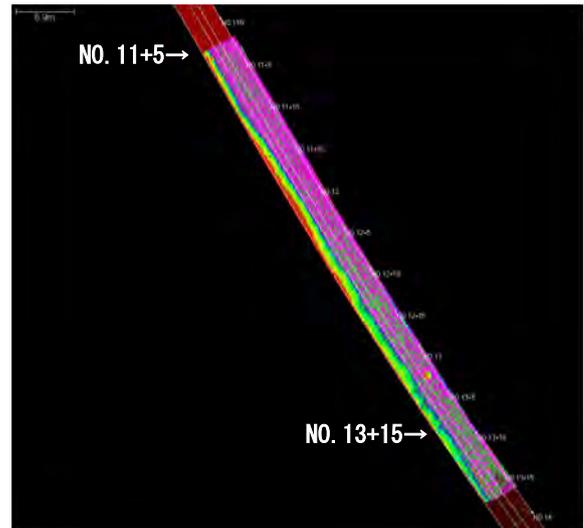


図-8 スキャナ計測範囲

- 1) 1m<sup>2</sup>に1点以上の面精度検証結果
  - ・規格値の最大最小値 50% (±8.5mm) に対し、100%入っていることを確認した。
  - ・平均値では、規格値-2mm に対し 0.3mm となり、規格値内に入っており、実際の切削工事で本システムが活用できることを確認した。(図-9、図-10)

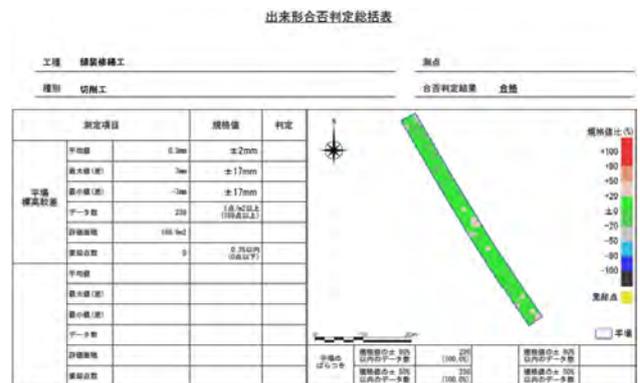


図-9 出来形合否判定総括表

測定項目		規格値	判定
平場 標高較差	平均値	0.3mm	±2mm
	最大値 (差)	7mm	±17mm
	最小値 (差)	0	±17mm
	データ数	236	1点/m <sup>2</sup> 以上 (134点以上)
	評価面積	168.9m <sup>2</sup>	
	棄却点数	0	0.3%以内 (0点以下)

図-10 出来形合否判定総括表(測定項目、規格値拡大図)

## 2) 1m ピッチの自動制御施工精度 (縦断)

・MAX+5mm, MIN-7mm,  $\pm 5\text{mm}$  の範囲内に 96% 入っており, 設計面に対して高精度に制御できたといえる。(図-11)

・センター側と側溝側は, 倣い制御をしており, そのデータと比較しても同等のばらつきとなっている。3次元現況面データと3次元設計面データを活用した本システムで, 従来の倣い制御と同等に制御できていることがわかる。(図-12)

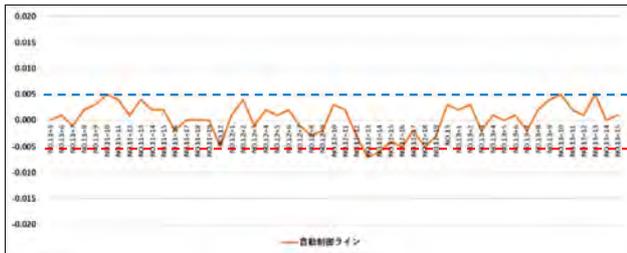


図-11 自動制御施工精度グラフ (設計との差)

標準偏差 (データのばらつき)	単位:m
センター側 (倣い制御)	0.0030
センタから2mライン (自動制御)	0.0030
側溝側 (倣い制御)	0.0031

図-12 標準偏差比較表

### 3.3.3 その他効果

・センターライン部分は, 反対車線の車両が往来しており, 写真-1, 写真-2 のようにオペレータが切削機の進行方向の制御を実施していたが, 左側 (反対側) の切削深さ調整については, 路面マーキングを見ながら実施する必要が無いことから以下効果が考えられる。

- ① 安全性の向上 (特に夜間は顕著)
- ② オペレータの負担軽減



写真-1 センターライン位置でのオペレーション



写真-2 往来する車両と切削機

## 3.4 現場見学会

現場見学会開催により, ICT 切削工の取組みを実際に見る機会を設けることができた。(写真-3, 写真-4)



写真-3



写真-4

## 4. 検証工事-2 県道 伊丹池田線 (伊丹市下河原1丁目地内)

### 4.1 検証項目

- ・RD-MC の現場適用の確認と効果
- ・スキャナによる出来形検証 (ICT 切削工の精度検証)

### 4.2 検証状況

- ・検証日: 2020年3月26日
- ・延長約200m 約670 $\text{m}^2$  AS舗装5cm (図-13)
- ・センターと2.05mの両側を自動制御側で施工後,

残り両端は倣い制御を実施) (図-14)

・現況面計測は、地元測量会社(外部委託)で実施。地上型レーザースキャナで計測し、25cmメッシュで間引いたものを使用。

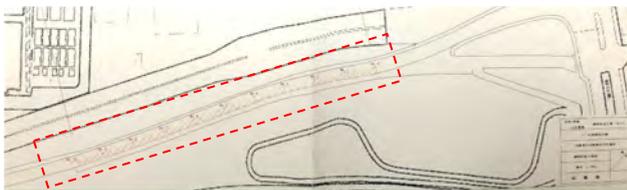
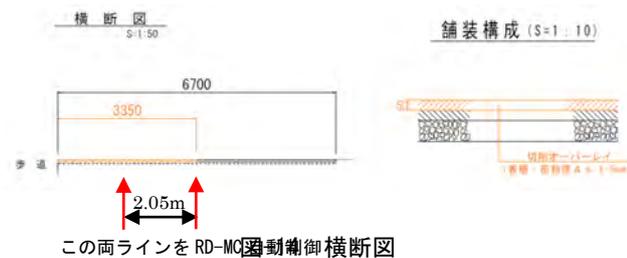


図-13 平面図



この両ラインをRD-MC自動制御横断面図

### 4.3 検証結果

#### 4.3.1 本システム現場適用の確認と効果

地元測量業者で本システムの3次元データ、設計データを作成できることが確認できた。

地上型レーザースキャナで既設路面を計測した25cmメッシュの現況面データと現況面データをもとに縦断方向に5mピッチで作成した設計面データで問題無く自動制御できたことを確認した。(図-15, 図-16)

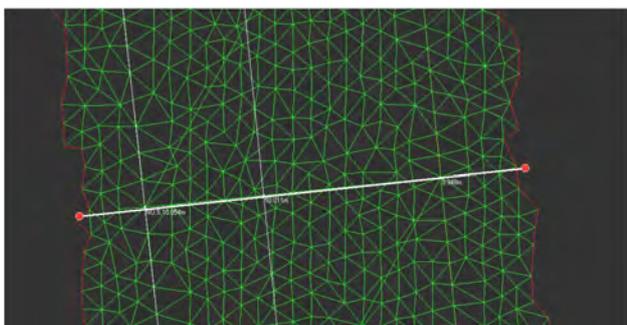


図-15 NO.5付近の3D平面図

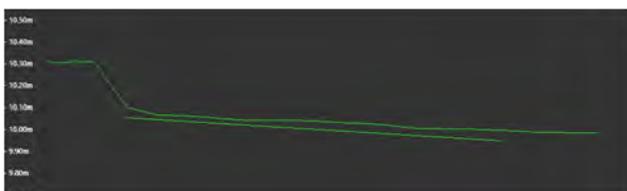


図-16 NO.5付近の横断面図(上:現況, 下:設計)

RD-MC活用による施工日数の縮減効果無し。起工測量, 施工用データ作成で各1日短縮したものの, 出来形資料作成で2日増加のため縮減効果は

認められなかった。(図-17)

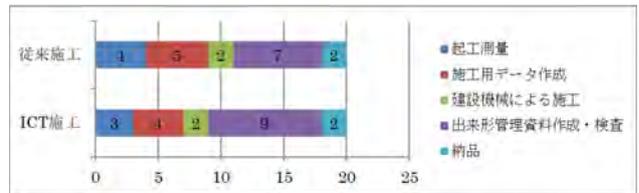


図-17 施工日数の比較(単位:日)\*出典:兵庫県

のべ作業工数の比較によると, MCシステム活用による建設機械のべ作業工数の縮減効果は, 17%。出来形管理資料作成以外のプロセスで縮減効果があり, 全体で12%の縮減効果を確認した。(図-18)

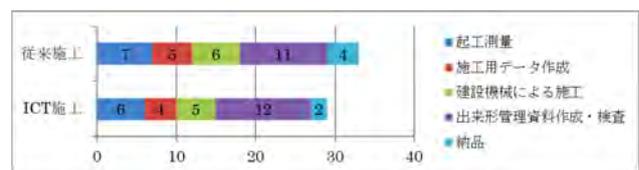


図-18 のべ作業工数の比較(単位:日)\*出典:兵庫県

#### 4.3.2 地上型レーザースキャナによる精度検証

切削後地上型レーザースキャナで切削面を計測し, 設計面との比較を検証した。(図-19)

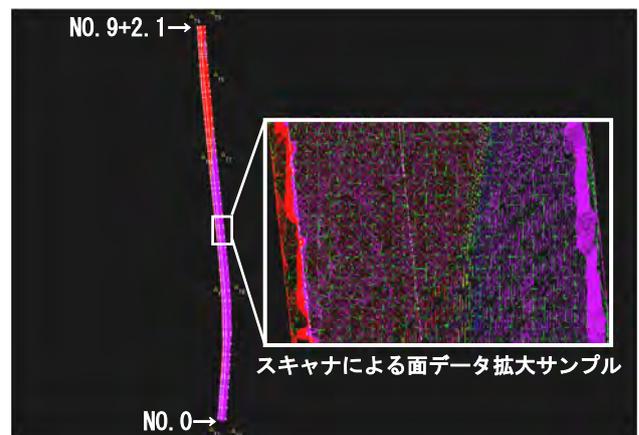


図-19 スキャナ計測範囲

##### 1) 1m<sup>2</sup>に1点以上の面精度検証結果

・最大+11mm, 最小で-8mm, 平均で1.4mmと舗装工の規格値に入っていることから, 実際の切削工事で本システムが活用できることを確認した。

・左端のデータのヒートマップがばらついていることがわかる。左端はマニュアルで施工しており, 倣う構造物も無いことから比較的バラツキが大きく全体に影響しているが, 最大最小値 50% (±8.5mm) に対し, 99.4%入っていることを確認した。(図-20, 図-21)

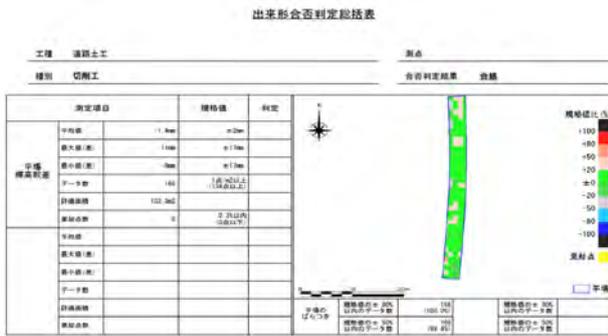


図-20 出来形合否判定総括表

測定項目		規格値	判定
平場 標高較差	平均値	1.4mm	±2mm
	最大値(差)	11mm	±17mm
	最小値(差)	-8mm	±17mm
	データ数	166	1点/m以上 (134点以上)
	評価面積	133.3m <sup>2</sup>	
棄却点数	0	0.3%以内 (0点以下)	

図-21 出来形合否判定総括表（測定項目，規格値拡大図）

#### 2) RD-MC 自動制御施工精度（縦断）

・MAX+8mm, MIN-5mm, ±5mm の範囲内に 97% 入っており，設計面に対して高精度に制御できたといえる。（図-22）

・検証工事-1 での検証結果と比較しても同等以上の制御をしており，3次元現況面データと3次元設計面データを活用した本システムで，従来の做い制御と同様以上に制御できていることがわかる。（図-23）

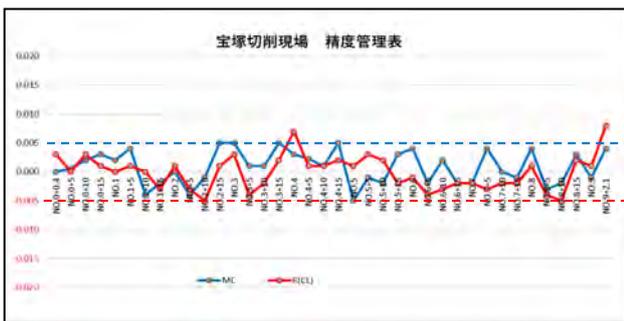


図-22 自動制御施工精度グラフ（設計との差）

標準偏差（データのばらつき）	単位:m
センター側（自動制御）	0.0030
センタから2mライン（自動制御）	0.0028
側溝側（マニュアル）	0.0098

図-23 標準偏差比較表

#### 4.4 現場見学会

検証工事-1 と同様，現場見学会開催により，ICT 切削工の取組みを実際に見る機会を設けることができた。（写真-5，写真-6）



写真-5



写真-6

#### 5. 現場検証結果まとめ

##### 5.1 本システム現場適用の確認と効果

2 現場共，地元測量業者で地上型レーザースキャナを活用し，本システムの既設路面の 3 次元データを，設計データを作成できることが確認できた。

両現場共，25cm メッシュの現況面データと現況面データをもとに縦断方向に 5m ピッチで作成した設計面データで問題無くマシンコントロール制御できたことを確認した。

また，検証工事-2 では，出来形管理資料作成に従来より時間がかかる結果となり，施工工数の縮減効果が見られない部分もあったが，平均すると施工日数 26%縮減，建機施工日数 13%縮減，のべ作業工数では，34%縮減，建設機械ののべ施工工数 33%縮減との結果となった。（図-24）

	施工日数	建設機械による 施工日数	のべ作業工数	建設機械による のべ施工工数
洲本現場	▲38%	▲17%	▲44%	▲43%
宝塚現場	0%	0%	▲12%	▲20%
平均値	▲26%	▲13%	▲34%	▲33%

図-24 施工日数標準偏差比較表

##### 5.2 スキャナによる精度検証

今回，地上型レーザースキャナで計測した切削後の面と設計データとの比較で検証した結果，路面切削工（面管理）の規格値にすべて入っており，最大最小値 50%（±8.5mm）に対しても，99%以上

入っている結果となった。レベルとの比較ではないため、スキャナの測定精度による結果であること、部分的には切削カスなどの誤差を含んでいる可能性もあるなか、高精度に自動制御し施工できたと言える。

### 5.3 その他効果

今回、両現場共片側1車線道路の片側のみ切削する工事のため、センターライン部分は、反対車線の車両が往来しており、特にオペレータがセンターライン側で切削機の操作を実施していたが、路面マーキングを見ながら実施する必要が無いこと、運転に集中できることから、安全性の向上、オペレータの負担軽減を両現場で認められた。

## 6. 今後の運用について

RD-MCを活用するにあたり、現況路面データが必要なため、今回地元測量を活用して現況面計測、設計データ作成を実施し、うまく運用して施工することが出来た。今後も元請け施工会社、地元測量業者、切削業者と分業して運用することにより、3次元データの知識が比較的浅い施工会社でも運用できることを確認した。今後、今回の運用方法で進めていけば経験の浅い施工者でもICT活用工事が対応可能と考える。(図-25)

また、検証工事-2では出来形管理資料作成で従来より時間がかかった原因のひとつとして、慣れない3次元データ処理作業が考えられる。しかし、3次元データ活用の経験を積むことにより、今後のICT舗装工への対応につながると考えられる。

との意見もいただき、今後のICT切削工普及の足掛かりになる事例と考えています。

効果についても、約26%の作業日数縮減が確認できましたが、安全性についても向上し、特に夜間工事等における事故防止にも貢献できると思われれます。

今後も兵庫県だけではなく、本システムが全国の自治体でも活用され、普及することによりICT舗装修繕工全体の効率向上および安全性の向上につながることを期待します。

\*1 CONTACTとは、Construction Tactics Group(建設戦略会議)の略でi-Constructionの普及を推進するため、3Dデータをハンドリングするメーカー有志が集まり発足したグループ。

以上

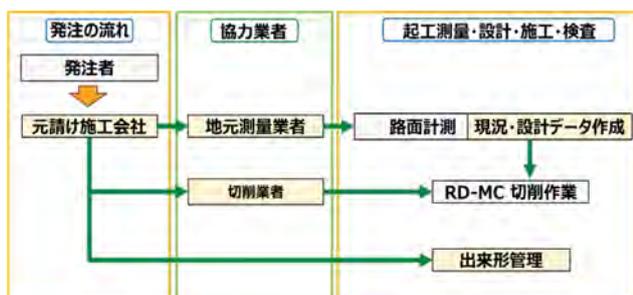


図-25 分業状況

## 7. まとめ

今回、兵庫県にご協力をいただき、CONTACT<sup>\*1</sup>のメンバーとして兵庫県発注の実際の切削オーバーレイ工事で効果検証を実施することができました。御礼申し上げます。

また、今回はじめてICT工事に取り組む業者に活用していただきましたが、このような状況においても問題無く本システムを活用し、高精度に施工ができたことは、非常に意味がある結果であり、受注業者からも、今後もICT切削工を実施したい

## 37. UAV を活用した橋梁点検の撮影方法に関する考察

国立研究開発法人土木研究所 ○ 下川 光治  
 国立研究開発法人土木研究所 森川 博邦  
 国立研究開発法人土木研究所 服部 達也  
 国立研究開発法人土木研究所 榎本 真美  
 国立研究開発法人土木研究所 二宮 建

### 1. はじめに

日本国内には、国民生活に不可欠な共有財産の1つである道路橋（橋長 2m 以上）が約 72 万橋あり、その半数は高度成長期に建設されたもので、40 年以上にわたり供用されている。この老朽化した橋梁を効率的に維持管理することは社会的な要請となっている。

国土交通省では、橋梁定期点検要領に基づき、全ての橋梁について 5 年に 1 回点検技術者が全部材を近接目視し、確認した損傷状態などを踏まえ、健全性を診断し、適切に措置することを定めている。橋梁点検では、点検技術者の接近が困難な部位への特殊車両の適用や、点検作業および報告書作成への多大な時間・費用を多く必要としている。橋梁点検の生産性向上は、少子高齢化等による土木分野の技術者不足もあり喫緊の課題となっている。そのため、点検作業の効率化に対するニーズを受け、対応策として新技術の活用を進めている。

### 2. 本研究の目的

現状の橋梁点検では、撮影した損傷画像を点検調書に利用して、手作業で画像の位置関係を整理している。UAV（Unmanned Aerial Vehicle）等の新技術での点検画像は、橋梁全体を対象とし網羅的に撮影するため撮影枚数が多く、位置関係を人手で整理するには手間と時間を必要とし効率的ではない。

そこで筆者らは、市場で調達できる画像を 3 次元化する SfM（Structure from Motion）ソフトウェアを活用することで、点検画像の撮影位置、撮影方向の自動推定を行い、3 次元モデル上で点検画像から損傷を確認し計測する手法を考えている（図-1）。これにより、損傷位置の記録と確認作業を大幅に効率化できると考えている。

本稿では、UAV を活用した橋梁点検業務の撮影マニュアル作成を目的とし、茨城県ならびに鳥取県の実橋梁を UAV で撮影し、形状が複雑な鋼桁橋

梁とハイピア PC 橋における橋梁 3 次元モデル構築の実現性が得られたので報告する。（図-1）

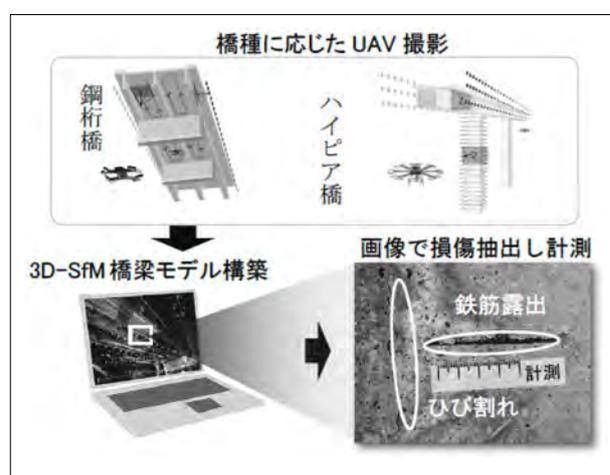


図-1 UAV と SfM を活用した橋梁点検イメージ

### 3. 検討フロー

本稿における検証フローを図-2 に示す。検証 1 では、橋梁の損傷確認に必要な画像品質について確認した。検証 2 では、橋梁の 3 次元モデル構築のための SfM 処理方法の検証と網羅性を確認した。検証 3 では、衝突回避型 UAV を用いた鋼桁橋の 3 次元モデル構築用の網羅的な撮影方法の確認と SfM 処理方法の検証を行った。検証 4 では、非 GNSS 環境下で自動飛行する UAV を用いたハイピア橋の 3 次元モデル構築用の網羅的な撮影方法の確認と SfM 処理方法の検証を行った。

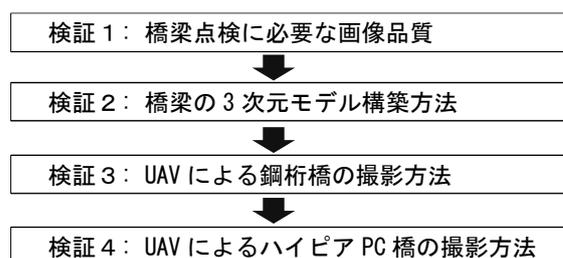


図-2 検証フロー

#### 4. 検証1：橋梁点検に必要な画像品質

##### 4. 1. 検証目的

検証1では、橋梁のひび割れ幅に対し撮影画像に必要な対物画素寸法を確認することを目的とした(図-3)。この検証を行うための対象構造物として、細かなひび割れが多い茨城県の寒沢橋の床版裏を選定した。(表-1)

表-1 対象構造物

橋梁名	寒沢(かんさわ)橋(茨城県)
大きさ	橋長 10.4 m 幅 7.4 m
構造	単純 PC プレテン I 桁橋
架設年度	1970
現地写真	

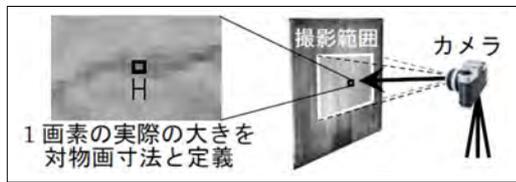


図-3 対物画素寸法の解説図

##### 4. 2. 検証方法

対物画素寸法の算出方法は、最初に図-4の検証フローに沿って一定距離で画像を取得し、SfM処理により撮影距離を算出した。次に、図-5のような撮影距離：H、カメラ焦点距離：F、カメラセンサーサイズ(横)：W、カメラセンサー画素数(横)：S、から対物画素寸法：Pを算出した。

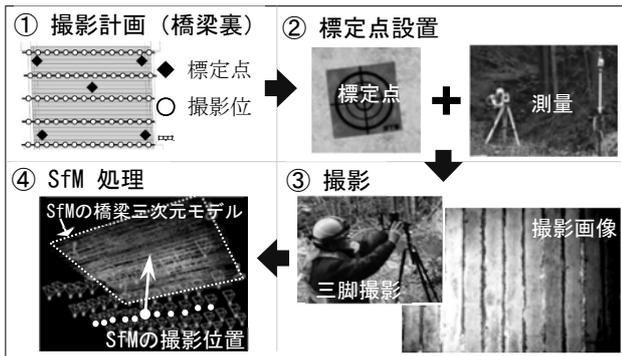


図-4 検証フロー

$$P = H/F * (W/S)$$

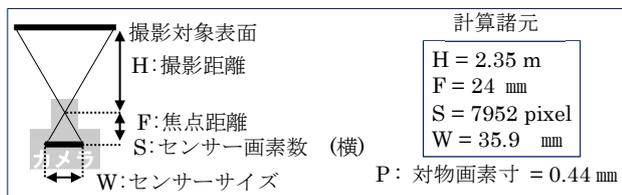


図-5 対物画素寸法の算出

#### 4. 3. 検証結果

ひび割れの認識方法は、図-6のように、ひび割れ幅 0.05 mm~0.2 mmを現地計測し、表2の条件下で撮影した対物画素寸法 0.44 mmの画像をディスプレイ上で拡大表示し、ひび割れ箇所を画像上で認識できるかを確認した(図-7)。その結果、ひび割れ幅 0.20mm~0.10mm は概ね確認することができたが、0.05 mmは半数確認できなかった。

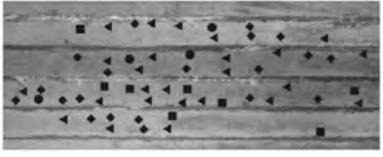
【計測箇所】			
	記号	ひび割れ幅	計測箇所数
	■	0.20 mm	4 個
	▲	0.15 mm	20 個
	◆	0.10 mm	25 個
	●	0.05 mm	8 個

図-6 ひび割れ確認箇所

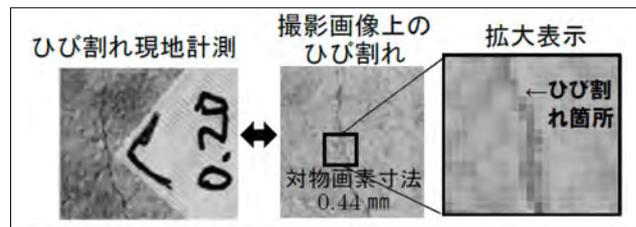


図-7 ひび割れ確認方法

表-2 撮影条件

撮影日時	2020年1月22日
撮影場所	橋梁床板裏(周辺は樹木密集地で暗い)
使用機材	単焦点レンズ(24mm)、三脚、LEDライト
露出設定	ISO400、絞り f/8、AF

#### 5. 検証2：橋梁の3次元モデル構築方法

##### 5. 1. 検証目的

検証2では、I桁鉄桁橋梁の上部構造を撮影し、近接目視点検相当の撮影画像から、橋梁3次元モデル構築に向けたSfM処理方法の検証と網羅性の確認を目的とした。この検証を行うための対象構造物として、損傷もあり UAV撮影を想定した事前撮影として、三脚固定カメラにより容易に撮影できる茨城県の園部新大橋を選定した。(表-3)

表-3 対象構造物

橋梁名	園部(そのべ)新大橋(茨城県)
大きさ	橋長 45m 幅 8.5m
構造	I 鉄桁鋼橋
架設年度	1973
現地写真	

## 5. 2. 検証方法

橋梁点検の近接目視点検用に近接で撮影を行う近接撮影では、図-7 のような、I 桁鉄桁橋の上部構造を撮影対象の対物画素寸法 0.5mm となるように複数方向から撮影した。また、近接撮影枚数を低減させるため、SfM 処理する際の写真重複率の補足用として、遠景から床板全体を撮影した遠景撮影を行った。

橋梁 3 次元モデル構築用の SfM 処理方法は、近接と遠景の撮影画像と現地に設置した標定点 (16 点) を使用し、両側面と下面、斜め方向、近接と遠景などいろいろな組合せで SfM ソフトウェア Pix4D により処理を行うことで検証した。

網羅性は、構築した橋梁モデル上に画像を重ね合わせ撮影範囲と未撮影範囲を確認した。

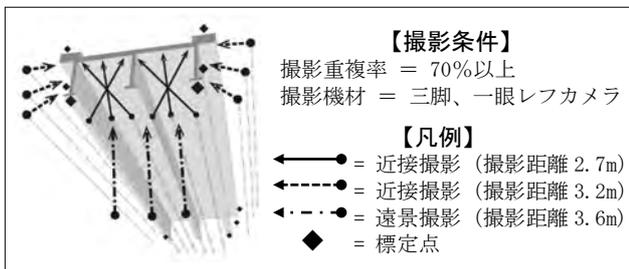


図-7 橋梁 3 次元モデル撮影計画図

## 5. 3. 検証結果

SfM 処理の検証では、側面と下面を一度に SfM 処理でモデル化したところうまく接続しなかったため、図-8 のように部材毎に分割処理したのち接合する方法で 3 次元モデルを構築した。

網羅性では、図-9 に示すように、未撮影範囲を確認した。特に、主桁の下フランジ部は引っ張り応力が大きく、塗装割れ確認が必要な箇所である。

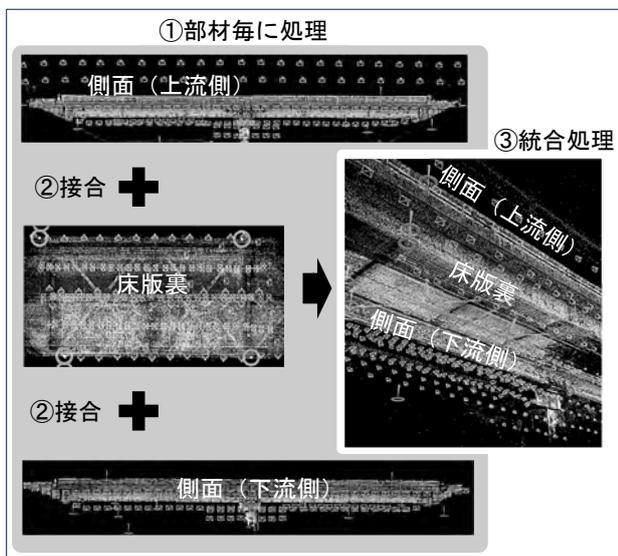


図-8 SfM 処理フロー

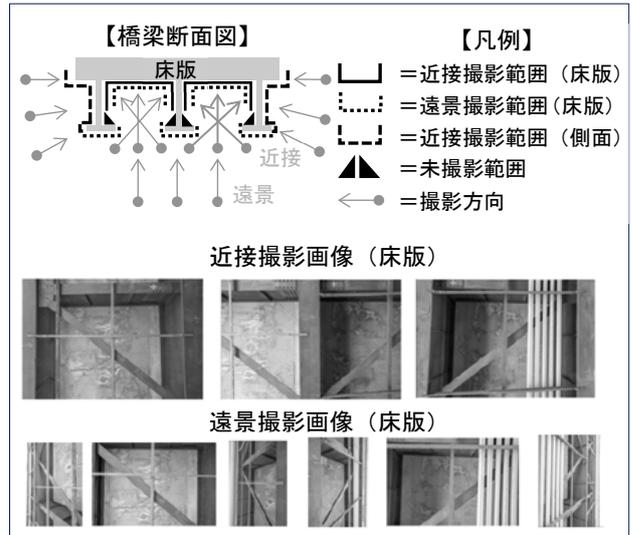


図-9 網羅性の確認

## 6. 検証 3 : 橋梁の 3 次元モデル構築方法

### 6. 1. 検証目的

検証 3 では、I 桁鉄桁橋の上部構造を対象に、UAV にて桁内部を近接撮影し、橋梁 3 次元モデル構築用の撮影方法と SfM 処理の検証を目的とした。検証には、ジャパン・インフラ・ウェイマークの衝突回避用 UAV (図-10) を用いた。この検証を行うための対象構造物として、架設年度が古い、茨城県の機初橋とした。(表-4)

表-4 対象構造物

橋梁名	機初 (はたそめ) 橋 (茨城県)
大きさ	橋長 110m 幅 6.3m
構造	I 鉄桁鋼橋
架設年度	1951
現地写真	

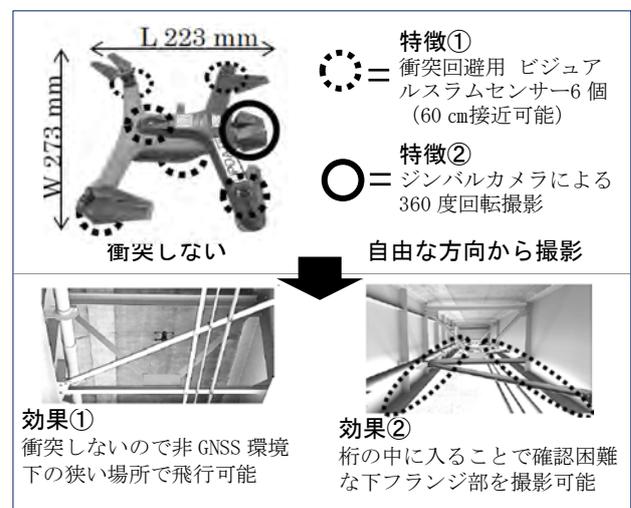


図-10 衝突回避型 UAV (J2) の特徴

## 6. 2. 検証方法

撮影方法の検証では、図-11 のように近接撮影として、近接目視点検相当の桁内部（床版下面を含む）と橋梁側面を網羅的に撮影し、桁外部においては、中景撮影として桁内部の近接撮影と遠景撮影の接合用に撮影し、遠景撮影として標定点観測用の撮影を行った。

SfM 処理の検証では、現地に設置した標定点（上部鋼構造の側面と下面）を使用して桁内部を含めた橋梁 3 次元モデルを SfM ソフトウェア Pix4D により処理を行うことで検証した。

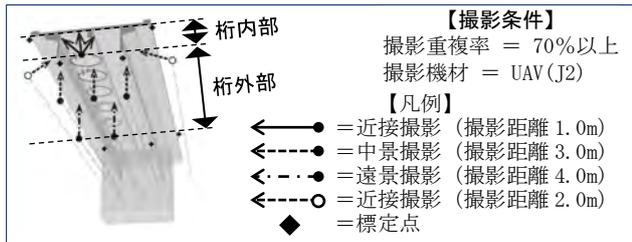


図-11 UAV 撮影計画図

## 6. 3. 検証結果

撮影方法の検証では、図-12 に示すように桁内部は狭く配管があったため桁半部を対象とした。移動範囲は制限されるが、カメラ方向を回転させることで網羅的に撮影できた。

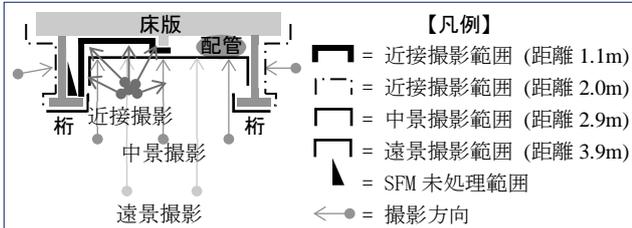


図-12 UAV 撮影実施図

床版の対物画素寸法は、SfM 処理で算出した撮影位置から床板（3次元モデル）間を計測し 1.1m を撮影距離とし、カメラ諸元と計算した結果 0.38mm と十分な値であった。

桁内部の SfM 処理では、桁内部の 3 次元モデルができたが、フランジ下部に未処理範囲があった（図-12）。その原因として、画像の重複率不足が考えられる。

桁内部の近接撮影画像と桁外部の中景・遠景撮影画像を同時に処理した場合、一部接続されなかった（図-13）。このような場合には、近接撮影画像と中景・遠景撮影画像に写った同一点を手掛かりに手動で接合する方法で、橋梁全体の 3 次元モデルを構築可能となる。この方法により机上で形状の複雑な鋼桁橋の桁内部の全てを画像上で確認が可能となった。これらの活用方法の事例として、国土交通省の「点検支援技術（画像計測技術）」を

用いた 3 次元成果品納品マニュアル」のオルソモザイク画像作成および 3D ビューアモデル構築を行い損傷の一部を抽出した（図-14）。

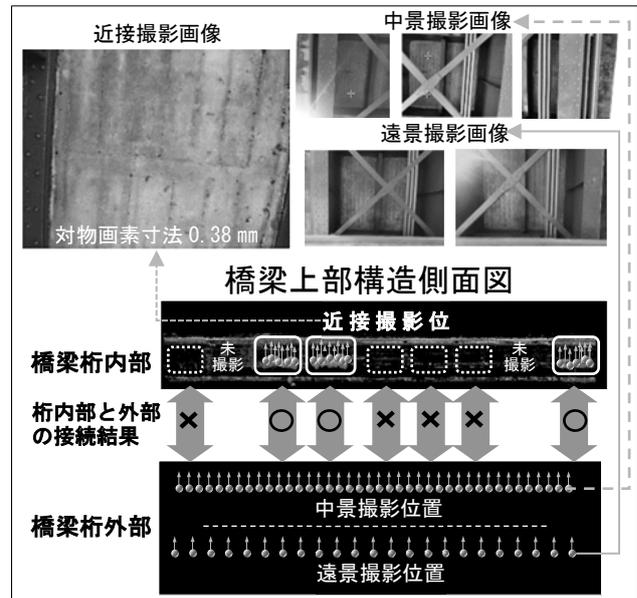


図-13 桁内部と外部の SfM 接合処理結果

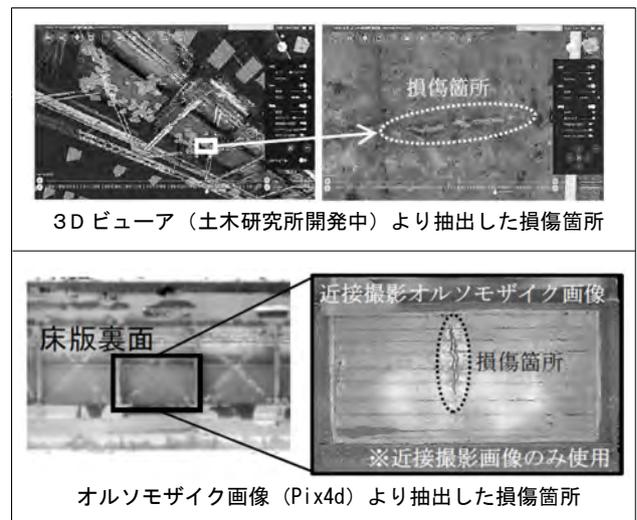


図-14 3次元成果品納品マニュアルの 3D ビューアとオルソモザイク画像による損傷抽出

## 7. 検証4：橋梁の3次元モデル構築方法

### 7. 1. 検証目的

検証4では、ハイピア PC 箱桁橋を対象に、プログラム飛行 UAV により近接撮影し、橋梁 3 次元モデル構築用の撮影方法と SfM 処理の検証を目的とした。また、検証には、デンソーの UAV を用いた（図-15）。さらに、遠景撮影を利用した標定点設置方法の検証を行い（図 16）。検証には DJI の UAV を用いた。この検証を行うための対象構造物として、手動操作の UAV では近接撮影が困難な、ハイピア橋梁の鳥取県の淵見（ふちみ）大橋とした。（表-5）

表-5 対象構造物

橋梁名	淵見大橋（鳥取県）
大きさ	橋長 167.0m 幅 9.2m 橋脚高 31.0m
構造	PC 連続ラーメン箱桁橋
架設年度	2001
現地写真	

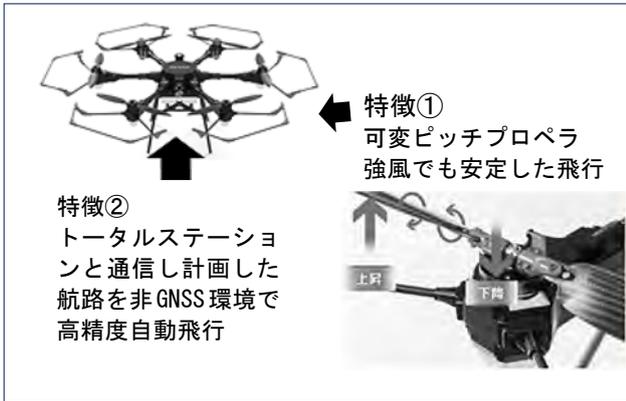


図-15 非GNSS自動飛行UAV（デンソー）の特徴

SfM 処理の検証では、遠景撮影画像から SfM 処理により 3 次元モデルを構築した。使用した標定点は地上レーザ計測の点群データから抽出した。近接画像の SfM 処理は、遠景撮影 3 次元モデルから抽出した座標を標定点に使用し、近接撮影橋梁 3 次元モデルを SfM ソフトウェア Pix4D により処理を行うことで検証した。

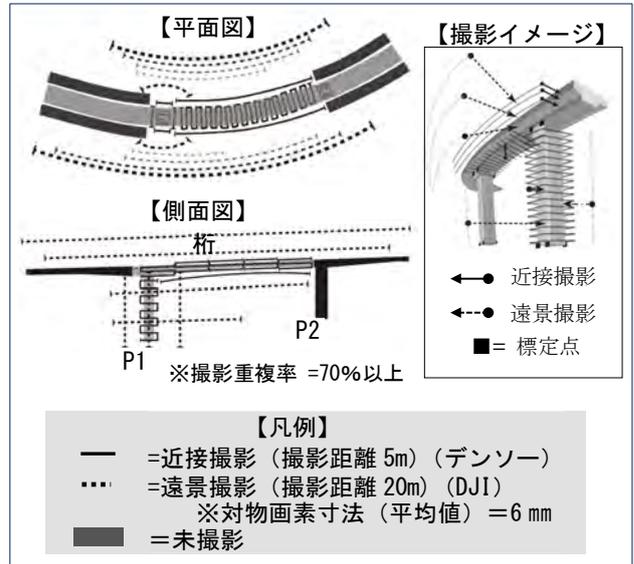


図-17 撮影実施図

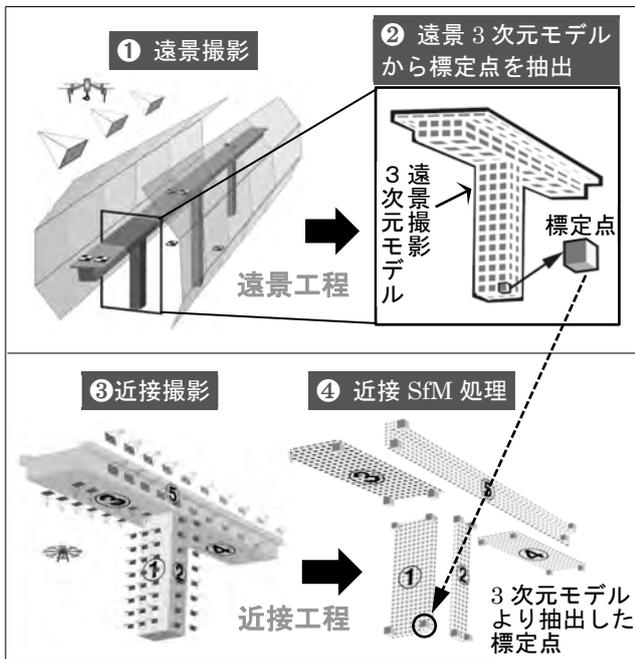


図-16 遠景撮影 3Dモデルによる標定点作成

### 7. 3. 検証結果

撮影方法の検証では、計画した近接撮影範囲の撮影を行った。橋台付近は樹木が茂っているため UAV の飛行は難しい。近接撮影画像の対物画素寸法は、図-18 に示すように対物画素寸法 0.4 mm を確認した。

SfM 処理の検証では、遠景撮影画像の SfM 処理を全域処理した場合、橋梁を境に統合されなかったため、図-19 に示すように道路を境に別々に SfM 処理し、橋梁モデルを生成し統合を行った。次に図-20 に示すように 3 次元モデルを作成し近接撮影画像 SfM 処理用の標定点座標を抽出した。

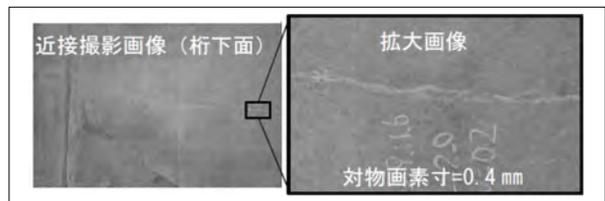


図-18 近接撮影地上画素寸法確認結果

### 7. 2. 検証方法

撮影方法の検証では、図 17 側面図のように近接撮影範囲として橋脚 P1 と桁の側面と裏面（P1-P2 区間）を網羅的に撮影し、遠景撮影は、橋梁全体を対象とするため、安全を考慮し道路真上を避けた飛行可能な位置から橋梁を挟むように複数方向から撮影し、橋脚は P1 を上下方向に撮影した。

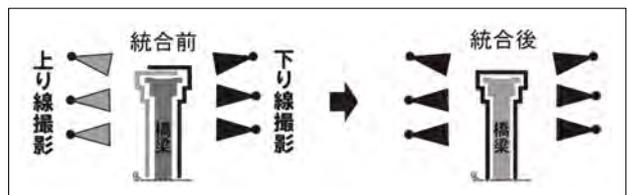


図-19 遠景撮影モデル統合イメージ図

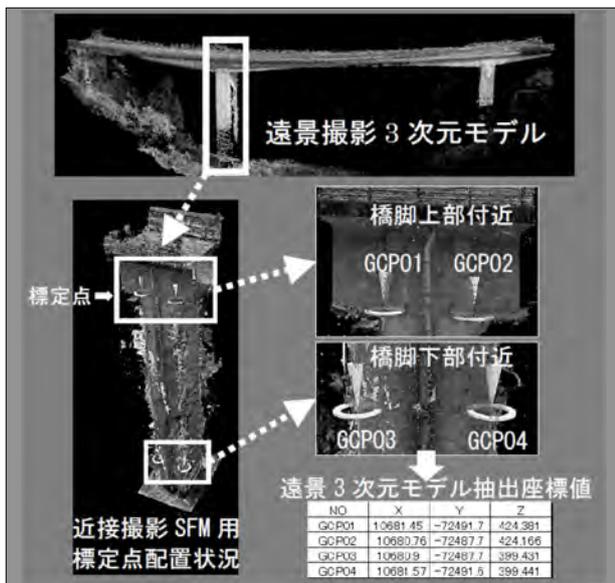


図-20 遠景 3次元モデル標定点座標抽出方法

近接撮影画像 SfM 処理の検証は、図-21-①に示すように橋脚の全方向（正対 4 方向と角 4 方向）を同時に処理した場合、橋脚として統合されなかった。SfM 処理方法については、図-21-②③に示すように部材を統合し橋梁モデルを生成した。

橋梁全体の 3 次元モデルにより机上でハイピア橋の全てを画像上で確認が可能となった。これらの活用方法の事例として、前項の 6-3 と同様オルソモザイク画像作成および 3D ビューアモデル構築を行い損傷の一部を抽出した（図-21-④）。

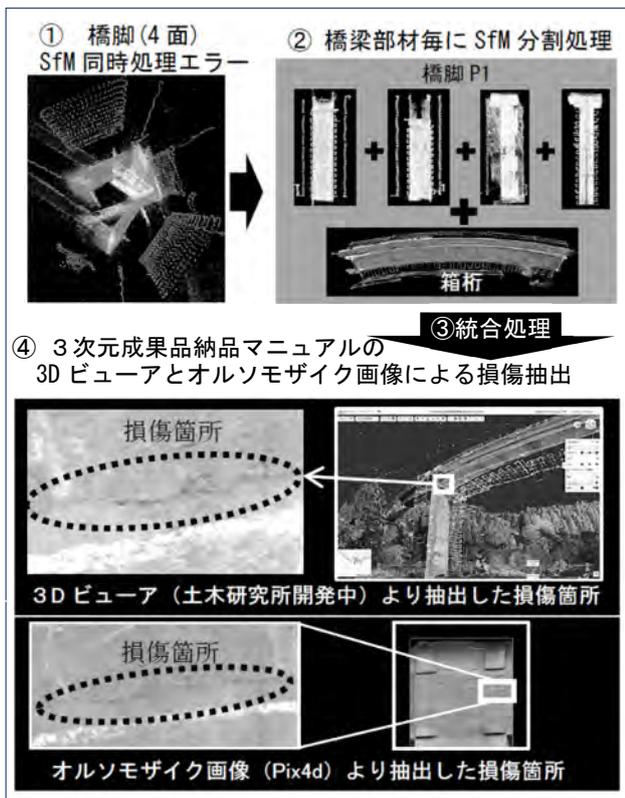


図-21 近接撮影 SfM 処理方法

## 7. まとめ

本稿では、UAV を活用した橋梁点検用撮影マニュアル作成を目的に、UAV で撮影した画像から、SfM ソフトウェアを活用した橋梁 3 次元モデルを構築するための撮影方法と SfM 処理方法について、下記の項目が得られた。

- ① 「橋梁の 3 次元モデル構築方法」では、橋梁を網羅撮影した上で、部材毎に SfM 処理する方法を考案した。
- ② 「UAV による鋼桁橋の撮影方法」の検証では、衝突回避型 UAV を活用することで、桁内部の網羅的な近接撮影が可能であることを確認し、近接画像から桁内部を含めた橋梁 3 次元モデルを構築するための撮影方法を考案した。
- ③ 「UAV によるハイピア PC 橋の撮影方法」の検証では、橋梁下の非 GNSS 環境下で自動飛行する UAV を活用することで、計画した航路に沿った近接撮影が可能であることを確認した。さらに、橋梁全体を遠景撮影し構築した 3 次元モデルから座標値を抽出したものは標定点の代用が可能であることを確認した。

今回の結果により、現地での点検技術者の近接目視点検作業に先立って机上にて橋梁を網羅的に画像上で確認する技術を確認することができた。

今後は、本稿で確認できた事項について、実運用レベルへ SfM 技術を適応させるため、実橋梁で下記の検証を予定している。

- I 桁鋼桁橋の桁内部の未撮影範囲(下フランジ部)の撮影方法と SfM 処理方法の検証
- SfM 処理が許容可能な撮影距離と撮影角度の限界値の確認
- SfM 処理による橋梁オルソモザイク画像の検証

謝辞：本研究では、橋梁撮影に関して、茨城県と鳥取県から検証場所を提供していただいた。さらに、アジア航測株式会社により計画および測量作業の助力、株式会社ジャパン・インフラ・ウェイマークより UAV 撮影の助力をいただいた。ここに謝意と敬意を表す。

## 参考文献

- 1) 下川光治, 新田恭士, 二宮建, 田中洋一: 橋梁点検画像の 3 次元管理に関する考察, 令和元年建設施工と建設機械シンポジウム, pp. 177-180, 2019

## 38. 水路トンネル調査ロボットの開発

### 自律飛行可能な飛行船型ロボットによる水路トンネル調査の適用性確認

西松建設株式会社  
西松建設株式会社  
長崎大学

○ 松浦 誠司  
原田 耕司  
山本 郁夫

#### 1. はじめに

水路トンネルには、主として電力関連や農業関連のトンネルがある。電力関連の導水路・放水路などの水路トンネルは総延長が 4,700 km に達しており、平均経過年数は約 50 年である<sup>1)</sup>。また、農用水路トンネルは総延長が約 2,000 km である。

水力発電の導水路や農業水路など水路トンネルは、震災等の災害後の調査では、安全の確保のため無人で被災状況を把握することが重要であり、小断面の水路トンネルでは狭い坑内を長距離調査することが必要となるが、マルチコプターでは電源等の問題があり適用が難しい。

そこで、飛行のための消費電力が少なく小断面水路トンネル坑内での自律飛行が可能な飛行船型の水路トンネル調査ロボット(写真-1)を開発し、実構造物において適用性を確認した。

#### 2. 水路トンネル調査ロボットの概要

水路トンネル調査ロボットは、ヘリウムガスを封入したバルーンを浮体とした飛行船型であり、制御機器、各種推進装置、カメラ・照明装置等を搭載し、小断面の水路トンネルにおいて自律飛行し、トンネル壁面の画像を取得することで、無人調査を行う装置である。トンネル壁面との距離を保持する制御システムにより、トンネル線形に追従して水路トンネル内を自律飛行する。



写真-1 水路トンネル調査ロボット

#### 2.1 水路トンネル調査ロボットの特長

水路トンネル調査ロボットは飛行体とすることで、水路トンネル底面の水や瓦礫等の影響を受けずにトンネル内を移動して調査することができる。また、ヘリウムガスを注入したバルーンにより浮力を得るため、マルチコプターと比較して飛行で消費するエネルギーが少なく、航続時間が長いことから<sup>2)</sup>、長距離の調査が可能である。

#### 2.2 ロボットの構成

水路トンネル調査ロボットは、浮体(バルーン)に機体やカメラモジュール等、図-1に示す一連の機器で構成され、総質量は 4,970g である。以下にそれぞれの仕様を記す。

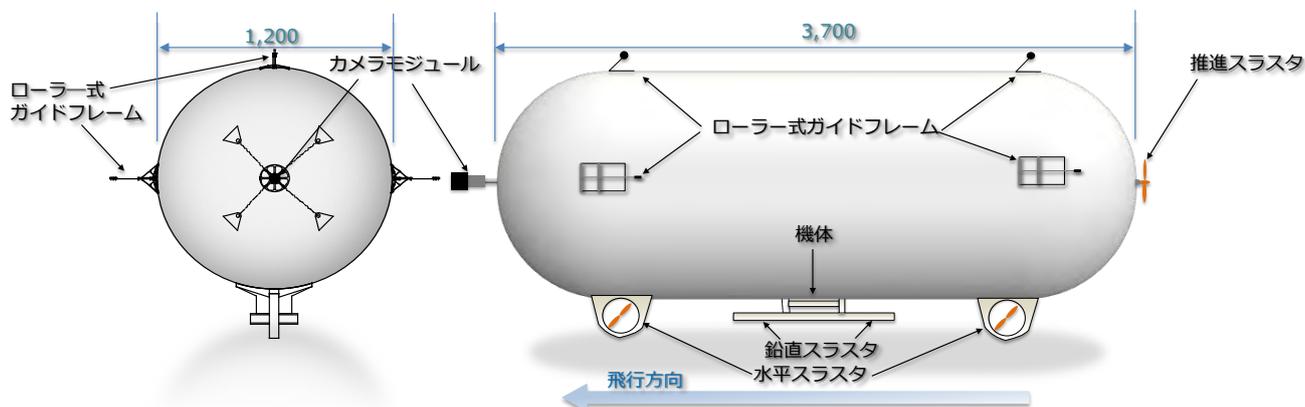


図-1 水路トンネル調査ロボットの構成

### (1) バルーン

バルーンは、塩化ビニル製シートを円筒形状に貼り合せたものであり、設計寸法は、直径 1,200mm × 長さ 3,700mm である。バルーン内にヘリウムガスを注入することで水路トンネル調査ロボットを浮遊させる。

### (2) 機体

機体は、ポリスチレンフォーム製のメカデッキモジュールに水路トンネル調査ロボットの動作を制御するための一連の機器を搭載したものである(写真-2 (a))。主な搭載機器は、電波受信部、制御用マイコン、バッテリー、鉛直スラストである。

### (3) カメラモジュール

カメラモジュールは、360度カメラと 54W の LED 照明をフレームに装着したもの(写真-2 (b))であり、バルーン前端に固定する。トンネル前方を中心とした半球画像を撮影することで、トンネルの天端・側壁から底部までの連続画像(2880 × 2880 ピクセル 30fps (1:1))を取得できる。

### (4) 推進スラスト

推進スラストは、ヘリウムガスで浮遊した水路トンネル調査ロボットに推力を与えるためのものであり、バルーン後端に設置する。

### (5) ローラー式ガイドフレーム(写真-2 (c))

ローラー式ガイドフレームは、トンネル壁面や壁面に取り付けられた金具等のトンネル附属物にバルーンや機体が接触し、損傷することを防止するため、トンネル壁面と接触する頻度が高いバルーンの上部と左右側部に設置した。カーボン製のアーム先端にジュラコン製のローラーを備えており、壁面と接触時の摩擦による飛行速度の低下を抑制する。

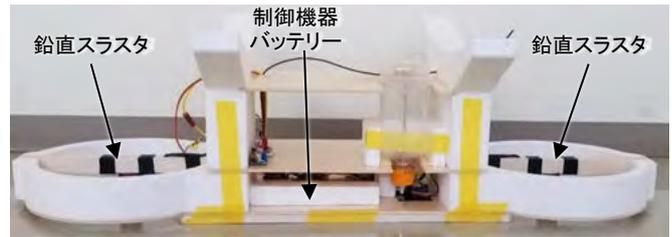
また、張出し寸法を調整することで、トンネルの断面寸法やトンネル附属物の壁面からの突出寸法などのトンネルの条件に対応できる。

## 2.3 自律飛行のための制御

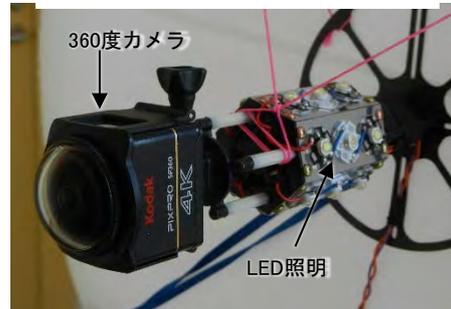
水路トンネル調査ロボットの制御システムは、以下の鉛直制御と水平制御を独立して行っている。

鉛直制御は、超音波センサで得たバルーン中心とトンネル床面までの距離  $\delta_z$  を条件式に当てはめ、 $\delta_z$  の変化に応じてモータの PWM (出力) を制御してモータを正転あるいは逆転させることで、バルーン中心がトンネルの中心になるように自律制御する。

水平制御は、前後の水平スラスト基部に 2 つのレーザセンサを搭載してそれぞれ 距離  $\delta_F$  および  $\delta_R$  を取得し、トンネルの進行方向に対する機体の傾き角度  $\theta$  およびバルーン中心と壁面との距離  $\delta_x$  を演算している(図-2)。



(a) 機体



(b) カメラモジュール



(c) ローラー式ガイドフレーム

写真-2 水路トンネル調査ロボットの主な機器

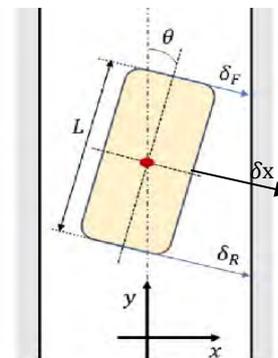


図-2 水平制御の概念 (x-y 座標)

$\theta$  に対して、許容傾き角度の範囲を超えた場合は、前後の水平スラストを前後逆位相で作動させ、機体を回転させる。また、 $\theta$  が許容傾き角度範囲内である場合は、壁面との距離  $\delta_x$  に応じて前後の水平スラストを同位相で作動させ、バルーン中心がトンネル中心になるように水平位置を制御する。

## 2.4 調査手順

水路トンネル調査ロボットによる調査は、発進側と到達側に人員を配置し、その間は無人で水路トンネル調査ロボットを自律飛行させることにより行う。片方のトンネル坑口から発進させた水路

トンネル調査ロボットは、壁面の画像を取得しながら自律飛行を行い、反対側の坑口へ到達する。到達後にカメラから SD カードを取り出し、記録画像から顕著なひび割れや壁面の崩壊、その他変状の有無などを確認する。変状の位置は、壁面の距離表示や飛行時間と飛行距離の関係から把握する。

### 3. 実構造物での実証実験

実構造物の水路トンネルで水路トンネル調査ロボットを自律飛行させ、現場適用性の検証を行った。

#### 3.1 現場概要

対象となる水路トンネルは、**図-3**に示すように幅、高さともに2,040mmの馬蹄形であり、最小曲線半径30m、平均勾配は0.07%でほぼ水平である。実験時は水路は稼働しておらず、坑内湧水などにより最大水深15cm程度の流水がみられた。坑口に接続する下流側の水槽（作業スペース長さ8.7m×幅3.8m×高さ2.8~4.0m）において水路トンネル調査ロボットの組立て、調整を行い、上流に向かって自律飛行させた。

#### 3.2 実験内容

##### (1) 作業性の確認

搬入・組立て・準備・片付けなど一連の作業の所要時間や作業手順を確認、記録した。

##### (2) 長距離自律飛行試験

水路トンネル調査ロボットを水路トンネル内の2,500mの距離の長距離自律飛行を行い、速度や飛行の安定性、バッテリーの消耗状況等の確認を行った。

##### (3) 取得画像の確認

画像取得状況は、**写真-4**に示す1~15mmの太さを変えた線（線と線の間隔も1~15mm）を記入したチェックシートをトンネル壁面に貼り付けておき、取得した画像で判別可能な範囲を確認した。

#### 3.3 実験結果

##### (1) 作業性の確認

水路トンネル調査ロボットの組立調整を行った下流側水槽は、地上の1,200mm×800mmの開口部より水槽床面までタラップで約5m降りた位置にあった。このため、各パーツをロープを用いて水槽内まで荷降ろしし、水槽内で組み立てた。

ヘリウムガスボンベは地上に配置し、長さ10mのホースを用いて水槽内のバルーンにガスの注入を行った。

水槽への資機材の投入開始からの組立て、調整を行い、飛行準備が完了するまでの時間は約90分だった。また、解体搬出作業は、組立設置と逆の手順で行い、開始から坑外へ全ての資機材の搬出までの時間は約50分だった。以上より、水路トンネ

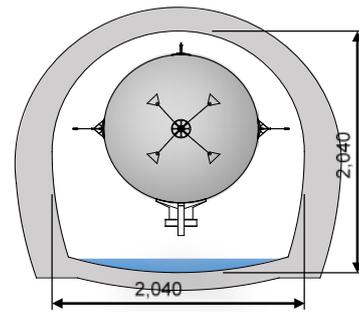


図-3 水路トンネル断面



写真-3 飛行状況

ル調査ロボットによる調査では、2,500m程度の距離を2回調査するのであれば1日の作業時間内に十分に収まることがわかった。

##### (2) 長距離自律飛行試験

発進箇所でプロポにより推進スラストの出力（トリム値）を調整して固定し、2,500mの距離を自律飛行させた（**写真-3**）。

##### ①鉛直方向制御結果

鉛直スラストの作動により床面との距離300mm以上を保って飛行できた。

##### ②ガイドフレームの稼働状況

バルーンの上部および側部に取り付けたローラー式ガイドフレームは、壁と衝突した際、アーム部分が適度に撓ることで衝撃を和らげつつ反発し、かつ先端のローラーが回転して摩擦抵抗を低減していた。これによりバルーンの壁面への衝突や、壁面に取り付けられた金具（高さ70mm）が飛行に支障することを防止できた。

##### ③バッテリー消費状況

時速約3km/hでの2,500mの長距離自律飛行におけるバッテリーの電圧低下状況を**図-5**に示す。残圧100%の12.4Vから2,500m飛行後の電圧の測定値から、使用限度の10.8Vに低下するまでの飛行可能距離は6,000m以上となっており、2,500mの調査に関してバッテリー残量にはかなり余裕がある状態であった。

##### (3) 取得画像の確認

飛行速度が約1.5km/hの場合、飛行方向（トンネ

ル軸方向)および飛行と直角方向(トンネル軸と直角方向)ともに10mmが判別できた(写真-4)。一方、飛行速度が3km/hを超えた場合、飛行と直角方向(トンネル軸と直角方向)は15mmがようやく判別できる程度であった。よって、10mmを判別したい場合は、飛行速度を落として飛行させる必要があることがわかった。飛行速度が遅くなると距離当たりのバッテリー消費量が増加することが懸念されるが、時速約3km/hの飛行では6,000mの飛行が可能であることから、半分の1.5km/hまで低下させても2,500mの調査は十分に可能である。

#### 4. まとめ

飛行船型水路トンネル調査ロボットの開発で得られた成果を以下に記す。

- ① 水路トンネル調査ロボットは、トンネル線形に合せたスムーズな飛行ができ、小断面水路トンネル内で2,500mの自律飛行が可能である。
- ② 水路トンネル調査ロボットの総質量は5kg程度と軽量であり、分割・運搬が可能であるため、坑口部が立坑下にある場合でも運搬、組立、発進が可能である。
- ③ 調査の準備と撤収の所要時間は、それぞれ約90分および約50分であり、2,500m程度の距離を2回調査するのであれば1日の作業時間内に十分に収まる。
- ④ 前部に搭載したカメラモジュールにより、トンネル壁面の連続画像で10mmを判別できる。

今回の開発では、画像は360度カメラから得られた動画をそのまま確認していたが、これに加えて360度カメラによる半球画像から展開図を作成するソフトの導入を検討している。

本ソフトは、トンネル前方を中心に撮影した半球画像を2次的に展開して展開画像を作成するものである。本ソフトにより作成した展開画像を写真-5に示す。

本ソフトでは2点以上の距離が既知である点を与えるとその間の距離を画像の特徴から判別して自動的にトンネル延長方向の距離程を演算して展開図を作成できる。このため、水路トンネル調査ロボットのような飛行速度が一定でなく移動距離の測定が難しい飛行体ロボットにでも距離精度の高い展開図を作成することができる。水路トンネルの状況の記録として、俯瞰的に確認可能な展開図を併用することは有効である。

本飛行船型ロボットは災害後の概査を目的として開発した。今後はこのような展開図の活用に加え、撮影画像の高精度化や画像処理等により、災害時の応急点検だけでなく、定期点検に使えるようなシステムへの改良を検討する予定である。

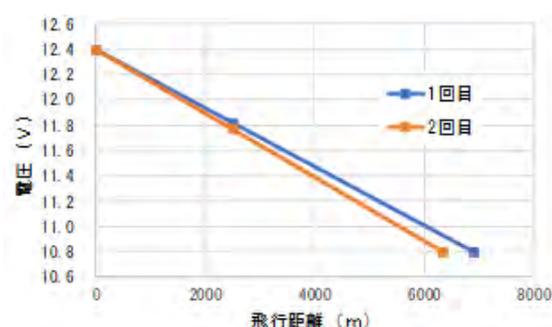


図-4 飛行距離とバッテリー電圧の関係 (10.8Vになるまで飛行可能)

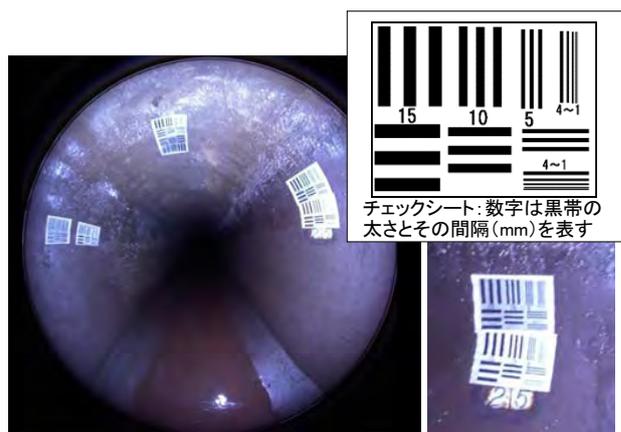


写真-4 画像取得状況

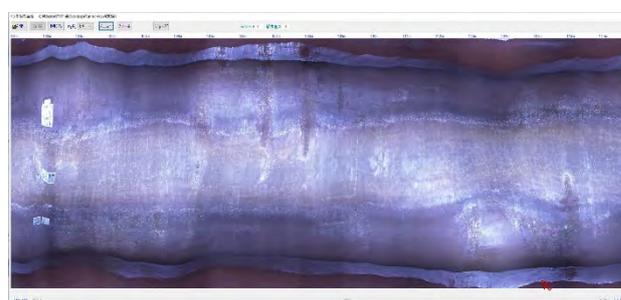


写真-5 画像展開ソフトによる展開画像の例 (左端の断面が写真-4の位置)

謝辞. 現場実証にあたり、快くトンネルを提供いただいたトンネル管理者様、また、半球画像からの展開図の作成にご協力いただいた磯貝信男氏に、深く感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 一般社団法人日本建設業連合会 電力工事委員会: 水力発電土木施設のリニューアル技術【増補改訂版】, p.276, 2015
- 2) 国土交通省: 点検支援技術 性能カタログ(案), pp.2,9,16,23, 2019

## 39. 写真計測 (SfM/MVS) を活用した低コストな路面損傷調査の試行報告

(株)環境風土テクノ

○ 本田 陽一

(株)愛亀

黒河 洋吾

宮城大学

蒔苗 耕司

### 1. はじめに

経年的に劣化が進行する道路路面は継続的な損傷調査が必要となる。供用中の調査となるため、目視によるクラック分布調査やマルチロードプロファイラによる路面形状の測定を行う際には一時的に通行規制をかける必要がある。路面計測車やMMSを用いれば通行規制なしに高速かつ高精度な計測が可能であるが、コストが大きくなりがちである。AIによる画像解析により路面の損傷程度を評価する手法も有効と考えられるが、微小な変形の定量的評価は容易でないと考える。

特に、歩道では狭隘な場所や急勾配、段差などが歩行者の通行のハザードとなる。車いすベビーカーでは2cmの段差も支障となることから微小な形状を調査・判別する必要がある。

そこで、汎用的で入手が容易な機器やオープンソースソフトウェアを活用して路面形状の3次元点群を再構成し、損傷や通行上のハザードを測定・把握するアプローチを試行した。3次元点群はSfM/MVS技術を用いて多数の写真画像から再構成した。ハザードとなる急勾配や段差は点群情報を利用して、手間をかけずにマッピングすることができる。

### 2. 方法

#### 2.1 撮影

UAVにより上空から撮影することにより広範囲の地形測量が可能である。しかし、路面損傷を対象としたとき、クラックや微小な段差を把握するためには細密な点群が要求され、路面への接近撮影が必要となる。また、細部形状の再現のためには、上空からの平行撮影よりも地上付近で多方向からの収束撮影<sup>1)</sup>が適する。そこで、手持ちカメラまたは車載カメラによる路面付近からの撮影を行った。撮影はできるだけ収束撮影に近づけるため、多方向からの撮影に努め、複数回往復撮影した。

撮影に使用したカメラは単焦点レンズを備えた一眼レフカメラと4Kアクションムービーカメラである。車道部については歩道からの撮影と車載カメラによる撮影とした。補修工事施工時には通

航制限がかけられるため、路面上からの撮影も行った。

歩道を撮影する際には、徒歩により前方または斜め側方の路面が画像内に含まれるようカメラを向けムービー撮影した。撮影された映像から0.5～2秒間隔で画像を切り出し、SfM処理の入力画像とした。

歩道の場合、対象領域のアスペクト比が100を超える(幅2～3mの歩道に対し、一度に処理する距離を200m～300mとしたとき)形状でも3次元再構成が可能のように、多くの画像に共通して写りこむ遠方の建物や地物も含まれるよう撮影した。

#### 2.2 3次元点群再構成

SfM/MVSにはオープンソースであるCOLMAP<sup>2)</sup>またはMeshRoom<sup>3)</sup>を用いた。この二つを比較すると、COLMAPはカメラモデルが充実していることと連続撮影を前提とした特徴点マッチングが可能であることなどから、高画角のアクションカメラによっても良質な点群を再構築することができた。一方、MeshRoomはテキストチャ付きの3次元メッシュを形成できる点に特徴があり、路面損傷を視覚的に把握する際に有用であった。

点群の編集にはCloudCompare<sup>4)</sup>を、可視化にはCloudCompareとParaView<sup>5)</sup>を主に用いた。これらもオープンソースとして公開されている。

歩道調査の場合、例えば2km区間で2cmの段差を扱う際にはスケールに10<sup>5</sup>の開きがあることから、一度に処理することは難しい。そこで、200m～500mほどの区間に区分して個別にSfM/MVS処理をしたのち、結合した。一度にSfM/MVS処理を行う画像数は4K画質でおよそ3000枚以内とした。

SfM/MVS処理に要した時間は1日～6日であった(intel i7-8700K,64G,RTX2060)。

#### 2.3 標点

供用中の車道、歩道内およびその付近に標点を設置することは難しいため、地物(縁石、マンホール、平板の角等)を座標合わせのための標点とした。標点の座標測位には安価な2周波RTK-GNSSモジュールを用いた。

SfMによる疎な点群再構成を行う際に標点座標

を内的拘束条件として与えれば得られる点群と実空間座標の誤差は適切にコントロールされると考えられる。しかし、今回使用したソフトウェアではこの手法が利用できなかったために、無標点にて得られた点群内から標点となる地物を選択して座標とスケールを与えた。

ただし、歩道では対象のアスペクト比が大きく、無標点による SfM 処理では実空間に対する十分な相似性を確保することができなかった。特に、屈曲部を含み、かつ全域から見渡せる地物が少ない領域ではその傾向が強かった。そこで、以下の手順で補正を実施した。

- 1) 剛体変換 (CloudCompare の align 機能) で座標、スケール変換する
- 2) GNSS 測点または補正済の隣接モデルと補正対象モデル間のずれ量 (ベクトル) を数点～十数点計測する
- 3) 対象モデルを覆う正方格子を作り、ずれ量測定点と格子点の距離の関数で重みづけしてずれ量を格子上に展開する
- 4) 格子点から線形補間により点群各点のずれ量を算出し、補正する

これまでの試行では、約 500m の延長ではほぼ 90 度の屈曲部を含む幅 2m 前後の歩道区間 (道路片側) で最大 1m 程度の修正が必要であった。ただし、このような事後補正では精度保証が難しいことに注意が必要である。

### 3. 路面補修工事への適用

車道の切削オーバーレイ工事において施工前と切削後の路面を 3 次元点群化して評価した。

#### 3.1 レーザースキャナとの比較

アスファルト表層 10 cm の切削が終了した時点でレーザースキャナおよび SfM/MVS により 3 次元点群を再構成した。写真撮影には単焦点の一眼レフカメラ (SONY α7III, α6300) を使い、夜間工事であったため工事用ライトまたはストロボを用いた撮影とした。図-1 は写真画像から点群を再構成してテクスチャ付きメッシュとして示したものである。切削機のビット痕まで精細に再現されている。撮影はこの図に示される範囲を再構築モデルの対象とし、周辺および内部から手持ち撮影した 24MP 画像 318 枚を利用した (写真-1 参照)。図-2 はレーザースキャナ (Leica ScanStation P40) による計測結果、図-3 は SfM/MVS による結果である。

図-4 はその両者の高さ方向に差を示したものである。SfM/MVS による方法ではモデル縁辺部 (モデル化対象範囲外) のデータばらつきが多くみられるが、モデル化対象とした切削面はではほぼ ±5mm 以内の差となっている。ビット痕による微細な凹凸を考慮すると、十分な精度が得られている

と考えられる。

図-5 は SfM/MVS による点群の点間距離分布である。切削面は点間距離が  $10^{-5}$ m 程度で、精細に再現されている。一方、対象域の周辺部 (収束撮影の範囲外) は点間距離が長く、図-4 にも示されているように精度が低下している。



図-1 テクスチャ付きメッシュモデル



写真-1 切削面を撮影した画像の例

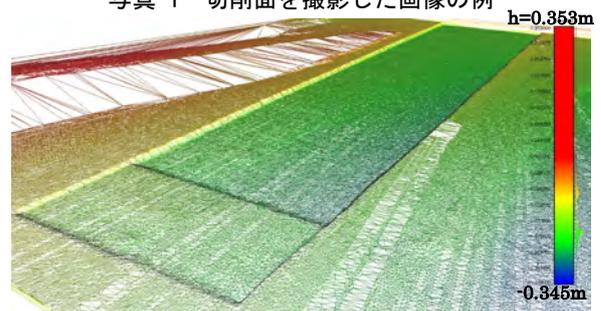


図-2 レーザースキャナによる点群 (メッシュ表現)

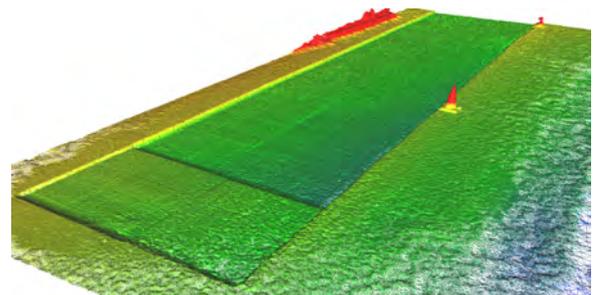


図-3 SfM/MVS による点群 (メッシュ表現)

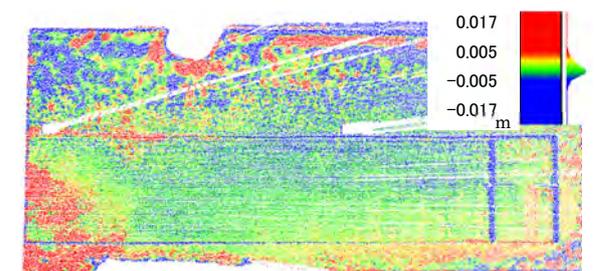


図-4 レーザースキャナと SfM/MVS の標高差



図-5 SfM/MVSによる点間距離

### 3.2 切削深分布

図-6 は 3.1 と同様に切削オーバーレイ工法によるアスファルト道路補修について、切削前および切削後を SfM/MVS により 3 次元再構成したものである。切削前後のモデルの差から切削深分布を求めることができる。ここでは赤色から青色になるほど切削深が大きい。図左下部に切削深の浅い領域（赤色）があるが、これは切削前に路面が沈下していたところであり、切削面の平坦性は確保されている。

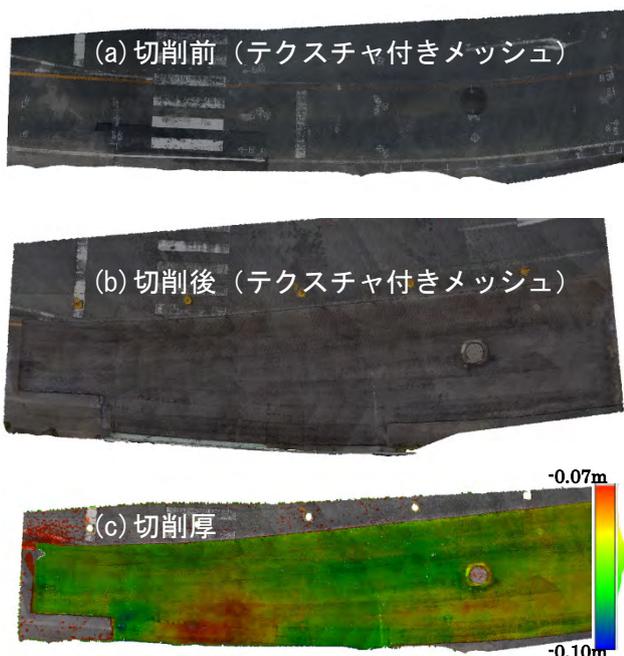


図-6 切削前後のモデルと切削深さの分布

### 3.3 クラックの抽出

図-6 中にあるマンホール付近の切削前後の 3 次元モデル拡大図を図-7 に示す。この図ではクラックや段差等を形状から抽出するため、3 次元モデル上に勾配分布を路面のテクスチャに重ねて示している。角度にして  $9^\circ$  以上の勾配を赤色で表しており、白に近い色彩ほど勾配が緩やかである。クラック部には局所的な斜面があるために勾配が大きい領域が線上に分布していることがわかる。

切削後は切削ビットの跡が一定方向に並んだ線状の高勾配域がみられるが、そのほかにクラック

と考えられるランダムな方向に連続した線状の分布が確認できる。なお、これら切削後の線状構造については、施工時の目視では判別が困難であった。

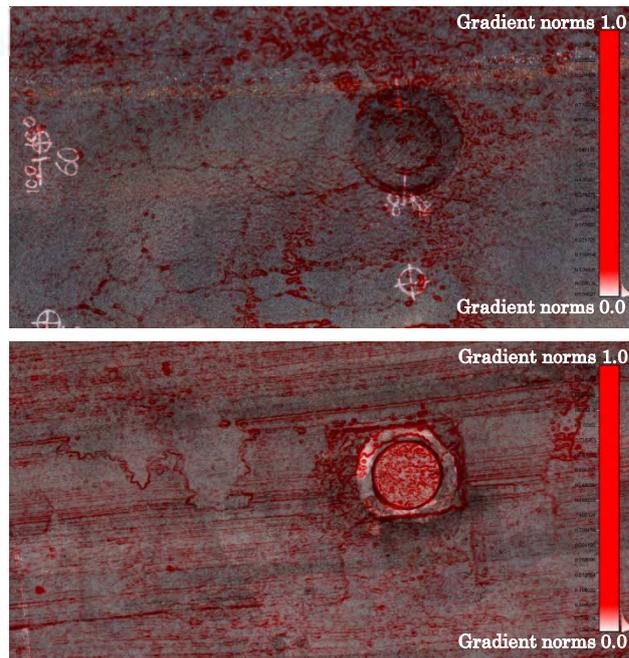


図-7 切削前後の路面表面（上：切削前，下：切削後）  
（テクスチャ付きメッシュモデルと勾配の重畳表現）

### 4. 歩道調査への適用

歩道調査では数百メートル～数キロメートルを対象に狭隘部や段差、勾配などについて確認していく必要がある。特に、段差はベビーカーの通行の障害となる 2cm を抽出しなければならず、広域、高アスペクト比形状、精細といった困難な条件がある。

図-8 は道路両側あわせて約 600m の歩道区間を SfM/MVS で 3 次元点群モデルとした例である。撮影は GoPro HERO6 で 4K ムービーとした。再現形状の相似性を確保するために、多くの視点から見通せる沿道のビル群も含んだ点群が作成されるが、後処理により歩道付近のみを切り出した。

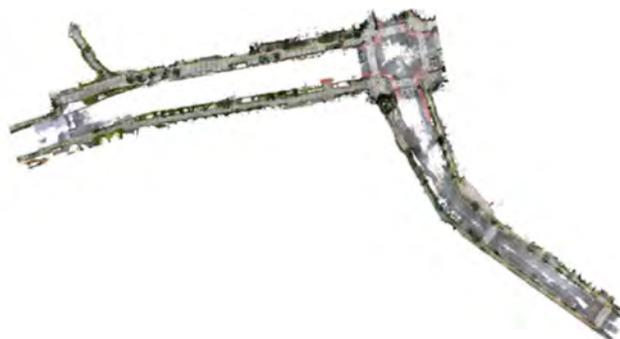


図-8 歩道モデルの例（RGB 表示）

図-9 は歩道のハザードのひとつとなる路面勾配をマッピングしたものである。勾配は点群の法線ベクトルや TIN メッシュから容易に求められる。

図-10 は段差の大きさを点群上に重畳して示したものである。平板のズレにより生じた段差が抽出されている。段差の計算は点群データ座標から以下の手順で計算した。

- 1) 画像から作成した点群情報のうち、法線の z 方向成分が 1 に近いもの（たとえば 0.95 以下など傾きのある点）を選択（斜面上にある点）
- 2) 上記で選択された点の半径 5 cm 内の点を抽出し、k-means 法により標高で 2 つのクラスに分類
- 3) 上記標高の分散が一定以上、尖度が一定（たとえば 0.0）以上の点を選択（クラスが 2 分類にはっきりと分かれているものを選択するため）
- 4) 2 クラスの平均標高の差を段差とする

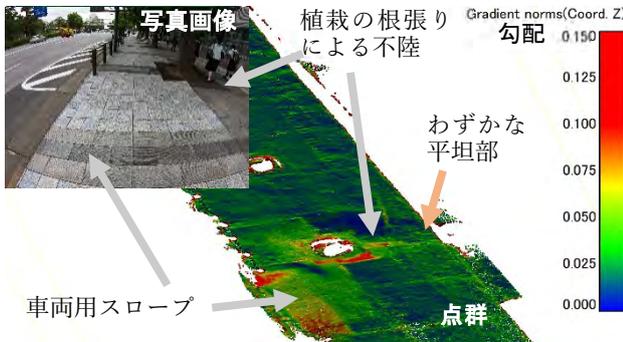


図-9 勾配図によるハザード抽出例（狭隘な平坦部）

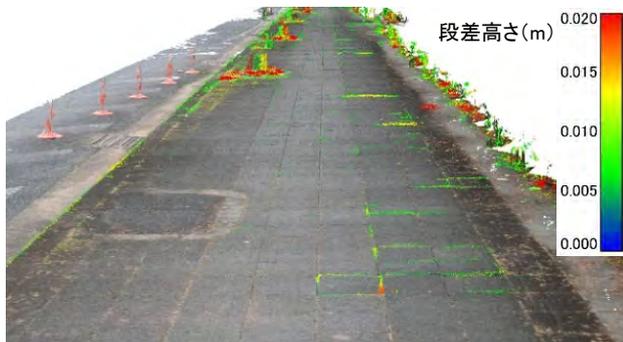


図-10 点群モデルと段差の重畳図

## 5. 路面調査への SfM/MVS 適用の課題と展望

以上のように道路路面の損傷調査に SfM/MVS 技術を活用した。その中で見いだされたいくつかの課題を以下に述べる。

### 1) 形状誤差

アスペクト比が大きい対象領域では SfM 処理で特徴点を共有できる画像数が限定され、実空間との相似性を保ちにくい。内的拘束条件を与える場合も、標点の配置に十分注意する必要がある。

### 2) 撮影方法

撮影方法が結果に大きく影響する。可能な限り

収束撮影条件とする必要がある。撮影画角の最適化も重要である。対象域全体の形状誤差を減らすためには多くの画像で同じ物体を撮影できる広画角画像が適するが、微小な段差を表現する点群を得るためには狭画角の精細な画像が求められる。

### 3) 対象物

新設アスファルト、金属面等のテクスチャの変化が乏しいところでは SfM 計算に必要な特徴点を得にくく、再現が難しいことがあった。

また、供用中の路面を撮影することから車両や歩行者の映り込みが生じる。多少の映り込みは外れ値として排除されるが、多量の場合にはマスキング処理が必要である。これには手作業では困難なため、セグメンテーション<sup>6)</sup>によるマスキング（図-11 参照）などの工夫が求められる。

### 4) 計算時間とマシンスペック

十分な精度の点群を得るまでには複数回の試行計算が必要なことがあり、多大な計算時間を要する。また、計算時間はマシンスペックに大きく依存し、特に現状では GPU 並列処理が不可欠である。

### 5) 2次元図面化

3次元点群の活用には多くの利点があるが、従来の2次元図面作成にこの点群を用いるには多大な手間を要することが多い。2次元図面化が必要な場合には、自動処理の仕組みが不可欠と考えられる。



図-11 撮影画像(左)とセグメンテーション例(右)

課題はあるものの、オープンソースや汎用的なカメラ、パソコンおよび安価な RTK-GNSS 機器（2セットで 8 万円程度）を用いて 3次元点群を得られるメリットは大きい。試行は容易で、商用ソフトウェアを利用すればさらに扱いやすい可能性もある。狭領域であれば RTK-GNSS に代えて標尺等を用いることもできる。今後は、精度確保とその検証方法、最適な撮影方法等について検討を重ねたい。多くの場面で有効に活用されうるものと期待する。

### 参考文献

- 1) 日本測量写真協会：三次元画像計測の基礎—バンドル調整の理論と実践—, pp.90~95・pp.106~109, 2016
- 2) <https://colmap.github.io/index.html>
- 3) <https://alicevision.org/#meshroom>
- 4) <https://www.danielgm.net/cc/>
- 5) <https://www.paraview.org/>
- 6) <https://github.com/hszhao/PSPNet>

# 40. 誰でも働ける現場を目指した 「遠隔臨場」が作業効率に与える影響の研究

コベルコ建機株式会社                      ○ 藤原 裕介  
コベルコ建機株式会社                      山崎 洋一郎  
コベルコ建機株式会社                      佐伯 誠司

## 1. はじめに

日本では少子高齢化の影響による労働者不足が深刻となり、日本国内における建設技能労働者数は2014年から2025年までに128万人の減少が想定されている<sup>1)</sup>。そこで、熟練オペレータ、若手就業者の減少といった課題に対して、国土交通省主導のもと、i-Constructionが提案され建設現場全体での生産性向上の取り組みが行われている<sup>2)</sup>。また、2020年5月に示された”i-Constructionによる建設現場の生産性向上”<sup>3)</sup>では「新型コロナウイルスが蔓延する状況下でも、いわゆる3密を避け現場の機能を確保するため、映像データを活用した監督検査等、対面主義にとらわれない建設現場の新たな働き方を推進」が挙げられ、新技術やデータを活用した生産性の向上や働き方の改革が必要となる。さらに、建設現場の新たな働き方として、遠隔技術の応用があり、2020年3月に「遠隔臨場」の試行方針も策定されている<sup>4)</sup>。コベルコ建機株式会社では、熟練オペレータが遠隔地の現場作業にも参加できること、次世代を担う若手オペレータへ効率的に操作教育を行うことを目指し、油圧ショベルを用いた遠隔施工の研究を広島大学と連携し進めている。

このように、「遠隔臨場」「遠隔施工」といった建設現場における新たな働き方改革に向けた商品・サービスの社会実装が今後益々加速すると考えられる。遠隔ショベルを用いた生産性向上の先行研究として、茂木等は遠隔操作システムの機能向上に取り組んでいる<sup>5)</sup>。しかしながら、生産性を評価する作業タスクは機械操作に限られた単純な作業の検証しか行われていない。一方で、実際の作業現場においては、現場監督者と手元作業者ならびに重機作業者の意思疎通を通じて複雑な作業が行われている。そのため実作業を「遠隔施工」で実施する場合、現場作業者と現場監督者の

コミュニケーションが重要となり、映像と音声の双方向通信で「遠隔臨場」を与える仕組みが必要となる。

本稿では、「遠隔施工」を模擬した現場を再現し、現場監督者と現場作業者がコミュニケーションを図ることが可能な「遠隔臨場」システムを構築して、集水桝設置作業を行う。「遠隔臨場」システムは、映像と音声の情報を現場監督者と手元作業者がビデオ通話機能を用いて共有可能とする。現場監督者が遠隔地から作業指示を行う場合、映像情報が現場監督者へ臨場感を提供し、作業効率へ影響することを確認するために、映像情報の有無で作業時間の差異を検証した。また、本検証に用いた作業タスクは、より複雑な施工作業を検証するため、掘削部の進捗状況を検測作業を行いながら段階的に進める必要性のある、集水桝設置作業を対象とした。本検証によって、現場監督者が遠隔地から作業指示を行う場合、映像情報の有無が作業効率に影響を与えることを明らかとした。

## 2. 研究内容

### 2. 1 検証システム

構築した「遠隔臨場」システムを図-1に示す。ここで、「遠隔臨場」システムは現場から遠隔地にいる現場監督者(A)に俯瞰視点映像(a)、作業者視点映像(b)ならびに音声(c)を提示し、現場監督者から手元作業者(C)に音声(d)を提示可能なシステムである。俯瞰視点映像(a)を取得する装置としてAXIS Communications製のP1445-LE、作業者視点映像(b)を取得する装置としてコニカミノルタ製のWCC-X5を使用した。また、作業者視点映像(b)、音声(c)、並びに音声(d)はビデオ通話システムとして利用されるMicrosoft Teams®を使用した。各機器の特徴的な性能を表-1に示す。構築した本システムを用いて、現場監督者がモニタ越しに確認した実際の映像情報を図-2に示す。

表-1. システム構成機器性能

	俯瞰視点映像	作業者視点映像
メーカー	AXIS Communications	コニカミノルタ
型式	P1445-LE	WCc-X5
解像度	1920×1080	1280×720
フレームレート	60fps	15fps
水平画角	最大100°	25°
垂直画角	最大62°	25°

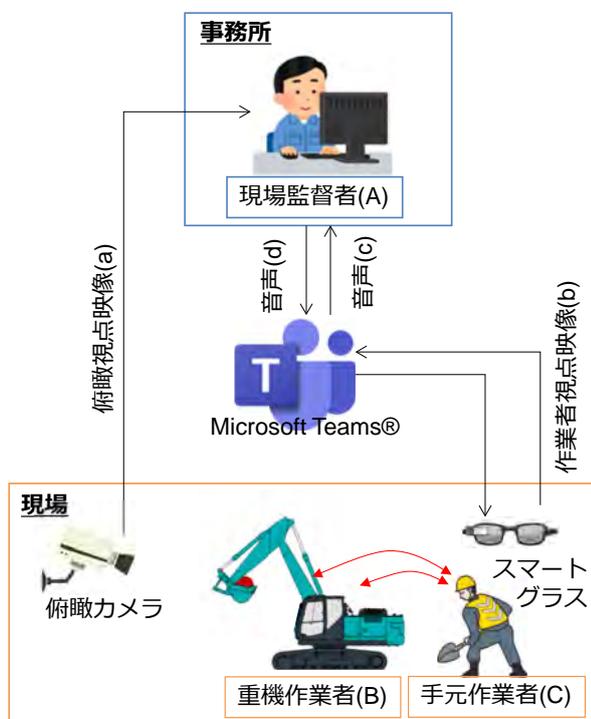


図-1. 「遠隔臨場」システム構成



図-2. 現場監督者がモニタ越しに確認した実際の映像情報

## 2. 2 検証条件

現場監督者が遠隔地から「遠隔臨場」システムを使って作業指示をするときに映像情報が作業効率に及ぼす影響を検証する。そこで構築したシステムを使い映像情報の有無で作業効率を比較する。

検証条件を表-2に示す。Case1は、事務所にいる現場監督者(A)と現場にいる重機作業者

(B)と手元作業者(C)が、映像情報と音声情報を共有して施工を行う。Case2はCase1から映像情報(a)、(b)を除いて施工を行う。すべての条件で、現場監督者は集水樹設置作業の経験年数が45年ある作業者Iが行う。その他の作業者IIおよびIIIは未経験者が行う。作業タスクはいずれも集水樹を1箇所設置する施工を行った。検証した作業工程の詳細を図-3に、集水樹設置における断面模式図を図-4に示す。作業は、丁張、床掘り、砕石布設、敷きモルタル布設、底板設置、集水樹設置、埋め戻しの順に実施する。なお、検証は作業割合の大半を占める床掘りから砕石布設までを細分化し時間配分を比較する。

表-2. 検証条件

	Case1	Case2	従来作業
現場監督者(A)	作業者I	作業者I	作業者I
重機作業者(B)	作業者II	作業者II	作業者I
手元作業者(C)	作業者III	作業者III	作業者I
現場監督者とのコミュニケーション手段	遠隔臨場 (本検証システム)	音声のみ	不要

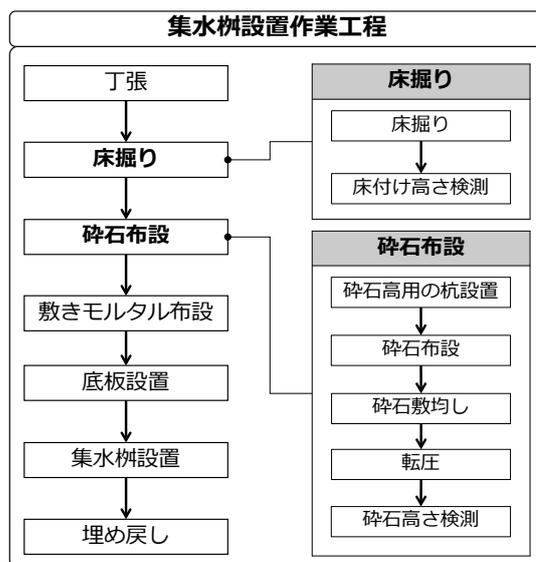


図-3. 集水樹設置作業工程

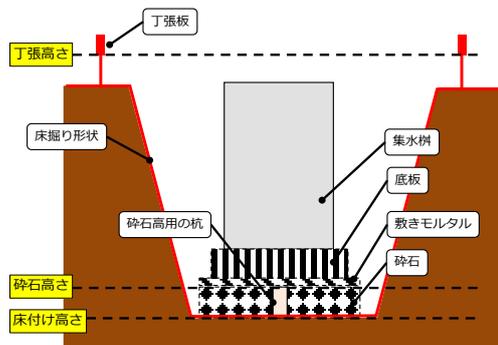


図-4. 集水樹設置作業の断面模式図

### 3. 検証結果と考察

#### 3.1 検証結果

図-5にCase1、Case2及び従来作業の各作業時間をそれぞれ棒グラフに示す。また、各項目は図-3の右側に示す床掘りと砕石布設の詳細作業とする。

作業合計時間はCase1に対して、Case2では+17minとなった。また、Case2はCase1と比較して作業時間が長い工程は主として“床付け高さの検測”作業であることが分かる。また、従来施工として、遠隔臨場システムを使わず全ての作業を同一作業者が実施した結果は、Case1およびCase2と比較して床掘りの作業時間が短い結果となった。

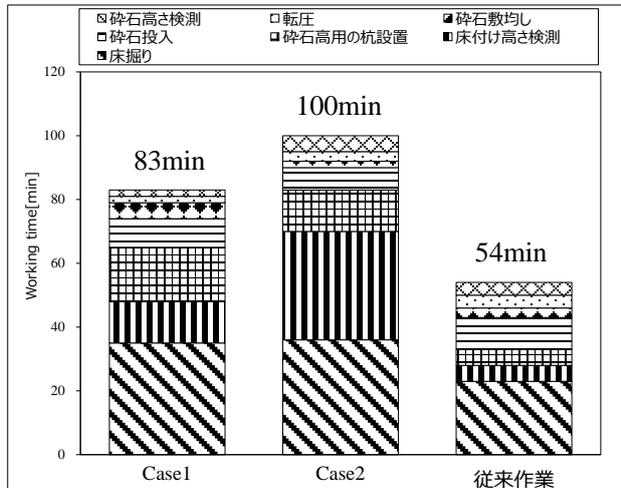


図-5. 検証条件における作業時間

#### 3.2 考察

本検証で実施した作業を分析し、フローチャートとして作業員間の情報を整理した結果として、床掘り作業を図-6に、砕石布設作業を図-7にそれぞれ示す。図中の□記号は作業を、◇は判断を示す。また、各工程を結ぶ実線は作業の手順を、破線は現場監督者と手元作業員間の音声情報を、一点鎖線は手元作業員の着用するスマートグラスを使用して取得された映像情報を示す。

床掘り作業では、現場監督者と現場にいる重機作業員と手元作業員は初期の作業開始指示のみが行われ、丁張りの深さ確認は手元作業員が目視で行い、現場監督者との連携は行われない。一方で“床付け高さの検測”は、現場監督者が音声情報の検測値に加えて、検測箇所や検測方法を映像情報によって確認しながら進めることで現場の進捗状況を把握している。しかし、Case2においては映像情報が無いことから、検測位置の確認・指示

作業は現場作業員との会話で現場監督とやり取りされる。その結果、情報の不一致ややり取りに多くの時間を必要としている。

一方で、“砕石高さの検測”は“床付け高さの検測”ほど多くの時間を必要としていない。これは砕石高さ用の杭を予め設置することで敷均しを容易にしていることがあげられる。砕石高さ用の杭は床付け面から砕石高さの位置で事前に設置することで目印の高さとなり、その後は、水平器を用いて全体の敷き均しを調整するため、容易な作業となる。

また、全ての作業を同一作業員が実施した従来作業において、床掘り作業時間が短いのは、重機作業員の経験年数が多いことで、床掘り作業の作業速度が速いためであった。一方で、Case1のその他の作業においては「遠隔臨場」システムを利用することで従来作業と同等の作業時間で作業が行えることが示された。これは重機作業を除いて、現場の作業員が未経験の場合でも、経験年数が多い現場監督者が指示し、「遠隔臨場」システムを利用することで、集水桝設置作業が行える可能性を示している。

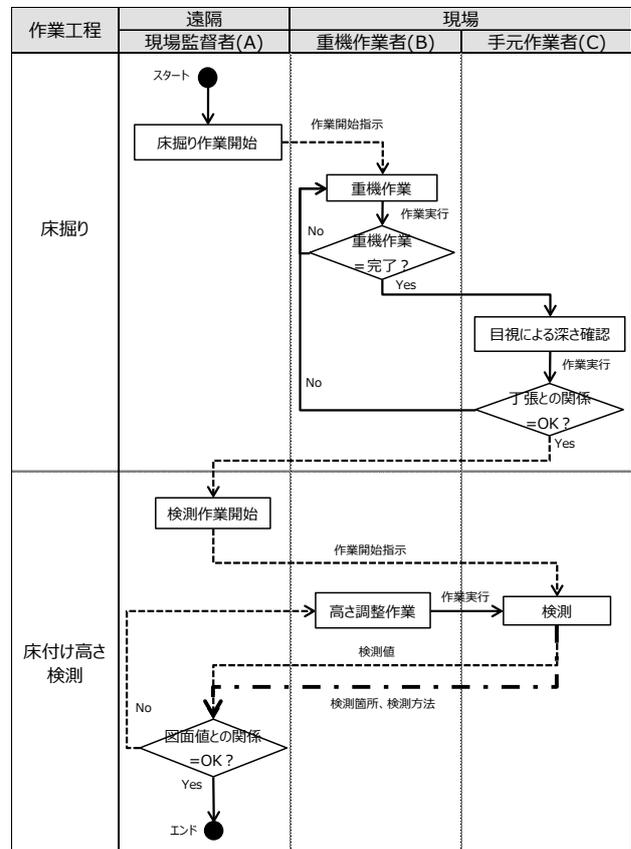


図-6. 床掘り作業におけるフローチャート

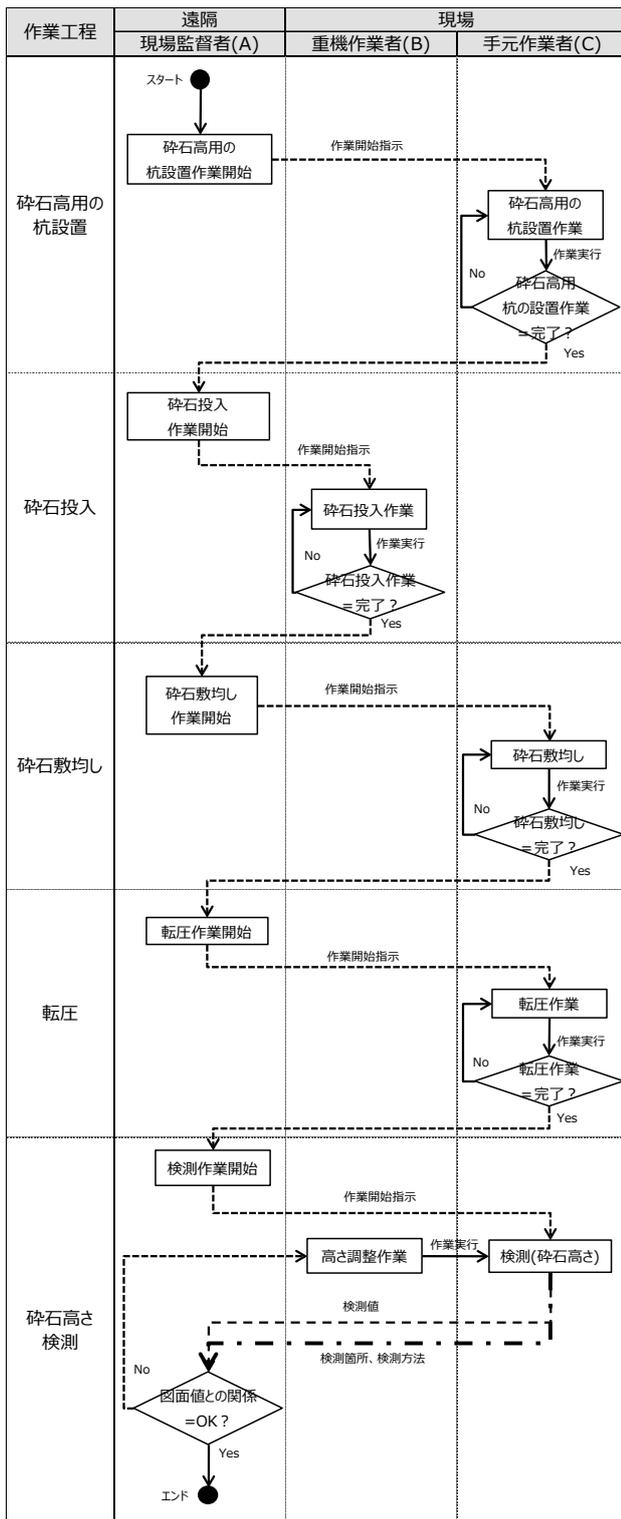


図-7. 砕石布設作業におけるフローチャート

#### 4. まとめ

少子高齢化、新型コロナウイルスによる建設業を取り巻く環境変化により、今後益々加速することが想定される建設現場の新たな働き方革新に向

けて「遠隔施工」を想定した作業課題の抽出や検証を行ってきた。本検証によって、「遠隔臨場」における映像情報が作業を進めるために重要な役割を示していることが明らかとなった。今後、重機作業者が遠隔操縦システムを利用した場合の研究も進めていき、社会課題の解決につながる商品・サービスの提供を目指す。

#### 参考文献

- 1) 一般社団法人日本建設業連合会,再生と進化に向けて-建設業の長期ビジョン-,[https://www.nikkenren.com/sougou/vision2015/vision\\_pdf.html](https://www.nikkenren.com/sougou/vision2015/vision_pdf.html),(2015年3月)
- 2) 国土交通省「i-Construction～建設現場の生産性革命～参考資料」,<https://www.mlit.go.jp/common/001127740.pdf>,(2016年3月)
- 3) 国土交通省「i-Constructionによる建設現場の生産性向上」,<https://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/special/reform/wg6/20200507/pdf/shiryu2.pdf>,(2020年5月7日)
- 4) 国土交通省「建設現場の遠隔臨場に関する施行要領(案)」,<https://www.mlit.go.jp/tec/content/001343445.pdf>,(2020年3月)
- 5) 茂木正晴,西山章彦,橋本毅,藤野健一(土木研),油田信一(芝浦工大),油圧ショベルの遠隔操作における視覚及び操作系インターフェースの違いによる作業効率の向上について,2016建設ロボットシンポジウム論文集

# 41. 自動運転油圧ショベルの現場実証

安藤ハザマ  
コベルコ建機株式会社  
コベルコ建機株式会社

○ 武石 学  
土井 隆行  
野田 大輔

## 1. はじめに

油圧ショベルは建設機械の中でも多様な作業に使われる汎用性の高い建設機械である。建設機械の自動運転技術の開発が進んでいる近年では、生産性向上を目的に油圧ショベルの自動運転技術の確立が強く望まれている。

そこで筆者らは、実際の運転手の油圧ショベル操作を各種センサで記録し、記録した操作を再現することで、繰り返し行う作業を自動運転する技術を開発した。

本稿では、開発した油圧ショベルの自動運転システム（以下自動運転システム）と実証実験結果について報告する。

## 2. 技術開発の内容

技術開発にあたり自動運転システムを適用する現場と作業対象を想定する必要があるが、油圧ショベルは様々な工種で使用されており、そのすべての工種に対応できるものを開発することは難しい。また、油圧ショベルの特性として、ブーム・アーム・バケットのみならず、旋回、走行と動作種別も多いことから、さらに解決すべき課題は多くなる。

そこで、運転手が苦渋に感じる単純な繰り返し作業に着目し、その作業を行うための自動運転システムの技術を開発した。今回は、濁水処理装置において、同一箇所に堆積する脱水ケーキを所定の場所に停車したダンプトラックの荷台へ積込む作業を選定した。これであれば、バケットのすくい上げ位置と荷下ろし位置はそれぞれほぼ一定であり、走行させずに同一場所で繰り返し行う作業を自動運転で実施することが可能である。

このとき、自動運転システムの動作は、実際の運転手の油圧ショベル操作を各種角度センサで記録し、記録した操作を再現する形で実施することとした。この手法であれば、自動運転システムに記録させる動作も直観的に行うことができ、汎用性が高いと考えられる。

また、本自動運転システムは、現場ショベルへ後付け設置できるよう汎用的なシステム構成とし、

制御開発は MBD（モデルベース開発）を適用することで、開発効率の向上を図った。

現場実証実験では、監視者側に手動の非常停止スイッチ、油圧ショベル側に自動の非常停止装置を設け、双方で監視することで安全を確保した。

## 3. システム概要

今回開発した自動運転システムの概要を以下に示す。

### 3.1 使用機械

開発対象とした油圧ショベルはコベルコ建機製の SK135SR-5 である（写真-1）。



写真-1 自動運転に使用した油圧ショベル

### 3.2 システム構成

今回開発した自動運転システムでは、現場監視者が操作タブレット(Panasonic製, FZ-G1W3001VJ)を用い、油圧ショベルに対し、開始もしくは停止を無線で指示できる構成とした。

また安全装置として非常停止スイッチとレーザーバリアセンサを設置し、油圧ショベルへ指令を出す操作タブレットの無線通信から独立させて直接油圧ショベルを無線通信で非常停止する構成とした（図-1）。

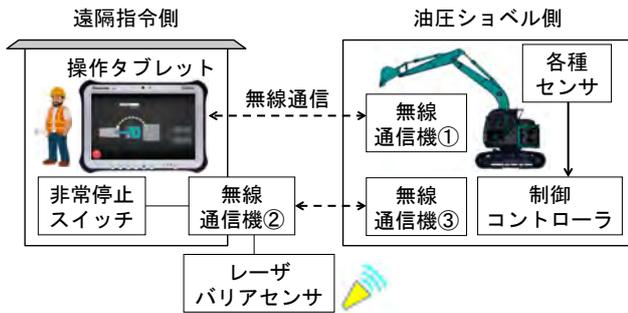


図-1 機器構成

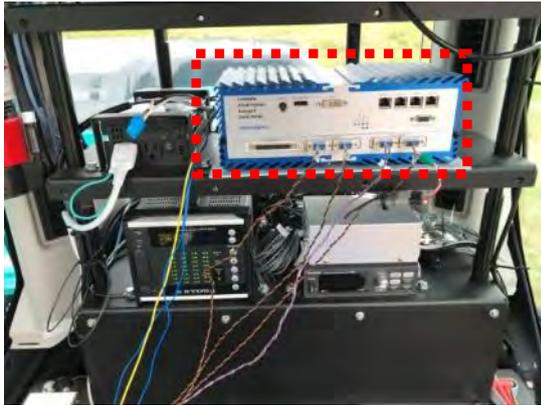


写真-2 制御コントローラ

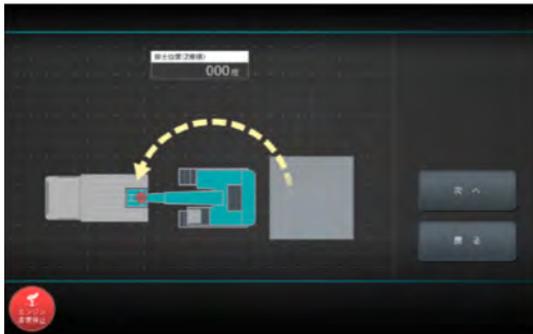


写真-3 ティーチング時の操作タブレット画面



写真-4 非常停止装置

### 3.3 制御概要

油圧ショベル本体には自動運転のために位置・姿勢情報を取得する角度センサ，加速度センサな

ど各種センサを搭載しており，これらのセンサ情報は制御コントローラに集約される（写真-2：Speedgoat社製，Mobile Realtime-target machine）。これらの情報からバケット，アーム，ブーム，旋回の姿勢状態およびレバー操作指令値を算出する。指令値に応じて操作レバーに取り付けたアクチュエータを駆動することで自動運転を行っている。

また，今回制御開発にあたり，MBDを用いて自動運転用制御モデルを作成し，制御コントローラへ実装することで実証実験を行った。

### 3.4 ティーチング

自動運転させたい動作を運転手にて行い，それを記録（ティーチング）し，操作タブレットから再現指示することで繰り返しの自動運転が可能となる（写真-3）。

### 3.5 安全装置

油圧ショベルが現場の動作許容範囲を逸脱しないように，レーザバリアによる自動の非常停止装置を写真-4のように周囲に設置し，動作許容範囲を逸脱した際に自動で運転を停止する機能を付与した。

## 4. 実験方法

運転手がティーチングした動作を開発した自動運転システムで再現できるか，実際の現場で実証実験した（写真-5）。



写真-5 ティーチングの状況

実験では濁水処理設備のベルトコンベアから落下して堆積している脱水ケーキをピットからすくい上げ，180度旋回してダンプの荷台へ積込む一連の作業を自動運転させた。

ダンプの停車位置は，設置した赤外線センサでダンプの荷台が所定位置に来たことを検知し，回転灯でその旨を明示することで油圧ショベルからの離隔を一定に保っている。加えて，車止めを設置することで油圧ショベルとの接触を防止する対策も講じている。



図-2 自動運転の作業手順

自動運転の作業手順を図-2に示す。

- (1) 自動運転システムを動作させ、油圧ショベルの各部位の挙動を示す角度センサデータの記録を開始する。
- (2) 運転手がピットからダンプ荷台に脱水ケーキを積込む作業を行う (①→②→③→④)。
- (3) 自動運転システムの記録を停止する。
- (4) 自動運転システムの操作者は遠隔地にある操作タブレットから記録した動作の再現を指示する。なお、今回の実験ではシステムの操作者は油圧ショベルの近傍で安全を確認しながら指示を与えている。
- (5) 自動運転システムは記録したセンサデータに基づき、運転手の動作を再現する。(①→②→③→④)。
- (6) 手順(5)を指定した回数繰り返し、ダンプへの荷下ろし作業を完了させる。

上記実証実験の際は、安全面を考慮し、タブレット操作者、油圧ショベル近傍に配置する非常停止装置の操作者を決め、それ以外の作業者は自動運転している油圧ショベル周辺には近づかないこととした。

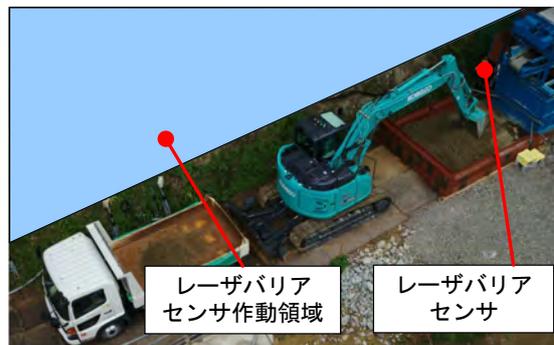


写真-6 レーザバリアセンサの作動領域

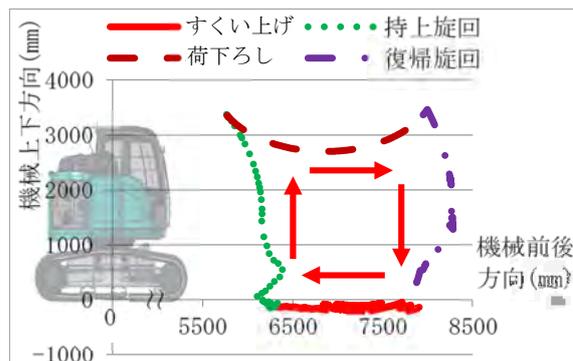


図-3 刃先軌跡 (機械側面図)

## 5. 実験結果

### 5.1 安全装置の動作確認

実験前の安全確認として、安全装置の起動、ダンプの停止位置を検出するための赤外線センサの動作を確認した。いずれも、自動運転している油圧ショベルが設定通りに動作を停止することを確認した。その際の安全装置の作動時間も油圧ショベルが対象物に接触せずに停止できるものであった (写真-6)。

### 5.2 自動運転の実験結果

自動運転の実験時のバケット刃先先端の軌跡を図-3、4に示す。また、自動運転中の状況を写真-7に示す。

自動運転システムは記録したセンサデータに基づき、下記①～④の油圧ショベルの動作を再現した。その際の動作は、バケット先端位置を目標位置に対して 120mm 以内におさめることができた。なお、現場が狭隘であり、安全を考慮して通常よりゆっくり動作させたことから、一連の自動運転

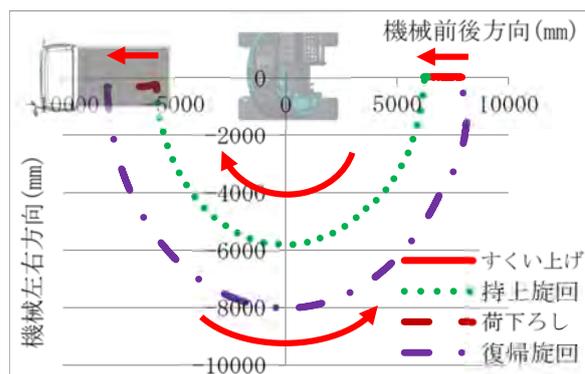


図-4 刃先軌跡 (機械平面図)

(1 サイクル)に要した時間は 40 秒程度であった。

#### ① すくい上げ

バケット先端が旋回中心から 8,000mm の位置からすくい上げ動作を開始し、ブーム、アーム、バケット操作をしながら、水平にバケット先端を移動させ、ピット内の脱水ケーキをこぼさずにすく

い上げることができた（図-3）。

## ② 持上旋回

ティーチングで指定した位置を通ることで、地盤から高さ 1,500mm のダンプ荷台とバケットとの衝突を回避しながら、すくい上げ開始位置から 180 度に位置するダンプ荷台位置まで旋回動作がスムーズにできた（図-3, 4）。

## ③ 荷下ろし

バケット先端が旋回中心から 5,700mm の位置から荷下ろし操作を行うことで、ダンプ荷台中央部に脱水ケーキを積込むことができた（図-4）。

## ④ 復帰旋回

旋回動作を行い、バケット先端が旋回中心から 8,000mm のすくい上げ開始位置へ復帰できた（図-3, 4）。

## 6. まとめ

### 6.1 検証結果

開発した自動運転システムで確認できた成果を以下に示す。

- ・現場ショベルへ後付け可能な機器構成とすることで汎用的なシステムとなることを確認できた。
- ・制御開発に MBD を適用することで効率的に実証実験を実施できた。
- ・実際の運転手が行った操作を記録し、記録した動作を自動運転システムで再現することができた。
- ・運転手が苦渋に感じる繰り返し作業を自動運転システムで実施できることを確認した。
- ・操作タブレットからの指示で施工が可能であることから、無人での作業が可能であり、生産性が向上する可能性があることを確認した。
- ・非常停止・赤外線センサからなる安全装置が適切に作動し、近接している法面に接触することなく運転できることを確認した。
- ・安全装置の信号で自動運転システムが動作停止することで、油圧ショベルの周囲で安心して作業ができることを確認した。
- ・自動運転システムを現場作業で実証することで、実際の施工に適用可能であることを確認した。

### 6.2 今後の展開

今回の実験を行った現場は、周囲環境の制約から自動運転する油圧ショベルと周囲干渉物との距離が近く、作業の安全性確保の観点から特定の動作のみゆっくりと動かしたい、特定の作業のみ経路・位置を変更したい、という状況が発生した。動作速度、および経路・位置を現場状況に合わせて容易に変更・修正可能なシステムにすることでさらに安全性、操作性が向上し、より現場に適用しやすくなることが分かった。

また、ダンプトラックの運転手による操作タブレットでの荷下ろし作業の指示や遠隔地から1人



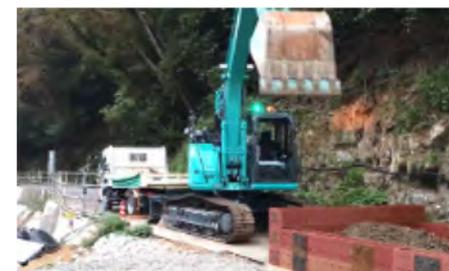
①すくい上げ



②持上旋回



③荷下ろし



④復帰旋回

写真-7 自動運転の状況

で油圧ショベルを複数台操作するなど、施工の省人化、生産性の向上が期待できる自動運転システムの適用例を想定できるようになった。

今後も油圧ショベルの自動運転技術の開発に取り組み、安全・安心なシステムを確立して現場適用を行うとともに、将来的にはAIを活用した高度な自動運転技術を開発することで生産性向上を実現したい。

### 参考文献

- 1) 武石学ほか：自動運転油圧ショベルの現場実証報告，土木学会第75回年次学術講演集，VI-1135，2020

## 42. モニター画像からの重機の状態推定と現場環境モデルの構築に関する研究

芝浦工業大学  
芝浦工業大学  
芝浦工業大学

○ 酒井 優  
手塚 悠太  
吉見 卓

### 1. はじめに

日本は、地震や豪雨などの自然災害が多い国であり、自然災害を原因として土石流や河川の氾濫などが多く発生する。災害発生後、その復旧作業は早急に行われる必要があるが、危険性が高いため人が立ち入ることができない。そのため近年、重機を安全な場所から遠隔操作により復旧作業を行う、無人化施工の研究・導入が進められている(図-1)。

無人化施工現場では各種重機が協調して作業を行っているが、そこでは重機操縦者が遠隔地からモニター映像を通して無人の重機の状態や周囲環境の状況を確認しながら運転操作を行っているため、その安全・効率的な運転操作のために、操縦者は各重機の位置や向き、姿勢等の状態を常に正確に把握している必要がある。その際、重機操縦者は作業現場近くに設置される定点カメラの映像を見ながら重機の操作を行っており、カメラ映像からのみ施工現場の環境の情報を取得している。このため、広い施工現場全体の環境の情報を取得するためには多くの定点カメラを設置しなければならず、経費やカメラを設置する時間を費やすという問題が生じている。また、無人化施工現場における一部の重機にはGPSが搭載されているが、現状多くの重機の位置や向き、姿勢等の情報は操縦者がモニター映像を通して確認・取得するレベルにとどまっている。これらの問題を解決するために、重機のモニター映像から映っている重機の位置、向き、姿勢を推定し、重機操縦者に提示する手法・システムの構築が求められている。そこで本研究では、重機のモニター映像から、そこに映っている重機の位置、向き、姿勢を推定し、重機操縦者に提示する手法・システムの構築を目指す。またその際、取得した情報を統合して施工現場環境のモデル構築を行うことで、異なる視点からの施工現場の重機や環境の情報を重機操縦者に自在に提示できるようにする。

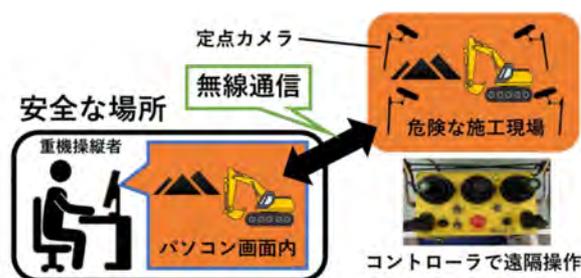


図-1 無人化施工による作業イメージ図

### 2. OpenPose による重機の姿勢推定

この章では、本研究でモニター映像から重機の向きや姿勢を推定するための手法として重機への適用を検討した OpenPose アルゴリズムについて述べ、重機適用のために検討した内容、その結果について記述し、最後に OpenPose 以外の手法を用いた姿勢推定手法の提案を行う。

#### 2.1 OpenPose について

OpenPose<sup>1)</sup>は2017年に発表された、画像中の複数人物の2D姿勢を効率良く検出する深層学習を用いたアルゴリズムである。複数人の姿勢を同時に推定するために、画像から各関節位置を深層学習により推定し、その関節を繋ぎ合わせることで人の姿勢情報を得ている。その際、複数の人物が写っている場合に各関節のつながり方の組み合わせが複数存在する問題が発生するが、これをPAFs(Part Affinity Fields)と呼ばれる各関節が繋がり得る可能性を、方向ベクトルマップとして予測するネットワークを用いることで、正しい組み合わせを推定している。これより、OpenPoseは映像内の複数人数の姿勢をリアルタイムで推定可能となっている(図-2)



図-2 大人数へのOpenPose適用例<sup>1)</sup>

## 2.2 重機への OpenPose 適用のための検討

2.1節で述べたように、OpenPoseは人の関節位置を推定し、各関節情報を組み合わせることで人の骨格をリアルタイムで推定するアルゴリズムである。本研究ではこのOpenPoseを人ではなく重機に適用することで、重機の向きや姿勢の状態を推定する事を提案した。

重機を対象にOpenPoseを適用するにあたって、どの種類の重機を姿勢推定の対象とするか、重機のどの部分を人間の関節部に見立てて姿勢推定を行うか、という事を検討する必要がある。そのため、本研究は可動部が多く姿勢・状態が変化する頻度が高いため、現場にて強く姿勢推定が求められているバックホウを姿勢推定の対象として扱うことを決めた。また、バックホウの車体の傾きを推定するために、クローラの両先端部分とキャビン部分を、また、アーム部分の可動部の曲がり方を推定するために、アーム関節とバケット関節とバケット先端のそれぞれの部分を、人間の関節部に見立てて推定を行うこととした(図-3)。これにより、OpenPoseを用いて、モニターに映っている重機の向き、車体の傾きや可動部の曲がり具合などの姿勢を推定することが可能となると考えた。



図-3 重機へのOpenPose適用イメージ

## 2.3 学習モデル作成について

### 2.3.1 データセットの作成

OpenPoseを人物ではなく重機に適用するためには、重機の各部位を推定・検出し、それらの部位の繋がりを推定して繋ぎ合わせることができる学習モデルを独自で作成する必要がある。本研究では、既存のOpenPoseを大きく変更することは行わずに、ツールとして利用することを想定した。そのため、重機の姿勢推定を行うための独自学習モデルを作成する場合においても、既に用意されている姿勢推定学習モデルを作成するためのプログラムを利用して学習を行うことを検討した。学習モデルを作成する際、訓練および評価用データセットが必要となるが、OpenPoseにおいては人物の姿勢推定用のデータセットとしてMicrosoft Common Objects in Context (MS COCO)が提供するKeypoint Detectionが用いられている。そのため、既存の学習プログラ

ムを大きく変えずに独自の学習モデルを作成するためには、MS COCOと同じ形式でデータセットを独自で作成する必要がある。本研究では、500枚分のバックホウの画像を用い、更に画像を拡大、縮小、回転などのData Augmentationを行い、画像データ数を1500枚に増やした。これらの画像データに対し、重機の姿勢推定に向けてバックホウにおけるクローラの両先端部分、キャビン部分、アーム関節、バケット関節部、バケット先端をそれぞれ人間の関節部に見立ててアノテーションを行い、重機姿勢推定のための学習モデル作成用のデータセットとして用いた。

### 2.3.2 学習の実行結果と考察

作成したデータセットを用いて、学習用プログラムを実行した。この学習プログラムは独自モデル作成のためにOpenPoseにおいてプログラムとして公開されているものである。しかし、OpenPoseの学習方法に則って学習を実行したにも関わらず、エラーのため学習モデルを作成することができなかった。この原因の特定を試みたが、最終的に明確な原因を特定することができなかった。最も考えられる理由としては、OpenPoseにおける学習を行う際に用いているPAFs推定用などのパラメータが、人物の姿勢推定用に最適化されていることが影響していると考えられる。そのため、人物用に最適化されているプログラムで学習を行なった場合には、重機の姿勢推定用モデル作成のための学習が上手く行えなかったものと考えられる。

以上の結果から、我々は重機の姿勢推定手法を構築する上で、開発が容易なツールとしてOpenPoseを利用することは難しく、当初のアイデアに基づき重機の姿勢推定を行うことは困難であると結論付け、OpenPoseを用いない別の姿勢推定手法を検討する必要があると考えた。

## 2.4 重機姿勢推定に関する新たな手法の提案

### 2.4.1 提案手法

OpenPoseを用いた重機の姿勢推定に代わる、他の重機姿勢推定手法の検討を行った。本研究では、無人化施工現場で用いられる手法の実現を目指していることから、重機の姿勢推定手法に要求される条件として、

- ・現場で精度の高い姿勢推定が可能であること
- ・リアルタイムでの推定が可能であること

の2点を満たす必要がある。

そこで、この2点を満たす新たな手法として、我々が2017年度に一般社団法人日本建設機械施工協会研究開発助成研究<sup>2)</sup>にて開発に取り組んだ、重機認識のための部位に着目したYOLOモデルであるPart based YOLO (POLO)の手法を応用することを

考え、POLOの手法を用いた重機の姿勢推定手法を提案する。POLOでは部位に着目し、それら組み合わせることで重機全体を推定するという考えに基づき、検出された部分を組み合わせ、オブジェクト全体の種別および位置をリアルタイムかつ高い精度で推定することを可能とした(図-4)。我々が今回提案する手法では、このPOLOの部分推定を、重機全体を推定するためではなく、重機の姿勢推定を行うために用いる。すなわち、OpenPoseで行われている関節部分の推定・検出を、POLOの手法を用いる事によって行う事で、精度が高くかつリアルタイムでの重機の姿勢推定が可能になると考えた。バックホウを姿勢推定の対象とする場合、クローラの両先端部分、キャビン部分、アーム関節部分、バケット関節部分、バケット先端部分をそれぞれPOLOの手法を用いた推定により検出し、その検出された部位の Bounding Boxの中心点をそれぞれ繋ぎ合わせることで、姿勢を推定する(図-5)。



図-4 POLOデータセット例



図-5 POLOによる検出手法のイメージ

#### 2.4.2 検証結果

提案した手法が重機の姿勢を推定することができる手法であるかを検証した結果を図-6に示す。バックホウ全体、クローラの両先端部分、キャビン部分、アーム関節部分、バケット関節部分、バケット先端部分を学習させ、それぞれを推定することが可能となっているモデルを用いて検出を行っている。結果より、バックホウのそれぞれの部位が検出できており、各部位の繋がり方もシステム内で設定しているため、どのような姿勢であるかということも正しく認識できていることが確認できる。

以上より、我々が提案した手法を用いることで重機の部位の検出及び部位の繋がり方を認識することができ、姿勢を指定することが可能であることが

確認できたため、今後はこのPOLOによる部位検出を用いた重機姿勢推定手法を用いてシステムの開発を進める。

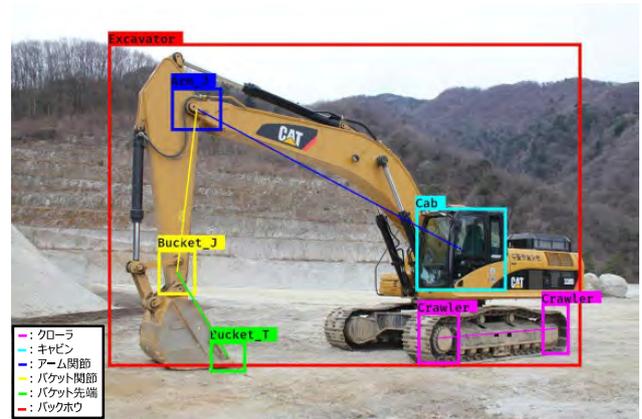


図-6 POLOによる姿勢推定

### 3. ゲームエンジンを用いた施工現場環境モデルの構築

ここでは、重機操縦者に映像から施工現場の環境を把握させるため、施工現場の稼働している重機の姿勢と地形を再現し、施工現場の環境を操縦者に適切な映像として提示を行う手法として、本研究で実施したゲームエンジンを用いた施工現場の環境モデルの構築手法について述べる。我々がここで考える適切な映像の提示とは、重機の状態や施工現場の環境全体を俯瞰できるような映像の提示である。

#### 3.1 施工現場の環境を再現するための事前検討

##### 3.1.1 環境構築ソフトウェアについて

本研究において、施工現場の環境の再現を行うにあたってどのようなソフトを用いて施工現場の環境を再現するかについて検討を行った。無人化施工現場では拡張性が大きく、物理演算ができ、三次元の環境を構築できることが求められている。

上記の要求を達成するために、本研究ではゲームエンジンといわれるソフトウェアを利用することにより施工現場環境の構築を行った。

また、用いるゲームエンジンを選択する必要があるが、本研究では導入と使用が容易な、一般向けに公開されているゲームエンジンである「Unity」というゲームエンジンを用いることで施工現場の環境の構築を行った。

##### 3.1.2 施工現場環境の再現のための実施事項

「Unity」上で施工現場の環境の再現を行うにあたって、どのようなことを行う必要があるかの検討を行った結果、

- ・ゲームエンジン上で、施工現場の地形を再現する

- ・ゲーム上の施行現場環境を表示するためのビジュアライゼーション用の視点を作成する
- ・ゲームエンジン上で姿勢再現する重機の関節を作成する

という3つが必要であることが分かった。よって、次節以後では、ゲームエンジン上での施工現場の地形を再現するために行った3つの手法についての検討の結果について述べる。なお、ここでのビジュアライゼーション用の視点とは、PCにゲームエンジン内の映像を表示するために、視点としてカメラを作成する必要があり、そのゲームエンジン上に作成される視点のことである。

### 3.2 施工現場の地形再現手法の検討

#### 3.2.1 標高データによる施工現場の地形再現

施工現場の地形の再現する手法として、点群データにより作成された標高データを用いることにより施工現場の地形再現を行った。本手法で用いる点群データを図-7に示す。この点群データには三次元座標の深さデータが記録されており、元に高地を白、低地を黒とした白黒のグレースケールの標高データを作成するDEM(Digital Elevation Model)解析を行うことで地形再現を行なった。「Unity」上で地形を再現した結果を図-8、斜面部分を再現した結果を図-9に示す。本手法の結果、図-8のように施工現場全体の地形を把握できることが確認できたが、図-9のように斜面の部分が階段のように再現される問題が発生した。これは標高データが8ビットグレースケール画像のため色の濃さは2の8乗の階調で表され、地形を再現する際に標高の最高点と最低点の差を256で割った値の分解能で再現されてしまうためであると考えられ、本手法で使用した点群データの場合は(最高点 452m-最低点 250m)/256=0.79mの分解能となり階段状に再現されてしまう。そのため、標高データを利用する施工現場の地形再現する手法とは異なる地形再現手法の検討が必要と考えられる。



図-7 標高データによる施工現場の地形再現手法で使用する点群データ

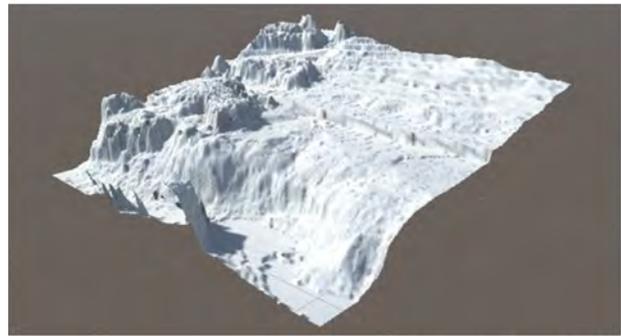


図-8 「Unity」上で標高データより作成した施工現場の地形再現の結果(全体)



図-9 「Unity」上で標高データより作成した施工現場の地形再現の結果と点群データとの比較(斜面部分)

#### 3.2.2 表面再構成法による施工現場の地形再現

施工現場の地形を再現する手法として、点群データをメッシュ化して3Dモデルにする、表面再構成法による施工現場の再現手法を検討した。本手法は、3.2.1と同様の方法で取得したデータ(図-10)をサンプリングし、サンプルを元にオブジェクト表面を表すメッシュを生成することで地形のモデルの再現を行なっている。

表面再構築法による施工現場の地形再現の結果を図-11に示す。この結果から、3.2.1の提案手法よりも高い精度で再現ができていくことが分かる。

以上より、表面再構成法による施工現場の地形再現手法は施工現場の地形環境を詳細に把握しやすく、実際に動いている重機の周辺環境を把握することが可能である。そのため、本研究では点群データの表面再構成法を用いて施工現場の地形再現を進めていくこととした。



図-10 表面再構成法による施工現場の地形再現手法で使用する点群データ

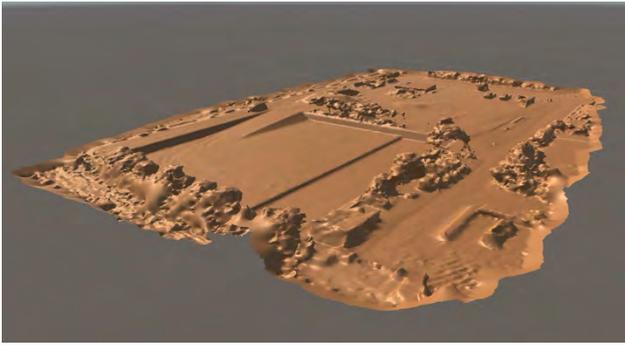


図-11 「Unity」上で表面再構成法より作成した施行現場の地形再現の結果

### 3.3 「Unity」上での視点の作成

「Unity」上で施工現場の環境モデルのビジュアライゼーションを行うにあたって、環境を再現する視点方向を検討する必要がある。無人化施工において、重機操縦者は遠隔地からモニター映像を通して状況を確認しながら運転操作を行っているため、施工現場を再現する際には、施工現場全体の環境を俯瞰でき、また重機周辺の状態を把握できる視点作成が必要であると考えられる。よって、本研究では、施工現場を全体俯瞰できる視点と重機周辺を監視できる移動式の視点の2種類の視点を作成した。図-12に施工現場を全体俯瞰できる視点から施工現場地形を映した画像、図-13,14に重機周辺を監視できる移動式視点から重機を映した画像を示す。

結果より、施工現場を全体俯瞰できる視点と重機周辺を監視できる移動式の視点を作成することで、重機の位置や姿勢、周囲環境を把握できる映像の提供ができていることが確認出来る。

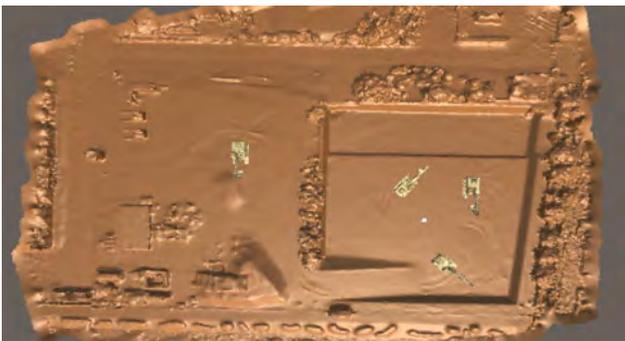


図-12 施工現場の全体を俯瞰できる視点の映像

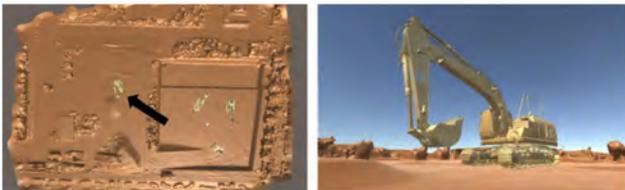


図-13 重機の状態と周辺を監視できる視界の映像①



図-14 重機の状態と周辺を監視できる視界の映像②

### 3.4 重機の関節作成手法の検討

施工現場の環境の再現を行うためには、「Unity」上で重機の姿勢を再現する必要がある。しかし、重機の姿勢を再現するにあたり既存の3Dモデルには関節が実装されていないため、3Dモデル上に関節を作成する必要がある。本研究では、施工現場の重機のモデルに関節を作成する手法として、

「Blender」という「Unity」と相互運用ができ、独自3Dモデル形式にも対応可能なソフトを使用する手法を考案した。

重機のラジコンの姿勢を「Blender」を用いて再現した結果を図-15に示す。重機がどのような状態か分かるような映像の提供が出来ていることが確認できる。



図-15 ラジコンと「Blender」内で重機の姿勢の再現

### 3.5 「Unity」上での施工現場の環境モデル再現の実験と考察

本実験では、施工現場の全体を俯瞰することで施工現場の全体と「Unity」上で行った重機の姿勢の再現ができるかを検証した。また、再現された重機の姿勢と周辺の状態を監視できる視点により重機がどのような状態になっているのかが分かるような映像の提供が可能であるか確認を行った。

施工現場の地形と関節を付与した重機を統合した施工現場環境モデルを図-16に示す。図-16から、施工現場の地形と重機の3Dモデルを再現することができており、施工現場環境モデルを再現することができたことが確認できる。また、図-17に施工現場の全体を俯瞰した視点の映像を、図18,19に「Unity」上で行ったラジコンと重機の姿勢の再現の比較結果を示す。図17のように施工現場の全体を俯瞰した視点からの映像からはっきりと全体を俯瞰でき、重機の位置関係を確認できた。また、図18,19のようにラジコンと姿勢の比較を行った結果、重機の姿勢を問題なく再現できていることが確認できる。

以上より,統合したシステムを利用することにより,「Unity」上に施工現場の地形の再現とビジュアライゼーション用の視点の作成ができ,重機の関節を作成することも問題なく再現できていることが確認できる。以上より,重機操縦者が施行現場の環境を把握できるようなシステムを,「Unity」上で実現することができたと考えられる。

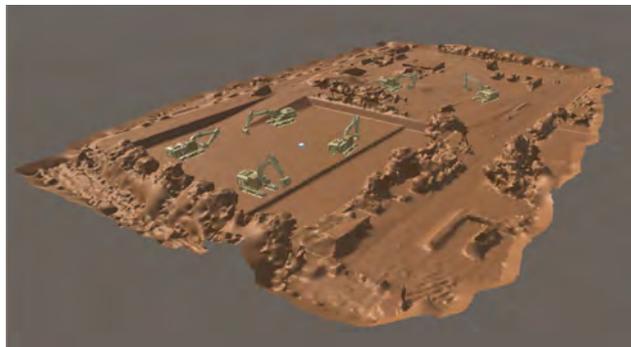


図-16 「Unity」上での施行現場の環境モデル



図-17 「Unity」上での施行現場の全体俯瞰映像



図-18 「Unity」上での重機の姿勢の再現結果①



図-19 「Unity」上での重機の姿勢の再現結果②

#### 4. 結論

本研究では,無人化施工において作業現場にモニター用に設置されたカメラの映像から,映っている重機の位置,向き,姿勢を推定し,遠隔重機操縦者に提示する手法・システムの構築を目標とした。そのための方法として,①骨格位置を推定するために

開発されたアルゴリズムであるOpenPoseアルゴリズムを重機に適用することで,特別な機械装置の付加なく,重機の向きや姿勢を認識する手法の実現と②取得した重機や施工現場環境の情報をUnityなどのゲームエンジンを使って統合することで,豊富な拡張機能を活用し,施工現場環境の高度なモデルを効率良く構築する手法の開発を進めた。

①については,提案手法を実現するために,どの種類の重機を対象とするか,またどの可動部分を人間の関節として見立てて姿勢推定を行うかについての検討を行い,アノテーションの実施,既存の学習プログラムをそのまま利用して,重機の姿勢推定用学習モデルの作成を試みた。しかしながら,最終的には人物を対象として最適化されたOpenPoseを用いた重機の姿勢推定用モデルの作成は困難であり,OpenPoseを重機に適用するためには,アルゴリズム自体に大きな変更を加える必要があると考えられることがわかった。そのため,重機の姿勢推定のための他手法として,我々が過去に開発した,部位に着目した重機の認識手法POLOを用いた重機の姿勢推定手法を提案した。ボックス画像を用いて提案手法の有効性を検証したところ,重機の各部位が正しく検出され,重機の姿勢を正しく認識することが確認できた。

②については,施行現場を再現するゲームエンジンとしてUnityを選択し,施行現場の再現を行うために必要な,施行現場の地形の再現,ビジュアライゼーション用の視点の作成,重機モデルの関節の作成を進めた。施行現場地形の再現には点群データの表面再構成法を用い,ビジュアライゼーション用の視点の作成では,施行現場の全体を俯瞰できる視点と,重機周辺を監視できる移動式の視点を作成した。また,実際の重機の姿勢はBlenderを用いて再現を行った。これらを組み合わせることで,ゲームエンジン上で,重機操縦者が施行現場環境を把握できるシステムを実現することができた。

今後は,新たに提案した重機姿勢推定手法を実用段階まで完成させ,この提案した手法で,構築した重機のモデルをUnity上で再現した施行現場環境に提示し重機操縦者が,操縦対象の重機の位置,向き,姿勢や施工現場の状況を,正確に把握できるシステムの実現を目指していく。

#### 参考文献

- 1) Zhe Cao and Tomas Simon and Shih-En Wei and Yaser Sheikh (2017), "Realtime Multi- Person 2D Pose Estimation using Part Affinity Fields", In CVPR, 2017.
- 2) 井上慎人,藤武将人,吉見卓:"機械学習と画像処理を用いた重機の自動カメラ追従システム", 平成30年度建設施工と建設機械シンポジウム, 災害,防災,復旧・復興(3)-7, 2018.

## 43. AI を用いて映像中の建設機械を自動的に検出するシステムの開発

安藤ハザマ  
富士ソフト

○早川健太郎 木付拓磨  
増田裕正 寺原 勲

### 1. はじめに

建設現場では、レーザスキャナや GNSS 等の 3 次元計測機器を活用した ICT 施工が盛んに行われている。様々な機器を用いて現場の形状を計測することで出来高や出来形を管理しているが、これらの多くは施工完了時の一瞬を計測したものであり、あくまで施工結果の確認として実施されている。結果に至るまでの歩掛や日々の出来高等のプロセス管理は異なった手法で行われることが多く、定点カメラで撮影した映像を用いて施工管理を行うものなどが挙げられる。例えば、動画やタイムラプスカメラで工事の進捗を一定間隔で記録するものがある。これらの活用方法では、毎秒数フレーム～数分間隔の高い時間分解能で現場内を継続的に記録することが可能であり、映像から施工の結果だけでなくプロセスを確認することができる。しかし、映像を見るだけでは、工事完成形に対する進捗状況が直観的にわかりにくい、施工量や距離、面積等の定量的な情報を取得しづらい、稼働している建設機械の台数等の常に変化する情報を素早く把握できないといった課題がある。そこで、上記の課題を解決しつつ建設現場の進捗管理を効率的に行うため、「4K 定点カメラ映像による工事進捗管理システム」<sup>1)2)</sup>を開発した。このシステムは①3D

データの重畳表示、②映像から距離や面積を算出、③AIによる進捗レポート、④オルソ画像の作成の4つの機能を搭載している。

このうち③AIによる進捗レポートは、AIを用いて映像中の建設機械を検出し出来高管理に活用するものであり、特に先進的な機能である。従来は職員が現場に長時間留まり、建設機械の歩掛や稼働状況を知ることによって出来高を管理していたが、AIによる建設機械の検出によりこの業務を効率化することが可能である。本稿では「AIを用いて映像中の建設機械を自動的に検出するシステム」について詳しく述べる。

なお、本件は国土交通省「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」(PRISM)に採択され開発したシステムの一部である。

### 2. 建設機械検出システムの開発

#### 2.1 システムの概要

映像中の建設機械を自動的に検出するシステムの概要を図-1に示す。このシステムの特徴は、建機検出AIとカテゴリ認識AIと呼称する2つのAIで構成されていることである。建機検出AIは、盛土施工で一般的に使用されている4種類の建設機

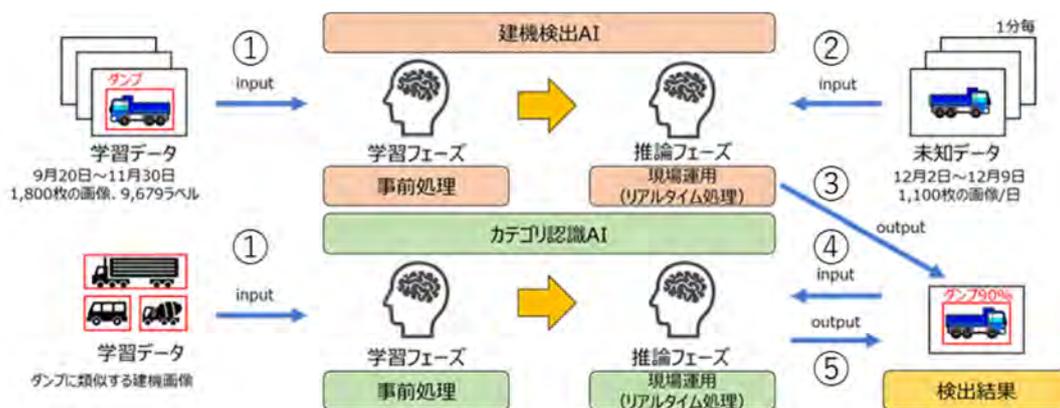


図-1 建設機械検出システムの概要

械(ダンプ、バックホウ、ブルドーザ、振動ローラ)を検出対象としており、入力された未知の画像から4種類の建設機械を検出する。この検出結果では外観がダンプに類似する車両を誤検出する傾向があるため、それらを区別することが可能なカテゴリ認識AIを用いた。建機検出AIがダンプを検出した場合、それが真にダンプであるかさらに分類することで、検出精度を高めている。図中の①は機械学習によるAIの生成を表しており、システム運用前に実施する。ここでは事前に収集した複数のデータを学習することで、建機検出AIとカテゴリ認識AIを作成している。②～⑤は未知の映像から建設機械を検出する手順を表している。②では建設機械を検出したい画像を建機検出AIに入力し、③で検出結果を出力している。ここでダンプとして検出された場合は外観が類似する車両である可能性があるため、③で得られたダンプの画像を④でカテゴリ認識AIに入力し、検出精度を高めた結果を⑤で出力する。これにより未知の映像に存在する建設機械が検出される。

建設現場の映像をこのシステムに入力することで、映像中の建設機械を自動的に検出することが可能になり、職員が現場を常時観察せずとも出来高管理の基礎となるデータを得ることができる。

## 2.2 システム運用までの準備

以下にシステムを現場で運用するために必要な準備事項を示す。

### (1) 対象現場と定点カメラの設置

映像撮影の対象として、図-2に示す延長300m、T.P.+14.5mの防潮堤を構築する工事現場を選定した。この防潮堤に近接する位置に構築された2つの水門上に定点カメラ(JVCケンウッド社製VN-178WPR)を設置し、4K解像度(3,840×2,160)、1fps間隔で防潮堤を構築様子を記録した。図-3は定点カメラで実際に得られた映像である。

### (2) 検出の対象とする建設機械の選定

盛土施工で一般的に使用されている4種類(ダ

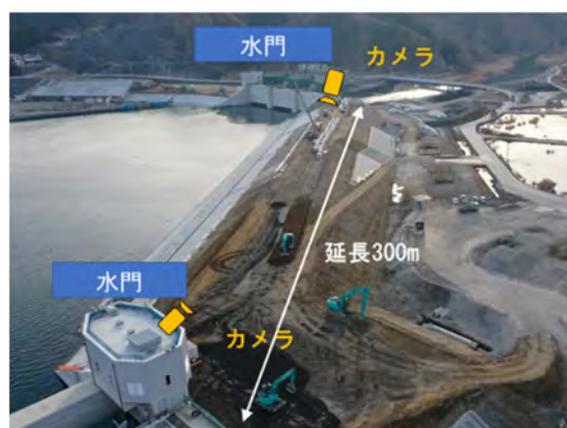


図-2 対象とした防潮堤の工事現場

ンプ、バックホウ、ブルドーザ、振動ローラ)を対象にした。同種の機械であっても仕様(バックホウのバケット容量やアーム長など)や色が異なる機械が複数台存在するが、ここでは同種の機械として扱っている。また、検出の対象とするエリアは定点カメラからの距離が150m以内の盛土施工範囲(図-3)とした。

### (3) AIの作成に利用するプラットフォームの選定

AIを作成するために、Microsoft社のCustom Visionを利用した。このプラットフォームでは機械学習技術を用いて、学習データとして入力した画像から学習モデルを作成し、学習した対象を検出するAIを作成することが可能である。このAIは学習によって得られた対象の特徴を用いて画像内に存在する対象を検出し、名称と画像内の座標を得ることができる。

### (4) 学習用の画像データの取得

盛土施工用の建設機械が稼働していた2019年9月20日～11月30日までの定点カメラ映像のうち、作業が行われている時間帯から無作為に1,800枚の静止画(JPEG)を切り出し学習用の画像データとした。

### (5) 画像データへのラベル付け

学習用の画像データに映っている建設機械の位置と名称を登録する作業をラベル付けと呼び、ラベルを付けた画像データはAIにとっての正解値である。図-4のように建設機械を矩形で囲み位置を決定し名称を登録する作業により、建設機械の外観と名称が関連付けられ学習データとなる。ラベル付けは通常、目視かつ手作業で行うため膨大な時間を要する。1,800枚の画像データには総数10,000以上の建設機械が映っており、そのうち9,679台の建設機械にラベル付けを行った。図-5はラベル付けを行った画像データの一例であり、一枚の画像中に複数台の建設機械が映っている場合は、全てにラベルを付与している。4種の建設機械のラベル数の内訳は、ダンプ4,043個、バックホウ4,042個、ブルドーザ812個、振動ローラ782個である。ただし、矩形の大きさが100×100px以下となる建設機械はカメラからの距離が概ね150mを



図-3 定点カメラから得られる映像

超えるものであり、検出の対象範囲外となるので、ラベル付け作業の対象外とした。

(6) 建機検出 AI の作成

ラベル付けされた画像データを学習データとして、Custom Vision にて機械学習を実行した。これにより、未知の映像中に存在する 4 種の建設機械を検出できる建機検出 AI を作成した。建機検出 AI に未知の映像を入力し、建設機械を検出した結果を図-6 に示す。建機検出 AI は入力された映像内で学習した特徴に似ている対象を検出すると、対象の名称とそれを囲む矩形座標を出力する。システム上では建設機械の種類ごとに異なる色の矩形で表現しており、同時に矩形上部には推論確率(推論の確からしさ)が表示される。図-6 の左上の例では赤い矩形で囲まれた対象は「90.5%の確率でブルドーザである」ことを示している。

(7) カテゴリ認識 AI の作成

建機検出 AI を用いて未知の映像中からダンプ

を検出する際、ダンプと外観が類似している建設機械を誤ってダンプとして検出する事例が多く発生した。図-7 はダンプとして誤検出された建設機械の例である。矩形で囲まれている対象は、正しくは生コン車や資材搬入用のトレーラである。

これらの誤検出結果を正しい結果へ導くため、ダンプとダンプに類似した 5 種の車両のカテゴリを分類するカテゴリ認識 AI を作成し、建機検出 AI による検出結果に対して適用した。AI の作成に Microsoft 社の Custom Vision を利用した点と学習用の画像データの収集期間は建機検出 AI と同様である。学習用の画像データに映っているダンプに類似した車両を 5 種類選択しラベル付け作業を行い、ラベル総数は 248 個(表-1)とした。

建機検出 AI とカテゴリ認識 AI で大きく異なる点は、建設機械の見つけ方にある。建機検出 AI は入力画像の全範囲から対象となる物体の存在を検出している。一方、カテゴリ認識 AI は建機検出 AI の検出結果(矩形で囲まれた画像)のうち、誤判定の多いダンプに対して働くものである。対象は既にダンプとして判定された画像のみであり、それをダンプもしくはダンプ以外の車両に分類してい

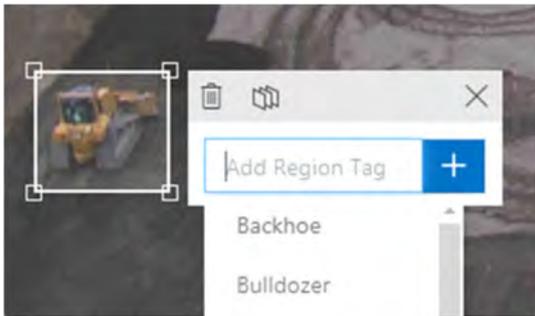


図-4 ラベル付け作業の様子



図-7 建機検出 AI がダンプと誤検出した例



図-5 ラベル付けされた画像データの例

表-1 カテゴリ認識 AI の作成に用いた車両のラベル数

カテゴリ	ラベル数	ラベル合計
ダンプ	50	248
Wキャブトラック	50	
生コン車	50	
トレーラ	48	
乗用車	50	



図-6 建機検出 AI での検出結果

る。この2つのAIを連続的に運用することで、盛土上で稼働する建設機械を精度よく検出することが可能になる。

### 3. 建設機械検出システムの性能確認と運用結果

#### 3.1 AIの性能確認の方法

一般的にAIの性能を評価する場合、性能指標として「Precision」、「Recall」、「F値」、「mAP」の4つが用いられるが、このうちPrecisionとRecallに注目し性能を評価する。本稿の建設機械検出の事例で言えば図-8に示すとおりである。PrecisionはAIがダンプとして検出した対象のうち、真にダンプだった対象の割合を示している。Precisionの値が高い場合、誤った検出が少ないことを意味している。Recallは真にダンプである対象のうち、AIがダンプとして検出した対象の割合を表しており、Recallの値が高いほど対象の見逃しが少ないことを意味している。

#### 3.2 評価用データ

AIの性能指標を求めるため、建機検出AIとカテゴリ認識AIに評価用のデータを入力して得られた検出結果を評価用データの正解値と比較する。評価用データとして2.2.(4)と同期間に取得した映像のうち、学習データとして使用していない画像から72枚抽出した。その画像に含まれる4種の建設機械を目視し、正解となるラベルを付与した。その内訳はダンプ190個、バックホウ132個、ブルドーザ30個、振動ローラ27個の合計379個である。

#### 3.3 学習用のラベル数と性能指標の関係

一般には、AIを用いて対象を検出する場合、学習データの数が多の方が検出精度は向上すると言われている<sup>3)</sup>。しかし、多くの学習データを用意しラベルを付ける作業には多くの時間を要するため、必要となる学習用ラベルは極力少ない数で高い性能を出すことを考えたい。そこで、建機検出AIのラベル数を増加させた場合の性能指標への影響を検証した。

図-9, 10には評価用データを用いて算出したAI

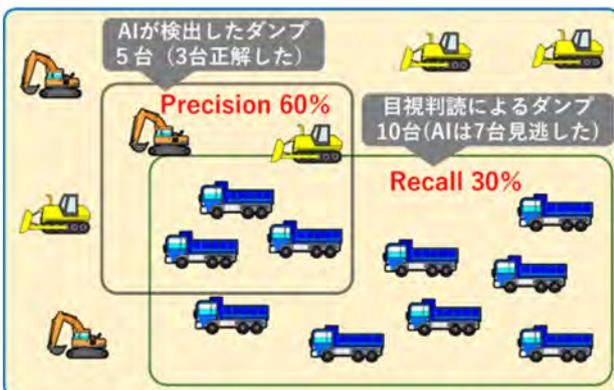


図-8 建機検出AIにおける性能指標

の性能指標を示す。図-9はブルドーザを検出した場合のラベル数と性能指標との関係である。Precisionはラベル数が約400個の時に既に80%以上と高い値を示し、500個を超えると100%となる。すなわち、AIがブルドーザとして検出した対象は、それが全て正解であったことを示している。一方、Recallはラベル数500個までは低い値を示しているが、600個を超えると80%以上となる。図-10にはダンプについての同様のグラフを示す。ダンプは複数台が同時に映像に映る機会が多いため、最小ラベル数が2,424個とブルドーザと比較して多くなっている。そのため、PrecisionとRecallは初期から概ね80~90%と高い水準を維持している。

図-9, 10より、学習データに用いるラベル数が増加するにつれてAIの性能指標が向上していることが明らかとなった。また、ラベル数が一定数を超えると性能指標は収束する傾向にあり、高い値で安定することも確認された。

#### 3.4 AIによる検出結果と目視計数の比較

AIの性能指標が80%を超えたことが確認できたため、現場運用を開始し未知の映像から建設機械の検出を行った。このときの検出誤差を評価するため、AIによる検出数と目視で計数された台数を比較した。ここでの検出誤差は、(AI検出数-目視台数)/目視台数で定義した。評価に用いるデータは、AIの学習に使用していない2019年12月2日~12月9日の映像を1分間隔で静止画として切り出したもの(約1,100枚/日)を採用した。建設機械ごとの検出誤差を図-11に示す。目視での計

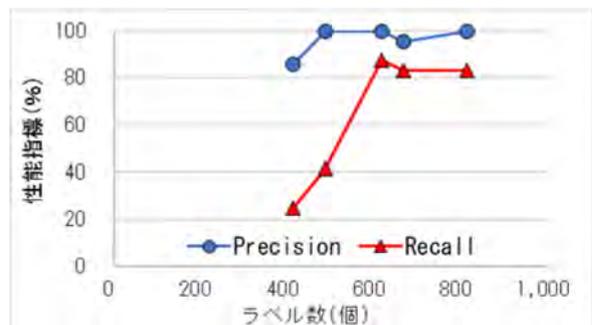


図-9 建機検出AIの性能指標 (ブルドーザ)

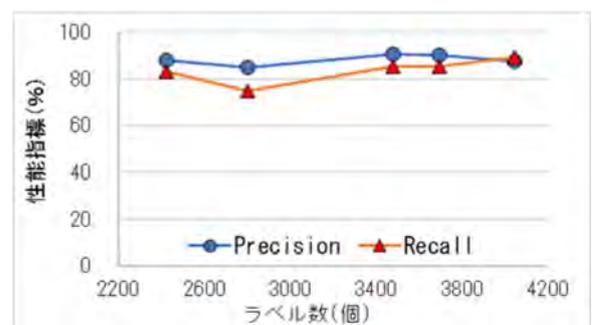


図-10 建機検出AIの性能指標 (ダンプ)

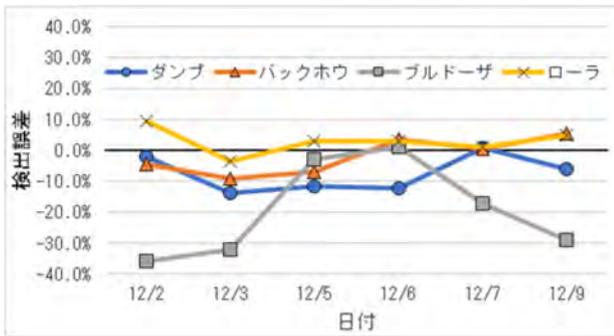


図-11 建設機械ごとの検出誤差

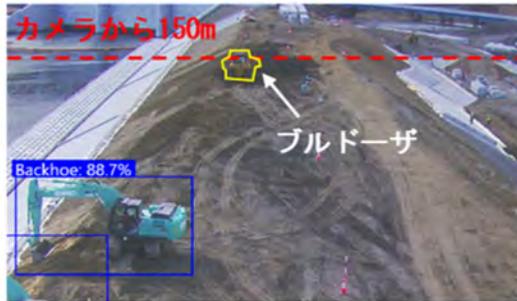


図-12 対象範囲の境界付近のブルドーザ

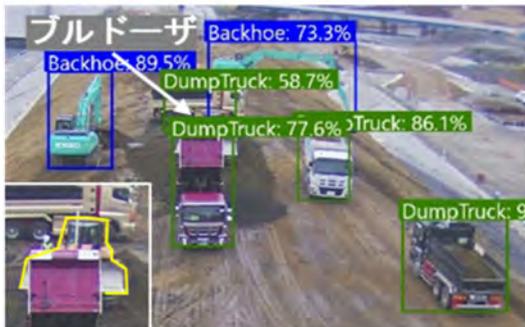


図-13 ダンプと重なった状態のブルドーザ

数に対する AI による検出誤差は、バックホウと振動ローラの場合でいずれの日も  $\pm 10\%$  以内に収まっている。一方、ダンプは  $+0.8\% \sim -13.7\%$ 、ブルドーザは  $+1.2\% \sim -35.6\%$  の範囲と変動幅が広く、特にブルドーザの検出誤差が大きい。この原因として、次の 2 つが考えられる。第一に、ブルドーザの検出誤差が大きい日の敷き均し作業は図-12 に示すように検出対象範囲とした 150m の境界付近で行っており、ブルドーザは他の建設機械と比べて機体の実寸が小さいため、映像中の解像度が低下したことが挙げられる。第二は盛土材を運搬しているダンプと映像上で重なる(図-13)ことで、建機検出 AI による検出の困難さが増したものと想定される。

このように、AI の性能指標のみで評価した場合は Precision と Recall 共に 80% 以上という結果が出たが、実際に現場で運用し目視結果と比較することで解像度の低下や障害物との重なりを苦手と

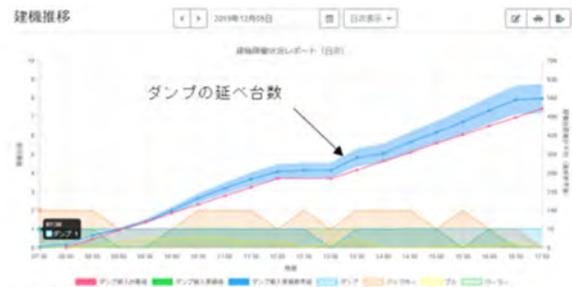


図-14 AI が検出したダンプ台数の積み上げグラフ

していることがわかり、性能指標だけでは把握できない課題が判明した。AI の性能を向上させるだけでなく、カメラの設置位置や建設機械の動線などを工夫し図-12, 13 のような状況を避けることで、その性能を発揮することができる状況を整えることも重要である。

#### 4. 出来高管理の高度化

検出対象の解像度の低下や障害物との重なりなどの不適切な条件下を除けば、映像中の建設機械を  $\pm 14\%$  程度の誤差で検出できることが明らかとなり、現場の出来高管理に活用可能であると考えられる。例えばダンプの台数を計数することで、日々の運搬土量を求めることができる。さらに図-14 のようにダンプの延べ台数の積み上げ推移を見ることで、ダンプが集中するもしくは途切れる時間帯を把握し、現場の改善に資することも可能である。

従来、これらの情報は職員による観察で得ていたが、現場に滞在できる時間には限りがあった。このシステムを用いることで終日の情報を自動的に得ることができるため、職員の負担が減るだけではなく、建設機械の時間ごとの推移などこれまでは気づきにくかった情報を得られるようになり、建設現場の管理業務をより効率的に進めることができるようになる。

#### 5. システム運用上の留意点

建設機械検出システムを運用していく中でいくつかの課題が明らかになったので、以下に述べる。

##### (1) 現場の広さとカメラの解像度

定点カメラを設置して現場の映像を得るとき、対象とする範囲に対して適切な解像度のカメラを選択する必要がある。解像度の低いカメラを使用すると、撮影距離によっては映像に映る建設機械の解像度が低下し、モザイク処理を施したような見た目になる。このような映像は学習データとして不適切であり、検出精度の低下を招く恐れがある。

##### (2) カメラの設置位置

定点カメラを設置する位置によって撮影対象に偏りが生じる可能性がある。例えば人の目線程度の高さにカメラを設置した場合、特定の建設機械

が視界を遮り他の建設機械が映像に映らないことがある。このような状況が続くと学習データの収集に影響があるだけでなく、現場内の建設機械数を正確に検出できないため、出来高管理のデータとして運用することができなくなる。そのため、カメラは現場を俯瞰するような位置に設置することが望ましい。

### (3) 学習データの収集期間

建設現場では、施工の進捗によって地形や動線の変化、使用する建設機械の入替えなど、現場の状況は日々更新されている。このような状況の中で短期間のうちに集中的に学習データを収集した場合、特定の状況での検出に特化したAIとなる可能性がある。AIに汎用性を持たせるためにも様々な状況の学習データを得ることが望ましい。

### (4) ラベル付け作業時間

ラベル付け作業は人の手作業で数千回にわたって行われるため、多くの人工を要する。今回使用した学習データのラベル数は9,679個であり、ラベル付与には約256時間を要している。人物の顔や一般的な車両などを検出する場合、公開されている学習データセットを活用することでラベル付け作業を省略することができるが、建設機械のような特殊な物はデータセット公開には至っていない。

### (5) AIの検出精度の向上手法

本稿ではAIの検出精度を向上させる手法として、カテゴリ認識AIの活用と学習データに使用するラベル数の増加が有効であったことを示している。一方で、筆者らはその他にも精度を向上する手法を検討しており、ラベルの偏りも重要な要素であることを確認している<sup>3)</sup>。偏りとは、建設機械の向きごとのラベル数の多少を意味しており、AIの検出精度に影響を与えることがわかっている。そのため、無作為にラベル数を増やすだけでなく建設機械の向き等に一定のルールを設定して学習データを作成することも検討すべきである。

## 6. おわりに

建設現場の映像から学習データを作成し、建機検出AIとカテゴリ認識AIに建設機械の外観と名称を学習させることで、建設機械を自動的に検出するシステムを開発した。このシステムは、適切な条件下であれば映像中の建設機械を±14%程度の誤差で検出できることがわかり、現場の出来高管理に適用可能である。その結果として、職員が現場に長時間留まる必要がなくなり効率的に業務を進めることができる。

このような有用性が明らかとなった一方で、映像とAIを用いたシステムを運用する場合の留意点もいくつか判明した。大きく分類すると、映像の撮影方法、学習データの収集・作成、AIの検出精度の3つに分類され、これらの課題を解決するに

はシステムの改良だけでは限界があり、現場との密接な連携が必要となる。具体的には、現場条件に合致するカメラの選定や実際に使用されている建設機械をもとにした学習データの作成がある。しかしながら、特定の現場に特化したシステムとした場合は汎用性が新たな課題となる。このシステムを展開し、現場の効率的な管理を実現させるためには様々な現場状況に対応する必要がある。今後はシステムに汎用性を持たせる技術開発が求められる。そのために、汎用的な学習データの作成方法やより少ない学習データで検出精度を向上させる手法についてさらに検討していきたい。

## 参考文献

- 1) 佐藤 諒, 木付拓磨, 松本江基, 早川健太郎, 花坂弘之, 朝倉健介, 伊藤祐介, 蒔苗耕司: 4K 定点カメラ映像による工事進捗管理システムの開発および試行結果(その1), 土木学会第75回年次学術講演会, VI-990, 2020.
- 2) 木付拓磨, 佐藤 諒, 松本江基, 早川健太郎, 永井利幸, 増田裕正, 伊藤祐介, 蒔苗耕司: 4K 定点カメラ映像による工事進捗管理システムの開発および試行結果(その2), 土木学会第75回年次学術講演会, VI-991, 2020.
- 3) Chen Sun, Abhinav Shrivastava, Saurabh Singh, Abhinav Gupta: Revisiting Unreasonable Effectiveness of Data in Deep Learning Era, In ICCV, 2017.
- 4) 早川健太郎, 黒台昌弘, 増田裕正, 蒔苗耕司: AIによる建設機械検出システムの開発と検出精度を向上する試み, AI・データサイエンスシンポジウム(投稿中), 2020.

## 44. 遠隔臨場を活用した多人数コミュニケーションの実験的報告

可児建設株式会社      ○可児 純子  
立命館大学              横山 隆明  
株式会社環境風土テクノ 須田 清隆

### 1. はじめに

新型コロナウイルス感染の先行きが見えない中で、建設業においても接触レス・移動レスによるリスク回避や生産性の視点で遠隔を利用した新しい働き方が求められている。本論文は、遠隔技術の活用によって検証した、多人数の参加の講演会・報告会の運営や施工現場における臨場を要する工事検査などの実施結果を通じて、遠隔臨場の効果や課題について考察し、広く一般化していく上で提案をするものである。論文では講演会での発言権がない聴衆 268 名、発言権を持つパネラー 15 名（5 セッション）により構成、工事検査では受発注者間の臨場共有など運用面での課題や改善策などを利用形態別に整理し考察している。

### 2. オンライン報告会の目的

本報告会は、国土交通省が公募した令和元年度 P R I S M 活動や政策課題型研究助成の活動成果について、映像の活用のノウハウや有効性などオンラインでの啓発により、社会実装化への議論が深まることを期待して開催するものである。報告会の開催を通じて遠隔臨場技術の比較検証を行っている。

### 3. 通信環境の選定

検証に使用した通信環境には、インターネットによる開域環境（WEB 会議システム Zoom ウェビナー）の活用を基本としている。ただし、遠隔の山間部にある現場案内には映像の安定性等、臨場面で

の課題も想定され、通信の安定化への方策を検証し、最適な方策を決定する。

### 4. オンライン報告会開催における課題

オンライン報告会では、報告側 15 名、聴衆側 268 名を予定し、特に報告者・聴衆者共に北海道から九州までの全国各地の職場や自宅からの参加のため、運用面での時間管理が重要になった。そのため、通信障害やシステム障害が発生した場合の対処方法は事務局に集中することが予想され、事前の検証が必要になった。同時に事務局対応をスムーズに行う上で事前のシナリオ策定が必要になり、シナリオに従った事前検証が必須になった。

以下に本報告会開催までの活動内容をまとめている。

表-1 報告会準備実績

活動内容	回数	検討内容
事務局会議	6 回	シナリオ策定、個別会議調整等
予行(個別)	8 回	パネル別予行、現場通信検証
予行(全体)	3 回	運営管理、通信検証

### 5. 報告会シナリオの策定

報告会のシナリオは講演内容や報告内容などを考慮し、かつ障害時の対応時間を休憩時間として採り入れ 2 時間 30 分で収まるように時間配分している。

#### 5.1 運営計画

オンライン報告会のシナリオに対する検証課

題と内容を表-2 に示す。

表-2 シナリオに対する検証課題と内容

検証内容	時間(分)	実施項目
WEB 会議 1 人	10	開催挨拶
WEB 会議 1 人	20	基調講演
WEB 会議 1 人	25	特別講演
WEB 会議 4 人	30	パネル討論 A
WEB 会議 5 人	30	パネル討論 B
ビデオ会議(WEB 併用)	25	遠隔現場+本社
ビデオ会議(WEB 併用)	10	遠隔現場
WEB 会議 2 人	15	事務報告
WEB 会議 160 人	25	統括討議

## 5.2 通信環境の検討

通信環境を当初 WEB 会議 (Zoom) (図-1 参照) を設定していたが、試行段階で山間部の現場から送られてくる映像の不安定化が課題になり、発注者における段階検査を目的にした場合に不具合が想定された。そのため、本報告会では通信環境の改善策として非対称通信や帯域推定技術、画像圧縮技術を組み入れているビデオ会議 (HD コム) (図-2 参照) の併用を行っている。

専用端末/パソコンで構成



図-1 ビデオ会議



図-2 WEB 会議システム

WEB 会議とビデオ会議の比較を表-3 にまとめる。

表-3 ビデオ会議と WEB 会議の比較評価

	ビデオ会議	WEB 会議
サービス形態	オンプレミスサービス ( 宅内設置 )	クラウド サービス / オンプレミスサービス
利用形態	テレビ/専用端末と、社内イントラ回線を通じて会議を行う	パソコンとインターネット回線を通じて会議を行う
ネットワーク	イントラネット・VPN・インターネット回線	インターネット回線
利用場所	会議室 ( 参加者: 複数 / 対複数 )	自席、会議室 ( 参加者: 基本 1 対 1 )
操作性	リモコン操作	パソコンブラウザ操作
安定性	ハードウェア処理のため一般的に安定	ソフトウェア処理のため安定性に欠ける
品質	高画質、高音質	ビデオ会議の品質確保は困難
マルチデバイス	スマホ、タブレット、パソコン	スマホ、タブレット、パソコン
PCリテラシー	不要	必要
長時間会議	向いている	不向き
提供メーカー	シスコ、ポリコム、ソニー、パナソニックなど	ZOOM、シスコ、ブイキューブ、Meeting Plaza など

## 5.3 映像の安定化のための方策

### a. 非対称通信

エンコード帯域を 4Mbps に設定すると HD 解像度で十分な映像品質を確保できるが、一般的な会議システムでは 4Mbps で設定した場合、映像の送受信共に 4Mbps の帯域を使用するため、上り、下り合計 8Mbps 帯域が必要となる。またスマートフォンの画面サイズは通常 6~7 インチ程度のため、スマートフォンに表示する映像が SD 解像度でも実使用上問題はない。

ビデオ会議 (HD コム Live) では、このことに着目し端末側で受信する映像は 256kbps の SD 解像度、送信する映像は 4Mbps の HD 解像度とする非対称通信 (図-3 参照) を行い送信する映像の高画質化を図った。

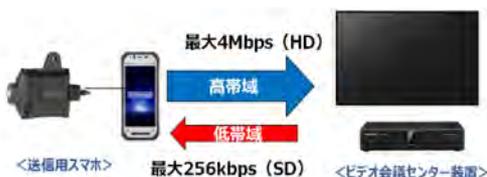


図-3 非対称通信の仕組み

## b. 帯域推定技術 (AV-QoS)

ネットワーク環境において、一定の品質の映像を維持するためには通信中の帯域を維持する必要がある。インターネット回線や公衆無線回線は、多数の端末が同じ通信資源を共用しており端末数や使用されるアプリケーションが常に変化するため、各端末が使用可能な帯域幅も変動する。ビデオ会議端末が送信する映像、音声データの送信帯域が使用可能な帯域幅を超過した場合、超過分は遅延したり、損失したりする。これによって映像・音声の乱れや途切れが発生している。これを防止するために、常に狭帯域で送信すると映像・音声品質が常に低くなり、ビデオ会議端末としての優位性が失われる。そこでビデオ会議システム (HD コム Live) では、変動する帯域幅を推定し、映像・音声の帯域幅を動的に調整することで、遅延や損失を抑制する帯域推定技術を採用した図-3 に無線回線を使用した際の帯域変動の例を示す。無線の場合、帯域の変動が急峻(図-4 参照)である。

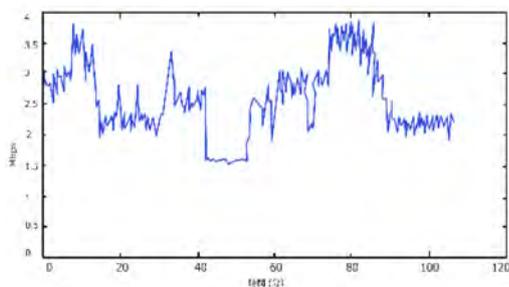


図-4 無線における帯域変動

## 5.4 現場との中継検証結果

### a. WEB 会議方式のみの検証結果

スマートフォンと Zoom との接続だけでの試験では映像に揺れが入り、かつ注目箇所へのフォーカス過程での映像に乱れが生じた。見ている側からは揺れの映像から不快感はぬぐえなかった。

### b. ビデオ会議方式のみの検証結果

ジンバル付カメラとタブレット (映像圧縮機能と帯域推定を装備) とビデオ会議 (非対称通信) での映像には揺れが明らかになく、映像が安定していた(画像-1 参照)。



画像-1 メモリまで鮮明に表示

## c. 運用結果

オンライン報告会では現場からの遠隔臨場の場合、映像の揺れによる不快感を解消するために WEB 会議システムを基幹システムにし、ビデオ会議を結合させた二つのシステムのハイブリッド化を試行するものとした。その結果、明らかに映像の画質において WEB 会議(画像-2 参照)に比べてビデオ会議(画像-3 参照)を使用した映像の方が画質の鮮明性が高いことが確認されている。



画像-2 WEB 会議 (映像は不鮮明)



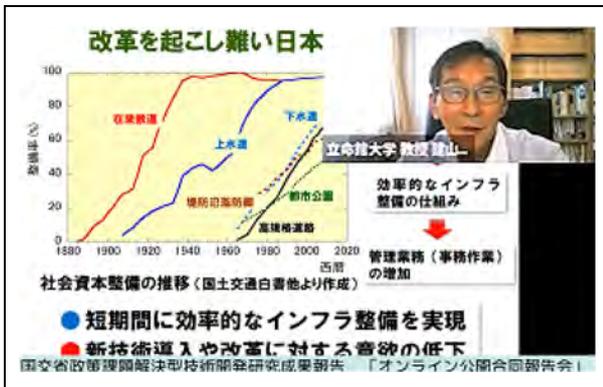
画像-3 ビデオ会議 (映像が鮮明)

## 6. オンライン報告会

オンライン報告会に関する事後アンケートでは全セッションともに5段階評価の関心度で平均4.2と高い理解が得られた。特に遠隔の現場見学会では、画質、音声の安定感から臨場感が表れたと高い評価に繋がっていた。

## 6.1 講演会（基調講演）

講演会（基調講演）の様子を画像-4 に示す。



画像-4 WEB 会議一人 spotlight

## 6.2 遠隔現場見学会

遠隔現場見学会では、北海道天塩の現場と堀口組本社をビデオ会議システムで繋ぎ、WEB 会議システムを通じて聴講者に映像と音声をリアルタイムで送信した。



画像-5 ビデオ会議（WEB 会議併用）



画像-6 ビデオ会議（WEB 会議併用）

## 7. まとめ

オンライン報告会は、参加申し込み数 268 名、平均聴講率 70%程度あり、常時報告者も含めて 180 人近くが実質参加したことになる。

またオンラインのために全国からの参加となり、特筆すべきは行政 30%、大学 10%、建設業界 40%、他産業 20%と産官学体制が確認されている。ただし行政ではWEB 会議に職場のセキュリティの問題で活用を難しくしていた。それらを踏まえてオンライン報告会の特徴を整理した。

- ① 報告会をスムーズに進める上で事前準備とホストの役割の明確化が必要となる。
- ② オンラインでの報告会は、聴講者の出入りが自由のためセッションごとの時間管理が重要になる。
- ③ ビデオ会議を使用する場合 WEB 会議との結合を可能にする仕組みづくりが必要になる。
- ④ 聴講者からの意見や質問はチャットを利用して必要に応じて即応しても、時間制限の中で事後対応も事前告知する必要がある。
- ⑤ 通信環境が厳しい工事現場からの無線伝送には非対称通信や帯域推定技術を持つビデオ会議システムが有効である。

## 45. 超大型建築現場における生産性向上を目指した 資機材管理システムの開発と導入

鹿島建設（株） ○中澤 勇介  
鹿島建設（株） 内田 佳親  
鹿島建設（株） 犬窪 昭裕

### 1. はじめに

毎週およそ500台を超える車両で資機材の搬出入を行っている大型建築現場でも、レンタル資機材の貸出し業務は通常の記帳管理で行っている。さらに、点検対象の機械は現場内に点在していたため、資機材管理や機械点検管理にかなりのマンパワーが割かれてきた。これらを効率的に解決することは現場の生産性向上に必要不可欠である。このため、ICTとQRコードを活用して資機材を管理する「KENLOGI」システムを開発して業務の改善を図った。開発したシステムは、延床面積が35万㎡を超え、工事最盛期に作業員数が約3500人/日、高所作業車の台数が1200台/日を超える過去に例が無い最大規模の建築現場に適用した。また、当システムは建築現場のみならず、土木現場への適応も行いつつあり、建設業界全体の標準システムとして生産性向上をはかることを目指している。本報文では、この「KENLOGI」システムの概要と超大型現場における導入後の試行結果、また、今後のシステムの展開について報告する。

### 2. 資機材管理における現状と課題

#### 2.1 資機材管理について

建設現場には高所作業車やミニクレーンなどの建設機械や台車・立馬など、様々な資機材が存在する。貸与時には、使用者つまり管理責任者が明確であるが、時間の経過とともに管理責任者が不明となるケースが散見される。そのため、稼働率の悪い資機材が放置されることとなり、逸失利益の原因となる。さらに破損・故障時には起因者が特定出来ないため、その後の費用措置や対策立案が困難になることが多々ある。特に建設機械の場合は、リース料や修理費が高額であるため、コストの圧迫に直結する。さらに安全管理の面においても管理責任者が不明確であることは看過できない。

### 2.2 受発注について

あらゆる資機材は、工事担当者が物品請求書を作成し、所内承認を得たのちに発注され、場内に搬入される。しかし、多忙な工事担当者は、資機材を発注するたびに上記のような業務を行うことは非常に効率が悪い。また、所内承認を得るには、上長が事務所に在席している必要があり、工事担当者、上長の双方への負担が大きい。さらに、資機材を発注したり、在庫や納期を確認したりするために繰り返される電話やメールは非常に手間である。（図1）大規模現場では発注件数も非常に多く、これらの業務を効率化することが、生産性向上に大きく寄与すると考えた。



図 1 従来の資機材発注フロー

### 3. 建設機械の管理

#### 3.1 鍵管理

当工事は、当社の建築工事の中で最大規模であり、高所作業車やフォークリフトの稼働台数は、1日当たり1,200台を超える。これらを前述の様に、従来の方法で管理することは非常に非効率であり改善が求められた。（図2・3）

協力会社は高所作業車やフォークリフトなどの機械を借りる場合、台帳に会社名や氏名などを記入して、鍵と点検表などを入れた「安全バッグ」（後述）を借りる。機械管理は、この台帳の記載内容によって管理していた。鍵を紛失した場合などの措置は、この台帳に基づいて行っていた。しかし、この管理方法では協力会社の記帳手間が大きく、また、記帳ミスなどのおそれもある。

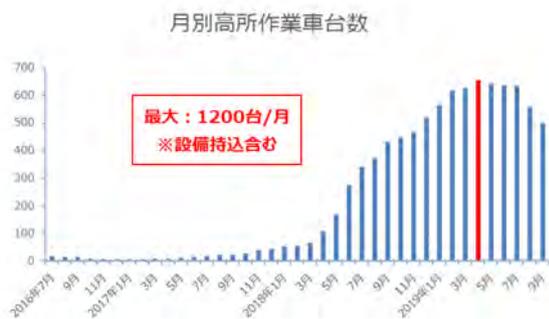


図 2 月別高所作業車台数

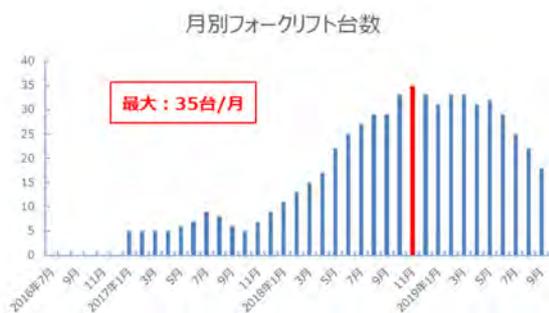


図 3 月別フォークリフト台数

稼働率の悪い機械は逸失利益を発生させるため、稼働率を確認することは現場を運営する上で必要不可欠であるが、この方法では非常に大きな労務量が求められる。

### 3.2 点検管理

当社では、高所作業車やフォークリフトなどの機械の管理を厳格化するために、1995年に安全バッグ制度が導入され、現在も同制度で運用している。(図4)

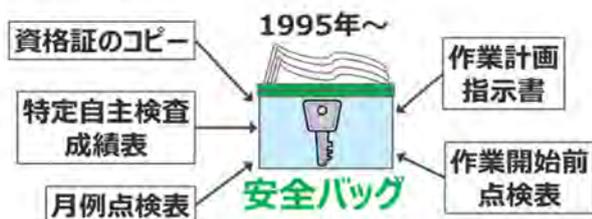


図 4 安全バッグ制度

この制度は、安全バッグの中に、作業開始前点検表、月例点検表、年次点検表などの法定点検表を入れることで点検管理を一元化することが目的である。しかし、この管理方法は各点検表の更新時に全て手作業で点検表を入れ替える必要があり、管理する機械の台数が増えるほど手間がかかる。

また、作業開始前点検の実施状況を確認するには、現地へ行くしか手段はない。限られた社員の数で全数を確認するには現実的に困難である。機械毎の月例点検や年次点検の有効期限の確認も煩雑となり、更新を失念するおそれがある。

上述のような状態は点検管理の厳格さに欠け、機械の安全管理が十分とは言えない。これは大型現場のみならず、すべての建築現場において顕在化している問題である。

### 4 揚重管理における現状と課題

建築現場では、製作工場から現場へ搬入された仕上げ材を、工程に合わせて必要なフロアまで揚重することが重要となる。この揚重を一括管理するために揚重センターを組織する。(図5)



図 5 揚重センターの概要

揚重予定は、あらかじめ協力会社から提出された揚重申込書を元に調整し計画される。この揚重申込書は決まった様式でメールや紙面で提出されることが一般的である。(図6)

当現場では特に仕上げ工程時の搬入が多く、1週間あたり約100社、車輛500台分の揚重量があった。提出される揚重申込書を週単位でまとめる作業には非常に多くの労務量が求められた。また、揚重予定に変更が生じた際、協力会社とリアルタイムにその情報を共有することが出来ず、混乱を招くおそれがあった。



図 6 揚重センターの役割

揚重費用負担の根拠資料の作成や、今後の工事現場に揚重計画を展開するには、紙情報の揚重実績を電子化することが必要である。しかし、この作業には過大な労力がかかっていた。揚重実績は、通常、エレベーターのオペレーターが揚重作業を行いながら、台帳に揚重実績を手書きで記載し、その台帳を電子化する。これらの作業は実績記録の二重手間であり、揚重センターへの負担が非常に大きかった。

(図7)



図 7 従来の揚重実績記録方法

## 5 「KENLOGI」システムの開発

昨今、建設現場においてもQRコードが普及してきた。例えば、現場では作業員(ヒト)にQRコードを与え入退場管理を行ったり、レンタル会社は資機材(モノ)にQRコードを与え在庫管理を行ったりしている。そこでヒトとモノをスマートデバイスで紐づけ、データベース化し、管理を「見える化」することで前述した管理の様々な課題を解決することに着目し、「KENLOGI」システムを開発した。(図8)



図 8 システム構築イメージ

開発は、当現場の課題解消だけではなく他現場やレンタル会社のニーズも反映させることを目標とし、「資機材管理」「受発注」「カギ・点検管理」「揚重管理」、の4つの管理業務をシステム化した。(図9)



図 9 システム構成

本システムは、通信環境の無い高層階や地下階でも利用出来る様、スマートデバイスに情報を蓄積でき、通信が回復した時にクラウドサーバとの同期処理を行う事が出来る仕様である。また、レンタル会社独自のQRコードが共有可能なことも特徴である。

### 5.1 資機材管理システム

本システムは、資機材にQRコードを割付けることで、資機材情報をデータベース化し、一元管理することが可能である。QRコードはシステム独自のものを使用しても良いが、レンタル会社独自のQRコードも使用可能である。(図10)

図 10 「資機材管理」情報データ

### 5.2 受発注システム

本システムは、物品請求から現場に資機材が納品されるまでをシステム上で行うことが可能である。また、所内の承認作業もシステム上で行うことが可能で、承認されると自動的に資機材が発注される。また発注・納入履歴も自動データベース化される。(図11)



図 11 「受発注」フロー

### 5.3 鍵・点検管理システム

#### 5.3.1 鍵管理システム

本システムは、鍵に取り付けたRFIDタグを併用することで建設機械の鍵の貸出業務をシステム化し、データベース化することが可能である。貸出状況がリアルタイムに「見える化」される。個人（ヒト）との紐づけは入退場管理システムのQRコードを使用する。（図12）



図 12 「鍵管理」フロー

#### 5.3.2 点検管理システム

本システムは、スマートデバイスを用いて作業開始前点検を実施し、データベース化することが可能である。これにより点検の実施状況がシステム上に一元管理される。使用者（点検者）は異常を発見した際に写真を登録することが可能で、担当者にメールで異常通知が送信される。（図13）



図 13 「点検管理」フロー

機械毎の月例点検や年次点検の有効期限も登録でき、点検表の写真をシステムに登録することも可能である。

### 5.4 揚重管理システム

本システムは、揚重申込から揚重実績まで全てシステム上で行うことが可能である。作成された揚重予定表はシステム上で協力会社と共有することができる。実績はスマートデバイスで入力しデータベース化する。データ化された揚重実績を出力することも可能である。（図14）

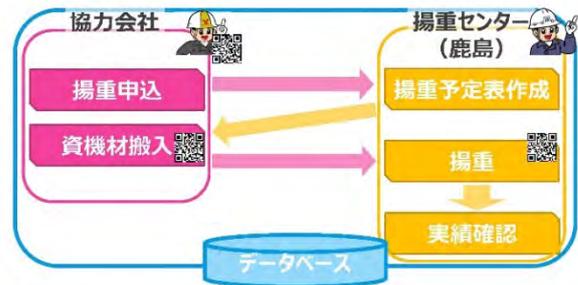


図 14 「揚重管理」フロー

## 6. システムの試行結果

### 6.1 資機材管理システム

資機材情報をデータベース化することで、その資機材の搬入日や仕様、管理責任者など、一元管理を可能とした。これにより場内にある資機材管理の「見える化」が可能となった。また、現地で資機材に貼られたQRコードを読み込むことで、その資機材情報が瞬時に画面に表示され、管理状態の悪い資機材の情報などが明確となった。（図15）

図 15 資機材一覧

当工事では、試行時に稼働していた高所作業車約300台、フォークリフト約25台を対象にした。これらの機械に、システム独自のQRコードステッカーを場内で貼り、紐づけ作業を行った。今回は現場担当で紐づけ作業を行ったが、レンタル会社のQRコードも利用可能で、今後はレンタル会社に協力をいただき、資機材のQRコード化を進める必要である。（図16）



図 16 QRコード紐づけ作業

## 6.2 鍵・点検管理システム

### 6.2.1 鍵管理システム

当工事では、鍵（安全バッグ）貸出所を現場に設けた。そこにシステム専用のPCとRFID読み取り機を設置した。当日、予定されている建設機械の作業指示書を貸出所にて配布し、その確認と引き換えに鍵を貸し出す仕組みとし、貸出業務の厳格化も図った。（図17）



図 17 鍵(安全バッグ)貸出所

使用者は専用のPCに接続されたリーダーに自身のQRコード読み込ませ、「借りる」申請を行う。その後、RFIDの付いた鍵（安全バッグ）を読み取り機に置き、鍵をシステムに読み取らせる。これにより、「いつ」・「誰が」・「借りた」・「返した」という履歴が全てデータベース化された。RFID読み取り機は一度の読み取りで複数の鍵を登録することができ、複数台貸出も円滑に対応することができた。貸出履歴が残るため、各機械毎の稼働率も明確となった。従来のように機械毎に手書きの帳簿で管理する方法に比べ、貸与者、使用者ともに労務が軽減化された。記載ミスもなく、確実な鍵管理が可能となった。（図18）

貸出機種	貸出日時	貸出場所	貸出者	返却日時	返却場所	返却者	備考
クレーン	2018/12/12 10:00	現場	田中	2018/12/12 15:00	現場	田中	
クレーン	2018/12/12 10:00	現場	田中	2018/12/12 15:00	現場	田中	
クレーン	2018/12/12 10:00	現場	田中	2018/12/12 15:00	現場	田中	
クレーン	2018/12/12 10:00	現場	田中	2018/12/12 15:00	現場	田中	
クレーン	2018/12/12 10:00	現場	田中	2018/12/12 15:00	現場	田中	
クレーン	2018/12/12 10:00	現場	田中	2018/12/12 15:00	現場	田中	
クレーン	2018/12/12 10:00	現場	田中	2018/12/12 15:00	現場	田中	
クレーン	2018/12/12 10:00	現場	田中	2018/12/12 15:00	現場	田中	
クレーン	2018/12/12 10:00	現場	田中	2018/12/12 15:00	現場	田中	
クレーン	2018/12/12 10:00	現場	田中	2018/12/12 15:00	現場	田中	

図 18 鍵貸出返却状況

### 6.2.2 点検システム

今回は高所作業車とフォークリフトを対象に、「作業開始前点検の実施」と「年次・月例点検の管理」を試行した。

#### a. 作業開始前点検の実施

作業開始前点検は「KENLOGI」アプリを使用する。使用者は点検を開始する前に自身（ヒト）機械（モノ）、鍵、それぞれのQRコードをスマートデバイスでアプリに読み込む。次に作業計画指示書をカメラで撮影し登録を行う。その後点検を行い、点検結果をシステムに同期する。

(図19・20)



図 19 「KENLOGI」アプリ(作業開始前点検)



図 20 作業開始前点検の様子

使用開始前点検の実施状況と点検結果がすべてデータベース化され、システム上で点検状況の一括管理が可能となった。異常が報告された際は、現地で確認する前にシステム上の写真で当該部が確認できるため、迅速な対応が可能となり、労務軽減にも繋がった。（図21）

点検機種	点検日時	点検場所	点検者	点検結果	備考
クレーン	2018/12/12 10:00	現場	田中	正常	
クレーン	2018/12/12 10:00	現場	田中	正常	
クレーン	2018/12/12 10:00	現場	田中	正常	
クレーン	2018/12/12 10:00	現場	田中	正常	
クレーン	2018/12/12 10:00	現場	田中	正常	
クレーン	2018/12/12 10:00	現場	田中	正常	
クレーン	2018/12/12 10:00	現場	田中	正常	
クレーン	2018/12/12 10:00	現場	田中	正常	
クレーン	2018/12/12 10:00	現場	田中	正常	
クレーン	2018/12/12 10:00	現場	田中	正常	

図 21 作業開始前点検結果状況確認

アプリ化したことで、点検結果は一時的にデバイス内に保存され、通信環境がある場所で同期処理を行いクラウド上へデータ送信を行う。これにより通信圏外においても点検が可能となった。

#### b. 年次・月例点検の管理

各レンタル会社は機械毎に点検記録をカメラで撮影し、システム上にその写真を登録することとした。更新の際は、新しい点検表を再度登録することでデータベース上において点検表を管理することが可能になった。今後は、作業開始前点検の機能と合わせることで安全バグ制度を廃止し、効率的な管理が可能となる。(図22)



図 22 年次・月例点検表

### 6.3 揚重管理システム

システム上で一括して揚重申込を管理することで、従来に比べ、効率的に揚重予定の調整や予定表の作成を行うことが可能になった。また、揚重予定表はシステム上で各協力会社と共有することが可能で、揚重予定の変更周知が迅速に行うことも可能である。(図23)



図 23 揚重予定調整

また、揚重予定には揚重毎にQRコードが割り当てられる。このQRコードには揚重物や揚重フロアなどの情報が登録されている。揚重作業中に「KENLOGI」アプリ上で当該QRコードを読み込み、揚重作業終了後、実績を修正入力し同期を行う。これにより、揚重実績がリアルタイムにデータベース化され、揚重実績の記録が効率化された。(図24)



図 24 揚重実績登録アプリ

### 7. 今後の展望・土木現場での試行

本システムは、当社の土木現場においても試行を開始し、各システム機能の有用性の検証を行っている。建築現場だけでなく、土木現場への導入・展開をすることで、建設業界全体で使用できる生産性向上ツールの一つとなるようなシステムを目指している。(図25)



図 25 土木現場 試験導入状況

### 8. 終わりに

今後、本システムが様々な条件下で使用できるシステムとなるよう、引き続き改良を重ねていく。そのためにも、更なる操作性の向上やレンタル会社との連携、システムのマニュアル整備、さらに、利用者へのフォローアップ体制の構築などによりブラッシュアップする必要がある。

最終的に、本システムが現場の生産性向上に大いに貢献出来ることを期待する。

## 46. 地理空間情報アーカイブ活用における 航空レーザ点群の土工事への適用性検証

株式会社安藤・間  
朝日航洋株式会社

○澤城 光二郎  
大伴 真吾

### 1. はじめに

産官学が保有する多様な地理空間情報を集約し、新たな利活用方法を創造するためのプラットフォームとして、G 空間情報センター<sup>1)</sup>や国土交通省データプラットフォーム<sup>2)</sup>などが存在する。建設業界においても i-Construction に関わる電子納品データの登録が今後進むものと予想されることから、このようなアーカイブを有効に活用する方法が求められている。

これらのプラットフォームに蓄積されているデータのひとつに航空レーザ測量の点群データがある。航空レーザ測量とは、航空機に搭載したレーザスキャナ(LS)で地上にレーザ光を照射し、上空から地形形状を効率よく計測するシステムである(図-1)。その中でも固定翼機による計測は、高度2,000m程度から広範囲を迅速に計測することが可能であり、主に標高地形図の作成、災害発生時の現況把握、森林事業管理などに活用されている。

造成工事では、通常、トータルステーションや地上LS、UAVレーザを用いた起工測量を実施して現場の地形データを取得するが、天候の影響や現場の繁忙期と重なるなどして、日程調整が繁雑となる問題があった。そこで筆者らは、この起工測量の地形データに先に挙げたアーカイブのデータを利用することで、現場ごとに測量を実施する必要がなくなるのではないかと考えた。このような背景から既存のアーカイブに蓄積されている航空レー

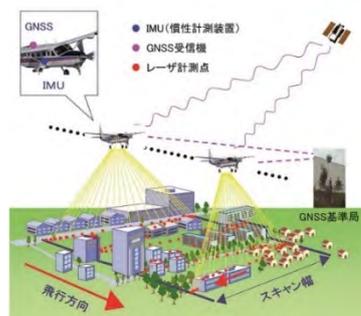


図-1 航空レーザ測量の計測イメージ<sup>3)</sup>

([https://www.gsi.go.jp/kankyochiri/Laser\\_sennon.html](https://www.gsi.go.jp/kankyochiri/Laser_sennon.html) : 国土地理院 HP より)

ザ点群データの現状を整理するとともに、道路造成工事の実現場で航空レーザ計測を実施し、これらを比較することで i-Construction に準じた起工測量に適用できる精度を有するかの検証を実施した。

### 2. G 空間情報センター

本研究では、活用する地理空間情報プラットフォームとして G 空間情報センターを対象とした。このプラットフォームは地理空間情報の活用を促進するために2016年より官民一体となって運用が開始されたもので、国、地方自治体、教育機関、民間など456の組織が保有するオープンデータ、有償・無償データが蓄積されている。ここに存在する航空レーザ点群の活用が可能か、現状のデータ保有数や点群の密度に着目して調査を実施した。

#### 2.1 航空レーザ点群のデータ数

2020年8月21日調査時点、G 空間情報センターにある全データセット数は5,402件でファイル数は49,588となっている。データの種別は様々であり、日本各地の地質図や地震動の波形データをはじめ、交通量情報や人口流動データなど多岐にわたるデータが蓄積されている。これらのデータセットの中にある3次元点群や航空レーザ点群のデータセットの数を表-1に示し、全データセットのうちに占めるこれらデータの割合を図-2に示す。全データセットに占める3次元点群データの割合は約0.5%と非常に少なく、点群データの蓄積が現状では十分に進んでいないことがわかる。一方で3次元点群データに占める航空レーザ点群の割合は図-3に示すように54%となっており、点群データの中で最も多いデータ数となっている。

このことから G 空間情報センターの点群アーカイブの活用を効率的に進めるためには航空レーザ点群を使用することが最も効果的であることがわかった。

表-1 G 空間情報センターデータ数

全データセット数	5399
3次元点群	26
航空レーザ	14

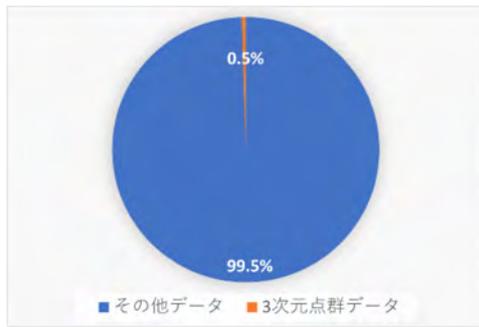


図-2 全データセットに占める点群データの割合

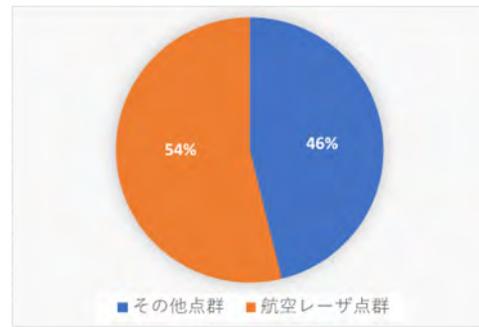


図-3 点群データに占める航空レーザ点群データ

## 2.2 航空レーザ点群の点群密度

国土交通データプラットフォームで公開され、G 空間情報センターからデータ入手可能な国土交通省および静岡県から提供された 11 個の航空レーザ点群のデータセットの中から一部データを抜き出して点群密度を算出し、国土交通省の定める<sup>4)</sup>i-Construction の土工事起工測量に準じた点群密度(0.25 m<sup>2</sup>あたり 1 点以上)を満たすデータがどの程度存在するか検証した。

検証の結果を表-2 に示す。11 個のデータセットのうち 8 個で上記の基準を満たす点群密度を有することが確認された。このことから、これまでの航空レーザ計測業務において取得されてきた点群データには、土工事の起工測量に適用できる品質を持つデータが数多く存在すると考えられる。

## 2.3 点群アーカイブ活用に向けての課題

航空レーザ点群の土工事における起工測量への活用を実現するためには、日本全国の地域をカバーできるデータ数と要求精度を満たすデータ品質が必要となる。これまでの検証から土工事の起工測量に適用できる点群密度を有するデータの存在が確認できたことから、今後はいかに広範囲かつ点群精度の高いデータを蓄積できるかが重要となる。

表-2 航空レーザ点群の点群密度

No.	データ名	提供元	有償/無償	データ形式	点群数 (0.25m <sup>2</sup> あたり)	起工測量基準 (1点以上)
1	平成20年度 狩野川水系航空レーザ 測量業務	国土交通省	無償	.las	1未満	×
2	平成30年度 静岡国道管内航空レーザ 測量業務	国土交通省	無償	.las	15	○
3	平成20年度 沼津河川国道事務所管内 航空レーザ測量業務	国土交通省	無償	.las	1未満	×
4	平成25年度 菊川航空レーザ測量	国土交通省	無償	.las	3	○
5	平成27年度 天竜川地形計測業務	国土交通省	無償	.las	1未満	×
6	平成26年度 天竜川地形計測業務	国土交通省	無償	.las	2	○
7	平成25年度 天竜川航空レーザ測量	国土交通省	無償	.las	2	○
8	平成30年度 沼津河川国道管内航空測 量業務	国土交通省	無償	.las	2	○
9	平成30年度 二級河川太田川河川改良 工事に伴う測量業務委託	静岡県	無償	.las	6	○
10	平成30年 度蘆山反射炉計測業務	静岡県	無償	.las	18	○
11	掛川城オープンデータ化プ ロジェクト	静岡県	無償	.las	136	○

## 3. 現場計測実験

前章では G 空間情報センターに蓄積されている航空レーザ点群の密度を確認したが、実際にこれらの点群がどの程度の精度を有するか検証する必要がある。そこで本研究では実際の工事現場を対象に航空レーザ計測を実施し精度を検証した。

本検証において計測対象とした現場は、切土法面の道路造成現場である(図-4)。当該現場は ICT 活用工事となっており、UAV レーザによる起工測量が予定されていたことから、航空レーザとの比較データとしてこの UAV レーザのデータを使用した。航空レーザは、図-5 に示す固定翼機にレーザ計測器としてライカジオシステムズ社製 Terrain Mapper を搭載したもので、12 月 8 日に対地高度 2,300m から計測を行った。このときの計測性能は鉛直精度 18cm<sup>5)</sup>となっている。一方、UAV レーザによる起工測量は、UAV の機種として DJI 社製 MATRICE600PRO(図-6)、レーザ計測器は Yellow Scan Surveyor を使用し、10 月 22 日に対地高度 50m から計測を行った。このときの計測性能は鉛直精度 5cm<sup>6)</sup>となっている。

### 3.1 検証項目

本実験では、UAV レーザで取得した点群を基準データとし、国土交通省の UAV レーザにおける出来形管理基準<sup>4)</sup>と照らし合わせることで航空レーザの起工測量への適用性を検証した。検証項目は①標高精度、②地形条件の精度への影響、③点群密度の 3 つを設定した。①標高精度についてはエリアを図-7 のように 9 箇所選定し、それぞれのエリアで UAV 点群から作成した不整三角網(TIN)と航空レーザ点群の標高較差を計算した。UAV レーザと航空レーザの計測日が約 2 か月離れているため、各計測間で地形変状の少ないエリア 1~エリア 8 を精度検証の対象とした。また、大きな地形の変状のあったエリア 9 では土量の変化を点群データから確認できるかについても検証した。②については計測した地盤の地形条件(傾斜や地形形状)によって標高較差精度にどのような影響を及ぼすかについて検証を実施した。③点群密度については、①において選定した 9 箇所のエリア毎に航空レーザと UAV レーザ点群の密度を計算した。



図-4 検証現場



図-5 航空レーザ搭載固定翼機



図-6 UAVレーザ

#### 4. 検証結果

検証項目①, ②, ③の結果を以下に示す。

##### ①標高精度

エリア1から9までの標高精度の結果を表-3に示し、図-8から図-11にエリア1, 7における標高較差のヒートマップとデータ分布のヒストグラムを一例として示す。標高較差の平均値と標準偏差がともに国土交通省の要求精度 $\pm 100\text{mm}$ を満たしたものはエリア1, 2, 3, 4, 6の5箇所である。要求精度を満たさなかったのはエリア5, 7, 8となった。このうちエリア7, 8については勾配が他のエリアに比べて大きい箇所になっている。また、エリア9についてはUAVレーザと航空レーザの計測間に地形が変化した範囲であり、図-12のヒートマップ上でわかるように土が削られて土量が少なくなっていることが確認できた。

##### ②地形条件が精度に与える影響

先に挙げた測定エリア9箇所の勾配をX方向, Y方向それぞれで算出し、絶対値の大きいものを表-3に記載し、地面の勾配と標高較差の関係を表したグラフを図-13に示す。この結果をみると傾斜が小さいほど標高較差も小さく、傾斜が大きくなるほど標高較差も大きくなる傾向が確認できた。

国土交通省の要求精度を満足した検証エリアの勾配は、おおむね20度~30度程度であるのに対し、要求精度の範囲外となったエリア7, 8では検証エリア全体の勾配が40度程度で局所的に約80度と非常に急傾斜な地形が存在している。このような部分でUAVレーザと航空レーザそれぞれの点群のばらつきが大きくなり、そのデータどうしを比較したことが較差の大きくなった原因と考えられる。このことから航空レーザ計測の標高格差精度には対象となる地形の傾斜が影響していると考えられる。

##### ③点群密度

エリア1から9まで、それぞれ $0.25\text{ m}^2$ あたりの点群密度を表-4に示すように平均8点となった。i-Constructionにおける起工測量の基準では $0.25\text{ m}^2$  ( $50\text{cm}\times 50\text{cm}$ )に1点以上となっており、全エリアにおいてこの基準を満たすことが確認できた。一方、UAVレーザと比較すると単位当たりの点数は15分の1程度と点群密度が小さかったことから、さ



図-7 検証エリア

表-3 標高較差結果

エリア		1	2	3	4	5
標高較差(mm)	平均	98	56	60	74	103
	標準偏差	37	31	68	30	96
勾配(度)		31	27	21	33	31
エリア		6	7	8	9	
標高較差(mm)	平均	91	274	228	-262	
	標準偏差	83	191	145	681	
勾配(度)		39	46	41	26	

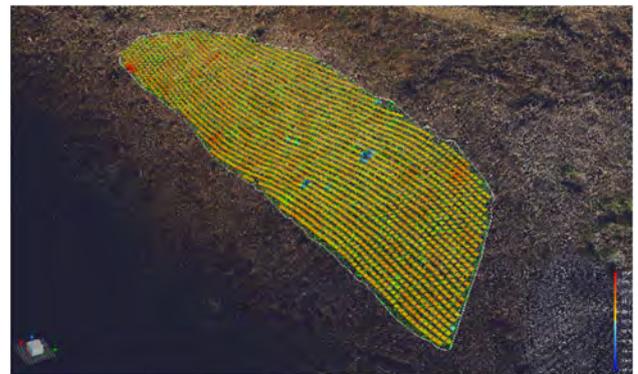


図-8 標高較差ヒートマップ(エリア1)

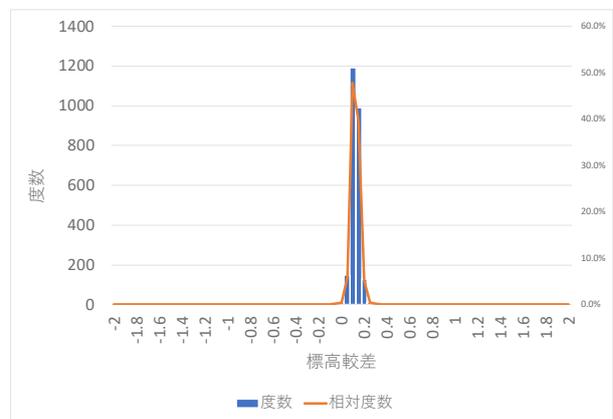


図-9 標高較差ヒストグラム(エリア1)

らなる精度向上のために飛行高度を下げることやレーザラップ率を上げるなどの方法で点群密度を大きくすることが望まれる。

なお、高度を下げた場合でも、航空レーザ計測では高度に応じて自動的にレーザを遮断するようなフェールセーフを備えているため、身体に対する安全性は担保できている。

## 5. まとめ

地理空間情報アーカイブにおける航空レーザ点群の活用において、G 空間情報センターに蓄積されている既存のデータにも、i-Construction における起工測量の基準を満たすものが存在することを確認した。このことは現場検証においても確認した。また、アーカイブに占める点群データの絶対数が十分でないことから、航空レーザ点群の活用のために、各所で計測された点群データがアーカイブに集積されていくための仕組みを検討する必要があることがわかった。

現場検証においては、標高較差について、傾斜角が一律に30度程度までの地形では基準値を満たすことが確認できた。一方で傾斜が大きくなるほど標高較差が大きくなり、一部に約80度のような非常に急傾斜な部分を有する地形では基準値外の結果となったことから、傾斜の大きい地形でも航空レーザ計測での精度を確保する方法を検討する必要があることがわかった。

今後検証で未実施の事項として水平精度の検証が挙げられる。今回使用した航空レーザは高度1,000mにおいて水平精度13cm<sup>φ</sup>の機器性能となっているが、今回の計測では点群から判読可能な地物が少なく、水平精度を満足に検証できなかった。今後、水平精度の検証を進め、これらの結果をもとに起工測量への点群アーカイブの有効活用へと繋げていきたい。

### 参考文献

- 1) G空間情報センターHP : < <https://www.geospatial.jp/> > (2020.3.20入手)
- 2) 国土交通省データプラットフォームHP<[https://www.mlit.go.jp/tec/tec\\_tk\\_000066.html](https://www.mlit.go.jp/tec/tec_tk_000066.html)>
- 3) 国土地理院HP : < [https://www.gsi.go.jp/kankyochiri/Laser\\_senmon.html](https://www.gsi.go.jp/kankyochiri/Laser_senmon.html) >
- 4) 国土交通省：無人航空機搭載型レーザースキャナーを用いた出来形管理要領（土工編）（案）H30.3
- 5) ライカジオシステム社HP : < <https://leica-geosystems.com/> > (2020.3.20入手)
- 6) YellowScan社HP : < <https://www.yellowscan-lidar.com/ja/> > (2020.3.20入手)
- 7) 澤城光二郎・中野一也他：航空レーザ点群の造成工事における起工測量への適用性検証，土木学会第75回年次学術講演会VI-1117，2020

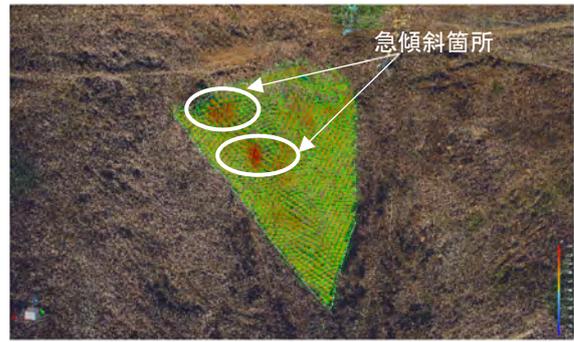


図-10 標高較差ヒートマップ(エリア7)

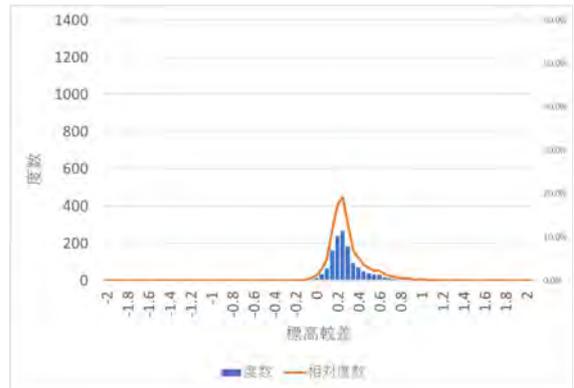


図-11 標高較差ヒストグラム(エリア7)

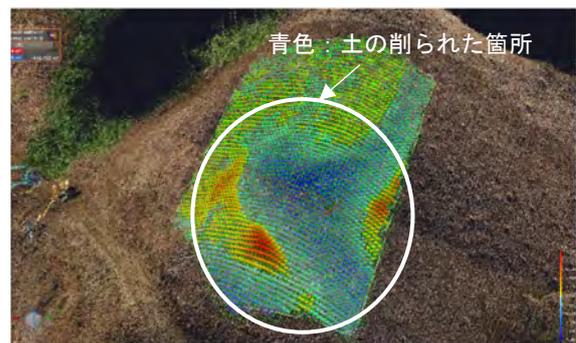


図-12 標高較差ヒートマップ(エリア9)

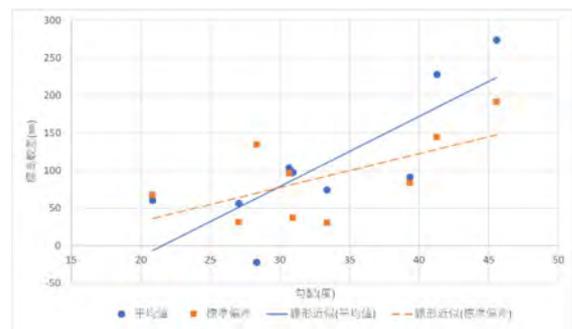


図-13 勾配と標高較差の関係

表-4 航空レーザ点群の点群密度

点群数 (点/0.25㎡)	航空レーザ	
	UAVレーザ	航空レーザ
エリア1	102	7
エリア2	125	9
エリア3	105	14
エリア4	111	8
エリア5	120	8
エリア6	159	5
エリア7	158	6
エリア8	149	5
エリア9	117	7
平均	127	8
i-Construction基準	1点以上	

## II 梗概集



## ● ポスターセッション要旨

### 1. 地上写真測量（動画撮影型）土工の出来高算出要領（案）に対応

- 「Solution Linkage Survey」による現場計測-

日立建機株式会社 ○ 田中 一博

はじめに

日立建機は、土木施工現場の生産性を向上するため、スマートフォンの専用アプリケーションで計測対象を動画撮影するだけで、土木工事の作業により発生する土量や、計測対象の3次元データを簡便かつ定量的に把握することができるサービス「Solution Linkage® Survey」（以下、SL-Survey）を提供してきた。

令和2年度からこのサービスを拡充し、国土交通省の「地上写真測量（動画撮影型）」を用いた土工の出来高算出要領（案）に基づいて、施工現場の出来高算出に対応できるようにした。

工事が進捗した箇所を撮影して作成した3次元点群データと、工事を行う前の施工現場の形状を示す現況データを点群処理ソフトなどで比較することで、工事の進捗を示す出来高数量を算出する。同サービスは、TLSやUAV写真測量を用いないで、地上から動画撮影するだけで出来高数量計測が可能のほか、これまでは必要だった数量算出の為に排出土等の整形が不要になるなどの利点がある。



図1 Solution Linkage Survey のAdvanced版

SL-Survey の仕組み

SL-Survey は、動画を撮影するだけで3次元モデル

を作成して、土量を計測できるアンドロイドスマートフォン向けのアプリケーションである。動画撮影中に、2周波のGNSS信号とRTK方式を使って、スマートフォンに取り付けたアンテナの位置を記録し、撮影後に動画から静止画を切り出してそれぞれの静止画に精密な位置情報をメタデータとして付与する。

切り出した静止画は、まとめてクラウドサーバーに送信し、サーバー内の写真測量ソフトウェアで点群やDEM（デジタル・エレベーション・マップ）などの3次元モデルを生成する。生成したモデルは再びスマートフォンに返し、アプリケーション内でDEMから体積を算出する。

体積(+)	:	10,179.96 m <sup>3</sup>
体積(-)	:	-11.57 m <sup>3</sup>
体積(合計)	:	10,168.39 m <sup>3</sup>

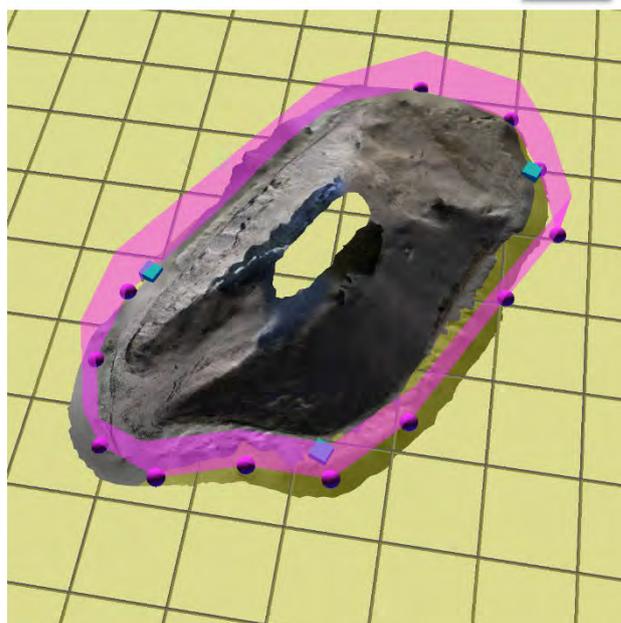


図2 アプリケーションで算出した結果例

### 標定点への対応

SL-Survey は、標定点機能を持っている。あらかじめ3点までの標定点用対空標識を計測対象に取り付け、標識の座標をトータルステーション (TS) やGNSS ローバーで計測しておけば、現場座標に合わせて3次元モデルを生成できる。公共座標系で、標高がジオイドファイルからの算出でよければ、SL-Survey に付属している GNSS アンテナで対空標識の座標を計測、記録して標定点として利用できる。

現場で使用している座標系がローカライゼーションされている場合は、標定点は現場座標系で設置した TS など計測する必要がある。



図3 計測対象に標定点を設置した例

SL-Survey は、クラウドサーバーで3次元モデルを生成した際、スマートフォンにLAS形式の点群データもダウンロードする。LASデータはスマートフォンをPCに接続して取り出すことができる。このデータを点群処理ソフトなどに読み込ませ、TINデータを作成したり出来高算出などに利用することができる。

### 国土交通省の要領への対応

要領案では、地上写真測量（動画撮影型）の座標計測精度は、「水平・標高較差±200mm以内とすること」としている。また対象物の点群を取得する場合は、撮影対象外縁に50mごとに1点以上の標定点を設置し、標定点は現場座標系でローカライゼーションを行ったGNSS ローバーや、工事基準点で後方交会設置したTSなどを利用して座標を計測する（ただし、GNSSなどに

より詳細な自己定位を行える場合は、標定点設置しなくても良いものとする」と記述されている。

また検証については、撮影時には予め検証点を撮影対象外縁に100mごとに1点（最低2点以上）設置し、GNSS ローバー、またはTSで検証点の真値を確認し、それぞれ±200mm以内であればよい、と規定されている。これらの精度検証を行えば、出来形部分の面データと起工面との比較により、数量（土量）を算出し、このときの出来高数量については、算出値の9割を上限に計上してもよいこととなっている。

図4 国土交通省の要領案にある計測精度確認方法



### おわりに

SL-Survey は、UAVによる写真測量や、地上型レーザスキャナーによる計測と比較して、手軽に3次元の点群を作成することができる。一方で地上からの写真撮影を行うため、1回で計測可能な範囲は狭小であり、現場の状況にあった計測手法を上手に選定することが必要となる。作業性については、平均断面法などに比べて作業時間が短縮でき、さらに数量算出の為の排出土等の整形が不要になることなどで作業効率が向上する。

今後の展開としては、現場条件や現場規模に応じた適切なICTが導入できるような環境整備が継続的になされることを期待する。

<参考文献>国土交通省 HP:i-Constructionの推進に向けた基準類の策定

[http://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08\\_hh\\_000405.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08_hh_000405.html)

## 2. 高所作業車における安全対策の提案

(挟まれ防止装置や転倒防止装置等の安全対策の紹介)

株式会社カナモト 吉田 道信

○清水 亮

### 1. はじめに

建築物の高層化や多種多様な施工方法の出現により、高所作業車の活躍する場面が増えました。

活躍する場面が増える一方で毎年、挟まれや転倒などが原因の死傷災害が発生しております。平成30年は約30件、令和元年では約50件発生しており、安全対策が急務となっております。弊社においても、高所作業車のレンタルをしており多くのお客様に使われおります。そんな中で、高所作業車の安全な運用を手助けすべく、挟まれ防止装置や転倒防止装置などの安全補助システムを各種開発いたしました。今回は、その開発した安全補助システムのご紹介をいたします。

### 2. 装置

高所作業車の事故は、「挟まれ・巻き込まれ」「墜落・転落」「転倒」等での死傷災害が全体の8割を締め、また昨今の建築現場の増加により比例して事故件数も増加しています。前述の死傷災害に対応して、各種事故防止システムを作製いたしました。

#### 2. 1 挟まれまセンサー

高所作業車にてバケットを上げて作業する際に発生する「挟まれ・巻き込まれ」やそれに起因する「墜落・転落」事故を、未然に防ぐ安全補助システムです。バケットにアルミシャフトを立ててその先に接触スイッチを設置。接触スイッチが構造物に接触するとバケットが自動的に停止します。写真-1のようにバケットの四つ角にセンサーを立てて運用することにより、センサー下の乗員を保護します。緊急停止せずアラート通知のみにすることも可能です。



写真-1 (挟まれまセンサー)

#### 2. 2 挟まれまセンサーLiDAR

この安全補助システムは、挟まれまセンサーが4つ角にセンサーを立てて、その場所の構造物に対してピンポイントで検知するシステムに対して、測域センサーであるLiDARを使い、バケットの上空を面的に検知するシステムです。場合によっては凹凸の激しい現場もあり、従来の挟まれまセンサーではカバーし難い事もあり、面的に検知できないか検討し開発いたしました。そして2D-LiDARを使用した、エリアの凹凸物の検知する挟まれ防止システムの構築をしました。LiDARでセンサー本体からバケット上空の一面を監視します。センサーの感知範囲は変更可能で、機種によって細かい感知範囲が設定できます。またセンサー本体の真上が死角となりますが、ここに赤外線センサーを設置。LiDARの死角をカバーし、バケット上空全面を監視します。(図-1) 設置もLiDARと赤外線センサーを取り付けるセンサーポール1本で済み、取付機種を選びません。(写真-2)

挟まれまセンサー及び挟まれまセンサーLiDARは、障害物を検知するとアラート通知とともに機械の緊急停止をさせることも可能です。



図-1 (挟まれセンサーLiDAR)



写真-2 (設置状況)

### 2. 3 バックダンサ

今までご紹介した装置は、「挟まれ・巻き込まれ」やそれに起因する「墜落・転落」事故を未然に防ぐシステムでした。バックダンサは「挟まれ・巻き込まれ」事故と同様に多発する「滑落・転倒」事故を未然に防ぐシステムです。高所作業車の後進等の移動時に、不安定な視野から段差や傾斜に気づかず滑落・転倒してしまう事故が絶えません。高所作業車後方に赤外線ステレオカメラによる深度センサーと200万画素のRGBセンサーを併せ持つIntel「REALSENSE Depth Camera」を設置。約30cm内(距離調整可能)に段差や極端な傾斜・床面の形状変化を感知すると、操縦者にアラート通知で事前に危険を知らせます(図-2)。アラート通知だけでなく、緊急停止の機能を付加することも可能です。カメラ及びアラーム解除スイッチはマグネット固定式で機種を選ばず、導入が

可能となっています(写真-3)

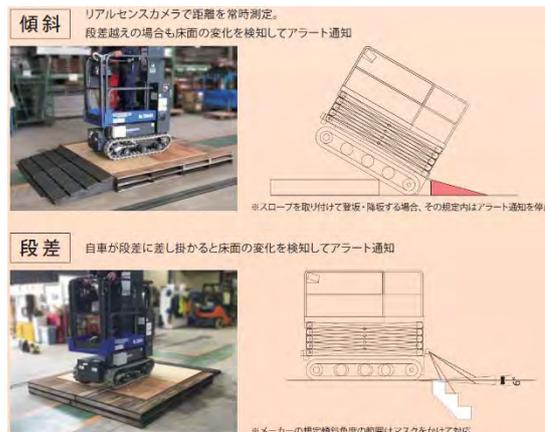


図-2 (バックダンサ)



写真-3 (バックダンサ設置状況)

### 3. 終わりに

今回、ご紹介いたしましたシステム群は併用してのご使用が可能となっております。

またこのシステム群は、あくまでも安全補助システムであり、運用するにあたり周囲に十分注意して高所作業車の操作や作業従事されることをお願いいたします。

最後に弊社は、今後の建設現場の技術の向上と普及に期待し、最新のICT技術を用いた最良の機材の提供し、現場作業の安全を切に願うとともに、現場環境の向上や更なる安全の向上に貢献していきたいと考えております。

以上

### 3. 舗装工事におけるプッシュオフ式トレーラ導入による有効性の検証

材料運搬の側面から人手不足解消と舗装の品質向上を求めて

株式会社 NIPPO 合材部 ○土肥真也

株式会社 NIPPO 総合技術部 梶原覚

トップアローズ株式会社 矢崎翔太

#### 1. はじめに

建設業界では担い手不足、労働人口の減少が問題となっているが、道路運送業界における運転手不足も同様に深刻であり、数年後には必要な運転手数に対して25%の不足が生じるという試算もある。

アスファルト舗装の現場においても運送車両の手配が課題の一つとなっており、運送の効率化や生産性向上が求められている。アスファルト混合物運搬の主流となっている大型ダンプの積載量は、近年の環境対策装置の義務化等により9t程度であり、生産性の向上には車両の大型化も手段の一つとなるが、ダンプアップ時の高さが問題となる場合が発生する。

このような問題を解消する可能性をもつ、ドイツ製プッシュオフ式トレーラを舗装現場のアスファルト混合物運搬に採用し、本機の持つ特徴が生産性および品質に与える効果を検証した。



写真1. プッシュオフ式トレーライメージ

#### 2. プッシュオフ式トレーラの特徴

最大積載量：28 t

荷下ろし機構：リモコン制御押し出し方式  
(ダンプアップ不要)

保温性能：2.15 m<sup>2</sup>・K/W (荷台の平均熱抵抗値)

その他の機能：リフトアクスル機構

#### 3. 舗装工事における運送の生産性

採用した舗装現場は高速道路で、トンネル内の施工を含むものであった。トンネル内の舗装においては高さの制限を受けるため、通常は8tダンプ以下でなければ、荷下ろし困難な場合が多い。荷下ろし時にダンプアップを伴わないプッシュオフ式トレーラにはうってつけの現場となった。他の施工箇所においても、舗装幅員等の現場条件に関して、本機導入に対する問題は見られないことから当該現場を選定した。

本機による一般道の走行にあたっては特殊車両通行許可が必要となるが、3週間程度の申請期間を要し、『重量についての条件 区分C』の徐行、連行禁止および当該車両の前後に誘導車を配置することを条件として許可を取得した。



写真2. 荷下ろし状況

許可条件を踏まえ本機の積載量は24t/台とし、前後に8tダンプ(積載量8t)を配車して誘導車とした。これにより前後の誘導車を含めた運転手一人当たりの生産性は、約13.3t/人となり、8tダンプに対して約67%、大型ダンプと比較しても約48%の生産性向上となった。

また多量積載の効果として、混合物1t当たり燃費、同1t当たり高速道路通行料金等、環境およびコスト

の面においてもダンプトラックに比べて優位性が確認された。

#### 4. 舗装品質に与える効果

プッシュオフ式トレーラが開発されたドイツにおいては、アスファルト混合物の運搬車両の技術基準として荷台の保温性能に『外気20℃における1.65 m<sup>2</sup>・K/W以上の熱抵抗を要する』と定められており、本機はこの基準を満足する保温性能を持っている。多量積載による周囲との接触面積低減の効果と相まって混合物の温度低下は抑制され、舗設に対する好影響が得られるものと予測した。

その検証として、リアルタイムに舗装敷き均し表面温度が測定できるPAVE-IRを用い、アスファルトフィニッシャー敷き均し時の舗装面の温度分布についてサーモグラフィによる可視化を行った。

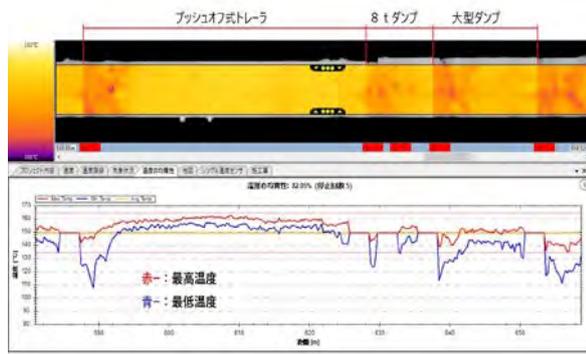


図1. 舗装面のサーモグラムと温度分布

図1は横軸を時間軸として、図上部はサーモグラム、図下部は各点における横断方向の最大（赤線）と最小（青線）の温度を表したものである。サーモグラムは明色となるに従って高温であることを示している。

アスファルトフィニッシャーへの運搬車両が入替る箇所で温度が低くなっていることがわかるが、本機が供給した部分は、他の車両に比べ明色区間が長く、かつ均一な温度分布であることを確認できる。

供給するアスファルト混合物温度の均質性は、舗装品質に大きな影響を与えることから、本機を用いることによって温度の均質性を確保することは、品質を担保するうえで有効と考えられる。

図2は同区間におけるサーモグラムと、各点におけるアスファルトフィニッシャーの速度を示したものであ

るが、本機による供給を行った区間は当然ながら他の車両より入替が少なく、アスファルトフィニッシャーの速度に関しても安定した速度が確保できることが確認できる。

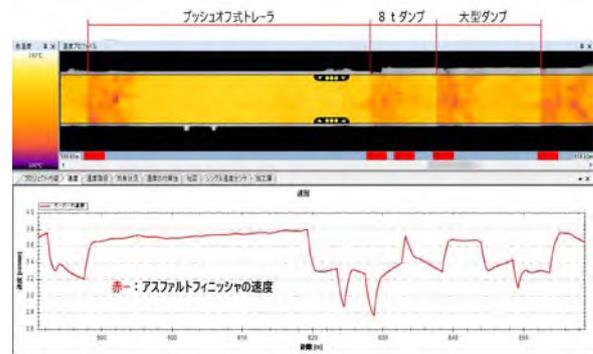


図2. 舗装面のサーモグラムと速度分布

アスファルトフィニッシャーの速度の均一性が平坦性に影響を及ぼすことは既知の事実であり、平坦性向上の面においても有効であると考えられる。

#### 5. おわりに

今回導入したプッシュオフ式トレーラは、国内では特殊車両という位置付けであることから、従来車両に比べ「牽引免許を要する」「通行許可申請手続きが必要」「運送経路により積載量減量・誘導車配置を要する」といった制限を受けることとなる。

しかし国交省においては通行許可申請手続き緩和する取り組みを発表する等、道路輸送の効率化の取り組みを進めている。これらに鑑みて土木業界においても、今後進行すると予測される運転手不足に備え、車両の大型化等の生産性の高い輸送方法の検討は必要不可欠であると考えられる。

一方、道路舗装においては、ICT技術を活用したトレーサビリティの確保等、施工プロセスにおいて、さらに高度な品質管理が求められつつある。

アスファルト舗装へのプッシュオフ式トレーラの導入は、大型工事など諸条件を許容できる舗装現場において、これらの課題を改善する一助となるものと思料する。

## 4. 現場第一主義が生み出す「生きた技術」

『TITRC 土木 ICT ソリューションシステム』クラウドによる土木事業全体の一括集中管理

タイトレック株式会社 ○山口孝人

タイトレック株式会社 野中浩平

タイトレック株式会社 村上四季

### 1. はじめに

弊社は i-Construction 施行の数年前より技術革新に積極的に取り組み、ICT 施工の実績を重ね、その経験から培った「現場第一主義」のスタンスを基に

- ・ドローンを使った飛行測量（レーザー、写真）
- ・現場に即応する 3D 設計（施工実績を裏付けとした）
- ・現場安全管理の新たな取り組み（IoT、IT 化）
- ・現場稼働状況の収集～整理への一括管理（IoT、IT 化）
- ・現場従事者の健康管理

など、現場が最も必要としているであろう問題の解決に取り組んでいる。

更に、①施工計画、②施工要領、③施工管理、④安全管理、⑤原価管理 など生きた技術を『TITRC 土木 ICT ソリューションシステム』として構築した。

### 2. 道路プランくん3D（仮設道路設計システム）

『道路プランくん3D』は、複雑なパソコン操作やモデリング知識を必要とせず、手書き感覚で3次元の仮設道路設計が行える、弊社開発のアプリケーションである。設計図書にはないが、施工において最も大切な「段取り」と呼ばれる、準備工でのパイロット道路計画や仮設道路を設計する過程に、「豊富な現場知識を持つベテラン技能者の意図が、設計に織り込まれていなければ意味がない」という発想から開発された。

イメージした道路線形をタッチパネルになぞるだけで、3次元化された道路が設計されると同時に、切盛土量ならびに法面積が算出される。この設計は、何度でも線形ルートや条件を変えてタッチ&トライが出来、複数本の道路検討がその場で可能になる。

『道路プランくん3D』で、可視化による打合せを行う事により、施工範囲全体から細部に渡り、従来では確認が難しかった箇所について思案出来る為、元請け

から施工オペレータに至るまで、関係各所の考えを織り込んだ、効率的で安全な施工が実現できている。



写真1：道路プランくん3D

写真2：道路プランくん3Dによる検討

### 3. AR（拡張現実）×オンライン画面共有システム

現在、ヘッドオフィスとサテライトオフィスとの遠隔環境において、オンライン会議を使用する機会も増え、更に今後の導入も盛んになると考えられる。

この『AR（拡張現実）×オンライン画面共有システム』は、近年のオンライン会議システムをグレードアップした物である。

高精度位置情報（GNSS）とAR技術（拡張現実）を組み合わせたスマートフォン画面上で、3次元設計データを、実際の現地座標上に重ねる事ができる。

現場の工事進捗状況や、施工手順などを視覚的に確認することができ、GNSS機能により、岩検の箇所や法面位置等の確認、現場からの提供情報についても正しく位置情報を取得する事ができる。

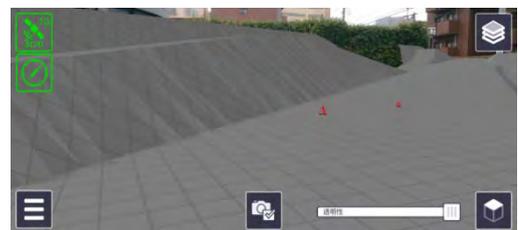


写真3：3次元モデリングデータとの合成（スマートフォン画面）

現在、現場では、現場責任者または安全担当者による現場パトロールが日々行われており、店社安全担当者によるパトロールも毎月行われている。

この情報をオンライン画面共有システムにのせる事

で、施工現場と現場事務所、さらには支社・本社などの遠隔地であっても、現場の問題点、改善点の協議が行える。更に、今後、現場施工における立会、検査をこのシステムにて行うことで、施主から全ての階層の生産性向上に繋がる。さらに、書面や写真ではなく、正確な位置情報を持った情報として残すことが出来るのもこのシステムの大きなメリットであり、現地と遠隔地との通信映像打合せが可能となる。

#### 4. ICT・IoT化から生まれた働き方の変化（日報管理システム）

『日報管理システム』は、現場で働く作業員、現場管理者等の業務時間軽減の発想から構築された。

建機オペレータ、及び一般土工作业員は1日の作業終了後、日報情報を専用アプリケーションにて、スマートフォン及びPC端末から入力する。

現在のコロナ禍で終業時、多くの作業員やオペレータが一同に集まらず、各担当レベルでの終礼も見受けられる現状の中、この日報管理システムであれば、個人のタイミングで日報の入力が可能である。

入力されたデータはサーバーに蓄積され、あらかじめシステムに組み込まれている自動集計シートの手書にあわせて集計され、管理者の欲しい情報はいつでも抽出でき、思い通りの集計・分析ができる。

更に、労務時間の集計は勿論の事、建機についても稼働に伴う修理履歴や燃費計算等、諸々の情報が集計される為、単なる勤務日報ではなく、ひと現場毎の総業務量、工種数等の可視化を行い、現場運営に必要な情報を得る事ができる。



写真4：スマートフォン入力画面

写真5：自動集計シート

#### 5. みまもりウォッチ（作業員みまもりシステム）

『みまもりウォッチ』（作業員みまもりシステム）は、屋外の現場では避けようがない、急な転倒、体調不良、

夏場の熱中症など現場にて起こりうる作業員の異常を、みまもり、管理する考えから生まれた。現場の作業員が腕時計型のウェアラブルトラッカーを装着することで、皮膚温度・心拍のバイタル情報と併せてGPS位置情報の取得を行う。データはクラウドに集約され、管理者はリアルタイムに作業員のバイタル情報を確認することができる。さらに、心拍の急激な低下や転倒など作業員に異常が起きた際は、管理者へアラート通知が届き、又、作業員自らSOSボタンで危険状態を管理者へ緊急発信することで、異常の早期発見及び、駆け付けが可能となる。作業員の体調管理＝季節的な熱中症対策を重点に考えがちであるが、本来、日常的な工期全体を見据えた体調管理、また、今後このコロナ禍においては、クラスタを出さないという強い意志が管理側に必要と考える。



写真6：みまもりウォッチイメージ

#### 6. おわりに

現在、労働人口の減少は、国全体でも無視できない問題とされている。勿論、土木、建設業界においても就業労働者の減少、技術の担い手不足は大きな課題である。更に、現在のコロナ禍の中で、在宅勤務や現場の3密を避ける取組みなど様々な制約が生じる中、新しい生活様式内での、ものづくりを考える時代になった。この現状に対応するため、弊社は、土木事業全般に関する問題を、『TITRC 土木 ICT ソリューションシステム』として、これまでの経験に裏付けされた自社技術とノウハウで、問題解決と管理に取り組んでいる。

今後も IT、AI、通信と各方面での技術変革は多様に進んでいくと思われるが、これからも弊社は机上のシステムではなく、これまでの経験に裏付けされた「現場第一主義」から生み出す『生きた技術』の構築を進めていきたいと考えている。

## 5. 排水ポンプ車のポンプ設置作業の安全性向上

国土交通省中部地方整備局 中部技術事務所 防災・技術課長 大坪 晋作  
国土交通省中部地方整備局 中部技術事務所 防災・技術課専門職 ○鶴田 勇

### 1. はじめに

排水ポンプ車に搭載されている排水ポンプは、昔は本体質量が550kgもあり、クレーンを使わなければ設置できない大型のものであったが、その後の小型軽量化により質量が30kg程度となり、人力のみによる運搬・設置が可能となった。設置作業にクレーン等の重機が不要となり、使用箇所が増えて利便性が向上し、昨今の災害時において広く活躍している。

一方、人力での設置作業は、軽量化したとはいえ、荒天時での濡れて滑りやすい堤防法面などの悪条件下では、転倒などによる作業員の怪我等も懸念され、排水ポンプ車の設置手順の中で、最も危険で苦渋な作業は排水ポンプの投入作業である。(写真-1) また、排水ポンプ設置の際に、漏れないように排水ポンプと排水ホースの口を正確に合わせて接続することも手間のかかる作業となっている。

このような状況から、排水ポンプ設置作業の安全性を向上させることを目的に、排水ポンプの投入方法及び排水ホース接続金具について検討を行った。



写真-1 排水ポンプ設置状況

### 2. 排水ポンプ投入方法の検討

現状の人力による排水ポンプの投入には、次のような問題がある。

- ①複数の作業員による対応が必要
- ②降雨時での作業も多く堤防法面は濡れていて

滑りやすい

③投入する湛水池は濁っていて視界が不良

上記の問題点を踏まえて、堤防での排水ポンプの運搬や湛水池への投入作業を安全に行う方法として投入台車の検討を行った。投入台車の検討に当たり、扱いやすさ・車両への積載・コスト削減を目的に既製品の利用などを考慮した。排水ポンプを安全に運搬する投入台車として、1台で複数のポンプに対応する「折りたたみリヤカー案」と個別のポンプに補助輪を装着する「補助輪取付案」の2案について検討した。上記の2案について、傾斜角度を変えるなど、異なる条件の法面での運搬作業（上げ下ろし）及び湛水池への投入・回収作業を行い、動作確認を実施した。

確認項目は、次のとおりである。

- ・刈草状態の傾斜地（24度、34度）での運搬
- ・雑草状態の傾斜地（25度）での運搬
- ・湛水池（6度）への投入・回収
- ・訓練用水槽（26度）への投入・回収

#### (1) 折りたたみリヤカー案

排水ポンプを運搬可能な既製品を比較検討した結果、折りたたみリヤカー（アルミ製）をベースとして検討を行った。排水ポンプを乗せたまま水中に投入できるように、ポンプの固定台座の配置、排水ホースとの干渉を考慮した取手フレーム位置の変更を実施した。図-1に折りたたみリヤカー案の概要を示す。

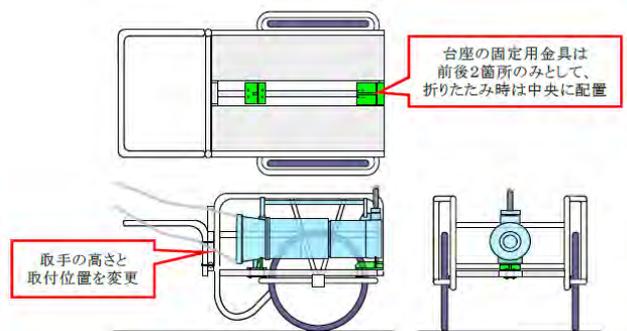


図-1 折りたたみリヤカー案

傾斜地での運搬は、リヤカーの大径タイヤは転がりやすく、勾配が小さい場合でも作業員2名で対応する必要がある、さらに勾配が大きい場合には2名で上げることは困難であった。雑草の有無についての影響は認められなかった。

排水ポンプ投入は、リヤカーごと沈めて、ポンプが浮いた状態でリヤカーを回収するため、排水ポンプが浮く水深まで作業員が水中に入り、リヤカーを水没させる必要がある。

### (2) 補助輪取付案

排水ポンプに直接簡素な車輪を装着して、台車の機能を持たせることで、安全に運搬、投入できるようにしたものである。補助輪の個数、大きさなどを検討して2〜4輪仕様の台車とした。図-2に補助輪取付案の概要を示す。

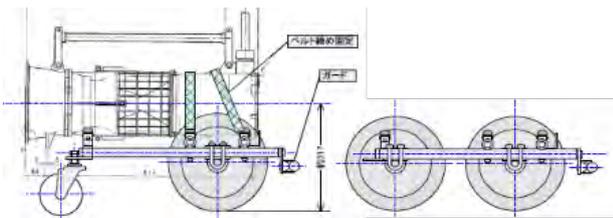


図-2 補助輪取付案 (2〜4輪)

傾斜地での運搬は、2輪では常時片側を保持しながらとなり、3輪では1輪側でひっかかり転倒するなど問題があったため、4輪への改良を行ったことでそれらの問題を解決でき、スムーズな運搬が可能であった。

排水ポンプの投入は、4輪タイプで動作確認を行った。投入・回収ともに作業員2名でも問題なく作業は可能であった。また、補助輪を取り付けた状態で排水運転を実施したが、排水への影響は認められなかった。

### 3. 排水ホース接続金具の検討

排水ポンプと排水ホースを接続する作業は、排水ポンプ車に広く普及しているフェールールとクランプバンド(図-3)で固定しているが、フェールールが少しずれるだけで固定できなくなる。現状では2〜3人で作業を行わなければならず、また、作業にコツが必要であり、その他の時間もかかるため、接続金具の改良について検討を

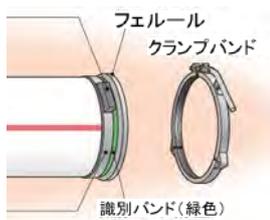


図-3 接続金具

実施した。

フェールールとクランプバンドは排水ポンプ車に広く普及しているため、現状の改善を前提とした比較検討を行い、「排水ホース接続用補助材案」(写真-2)について、試作を行い、排水ホースとの接続作業の確認を実施した。



写真-2 排水ホース接続用補助材外観・取付状況  
排水ホース接続用補助材により、フェールールのずれが押さえられて接続状態が保持されるため、一人でもクランプバンドの接続が可能となった。

### 4. まとめ

本検討では、排水ポンプ車設置現場における安全上の問題解決、作業員の負担軽減のため、排水ポンプの投入方法、排水ポンプと排水ホースの接続金具について、試作も含めて排水ポンプ設置作業への実用性、有効性などを検討した。その中で排水ポンプに補助輪(4輪)を取り付けた投入方法や接続用補助材を使った排水ポンプと排水ホースの接続方法は、実用可能であると確認された。

今回の投入方法は、排水ポンプに補助輪を取付け、法面を転がすことで作業員の負担を軽減し、安全性の向上を図っているが、実際の災害現場では条件が各々異なり、使用できない場面が多く存在する。そのため、実排水作業における検証が必要であり、今後、排水ポンプ車へ試験的に導入した上で操作訓練や災害時に使用して、排水ポンプ設置作業時及び排水時の問題点についての検証を行う予定である。

また、近年の新技术を応用した、あらゆる状況においても使用可能となる排水ポンプの投入方法・装置についての検討も予定している。

## 6. 作業効率化と安全性能の向上を両立した次世代の高所作業車

### 次世代高所作業車 建トウン

株式会社レンタルのニッケン

研 次郎

○湯島 一郎

#### 日本国内の高所作業車事情

建設現場における高所作業は作業車の活用が主流となっている。

特に屋内作業においては多くの作業をテーブル型高所作業車にて行っている。基本的には、各メーカーのテーブル型高所作業車は、ある一定の高さまでは上昇したまま走行可能であり、機種により荷台を最高高さ状態でも走る機種も存在する。しかし、現状では建設会社各社は荷台を上げたままでの走行は禁止されており、メーカー側は日本国内限定の仕様として（オプションという位置付）走行規制を追加して出荷されている。

#### 建トウンとは

本開発商品「建トウン」（写真1）は、耐火被覆工事、設備工事等の天井内作業の生産性向上にスポットを当て「安全に荷台を上げたまま走行可能」を基本コンセプトとして様々な安全装置、規制追加装置を開発した。具体的には、±25mmの段差を検知するセンサー、本体前後にある障害物を検知するセンサー（写真2）、作業員の挟まれ防止策として上部の障害物を検知するセンサー（写真4）の3箇所のセンサーを設置することで、上昇させた状態での安全策を講じた。

写真1



主要諸元	
全長	1790mm
全幅	750mm
全高	1840mm
軸距	1000mm
輪距	670mm
車両質量	800kg

検知機能	
前後段差検知機能	
前後障害物検知機能	
上部障害物検知機能	
動作停止警報鳴動	

#### ユーザビリティの追求

更に、付加機能として、作業員に分かりやすい操作を実現するため、機能表示板を新規設置し、操作可能な状態をLEDにて一覧表示していること（写真5）や、荷台四隅に上部レーザー光を投射（写真3）し、荷台上昇位置の位置決めを利用する機能も有している。今後、「建トウン」は様々な高所作業において活用が期待されているため、機械台数の増産及び改良改善を引き続き行っていく。

項目	作業床最下部(センサーセット有)	作業床上昇中(センサーセット有)
建トウンの状態(外観)		
走行速度	0 ~ 3.0km/h	0 ~ 0.5km/h(通常時1/6の速度)
操舵角度	左右0~70度	左右0度規制(旋回不可)
登坂角度	8度(5度)	1.7度規制

写真2: 段差、障害物検知センサー



写真3: 上部レーザー光投射器



写真4: 上部障害物検知センサー



写真5: 案内表示板





## 7. ウェアラブルデバイスを用いた遠隔現場巡回システム

清水建設株式会社 ○佐藤 有  
清水建設株式会社 鈴木 正憲  
清水建設株式会社 奥田 悠太

### 1. 背景

近年建設業界では働き方改革の実現、労働時間の見直しが求められている。働き方改革の実現に向けて、移動時間などの無駄の削減による勤務時間の効率化が喫緊の課題である。

また、ニューノーマル時代におけるコロナ対策においては、遠方現場への出張に対して感染拡大防止のための公共交通機関による移動制限がある。

さらに、配置職員の減少により若手職員の教育に十分な時間が取れないといった課題がある。

### 2. 目的

従来の本社から現場への巡回、職員による現場管理、若手職員への教育を、遠隔での巡回・管理・教育に置き換えることで、安全・品質不具合の根絶、働き方改革、若手職員への教育の拡充、コロナ感染拡大防止を目標とする。

### 3. 方法

TV 会議機能を搭載したウェアラブルデバイスを用いた遠隔現場巡回を実施する。遠隔での現場巡回を実施する事で、移動時間が不要となり、業務調整は最低限の TV 会議実施時間のみとなり、生産性向上に貢献できる。また、感染拡大防止においても、公共交通機関を使用した移動が減少し、リスクを低減できる。

TV 会議機能を使用すれば、本社のベテラン職員により複数の若手職員を教育する事が可能であり、人員不足で1名で現場管理を行っている若手職員の支援も同時に実施可能である。

### 3.1 課題：建設現場での TV 会議実施は困難

- ① 通信環境が整備されていない  
携帯電話を使用できない環境が多い。
- ② 巡回中はタブレット等の操作が必要となる  
手が塞がっていると躓き転倒の危険がある。
- ③ 歩行により画像の揺れが発生する  
TV 会議をしながら移動すると画面が大きく揺れ、長時間画面を見続ける事ができない。
- ④ 巡回者と図面や仕様書を共有できない  
図面と現場を比較しての、巡回者への指示が難しい。

### 3.2 対策：ウェアラブルデバイスと Wi-Fi を使用

- ① Wi-Fi 環境の整備  
工事現場への Wi-Fi 環境を整備し、(図 1) 現場内のどこでも TV 会議を実施可能にする。
- ② ウェアラブルデバイスを使用  
音声操作のみ (ハンズフリー) で操作・映像の送受信が可能なウェアラブルデバイス (図 2) を使用する事で、足元の悪い環境でも安全に TV 会議の実施が可能となる。
- ③ ブレ (画面揺れ) 補正  
長時間の現場巡回を実施する場合には、ブレ補正機能搭載型ウェアラブルカメラ (図 3) を使用し、画面の揺れを防止する。
- ④ 小型ディスプレイ内蔵  
内蔵された小型のディスプレイ (図 2) を用いて、巡回者は本社で TV 会議に参加しているベテラン職員と同じ図面や仕様書を共有しつつ指示を受けることが可能となる。

表1 ウェアラブルデバイスの比較表

	A社製 ウェアラブルデバイス	[Realwear] HMT-1	日社製 ウェアラブルデバイス	[Xacti] CX-WE100	C社製 ウェアラブルデバイス
稼働時間	2時間	3.5時間	2時間	デバイスから給電	約4時間50分
重量	68g	380g	119g	135g	114g
防塵防水IP	IP67	IP66	記載なし	IP65	記載なし ※別売り防水ケース有り
動作OS	AndroidOS	AndroidOS	AndroidOS	カメラ機能のみ	カメラ機能のみ
容量	64GB	16GB	16GB	HD無し	HD無し
画質	640×360	854×480	1280×720	1280×721	3840×2160
フレームレート	60fps	30fps	記載なし	30fps	30fps
通信方法	Wi-Fi, Bluetooth	Wi-Fi, Bluetooth	Wi-Fi, Bluetooth	サーフェイスとの有線接続 ※今後OS、androidとの 無線接続予定	Wi-Fi
金額	199,000円(税抜)	265,000円(税抜)	86,500円(税抜)	198,000円(税抜)	43,400円(税抜)
装備オプション	ヘルメットマウントクリップ (別売り)	ヘルメットマウントクリップ (別売り)	-	ヘルメットマウントクリップ (別売り)	-
その他特記事項	本体側面の タッチパッドで操作	音声操作 完全ハンズフリー	-	エクスタビライザを使用した、 高度なブレ補正機能搭載	空間光学ブレ補正機能搭載 暗所での撮影が可能

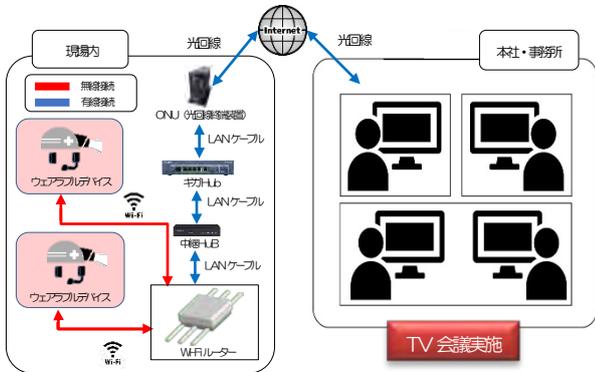


図1 TV会議の通信フロー図



図2 小型ディスプレイ内蔵ウェアラブルデバイス



図3 画面揺れ補正機能搭載ウェアラブルデバイス

#### 4. 運用実績

ウェアラブルデバイスは5種類のデバイスを比較し、現場での使用に耐えうる防塵・防水性を持ち、ハンズフリーで使用できるデバイス、高度なブレ補正機能を有するデバイスの2種類を選択し導入した(表1)。

(1) 現場展開数：12 現場

期間：2020年4月1日～9月30日

(2) 遠隔巡回実施数：16回

期間：2020年4月1日～9月30日

#### 5. 効果

##### 【出張人数の減少】

通常平均して3名の技術者が参加する現場巡回が1名での実施が可能となり、半年の試行期間で出張人数が合計32人減少した。

##### 【現場巡回数の維持】

半年の試行期間で16回の遠隔現場巡回を実施し、感染拡大を防止しつつ、現場巡回の頻度を維持した。

#### 6. 今後の展望：ウェアラブルデバイスへの機能追加

##### ① 巡回記録自動作成アプリケーションの開発

音声による操作のみで写真撮影と指摘事項やコメントの入力を行い、自動で巡回記録を作成する。従来の手入力を不要とし、生産性の向上を目指す。

##### ② 多言語翻訳機能の追加

翻訳アプリを搭載し、母国語の異なるエンジニア同士のコミュニケーション円滑化に活用する。

## 8. 現場の清掃作業をロボットと協働 -自動清掃車「e-madillo」-

### 自動運転で省力化+環境改善

西尾レントオール株式会社 ○佐藤 芳和

西尾レントオール株式会社 山口 秀樹

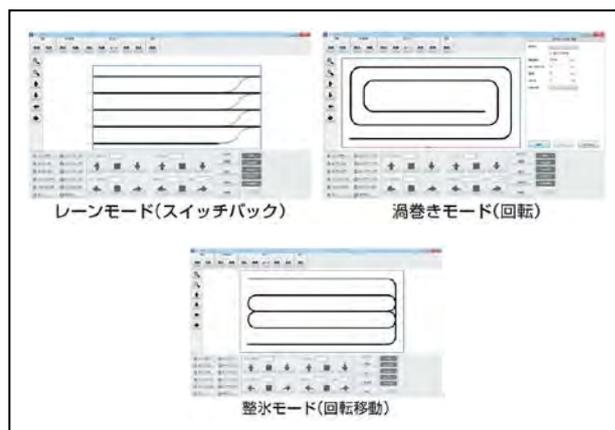
現場の美化を定期的かつ省力化で

工事現場やプラント構内における清掃・美化活動は本体施工や、メインの生産業務に追われ、やむなく後回しになったり、作業の合間を狙い追加業務として実施するようになるケースも少なくないと考えます。増して担い手不足により職員や協力会社の適正配置や働き方改革による時短の推進を実施しないといけない管理者にとっては、改めて作業指示をする事自体が精神的な負担につながるケースもある。反面、清掃・美化活動は、場内の安全を確保するためにも重要なスキームであり、優先順位が高い事も周知の事実である。本技術は自動運転による清掃車を活用する事で、省力化とともに、定型の作業を機械に任せられ、現場の清掃美化により、安全の確保や近隣環境への配慮も遂行できるものである。(図④)

設定するようになっている。座標の取得には、清掃車自体に搭載している GNSS から取得したり、実際に現地で測量した座標を利用したり、正確な CAD 上の座標を取得して入力する事も可能である。指定したエリアをどのように走行するかは大きく分けて3つのモードを用意している。(図⑤) ①レーンモード:対象エリアを任意の一辺から平行に前後進移動しながら清掃を実施する。ラップ率の設定も可能な為、確実に対象を清掃したい時に有用な走行モードとなる。②渦巻きモード:対象エリアを、前進のみで渦巻き状に移動しながら清掃を実施する。本清掃車は前進時にのみ清掃機能を発揮するため、効率的に清掃作業を進めたいときに使用するモードとなる。③整氷モード:スケートリンクの整氷車と同様な動きをする。レーン走行と同じく確実に清掃したい場合に使用するが、対象範囲が比較的広い場合にはこちらのモードのほうが適している。



図④ e-madillo 全景



図⑤ 走行モード

清掃作業範囲も簡単に指示

清掃作業範囲については、対象エリアを囲むポイントを座標で指示してやることで、走行ルートを自動に

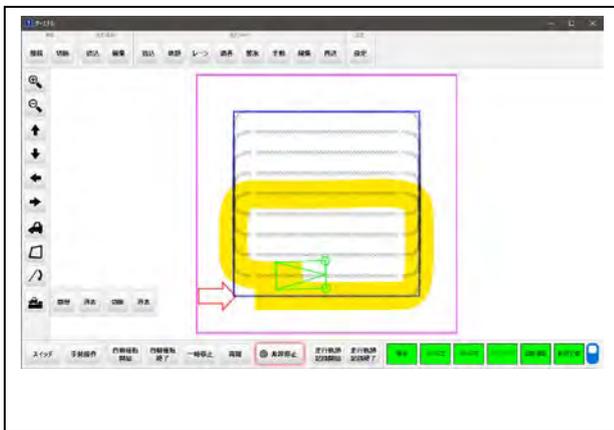
複雑なルートへの対応

実際に清掃するにあたり、座標の指定だけでは対象

が複雑な形で効率的な清掃が行えない場合がある。その際に利用するのがティーチングモードである。実際に清掃するエリアを1回目はマニュアル操作でルートを記憶させ、次回からはそれに則り自動清掃するモードである。プラント構内等、定期的な同じ場所を清掃する業務の場合、効率的な最適なルートを再現する際に適しており、後進についても対応している。尚、ティーチングモードと前述の3つのモードいずれも設計時に清掃エリア予定や清掃済みエリア結果を色塗り表示させることができる。(図㉔)



図㉔ レーザーセンサー



図㉔ 清掃軌跡図

#### 更なる安全性の向上・機能向上

生産現場でロボットと協働するにあたり重要な事項は安全性の確保である。本技術はシステム上の異常があれば停止する事はもちろん、レーザーセンサー（図㉔）により、人や障害物を感知すると運転を停止する機能も装備している。本センサーについては、現在数多く開発されているSLAM技術やAI技術を利用したセンサーを取り入れられるようなインターフェイスにしているため、最新技術を取り入れたものを選択する事が可能となっている。また、走行機能自体も、同様のSLAM・AIを活用した自動運転から自律運転にシフトしていけるよう実装を計画している。

## 9. 橋梁点検の作業性向上について

### ～ 橋梁点検昇降装置の開発 ～

九州地方整備局 九州技術事務所

施工調査・技術活用課長 福川 雅章

施工調査・技術活用課 ○深町 真吾

#### 1. はじめに

九州地方整備局では、約4,500橋の橋梁を管理しており、道路橋定期点検要領に基づき5年に1回、橋梁点検を実施している。点検では確実に状態を把握して健全性の診断を行う必要があることから、近接目視による点検が基本となっている。このため、河川や水路を横断する橋梁の桁や床版下面の点検を行う場合には、九州技術事務所が保有する橋梁点検車（写真-1）を使用して点検作業を実施している。



写真-1 橋梁点検車 (型式BT400)

点検者は、この車両のバケットに搭乗することで足場等を必要とせず容易に橋梁下部にアプローチすることができる。(写真-2)



写真-2 橋梁点検車での点検状況

しかし、桁間が狭く横構等が配置されている橋梁では、接触の危険があるためバケットが桁間に入れず、桁の高い橋梁では床版の下面付近に十分に近づくことができないといった状況が生じていた。(図-1)

そこで今回、九州技術事務所では点検の作業性向上のための支援として、バケット内に装着できる軽量の昇降装置を開発し、点検者がバケットの床面から更に上部方向へ移動ができ部材近くまで到達できるように改善を図ったので紹介する。

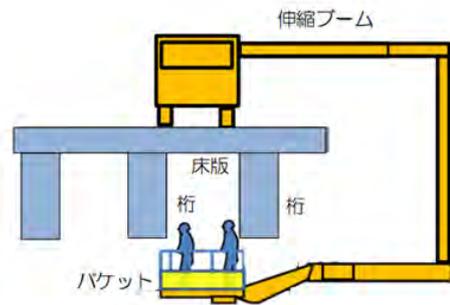


図-1 バケット配置図

#### 2. 昇降装置の特徴

バケットの積載可能荷重は300kgであり、バケットには点検者とバケット操作を行う2名が搭乗する必要があることから、昇降装置はアルミ材を使用した軽量なものとなっており重量は約90kgとなる。昇降機構は、電動ドライブドリル又は手動ハンドルを開閉機に差し込み駆動させるもので、簡易かつ確実に上下操作を行うことができる。(写真-3) 昇降に要する時間は約70secであり、点検者はバケット床面より約1.5m上昇することが可能となっている。(図-2)



写真-3 電動ドライブドリル、開閉機

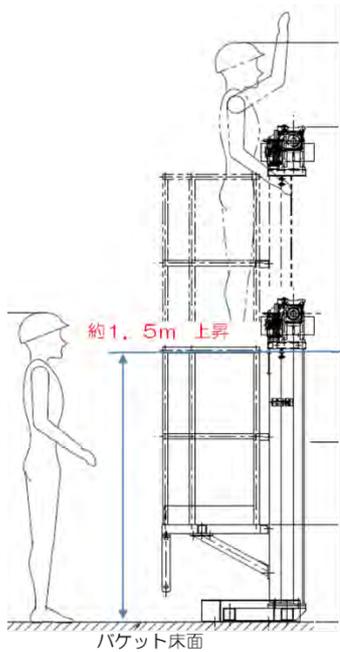


図-2 昇降装置の昇降高

昇降装置とバケットは、ボルト (M16×4 本) 固定となっており、手摺りの高さは1mを確保して高所作業車の構造規格に対応させている。その他、装置使用時の注意点として、接触や挟み込みの危険があることからバケット移動時は昇降装置を収縮させる必要がある。

また、装置の取付にあたっては、クレーン付車両と玉掛の資格保有者が必要となっている。

### 3. 昇降装置諸元

装置の諸元及び外観を以下に示す。(表-1、写真-4)

表-1 昇降装置 諸元

項目		昇降装置 (開発機)	
装置質量	kg	89	
搭載可能荷重 (人員)	kg	211 (2名)	
作業床寸法	長さ	mm	550
	幅	mm	650
床面高さ	最高位	mm	1,525
	最低位	mm	550 (昇降用足場1段設置)
昇降量 (揚程)	mm	975	
昇降操作方法		電動ドラパドール (充電式) 又は手動ハンドル	



写真-4 昇降装置 外観

### 4. 点検状況

実際の橋梁で昇降装置を用いて実施した点検状況を以下に示す。(写真-5、6)

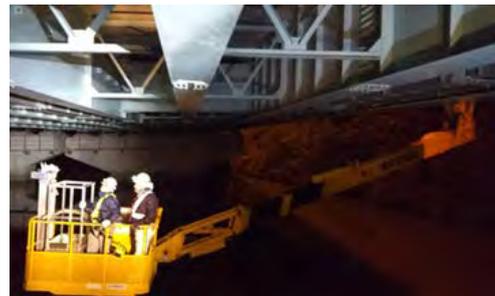


写真-5 バケット移動状況

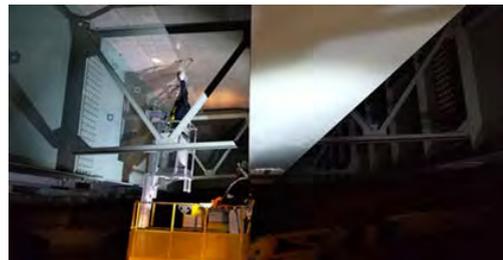


写真-6 床版点検状況

### 5. おわりに

管内の橋梁は全体の3割以上が高度経済成長期に建設されたもので老朽化が進行していることから、定期点検は橋梁の維持管理を行う上で非常に重要なものとなっている。

今後、開発した昇降装置が点検時に有効に活用され、点検者が行う近接目視や打音検査などの作業に貢献することができれば幸いである。

## 10. 小型マイコンを用いた建設現場計測用 IoT 機器の試作

立命館大学 ○横山隆明  
立命館大学 建山和由

### 1. はじめに

建設業を取り巻く諸問題を解決のため建設現場の情報化 (i-construction) が推進されている。しかしそのためには高価な機器を用いる必要があり、中小建設業者の建設現場に関連機器を独自に導入することは予算的な問題からなかなか進展していない面があった。本研究では安価なマイコンを用いて IoT 機器を製作し、中小建設業を対象とした建設現場における各種の計測を試みた。

### 2. IoT 機器の構成

今回はオープンソースハードウェア Arduino システムでプログラム可能なマイコンである ESP32 (Fig. 1) および M5Stack へ Fig. 2 に示すような MEMS 技術を用いた小型計測モジュールを基本的には 1 つのマイコンに対して 1 つ接続し計測回路を形成した。収集したデータは ESP32 に内蔵されている WIFI モジュールで Web 上のクラウドサービスへと保存する形式又はマイコンに接続した  $\mu$  SD カードに記録する形式とした。

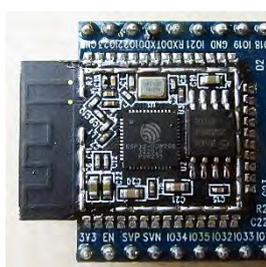


Fig. 1 ESP32

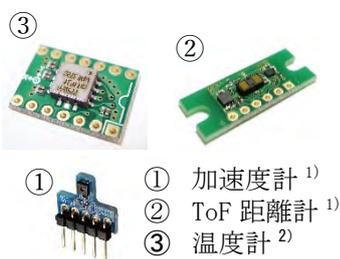


Fig. 2 小型計測モジュール

### 3. 計測結果

Fig. 3 に現場での温度計測時の機器設置状況を示す。現場での温度計測については、電源が無い山間部であったため、太陽電池パネルと蓄

電池を使った電源確保及びソラコムによるデータ送信を用いた。温度計測では付近のアメダスによる計測値とほぼ同じ結果が得られている。Fig. 4 に舗装工事でのマカダムローラによるアスファルト締固め時の締固め量計測状況を示す。締固め量計測結果からはマカダムローラ走行プロファイルに即した沈下量が得られた。



Fig.3 温度計測結果



Fig.4 機器設置状況

Fig. 5 に M5Stack による GPS 計測結果を示す。この計測では携帯電話のデザリングにより M5Stack に接続した GPS モジュールから得た位置情報を Ambient というデータ可視化サービスに送信しクラウド上で位置情報が確認できる。

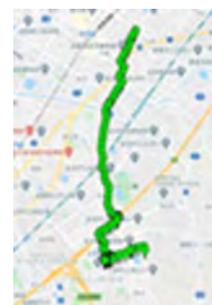


Fig.5 GPS 計測

### 4. まとめ

安価なマイコンと小型 n 計測モジュールを組み合わせて現場での IoT 計測を試みた。現在各種の小型計測モジュールを用い、数千円で計測装置を構成できる。耐久性の面では工夫が必要であるが、多地点での計測を導入することで建設現場の情報化に寄与できると考えられる。

1) ストロベリーリナックス HP : <https://strawberry-linux.com/>

2) 秋月電商 HP : <https://akizukidenshi.com/>



# 11. 施工現場でのリスク評価と映像を活用したリスク予知教育

## － アイトラッキング調査とVRの活用 －

株式会社建設IoT研究所 ○可児 憲生  
株式会社環境風土テクノ 須田 清隆  
立命館大学 横山 隆明

### 1. はじめに

現在、中小建設業において問題となっているのが、社員の高齢化であり、高齢化に伴う工事事故予防に対するリスク教育の進め方である。リスク教育の目的は、建設や自然災害時での安全や危険に対するコミュニケーション齟齬の解消とリスク想像力の醸成を図ることである。ポスターセッションでは、①コミュニケーション齟齬の解消を目的に遠隔臨場技術の活用や②工事経験値の違いによるリスク認知の差を視線調査で明確にし、③視線調査結果を反映させた、現場に発生するリスクポイントでの臨場感のある緊張感をVRで体験させて、従業員のリスク予知能力を高める現場教育の実効性を報告している。

### 2. 遠隔臨場技術

#### (1) 映像臨場技術

遠隔臨場による施工管理は、発注者と現場事務所や現場での日常的に行えるリアルタイムなコミュニケーション環境の整備により、接触機会や移動時間の解消を実現するものである。その結果、遠隔臨場によって本社常勤の熟練技術者の知見や経験知が多面的継続的に活用できる環境も創造され、日常的な社内検査で映像が活用され現場の安全面と品質面の向上を期待するものである。

#### a) 遠隔臨場の装備



図-1 遠隔臨場の装備

#### b) 独自の通信環境

通信事業者のサービスにおいては、通常は上り下りの通信速度は対称 (同じ速度) になっているが、本技術では上り速度を広帯域化 (最大 4Mbps) し下りを狭帯域化 (最大 256Kbps) した非対称通信サービスを活用した。これにより、上りの現場映像を高品質で送信することが可能となっている。



図-2 独自の通信環境

#### c) 定点カメラによる映像臨場

ネットワークカメラによるリアル映像により、本社・現場など多地点監視を可能にすることで、会社が一体となった現場の安全推進活動に参加できるようになった。特に、現場での見守られ効果から、作業員の事故予知への意識づくりが高まっている。



図-3 定点カメラ映像

### 3. 視線調査 (アイトラッキング) のリスク認識

技術者の経験や立場によって異なる施工現場の品

質面、安全面の着眼点をアイトラッキング調査で分析し、効果的な撮影ポイントや撮影範囲の決定により、施工現場での迅速なリスク管理を可能にしている。

a) 視線調査 (アイトラッキング) 装備



図-4 アイトラッキング装置

製品名：EMR-9



図-5 調査における装着状態

b) 視線調査事例 (ICT 重機操作)

ICT 重機 (MG) のオペレータ教育において、未熟練オペレータ (図-6) と熟練オペレータ (図-7) の、注視傾向を確認している。

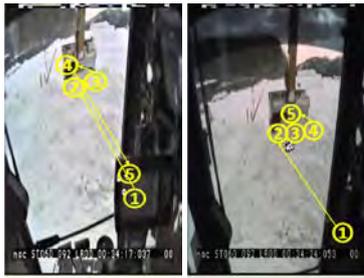


図-6 未熟オペレータの作業確認点

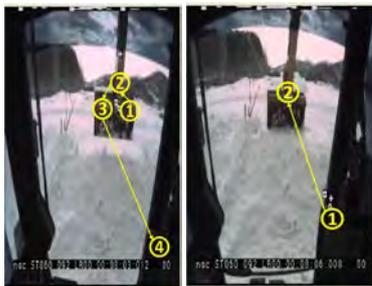


図-7 熟練オペレータの作業確認点

4. 360 カメラと VR による仮想臨場感

a) 全天候型 360° カメラの構成

全天候で長期稼働が可能なネットワーク型魚眼カメラ (図-8) を 2 台組み合わせ、画像処理が可能な録画装置を使用している。



図-8 360° カメラ取り付け事例

b) VR 事例 (法面作業)

技術者や作業員への法面施工環境に対するリスクの捉え方を、事前にアイトラッキング調査にて確認し、双方の陥りやすいリスクポイントについて、360° カメラを設置、VR により臨場感のある危険緊張感を演出している。(図-9、図-10)

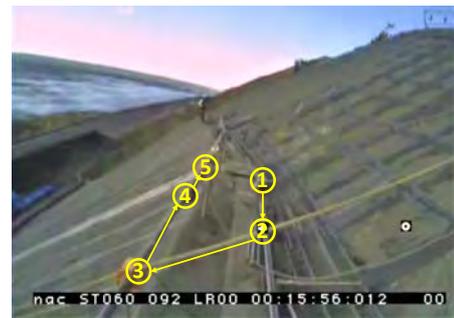


図-9 アイトラッキングによるリスク着眼点



図-10 リスク着眼点での作業内容 (機材吊り込み作業)

5. 謝辞

本技術は、国土交通省「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」の助成を受けたものです。本報告にご協力頂きました関係各位に感謝申し上げます。

参考文献 1) 渋谷義博：タイムラプス映像から読み取れる施工属性情報に関する検討，土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集，VI-233，2015

## 12. しなやかだけど強靱！ポリウレアなのに簡単！

### 常温型コンクリート舗装補修材「ニンジャシール」

コンクリート舗装に発生する目地部分の角かけ、ひび割れ、段差、水の侵入を解決！

株式会社ガイアート ○渡邊 大介

株式会社ガイアート 小川登

#### それはタフで優しい

「ニンジャシール」は、ひび割れ・角欠けへの充填や面的塗布が可能な2液混合常温硬化型ポリウレア樹脂材料で、1缶に施工に必要な材料がすべて入ったキットとなっているため、熟練者でなくとも簡単に施工が可能となる。しなやかな物性で（伸び率 300%）ひび割れにも追従し、万が一飛散しても大きな事故に繋がる可能性が少なくと考える。従来のコンクリート舗装のひび割れ補修では、コンクリートを取り壊してジェットコンクリート等を打設する方法が多いため、衝撃等から再劣化が発生しやすく、周囲の脆弱な部分からの剥離が課題となっていた。

#### 火も重機も不要

アスファルト系補修材の加熱注入ではトンネル内での火災や火傷のリスクがあったが、「ニンジャシール」は重機不要、少ない人員で施工でき、そのしなやかな物性により衝撃を吸収するため既設舗装を傷めないところがポイントとなる。



#### 圧倒的な強さと驚異的な復元力

上面載荷試験では曲げ強度比 85%、下面載荷試験では曲げ強度の 105%の強度を持つ。ホイールトラッキング試験（DS）は 60,000 回/mm以上を誇り、ラベリング試験でも排水性（高機能）舗装以上の耐久性を持つ。せん断試験では、1N/mm<sup>2</sup>以上の荷重が加わり 10%以上の伸びで変形したにもかかわらず、試験後は元に戻るするという驚異的な復元力を発揮した。



#### 様々なトラブルを解決

国道維持工事に技術提案し繰り返し発生していた段差振動の苦情を解決、また北陸地方や中国地方、九州地方の高速道路のコンクリート舗装の版端部や目地の補修に採用されている。職員による直営施工で橋梁補修「DIY」を実践している玉名市（熊本県）においては、機能不全となった埋設型橋梁ジョイントの遊間部にて検討され、付着が強く動きに追従し、目地だけでなく面的にカバーできる為、採用に至った。今後も直営で行う道路・橋梁維持管理に役立てたい考えた。



## 令和2年度 建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集

---

令和2年12月2日 発行

編集 一般社団法人 日本建設機械施工協会  
発行所  
〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8  
(機械振興会館内)  
TEL (03)3433-1501  
FAX (03)3432-0289

---

複製厳禁

発行補助 (株)アクセス