

令和 7 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 7 年 11 月 26 日～11 月 27 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 7 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 7 年 11 月 26 日～11 月 27 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、実行委員会で採択を決定する。

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 総合科学技術研究機構 教授
副委員長	高橋 弘	東北大学 大学院 特任教授
委員	菊田 一行	国土交通省 大臣官房 技術調査課 施工企画室 企画専門官
委員	北山 孝	西尾レントオール（株） 常務取締役
委員	坂下 誠	前田建設工業（株） 土木事業本部 機械部
委員	関野 聡	日立建機（株） 研究・開発本部 先行開発センター
委員	田村 匡弘	国土交通省 関東地方整備局 企画部 施工企画課
委員	玉石 修介	玉石重機（株） 代表取締役社長
委員	丹治 雅人	コベルコ建機（株） マーケティング事業本部
委員	中川 智裕	(株) 小松製作所 商品企画部 商品企画室 自動化グループ
委員	中島 正登	鹿島道路（株） 技術開発本部 技術開発総合センター 機械部
委員	行川 恒弘	前田道路（株） 技術研究所 施工技術開発室
委員	橋本 毅	(国研) 土木研究所 技術推進本部 先端技術チーム
委員	二塚 勇吾	キャタピラー 販売促進部（中・大型製品）
委員	本田 肇	(株) トプコン スマートインフラ事業本部 スマートインフラ事業部
委員	渡部 純	(株) カナモト 取締役執行役員 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	正田 明平	(一社) 日本建設機械施工協会 技術部
委員	松枝 浩太郎	(一社) 日本建設機械施工協会 標準部

「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. 積雪期における河川堤防の変状抽出に向けた予備的検討	・ ・ ・ ・ ・	1
(国研)土木研究所 寒地土木研究所	○吉田 智	
北海道開発局 事業振興部 デジタル基盤整備課	飯田 美喜	
2. 建設現場における無人化施工向け無線 LAN システムの		
ローミング技術と応用に関する検討	・ ・ ・ ・ ・	5
(株)熊谷組	○畑本 浩伸	
(株)国際電気通信基礎技術研究所	清水 聡	
(独)国立高等専門学校機構東京工業高等専門学校	松林 勝志	
3. PC 圧着接合によるプレキャスト栈橋工法の開発		
ー工場製作部材を活用したフルプレキャスト施工ー	・ ・ ・ ・ ・	11
五洋建設(株) 技術研究所	○池野 勝哉	
	田中 智宏	
(株)日本ピーエス 工事本部	天谷 公彦	
4. 3D プリンタにより製作した埋設型枠を用いた		
プレキャスト部材の適用事例の報告	・ ・ ・ ・ ・	17
(株)大林組	○吉村 瑞貴	
	西村 俊亮	
	小俣 光弘	
	北村 勇斗	
	宮入 斎	
日本ヒューム(株)	田口 拓望	
5. 切羽近傍からの吹付けコンクリート供試体採取ツール		
ドリルジャンボで原位置から吹付けコンクリートコアを採取	・ ・ ・ ・ ・	21
西松建設(株)	○辻岡 高志	
	原 圭太	
フジモリ産業(株)	小椋 孝太	

6. ベテランオペレータの操作パターンのモデル化による

油圧ショベルの自動掘削

・・・・・・・・ 23

(株)小松製作所 ○森澤 直樹
今西 将也
井門佳那子
小山 幹
勝呂 大
柳下 正紀
千葉貞一郎
山元 弘
(国研) 土木研究所 遠藤 大輔
橋本 毅

7. 山岳トンネル工事のずり出しにおける

ホイールローダ自動運転システムの開発

・・・・・・・・ 29

西松建設(株) 技術研究所 ○本山 昇
田口 毅
ジオマシンエンジニアリング(株) 塚田 純一

8. 建設機械施工の自動化・遠隔化技術の普及による

施工のオートメーション化に向けた取組

・・・・・・・・ 33

国土交通省大臣官房参事官 (イノベーション) グループ施工企画室 ○松沢 啓太
中根 亨

9. 温度予測型転圧管理システムの開発による生産性向上への検討

アスファルト舗装における現場温度管理の省人省力化

・・・・・・・・ 37

(株)NIPPO 総合技術部 機械開発グループ ○梶原 覚
相田 尚
(株)NIPPO 総合技術部 技術研究所 門田 誠也

10. アスファルト舗装 施工情報一元管理システムの導入と展望

・・・・・・・・ 43

(株)NIPPO ○竹内 伸
阪神高速道路(株) 前川 裕哉

11. 軟弱地盤への盛土施工における地盤性状等の不確実性を考慮した

施工管理手法に関する検討

・・・・・・・・ 47

(国研) 土木研究所 ○茂木 正晴
山口 崇
(株)東設土木コンサルタント 中川 光貴
(株) EARTHRAIN 緒方 正剛

12. 施工データの活用 (ICT 施工 Stage II) の取組効果について

～さらなる省人化に向けた ICT 施工の次なる段階～

・・・・・・・・ 53

国土交通省大臣官房参事官 (イノベーション) グループ施工企画室 ○長田 陸

13. ICT 活用による堤防除草自動化技術の開発について			
堤防除草現場の省人化による生産性向上に関する取組	・ ・ ・ ・ ・	57	
北海道開発局 事業振興部 機械課	○小川 亮司		
	秋田 宜克		
	東 陽一		
14. ICT 除雪機械の現場導入に向けた取組状況と今後の展望について	・ ・ ・ ・ ・	63	
国土交通省大臣官房参事官（イノベーション）グループ施工企画室	小池 喬		
	○細川 太暉		
15. ICT と GNSS を活用した簡易測量支援アプリの精度検証と			
生産性向上事例について	・ ・ ・ ・ ・	67	
大成建設(株)	○石井 崇充		
	片山 三郎		
	石井 亘		
16. 重機搭載レーザー計測システム			
共通データ環境と API 連携で監督・検査を効率化	・ ・ ・ ・ ・	73	
(株)フジタ	○上原 広行		
17. 小型 ICT 建設機械の刃先位置計測機能を用いた			
効率的な出来形管理手法の構築について	・ ・ ・ ・ ・	77	
近畿地方整備局 近畿技術事務所 技術活用・人材育成課	○伊藤 亘佑		
18. ニューマチックケーソン工法における排土設備自動化	・ ・ ・ ・ ・	83	
(株)大本組	○坂本 浩平		
	橘 伸一		
	藤原 啓		
	南坂 義雄		
(株)アクティオ	浅利 和輝		
	荒地 智晴		
19. 高速道路リニューアルにおける床版取替技術の開発			
高速・安全施工を可能にする床版更新工法	・ ・ ・ ・ ・	89	
鹿島建設(株)	○吉崎 伸		
	古川紗也加		
	早房 昭人		
20. トレンチャー掘削による掘削断面積と施工速度の関係	・ ・ ・ ・ ・	95	
(国研)土木研究所 寒地土木研究所	○永長 哲也		
21. DX 技術を活用した除雪オペレータの担い手確保の取り組み			
～除雪シミュレータによる技術伝承～	・ ・ ・ ・ ・	99	
国土交通省 東北地方整備局 東北技術事務所	佐藤 信之		
	○田中 孝之		

22. マスプロダクツ型排水ポンプの現場実証と新たな研究開発について	・ ・ ・ ・ ・	103
国土交通省 大臣官房 参事官（イノベーション）グループ 施工企画室	○吉崎 雄一 能登 眞澄	
23. 電動化排水機場の信頼性等を考慮した発電機構成の比較検討	・ ・ ・ ・ ・	107
(国研)土木研究所 寒地土木研究所	○澤口 重夫 永長 哲也 岸 寛人	
24. 国民公園（皇居外苑）における電動建機試用に関する報告	・ ・ ・ ・ ・	111
環境省 水・大気環境局 モビリティ環境対策課 脱炭素モビリティ事業室	○栗原 幸大 須山 友貴	
25. 舗装用電動ローラの運用に関する考察と適用事例		
舗装工におけるカーボンニュートラルへの一助	・ ・ ・ ・ ・	115
(株)NIPPO 総合技術部 機械統括グループ	○田中 翔悟 小川 亮太 大西 秀樹	
26. 建設機械分野の脱炭素化に向けた政府の取組について第2報	・ ・ ・ ・ ・	119
環境省 水・大気環境局 モビリティ対策課 脱炭素モビリティ事業室	○植竹 康朋 須山 友貴	
27. 重機におけるエンジン回転数と燃料消費量の相関関係について		
CO ₂ 削減及び現場施工性の実現に向けて	・ ・ ・ ・ ・	123
西松建設(株)	○吉田 千智 井上 洸也 齋藤 貴之	
28. 複合噴射攪拌式深層混合処理工法の出来形確認ならびに		
環境負荷低減に関する検証	・ ・ ・ ・ ・	127
三信建設工業(株)	○山口 洋 島野 嵐 熊田 大地	
(株)エヌ、アイ、テイ	中西 康晴	
29. 建設現場におけるカーボンニュートラルに向けた取組について	・ ・ ・ ・ ・	131
国土交通省大臣官房参事官（イノベーション）グループ施工企画室	○伊藤彩也香 中根 亨	
30. 油圧ショベル用エリア限定型自動停止システム	・ ・ ・ ・ ・	135
鹿島道路(株) 技術開発本部 機械部	○大竹 元志 齋藤 光陽	
31. 現場地耐力試験を用いた地盤安全性評価の基礎的研究	・ ・ ・ ・ ・	139
(独)労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所	○堀 智仁 玉手 聡	

32. 自動化リジッドダンプおよび施工管理支援基盤システムを用いた 土砂運搬作業のオートメーション化の実証	・ ・ ・ ・ ・	143
大成建設(株)	○市川 裕駿 遠藤 亮雄 田村 道生	
33. 自動自律機械施工への取組に向けた課題とエコシステムの構築 4つの課題と解決策に向けた取組み	・ ・ ・ ・ ・	147
(株)大林組	○杉浦 伸哉	
34. 建設現場におけるマニピュレータ型耐火被覆吹付ロボットの開発	・ ・ ・ ・ ・	151
鹿島建設(株)	○高木 良介 石田 武志 松田 陸	
35. 自動運転ショベルの開発と現場運用 現場人員で運用できる自動運転技術	・ ・ ・ ・ ・	157
安藤ハザマ コベルコ建機(株)	○小田 銀河 藤原 翔 野田 大輔	

II 梗概集

II-1 ポスターセッション要旨

1. 機械学習を用いた RC 構造物の異常検知手法および

自動測定ロボットの開発 163

五洋建設(株) ○バルガス ルベン

池野 勝哉

東北大学 内藤 英樹

大分工業高等専門学校 木本 智幸

2. ホイールローダの衝突検知ブレーキシステムの開発 165

コマツ ○内海 将広

内藤 亨

3. ICT除雪機械の開発 歩道除雪車の作業装置自動化機構の開発 167

国土交通省北陸地方整備局北陸技術事務所 ○深澤 慶

畑山 啓

以倉 直隆

4. 除雪作業等の安全作業の促進を目的としたメタバースプロジェクト

「JAMP」とスマートフォンを用いたAR点検支援ツールの紹介 169

(一社)日本建設機械施工協会施工技術総合研究所

・長岡技術科学大学工学研究科 システム安全工学分野 ○酒井龍之介

長岡技術科学大学 システム安全系 高橋 憲吾

(一社)日本建設機械施工協会施工技術総合研究所 佐野 昌伴

5. 宇宙を利用した現場管理が当たり前の時代に

「GNSS 動態観測システム GeoLoc」 171

(株)レンタルのニッケン ○湯島 一郎

6. 建設機械の遠隔運転シミュレータ (切羽ずり出し作業)

ホイールローダ切羽ずり出し作業の遠隔運転をサイバー空間で練習する 173

西松建設(株) 技術研究所 ○平野 亨

高原 裕介

辻岡 高志

7. AI 姿勢検知システム「AI's (アイズ)」

AI を使って合図者の意思をジェスチャーで瞬時に伝達する 175

西尾レントオール(株) 通信測機機材部 ○西野 公貴

8. 建設現場におけるレンタルできる自動施工 177

西尾レントオール(株) 建設 DX 営業課 ○佐藤 芳和

9. 水素専焼ジェットヒーターの戦略的導入による建設現場の CO2 排出量削減の推進

～水素利用の建設現場への実装～ 179

(株)カナモト ○畑中 淳

宮坂建設工業(株) 今井 貴寛

日工(株) 長谷川修磨

10. 小型照明車の開発	・ ・ ・ ・ ・	181
国土交通省 中部地方整備局 中部技術事務所 防災・技術課	川田 明男 野口 徹也 ○炭谷 佑介	
11. リアルタイム平坦性センサー		
コンクリート床打設時の面的可視化による平坦性精度向上	・ ・ ・ ・ ・	183
(株)トプコン	○西田 信幸	

I 論文集

1. 積雪期における河川堤防の変状抽出に向けた予備的検討

(国研)土木研究所 寒地土木研究所
北海道開発局 事業振興部 デジタル基盤整備課

○吉田 智
飯田 美喜

1. はじめに

日本国内では大規模な地震により、家屋だけではなく、道路の陥没や河川堤防（以降、「堤防」という。）にクラックが発生するなど、土木施設においても甚大な被害を受けている。なお、河川管理においては、震度 5 以上の地震が発生した場合、直ちに堤防の点検を実施しなければならないが¹⁾、北海道のような積雪寒冷地では、冬季間、河川敷地に立ち入っての点検は積雪により困難を極める地域がある。そのため、広範囲にわたる堤防の被害状況を迅速かつ効率的に検知する手法の構築は重要となる。

本稿では、冬季間に地震が発生した時、堤防のクラック上の積雪にも同様の変化が発生すると想定し、これらの被害（変状）を検出するための試験を実施したので報告する。具体的には、冬季環境下の雪面に作製した変状上を固定翼の無人航空機（以降、「UAV」という。）が飛行し、光学カメラで撮影した画像データから、変状を抽出できるか検証した。

2. UAV 飛行試験

2.1 試験機器

本試験では、過年度実施した検証試験と同様に Quantum-Systems 社製の VTOL 型の機体を用いた（図-1）²⁾。変状の撮影には、当該機体に搭載された RGB カメラ（以降、「カメラ」という。）を用いている（図-2）。なお、試験時の飛行高度 100m における、カメラの画角から算出される撮影範囲は横 102m、縦 68m となる。

2.2 試験方法

試験は、令和 7 年 1 月 22 日に寒地土木研究所が保有する石狩吹雪実験場（以降、「実験場」という。）の積雪上に変状を作製し試験を行った。試験時の気象を表-1³⁾に示す。

(1) 飛行ルート

試験の飛行ルートは、地震発生後の点検を考慮し、変状箇所の直上を往復することとしたほか、往復だけでは変状の撮影が不足することと考えられたことから、変状を十字に交差するように飛行し、撮影を行った。

(2) 作製した変状

本試験では、積雪上に幅 0～700mm、深さ 0～850mm の三角錐形状の変状を作製した（図-3）。

変状は、堤防天端（平面）と法面（斜面）に発生することを想定し、実験場の平面部分に方向が約 90° 異なる 2 つ（変状 1, 2）、また、実験場の斜面部分には、長手方向に対し縦（変状 3）、横（変状 4）となる 2 つ作製した。なお、試験前に変状の状態をスケールで測定したほか、モバイル端末に搭載された LiDAR を用いて事前に変状をスキャンしている（表-2、図-4）。

3. 試験結果及び考察

3.1 変状の視認性検証

撮影した画像を確認した結果、平面に作製した

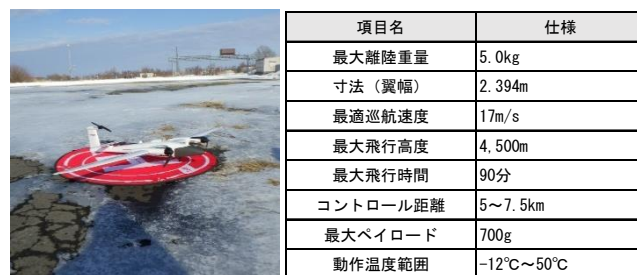


図-1 Quantum-Systems 社製の VTOL の外観と仕様



図-2 RGB カメラの外観と仕様

表-1 試験時の気象条件等

飛行時刻		天気	気温 (℃)	平均 風速 (m/s)	最大 瞬間 風速 (m/s)	風向	飛行 高度 (m)	データ 形式
開始	終了							
10:38	10:56	晴	-2.2	2.5	5.7	東南東	97	JPG

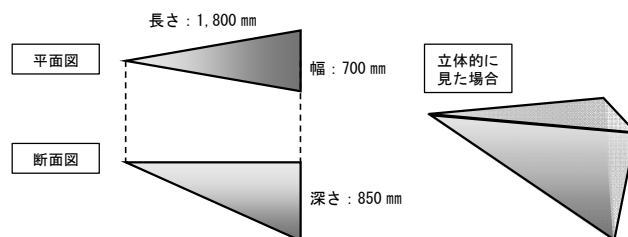


図-3 作製した変状イメージ

表-2 モバイル端末仕様

項目	仕様
モデル名	iPhone 13 Pro
容量	128GB
重さ	203g
サイズ	高さ×幅×厚さ：146.7mm×71.5mm×7.65mm
搭載センサ	12Mpixel メインカメラ、12Mpixel 超広角カメラ、12Mpixel 望遠カメラ、LiDARスキャナ、気圧計、3軸ジャイロ、加速度センサ、近接センサ、環境光センサ
画面解像度	2,532×1,170 px
OS	iOS 18.2
CPU/GPU	A15 Bionicチップ（6コアCPU、5コアGPU）
メモリ	16コアNeural Engine

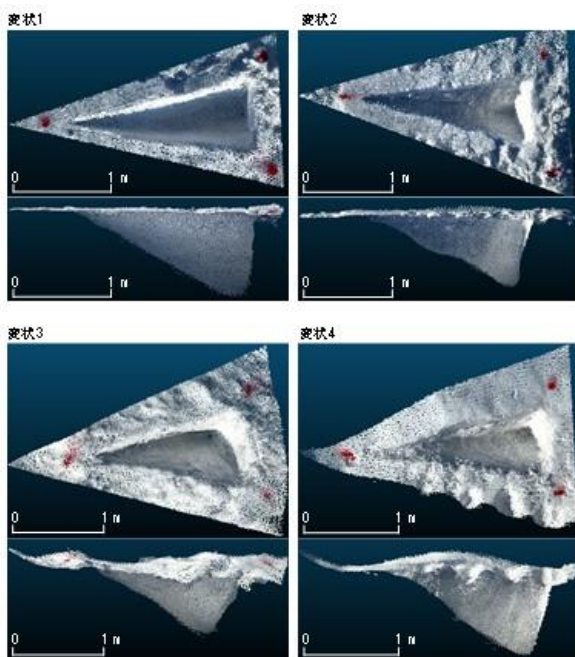


図-4 モバイル端末LiDARでスキャンした各変状の形状
(上：各変状の上面の状態、下：各変状の側面の状態)

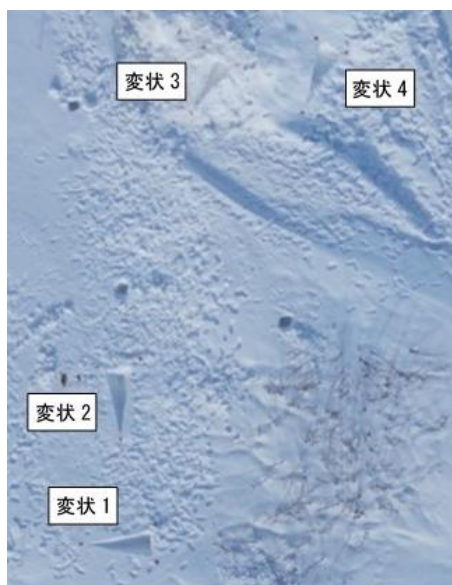


写真-1 撮影した変状の視認性

変状 1, 2 は、陰影により視認は容易であったが、斜面に作製した変状3,4は陰影が乏しかったため、平面の変状と比較して視認性は劣っていた（写真-1）。

3.2 画像のSfM処理

画像から変状の平面形状は視認できたが、変状の深さの確認は困難であったため、取得した画像データをSfM処理し、点群データを作成した。なお、SfM処理に使用した画像データ、ソフトの概要を表-3、4、及び作成した点群データから各変状を切り出したものを図-5に示す。

SfM処理した点群データより、変状1～3の形状は明瞭に確認できたが、斜面の長手方向に対して横となる変状4は、深さ方向の点群の一部に欠損が生じていた。これは斜面の傾斜により変状の奥まで撮影できなかったことが要因であると考えられる（図-6）。

3.3 SfM処理における画像枚数について

試験時、風の影響により飛行速度に差異が生じていることが目視できたため、画角に入る変状の

表-3 画像データ概要

解像度		1枚あたり撮影範囲		地上解像度
長辺 (px)	短辺 (px)	長辺 (m)	短辺 (m)	(mm)
7,952	5,304	93	66	12

表-4 SfM処理に使用したソフト概要

ソフト名	バージョン	ベンダー	国
Metashape	2.2.0	Agisoft	ロシア

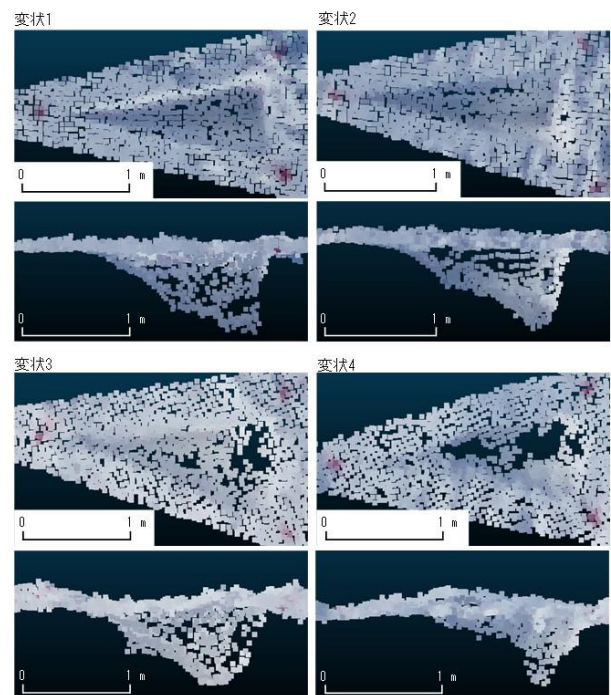


図-5 切り出された各変状
(上：変状の上面図、下：変状の側面図)

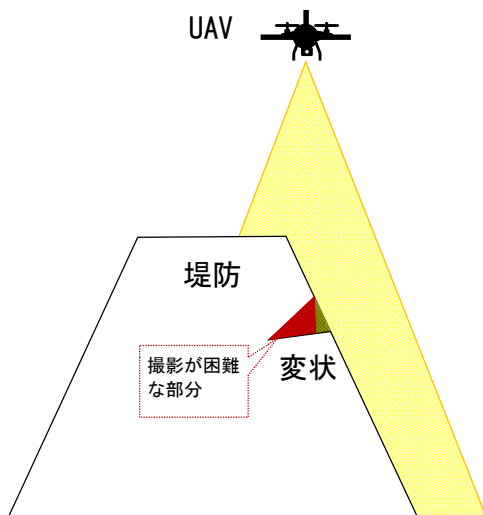


図-6 傾斜により撮影が困難になるイメージ

撮影枚数が異なることが考えられたことから、画像データが持つ時間情報をもとに往路、復路の各画像データで SfM 処理したほか、往路と復路の全ての画像データで SfM 処理したもの（以降、「往復」という。）と、それらに十字方向の 2 ルートを加えた 4 方向全ルート of 画像データで SfM 処理したもの（以降、「全ルート」という。）で比較検証を行った。SfM 処理に使用した写真の枚数を整理したものを表-5、また、変状 1 と変状 4 における処理結果を図-7、8 に示す。

SfM 処理に使用した写真データ数は、復路の方が若干多かったが、往路と復路の SfM 処理結果に差異は見られなかった。一方、往復、全ルートは、SfM 処理に使用する写真枚数が多かった分、往路、復路よりも変状の形状が鮮明になっていた。なお、往復で撮影した画像データを用いて SfM 処理することで、変状の形状が鮮明になっていることを鑑みると、地震発生後の点検は、堤防を往復して撮影することで、変状の形状を把握し得る可能性が示唆された。

3.4 SfM 処理で作成された点群データの測定値と実測値の比較

CloudCompare を用い（表-6）、点群データの各変状における最大幅、最大深さ、長さを測定し、実測値との比較検証を行った（表-7）。最大幅、最

表-5 SfM 処理に使用した写真枚数

飛行方法	写真枚数
往路	8
復路	11
往復	19
4方向	34

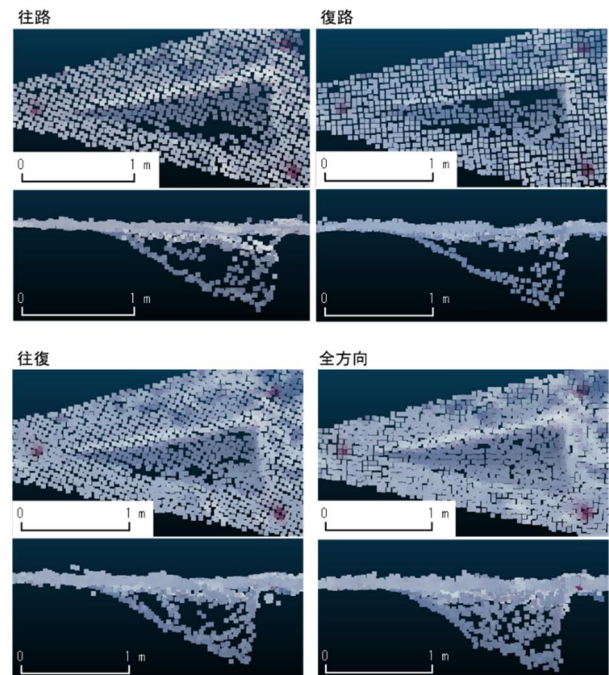


図-7 変状 1 の SfM 処理結果
（上：変状の上面図、下：変状の側面図）

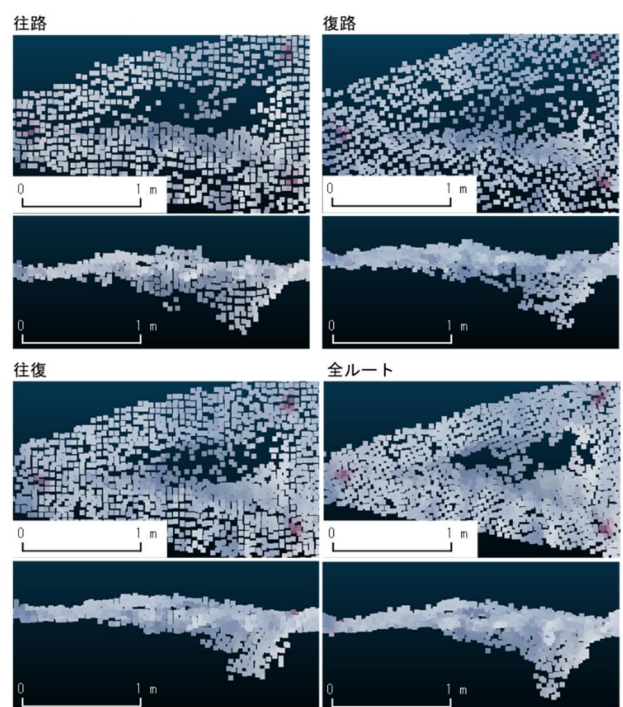


図-8 変状 4 の SfM 処理結果
（上：変状の上面図、下：変状の側面図）

表-6 点群データの測定に使用したソフトウェア

ソフト名	バージョン	ベンダー	国	価格
Cloud Compare	2.12.4	Daniel Girardeau-Montaut	フランス	無料

大深さ、長さのいずれも、実測値より 0～数十 cm 小さい数値で測定される傾向が見られた。特に斜面に作製した変状 4 の最大深さの測定値とは 50%

表-7 各変状の実測値と測定値との比較

単位 (mm)

変状		実測値	SfM計測結果											
			往路			復路			往復			全ルート		
			解析値	誤差	割合 (%)	解析値	誤差	割合 (%)	解析値	誤差	割合 (%)	解析値	誤差	割合 (%)
1	最大幅	750	690	-60	8	670	-80	11	720	-30	4	750	0	0
	最大深さ	870	740	-130	15	790	-80	9	770	-100	11	850	-20	2
	長さ	1,820	1,530	-290	16	1,620	-200	11	1,590	-230	13	1,620	-200	11
2	最大幅	800	660	-140	18	740	-60	8	680	-120	15	730	-70	9
	最大深さ	860	710	-150	17	670	-190	22	800	-60	7	850	-10	1
	長さ	1,920	1,720	-200	10	1,660	-260	14	1,710	-210	11	1,700	-220	11
3	最大幅	880	590	-290	33	680	-200	23	680	-200	23	800	-80	9
	最大深さ	900	800	-100	11	760	-140	16	840	-60	7	790	-110	12
	長さ	1,800	1,690	-110	6	1,660	-140	8	1,650	-150	8	1,640	-160	9
4	最大幅	750	730	-20	3	730	-20	3	660	-90	12	690	-60	8
	最大深さ	820	480	-340	41	530	-290	35	430	-390	48	570	-250	30
	長さ	1,870	1,730	-140	7	1,790	-80	4	1,600	-270	14	1,300	-570	30

近い差が生じている。その理由として、撮影した画像は、変状の最深部まで撮影されなかったため（図-6）、変状の再現性が低下したと考えられる。一方、平面に作製した変状は、最深部まで撮影できていたことから、斜面に作製した変状よりも再現性が高くなったと考えられる。

以上のことから、斜面に発生する変状の形状を正確に認識するには、変状の最深部まで撮影できるよう、撮影に工夫が必要である。

4. まとめ

実験場の積雪に三角錐の変状を作製し、UAVに搭載されたカメラを用いて変状を確認する冬季飛行試験を実施した。その結果、上空から撮影した画像で雪面上に発生する変状の有無は視認することは可能であるが、平面上と斜面上の比較では、斜面上の変状の方が視認性は劣っていた。一方、撮影した画像データを用いて SfM 処理することにより、変状の形状は明瞭になることを確認できたが、斜面に発生する変状によっては最深部の形状を確認できないことを認識した。そのため斜面に発生する変状の形状を正確に確認するには、変状の最深部まで撮影できるよう、撮影に工夫が必要である。

今後は、撮影データから効率的に変状を抽出する手法についても検討していきたい。

参考文献

- 1) 国土交通省関東地方整備局HP：直轄管理河川に係る地震発生時の点検について、
https://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000112586.pdf?utm_source=chatgpt.com（2025.7.14確認）
- 2) 吉田智・山崎貴志・飯田美喜：積雪期における堤防変状の検知に向けた取組，建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集，pp.1-4，2024.
- 3) 国土交通省気象庁HP：石狩過去の気象データ検索，
https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/view/10min_a1.php?prec_no=14&block_no=1085&year=2025&month=01&day=22&view=p1（2025.7.14確認）

2. 建設現場における無人化施工向け 無線 LAN システムのローミング技術と応用に関する検討

ローミング技術の紹介を中心にして

株式会社熊谷組
株式会社国際電気通信基礎技術研究所
独立行政法人国立高等専門学校機構東京工業高等専門学校

○ 畑本 浩伸
清水 聡
松林 勝志

1. はじめに

近年、建設業界では生産年齢人口の減少と就業者の高齢化が顕著であり、業界全体にとって重要な課題となっている。特に建設機械オペレータをはじめとする熟練技能者の不足が深刻化している。令和 6 年能登半島地震のような災害時に宿泊施設や交通インフラの損壊が発生した場合、土木作業員の確保が困難となることで、問題の深刻度が増している。加えて、2024 年 4 月から建設業界にも適用された働き方改革関連法により、時間外労働や休日出勤に対する規制が強化されている。

このような状況を受けて、国土交通省は 2024 年 4 月に「i-Construction 2.0」を策定し¹⁾、「建設現場のオートメーション化」を掲げている。具体的な目標として、2040 年度までに省人化を進め、現状と比べて生産性を 1.5 倍まで向上することが掲げられている。これに先立ち、2022 年 3 月には「建設機械施工の自動化・自律化協議会」が設立され、技術開発と普及の加速化が図られている。

技術開発については、災害復旧現場など、二次災害のリスクがある危険な場所での作業員の安全性が求められている。そのため、施工現場に対する無人化・自動化技術の導入は、安全性を確保しつつ、夜間作業や降雪・降雨による作業中断が多い状況下でも施工の継続性を確保し、工期の遅延を防ぐ目的がある^{2)~6)}。

無人化施工において建設機械の遠隔操作を行うためには、無線ネットワークが必要となる。現場においてのみ利用するためキャリアの無線ネットワークではなく、ローカルエリアネットワーク (LAN: Local Area Network) の構築に優れた Wi-Fi が利用されている。しかし、Wi-Fi を広い現場で移動する建機に実装した場合、「適切な基地局に接続されない」「切り替えに時間がかかる」という課題がある。

本検討では建設現場における無人化施工向け無

線 LAN システムのローミング技術と応用に関する検討を行うにあたり、3 つのアプローチを並行して進めている。

研究開発項目 (1) として、建設現場で使用されている無線 LAN の端末が、最適な基地局と接続できるように、ローミングの判断に必要なパラメータを抽出する Wi-Fi 利用環境モニタリング技術を確認する。後述の研究開発項目 (2) (3) と連携して様々な使用環境で評価し、本システムを実装していない場合に比べ、ローミングに要する平均的な基地局切替時間を低減する。

研究開発項目 (2) として、2 台の重機を運用する際の映像伝送に要する最大遅延時間が 400msec となる場合に対して、ローミングポリシーを制御することによってアクセスポイント毎の通信負荷が平滑化され、200msec (50%低減) にすることを目指している。作業開始からの基地局に対する無線通信負荷状況を重機に搭載された GNSS の位置情報と関係づけながらモニタリングし、ローミングのためのパラメータを計算する。計算結果に基づいてアクセスポイントへの建設機械の接続数をローミングポリシーに基づいて制御されることを確認する。

研究開発項目 (3) として、ヘッドマウントディスプレイ (HMD: Head Mounted Display) とモーションシミュレータを用い、重機オペレータの作業負荷を低減し、作業効率を高める遠隔操縦システムを実現する。オペレータの作業負荷に大きく関わるのは重機の応答のタイムラグと映像解像度である。(1) (2) により改善されたローミング環境及び新技術開発により、これまでの 0.5~1 秒のタイムラグを半減させ、映像の高解像度化を目標とする。

本稿では、2. においてシステムの概要としての無人化施工技術や遠隔操作システム、自動走行制御を示し、3. においてローミング技術について説

明する。4. においてはローミング技術を用いた数値シミュレーション結果について説明する。5. においては、作業負荷低減と作業効率向上を実現する遠隔操作を支えるカメラ制御技術について説明する。最後の6. において、今後の検討事項について説明する。

2. システム概要

2.1 建設現場における無人化施工技術

災害復旧で活用される無人化施工はオペレータによる遠隔操作と、システムによる自動走行制御を連携している。このコンセプトの根幹には、自動走行制御の全ての動作が遠隔操作をベースにする設計思想がある。これにより、万が一自動走行制御のシステムに不具合が発生した場合でも、即時にオペレータによる遠隔操作へと切り替えて作業を続行できる、信頼性と堅牢度の高いバックアップ体制が確保されている。

2.2 遠隔操作システム

建設機械の管理はすべて遠隔操作室に集約・完結させている。オペレータは安全な位置に配置された操作室から、リアルタイムで送られている現場の映像データを基に作業状況を正確に「見える化」しており、現場を俯瞰的に把握できるようになっている。この中央集権的な管理体制は、オペレータ1人が複数の建設機械の動作を同時に管理することを可能としており、省人化を実現している。

システム全体の運用を簡素化し、ICT (Information and Communication Technology) に強い専門の技術者のサポートなく、オペレータのみで操作可能なシステムを構築することで、実際の建設現場への導入を容易にしている。

2.3 自動走行制御

建設機械の自動走行制御を行うにあたり、「仮想レール方式」を採用している。これはまず人間が手本となる走行ルートをシステムに記憶し、その後、自動走行時に仮想レールに対して忠実に走行するという考え方である。

具体的には、最初にオペレータが遠隔操作で建設機械を運転する。この「教示運転」の際に、車両に搭載されたGNSS (Global Navigation Satellite System) やIMU (Inertial Measurement Unit) が位置と速度の情報を取得し、走行した経路を「教示経路」として車載コンピューターに記憶させる。オペレータが自動走行モードに切り替えることで、建設機械は記憶された仮想的なレールに沿って、教え込まれた通りの動きを正確に追従して走行する。この制御方法の利点として、現場の地形変化に合わせて容易に経路を再登録できる柔軟性と、熟練オペレータの運転技術をデジタルデータとして保存・再現することで、高い走行精度と生産性を

実現できる点にある。

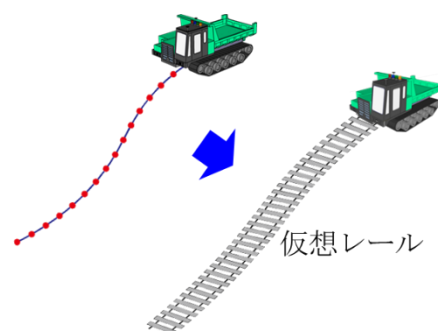


図-1 自動走行制御における仮想レール方式

3. ローミング技術

3.1 基本的なローミング技術とその課題

図-2 に、基本的なローミングの概念を示す。ローミングとは無線 LAN の端末が接続先のアクセスポイント (AP : Access Point) を切り替える動作である。現在の Windows OS でもローミングの設定変更はできるが、接続先を切り替えるかどうかについて、電波品質が極端に悪くなった場合にのみ変更するか、あるいは継続的に電波品質をチェックして電波品質の良いアクセスポイントを探すことしかできない。

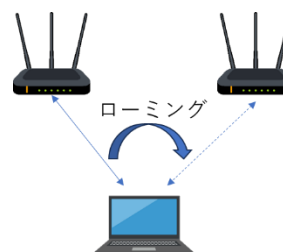


図-2 ローミング動作

現在のローミング技術では、切り替える際の受信信号電力の強度 (RSSI : Received Signal Strength Indicator) の基準が不明であり、切り替え時間に数秒かかる場合がある。そのため、建機の遠隔操作では使えない。単に RSSI だけでなく、基地局と端末の位置関係、基地局のトラフィック状況などを総合的に判断し、かつ短時間 (目標 200ms 以下) で切り替えることが必要である。

ローミングの基準として OS が RSSI しか判断材料としておらず、また切り替えに時間がかかるのは、新たなアクセスポイントとの接続に向けた認証プロセスに時間がかかるためである。これを改善するには、端末側で RSSI 以外に GNSS 情報やトラフィック情報も入手できるようにし、アプリケーション側で切替判断ができるような構成にする必要がある。

3.2 提案するローミング構成

図-3 に、現在のローミング方式と目標とするローミング方式を比較する。現在のローミングの場合、ローミングの基準として OS が RSSI しか判断材料としていない。AP の切替に時間がかかるのは、新たな AP との接続に向けた認証プロセスに時間がかかるからである。これを改善するには、端末側で RSSI 以外に GNSS 情報やトラフィック情報も入手できるようにし、アプリケーション側で切替判断ができるような構成にする必要がある。

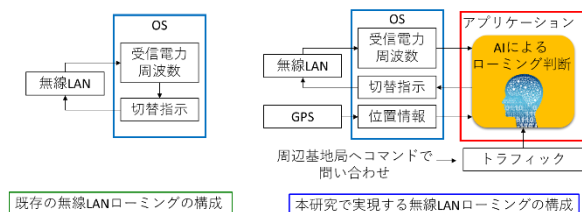


図-3 ローミング構成の比較

端末側に Wi-Fi を 2 つ装備し、1 つは最も条件に合う AP と接続して無線通信を行い、もう 1 つはローミングに備えて次に条件に合う AP に接続しておく。そして、AI から切り替え指示があればルーティングテーブルを書き換えることでローミングを実現する。

図-4 に、ローミングの実験系を示す。つくば市にある熊谷組の技術研究所の実験ヤードに無線通信システムを構築して通信品質実験を行った。端末側のモバイル PC に小型 PC (Raspberry Pi) を 2 台接続し、AP1 と AP2 へと常時接続している。

実験の結果、時刻、RSSI、緯度経度、トラフィック量など、パソコン側のローミングポリシーに必要な情報収集ができることを確認した。別途、実施したローミング切替時間の計測では、従来は数秒かかっていたローミング時間が 50ms 以下で実現できることも確認できた。これは、2 つの AP に常時接続を実施しているためである。

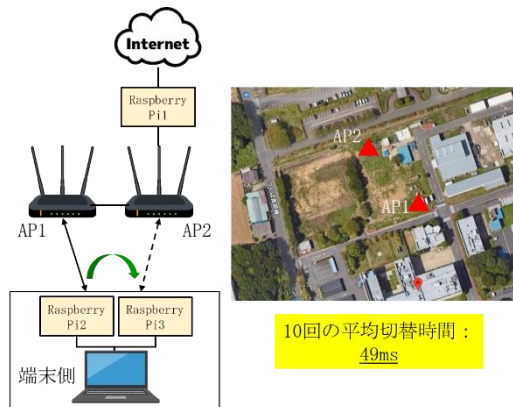


図-4 ローミングの実験系

4. 数値シミュレーション

4.1 シミュレーション環境

熊谷組の技術研究所における屋外実験ヤードの点群データを活用して、アクセスポイント 2 台に対する点群ごとの受信信号電力をシミュレーションで数値解析した。図-5 に、技術研究所の点群データを示す。AP を設置することで、各点群との距離を計算できる。

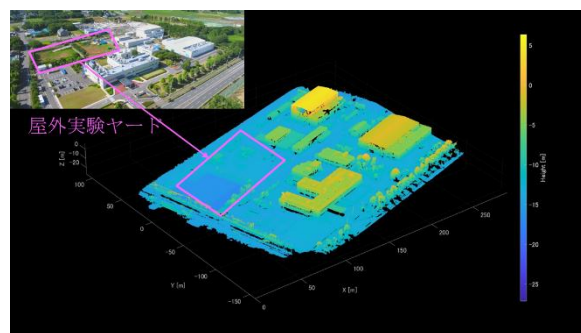


図-5 技術研究所の点群データ

表-1 に、数値シミュレーションで利用する無線通信のパラメータを示す⁷⁾。無線 LAN で最も利用される 2.4GHz 帯と 5.6GHz 帯の周波数を利用している。ともに屋外で利用可能なチャネルである。パスロス は自由空間伝搬損失とし、距離および周波数の二乗に比例して損失が大きくなるものとしている。周囲の遮蔽の影響を示すシャドウィングは対数正規分布に従う受信信号電力の変動であり、標準偏差を屋外環境で用いられることの多い 6dB としている。また、瞬時変動については仲上ライス分布に従う変動とし、端末に届く直接波と反射波の電力比率を示すライス係数 K は 0dB としている。

表-1 シミュレーションパラメータ

パラメータ	数値
搬送周波数	2.437GHz (6ch)
	5.6GHz (120ch)
送信電力	20dBm
パスロス	自由空間伝搬損失
シャドウィング	標準偏差 6dB
瞬時変動 (フェージング)	仲上ライス分布 (ライス係数 K=0dB)
ケーブル損失	6dB
雑音指数	10dB
アンテナ利得	2.14dBi (送受信)

図-6 に、屋外実験ヤードにおける AP の受信信号電力の一例を示す。周波数は 2.4GHz 帯であり、AP に近い点群ほど受信信号電力のレベルが高くなる

ことがわかる。

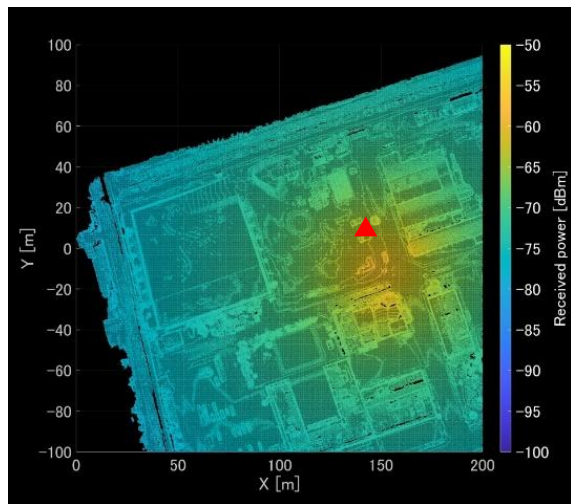


図-6 屋外実験ヤードと周辺の受信電力の一例
(2.4GHz)

4.2 ローミング技術に基づくシミュレーション

基本的なローミングポリシーを3つ検討した。

(a) ランダムなアクセスポイントの選択：受信信号電力や位置を想定していない。

(b) 受信信号電力ベースのアクセスポイントの選択：受信信号電力の高いアクセスポイントを選択する。

(c) 位置情報に基づくアクセスポイントの選択：建設機械の位置を把握し、受信信号電力に関わらず位置の近いアクセスポイントを選択するようにする。

受信電力の瞬時変動をシミュレーション空間に組み込みつつ、実験ヤード内に2台の建設機械が配置されている想定にした。ローミングポリシー毎の理想スループットを累積分布特性(CDF)として確認した。

図-7、図-8に、2.4GHz帯と5.6GHz帯のスループットの累積分布特性となる。赤線が(a)、青線が(b)、黒線が(c)のローミングポリシーとなる。表-2に、累積分布特性の1%値と10%値の結果を示す。

図-7及び表-2より、2.4GHz帯においては位置情報に基づくローミングポリシーによって、建設機械の配置に依存するものの、累積分布の1%値や10%値に注目すると理想スループットの向上を確認できた。1%値と10%値において、受信信号電力ベースのローミングポリシー(b)のときよりも、位置情報を活用するローミングポリシー(c)の方が約18%と約32%高くなる。

図-8及び表-2より、5.6GHz帯においては位置情報に基づくローミングポリシーによって、建設機械の配置に依存するものの、累積分布の10%値に

注目すると理想スループットの向上を確認できた。10%値において、受信信号電力ベースのローミングポリシー(b)のときよりも、位置情報を活用するローミングポリシー(c)の方が約17%高くなる。

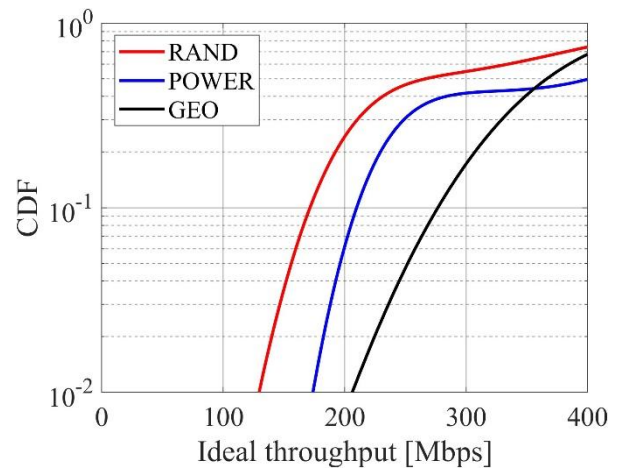


図-7 スループットの累積分布特性 (2.4GHz)

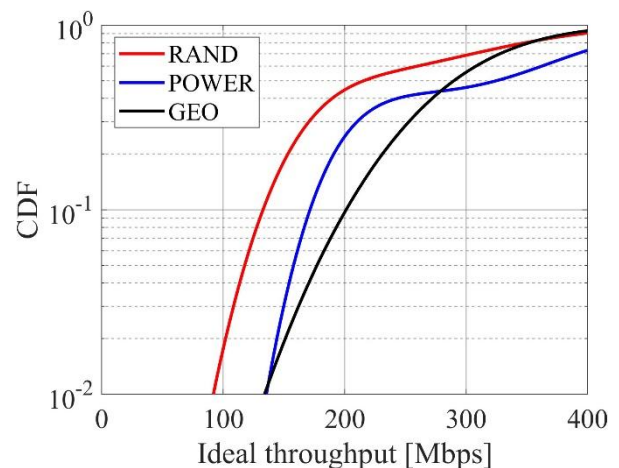


図-8 スループットの累積分布特性 (5.6GHz)

表-2 累積分布特性の結果

周波数	ポリシー	累積分布特性 [Mbps]	
		1%値	10%値
2.4GHz	a	130	171
	b	174	210
	c	206	277
5.6GHz	a	92	133
	b	136	171
	c	134	201

5. ローミング技術と統合予定の映像伝送技術

ローミング技術に合わせて、映像伝送技術との統合化を行う予定である。

4K 全天球カメラで撮影した映像全体を操縦者側に送信し、HMD側でその一部を切り取ることで投影

しており、HMD 本来の性能よりも画質が低下してしまう問題があった。そこで、全天球カメラに代えて、パン・ズーム・チルトが可能な PTZ カメラを使用し、HMD を装着した操縦者が向く方向とカメラを連動させることで高画質な映像のまま HMD に配信することを実現する。以下の 3 点に関して研究成果を得ている。

5.1 2 種類の性質の異なる PTZ カメラの選定とソフトウェアによる遠隔制御の確立

特性の異なる 2 つのカメラを導入し、遠隔地からソフトウェアで制御する方法を確立した。

1 つは、監視カメラとして設計されたカメラであり、通信規格として ONVIF を採用する。そのため、ソフトウェア側からは ONVIF に準拠した信号を送信することでカメラを制御可能である。

もう一方は、ドローンや自律型ローバーなどのロボットに搭載されることを想定した PTZ カメラであり、独自の制御信号を Ethernet 回線上の UDP や TCP で送信することで制御する。この 2 種類のカメラは異なる用途で設計されており、両方を評価することで重機の遠隔操縦により適したカメラを採用する。この 2 種類の PTZ カメラに対してどちらもプログラムによる遠隔制御を実現し、システムから制御することが可能となった。

5.2 HMD が向く方向と PTZ カメラの方向を連動させる技術の確立

PTZ カメラに対して、操縦者が装着した HMD の方向と PTZ カメラの方向を連動させ動作させるシステムを開発した。HMD は海外製の製品を採用した。この HMD は外部にベースステーションを設置しない場合でも HMD 単体で向きを検出する機能を有しており、また映像の解像度も高いことが特徴である。HMD と PTZ カメラの連動は実現できており、カメラの映像を HMD に配信するシステムの開発に取り組んでいる。

5.3 PTZ カメラの方向を現在角から目標角に対して直線的に制御する技術の確立

PTZ カメラの制御に関する検証を進める中で、1 つのカメラにおいては、ある目標角度にカメラを回転させる際、パン方向とチルト方向がそれぞれ独立に最速で目標角度に到達するように制御されるため、目標角度に対して直線的に動作しないことが分かった。このような現象は ONVIF で制御される他の PTZ カメラでも起こりうる現象であると判断し、本研究ではカメラを現在角度から目標角度に向けて直線的に制御する制御方法を確立した。

6. まとめ

システムの概要としての無人化施工技術や遠隔操作システムと自動走行制御を示し、提案するローミング技術に基づくハードウェア構成について

説明した。さらに、ローミング技術を用いた数値シミュレーション結果により、位置情報ベースでのポリシーを使うことで累積分布特性の 10% 値において理想スループットの改善を確認できた。さらに、ローミング技術と統合する予定の作業負荷低減と作業効率向上を実現する遠隔操作を支えるカメラ制御技術について説明した。

以降の研究開発では、得られた情報を元に開発する AI のアルゴリズムを実装して、ローミングプラットフォームで評価することが目標である。またそのローミングのプラットフォームについては、令和 6 年度に開発した装置一式をフィールド実験に向けて、コンパクトな実装に改良する。

建設機械に対するローミング機能付き無線機の接続試験を行うために、熊谷組の屋外実験ヤードに建設機械（不整地運搬車）2 台を用意し（図-9）、ローミング機能付き無線機を搭載して 2 台の AP との通信を行う。位置情報に基づいて AP が切り替わることを確認しつつ、スループット並びに遅延測定を実施する。



図-9 使用予定の建設機械（不整地運搬車）

自動走行システムへの適用のために、ローミングポリシーに基づくアクセスポイントの選択をした上で、建設機械の自動走行システムを適用し、屋外実験ヤード上における自動走行の動作確認を行う。並行して PTZ カメラが撮影した映像をリアルタイムで HMD に表示するシステムを開発する。その後、実際に PTZ カメラを重機に搭載する方法を検討の上実装し、遠隔地から HMD による映像で遠隔操縦する実証実験を実施する。

この実証実験における評価の観点としては、(1)HMD の角度変化に対して PTZ カメラが追従するまでの遅延時間、(2)カメラで撮影した映像が HMD に表示されるまでの遅延時間、(3)HMD に表示される画像の画質、(4)操縦者の操縦性、(5)ズームや、複数のカメラを用いて視点を切り替える機能などより操縦性を高める機能に関する考察、などの項目で検討を行う。

謝辞

本研究は国土交通省の建設技術研究開発助成制度 JPJ000094 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 国土交通省：「i-Construction 2.0」を策定しました～建設現場のオートメーション化による生産性向上（省人化）～，報道発表資料，2024年
- 2) 竹下嘉人・飛鳥馬翼・中須賀大樹：ネットワーク対応型無人化施工システムの盛土施工現場への適用，令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会，VI-115，2024年
- 3) 飛鳥馬翼・畑本浩伸・北原成郎・竹下嘉人：実施工現場における自動走行技術の評価－開発した2つのシステムの比較－，令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会，VI-116，2024年
- 4) 二村峻太・滝田真哉・西行和・飛鳥馬翼：令和6年能登半島地震におけるDXを活用した災害対応，令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会，VI-199，2024年
- 5) 二村峻太・高村忠勝・石山正太郎・飛鳥馬翼・天下井哲生・村上誠弥：令和6年能登半島地震における無人化施工の夜間導入とその評価，令和7年度土木学会全国大会第80回年次学術講演会，VI-1171，2025年
- 6) 飛鳥馬翼・高村忠勝・石山正太郎・二村峻太：令和6年能登半島地震における自動走行技術の導入とその効果，令和7年度土木学会全国大会第80回年次学術講演会，VI-1172，2025年
- 7) 三瓶政一：ワイヤレス通信工学，オーム社，2014年

3. PC 圧着接合によるプレキャスト栈橋工法の開発

ー工場製作部材を活用したフルプレキャスト施工ー

五洋建設(株) 技術研究所 ○ 池野 勝哉
五洋建設(株) 技術研究所 田中 智宏
(株)日本ピーエス 工事本部 天谷 公彦

1. はじめに

近年、建設現場の担い手不足を背景に、プレキャスト部材を活用した現場施工の省力化技術が求められている。とりわけ、港湾工事における栈橋上部工のプレキャスト施工は、海上作業を大幅に省略できるため、工期短縮や省人化はもとより、安全性の向上やコンクリート構造物の品質確保などの効果が期待できる。そこで、栈橋上部工を構成する部材を全て工場で製作し、現地へ陸上運搬した後、ポストテンション方式のプレストレスにより組み立てるプレキャスト栈橋工法（以下、本工法）を開発した。本工法は、従来の現場打ちによる工法と比較して上述した種々の効果が期待できるとともに、プレストレストコンクリート（以下、PC）構造とすることで上部工の軽量化が図れるため、地震時慣性力の軽減による合理的な設計が可能となる。

本論文では、本工法の構造および施工方法について説明し、設計法の概要について述べる。さらに、本工法の実物大模型を用いた施工性確認実験を示し、最後に現場適用事例を紹介する。

2. 本工法の構造および施工方法

2.1 構造概要

本工法の概要を図-1 に示す。本構造は2種類のプレキャスト部材（杭頭部材、梁部材）で構成されており、それぞれ陸上運搬が可能なサイズ（幅2.5m、長さ12m、高さ2.3m、重量20t以下）で工場製作する。杭頭部材と鋼管杭との連結には鞘管方式¹⁾を採用し、鋼管杭の打設後に杭頭部材を架設し、鞘管と鋼管杭の隙間に無収縮モルタルを充填

することで一体化を図る。ここで、鞘管は鋼管杭の平面的な打設精度（管理基準 ± 100 mm）を考慮し、鋼管杭の直径よりも+200~300 mm 程度大きいものを選定することで、鋼管杭の打設誤差を吸収可能としている。梁部材は、陸上運搬を前提として軽量化と施工性に配慮した逆U字形断面を採用している。両部材のシースを接続し、幅20~30 mm程度の目地部に無収縮モルタルを充填する。その後、現地でポストテンション方式のプレストレスを導入することで、プレキャスト部材同士が圧着接合される。杭頭部材には梁受け材を設けることで、逆U字形断面の梁部材を上方からはめ込むように架設できるため、施工時における波浪や潮流の影響に対する安定性を向上している。

2.2 施工方法

本工法には単独架設タイプとプレ連結架設タイプの2種類の施工方法がある。ここでは、紙面の都合上、単独架設タイプの施工フローを図-2 に示す。単独架設タイプは搬入した部材をそれぞれ単独に架設する方法であり、搬入車両から部材を直

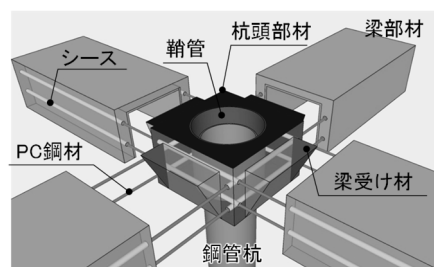


図-1 本工法の概要

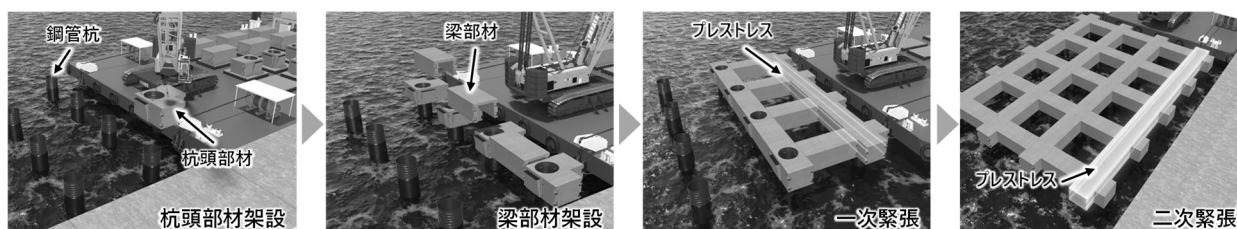


図-2 施工フロー（単独架設タイプ）

接架設できるため、陸上ヤードの広さが限られる場合においても適用が可能である。他方、プレ連結架設タイプは現地搬入した数点の部材を予め陸上ヤードで組み立てを行い、一次緊張によって連結部材を形成する。この連結部材を鋼管杭に架設し、一次緊張と直交する方向の梁部材を架設した後、二次緊張によって一体化を図るものである。

3. 設計法の概要

3.1 梁部材および杭頭部材の終局曲げ耐力

杭頭接合部には、地震時に外力として正負曲げモーメントが作用するため、それぞれの方に対して断面照査を行う。プレストレスを導入した逆U字形梁部材の終局曲げモーメントは、図-3に示す平面保持を仮定したひずみ-応力分布の力の釣り合い式から求める。

そこで、本工法の終局曲げ耐力や設計法の妥当性を確認するため、鋼管杭と上部工の一部を逆T形試験体とした正負交番載荷実験²⁾(写真-1)を実施した。従来の現場打ちによる「RC構造」と本工法の「PC圧着接合」の2ケースについて、鋼管杭基部の外縁が降伏した時の水平変位 δ_y を整数倍し、 $\pm 1\delta_y \sim \pm 5\delta_y$ の各ステップを3サイクルずつ繰り返した。実験で得られた荷重-変位関係を図-4に示す。図中より、「RC構造」の履歴ループはくびれた紡錘形状を示し、変位ステップ後半では水平荷重ゼロ付近で変位が進行するスリップ現象が明確に確認できる。一方、「PC圧着構造」はスリップ現象は見られず、残留変位の少ない紡錘形状を示した。一例として、 $+3\delta_y$ 時における試験体側面の損傷状況を図-5に示す。「RC構造」は杭頭部のひび割れ損傷の拡大・進展に伴い曲げモーメントを負担できなくなるのに対し、「PC圧着構造」は、接合面の弾力的な開閉挙動によって変形を吸収するため、梁部材へのひび割れ進展は限定的である。表-1に終局曲げ耐力の比較(実験値、設計値)を示す。ここで、設計値とは材料試験値を物性値として求めた終局曲げ耐力である。設計値に対する実験値の比は1.2~1.5であり、安全側に終局曲げ耐力を評価できることを確認した。



写真-1 交番載荷実験の状況

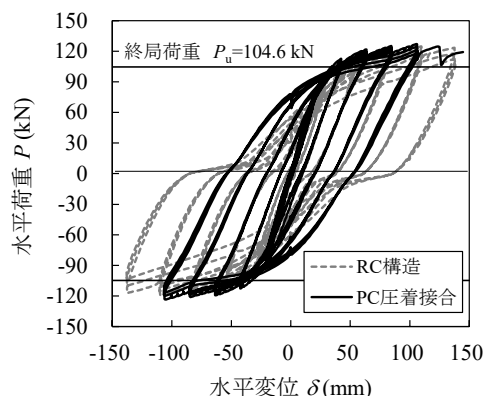
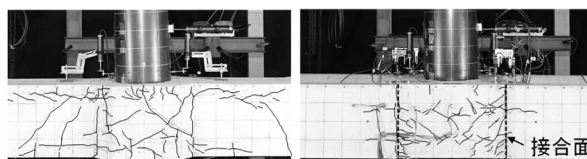


図-4 荷重-変位関係 (交番載荷実験)



(a) RC 構造 (b) PC 圧着接合

図-5 試験体側面の損傷状況 ($+3\delta_y$ 時)

表-1 終局曲げ耐力の比較

実験ケース	終局曲げ耐力			実験値 設計値
	設計値(鋼管杭) P_p (kN)	設計値(梁部) P_u (kN)	実験値 P_{max} (kN)	$\frac{P_{max}}{\min(P_p, P_u)}$
RC構造 正負曲げ	127.6	105.7	124.8	1.2
PC圧着接合	127.6	104.6	127.0	1.2
	127.6	87.3		1.5

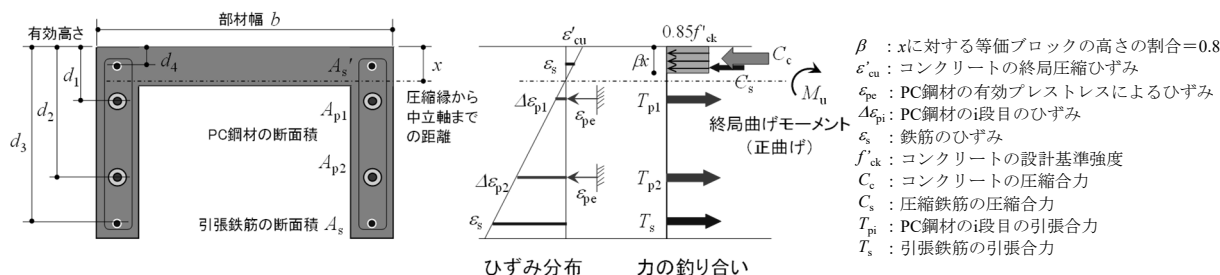


図-3 逆U字形梁部材のひずみ-応力分布 (正曲げの場合)

3.2 梁部材および接合部のせん断耐力

プレストレスを導入した梁部材のせん断耐力は、修正トラス理論に基づきコンクリートが負担するせん断耐力と、鉄筋が負担するせん断耐力の累加により評価する³⁾。接合部のせん断耐力は、主としてプレストレスによる摩擦力に期待し、せん断抵抗係数 μ を0.3とした式(1)により評価する。

$$V_{pf} = \mu P_e \cos \theta_p \cdots \cdots (1)$$

V_{pf} : 摩擦力が受け持つせん断耐力
 μ : せん断抵抗係数 (0.3)
 P_e : PC 鋼材による有効プレストレス
 θ_p : 有効プレストレスが接合面となす角度

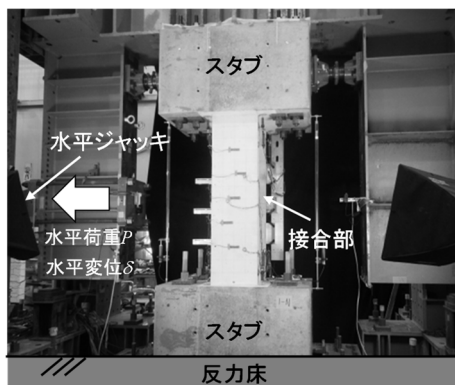


写真-2 せん断実験の状況

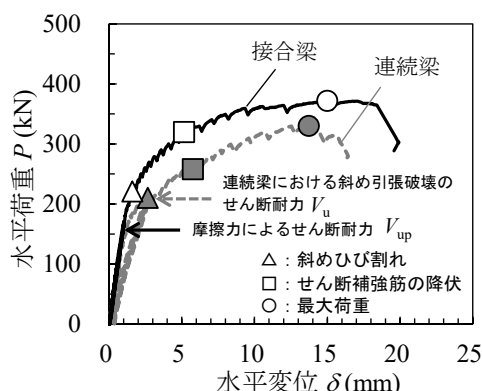


図-6 荷重－変位関係（せん断実験）



(a) 連続梁 (b) 接合梁

図-7 最大荷重時のひび割れ性状

ここで、せん断抵抗係数 μ の妥当性を確認するため、写真-2 に示すせん断実験⁴⁾を実施した。試験体のスタブ下端を反力床、スタブ上端を回転拘束した門形治具により固定し、水平ジャッキで門形治具を水平にスライドさせることで、模型の接合部に均質なせん断力を作用させ、接合部のせん断耐力や部材の一体性について確認した。実験は、連続梁および試験体中央で接続した接合梁の2ケース実施した。接合梁では逆U字形断面の梁部材端部を梁中央部で目地幅10mmで突合せ、隙間に無収縮モルタルを充填した。その後、ポストテンション方式でプレストレスを導入し、スタブと梁部材を一体化した。実験で得られた荷重－変位関係を図-6、せん断耐力の比較（実験値、設計値）を表-2にそれぞれ示す。設計値は材料試験値を用いて求めた。連続梁は、斜めひび割れが生じた後、斜め引張破壊による設計せん断耐力 $V_u=242$ kN時には剛性が低下した。一方、接合梁は接合部の摩擦力（せん断抵抗係数 $\mu=0.3$ ）による設計せん断耐力 $V_{up}=200$ kNにおいて線形的に振る舞い、梁部材の斜め引張破壊によって荷重が低下した。最大荷重時におけるひび割れ性状を図-7に示す。実験では2ケースともスタブ基部付近に曲げひび割れが生じた後、試験体中央付近から斜めひび割れが発生した。その後、せん断補強筋が降伏し、斜めひび割れが試験体の右斜め上方あるいは左斜め下方に進展して荷重低下に至っている。連続梁および接合梁ともに破壊形態は斜め引張破壊となり、接合梁では接合部に沿ったひび割れの貫通は確認されていない。以上より、接合部に作用する摩擦力（せん断抵抗係数 $\mu=0.3$ ）によって、接合梁の一体性が確保されるとともに、安全側にせん断耐力を評価できることを確認した。

表-2 せん断耐力の比較

実験ケース	連続梁	接合梁
① 斜め引張破壊に対する設計せん断耐力 V_u (kN)	242	343
② 接合部の摩擦力による設計せん断耐力 V_{up} (kN)	—	200
③ 実験値 V_{max} (kN)	330	372
実験値 / 設計値	V_{max} / V_u	1.4
	V_{max} / V_{up}	1.9

4. 施工性確認実験

本工法の施工は、鋼管杭に杭頭部材（あるいは連結部材）を架設し、杭頭部材の梁受け材に逆 U 字形断面の梁部材を上方からはめ込み、両者のシースを接続する。その後、目地部に無収縮モルタルを充填したうえで、連続したシース内に PC 鋼材を挿入し、所定のプレストレスを導入するという工程となる。杭頭部材架設に伴い生じる杭頭部材間の相対ずれは、後続の施工工程に影響を与える。そこで、杭頭部材間に任意の相対ずれを与えた条件下において、梁部材の実物大模型による架設実験を行い、各工程の施工性を確認した。

4.1 実験概要

実験は実物大模型を用いて、杭頭部材間に想定される最大の相対ずれを与えた。試験体概要図を図-8 に示す。相対ずれは、港湾工事共通仕様書⁵⁾の出来形管理基準を参考に、栈橋上部工の法線に対する出入 ± 30 mm、天端高 ± 20 mm のそれぞれを 2 倍し、平面ずれ 60 mm (y 方向)、鉛直ずれ 40 mm (z 方向) とした。杭頭部材と梁部材間における目地幅の設計値は 30 mm と設定し、杭頭中心間距離は栈橋における一般的な距離と同程度の 4,950 mm とした。また、目地部にモルタルを充填する際の型枠工程を簡略化するため、予め杭頭部材の梁受け

材側面にシール材を設置することで内型枠の代替とする工夫を試行した。その他、直径約 60 mm の模擬 PC 鋼材を用い、シースの連続性および PC 鋼材の挿入可否を確認した。モルタルの充填では、梁外面および底面型枠、梁内面シール材からの漏出の有無について確認した。

4.2 施工性の評価

実験状況を写真-3 に示す。杭頭部材間に想定される最大の相対ずれを与えた条件下において、梁部材は杭頭部材との接触や干渉が生じることなく架設可能であった。杭頭部材と梁部材間の設計目地幅値 30 mm に対し、架設完了時に最も狭い箇所でも 12 mm、最も広い箇所でも 51 mm であり、モルタル充填のための隙間を確保できていた。このことより、杭頭部材と梁部材間の設計目地幅は 30 mm を確保すればよいと判断した。また、シース内に挿入した模擬 PC 鋼材は支障なく通過し、PC 鋼材の挿入が可能ことが確認された。目地部へのモルタル充填では、試行 3 回のいずれにおいても、梁外面および底面型枠、また内面シール材からモルタルの漏出は認められず、実験終了後に梁部材を撤去したところ、目地部に未充填の箇所は見受けられなかった。本実験を通じ、これら一連の工程が確実に施工できることを確認した。

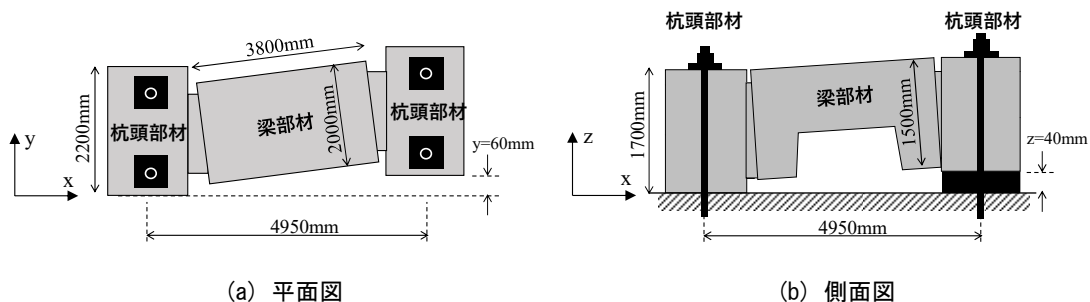


図-8 試験体概要図



写真-3 実験状況

5. 現場適用事例

5.1 工事概要

民間発電施設の建設にあたり、専用栈橋の構築が計画された。本工事において、工期短縮と品質向上を目的として、専用栈橋の上部工にプレテンション方式中空ホロー桁を用いたPC栈橋、栈橋形式の連絡橋の上部工には本工法、護岸渡橋部にポストテンション方式中空ホロー桁が採用された。専用栈橋および連絡橋の平面図を図-9に示す。本工法を適用した連絡橋は、延長53.6m×幅員9.2m、鋼管杭 $\phi 800\text{mm} \times 19$ 本、上部工は杭頭・梁連結部材 $\times 8$ 基、梁部材 $\times 16$ 基、橋台部材 $\times 3$ 基および床版部材 $\times 32$ 基のフルプレキャスト施工である。連絡橋の一般図を図-10に示す。ここで、本連絡橋の幅員が9.2mと比較的狭いことから、図-11に示すように幅員方向の杭頭部材および梁部材は、工場にて製作・一体化した連結部材を陸上運搬した。また、護岸渡橋部の主桁は桁長が26.0mと長く、連絡橋の端部に設置されるため、陸側端部の杭に大きな支点反力が作用する。この反力に対応するため、陸側端部のみ鋼管杭を3本の配置に変更した。また、支承部となる本工法の張出部の部材は図-11の右側に示すよう、橋台部材として大型化することにより耐力を確保し、陸上運搬を考慮して3分割構

成とした。これらにより、架設作業、目地部のモルタル充填、シースの接続作業、および一次緊張といった、現場における作業数を大幅に削減した。

5.2 施工状況

重量の大きな杭頭・梁連結部材および橋台部材の架設には500t吊の起重機船を用い、梁部材および床版部材は100t吊のクレーン付き台船を用いた。橋台部材および杭頭・梁連結部材の架設では、鋼管杭と鞘管との相対ずれが最大73mm生じたが、予め両者の間に設けたクリアランスにより吸収されたため、部材は特段の支障を生じることなく、設計位置に架設することができた。続いて、橋軸方向

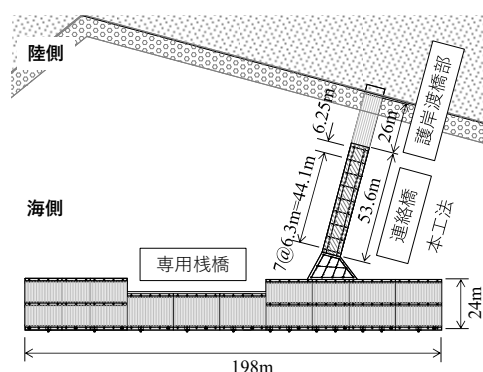


図-9 専用栈橋および連絡橋の平面図

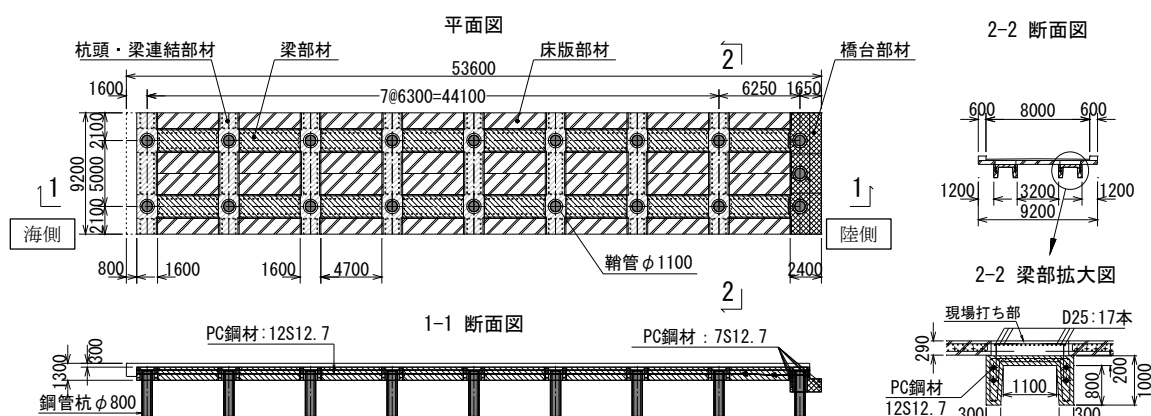


図-10 連絡橋一般図 [単位: mm]

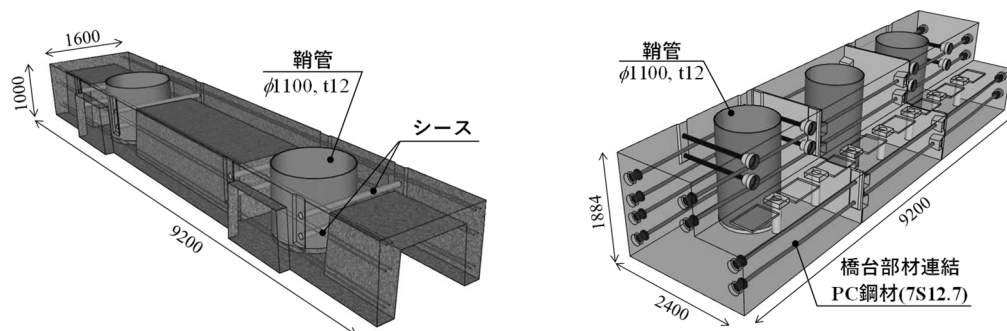


図-11 杭頭・梁連結部材 (左図: 一般部, 右図: 橋台部材) [単位: mm]

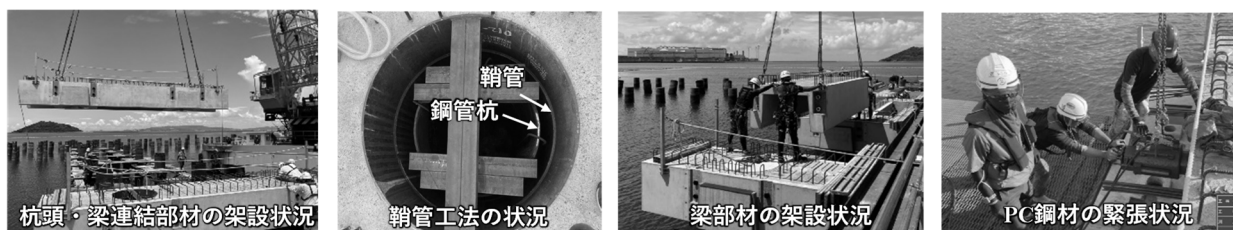


写真-4 施工状況

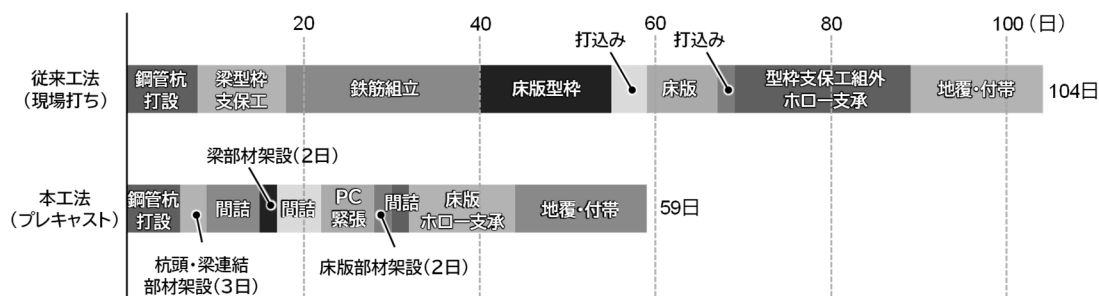


図-12 工期短縮効果

の梁部材を架設後、設計幅 30 mm の目地部に無収縮モルタルを充填した。その後、1つの梁部材あたり 4本の PC 鋼材 (12S12.7) を用い、緊張ジャッキで二次緊張し圧着接合した。そして、床版部材を架設し、各床版間に現場打ちコンクリートの打込みを行った。工事の施工状況を写真-4 に示す。なお、本工法の延長における部材の架設精度は+6 mm (管理基準: 0~+規定しない) であった。

5.3 本工法が生み出す効果

本工事における従来工法の現場打ちコンクリートとの比較を図-12 に示す。従来工法では、型枠・支保工組立や鉄筋組立、コンクリート打込み、型枠・支保工組外やホロー支承および地覆・付帯まで 104 日の計画であったが、本工法によって連絡橋を構成する全てのプレキャスト部材をわずか 7 日間で架設し、他工種を含めて計 59 日となり、約 40 % の工期短縮を実現した。当該工事の完成写真を写真-5 に示す。

なお、定量的に示すことは難しいが、工場製作による高品質のプレキャスト部材を用いることにより、従来よりもコンクリート構造物の品質が向上すること、不安定な海上作業を大幅に省略できるため災害リスクが低下し、安全性が向上するなどの副次的な効果も期待される。

6. おわりに

本論文では、PC 圧着接合を用いたプレキャスト栈橋工法について、その構造概要から施工方法、設計法の妥当性を示す実験的検討、そして現場実装に至るまでの一連を概説した。また、現場適用事例を通して、本工法の施工性および工期短縮効果に

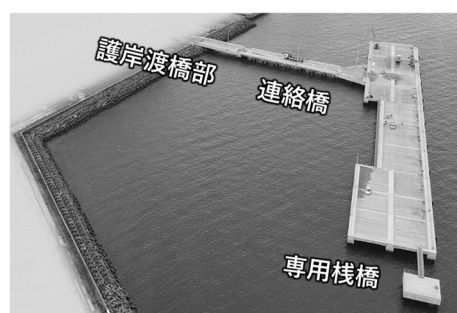


写真-5 完成写真

ついて示した。本論文が港湾工事におけるプレキャスト工法導入の更なる促進の一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) 池野勝哉, 岩波光保, 川端雄一郎: 鞘管方式による栈橋鋼管杭の杭頭接合部に関する交番載荷実験, 構造工学論文集, Vol. 64A, pp. 724-733, 2018.
- 2) 池野勝哉, 石塚新太, 天谷公彦, 前嘉昭, 川端雄一郎, 加藤絵万, 岩波光保: PC圧着した栈橋杭頭接合部の力学的挙動に関する実験および解析的検討, 構造工学論文集, Vol. 67A, pp. 605-618, 2021.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説IIIコンクリート橋・コンクリート部材編, pp. 149-173, 2017.
- 4) 石塚新太, 池野勝哉, 天谷公彦, 前嘉昭, 川端雄一郎, 加藤絵万, 岩波光保: プレストレスにより圧着した栈橋プレキャスト接合部のせん断耐力評価, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 77, No. 2, pp. I_385-I_390, 2021.
- 5) 国土交通省港湾局: 港湾工事共通仕様書, 2021.

4. 3D プリンタにより製作した埋設型枠を用いた プレキャスト部材の適用事例の報告

株式会社大林組 ○吉村 瑞貴 西村 俊亮 小俣 光弘
北村 勇斗 宮入 斎
日本ヒューム株式会社 田口 拓望

1. はじめに

建設業では就労者数の減少に伴い、生産性向上が喫緊の課題となっている。その解決策の1つとしてコンクリート構造物のプレキャスト(以下、PCa)化が挙げられる。PCa工法は、鋼製の型枠を繰り返し使用することで同一部材を効率的に製造できるという特長がある。一方で形状が特殊な部位については型枠の持ち合わせがないため、PCa化には鋼製型枠の検討・製作から行う必要があり、コストおよび納期の面で課題がある。その解決方法の1つとして、3Dプリンタを用いて製作した埋設型枠(以下、3DP埋設型枠)を使用することが有効と考えられている。本稿では、L型擁壁の隅角部に3DP埋設型枠を用いたPCa化を適用した事例について、検討、製作、施工およびそれらの評価をとりまとめる。

2. 現場の条件

対象構造物は、国土交通省中部地方整備局発注の新丸山ダム本体建設工事の仮設備におけるL型擁壁である。図-1に示すようにL型擁壁を配置し、周囲より4m程高い地盤面を造成する。直線区間である標準部は既製品のPCa擁壁(H=4.5m)を設置する。一方、3か所のコーナー部については既製品がないため当初現場打設で計画を進めていたが、現場工程の短縮および効率化を目的に、標準外であるコーナー部に対応したPCa部材の製作の検討を行うこととした。新たに鋼製型枠を製作すると納期に余裕がなかったため、3DP埋設型枠の適用を決定した。

3. 製作方法の検討²⁾

図-2に3DP埋設型枠によるPCa化の検討フローを示す。

3.1 条件整理

現場の施工効率が最も高いのは、対象物を分割することなくPCa化することである。しかしその場合、重量・寸法が大きく運搬できない、

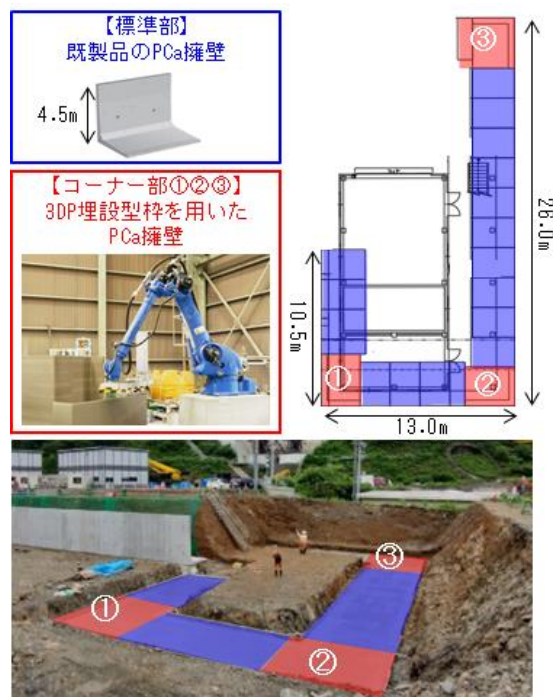


図-1 PCa部材設置箇所

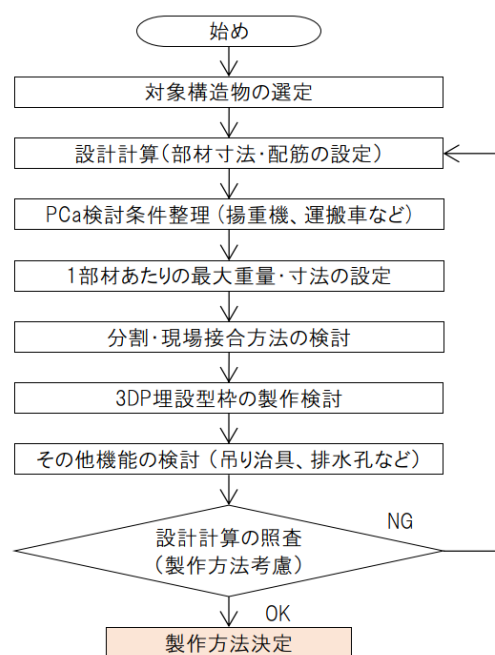
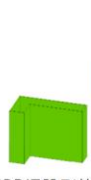




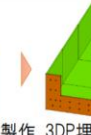
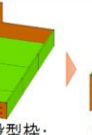
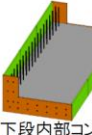
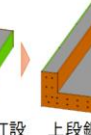
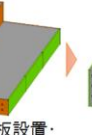


図-2 3DP埋設型枠によるPCa化の検討フロー

表-1 3DP 埋設型枠の比較

項目	【案①】壁を立たせた状態で製作	【案②】壁を寝かせた状態で製作
製作 ステップ	   	     
メリット	<ul style="list-style-type: none"> ・製作方法がシンプルでわかりやすい。 ・支保工を確実に行えば、内部コンクリートを1回で打設できる可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・内部コンクリート打設時の側圧による型枠破損リスクが低い。 ・足場や転倒防止の設備が不要となる。 ・コンクリートの充填が確認しやすい。
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> ・内部コンクリート打設時の側圧による型枠破損リスクが高く、対策には追加設備や打設速度の調整が必要となる。 ・足場や転倒防止の設備が必要となる。 ・コンクリートの充填が確認しづらい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・薄板の3DP埋設型枠を寝かせる作業が発生し、型枠破損のリスクがある。 ・内部コンクリートの打設を2回に分ける必要がある。

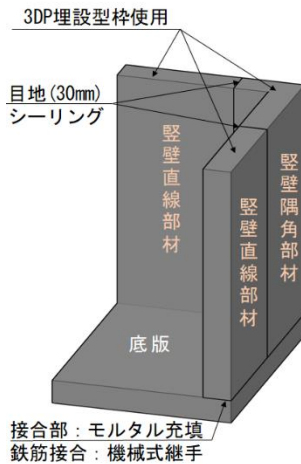


図-3 コーナー部の分割

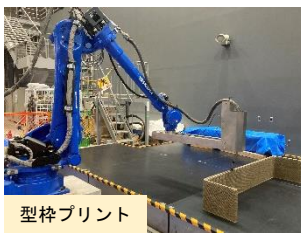


写真-1 製作状況

使用する揚重機が大型になるといったデメリットが生じる。そのため、現地で使用できる揚重機、運搬車を考慮した部材の分割を検討する必要がある。本ケースでは一般部のL型擁壁を設置するために、220tのオールテレーンクレーンを使用する計画であったため、コーナー部についてもそれを用いて揚重することとした。運搬には低床トレーラーを使用することとし、両条件より部材あたりの最大重量を10t、短辺方向の最大寸法を2.99mと設定した。

3.2 分割検討

3.1で決めた条件に基づき分割を検討する。設計計算の結果、コーナー部の重量は約32tとなったため、底板、壁隅角部材、壁直線部材(2部材)の4部材に分割することとした(図-3)。壁直線部材は2部材あるが、製作上の人為的ミスを防止するために、仕様を統一した。

3.3 継手・目地の検討

底板と壁部材の接合については、軸方向鉄筋をモルタル充填式の機械式継手で接合する仕様とした。部材間には20mmの隙間を設けておき、機械式継手にモルタルを充填すると同時に隙間にもモルタルが充填される構造とした。

壁部材間の目地については3Dプリントの製作誤差が大きいことを考慮し、設計図上30mmの隙間を設けた。隙間は現地組立後にシーリング材で充填することとした。

3.4 製作方法検討

壁部材に対して3Dプリンタの適用を検討した。使用する3Dプリンタはロボットアーム方式である。3Dプリンタの可動範囲、材料の特性を踏まえて、壁部材は高さ方向に3分割してプリントすることとした。製作方法は2通りの方法を比較した(表-1)。表-1の案①が最もシンプルな考え方であるが、内部にコンクリートを打設するときの側圧対策が困難、生コンの充填確認が困難など課題が多い。これらの課題は今後の技術の発展で解決できる可能性があるものの、検討時点ではリスクの少ない案②の方が実現性が高いと判断し、案②の製作方法を選定した。

3.5 製作³⁾

写真-1に実際の製作状況を示す。

(1) 3DP埋設型枠製作

3DP埋設型枠は専用のプリント材料を積層して製作する。積層幅は15mm×2列、1層あたりの高さは5mmとした。

(2) 3DP埋設型枠・鋼製型枠設置

3つに分割した3DP埋設型枠と鋼製型枠を組み立てた。各型枠間にはゴム材(EPDM, t=10mm)を挟み壁部材としての寸法を調整した。天端面および下面に設置する鋼製型枠は吊り治具および機械式継手の固定のために必要となる。

(3) 鉄筋かご建込み

別途組立した鉄筋かごを型枠内に配置した。機

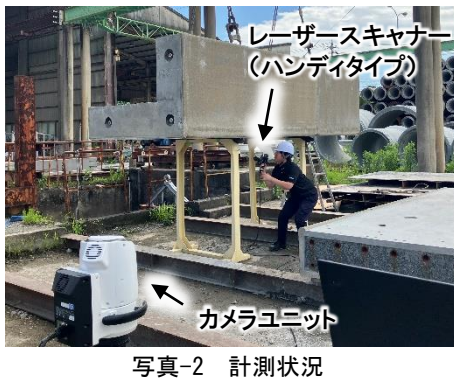


写真-2 計測状況

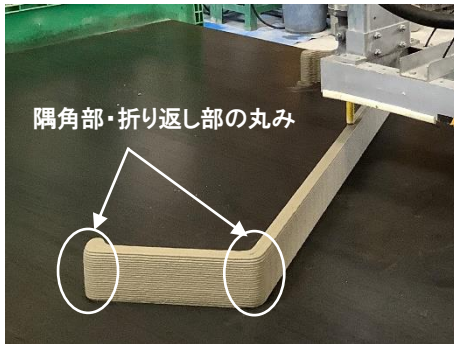


写真-3 3DP 埋設型枠製作状況

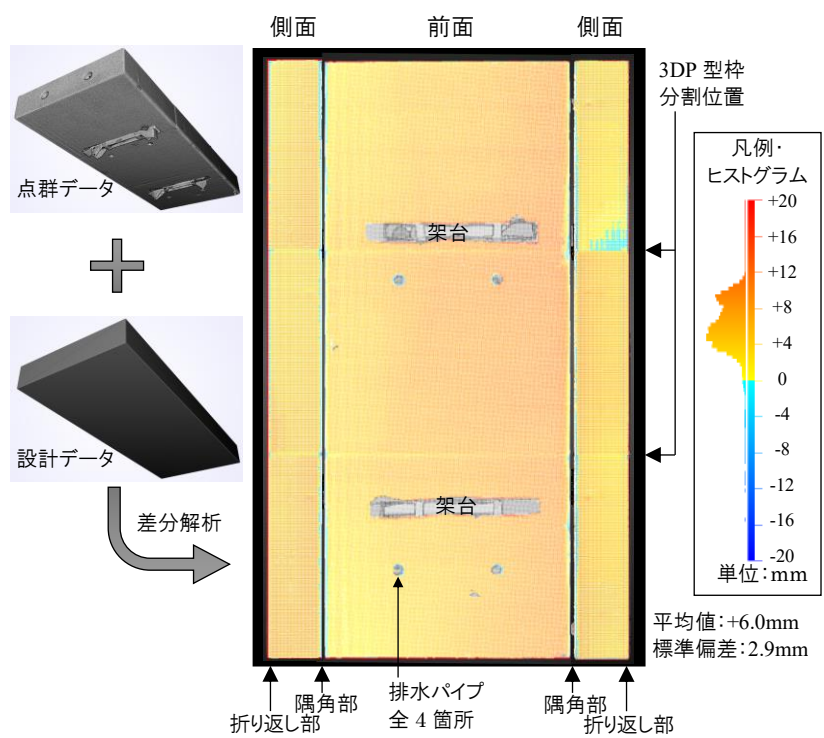


図-4 出来形の点群データと設計データの差解析結果

械式継手を鋼製型枠に固定し、かぶり部にスペーサーを配置することで鉄筋かごの位置を固定した。
(4) 下段内部コンクリート打設

内部コンクリートを打設した。積層の層間にもコンクリートのモルタル分が充填されるように、かぶり部分は入念に締め固めた。

(5) 上段型枠設置・上段内部コンクリート打設

堅壁隅角部材については、下段コンクリート打設後に鋼製型枠を設置し、上段コンクリートを打設した。

4. 精度検証⁴⁾

3D プリンタは可塑性のプリント材料を積層しながら造形するという特性上、一般的な型枠に比べて製作誤差が生じやすい。また、本ケースでは別々に製作した3DP埋設型枠を組み立てる方法を採用したため、製作誤差が出やすい条件であった。そこで、3次元レーザースキャナーを用いて3次元計測を行い、精度の検証を行った。

4.1 検証方法

レーザースキャナーにはハンディタイプの機械を用いた。カタログ上の計測精度は0.1mm程度である。写真-2に計測状況を示す。3次元レーザースキャナーにより取得した部材の点群データに3次元設計データを重ね合わせ、3DP埋設型枠側の面を対象にそれらの差分をとることで出来形を評価した。

4.2 検証結果

図-4に差解析の結果を示す。色が付いていない箇所は計測用の架台や排水パイプを表しており、評価対象外である。

図-4のヒストグラムより、出来形は設計値に対して-5～+15mm程度の誤差であった。平均値で+6.0mm、標準偏差2.9mmであった。壁厚400mmに対して平均6mmの誤差であれば、1.5%程度の誤差となる。構造計算時には、制限値に対して80～90%程度で部材仕様を決定することが多いため、この程度の誤差であれば構造上問題となることはほとんどないといえる。部材断面が小さい場合には相対的に誤差の影響が大きくなるが、その対策としては予め誤差を考慮して3Dプリンタのパスを設定することが有効と考えられる。

出来形が設計データより5mm程度小さくできている箇所が全体の3%弱あったが、これは隅角部や3Dプリンタのパスの折り返し点といった特定の箇所に多く見られた。写真-3に示すように、可塑性のあるモルタルでは明瞭な角部を表現することが難しく、丸みを帯びた形状となるため、隅角部は設計データより小さくなったと考えられる。また、3段目の側面部が一部分的に小さくなっているが、これは3つの3DP埋設型枠を人的作業により組み合わせることによって生じたものである。

本ケースのように複数の部材を隣に並べるような場合には、3DP埋設型枠の側面の精度が特に重要となるため、上記のような誤差を考慮して製作検討を行う必要がある。



写真-4 施工状況

表-2 L型擁壁隅角部の工法比較

項目	①現場打設	②鋼製型枠によるPCa工法	③3DP埋設型枠によるPCa工法
概要	底板・壁：現場打設	底板・壁下部：現場打設、壁：PCa	底板：PCa、壁：3DP埋設型枠PCa
現場工程	底板：1週間、壁：2週間 合計：約3週間（型枠解体まで含む）	底板：1週間、壁下部：3日、PCa壁：3日 合計：約2週間	コーナー部1箇所につき0.5日 合計：約2日
PCa製作工程	-	3か月	2.5か月
メリット	・現場施工による費用削減	・壁の打設回避による工程短縮 ・打設回避による管理省力化	・フルPCa化による工程短縮 ・②に比べPCa部材の製作期間短縮(約2週間) ・打設回避による管理省力化
デメリット	・打設施工計画、現場安全管理が必要 ・現場工程が最も長い	・継手配置のため工程短縮効果は小さい ・①に比べて費用が掛かる	・①に比べて費用が掛かる
①との費用比較	1.00倍	2.52倍	2.42倍
判定（※工程優先）	△	○	◎

5. 施工³⁾

写真-4に施工状況を示す。施工方法は一般的なPCa工法と同様である。部材を分割したため機械式継手による接合作業が現場で発生するものの、現場搬入から据え付けまでの作業をコーナー部1か所につき半日、3か所合計で1.5日で完了し、工程短縮につながった。壁部材間に設けていた幅30mmの隙間は、実際に組み立てると狭いところでは数mmの隙間となった。予め誤差を考慮して調整代を設けたことでスムーズな施工を実現できた。

6. 3DP埋設型枠によるPCa工法の評価²⁾

3DP埋設型枠によるPCa工法を、現場打設、鋼製型枠によるPCa工法と比較した結果を表-2に示す。③3DP埋設型枠によるPCa工法は、①現場打設に比べると、費用が2.4倍になるものの、現場工程を約3週間から約2日に短縮できた。また、②鋼製型枠によるPCa工法に比べて型枠の検討・製作期間が短いため、製作工程を0.5か月短縮でき、現場施工に製作を間に合わせることができた。

6.1 3DP埋設型枠の優位性

本ケースのように現場打設からPCaに変更する場合には、鋼製型枠の検討・製作期間がネックとなることが多いが、3Dプリンタであればすぐに3DP埋設型枠の製作に取り掛かることができるため、その点で大きなメリットがある。

また費用に関しては、3DP埋設型枠によるPCa工法は、少数部材の製作であれば、鋼製型枠と同程度の費用で製作工程を短縮できることがわかった。一方で同じ部材を大量に製造する場合には、一度製作さえすれば何度も転用ができる鋼製型枠によるPCa工法に利がある。現場で重視する項目に応じて適用する工法を判断する必要がある。

6.2 3DP埋設型枠の課題と展望

3Dプリンタは発展途上の技術であることから、2025年時点では材料費が高く、製作にも人手がかかっている。今後の普及による材料費の低減、一連の製作システムの構築が実現すれば費用が下がり、適用の幅がさらに広がることが期待される。

また、鉄筋コンクリート構造物に3DP埋設型枠を適用する場合、内部コンクリート打設時の側圧に耐える必要がある。3DP埋設型枠を厚く製作するなどすれば改善するが、その分かぶりが大きくなり構造自体に無駄が生じる。引張に強いプリント材料や簡易な側圧対策を実現できれば製作はさらに簡略化できる。

7. まとめ

実現場への適用を通じて、3DP埋設型枠の有効性を確認できた。適用には3Dプリンタや製作・施工方法の特性を十分に理解し、予め計画に見込んでおくことが重要であり、それにより一般的なPCa工法と同等の施工性を実現できる。

参考文献

- 1) 小俣光弘，他：建設用3Dプリンターの一般構造物プレキャスト部材への適用，ダム工学会研究発表会，2024.11
- 2) 西村俊亮，他：3Dプリンターにより製作した埋設型枠を用いたプレキャスト部材の製作方法の検討事例，第52回土木学会関東支部技術研究発表会，2025.3
- 3) 西山愛梨，他：3Dプリンターにより製作した埋設型枠を用いたプレキャスト部材の製作，施工，出来形計測，第52回土木学会関東支部技術研究発表会，2025.3
- 4) 西村俊亮，他：3Dプリンターにより製作したプレキャスト部材の3次元計測による出来形の評価，令和7年度土木学会全国大会第80回年次学術講演会，2025.9

5. 切羽近傍からの吹付けコンクリート供試体採取ツール

ドリルジャンボで原位置から吹付けコンクリートコアを採取

西松建設株式会社

○ 辻岡 高志

原 圭太

フジモリ産業株式会社

小椋 孝太

1. はじめに

我が国の高齢化に伴う労働人口の減少は、建設業界における就業者の減少と高齢化を加速させており、生産性向上の観点から業務効率化が求められている。山岳トンネルの施工に用いる吹付けコンクリートは、トンネル施工長 40m 毎に材齢 7 日と材齢 28 日に圧縮強度の測定を行う¹⁾²⁾。圧縮強度試験には 3 本の供試体 ($\phi=5\text{cm}$, $h=10\text{cm}$) を用いて指定した呼び強度以上であることを確認するが、供試体を作製する際には、専用の型枠の組立てやコアドリルの設置といった複数の作業を行うために約 70 分もの時間を要しており（図-1）、現場職員の拘束時間の短縮が重要な課題となっている。

このような背景から、著者らは山岳トンネルの施工で汎用的に使用されるドリルジャンボで原位置から供試体を採取することを可能とするコアビットを開発した。ドリルジャンボを使用して原位置での供試体の採取を実現することによりコアドリルの準備や手配が不要となり、作業の省人化と現場職員の負担軽減が期待される。

2. コアビットの概要

開発したコアビットの写真を写真-1 に、仕様を表-1 に示す。コアビットの形状は、強度試験に用いる円柱供試体の直径と高さ ($\phi=50\text{mm}$, $h=100\text{mm}$) を確保できるように決定した。また、適用ネジは全てのドリルジャンボに対応可能であり、重量は 6kg 程度と比較的計量のため、ドリルジャンボへの脱着が容易である。

ビットの刃先形状を写真-2 に示す。通常、ドリルジャンボの削孔では削岩機で打撃を与える場合が多いが、ディスクリング等によるコアの損傷を防ぐため、回転とフィード（押しつけ）のみで供試体が採取できるように刃先形状を検討した。ドリルジャンボの左回転に適合する形状（写真-2 (a)）とし、削孔時に掘削屑を排出するため、コアビット内に水みちを設けた（写真-2 (b)）。

また、本装置はビット部とチューブ・スリーブ部

で構成されており、両者の切り離しが可能であるため、ビットを交換してもチューブ・スリーブ部を再利用できる。



図-1 従来の供試体採取手順



写真-1 開発したコアビット

表-1 コアビットの仕様

外径	内径	有効長	適用ネジ
70mm	50mm	440mm	R32

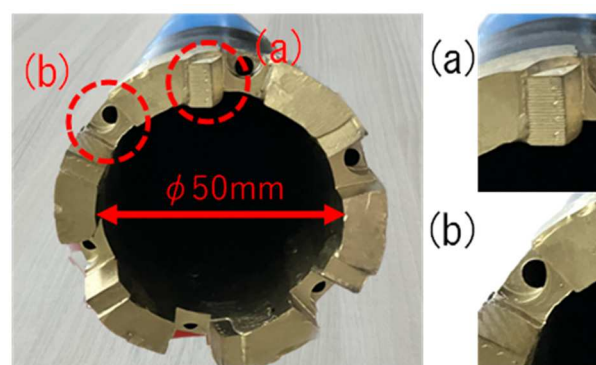


写真-2 コアビット刃先形状

3. 開発の成果

本装置を使用して、当社施工中の山岳トンネル現場にて供試体の採取試験を行った。現場の吹付けコンクリートは 18-22-15N であり、配合表は表-2 の通りである。

3.1 供試体の採取方法及び形状の確認

写真-3 に供試体の採取状況、写真-4 に採取した供試体の形状を示す。天端、肩部、側壁で採取を実施し、ドリルジャンボの稼働範囲であればどこからでも採取が可能であることを確認できた。

3.2 供試体採取時間の確認

本装置で 10 本の供試体を採取した結果、削孔速度にばらつきがあるものの平均値は 7.1cm/min であった(表-3)、このことより、本装置ではドリルジャンボへの取り付け(約 2 分)と削孔(15cm÷7.1cm/min×3 本≒約 6 分)、取り外し(約 2 分)の合計約 10 分で 1 セットの供試体を採取できることが見込まれ、従来手法の専用型枠の組立てやコアドリルの設置を省略することで作業時間を約 60 分短縮できることが期待される。

3.3 圧縮強度の確認

供試体の品質を確保するため、本装置と従来手法で採取した材齢 3 日の供試体に対して圧縮強度試験を行い、強度を比較した(表-4)。供試体 3 本の平均値は前者で 21.6MPa、後方で 19.7MPa であり、ほぼ同程度の数値であったことから、本装置で採取した供試体でも品質上問題ないことを確認できた。

4. コアビット導入による効果

本装置の活用により、以下の効果が期待される。

(1) 工程短縮による省力化

本装置を使用することで、強度測定に用いる供試体を採取するための時間を大幅に短縮することができ、省力化が期待される。

(2) 安全性向上

従来手法で使用していたコアドリルを使用しないため、現場職員のコアドリルによる巻き込まれ災害を防止できることが期待される。

(3) 施工品質の確認

トンネル壁面に吹付けられたコンクリートから直接供試体を採取することで、施工品質を直接確認することができる。

5. おわりに

開発したコアビットにより、工程を短縮しながら吹付けコンクリートの供試体採取を実現した。また、安全性の向上および施工品質の確保も確認することができた。今後は更なる作業の効率化を目指すとともに、本装置が山岳トンネルの標準技術となるよう広く展開していきたい。

表-2 コンクリートの配合 (1 m³当たり)

W/C (%)	s/a (%)	Ad (%)	水 (kg/m ³)	
			W1	W2
53	59	1.2	139	73
セメント C (kg/m ³)	フライアッシュ FA (kg/m ³)	細骨材 S (kg/m ³)	粗骨材 G (kg/m ³)	減水剤 Ad (kg/m ³)
400	64	946	699	4.8

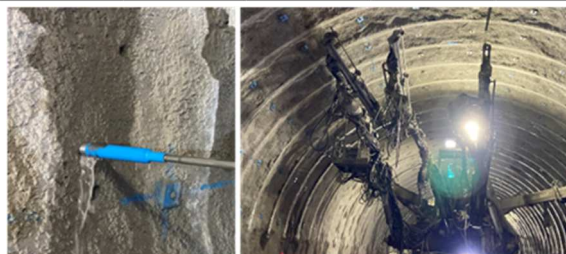


写真-3 供試体採取状況

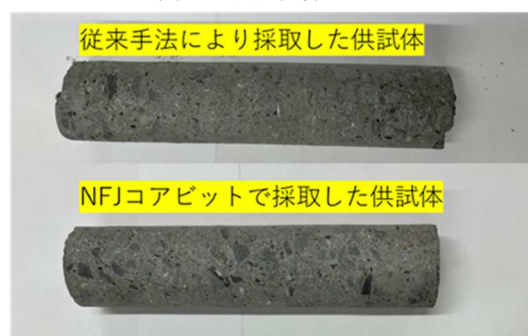


写真-4 採取した供試体の形状

表-3 供試体採取時の削孔速度

削孔No.	削孔長 (cm)	削孔時間 (min)	削孔速度 (cm/min)	削孔速度の 平均値 (cm/min)
1	37	4	9.3	7.1
2	17	4	4.3	
3	20	6	3.3	
4	25	6	4.2	
5	27	5	5.4	
6	35	10	3.5	
7	27	2	13.5	
8	25	3	8.3	
9	22	2	11.0	
10	25	3	8.3	

表-4 採取した供試体の圧縮強度の比較

手法	各供試体の圧縮強度 (MPa)			
	No.1	No.2	No.3	平均値
従来手法	18.4	22.0	18.8	19.7
本装置	21.2	22.5	21.0	21.6

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 施工編，pp.324～331，2023年
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書 規準編，pp.337～340，2018年

6. ベテランオペレータの操作パターンのモデル化による 油圧ショベルの自動掘削

株式会社	小松製作所	○森澤	直樹
株式会社	小松製作所	今西	将也
株式会社	小松製作所	井門	佳那子
株式会社	小松製作所	小山	幹
株式会社	小松製作所	勝呂	大
株式会社	小松製作所	柳下	正紀
株式会社	小松製作所	千葉	貞一郎
株式会社	小松製作所	山元	弘
(国研)	土木研究所	遠藤	大輔
(国研)	土木研究所	橋本	毅

1. はじめに

建設業は、新たな構造物の創出により生活を豊かにするだけでなく、自然災害の多い我が国において、災害復旧でも重要な役割を担っており、社会基盤を支える不可欠な分野である。

一方で、少子高齢化に伴う労働人口の減少および若手の担い手不足により、深刻な労働力不足に直面している¹⁾。

この課題への対策として、国土交通省は2016年より「i-Construction」施策を推進しており、2024年には新たに「i-Construction2.0」として、2040年度までに省人化3割を目標に掲げている²⁾。

建設機械の自動化はこの対策の一つとして位置付けられ、ブルドーザや油圧ショベルでのICT施工がその代表例である。建設機械のICT化により、施工に必要とされる精度を担保できる自己位置の認識が可能となり、事前の丁張りなどの補助作業を無くし、補助作業員の作業工数削減が実現した。成形や仕上げの工程においては、機械の部分的な自動化によりオペレータの技能に依存せず、出来形ばらつきの低減を可能にした。また、施工中のバケットの刃先軌跡データを施工履歴として活用することで、施工後の検測作業の代替となり大幅に生産性が向上した。

しかし、現状のICT施工はオペレータが搭乗することが前提であり、限られた工程において、モニタリング機能としてのガイダンス表示や車体制御の部分的な自動化により、機械がオペレータの操作を補助する形に留まっている。特に、油圧ショベルの主作業である掘削作業の自動化は、実用に至っていない。このため、建設機械の自動化においては、適用範囲（工程）の拡大とオペレータの省人化

が課題である。

油圧ショベルの掘削は、掘削対象の土質やバケットに抱えた土の影響を受け、車体への負荷が常に変動する。この負荷変動に対し、適切な操作介入による適応的な制御が行われなければ、掘削効率は低下する。オペレータは運転技能を磨き、短時間で効率よくバケットを満杯にするが、この技能の習得には多大な時間を要する。

従来の建設機械はオペレータの搭乗を前提に進化してきたが、今後は自動運転技術を活用したオペレータの技能に依存しない機械としての進化がより注目されるであろう。そのためには、油圧ショベルの主作業である掘削工程の自動化は有効であり、この実現によりさらなる生産性向上が期待できる。

ICT施工に対応するため、状態認識を目的とした車体センサが建設機械に多く取り付けられている。この車体センサのみで制御ができれば、ソフトウェアのアップデートによる従来機への機能追加(SDV: Software Defined Vehicle)も可能であり、最低限のコストアップでの実現にも期待が持てる。

本稿では、オペレータの掘削操作の根底にあるパターン（以降、操作パターン）に着目し、この操作パターンを機械側で再現することで、単純な制御ながらも高い汎用性を持つ自動掘削の実現可能性について報告する。

2. 既往研究に対する本研究の位置付け

2.1 関連研究

ベテランオペレータと新人オペレータの掘削効率には顕著な差異が見られる。オペレータは、操作レバーの入力に対する車体の反応や動きを、視覚

などの人間の感覚により把握し、次の瞬間の適切な操作方法を判断し、逐次操作に反映させている（図-1 参照）。このプロセスは、「認知⇒判断⇒操作」という処理を断続的に繰り返しており³⁾、掘削動作を実現するためには有効な方法であると考えられる。ベテランオペレータは経験を重ね、感覚を養いながらこれらの技能を磨いてきたため、高効率の掘削操作は容易ではないとされている⁴⁾。

このような背景から、従来の自動掘削の研究では、操作方法是考慮する一方で、事前に決定した掘削軌跡に多関節ロボットの制御理論を適用して追従制御を行う、「位置制御型」による自動掘削の研究が広く行われてきた⁵⁾。しかし、この方法は、土質が一樣でない場合や、地盤の硬度のばらつきによる負荷変動時に、既定の目標軌跡を維持しようとするため掘削効率が低下することがある。

そのため、掘削時の負荷が小さい仕上げ掘削の工程などでは効果的であるが、土質の急変など外乱要因の影響を受けやすい荒掘削の工程においてはロボスタ性を充分確保することが難しい。

また、近年のAI（人工知能）の発展に伴い、ベテランオペレータの掘削操作をAIに学習させ、状況に応じた操作方法を生成させて油圧ショベルを制御する研究も増加しており、実証実験が進められている⁶⁾。この方法は、様々な環境変化へ対応が可能である一方で、大量の高品質な教師データが必要であることや、品質保証およびAIの使用に起因する安全性の検証に課題が残されている。



図-1 オペレータの掘削操作

2.2 本研究のアプローチおよび仮説

筆者らは試作車の品質確認を行う部門に所属しており、複数のベテランテストオペレータの指導の下で油圧ショベルの運転技能を習得してきた。

ベテランテストオペレータから効率の良い掘削方法について学ぶ過程で、掘削操作の根底にある基本的な操作パターンは単純であり、かつオペレータ間で共通していることを見出した。

一例として、車体側の負荷増大による掘削速度の低下時には、「ブームを若干上げて負荷を緩和す

る」という掘削時の共通のパターンが存在する。

「若干」の意味する定量的な操作量やタイミングは、各オペレータの経験や感覚に依存するが、この操作パターンはオペレータ間で共通認識となっている。

本研究では、ベテランオペレータが掘削時に遵守している基本的な操作パターンを機械側で再現することを目指す。この考え方は山口らによる提唱の例はあるが、報告の例は見当たらない⁷⁾。このアプローチにより、複雑な制御を必要としない自動掘削の実現が可能であると考えた。さらに、本手法は従来の位置制御型の手法とは異なり、オペレータが日常的に行っている掘削操作の再現が可能のため、土質や掘削対象地形の変化に対しても高い適用性が期待できる。

この仮説に基づき、ベテランオペレータへのヒアリングを通して、掘削において共通する基本の暗黙知を形式知化し、制御ロジックを構築する。

なお、溝掘削や樹掘りにおける掘削の工程は、設計面に対して約 10～20cm の余肉を残す荒掘削を実施後、設計面に合わせた仕上げ掘削が行われる。仕上げ掘削の工程は ICT 施工によって既にシステム代替されており、位置制御型の自動掘削での対応が可能であると考えたため、本研究では、荒掘削の工程の自動化を対象とする。

3. 掘削時の根底にある操作パターンの把握

油圧ショベルの自動掘削における制御則を確立するため、数名のベテランテストオペレータに、効率の良い掘削を行うための注意点についてヒアリングを実施した（表-1）。

次に、20t クラスの油圧ショベルを用いた平地での掘削実験を行い、2名のベテランテストオペレータ（経験年数 16 年および 15 年）の各レバー操作の時系列データを取得した（図-2）。掘削実験は、コマツが保有する屋外試験場（細粒分礫質砂のフィールド）にて行った。土質の不均質さによる結果へのばらつきを防止するため、車体左右方向に 3m、前後方向に 5m、深さ 2m 程度の掘削枿を準備した（図-3 参照）。今回の実験では、掘削が容易な土質条件として、簡易 N 値が 2～3 のほぐしたルーズな土壌を準備した。掘削前に（株）西日本試験機製の土研式貫入試験機を用いて、掘削箇所的前後方向に 3 か所計測を行い、土質の均質性を確認後に、掘削実験を行った。

また、掘削開始姿勢によるばらつきを防止するため、掘削開始姿勢を統一した。アームを最大まで伸ばし、バケット角度 $\theta = 0.105$ [rad] の姿勢を掘削開始姿勢として、平地での掘削実験を行った。なお、このバケットの角度 θ は、事前に社内のテストオペレータ数名の掘削開始姿勢を参考に設定した（図-4 参照）。

掘削開始姿勢を一定とした一方で、オペレータには掘削方法に関して指示は与えず、自由に操作を行ってもらった。これらの結果をもとに、具体的な掘削を行うための操作パターンの解明を進めた。

表-1 掘削中の着眼点

掘削開始	・バケット刃先を貫入しやすい姿勢にセット ・アーム掘削し、レバー入力に対しての刃先の貫入量を確認
掘削途中	・バケットの刃先が常に掘削方向に沿っているか確認し、刃先の向きを調整 ・負荷が高い場合は、ブームを上げて負荷を緩和 ・基本的にアームは掘削側100%入力し、上記のバケットとブームの操作で負荷を調整
掘削終了	・バケットの中が満杯になった時点で掘削終了、持ち上げ ・手前まで掘削しすぎると土盛りができるため、アーム垂直（ブームトップピンとアームトップピンを結んだ直線が地面と垂直）ぐらいが目安 ・持ち上げてもこぼれないぐらい（上面が水平）までバケットを動かす

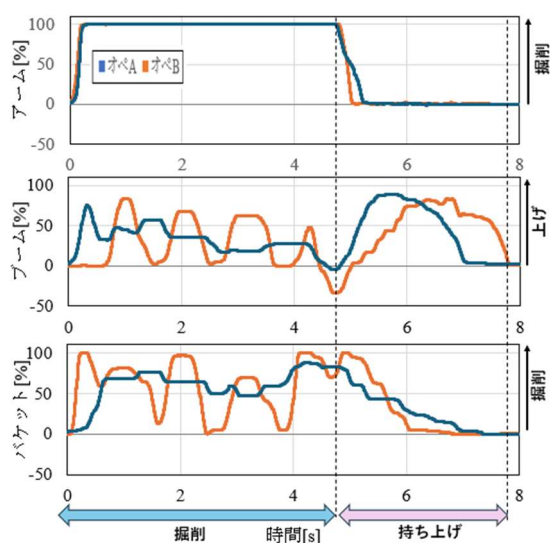


図-2 掘削中のレバー操作量の比較

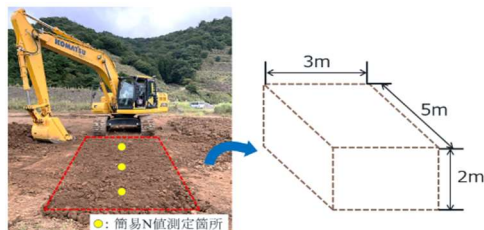


図-3 掘削坑の概要



図-4 掘削開始姿勢

3.1 掘削の操作パターンの選定

掘削は、ブームとアームとバケットの動作の組み合わせで行われる。このため、これら3軸それぞれについて制御則を定める必要がある。まずアームの操作について、掘削開始と同時に中立状態から掘削操作側にステップ状に入力した状態を掘削終了まで維持しており、オペレータ間での差異は掘削工程全体で小さかった。アーム軸が回転す

ることでバケット刃先が円弧状に運動する。この移動成分を主として、バケットの奥まで土を押し込むことで、掘削土量を確保する意図と推察される。このことから、掘削中のアーム操作量は掘削操作側への100%一定のステップ入力とする。

一方、ブームとバケットの操作では、入力量とそのタイミングにオペレータ毎に顕著な差異が見られた。ヒアリングの結果、高負荷時にはブームを上昇させて負荷を低減、あるいはバケットの刃先角度を掘削の進行方向に合致するように維持させ、アームをスムーズに動かすという基本的な意図は共通していた。しかし、具体的なタイミングや操作量および入力パターン（オペ A：ある程度の操作量を保持したまま連続的に調整を行う入力方法、オペ B：断続的な ON-OFF 操作を繰り返す入力方法）はオペレータ毎に、ばらつきが生じていた。

これまでの分析結果から得られた掘削のために有効と考えられる制御則の案を表-2 に示す。また、掘削動作の終了判定にするための条件も必要となるため、これについてもヒアリングの結果に基づいて設計した（操作パターン 4）。

表-2 掘削の操作パターン

操作パターン1	アーム	アーム掘削側の操作100%で掘削
操作パターン2	ブーム	負荷が高いと感じた時に、ブーム上げ操作にて負荷を低減 ⇒掘削終了後、持ち上げる
操作パターン3	バケット	バケット掘削の操作で、刃先の向きが悪く、掘削抵抗とならないように調整 ⇒掘削終了後、土がこぼれない様にバケット上面が水平になるまで動かす
操作パターン4	(掘削終了判断)	アームが垂直付近まで掘削が行われた時に、掘削終了

3.2 より具体的な掘削制御パターンの決定

本章では、3.1 章で仮定した操作パターンのソフトウェア上の実装について具体的な検討を行う。

操作パターン 1 は、掘削開始後にアームを掘削操作側に100%のステップ入力を行い、掘削中はその制御を維持する。

操作パターン 2 では、オペレータが感覚的に判断している高負荷状態をシステムに検知させるため、その感覚を置き換えるセンサが重要である。この点について、再度オペレータにヒアリングを行い、さらに分析を進めた。

オペレータは主に、アームの速度変化や油圧音の変化から負荷変動を判断していた。しかし、油圧ショベルに音響センサは搭載されていないため、作業機の姿勢把握のためのシリンダストロークセンサによる速度の値を用いる方法が第一に考えられた。しかし、このセンサは ICT 油圧ショベル専用であり、搭載されている車両は限定的である。開発する技術をより多くの機体へ展開するためにはシリンダストロークセンサに依存しないことが望ましい。そこで代替として、多くの機種で標準的に取り付けられており、後付けも容易なシリンダの圧力センサを用いることを検討した。

油圧システムの特長上、シリンダー内の圧力と油の流量（すなわち速度）には相関関係がある。掘削中に車体が受ける負荷が増大し、シリンダーの速度が低下した場合、掘削側のシリンダー内の圧力が上昇する。つまり、掘削中の速度の低下に伴う圧力上昇は、負荷状態の指標としての利用が可能である。そこで、アームのボトム側の圧力を監視し、ある閾値を超えた場合に、ブームを上昇させ、その操作によって圧力が閾値を下回った場合はブームの上昇を停止する制御とした。簡略化のため、その閾値とブーム上昇のためのレバー入力量はベテランテストオペレータの掘削中の波形データの平均値を参考に決定した（図-5 参照）。

操作パターン 3 について、本研究では、取組の第一ステップとしてオペレータの掘削時のレバー操作量の時系列データから得られた平均値である 50% の一定入力とすることにした（図-5 参照）。

操作パターン 4 に関しては、掘削時の波形データを参考に、アーム角度センサの情報を用いて、アームが 100° になると停止する制御とした。ここまでで決定した制御則を表-3 に示す。

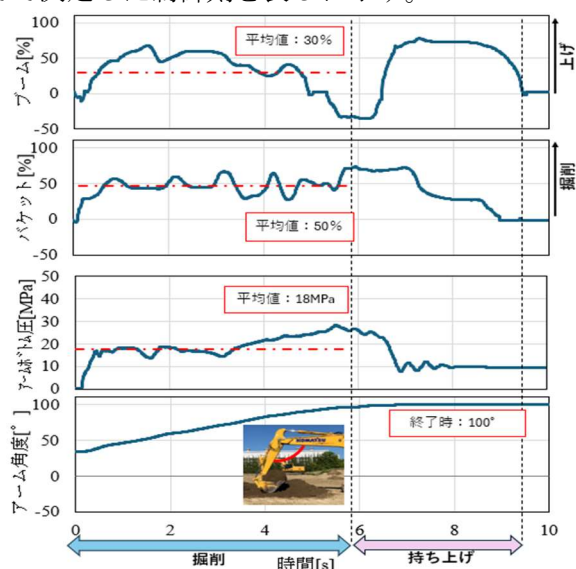


図-5 掘削中の各車体センサの時系列データ

表-3 自動掘削の制御則

ベテランオペレータの根拠にある掘削時の操作パターン	制御則
①アーム掘削操作100%で掘削	①アーム掘削側の操作 100%のステップ入力
②負荷が高い時、ブーム上げ操作で負荷を緩和	②負荷状況⇒アームボトム圧で代替 アームボトム圧が18MPa以上の時ブーム上げ30%入力
③バケット角度を調整し土を奥まで入れこむ	③（簡素化のため）バケット掘削 50%一定入力
④アーム垂直付近で掘削終了⇒持ち上げ操作	④アーム角度100°に到達時に掘削終了⇒持ち上げ操作

4. 車両の制御ロジック

4.1 制御対象の車両

コマツ（株式会社小松製作所）製 20t クラスの ICT 油圧ショベル PC200i-12 を使用する。この車両は、EPC（Electromagnetic Proportional Control）バルブを用いた電子制御システムを有している。

従来の油圧ショベルでは、オペレータのレバー

操作により PPC（Pressure Proportion Control）バルブからの油圧信号をホースでメインバルブまで導き、操作量に応じてメインバルブのスプールの開閉度合いを変えることで作業機の動きを制御している。このため、自動掘削の制御を行うには、外付けモータを用いて直接レバーを動かす方法や、操作レバーとメインバルブの間に電磁弁を追加し、その電磁弁を制御する方法等が考えられるが、大掛かりな車両の改造や構造の追加が必要となる。

一方、PC200i-12 では、電子制御システムによりオペレータのレバー操作量は電気信号に変換される。この信号はメインバルブに取り付けられた EPC バルブに指令を出し、スプールの開閉度合いの制御が可能である。つまり、オペレータのレバー操作を模擬した電気信号を与えるだけで、車両の制御が可能である。本研究では、この電子制御の特徴を活用して、レバーと車体コントローラの間にレバー操作を模擬した電気信号を与えることで、車両を自動で制御する。

4.2 制御ロジックの実装

車体制御用のモデルは、MATLAB/Simulink を用いて作成した（図-6）。このモデルは、車体コントローラに接続し CAN（Controller Area Network）を通じて、車体センサ情報（アームボトム圧力、アーム角度、バケット角度、ブーム角度）を 100Hz で取得する。取得した情報をもとに、3.2 章で検討した掘削操作の制御則を実際に車体で動かせるように制御モデルに実装した。なお、バケット角度とブーム角度は、掘削終了後にバケットを持ち上げる動作を自動化するのに用いた。アームが規定角度（100°）に到達し掘削が終了した後（図-6 のフロー終了後）、バケットを地面から約 1m 持ち上げるために、既定のブーム角度になるまでブーム上げに 50% の入力を与える。また、バケット掘削側にも 50% の入力を与え、土がこぼれないようにバケットの上面が水平になる既定角度まで入力を続けるフローとした。ただし、この持ち上げの操作は、掘削終了後の予備的操作であり、本稿では議論や評価の対象としない。

処理の遅延を防止するため、自動掘削用のコントローラとして Speed Goat 社製の Baseline-S real-time target machine を用いて実際の処理は行われた。

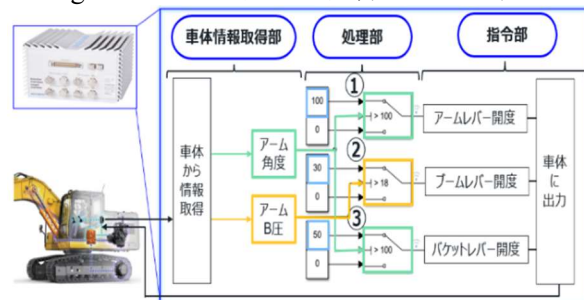


図-6 自動掘削制御ロジック

5. 掘削実験

5.1 目的

本章では、前章で設計した自動掘削のロジックにて掘削を行い、まず設計意図に沿った掘削動作が行われているかを確認する。さらに、ベテランオペレータと掘削効率の比較を行い、本ロジックの有効性を検証することを目的とする。

5.2 実験方法

本実験は、3章の試験条件に基づき、ほぐしたルーズな土質の掘削機を準備して実施した。掘削は3回行い、掘削効率の評価には車体のペイロードメータにより計測した掘削重量と、アームレバーの操作履歴データから算出した掘削時間（掘削側への入力開始から中立側へ戻すまでの時間）を用いて、1時間当たりの掘削重量 [t/h] を算出して比較を行った。

5.3 実験結果と考察

自動掘削とベテランオペレータによる掘削を行った際に得られた各レバーの入力およびアームボトム圧、アーム角度の時間履歴データの一例を図-7に示す。これにより、3.2章の表-3に示した制御則に基づいて掘削動作が行われていることが確認できた。また、自動掘削の動作は、ハンチングの発生や途中での停止はなく、スムーズで掘削土量も良好であり、マニュアルの掘削操作時と大きな差は見られなかった。

負荷が増大した際にブームを上げることで負荷を低減するロジックについて、掘削開始から0.7秒後に閾値であるアームボトム圧 18MPa を超過し、ブーム上げ操作を継続したが、アームボトム圧は18MPa を超える状態を維持し続けた。その結果、ブーム上げ操作は一定の入力を保持した。これは制御ロジックに従った動作であるものの、オペレータの操作パターンとは異なる結果となった。

熟練オペレータの操作を代替することを目的とする前提であれば、この現象は、負荷逃し操作（ブーム上げ）がオペレータに比べて少ないことによるものと考えられる。負荷緩和時のブーム上げのレバー開度の設定を増大させることで、より効果的な負荷緩和が実現し、オペレータの掘削操作により近づく可能性がある。様々な土質条件や掘削対象地形などの環境変化への適用性を高めるためにも、パラメータの最適化は今後の課題である。

次に掘削効率について、考察する。自動掘削とベテランオペレータの掘削効率を比較した結果を図-8に示す。自動掘削ではベテランオペレータと比較して掘削時間は約1秒短縮したものの、掘削重量は約17%減少した2.04tとなった。しかし、掘削効率で比較すると、自動掘削では1475t/h、ベテランオペレータでは1528t/hと同等の結果が得られた。

ベテランオペレータの掘削終了時のアーム角度

は90°であり、自動掘削の100°よりも、アームの移動量が多いため掘削時間は長くなった。しかし、その分、多くの土量が獲得出来たため同等の掘削効率となったと考えられる。

今回開発した自動掘削は予め設定された制御とパラメータに従い、レバーのON-OFF操作を機械的に実行するものである。

一方、人間は掘削対象地盤の性状を探りながら掘削を行い、また作業疲労を軽減するため、急激な操作による腕への負担や車体振動を避け、緩やかな操作入力を行う傾向がある。このような操作特性の違いも、掘削時間の差異を生む要因の一つと考えられる。将来、人が搭乗しないことを前提とした場合、機械的なON-OFFの操作でも乗り心地や疲労を考慮する必要がないため、人間の掘削効率を上回る可能性も考えられる。

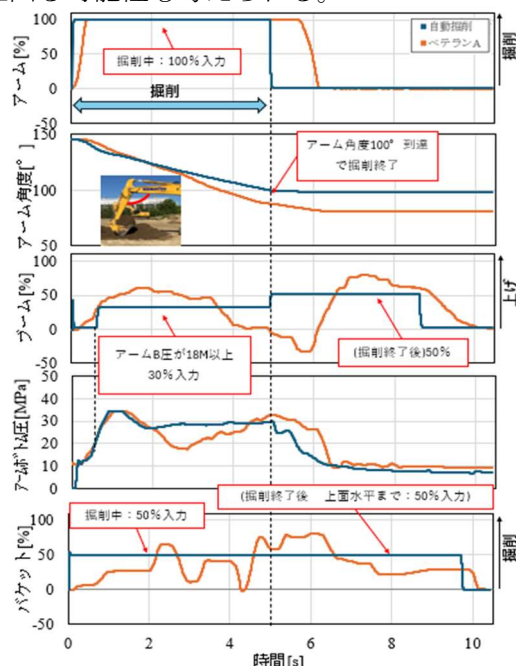


図-7 掘削中の各センサの時系列データ

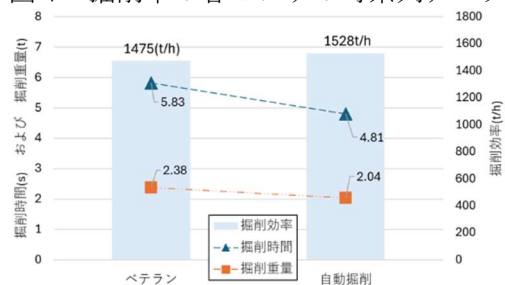


図-8 掘削効率の比較

6. 連続掘削実験

6.1 目的

前章では整った土質において、本ロジックの有効性が確認できた。本章ではさらに土質や掘削地形の変化に対する適応能力を検証するため、ダンブ積み込みを想定した連続掘削試験を実施する。

6.2 実験方法

掘削作業は自動掘削により実施し、掘削終了後

は、マニュアル操作で旋回角度 90° までの荷の持ち上げ旋回、排土、掘削開始位置への戻り旋回を実施した。同じ場所を連続で 5 回掘削し、その後、掘削場所と排土場所を入れ替え、合計 15 回行った（図-9 参照）。社内で経験年数が 16 年と 15 年のベテラン、13 年の中堅、3 年の若手の計 4 名のオペレータと掘削効率を比較した。

平地での掘削とは異なり、連続掘削では掘削の開始位置が徐々に下がるため、事前に試掘を行い、オペレータの操作を参考に自動掘削のパラメータを調整した。ブームは掘削開始位置の低下に応じて多く上昇させる必要があるため、ブーム上げのレバー入力力は 70%（平地掘削時は 30%）に設定した。その設定に伴い、迅速なブームの上昇に対して多くの土を掬いこむためバケット掘削のレバー入力設定を 65%（平地掘削時は 50%）に引き上げた。また、掘削開始時のバケットの貫入を増大させるため、ブームの上昇が開始するタイミングを遅らせることを狙い、アームボトム圧の閾値は 20MPa（平地掘削時は 18MPa）の設定で実施した。

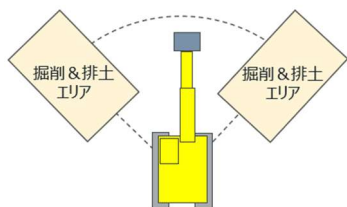


図-9 連続掘削実験の概略図

6.3 実験結果と考察

15 回の連続掘削試験で得られた結果を図-10 に示す。

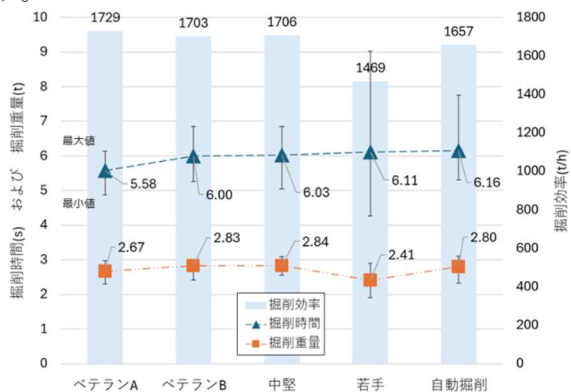


図-10 連続掘削試験における掘削効率の比較

ベテランオペレータ A の掘削効率と比較すると、自動掘削は約 4%低い結果となったが、マニュアルの操作では作業者の状態によって、数パーセントの作業効率の変動が生じることを考慮すれば、ベテランオペレータと同等の掘削を達成しているとみなせる。一方、若手オペレータと比較すると、自動掘削は約 12%掘削効率が上回り、掘削時間も安定していた。

連続掘削によって掘削土質は不均質となり、掘

削地形も変化するが、パラメータを適合することで同じロジックにて対応可能であることが明らかになり、本自動掘削の有効性や汎用性の高さが確認できた。

7. 結論

本研究では、ベテランオペレータの掘削動作に共通する根底にある操作パターンを形式知化した。これらの操作パターンを模擬した制御ロジックを実装し、油圧ショベルの荒掘削工程の自動化システムを試作・評価した。その結果、以下の結論が得られた。

- ・オペレータの掘削時の操作パターンをシステムで模擬することで、油圧ショベルの掘削が自動化できることを示唆した。
- ・本手法を適用することで、シンプルなシステムで、オペレータと同程度の掘削効率を達成できる可能性を示唆した。
- ・従来機が有するハードウェアで自動掘削が実現できる可能性を示唆した。
- ・本手法は土質や掘削地形の変化に対して、パラメータの適合により幅広く対応できる可能性がある。

今後、パラメータ適合の手法確立と制御の最適化が重要な課題であり、様々な土質や地形で検証を行う予定である。効率と汎用性の高い自動掘削の早期達成に向けて、引き続き研究を進めていく。

参考文献

- 1) 国土交通省HP, "建設業を巡る現状と課題", <https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001610913.pdf>(参照2025/8/6)
- 2) 国土交通省HP, "i-Construction 2.0 ～建設現場のオートメーション化～", <https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/content/001738240.pdf>(参照2025/8/6)
- 3) 藤田光伸, 鎌田実, 宮田圭介, "機械操作における技量の抽出に関する研究", 日本機械学会論文集(C編), Vol.67-653, pp.201-208, 2001
- 4) 境田右軌, 中後大輔, 川端邦明, 浅間一, "熟練オペレータによる油圧ショベルの掘削作業解析", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2007,1P1-M07
- 5) 山元弘, 茂木正晴, 大槻崇, 柳沢雄二, 野末晃, 山口崇, 油田信一, "動作計画と制御に 3 次元情報を用いた自律油圧ショベルプロトタイプの開発", 計測自動制御学会論文集, vol.48, no.8, pp.488-497, 2012
- 6) DeepX, "掘削からダンプ積み込みの繰り返し連続操作を現場で実証", <https://www.deepx.co.jp/ja/business/excavator2023/>(参照2025/8/6)
- 7) T.Yamaguchi, H.Yamamoto, "Motion Analysis of Hydraulic Excavator in Excavating and Loading Work for Autonomous Control", 23rd ISARC2006, pp602-607, 2006

7. 山岳トンネル工事のずり出しにおける ホイールローダ自動運転システムの開発

西松建設株式会社 技術研究所

西松建設株式会社 技術研究所

ジオマシンエンジニアリング株式会社

○ 本山 昇

田口 毅

塚田 純一

1. はじめに

昨今の建設業においては、作業従事者の高齢化や、入職者の減少による人員不足が加速しており、将来にわたって、建設産業の持続性や生産性の低下等が懸念されている。山岳トンネル工事においては、坑内での過酷な環境下にて特殊技能を要する作業が未だ多いことから、現場の安全性確保も含めた、施工の省力化・省人化による生産性向上が急務とされている。こうした背景から筆者らは、山岳トンネルの無人化・自動化施工システム『Tunnel RemOS（トンネルリモス）』の開発を進めており、当該施工で使用する主要な建設機械の遠隔操作・自動化を中心とした、山岳トンネル施工のオートメーション化による生産性向上を図っている。

山岳トンネル施工の掘削サイクルの一つに、発破や機械掘削によって発生した掘削岩塊（以下、ずり）を坑外へ搬出する、ずり出し作業がある。ずり出し作業は、ホイールローダ単体によるずり運搬が中心であるものの、複数の建設機械が同時に作業する場面もあることから、一以上の建設機械を自動化することで、オペレータの省人化による生産性向上が期待できる。そこで筆者らは、ずり出し作業に使用する建設機械の中でも、オペレータの操作技量によって施工効率が左右されやすいホイールローダの自動化に着目し、当該機械の自動運転システムの開発を試みた。

本稿では、先行して開発したホイールローダの遠隔操作システムの概要および試行結果と、この度開発した自動運転システムの概要および試行結果について述べる。

2. ホイールローダによるずり出し作業

ずり出し作業（ベルトコンベヤ方式）では、ホイールローダによって切羽前方のずりをすくい取り、後方に位置する破碎機（以下、クラッシャ）まで運搬および投入を行う（図-1）。発破掘削では1回の発破につき、この一連の作業を数十回にわたって繰り返し実施する。このため、1回のずり運搬・投入に要する作業時間の短縮は、施工サイクルの短縮に直結することから、ホイールローダのオペレータには可能な限り高速な操作が求められる。一方で、ずりを確実にクラッシャへ投入するために、ホイールローダをクラッシャの側部へ接近させる繊細な操作も必要であることから、難度の高い作業であるとともに、オペレータの操作技量によって、施工効率が左右されやすい課題がある。

また、ずり出し作業では、掘削後の切羽面に残った浮き石を除去するためのブレーカと、ずりのかき寄せや集積を行う油圧ショベルを同時に使用する場面がある。このため、狭隘な切羽で複数の建設機械が同時に稼働することとなり、機械同士の接触による災害リスクがあると言える。

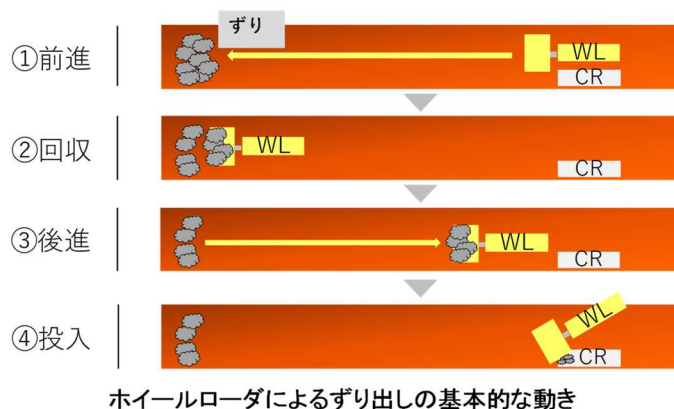


図-1 ホイールローダによるずり出しの一連動作

これらの課題に対して、ホイールローダのずり出し作業を自動化することで、オペレータの操作技量に依存しない安定した施工と安全性の向上を図るとともに、オペレータの省人化による生産性向上を図った。

3. ホイールローダ遠隔操作システムの開発

ホイールローダ自動運転システムの実現には、機体の制御部分を担う遠隔操作技術の構築が重要であると捉え、2019 年度に遠隔操作システムの試作機を開発し、その後 2 号機となる実用機の開発および現場試行を実施した¹⁾²⁾。実用機の開発では、試作機による現場試行で明らかとなったシステムの操作性や耐久性の改良を図り、実現場でのずり出し作業へ試験的に導入し、その性能を検証した。以下、実用機のシステム概要等について述べる。

3.1 システムの概要

ホイールローダ遠隔操作システムは、通常のホイールローダに各種制御装置や通信装置等を搭載し、遠隔仕様に改造することで、機体より離れた安全な場所に位置するコクピットから遠隔操作することが可能である（写真-1）。また、ホイールローダには各種センサを搭載し、稼働時の走行ギア、走行速度、ステアリング角度やバケット稼働状況等をリアルタイムで計測およびモニタへ表示することが可能である。これにより、遠隔操作時の運転情報をオペレータに教示するとともに、後述する自動運転システムの機体制御において重要なデータとして寄与している。

3.2 機体の遠隔制御装置

ホイールローダのステアリング、ブレーキ・アクセルペダル、アーム・バケットレバーには、それぞれの遠隔制御装置を取り付けた（写真-2）。これらの装置を作動させることによって、オペレータがステアリング等を直接操作せずに、遠隔地から機体を操作することが可能である。また、先行して開発した試作機では、アーム・バケットレバーの操作において、操作ロッド等をレバーに外付けした装置を使用して、レバーを直接的に動かす機械的な

制御としていた。しかしながら、実際の搭乗操作との操作性の違いや、装置の構成部品数が増加することによる機械的故障のリスクが課題であった。これに対して実用機では、ホイールローダ内部の電子回路へ信号を伝送してレバーを動かす電気的な制御にすることで、より実機搭乗時に近い操作を可能にするとともに、装置の構成部品数の削減による耐久性の向上を図っている。

3.3 遠隔操作信号・カメラ映像の通信装置

ホイールローダの上部には、コクピットからの操作信号を伝送する無線機や、複数のカメラとその映像を伝送する無線機等を設置した（写真-3）。これらを使用し、ホイールローダの操作信号とカメラ映像の通信を低遅延で確立することで、高速かつ繊細な操作が要求されるホイールローダを正確に制御し、ずり出し作業を安定して実施することが可能である。

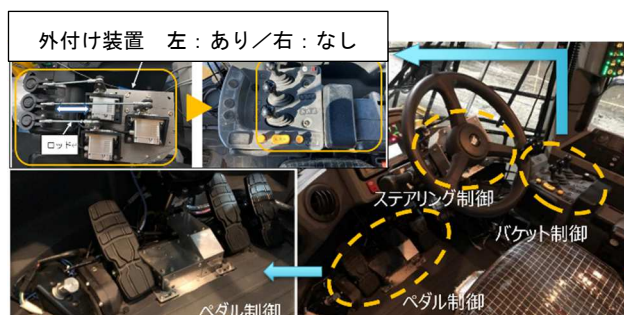


写真-2 遠隔制御装置（運転席内）

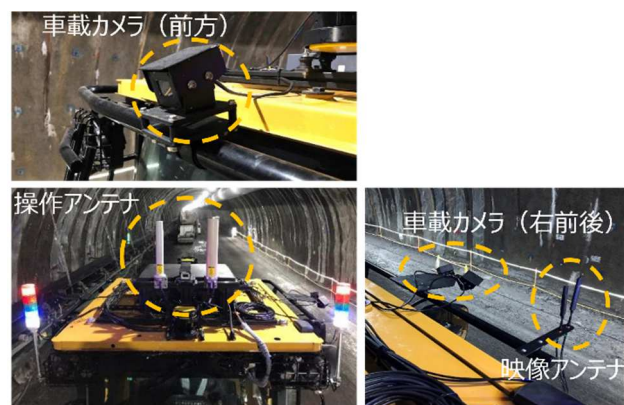


写真-3 ホイールローダ上部の搭載装置



写真-1 遠隔ホイールローダによるずり出し状況

3.4 現場でのシステム検証

遠隔操作システム(実用機)の性能を評価するため、現場でのずり出し施工効率を検証した。検証では、有人搭乗によるホイールローダのずり出し(従来工法)のサイクルタイムと、実用機によるオペレータ2名(A:ホイールローダの遠隔操作経験が浅い、B:遠隔操作経験が豊富)のサイクルタイムの比較を実施した(表-1)。検証の結果、2名のサイクルタイムは平均 75 秒～95 秒であり、搭乗操作のサイクルタイムの平均 54 秒を基準とした場合、施工効率は約 60%～70%前後であった。また、経験豊富なオペレータによる最短時間としては 59 秒、施工効率は約 92%となり、一時的ではあるが、遠隔操作でも搭乗操作に近い施工効率で稼働できることが確認された。また、複数回にわたって実施した現場試行において、システムに大きな動作不良や故障は発生しなかったことから、システムの耐久性向上も確認された。このことから、自動運転システムの制御部分を担う技術として、高い完成度であることが実証され、本システムを基盤とした、自動運転システムの開発を進めることとした。

4. ホイールローダ自動運転システムの開発

4.1 自動運転システムの概要

開発した自動運転システムは、前述したホイールローダ遠隔操作システム(実用機)を基幹とし、遠隔操作仕様に改造したホイールローダ本体に、複数のレーザースキャナを搭載した(写真-4)。スキャナより、坑内における機体周辺の側壁および前方の切羽面と、これらと相対的な自己位置を計測可能とした。本システムでは、ホイールローダが切羽とクラッシャ間を自動走行する経路を座標系によって、事前に設定している。レーザースキャナにより取得した自己位置に加えて、前述した機体の走行速度やステアリング角度等の情報に応じて、設定された自動走行経路に追従するよう、ステアリング制御・速度制御および所定位置でのバケット操作を自動的に作動させることで、ずり出しの一連作業を自動化した(図-2)。なお、システムの操作は、専用の操作端末(タブレット)を介して行う仕様とした。端末には制御プログラムの操作画面

面を表示しており、オペレータの判断によって事前設定した自動走行経路を画面上で選択し、自動運転の開始・停止を操作可能とした。

4.2 システムの試行

本システムの試行を実験ヤードで実施した³⁾(写真-5、写真-6)。実験ヤードは、トンネル断面約 66m²、トンネル幅 11m×高さ 7m×延長 47m であり、トンネル内には、ずりやクラッシャおよび風管を設置し、実際の山岳トンネルの現場を再現した。また、トンネル内のクラッシャ周辺には、車載と同様のレーザースキャナを設置した。これにより、クラッシャ付近におけるホイールローダの自己位置・姿勢を補足計測し、クラッシャ接近時の動作の安定性を高めている。

表-1 施工効率の比較結果

	搭乗 操作	オペレータ A	オペレータ B	
WL 走行距離	約 85m (ずり回収位置～クラッシャ位置間)			
サイクル タイム	平均	平均	平均	最短
	54 秒	95 秒	75 秒	59 秒
施工効率	100%	57%	72%	92%

遠隔仕様のホイールローダにセンサを追加搭載



写真-4 レーザースキャナを搭載した遠隔ホイールローダ



図-2 自動運転システムの概要図

本試行では、自動走行経路を切羽の左側・中央・右側の3つを設定し、各経路においてずり出しの一連動作を実施可能であるか検証した。その結果、設定した経路すべてにおいて、①前進走行・②ずりのすくい取り・③後進走行・④クラッシャへのずり投入、これら一連動作を自動で行うことが可能であることを確認した（写真-5・写真-6）。

4.3 遠隔操作の油圧ショベルとの連携

前述した通りずり出し作業では、ホイールローダに加えて、ブレーカや油圧ショベルが同時に稼働する場面がある。筆者らが取り組んでいる、山岳トンネルの無人化・自動化施工システム『Tunnel RemOS（トンネルリモス）』の開発においては、油圧ショベルの遠隔操作システムも構築している。そこで、油圧ショベルの遠隔操作システムと本システムを連携させた、ずり出し作業の検証を実験ヤードで実施した。検証の結果、遠隔操作の油圧ショベルのオペレータは、ずりのかき寄せや集積作業を行いながら、ホイールローダのずりすくい取りを自動で行うことが可能であった。このことから、通常は2名のオペレータが必要な作業を、1名で実施できることが確認され、本システムが作業の省人化に寄与する技術であることを実証した。

5. おわりに

本システムの開発により、ホイールローダによるずり出しの自動運転を実現し、当該作業の大幅な省力化と、オペレータの操作技量に依存しない安定した施工を可能とした。また、遠隔操作の油圧ショベルとの同時稼働により、オペレータの省人化のよる生産性向上が期待できるものとなった。今後は、本システムの改良による動作の高速化や高機能化を図るとともに、並行して進めている油圧ショベルの自動化技術と組み合わせた、ずり出しのオートメーション化の実現を目指す。また、山岳トンネルの施工で使用するその他建設機械においても自動化を展開し、山岳トンネル無人化・自動化施工システム『Tunnel RemOS』の構築を進める。

参考文献

- 1) 田口毅・本山昇・原圭太・角和樹・清水亮・塚田純一：山岳トンネルにおけるホイールローダ遠隔操作システムの実施工への試験導入，第78回土木学会年次学術講演会講演概要集，VI-764，2023
- 2) 本山昇・田口毅・山下雅之・原圭太：ホイールローダ遠隔操作システム（Tunnel RemOS-WL）の現場試行，西松建設技報48号，No.15，2025
- 3) 本山昇・田口毅・塚田純一：山岳トンネルにおけるホイールローダ自動運転システムの開発，第80回土木学会年次学術講演会，VI-1206，2025



写真-5 自動運転システムによるずりすくい取り状況



写真-6 自動運転システムによるずり投入状況

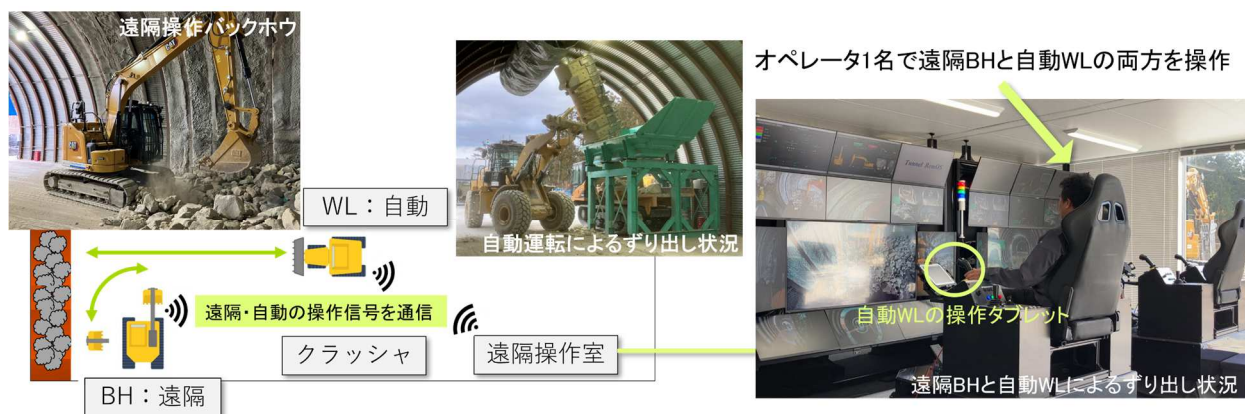


図-3 遠隔操作バックホウと自動ホイールローダによるずり出し概要

施工のオートメーション化に向けた取組

○ 松沢 啓太
中根 亨

現在、建設現場では経験豊富な技術者の指揮の下、施工計画を作成し、工事工程を定めた上で、指示を受けたオペレータが建設機械に搭乗し操作を行っている。「施工のオートメーション化」では、1人当たりの生産能力を向上するため、各種センサーにより現場の情報を取得し、AIなどを活用して自動的に作成された施工計画に基づき、1人のオペレータが複数の建設機械の動作を管理できるようにすることを目指している。

図-1 i-Construction2.0 の全体像

本稿では、本稿では、協議会において策定・改訂した、自動施工の安全ルールに加え、国土交通省における建設機械施工の自動化・遠隔化技術の普及についてこれまでの経過と今後の展望を述べる。

図-2 建設機械施工の自動化・自律化協議会の体制

- 33 -

既存のルールを自動・遠隔施工の現場にそのまま準用すると、過剰な安全対策を講じなければならなくなる懸念がある。

上記を踏まえ、自動・遠隔施工の普及促進を図るためには、この特徴に即した標準的な安全ルールを策定することが必要である。

安全ルールは、「自動・遠隔施工を実施する施工会社が、安全対策を検討する上で参照する資料」として位置づけられるものとしている。

また、あらゆる条件の現場で講じるべき全ての安全対策を列挙することは事実上不可能であることから、条件の異なる現場においても共通的に講じるべき安全対策を示す性質のものとして、現場検証を踏まえ、「自動施工における安全ルール Ver.1.0」を2023年度に策定した。(図-3)

2.1 エリア分けについて

安全ルールでは、自動施工を行う区域を「エリア」とし、人や立ち入り制限を目的に「エリア」を次の3つの区域で構成されることとした。

「無人エリア」：自動施工を行うため、原則として作業員、建設機械オペレータ、有人建設機械などが立ち入らないエリア

「立入制限エリア」：自動建設機械が予期しない動作を行った場合においても、自動建設機械がその範囲を逸脱せず、原則として人が立ち入らないエリア

「有人エリア」：人が搭乗した建設機械が施工を

行い、原則として自動建設機械及び遠隔建設機械が立ち入らないエリア

有人ダンプトラックによる土砂の積み下ろしなど、有人建設機械が一時的に立ち入ることを考慮し、有人エリア、立入制限エリア、無人エリアの境界に「中継区域」を設定する。本区域は建設機械に登場しない作業員は立ち入らないものとし、オペレータは有人建設機械から降車しないものとする。

2.2 その他の安全ルール

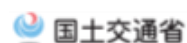
必要な保護方策の内容や担い手が従来の有人施工と異なることから、自動・遠隔施工の担当者を「製造者等」・「販売者等」・「施工者等」・「使用者等」と定義し、それぞれがどのような保護方策を担うかを整理している。

そして、自動・遠隔施工における安全方策を、自動施工中の安全を確保するための安全方策（「自動施工における安全方策」）と使用する自動建設機械や設備に求める安全方策（「自動建設機械や設備に求める安全方策に必要な機能」）に分け示した。

「自動施工における安全方策」：施工者等は、「無人エリア」「有人エリア」「立入制限エリア」を必要に応じて設定しなければならないとし、各エリア内の安全管理と運用について示している。

「自動建設機械や設備に求める安全方策に必要な機能」：主に自動施工実施者が、自動施工の実施にあたり、使用する自動建設機械や設備に求める安全方策に必要な機能を示している。

「自動施工における安全ルール Ver.1.0」について



概要	・「建設機械施工の自動化・自律化協議会」で検討され2024年3月に公表 ・本ルールで示すの標準的な安全方策あり、現場条件より別の安全方策に代えるなど柔軟に対応 ・自動化技術の使用状況、安全技術の進展状況などを踏まえ、今後必要に応じて修正
----	--

「自動施工における安全ルール Ver.1.0」において規定される主な内容

項目	主な規定内容
安全確保の原則	リスクアセスメントと保護方策の立案により、リスクを許容可能な程度まで低減すること
関係者の役割	製造者等、販売者等、施工者等、使用者の各役割、および関係者の連携によるリスクアセスメントを実施すること
エリアの設定	エリアの構成（無人エリア、立入制限エリア、有人エリアの3つの区域および一時的な中継区域、下図参照）、エリアの区割方法、逸脱・進入防止対策、エリア変更時の関係者への周知など
エリアの運用と安全方策	エリアへの進入退出時の手順の制定、各機械の操作者の選任、監視者の選任、運用体制の確立、不具合の対処方法の確立と安全確保、教育訓練 など
自動建設機械や設備の安全方策に必要な機能	自動建設機械の非常停止システム、自動建設機械の自動停止、表示灯の具備 など

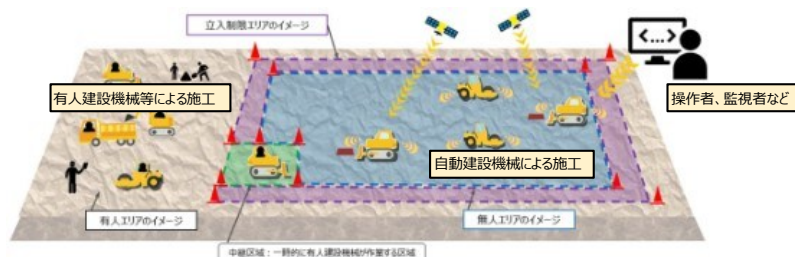


図-3 「自動施工における安全ルール」 Ver.1.0

主に、非常停止システム・自動停止などのイレギュラーな事態が発生した場合に停止する機能を自動施工実施者は具備することとし、その他、表示灯等で示す情報の具備や人・障害物検知機能の仕様、無線通信網についても整理した。

2.3 安全ルールの試行

2024 年度では、実工事における策定した安全ルールの試行を実施した。国土交通省の直轄工事において、自動施工技術を実装している工事を選定し、安全ルールに沿った方策を実施した。その後、安全ルールを現場に適用した際の、現場への適用性や実態との齟齬や課題などについてヒアリングを通して検証した。

試行対象の 4 現場についてのアンケートおよびヒアリング結果を以下に示す。

2.3.1 エリア設定について

【問】当該工事で設定したエリアの種類や大きさは、安全ルールに対応しているか。

【回答】

- 無人エリア、有人エリア等のエリア分けを現場内で実施。
- 安全を確保できる十分な面積も確保している。
- 無人、立入禁止エリアは、バリケードで区画。
- エリアを明示することにより認識可能にしている。
- 逸脱、侵入防止対策を現場内のルールと機械機能とシステム等の組合せにより実施。
- 接触防止対策はセンサとシステムにより実施。

2.3.2 機械的な機能について

【問】実装している人・障害物検知機能について。

【回答】

- レーザースキャナや IC タグと磁界を利用した検知機能。
- LiDAR センサにて障害物・人を検知して停止する機能搭載。

【問】自動施工における無線通信網について。

【回答】

- 『建設現場ネットワークの構築と運用ガイドライン』³⁾ に即して通信網を構築。
- 無線会社にて現地調査を実施し使用可能なチャンネルを選定。

【問】自動と搭乗の切替スイッチ他について。

【回答】

- 搭乗操作が可能であるためキャビン内に切替スイッチを具備。

【問】表示灯の具備について。

【回答】

- 表示灯を具備している、表示灯の情報は現場内で掲示板にて周知。

【問】自動建設機械の自動停止について。

【回答】

- 通信が途絶した時には自動停止（エンジンは停止しない）。
- 遠隔操作が可能な管制システムにはエンジン始動・停止と非常停止システムが具備されている。

2.3.3 リスクアセスメントについて

【問】リスクアセスメントは実施したか。

【回答】

- 自動化施工導入時にリスクアセスメントを実施し、作業手順に反映している。また施工状況が変化した際には再検討を実施している。
- 自動施工計画時にリスクアセスメントを実施、ルールに対応

2.4 安全ルールの改定について

自動施工を導入している直轄工事における、自動施工に関係する施工者・開発者等の意見を踏まえ、「自動施工における安全ルール」中のリスクアセスメントに関する箇所について追記し改定を行った。すでに安全ルールに記載していた、施工者によるリスクアセスメントに加え、自動施工を実装する建設機械の製造者によるリスクアセスメントについて追記した。追記内容の概要を以下に示す。

○自動施工を行う建設機械の製造者等は、販売者等、施工者等及び使用が緊密に連携して以下の項目を実施する。

- ・機械の設計段階でリスクアセスメントを行い、機械の危険源を特定し、それぞれの危険源ごとのリスクを見積り（適切なリスクの低減が達成されているかの検討を含む）を実施する。
- ・リスクアセスメントの結果に基づき、機械のリスクの低減のための措置の検討及び実施を行うものとする。
- ・上記の措置を講じた後に存在する残留リスクについては、残留するリスクの 内容とその対処法についての必要な情報等を、「使用上の情報」として販売者等を通じ、施工者等又は使用者に提供する。「使用上の情報」とは、安全でかつ正しい機械の使用を確実にするために、製造等を行う者が、標識、警告表示の貼付、信号装置又は警報装置の設置、取扱説明書等 の交付等による指示事項等の情報をいう。

以上のように、2023 年度に策定した「自動施工における安全ルール」について、試行検証を元に自動施工を行う建設機械の製造者等によるリスクアセスメントについて追記する改定を 2024 年度に行い、「自動施工における安全ルール Ver.2.0」を策定した。

3. 遠隔施工の取組

これまで遠隔施工技術は災害現場等の二次災害のリスクが懸念される現場にて導入が進められてきており、災害現場での使用や、一部の工事現場において個別かつ試験的な導入にとどまっている。また、遠隔化技術は安全で快適な場所からの建設機械の操作を可能にすることから、女性や高齢者でも働きやすい環境の整備が期待されている。2024年度では、国土交通省の直轄工事において災害現場以外の21件の工事において遠隔施工を実施した。今後は、さらなる遠隔施工の普及に向け、基準類を整備する方針である。

4. 今後の自動施工の取組

自動施工においては、i-Construction2.0の中の「施工のオートメーション化」において大規模現場での自動施工の実現を目指している。自動施工を先進的かつ自発的に開発・導入している施工者は参考となりうる重要な役割を果たす。また、自動施工の開発・導入を現在行っていないが、関心がある施工者に対して、開発・導入への障壁・労力を小さくすることも自動施工の普及促進には必要不可欠である。地域を基盤とする建設会社による自動施工の実装に向け、汎用的な自動システムの実装による部分自動化を含めた自動化の実装を視野に検討する。また、自動施工に必要な専門知識を持つコーディネータの役割を果たす人材育成のための教材作成、自動施工導入した場合の効果を評価するシミュレータの機能要件整理、建設機械の制御信号の共通化といったような、自動施工の開発・導入のハードルを下げ、自動施工の普及を促す取組を実施していく。

5. おわりに

本稿では、自動施工の安全ルールの策定・改定および遠隔施工における取組について紹介した。建設業は他産業と比較して高齢化率が高く、将来的な担い手不足が懸念される。そのような状況においても、社会資本の整備・維持管理を持続し、国民生活に不可欠なサービスを提供するためには、建設機械の自動・遠隔施工技術の普及は重要な役割を果たす。現在、自動・遠隔施工技術の開発も進展し、実現場への導入事例が増加しつつある。国土交通省としては、さらなる自動・遠隔施工技術の普及を目的に、試行工事の実施、自動・遠隔施工に関するルール・基準類の整備に取り組んでいく。今後も、i-Construction2.0が目指す目標である2040年までに、建設現場の省人化の省人化3割、すなわち生産性1.5倍向上を目指して、自動化・遠隔化技術の普及を進めていく。

参考文献

- 1) 国土交通省：i-Construction～建設現場の生産性革命～2016.
<https://www.mlit.go.jp/common/001127288.pdf>
- 2) 国土交通省：i-Construction 2.0 ～建設現場のオートメーション化～2024.
<https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/content/001738240.pdf>
- 3) 一般社団法人 日本建設業連合会：建設現場ネットワークの構築と運用ガイドライン 2001 初版 2020 改訂
nikkenren.com/sougou/10thaniv/pdf/07-03-24.pdf

業務委託先の開示

本報文にて報告した検討を実施するにあたり、基礎的な情報収集及び資料整理の一部を日本建設機械施工協会及び先端建設技術センターに業務委託して行った。

9. 温度予測型転圧管理システムの開発による生産性向上への検討

アスファルト舗装における現場温度管理の省人省力化

(株)NIPPO 総合技術部 機械開発グループ ○梶原 寛
(株)NIPPO 総合技術部 相田 尚
(株)NIPPO 総合技術部 技術研究所 門田 誠也

1. はじめに

国土交通省では、2016 年度から主導する「i-Construction」を、2024（令和 6）年 4 月には「i-Construction 2.0」に深化させると公表し、2040 年度までに建設現場の省人化を少なくとも 3 割、すなわち生産性を 1.5 倍向上することを目指し、少ない人数で、安全に、快適な環境で働く生産性の高い建設現場の実現を目指して、建設現場のオートメーション化（自動化）に取り組む方針が示されている。

道路舗装分野においては、3 次元データや ICT の活用による生産性の向上に取り組んでいる。しかし、アスファルト舗装の品質管理においては、省人省力化に資する技術の高度化や効率化による自動化が、なかなか進んでいないといった現状がある。

特に、アスファルト舗装の品質管理のうち、アスファルト混合物の締固め度の確保は重要な管理項目であり、温度依存性が高いアスファルト混合物の出荷、到着、敷きならし、転圧における施工温度を適切に管理する必要がある。このため、国土交通省や NEXCO などのあらゆる舗装工事で温度管理が規定されている。

現場での温度管理作業は、専任の管理者が都度舗装内部に温度センサを挿入して測定し、紙ベースで記録している。また交通規制を伴う現場では、狭い空間内で重機と近接しながら、規制時間に追われての温度管理となっている。このため、現場からは効率的かつ安全な管理方法が求められていた。

本論文では、現場温度管理作業を自動化することで省人化・省力化を図りつつ、安全な現場管理への変革に取り組んだ内容について述べる。

2. アスファルト舗装における現場温度管理の種類と自動化検討

2.1 アスファルト舗装の現場温度管理

アスファルト舗装の現場温度管理項目は、アスファルト混合物が現場に到着した時に測定する「到着温度」、アスファルトフィニッシャにて敷きならした直後に測定する「敷きならし温度」、転圧

直前に測定する「転圧温度」の 3 項目である。そのうち転圧温度は鉄輪ローラで転圧する初転圧温度と、タイヤローラで転圧する二次転圧があるため、一般的には合計 4 箇所での温度管理となる。

2.2 現場到着温度管理の方法と自動化

現場到着温度管理は、アスファルト混合物を積載したダンプトラックが現場に到着した時点において、温度管理員が荷台に上って、アスファルト混合物の温度測定をする。荷台への昇降作業があるため、労力を要すると同時に転落・墜落のリスクがある。

自動化の手段一例としては、通信機能を装備した温度計を使用する方法がある。アスファルトプラントで混合物をダンプトラックに積載した時点で、温度測定用センサをアスファルト混合物に挿入する。運搬中～現場到着時における温度が自動測定され、その測定データが自動的にクラウドに記録されると同時に、インターネットを通じてスマートフォン等で確認することが可能である（図－1 参照）。



図－1 現場到着温度管理方法の自動化イメージ

2.3 敷きならし温度管理の方法と自動化

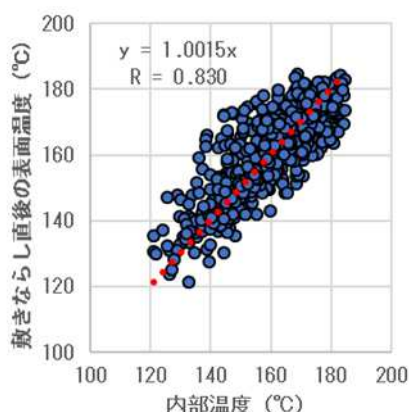
敷きならし温度管理方法は、アスファルトフィニッシャにてアスファルト混合物を敷きならした直後に、温度測定用センサを挿入して測定している。施工の進行とともに温度の測定位置も移動するため、温度センサの抜き差し行為、測定位置の移動が必要となる。

接触式温度センサでの自動化を検討したが、連続して測定する場合、温度センサで敷きならし面を引きずり、傷をつけることになる。このことから、非接触式温度センサでの対応を検討した。

非接触式温度センサでの測定による敷きならし表面温度と、敷きならし内部温度の相関を確認するため、外気温の影響を受けやすい冬季の舗装現場において、敷きならし直後の表面温度と同一位置の内部温度（敷きならし温度）のデータを 750 個取得した。取得状況を写真－1 に、検証した結果を図－2 に示す。



写真－1 敷きならし直後の表面温度と内部温度測定状況



図－2 敷きならし直後の表面温度と内部温度の関係

ここで、敷きならし直後の内部温度と表面温度の相関式の傾きは 1.0015 とほぼ 1:1 の関係にあり、相関係数は 0.830 と非常に高い相関を示すことが確認できた。このことから、敷きならし直後であれば非接触である放射式の温度センサを用いて、敷きならし温度取得の自動化が可能と判断した。

2.4 転圧温度管理の方法と自動化

転圧温度管理方法は、敷きならされたアスファルト混合物を転圧機械が転圧する直前に、温度測定用センサを挿入して測定している（写真－2 参照）。転圧機械の進行方向直前で測定するため、転圧機械との接触リスクがある。



写真－2 転圧温度の管理状況

転圧温度管理方法の自動化を、敷きならし温度管理と同様の方法で検討したが、転圧時は敷きならしから一定時間が経過し、特に冬場においては表面温度と内部温度に差異が発生してしまうため、非接触式温度センサを用いての表面温度での管理方法は困難と判断した。また前述の 2 つの温度管理と比較して測定、記録するだけでなく、転圧機械オペレータへの転圧範囲指示行為が発生する。

ここで、転圧温度管理の自動化を進めるには、以下の検討が必要と考えた。

- ① アスファルト混合物の内部温度を予測する。
- ② 予測には施工時の環境状況を反映し、時間経過に伴う温度低下を算出する。
- ③ 「②」の情報を転圧機械オペレータと共有する。

3. 転圧温度管理の自動化検討

3.1 有効な転圧時間と内部温度予測

1998 年に National Asphalt Pavement Association が報告した文献¹⁾に、「アスファルト混合物の有効な転圧時間は、敷きならし厚さ、気温および下層の表面温度、混合物の敷きならし温度、風速、太陽光線等によって増減する」との記載がある。

この有効な転圧時間は、アスファルト混合物の敷きならしから転圧終了温度が 80℃に低下するまでの時間と定義されており、様々な施工条件における有効な転圧時間が示されている。なお、この有効な転圧時間は、実測データから求められた物である。このため、これを応用することにより、アスファルト混合物の敷きならしから一定時間経過後の内部温度が予測でき、敷きならし後の温度推移が見える化できるのではないかと考えた。

3.2 現場実証データの収集

「3.1」で検討したアスファルト混合物の内部温度予測を検証するために、国土交通省、NEXCO などの舗装現場にて、アスファルト混合物舗設時の各種データ（以下、現場実証データ）を 2,300 個取得した。現場実証データの収集状況を写真－3 に

示す。



写真-3 現場実証データの収集状況

ここで、現場実証データは、敷きならしたアスファルト混合物の内部温度および表面温度に加え、7項目の施工環境パラメータとして、①舗装厚さ、②空隙率(混合物の種類)、③下層の表面温度(以下、基盤面温度と称す)、④気温、⑤風速、⑥湿度、⑦気圧を設定した。これらのデータは、敷きならし直後から1分ごとに内部温度が100℃に低下するまで取得した。

3.3 機械学習による分析

「3.2」で取得した現場実証データをAIに機械学習させ、相関性を解析した。この結果、図-3に示す相関性のヒートマップが出力され、温度変化に与える影響が大きい順に、以下の項目が確認された。

- ・舗装厚さが薄いほど温度変化が大きい
- ・気温が低いほど温度変化が大きい
- ・基盤面温度が低いほど温度変化が大きい



図-3 機械学習に基づく相関性ヒートマップ

3.4 内部温度予測式に適用する施工環境パラメータ

機械学習の結果よりパラメータを舗装厚さ、気温、基盤面温度に絞り、これらを基にした温度予測を行うこととした。ただし、舗装厚さは設計にて定められており、同一層を施工している限り施工中に変化することはない。このため、設計舗装厚さごとに温度予測式を構築することとし、そのパラメータとして気温と基盤面温度の2項目を用いることとした。

3.5 温度低下予測と2つの予測モデル式

前述の内容を踏まえて、AIに機械学習させて求めた係数を用いた指数方程式モデルと、機械学習による分析アルゴリズムを用いたLightGBMモデルの、2つの温度予測式を構築した。

今回構築した指数方程式モデルによる内部温度予測式を以下に示す。この式に、アスファルト混合物の敷きならし温度「 T_0 」を初期値として、基盤面温度「 a 」と気温「 b 」、舗装厚さと空隙率で分類した係数「 c 」、経過時間「 d 」を与えることで、時間経過ごとの内部温度が算出できる。

【指数方程式モデルによる内部温度予測式】

予測内部温度＝

$$(T_0 - (a+b/2)) \times \text{EXP}(c \times d) + (a+b/2)$$

T_0 : 敷きならし温度, a : 基盤面温度 (℃),
 b : 気温 (℃), c : 係数, d : 経過時間 (分)

なお、LightGBMモデル式は分析アルゴリズムであるため、ここでの表現は省略する。

3.6 2つの予測モデル式の予測精度

それぞれのモデル式に現場実証データを入力し、敷きならしから5分後の内部温度を予測させた。その結果、それぞれの式における予測精度は表-1に示すようになった。

表-1 予測モデルと5分後の予測精度

モデル名	真値への当てはまり率 (r2score)	真値に対するずれ量 (RMSE)
指数方程式モデル	0.984	2.383
LightGBMモデル	0.998	0.625

ここで、どちらの式も真値への当てはまり率(R2 score)は高い値(1.000が最高値)を示しているが、真値に対するずれ量(RMSE)はLightGBMモデルの方が小さい値を示しており、高精度に予測でき

ることを確認した。

4. 予測による転圧温度管理システムの開発

「2.4」に示した転圧温度管理方法の自動化と、温度管理員の事務所での仕事である、帳票作成の省力化を実施すべく、予測による転圧温度管理システム（以下、開発システム）の開発要件を以下とした。

- ① 敷きならし温度と転圧温度を自動で取得・記録する。
- ② 転圧機械のオペレータに転圧範囲を自動で指示する。
- ③ 温度管理帳票を自動で作成する。

機器構成を検討した結果、取得した温度や転圧回数が、位置情報とともにヒートマップ化して表示される機能を持つ、既存の締固め管理システムをベースとして開発することとした。

4.1 開発システムでの各種温度の取得内容と動作イメージ

開発システムでの各種温度の取得内容と、動作イメージ（図－4 参照）を以下に挙げる。実際は施工進行方向 50cm ごとに連続して取得されるが、ここでは管理地点における定点での説明とする。

- ① 管理地点にアスファルトフィニッシャが到達した段階で、気温と基盤面温度を取得する。
- ② 管理地点にアスファルトフィニッシャがアス

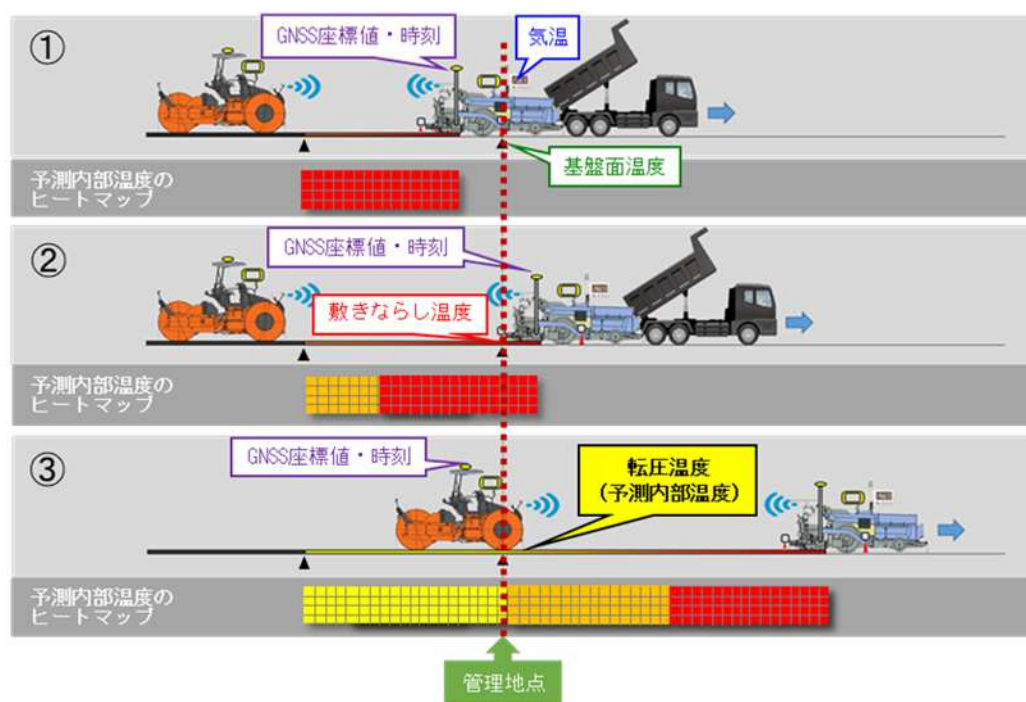
ファルト混合物を敷きならした段階で、敷きならし温度を取得する。取得後、敷きならし面の内部温度は、内部温度予測式により時間経過とともに低下し、それに伴ってヒートマップの色も変化する。

- ③ 管理地点に転圧機械が到達（転圧）した段階における、予測内部温度を転圧温度として記録する。

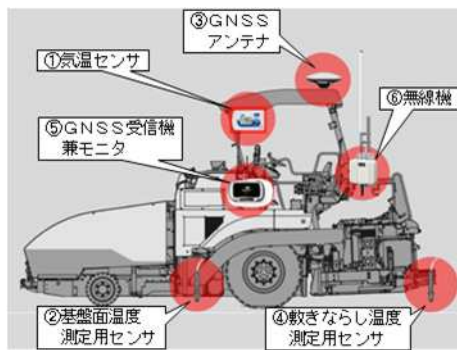
4.2 アスファルトフィニッシャにおける機器の構成

アスファルトフィニッシャにおける機器構成と機能を以下に列挙し、機器の設置状況を図－5 に示す。

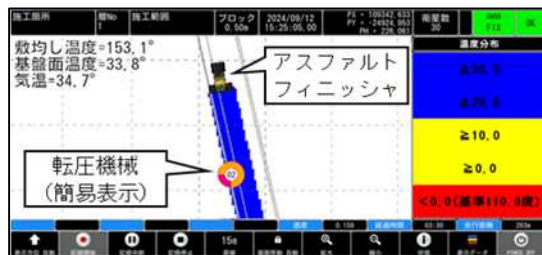
- ① 気温センサ：気温を測定する。
- ② 基盤面温度測定用センサ：基盤面の温度を測定する。
- ③ GNSS アンテナ：アスファルト混合物を敷きならした位置（座標）を測定する。
- ④ 敷きならし温度測定用センサ：アスファルト混合物の敷きならし温度を測定する。
- ⑤ GNSS 受信機兼モニタ：アスファルトフィニッシャの自己位置、アスファルト混合物の敷きならし範囲が、取得した敷きならし温度でヒートマップ表示される（図－6 参照）。なお、ヒートマップは 50cm メッシュの集合体で表現される。
- ⑥ 無線機：取得した各種情報を転圧機械に送信する。同時に各種情報は、インターネットを通じてクラウドに送信される。



図－4 開発システムの動作イメージ



図－5 アスファルトフィニッシャーへの機器設置状況

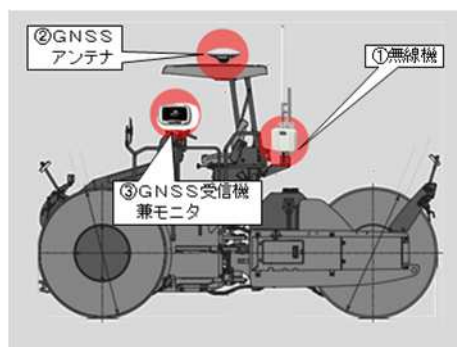


図－6 アスファルトフィニッシャーのモニタ画面

4.3 転圧機械における機器の構成

転圧機械における機器構成と機能を以下に列挙し、図－7に機器設置状況を示す。なお、機器に搭載する温度予測式は、現時点においてLightGBMモデルでは計算処理に時間を要するため採用するのは難しいと判断し、指数方程式モデルを採用することとした。

- ① 無線機：アスファルトフィニッシャーで取得した各種情報を受信する。
- ② GNSS アンテナ：転圧機械が転圧した位置（座標）を測定する。
- ③ GNSS 受信機兼モニタ：転圧機械の自己位置と、アスファルト混合物の敷きならし範囲が、予測内部温度でヒートマップ表示される（図－8参照）。転圧機械が敷きならした範囲に侵入し、初転圧を完了するとメッシュの色が固定され、この段階におけるアスファルト混合物の予測内部温度を、転圧温度として記録する。記録された情報はインターネットを通じてクラウドに送信される。



図－7 転圧機械への機器設置状況

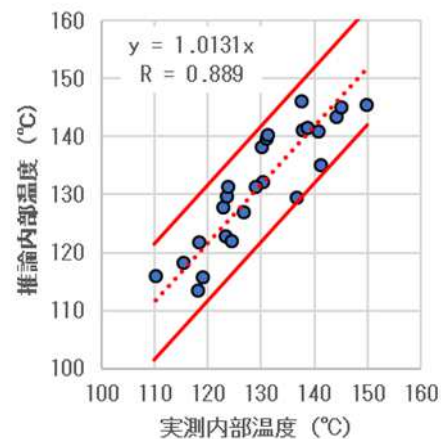


図－8 転圧機械のモニタ画面

5. 実現場における開発技術の検証

5.1 予測内部温度と実測内部温度の比較

新設舗装工事の基層工で、予測内部温度と実測内部温度の比較検証を実施した。従来方法により取得した内部温度（実測内部温度）と、同一位置で開発技術により取得した予測内部温度を25個（ダンプトラック25台分）取得して比較した結果を図－9に示す。



図－9 予測内部温度と実測内部温度の関係

ここで、実測内部温度と予測内部温度の相関式の傾きは1.0131と概ね1:1の関係にあり、相関係数は0.889と非常に高い相関を示すことが確認できた。また、実測内部温度と予測内部温度との差異は-7.4～+9.0℃、平均値は+1.8℃、標準偏差は4.7℃であり、図中に赤実線で示した±10℃の分布の中にすべての値が含まれている。これより、開発したシステムによるデータの取得方法と内部温度予測式の妥当性が確認できた。

5.2 転圧範囲の自動指示

転圧機械のモニタ上に表示される予測内部温度ヒートマップで、設定した温度以下に達した赤丸で囲んだエリア（黄色のメッシュ）が発生すると、警告音の発報と同時に画面左上に「至急転圧！！」が表示され（図－10参照）、転圧機械オペレータに

転圧指示が行われることを確認した。

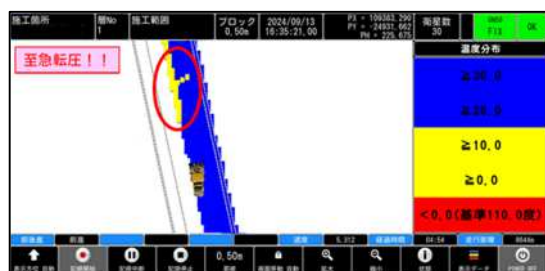


図-10 転圧機械に設置したモニタ上の警告表示

5.3 温度管理帳票と転圧回数管理帳票の自動作成

開発システムで取得した①敷きならし温度と②転圧温度の温度管理帳票と、③転圧回数の転圧回数管理帳票を図-11に示す。なお、これら3つのヒートマップ表示による面的な管理帳票は自動で作成されるため、出力に要するまでの時間は僅か5分であった。



図-11 帳票へのヒートマップ出力結果

6. 開発技術検証時の課題と機器の改良

実現場での開発技術の検証時に、アスファルトフィニッシャのシステムに課題が発生した。以下に課題を列举する。

- ① 敷きならし記録の幅員が数値入力による固定幅のため、施工途中での幅員変化に対応できず、記録された箇所を物理的に転圧しない(出来ない)箇所が発生する。
- ② アスファルトフィニッシャの施工速度が遅く、進行方向が認識できなくなり、実際の施工と異なる箇所に敷きならしの記録がされる。

これらに対応すべく、GNSS アンテナを2個にして常時進行方向が認識出来るようにし、さらに設置位置をスクリーンの左右端部にすることにより、施工幅員の変化に対応できるようにした。スクリーンの伸縮と同期してリアルタイムにモニタ画面にも反映し(図-12 参照)、同時に座標も記録でき

ることから、施工履歴データとしての活用も期待できる。

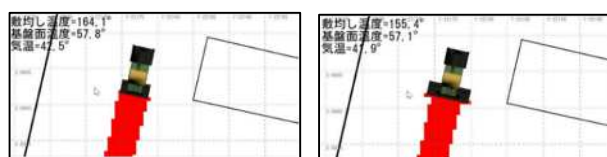


図-12 スクリーン幅の変化とモニタ画面

7. まとめ

開発システムの活用で得られる効果を、以下に整理して列举する。

- ① 敷きならし温度、転圧温度、転圧回数を自動で取得・記録でき、自動で転圧機械のオペレータに転圧指示が行えるため、これに要する管理要員を省人化(1~2人⇒ゼロ)できる。
- ② 温度管理帳票と転圧回数管理帳票が自動で作成されるため、事務所での作業時間が短縮され省力化(1時間⇒5分)できる。
- ③ 敷きならし温度と転圧温度のエビデンスを面的に取得し、これまで確認できなかった内容が可視化できる。
- ④ 重機と人との分離が可能となり、安全性が向上した。
- ⑤ 施工幅員が記録できることから、施工履歴データとしての活用も期待できる。

以上より、敷きならし温度と転圧温度の現場温度管理の自動化により省人化・省力化を図りつつ、安全な現場管理への変革に取り組んだことで、従来作業が改善できることを確認できた。

8. おわりに

AI, ICT, IoT 機器は日々進化しており、これらを組み合わせることにより新たな手法を生み出せるものと感じている。しかし、道路舗装は供用中の道路施工が主であり自動化へのハードルは高い。生産性向上を図るためには、ひとつひとつの作業を着実に自動化し、さらに社会実装へつなげていくことが肝要と考える。今後も確かなものづくりに貢献するとともに、少ない人数で、安全に、快適な環境で働く生産性の高い建設現場の実現を目指していきたい。

参考文献1): National Asphalt Pavement Association: Cold Weather Compaction, 1998

10. アスファルト舗装 施工情報一元管理システムの導入と展望

株式会社 NIPPO
阪神高速道路株式会社

○ 竹内 伸
前川 裕哉

1. はじめに

道路舗装はアスファルト舗装とコンクリート舗装の2つに大きく分けられるが、養生期間が短いことや初期費用が低いという利点から、道路舗装の約9割がアスファルト舗装である。

アスファルト舗装で使用するアスファルト混合物は、品質を確保するために、適切な温度で使用する必要がある。アスファルト混合物が適切な温度を保持できる時間は限られており、製造プラントから出荷して施工箇所に着、舗装を完了するまでの温度管理が品質を左右する。

限られた時間の中で混合物の温度管理を効率的に行うと同時に、舗装施工時の情報も取得できる新たな舗装施工管理の手法として、道路管理者の阪神高速道路と、施工者の NIPPO が施工情報一元管理システム「Paving Manager-As」(以下、本システム)を共同開発した。以下に、その概要と導入効果、今後の展望を報告する。

2. 舗装の施工管理課題

舗装工事の件数は、高度成長期に建設された道路の修繕工事が増加している。修繕工事の多くは交通規制を伴うため、規制時間内に施工を完了し交通開放する必要がある。徹底した施工の進捗管理が求められる。施工現場では時間に追われながら、出来形管理、品質管理、立会検査など様々なタスクを同時進行させるため、工程毎に管理担当者を配置している。各担当者は個別に施工情報を取得しているが、他の担当者とは情報共有されていない場合も多く、工程間のスムーズな連携の障害になっている。

一方、道路管理者の観点では、利用者への影響を最小限に抑えるため、交通規制時間内に施工者が補修したものの検査を確実に実施すると共に、適切な施工記録を残すことが肝要になる。

3. システムの開発コンセプト

前述の課題から、本システムは、舗装施工情報における「トレーサビリティの向上」「リアルタイム連携」「舗装施工情報の自動取得」をキーワードとして開発した。(図-1 システムイメージ図)

例えば、舗装工事にて使用される材料であるアスファルト混合物は出荷から施工完了までの各作業工程において材料温度を管理する必要がある。現状は、現場で温度管理員が棒状温度計をアスファルト混合物の内部に挿入して温度を測定し、手書きで記録しているが、他工程の担当者には情報共有されていない。これだと各担当者間で、材料出荷温度の調整指示や、材料運搬車の滞留による温度保持時間のリミットを注意喚起すること等が難しく、施工現場が混乱するリスクがある。

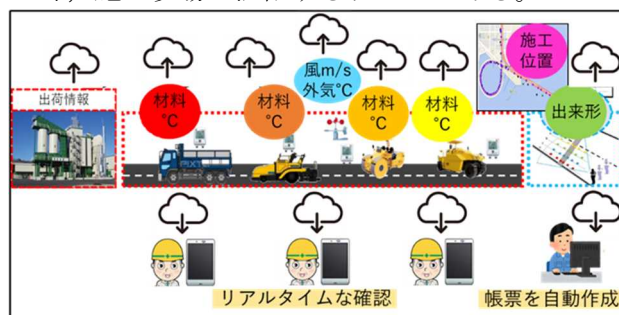


図-1 システムイメージ図

表-1 「Paving Manager-As」で取り扱う舗装施工管理データと管理手法の比較

管理項目	従来の管理手法	「Paving Manager-As」の管理手法
1. アスファルト混合物の出荷情報管理	紙伝票による管理	タブレット端末によるクラウド共有
2. アスファルト混合物の材料温度管理	手動温度計測による手書き記録	RFID 方式による自動取得
3. 施工時の気象情報管理	気象情報の手書き記録	IoT 気象計による自動取得
4. 施工時の位置情報管理	測点の手書き記録	GNSS 機器による自動取得
5. アスファルト舗装の出来形管理	レベル計測による手書き記録	写真測量技術によるデジタル計測
6. 橋梁ジョイント部を含む出来形管理	水系下がり計測による手書き記録	IoT 計測器によるデジタル計測

本システムを活用することで管理データを「自動取得」し、プラットフォーム上に一元管理するため、各工程担当者が任意のタイミングで他工程の施工情報にアクセスできる。これにより各工程間がシームレスに連携されるため、施工進捗管理の省力化が図れる。さらに、舗装の点検データと照らし合わせて、損傷との関係や影響有無に関する検討に活用することで維持管理性向上も期待できる。

取り扱う施工管理データは6項目（表-1）としたが、これらは現状の施工管理帳票として取り扱っている項目である。

4. システムの特徴

発注者側と施工者側双方の関係者が、現場だけでなく、在宅勤務時や事務所等の様々な場面からリアルタイムに舗装施工情報を把握することができ環境とするため、本システムはブラウザ型のアプリケーションとし、各種計測デバイスからの情報を集約するプラットフォームとしている。ブラウザ型であるため、システムへのログイン ID、PW を有していれば、パソコンやタブレット、スマートフォンを問わずアクセス可能である。

以下に前述の6項目に対して現状の管理方法とシステムの機能を示す。

4.1 アスファルト混合物の出荷情報管理

現状、アスファルト混合物の出荷状況に関する確認は、製造プラントが出荷する際に紙伝票を発行し、現場到着後の受入れの際に、施工者側へ手渡しするという方法がとられている。また、共同開発した高速道路会社の土木工事共通仕様書（以下、共通仕様書とする）では、材料の受入検査書類として伝票を添付することを規定しているため、施工者は事務所にて紙伝票をスキャンもしくは転記して管理する必要がある。

本システムでは、出荷情報のリアルタイム連携を可能にするとともに紙伝票からの脱却を目的に、プラントの出荷情報を直接システムへ登録・管理するための出荷登録用アプリケーションを設けた。具体的には、製造プラント側が出荷時にアプリケーションに運搬車両ナンバーを入力するだけで、



図-2 RFID タグ設置状況

紙伝票と同様の情報（工事名、プラント名、出荷時刻、材料種、出荷数量）が自動取得される。

（図-2 RFID タグ設置状況）

4.2 材料温度管理

アスファルト舗装の温度管理として、運搬車両ごとにアスファルト混合物の出荷温度、到着温度、敷均し温度及び転圧温度を検査することが共通仕様書で規定されている。施工者は、運搬車両ごとに全ての温度を手動で計測し、手書きで記録した内容を事務所に持ち帰り、帳票を作成することが一般的である。また、舗装の温度管理は立会いにより検査を行うよう規定されているため、発注者も多大な時間と労力を要している。

本システムでは、施工時の温度管理記録の自動化を実現させた。機材構成は図-3 に示すとおりであり、アスファルトフィニッシャにプラットフォームへの通信機能を有した制御 PC を取り付け、RFID リーダや表示灯など各種デバイスと連携させている。なお、RFID とは、近距離の無線通信を用いて、ID 情報などのデータを記録した専用タグと非接触による情報のやりとりをする技術であり、本システムでは、アスファルトフィニッシャに RFID リーダを、運搬車両に RFID タグを設置している。

また、運搬車両には、RFID タグ以外に無線通信機能を搭載した温度ロガーを設置する。各種温度の計測方法はそれぞれ以下の通りである。

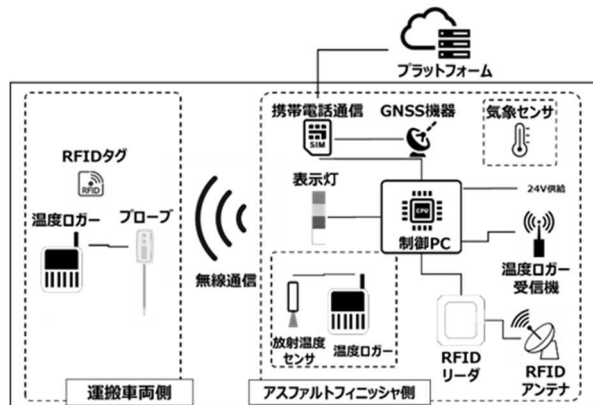


図-3 温度管理機能の機材構成図

4.2.1 出荷温度

- A) 事前に運搬車両に RFID タグを設置しておき、アスファルト混合物を積み込んだ後、保温シートを被せるタイミングで温度センサを材料へ差し込む
- B) 製造プラント側が前述の出荷登録用アプリケーションで情報を登録する
- C) 材料に差し込んだ温度センサで温度を常時計測し、運搬中に計測された温度の最高値を出荷温度として自動記録する

4.2.2 到着温度

- A) 事前にアスファルトフィニッシャに RFID リーダを設置しておく
- B) 現場に到着した運搬車両が荷下ろしのためにアスファルトフィニッシャまで後退する
- C) 運搬車両の RFID タグを認識した時点の計測温度を到着温度として自動記録する
- D) 規格値外の温度が計測された場合、アスファルトフィニッシャに設置した表示灯からブザーが鳴り、確認を促す機能がある

4.2.3 敷均し温度

- A) 事前にアスファルトフィニッシャ後部へ敷均し温度用の表面温度計を設置しておく
- B) 運搬車両の RFID を認識した時点から敷均し開始、荷下ろしが完了した後、運搬車両が離れて RFID が認識範囲外となった時点まで敷均し終了とみなし、この間に計測された温度の最高値を敷均し温度として自動記録する



図-4 到着温度の自動取得イメージ

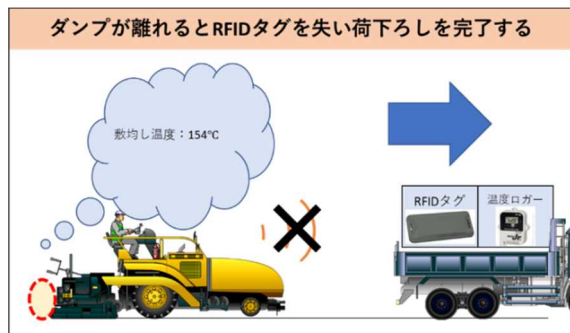


図-5 敷均し温度の自動取得イメージ

4.2.4 転圧温度

専用のアプリケーションを入れたタブレット端末とそのアプリに対応した無線温度計を用いて計測する。計測状況を図-6に示す。

- A) 敷均しが完了した箇所の舗装面へ無線温度計のセンサを差し込む
- B) タブレット端末上で「記録」を押下すると、その時点の温度を転圧温度として記録する

4.3 施工時の気象情報管理

アスファルトフィニッシャに搭載した気象計に

より、気温、湿度、風速、降雨量を計測し、到着温度が計測された時点の気象情報を自動記録する。

4.4 施工時の位置情報管理

現場の進捗を視覚的に把握することや GIS 等の地図情報システムと連携することを目指して、本システムでは、施工位置情報を計測し、リアルタイムに閲覧可能な仕組みを構築している。位置情報は、アスファルトフィニッシャに設置した GNSS 機器を通じて取得する。プラットフォーム上で表示される施工位置情報のイメージを図-7に示す。運搬車両ごと敷均し開始時点で赤色のピンを、敷均し終了時点で青色のピンにより GNSS 記録位置を表現している。ピンを選択すると、その地点の施工日時、各種温度等の舗装施工情報を確認できる。



図-6 転圧温度計測状況

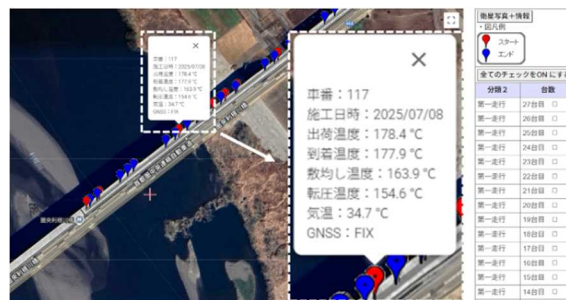


図-7 施工位置 地図表示

4.5 出来形管理記録

施工履歴を適切に記録・蓄積し、将来の維持修繕に有効活用するため、デジタル情報として施工箇所の出来形を保存するプラットフォームがある。

設定した基準高さに糸を張り、下がり計測する従来からの計測方法の他、デジカメ測量機器等の計測技術にも対応させるため、各種計測方法で取得・記録した出来形帳票をプラットフォームへアップロードする仕様とした。

4.6 橋梁ジョイント部を含む平坦性

橋梁ジョイント部の平坦性に関しては、施工者が必要に応じて自主的に管理しているため、計測方法の規定はなく、記録・報告の義務もない。しかし、施工品質の向上を促す目的で、本システムのプラットフォームに保存できる仕様とした。

例えば、図-8に示す電子水平計「フロアプロファイラ」でジョイント前後の舗装形状を効率的に

計測・記録するなど、将来の道路舗装の維持・修繕に活用できる情報の積極的な取得が期待される。

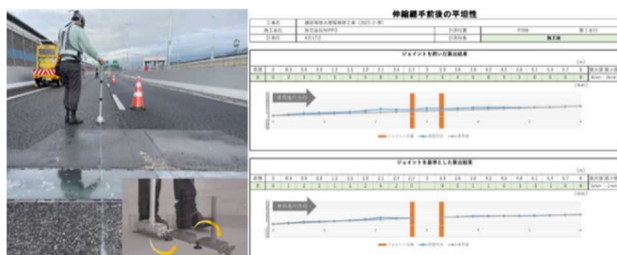


図-8 フロアプロファイラ計測状況と帳票例

5. 現場導入効果

5.1 道路管理者のメリット

舗装施工情報の一元管理によるトレーサビリティの向上が期待される。

現状は、温度をはじめとする舗装施工情報を紙ベース、もしくは記録用紙を電子データ化して保存しているため、損傷等が発生した場合には、保管されている紙もしくは電子データの中身を1つずつ確認する必要があった。本システムでは、施工情報や気象情報を位置情報と紐づけたうえで、電子データとして一元的に管理するため、工事名や施工日に加えて、施工位置等の情報からも検索をかけて効率的に該当するデータを探すことができる。

本システムの活用と、高速道路会社が保有する工事状況共有システムや情報共有プラットフォーム（GIS など）が連携すれば、施工データと損傷との関係性を検討することが可能となり、維持管理性の向上や補修計画の策定等、更なるトレーサビリティの向上に寄与できると考えている。

5.2 施工者のメリット

1) 舗装施工情報の自動取得による生産性・安全性の向上

施工者は現状、運搬車両の荷台に上がって到着温度を計測するなど各種温度を手動で計測し、手書きにより記録しているため、作業負荷が大きく墜落・転落のリスクも伴っている。本システムでは、各種温度データの取得とプラットフォームへの転送が自動的に行われるため、管理人員が3人工から1人工に削減出来ると共に、荷台に上がる作業が不要となるため安全性も確保される。

2) 帳票自動作成機能による働き方改革の推進

本システムでは、自動取得された舗装施工情報に関する帳票が自動的に作成される。現状の施工終了後に事務所で現場データの整理をする作業を削減し、施工が終わると同時に書類も自動的に完成すれば、働き方改革への寄与が期待される。

5.3 道路管理者、施工者双方のメリット

施工情報のリアルタイム連携による業務効率化が期待される。

現場で自動取得された舗装施工情報がリアルタイムに本システムへ集約され、道路管理者と施工者双方に連携されることで、双方の関係者は、事務所等の現場から離れた場所であっても任意のタイミングでそれらの情報を確認することが可能となる。例えば、プラント側で運搬車両の滞留状況を把握することや、出荷材料が適切な品質で、現場使用されているかを、遠隔地にいながら確認できるようになるものと考えられる。これにより、遠隔臨場の実施が容易となり、双方の現場に出向く回数が低減される。また、より多くの工事関係者が施工状況を確認できるので、工程管理や品質管理の見落としを減らし、早期の修正対応にもつなげられる。



図-9 従来の到着温度計測状況

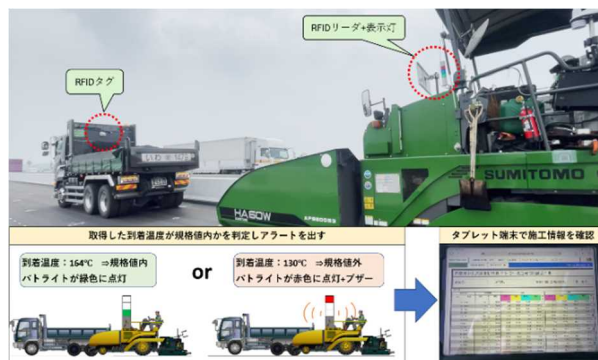


図-10 システム活用時の到着温度計測状況

6. 今後の課題及び展望

6.1 舗装施工管理に関するルール改定

既存のルールのままでは、従来通りの管理方法と合わせて二重管理が必要となることが課題である。本システムを含む ICT 技術等を活用して施工情報を自動取得できる場合の提出書類や検査の効率化についても、道路管理者と施工者双方が効果を得られるように協議を進めていきたい。

6.2 展望

建設就労人口の減少が想定される今後の道路舗装全般の維持・管理を考えると、舗装施工情報のデジタル化、リアルタイム共有は、効率化を図る上で必須であると考え。本技術を定着させるため、現場試行を継続しながら運用方法を確立すると共に、本システムをさらに発展させ、道路舗装業界の働き方を刷新する技術として普及させていきたい。

11. 軟弱地盤への盛土施工における地盤性状等の不確実性を考慮した 施工管理手法に関する検討

国立研究開発法人土木研究所 ○ 茂木 正晴
国立研究開発法人土木研究所 山口 崇
（株）東設土木コンサルタント 中川 光貴
（株）EARTHRAIN 緒方 正剛

1. はじめに

軟弱地盤の変形対策を伴う道路構造物整備において、調査、設計、施工の各段階において、地盤性状の空間的ばらつき、工法選定の適否、施工条件や施工品質の変動など、複数の要因に起因する不確実性が内在している。これらの不確実性は、対策工の性能や信頼性に影響を及ぼし、施工の合理化や維持管理の観点からも十分な考慮が求められる。

特に、既設道路の拡幅においては、供用中の本線に対する影響を最小限に抑えつつ、軟弱地盤対策を含めた工事全体の合理化が求められている。一方で、軟弱地盤上に盛土を構築する場合には、既設盛土および拡幅盛土の直下やその周辺地盤における変形挙動（沈下・側方流動等）に十分な配慮が必要であり、従来にも増して高度な技術的対応と的確な施工管理が求められている。

本研究では、このような背景を踏まえ、以下の2点に焦点を当てて検討を行う。

第一に、地盤改良体の施工状況を把握する手法として、改良機の稼働データを活用した施工時モニタリングによる広域的・連続的な施工管理手法の可能性を検討する。これにより、従来のコアサンプリングに依存した局所的な確認から脱却し、地盤性状のばらつきや施工条件の変動に対応可能な合理的な品質管理の実現を目指す。

第二に、盛土構築時の地盤変状管理として行われている動態観測の効率化を目的に、設置省力化機器及び ICT 測量技術（ドローン等）の導入可能性を検討し、従来の TS による観測作業の負担軽減と観測精度の確保を両立するための技術的方策を探る。

以上を踏まえ、本研究では、「地盤改良時における改良体の施工状況を把握するための稼働データの活用検討」、「盛土構築時における動態観測の効率化に向けた検討」を通じ、今後の施工プロセスにおいて求められる情報の取得方法に関する課題とその対応策について述べる。

2. 地盤改良時における改良体の施工状況を把握するための稼働データの活用検討

2.1 研究対象

過去 10 年間（2013 年度～2022 年度）の施工実績データ 15,627 件の分析結果によれば、図-1 に示すように浅層混合処理工法が最も多く（全体の 35%）、深層混合処理工法は次いで多い（29%）結果となっている¹⁾。深層混合処理工法は、軟弱地盤の層厚が大きい場合に、地盤深部まで改良を行うことを目的とした工法であり、浅層混合処理工法と比較して、N 値や含水比などの変動、土質性状等の空間的なばらつきといった不確実性の影響をより強く受けると考えられる。こうした特性を踏まえ、本研究では深層混合処理工法に着目し、その施工管理手法の検討を行うこととした。

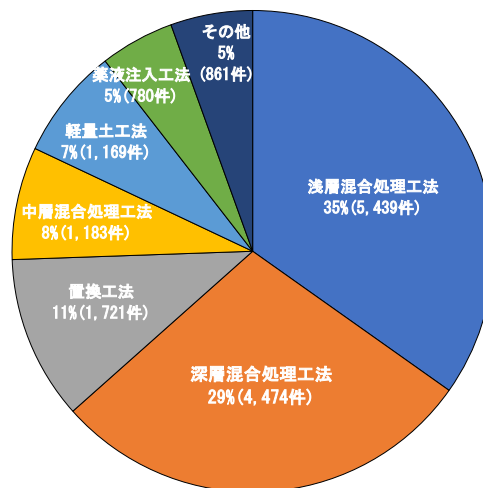


図-1 軟弱地盤対策工の工事件数内訳¹⁾

2.2 実態調査に基づく検討

一般的に地盤改良終了後、改良体 500 本未満は 3 本、500 本以上は 250 本増えるごとに 1 本追加された改良体に対してコア採取（上層・中層・下層の 3 箇所）を行い、施工管理（品質の把握）として一軸圧縮強さの確認を行っている。

地盤改良における変形リスクを適切に管理するためには、部分的なコア採取による地盤改良状況に関する施工管理から広域的な施工管理が求められる。そのため、地盤改良時における施工機械の稼働情報等から攪拌状況を把握することが必要になるものと考えられる。

深層混合処理工法 4,474 件の施工実績の中から、上層・中層・下層の各深度における詳細なコア採取データが得られた 22 件を対象として分析を行った。これらの現場において、施工時の稼働データと強度特性との関係性を把握するために、固化材の添加量と一軸圧縮強さの関係（512 データ）、ロッド回転数と一軸圧縮強さの関係（35 データ）、およびロッド回転トルクと一軸圧縮強さの関係（69 データ）について検討を行った。

2.3 施工機械の稼働情報と攪拌状況に関する検討結果

(1) 固化材の添加量と一軸圧縮強さ

固化材の添加量の比率が 1.0 付近で最も多く分布し、その際の一軸圧縮強さの比（現場施工で得られた一軸圧縮強さと改良地盤設計基準強度との比）は概ね 2～4 の範囲で推移していた。この結果は、添加量を単純に増加させることで必ずしも強度が向上するわけではないこと、また、改良対象とする土質の種類や含水状態、現場条件などにより強度発現にばらつきが生じることを示唆している。一方で、現場において実施工により得られた強度が設計基準に対しておおむね十分な余裕を持っていることから、室内配合試験に基づいて設定された基準添加量は、安全側に構築されるべき現場施工として妥当であったと評価できる。すなわち、本調査結果は、設計と施工の整合性を裏付けるものであり、地盤改良における設計基準の適切性と施工信頼性の両面において工学的に意義深い知見を確認できた（図-2）。

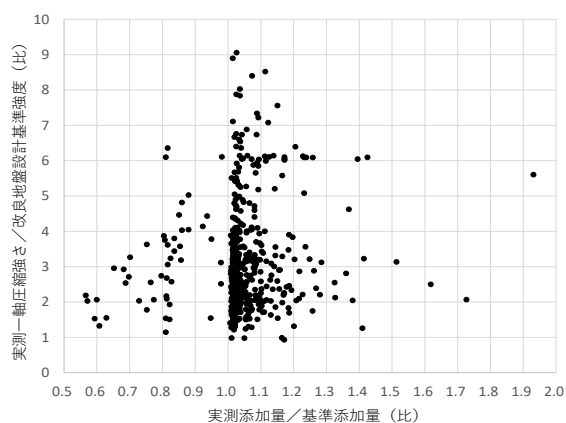


図-2 固化材の添加量比と一軸圧縮強さとの関係

(2) ロッド回転数と一軸圧縮強さ

改良機のロッド回転数と一軸圧縮強さの関係を分析した結果、ロッド回転数を高めることで一軸圧縮強さが上昇する傾向が確認された（図-3）。これは、地盤の性状に応じてロッドの回転数を適切に制御することにより、固化材が地盤内により効果的に攪拌され、均質に混合されることで所定の強度が確保されている可能性を示唆している。一方で、本分析では施工に使用された改良機の詳細な仕様、特にオーガ形状やスパイラルピッチなど、攪拌性能に大きく影響を与える要因について、十分な情報を把握できていない。そのため、ロッド回転数と一軸圧縮強さとの関係には一定のばらつきが認められており、これらの構造的要因がデータの分散に影響している可能性が考えられる。

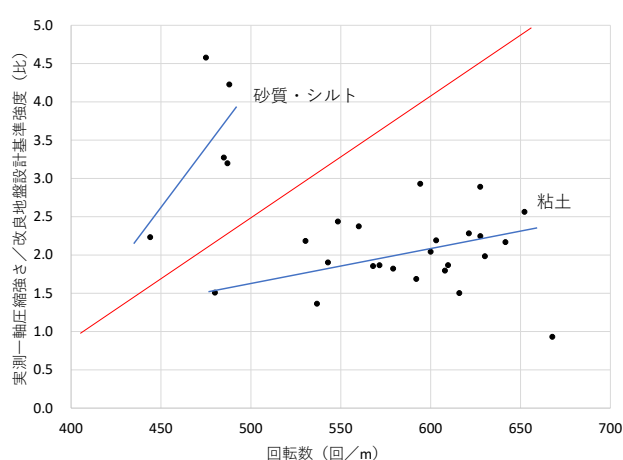


図-3 ロッド回転数と一軸圧縮強さとの関係

(3) ロッド回転トルクと一軸圧縮強さ

ロッド回転トルクについては、10 kN-m に集中する傾向が見られた。一方で、対応する一軸圧縮強さの比にはばらつきが確認された。特に、ロッド回転数と比較して、ロッド回転トルクと一軸圧縮強さとの相関性は明瞭でなく、土質性状の違いがトルク値に及ぼす影響は限定的である可能性が示唆された（図-4）。

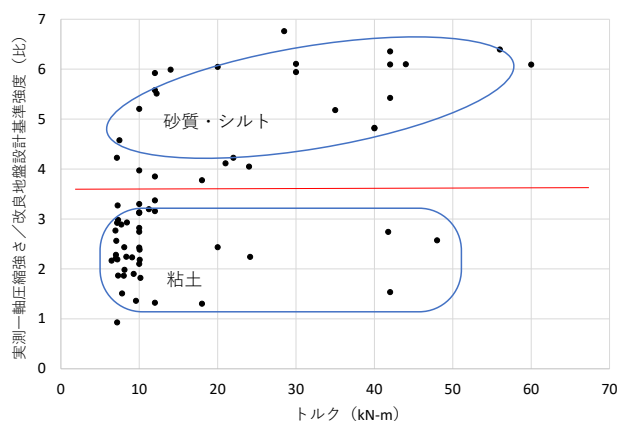


図-4 トルクと一軸圧縮強さとの関係

今後、異なる土質条件下でのデータを蓄積・分析することで、より明確な傾向や影響要因を把握できると考えられる。

3. ICT 測量技術等を用いた軟弱地盤上盛土の安定管理手法の検討

軟弱地盤における盛土の動態観測は、従来、手動による追尾型トータルステーション（以下、TS）を用いて行われており、盛土延長約 40m ごとに設けた横断測点を対象に、1 日 1 回の計測が実施されてきた。こうした手法は、長年にわたり標準的な観測手段とされてきたが、以下のような課題が指摘されている。

盛内ら²⁾の報告によれば、通常 1 つの工事で約 10,000～20,000 回に及ぶ計測が必要となり、変状が確認された場合には、その 3 倍程度の頻度で計測を行う必要が生じることがある。これにより、施工の進行とともに動態観測作業の負担が急増する。また、現行の手法では 2 名の人員が必要であり、測量精度を確保するためには熟練した作業者の確保が不可欠である点も課題となっている。さらに、TS の設置作業自体にも時間と手間がかかる。

こうした背景のもと、これらの課題を解決すべく自動化技術の導入に向けたシステム開発も進められているが、自動化に伴う初期投資や運用コストの増大が新たな懸念事項として挙げられている。

本研究では、動態観測の効率化および負担軽減を目的として、簡易的な動態観測技術の改善に加え、既存の ICT 測量技術などを活用した観測手法について適用の可能性について検討を行った。

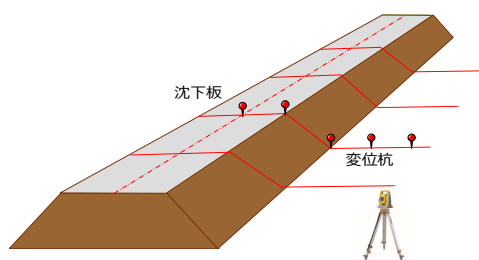


図-5 TSによる動態観測

3.1 簡易的な動態観測技術の改善検討

現場で活用されている TS による動態観測の課題改善のため、取扱い時間の短縮、安定した計測精度の確保、低コスト化を目指し、簡易的な改善によって測定精度を確保しつつ作業効率の向上に向けた検討を進めた。

(1) 従来の計測実態の把握

動態観測の課題に対処するため、「TS の取り扱い時間の短縮」、「安定した計測精度の確保」、「低コスト化」を目的として、実現可能な動態観測手法の検討を進めた。

現場における TS による動態観測作業の実態として、現場では必ずしも測量専門の作業者が動態観測を実施しているとは限らず、動態観測の経験が浅い作業者が対応しているケースも少なくない。

そこで、写真-1 に示すとおり、TS により計測するための環境整備として、土木研究所土工実験施設内に N 値 4 以下の盛土を整備し、測量経験の浅い作業員 1 名が 5 日間にわたり TS の設置及び計測により実態を把握した。



写真-1 従来の TS を用いた観測状況

計測では、設置時間（三脚設置、整準・水準）、測定時間（座標設定、計測）、撤去時間（TS の取り外し、三脚撤去）の 3 つの区分に分け、それぞれの作業時間を計測した（表-1）。

表-1 従来の TS による計測結果
(任意座標設定 X, Y, Z:50m)

	1 日目	2 日目	3 日目	4 日目	5 日目
TS 高さ(m)	1.312	1.347	1.335	1.298	1.34
X (m)	50.588	50.580	50.587	50.587	50.587
Y (m)	45.551	45.556	45.552	45.551	45.552
Z (m)	50.191	50.190	50.191	50.193	50.197
設置時間 (s)	300	360	960	570	570
測定時間 (s)	120	180	180	180	120
撤去時間 (s)	120	120	120	120	120
トータル時間 (s)	540	660	1,260	870	810

その結果、特に設置作業に時間を要している傾向が明らかとなった。加えて、各日での作業時間にバラつきが見られたが、これは三脚の固定、TS 機器の取り付け、整準・水準作業などにおける作業者の技量差に起因していると考えられる。

以上の結果から、複数箇所で動態観測を行うような場合には、設置時間の短縮が作業効率向上に寄与する可能性が高いことが示唆された。

しかしながら、TS の設置においては、機器の安定性を確保し、測定精度を担保することが前提であり、単に設置時間を短縮するだけでは不十分だと考えられる。

(2) 簡易的な工夫によるTSを用いた動体観測技術の検討

従前のTSによる計測実態に基づき、都度の設置作業の短縮を図ることを目的とした検討を進めた。検討では、従来のTSを用いた動態観測手法を大きく変えることなく、TSの使用環境において効率的かつ安定した計測を目指し、動態観測用台座を考案した。

動態観測用台座は、設置の容易さと可搬性、安定した計測を両立するため、本体重量を2kg以内とし、アルミ合金を採用した。また、TSおよび三脚の荷重に対する十分な耐久性を確保するため、強度計算を実施した(図-6)。沈下防止対策としては、TS本体および三脚、さらに台座本体の重量と接地面積を踏まえ、粘性土(N=2)を想定した接地圧に対応可能な形状とした。加えて、設置・計測時の滑りを防止するため、底部にスパイクを設置した。

本台座の有効性を確認するため、従来の計測実態把握のための計測と同様に、土木研究所の土工実験場において、N=4以下の軟弱地盤を対象に土木作業員1名が動態観測を5日間実施した(表-2)。

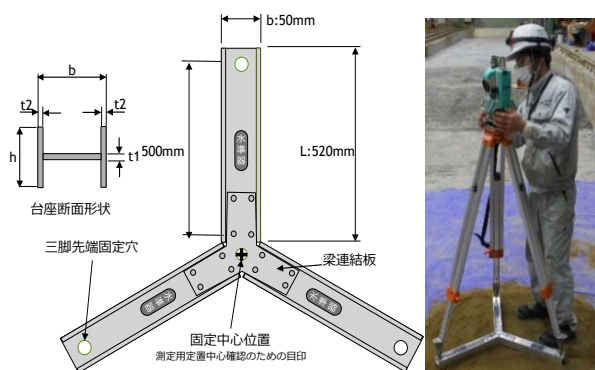


図-6 動態観測用台座及びTSによる計測状況

表-2 動態観測用台座を用いたTSによる計測結果
(任意座標設定 X, Y, Z:50m)

	1日目	2日目	3日目	4日目	5日目
TS 高さ(m)	1.365	1.365	1.365	1.365	1.365
X (m)	50.588	50.588	50.587	50.587	50.587
Y (m)	45.553	45.553	45.553	45.554	45.554
Z (m)	50.185	50.185	50.185	50.184	50.185
設置時間 (s)	360	180	180	180	150
測定時間 (s)	600	180	120	150	90
撤去時間 (s)	240	120	120	120	120
トータル時間 (s)	1,200	480	420	450	360

(3) 簡易的な工夫による効果(従来との比較)

従来の動態観測を想定した計測と比較した結果、動態観測用台座を用いた場合、1日目は設置に時間を要したものの、2日目以降は設置時間が半減し、

作業効率の向上を確認することができた(図-7)。加えて、台座を使用することで測定精度も安定し、現場での実用性の高さを示すことができた。

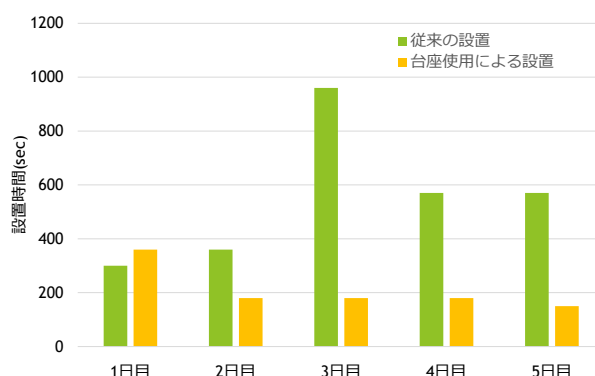


図-7 動態観測用台座の有無による設置時間

3.2 既存のICT測量技術等による動態観測の適用検討

盛土施工段階の地盤の安定性や変動を効率的・的確に把握可能なICTを活用した計測技術の検討を進めた。

(1) 既存のICT測量技術の選定

効率的・的確に動態観測を行うため、取り扱いが比較的容易で流通面において導入可能なICT測量技術について、現場での活用を想定し、NETIS登録されている計測技術より選定を行った。

その結果、土工等での施工管理やインフラ維持管理等で現場導入が進められている計測技術として、UAV「高速ドローン測量システム(NETIS番号:QS-230006-A)」,スマートフォン内蔵カメラ「Smart Construction Quick 3D(NETIS番号:KT-230083-A)」,一眼レフカメラ「遠方自動撮影システム(NETIS番号:KT-190008-VR)」を選定した。

これらの計測技術については、土木研究所建設機械屋外実験施設に構築した盛土に図-8に示す測量杭を対象に計測を行った。以下に結果及び課題を述べる。なお、予めTS(SOKIA:NET05AX)により、各種計測技術を比較検証(目標精度として±5mm以内)するための計測を行った。

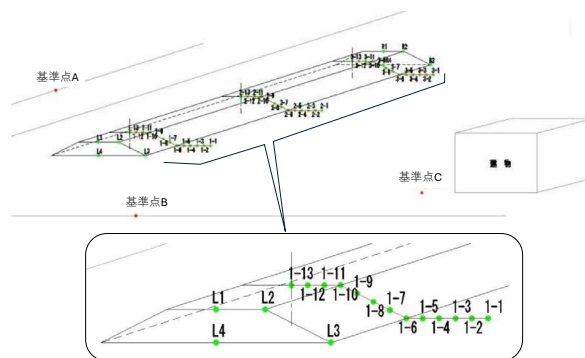


図-8 測量杭の設置場所及び基準点

(2) UAV による計測

計測後の SfM 処理では点群の密度が低く、盛土部分は一定程度の点群化が可能であったが、密度のばらつきにより検証点となる杭の位置特定が困難であった。そのため、現状の UAV 計測による動態観測への適用は困難と判断した。

効率面では、3 側線を 1 回のフライトで計測でき、1 側線あたりの所要時間は準備約 3 分、計測約 2 分の計 5 分であった（写真-2）。一方、SfM 処理に要する時間は、使用ツールの性能や設定により、最短 10 分から最長 6 時間と大きく変動した。計測自体は効率的であるものの、ツールの選定により内業（処理作業）時間が大きく左右される点が課題となる。



写真-2 UAV による計測状況

(3) スマートフォン内蔵カメラによる計測

本計測は、ICT 施工での活用を想定したものであり、「地上写真測量を用いた出来形管理の監督・検査要領（土工編）」等で示される 50mm 精度を基準とする技術である。検証（写真-3）では、平均 5mm ～10mm の精度が確認された。

効率面では、1 側線あたりの平均所要時間は、準備約 5 分、計測約 1 分の計 6 分、SfM 処理時間は 10～20 分であった。

一方、計測時における現場斜度の違い等に起因する計測位置や方法の誤差が、動態観測において求められる 5mm 精度の確保に影響を及ぼす点は、今後の課題といえる。



写真-3 スマートフォン内蔵カメラによる計測状況

(4) 一眼レフカメラによる計測

写真-4 に示す一眼レフカメラを用いた遠方自動撮影システム（以下、一眼レフカメラ）は、主に橋梁などのインフラ点検におけるひび割れ等の記録に活用された実績があり、正対撮影による計測検証において、水平方向で平均 1mm～1.5mm、鉛直方向で平均 7mm～40mm の精度を確認した。

精度に影響を与える要因としては、解像度、撮影角度、レンズの光学的な歪み、撮影枚数の多少が挙げられ、これらの条件を複合的に最適化することで、安定した精度が確保できるものと考えられる。今後、精度に関わる諸条件の詳細な検討が課題となる。なお、本計測手法は一定の精度を得られる一方で、計測にやや時間を要する点も課題として挙げられる。



写真-4 一眼レフカメラによる計測状況

(5) 計測結果のとりまとめ

各種計測技術について、検証結果に基づき課題を解決した際に期待される精度を表-3 に示す。

UAV のデジタル画像による計測精度は一般的には解像度が高いほど優位である。しかし、今回の検証では画角が狭くなる分、隣接画像間でのパターンマッチングで不利になり、飛行高度が低いと、点群処理ができなかったことが確認され、期待される精度の確保が難しい結果となった。実現場において、同様の事象が発生することが考えられ、SfM 処理ソフトの性能にも左右され、効率面においても課題が残る結果となった。今後、画像取得の最適化や SfM アルゴリズムの改良によって、点群密度のばらつきが抑制されれば、杭位置の特定精度の向上も期待され、UAV 計測の適用可能性が高まる可能性がある。また、活用を広域的（マクロ）な観点での動態観測が必要な場合、工区全体の状態監視といった施工管理への利用に期待できるものと考えられる。

スマートフォン内蔵カメラによる計測は、現段階においても比較的高い計測精度が得られており、盛土延長 40m・1 断面の条件下では、人員・計測時間の観点から生産性の高い技術と評価できる。

今後、スマートフォンのカメラ性能がさらに向上すれば、5mm 以下の高精度な計測も期待できる。

表-3 各種計測技術による検証結果

手法		UAV			スマートフォン内蔵カメラ		一眼レフカメラ				
対象		法下面-法面-天端			法下面-法面	法下面-法面-天端	法下面	法下面	法面	法面	法面
計測距離		20m	12m	6m	0.5m-1.0m	0.5m-1.0m	12m	12m	10m	25m	25m
角度条件		正対	正対	正対	—	斜め 45 度	水平 50 度	水平正対	水平正対	水平正対	水平正対
							鉛直 40 度	鉛直 40 度	鉛直 30 度	鉛直正対	鉛直正対
絶対平均値	X	鋺の特定困難			6.1mm	23.9mm	13.4mm	6.4mm	1.2mm	1.6mm	0.8mm
	Y				7.2mm	9.0mm	12.8mm	6.3mm	—	—	—
	Z				10.6mm	11.3mm	—	—	54.5mm	38.4mm	7.1mm
課題解決により期待される精度		—			5mm-10mm	10mm-20mm	10mm-15mm	5mm-10mm	1mm-60mm	1mm-40mm	1mm-10mm

また、実運用においては、斜面作業時の安全性と計測精度の両立が求められることから、一定条件下で安定した計測が可能となる治具等の活用も有効と考えられる。

一眼レフカメラによる計測は、1 断面をほぼ正対で撮影し、レンズ歪みを精度良く補正できた場合には、1mm 前後の高い精度を実現できる可能性がある。ただし、実現場で安定した計測を行うためには、現場規模や周辺環境を踏まえたうえで、使用するレンズの選定や計測位置の事前検討が必要となることから、効率面での課題が残ると考えられる。

4. まとめ

4.1 地盤改良時における改良体の施工状況を把握するための稼働データの活用検討

本研究では、軟弱地盤改良において不可視な地盤内部の改良状況を、改良機の機械稼働データを用いてモニタリングし、適切な施工管理が可能かを検証するため、深層混合改良工法を対象とした施工実態の調査を行った。改良機の稼働データ分析の結果、ロッド回転数を上げることで一軸圧縮強さが上昇する傾向が見られ、また、ロッドトルクについてもばらつきはあるものの、大きいほど強さが増す傾向が確認された。さらに、土質の違いによって強度の上昇傾向に特性が見られることも明らかとなった。

これらの結果から、改良機の稼働データを活用することで、広域的な施工管理を時系列でモニタリングする可能性が示された。しかしながら、本研究では、512 データのうち土質条件や含水比の欠落を含んでおり、それらの影響は考慮されていない。このため、強度のばらつきには土質特性や含水比の違いに加え、改良機の仕様や施工条件の違いも影響している可能性がある。特に、オーガの軸数や羽根形状、スパイラルピッチ、改良径といった改良機の仕様は、固化材と土の混合状態に直結し、攪拌性能に大きく関与する。また、スラリーの供給量や圧送圧力、回転数、貫入・引抜速度といった施工条件の組合せによっても、攪拌の均質性が左右され

る可能性がある。今後、改良体の品質管理技術の実用化を図るには、改良機の仕様および稼働パラメータに関する詳細なデータを収集・整理し、より高精度な施工管理モデルの構築を進める必要がある。特に、現場条件の多様性を踏まえ、攪拌性能と改良品質の関係性を定量的に把握する取り組みが今後の課題である。

4.2 盛土構築時における動態観測の効率化に向けた検討

本研究では、簡易的な動態観測技術の改善を通じて、測定精度を確保しつつ作業効率の向上を図る手法として、動態観測用台座の有効性を確認した。これにより、従来手法を大きく変更することなく、安定した計測が効率的に実施可能であることが示された。今後は、動態観測用台座の実用化に向けて、現場検証を通じた最適形状の検討や、使用環境に応じた改良が求められる。

一方、ICT 測量技術を動態観測へ応用するにあたっては、現在の基準に合わせた TS 計測の代替技術の実用化には個別の課題解決が必要であるが、本研究により、将来的な適用に向けた基礎的な知見を得ることができた。今後、安定的な計測精度を確保するための治具開発に加え、撮影方法や処理手法を含む計測条件の最適化が重要な検討課題となる。

参考文献

- 1) 佐々木亨, 宮下千花, 川村逸太, 茂木正晴, 間瀬利明: 土質の不確実性が深層改良体の施工品質に与える影響に関する一考察, 第 16 回地盤改良シンポジウム, pp.232-237, 2024.
- 2) 盛内政孝, 岡田昌俊, 山中誠也: 泥炭性軟弱地盤への盛土における自動追尾型 TS を用いた安定管理について, 第 62 回 (平成 30 年度) 北海道開発技術研究発表会, 2017.
- 3) 社団法人セメント協会, セメント系固化材による地盤改良マニュアル第 5 版, 技報堂出版株式会社, p.234, 2021.
- 4) 茂木正晴, 山口崇, 橋本聖: TS による軟弱地盤の効率的な動態観測手法に関する研究, 土木学会年次講演会, VI-1165, 2024.

12. 施工データの活用（ICT 施工 Stage II）の取組効果について

～さらなる省人化に向けた ICT 施工の次なる段階～

国土交通省大臣官房参事官（イノベーション）グループ施工企画室

○ 長田 陸

1. はじめに

国土交通省では、平成 28 年度より建設現場の生産性向上を図るため、ICT 建設機械や無人航空機（UAV）等を活用した ICT 施工や、設計・施工におけるデジタル技術の積極的な活用など、「i-Construction」を進めてきた。

i-Construction に着手して以降、社会資本整備をめぐる状況は大きく変化してきており、生産年齢人口の減少や高齢化の進展、気候変動の影響による自然災害の激甚化・頻発化、さらに高度経済成長期以降に集中的に整備されたインフラの老朽化が進行している。今後さらに生産年齢人口の減少が進んだ場合、将来にわたり社会資本の整備・維持管理を持続し、国民生活に不可欠なサービスを提供していくためには、デジタル技術やデータの活用により、少ない人数で仕事を遂行できるよう、建設産業の仕事のあり方そのものを変革していく必要がある。そこで、これまで進めてきた i-Construction を深化し、さらなる抜本的な建設現場の省人化対策として「i-Construction2.0」を打ち出した。i-Construction2.0 では、トップランナー施策として「施工のオートメーション化」、「データ連携のオートメーション化」、「施工管理のオートメーション化」を掲げ、これらに取り組むことで、今よりも少ない人数で、安全に、できる限り屋内など快適な環境で働く生産性の高い建設現場を実現することを目指している。

本稿では、「施工のオートメーション化」を進めるにあたり、これまでの ICT 施工の取組を次の段階へ進めた「施工データの活用（ICT 施工 Stage II）」について、その概念や取組効果を紹介する。

2. 取組の経緯

i-Construction のトップランナー施策の一つである ICT 施工は、起工測量から設計データ作成、施工、出来形管理、納品に至る五つのプロセスで三次元データを活用し施工を行う取組である。具体的には、UAV 等を活用して現場の測量を行い、発注図面から作成した三次元設計データと重ね合わせることで、土量などの施工数量を算出する。さらに設

計データを建設機械に取り込み、作業装置を自動または半自動的に動かすマシンコントロールや、ナビゲーション的に作業装置を誘導するマシンガイダンスといった ICT 建設機械を活用した施工を行う。これにより、作業の目印となる丁張りをかける必要もなく、水糸を張り手元作業員が確認していた作業も必要なくなるなど、施工の効率化と作業人員の削減が実現した。

直轄土木工事における ICT 施工の実施率は年々増加しており、2023 年度は公告件数の約 89% で実施している。また、都道府県・政令市においても公告件数・実施件数ともに着実に増加している結果が得られた（図-1）。

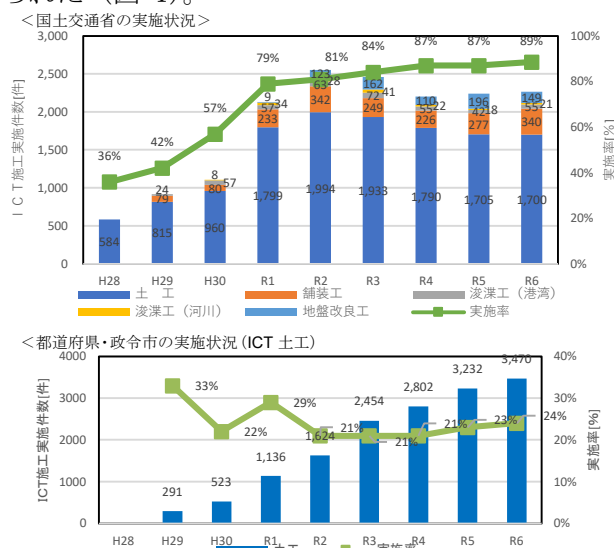


図-1 土木工事における ICT 施工の実施状況

ICT 施工を実施したことによる効果として、延べ作業時間の縮減について調査した結果、起工測量から出来形管理に至るまでの一連のプロセスで、土工では約 3 割の縮減効果が確認された（図-2）。しかし近年、この縮減効果は毎年約 3 割程度と横ばいで推移しており、作業時間の大きな割合を占める施工の部分においては、起工測量などの他の段階に比べて縮減効果が小さいという調査結果が得られている（図-3）。このため、新たな取組により施工のさら

項目	R1	R2	R3	R4	R5	R6
ICT (分)	125	140	135	125	135	115
従来 (分)	175	190	195	185	200	170
縮減率 (%)	30	35	38	35	38	40
平均 (%)	35	35	35	35	35	35

ICT活用工事効果（土工） N = 503

項目	従来 (Before)	ICT (After)
起工測量	17.1	6.9
設計データ作成	15.0	8.7
施工	138.7	104.9
出来形管理	13.1	2.7
検査	6.1	5.4
納品	195.3	113.6
合計	485.2	467.2

約3.5% (Reduction in total work hours)

3. 施工データの活用（ICT 施工 Stage II）の取組

施工データの活用（ICT 施工 Stage II）では、建設現場における建設機械の位置情報や稼働状況、施工履歴など様々な情報（施工データ）を集約し活用することで、現場のデジタル化・見える化を進めるとともに、必要な資機材配置や作業工程などを見直すことで作業の効率化を図り、さらなる省人化を目指す。つまり、これまでの ICT 施工のように、作業単位の効率化にとどまらず建設現場全体の効率化を目指す取組である。

計画最適化・改善

施工計画シミュレーション

資機材配置・作業工程等の見直し

施工計画の最適化

現場の見える化
進捗状況・ボトルネック
把握

現場の状況把握

① 現場把握
② 進捗状況把握
③ 現場改善

施工

の繰り返し

令和6年度は、15件の工事を対象に施工データの活用（ICT施工 StageⅡ）の取組効果等に関する調査を実施し、工程短縮効果や省人化効果など様々な効果を確認した（表-1）。

整備局等	事 務 所	工 事 名
北海道	札幌開発建設部千歳川河川事務所	石狩川改修工事の内 柏木川右岸築堤盛土工事 石狩川改修工事の内 松島川右岸築堤盛土工事
	札幌開発建設部札幌道路事務所	道央圏連絡道路 長沼沿 南長沼ランプ改良工事
東 北	北上川下流河川事務所	吉田川大規模災害関連工事(河道掘削工事)
関 東	常総国道事務所	R5東関東清水地区改良工事
		R5東関東清水石神地区改良工事
		R5東関東築地地区改良工事
中 国	岡山国道事務所	令和5年度玉島笠岡道路浜中地区中工区改良工事 令和5年度玉島笠岡道路浜中地区西工区改良工事 令和5年度玉島笠岡道路浜中地区東工区改良工事
	浜田河川国道事務所	令和5年度福光・浅利道路福光地区第4改良工事
	山陰西部国道事務所	令和5年度木与防災宇田地区第3改良工事
	福山河川国道事務所	令和5年度福山道路長和第5改良工事
	広島西部山系砂防事務所	令和5年度広島西部山系山本9号砂防堰堤外工事
九 州	八代河川国道事務所	鹿児島3号出水北IC13工区改良工事

令和6年度の調査によって確認された効果を示す。得られた取組事例は大きく以下の3つに分類された。

- ① 施工計画シミュレーションによる施工計画の最適化
- ② ボトルネックの把握・改善
- ③ データ集計作業や現地確認作業の軽減
以降にそれぞれの取組効果を示す。

施工計画段階や施工段階において、施工計画シミュレーションを実施することにより、滞留状況や運搬量を予測できる。得られた予測結果に基づき、運搬や積込体制を改善することで、施工計画の最適化を図ることが可能となる。

- 54 -

たため、敷鉄板を増設し、転回場所を設置した。これにより、運搬の作業量が $320\text{m}^3/\text{日}$ から $377\text{m}^3/\text{日}$ に増加した（図-5）。その結果、運搬に要する工期を 29 日から 25 日へと 4 日間短縮し運搬に係る作業員も述べ 377 人から 325 人へと 52 人の省人化を実現した（図-6）。



図-5 施工計画シミュレーションによる運搬経路の最適化

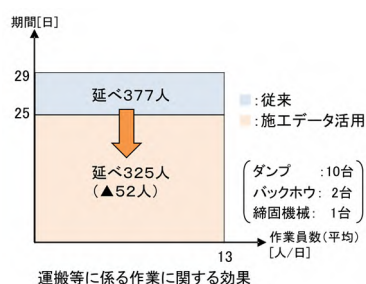


図-6 施工計画シミュレーションの取組効果

また、施工段階において、自社内の複数現場の工程を統合管理し、マイルストーンや供給量といった指標を基に、精緻かつ高頻度に把握しつつ、現場間でリソースのやり取りも実施している（図-7）。

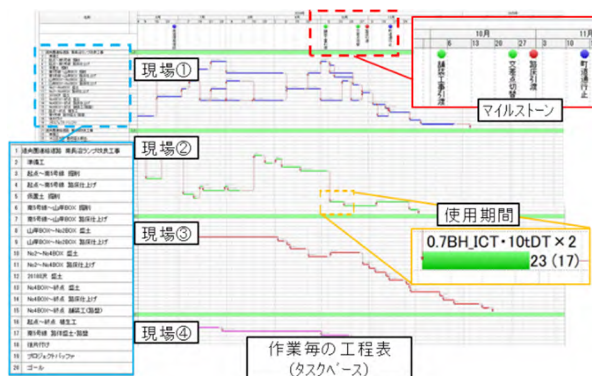


図-7 複数現場の工程表の見える化

こうした複数現場の工程表の見える化により、現場間での建機等の使用時期調整を行うことができ、当初の 3 台から 2 台へと、ICT 建機の供給量削減を実現した。（図-8）

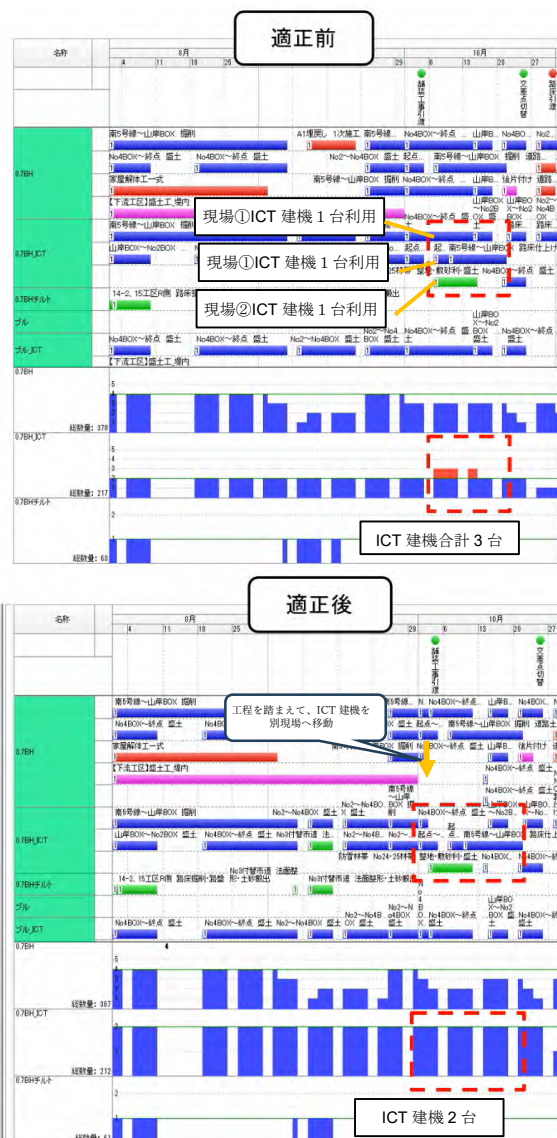


図-8 複数現場のリソースの見える化による供給量削減

3.2 ボトルネックの把握・改善

施工段階において得られた機械稼働データや施工履歴データなどの施工データを活用し、ボトルネックとなっている箇所を把握・改善することで、資機材や人材などの各種資源が有する能力を最大限に発揮することが可能となる。

北海道の事例では、施工段階において、ダンプトラックや掘削・積込み機械の位置情報及び機械稼働情報を活用することで、積込待ちによるダンプトラックの滞留が発生していることが確認された。これを改善するため、積込みバックホウを 1 台増車した結果、運搬の作業量は $500\text{m}^3/\text{日}$ から $600\text{m}^3/\text{日}$ へと 20%増加した。これにより、運搬に要する工

期は32日から27日へと6日間短縮し、運搬に係る作業員に関しても、日当りでは平均21人から22人へ増加したものの、述べ作業員数では672人から593人へと78人の省人化を実現した（図-9）。

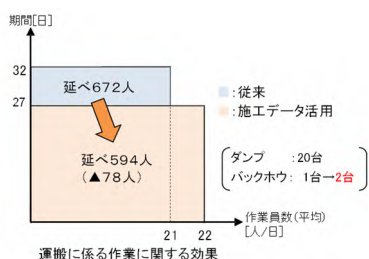


図-9 ボトルネックの把握・改善の取組効果

3.3 データ集計作業や現地確認作業の軽減

機械稼働データや施工履歴データなどの施工データを活用することで、データ集計作業や現地確認作業の軽減を図ることが可能となる。

東北地方の事例では、現場出入口に設置したカメラ映像から、ダンプトラックの入退場記録（時間・回数）や、泥落とし時間を把握・管理した（図-10）。これにより道路の汚染等が減少し、従来は週1回・約1時間程度かけて実施していた確認巡回作業を隔週2回・約30分へと削減できた。また、従来1日1時間程度行っていたダンプトラックの運行管理に関する書類作成作業についても、データを活用により、削減することができた（図-11）。

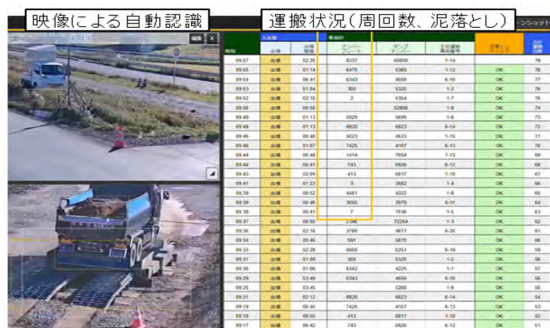


図-10 映像によるダンプトラックの入退場・泥落としの管理

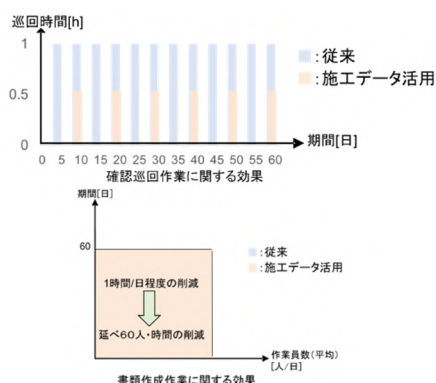


図-11 データ集計作業や現地確認作業の軽減に関する効果

5. おわりに

令和6年度に調査を実施した事例の一部について、その取組効果を検証した結果、施工データを用いて無理、無駄を的確に把握し、人員や資機材などのリソースを有効活用することで大きな省人化効果が得られることが分かった。本稿で紹介した事例以外にも、複数現場におけるリソース共有による全体最適化や、CO₂排出量の見える化による排出量削減など、施工データを有効活用することで様々な効果が期待できる。

また、施工データを活用した全体最適の実現には、監督職員と受注者間、受注者と協力会社等の関係者との間で、円滑なコミュニケーションが図れていることも重要である。計画最適化のためのリソースの調整等は、良好なコミュニケーションの上に成り立つものであり、相互の課題に対して共感・協調し、協議を重ねることでより良い現場につながる。

令和7年度も引き続き試行工事を実施し、効果検証を継続するとともに、その結果を公表することで、施工データの活用（ICT 施工 Stage II）の有効性を周知する。あわせて、要領等の整備を進めることにより、本取組みの一層の推進を図る。

参考文献

- 1)国土交通省：i-Construction～建設現場の生産性革命～,2016.
<https://www.mlit.go.jp/common/001127288.pdf>
- 2)国土交通省：i-Construction 2.0 ～建設現場のオートメーション化～,2023
<https://www.mlit.go.jp/tcc/constplan/content/001738230.pdf>
- 3)国土交通省：データ活用による現場マネジメントに関する実施要領（案）,2023
<https://www.mlit.go.jp/tcc/constplan/content/001733267.pdf>

業務委託先の開示

本報文にて報告した検討を実施するにあたり、基礎的な情報収集及び資料整理の一部を日本建設機械施工協会及び先端建設技術センターに業務委託して行った。

13. ICT 活用による堤防除草自動化技術の開発について

堤防除草現場の省人化による生産性向上に関する取組

北海道開発局事業振興部機械課○ 小川 亮司
秋田 宜克
東 陽一

1. はじめに

北海道は全国よりも人口減少や高齢化が進行しており、河川維持管理に従事する労働者不足が懸念されている。また、近年激甚化・多様化する災害に対し、堤防などインフラの品質確保と適切な機能維持が重要であり、インフラメンテナンスにかかる作業の省人化、効率化は喫緊の課題である。

河川堤防は、雨水や洪水による侵食から保護するため植生による法面保護がなされている。堤防機能を健全に維持するには目視点検を実施するため定期的な堤防除草が必要となる。北海道開発局が管理する一級河川13水系における管理延長は約1,850 kmと、国が管理する全河川堤防の約21%にあたる。また、泥炭層が広く分布する軟弱地盤地帯には、法勾配 1:5~1:10 の堤防（丘陵堤）が整備されている。図-1

全道で除草が必要な堤防の面積は 10,000ha を超え、除草作業には多くの労力と時間を要しており、河川堤防除草の省人化・効率化に向け様々な取組が行われてきたが更なる生産性向上が必要である。

北海道開発局では、これらの課題を解決するため、河川堤防除草作業における ICT(情報通信技術)を活用した自動化技術の開発と導入に向けた検討を「堤防除草の自動化検討ワーキンググループ【SMART-Grass】(Self-Moving And Remote-sensing Technique for Grass-cutting)」として進めている。

本取組で検討した除草機械の自動化技術や実証試験について紹介する。



図-1 石狩川の丘陵堤の例

2. 堤防除草の自動化検討（SMART-Grass）

2.1 自動化目標レベル

現在、河川堤防除草は現地の状況に応じてトラクターモア、ハンドガイド式草刈機、大型遠隔操縦式草刈機等を用いて施工しており、この操作は1台につき1人作業員が必要である。河川堤防除草作業の生産性向上を目指すにあたり、現在の除草方法を「レベル0」とし、1人が複数台の除草機械を運用する自動運転「レベル2」を本取組の目標として検討を進めた。図-2

2.2 自動化除草機械の選定

直轄河川の除草現場条件を基に、必要な除草法面勾配 30 度以上、除草幅 1.5m 以上とした。その他、除草能力、自動運転技術の実験状況及び改造への対応可否、国内でのメンテナンス性、国土交通省での保有状況を勘案した結果、大型遠隔操縦式草刈機が本取組に最も適したものと判断した。草刈機の基本仕様を示す。表-1

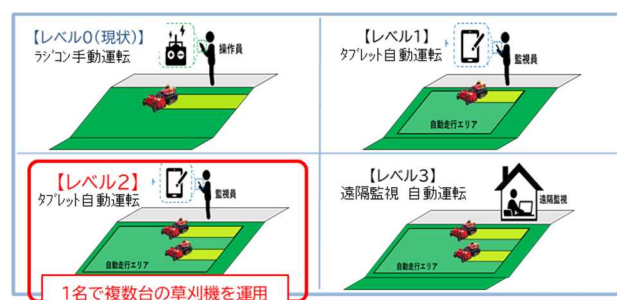


図-2 自動化目標レベル

表-1 草刈機基本仕様

全長×全幅	4,450mm×2,040mm
刈幅	1,850mm
質量	3,000kg
走行速度	0～6km/h
最大除草法面勾配	40 度

2.3 除草機械自動化システム概要

従来の除草作業の施工実態から、自動化に必要な諸条件を整理し、河川堤防における除草機械自動化システム概要を作成した。図-3

自動化システムは3つのプロセスで構成される。

【プロセス①】自動走行ルートや除草範囲を作成し、これらのデータを遠隔操作端末へ転送する。

【プロセス②】堤防除草の自動施工を実施すると共に、現地の監視員がリアルタイムで遠隔監視を行う。

【プロセス③】記録された施工履歴データを処理し、出来形管理帳票の自動生成・出力を行う。

自動走行パターンについては、北海道開発局の河川維持工事でハンドガイド式草刈機及び大型遠隔操縦式草刈機にて実施する施工実態を調査し、前後進の両方で除草する「スイッチバック」及び前進のみで除草し旋回は前後進して方向転換する「 α ターン」、前進のみで走行、旋回を行う「スパイラル」を選択出来るようにした。図-4

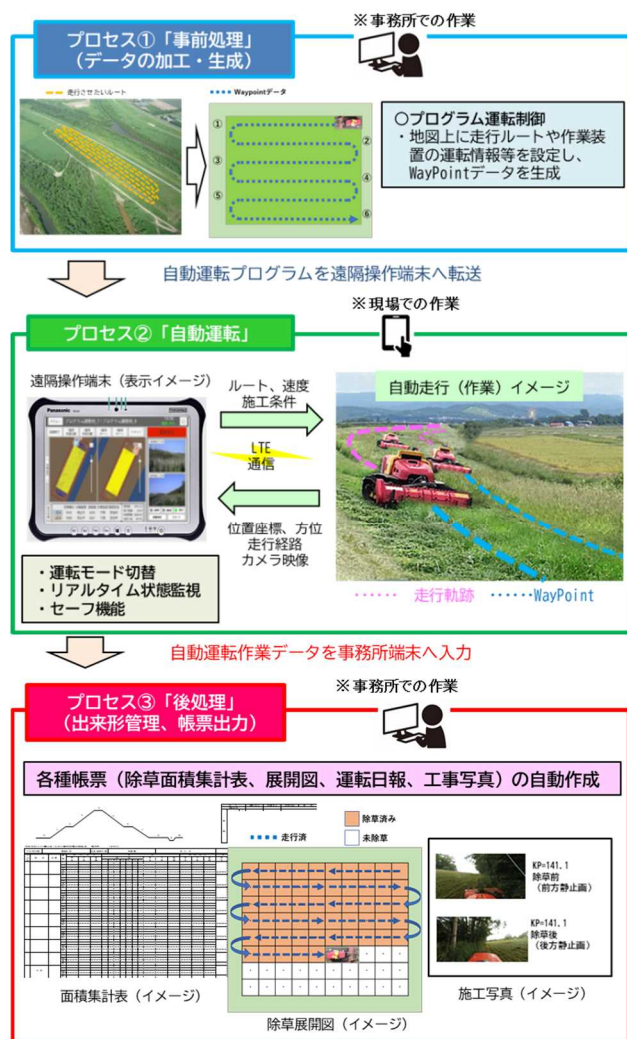


図-3 除草機械自動化システム概要

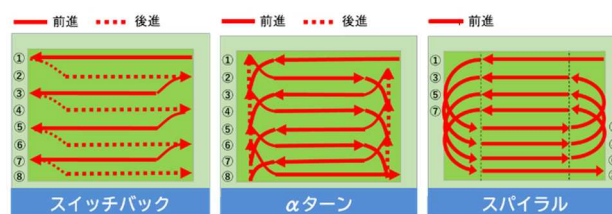


図-4 自動走行パターンイメージ

2.4 除草機械自動化システムの機器構成

除草機械自動化システムの主な機器構成は、草刈機本体上部に搭載した自動制御BOX(以下、「BOX」と言う)と草刈機の遠隔操作・監視が可能な端末(以下、「タブレット」と言う)である。BOXはGNSS受信機とIMUのセンサー類、各センサーが取得したデータを処理し自己位置推定を行う制御装置、草刈機へ走行指示信号等を通信するCANスイッチ、電源装置で構成される。図-5、図-6

草刈機の位置情報取得には、高精度な自己位置推定を行うため準天頂衛星「みちびき」のセンチメートル級測位補強サービス(CLAS)に対応したGNSS受信機を使用した。また、自動走行中の進行方向については、IMUの方位検出データをBOXの左右に設置したGNSSアンテナの相対位置から算出した方位で補正することで精度を高めている。

タブレットとBOXの通信はLTE回線を用いており、タブレットからBOXへは施工範囲、走行ルート、走行速度等の施工条件を登録すると共に自動運転の開始と停止及び、緊急停止の操作信号を送信する。また、BOXからタブレットにはカメラ映像、自己位置座標、時刻、方位、走行経路等のステータス情報が0.1秒周期で送信される。

自動走行中の監視についてはBOXの前後に設置した監視カメラ映像をタブレットに表示することで、リアルタイムで進行方向の安全確認と後方の施工状況確認を可能とし、2台の草刈機による協調運転作業の施工状況についてもタブレット上での確認を可能とした。



図-5 大型遠隔操縦式草刈機外観・機器構成

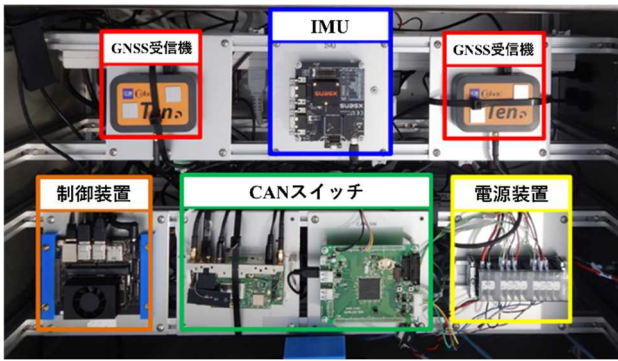


図-6 自動制御 BOX 内部

3. 除草機械 1 台による自動化システム走行試験

3.1 実験フィールドによる機能及び動作確認

令和 3 年度に自動化システムを試作し、平坦な実験フィールドにて草刈機 1 台による自動走行、セーフ機能及び出来形管理帳票生成のための出来形計測技術の確認実験を行った。

自動走行では「スパイラル」による直進性及び旋回性の確認を 2.0km/h、4.0km/h の条件にて実施、刈り残し防止のためラップ幅を 500mm としていることから自動走行ルートと実走行軌跡に対する直角方向のズレ幅（以下、「誤差」という）の目標値をラップ幅の半分に相当する 250mm とした。

4.0km/h の条件下では直線区間で目標値を超える蛇行が発生、旋回部分では両速度とも大きく目標値を超える結果となった。自動走行プログラムは施工エリアに配置された経由地点を通過するようルート計算を行っており、設定した自動走行ルートから外れた場合は次の経由地点を目指した走行となるため、結果、自動走行ルートと実走行軌跡のズレ幅が大きくなったと考えられる。図-7

セーフ機能は、タブレットによる緊急停止操作と自動走行中の施工エリア逸脱時の自動停止機能について、2.0km/h、4.0km/h それぞれの条件下で約 1 秒以内に停止する結果を確認した。

出来形計測技術では、除草対象となる施工エリア面積をメッシュで区切り、草刈機がメッシュ中心位置を通過した部分を除草済範囲として、自動走行したルートを反映した除草出来形展開図が生成されていることを確認した。図-7

3.2 河川堤防による現場実証試験

令和 4 年度は自動走行時の走行精度及びセーフ機能の現場実証試験を、直轄管理する河川堤防（法勾配 1:5、1:10）にて、「スパイラル」「スイッチバック」「αターン」の自動走行パターンで実施した。試験場所における植生は 60～200cm 程度のヒメシバやススキ等多種多様な草が繁茂する区域であった。

令和 3 年度に確認した自動走行の誤差について、自動走行ルートの各経由地点に向けて走行し、経由地点が近づく度に目標の経由地点を更新してい

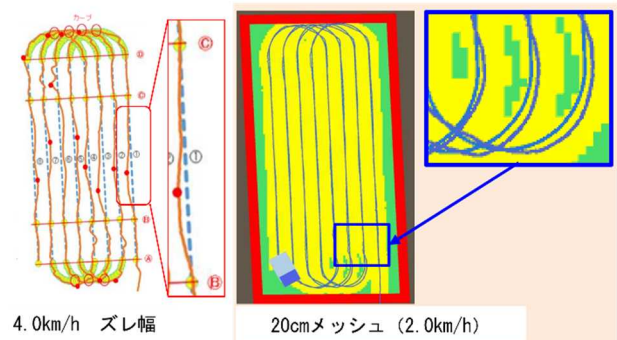


図-7 自動走行（左）出来形計測（右）

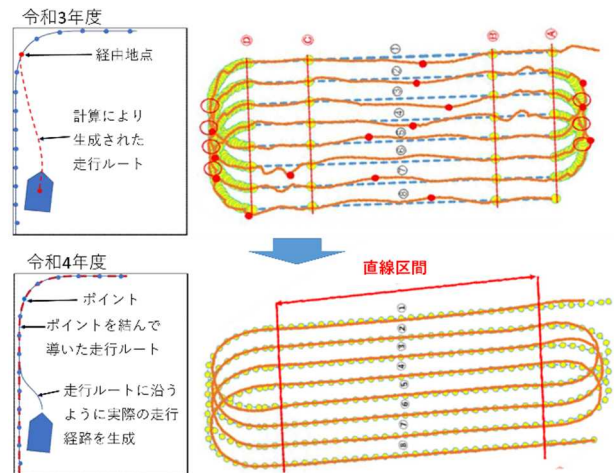


図-8 令和 4 年度 自動走行結果

く方式としていたものを、自動走行の開始地点から終了地点まで順にポイントを結んで導いた自動走行ルートとの誤差が最小となるよう改良したことにより自動走行精度が向上、4.0km/h、6.0km/h で試験を行った結果、目標値を下回ることを確認した。図-8

スパイラルのほか全ての走行パターンの直線区間についても目標値内に収まることを確認した。

4. 自動化システム協調運転実証試験

令和 5 年度に自動化目標レベル「レベル.2」に向け自動化システムを改良し、直轄河川堤防で 2 台協調運転技術の検証を行った。

協調運転については、1 つの作業エリア内で同時に 2 台での自動運転を行う「雁行運転」と 2 つの作業エリアでそれぞれ 1 台で自動運転を行う「別エリア運転」の 2 パターンを設定した。図-9

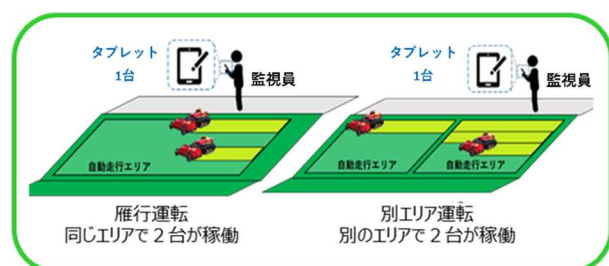


図-9 2 台協調運転パターンイメージ

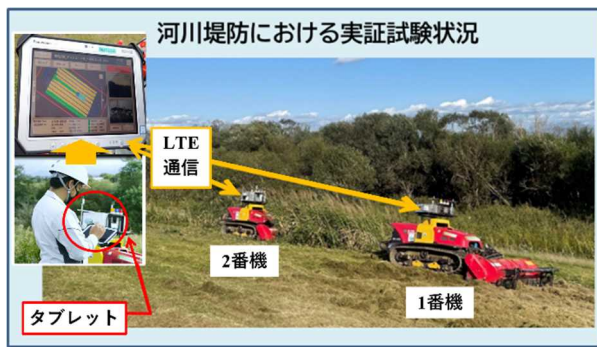


図-10 河川堤防における協調運転実証試験状況

試験内容として「協調運転技術(走行精度)確認」「自動運転追加機能(エンジンストール防止, 協調運転接触防止)確認」「出来形計測技術の確認」の項目を設定した。

試験条件は2パターン(法勾配 1:5, 1:10)の堤防法面勾配に複数の施工エリアを設定, 協調運転パターンを2種類(雁行運転, 別エリア運転), 自動走行パターンを3種類(スイッチバック, α ターン, スパイラル), 走行速度は4.0km/h, 6.0km/hで設定した。

なお, 自動化システム2台協調運転技術の制御を行う上で最初に走行する草刈機を1番機, 次に走行する草刈機を2番機と定義する。図-10

4.1 協調運転技術(走行精度)確認

試験の結果, 走行精度については雁行運転, 別エリア運転ともに各自動走行パターンにおいて, 自動走行ルートと実際の自動走行軌跡の平均誤差は目標値 $\pm 250\text{mm}$ の範囲内であることを確認した。

また, 自動運転時に多少の蛇行が発生した場合でも, 最大誤差は目標値 $\pm 250\text{mm}$ を超えないことを確認した。図-11

4.2 自動運転追加機能(エンジンストール防止)

イタドリやススキなどの草が繁茂している場所の自動運転では草刈機に高い負荷がかかるため, エンジン回転数の低下によるエンジンストールの発生を確認した。この場合, すべての機能が停止するため復帰にはエンジンを手動で再スタートした上で, 自動運転の再設定が必要である。これに対応するため, エンジン回転数の低下(1,900rpm以下)を検知した場合, 走行を減速・停止し, 草刈作業による負荷を一時的に軽減させることで, エンジン回転数の回復を図るエンジンストール防止機能を構築, この機能により高負荷時でもエンジンストールせずに自動運転できることを確認した。

4.3 自動運転追加機能(協調運転接触防止)

協調運転(雁行運転)による草刈作業では2台が同じエリアで草刈作業を行うため, 草刈機同士が近づいた場合に接触を回避するための対策が必要である。

この対策として, 2台が一定距離以内に近づいた場合, 監視員に対しタブレットで警告を発出する

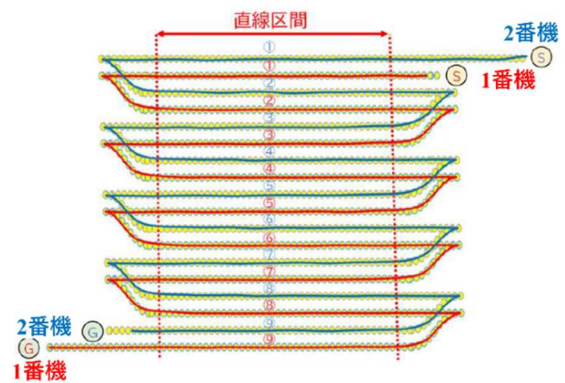


図-11 協調運転(スイッチバック)走行軌跡

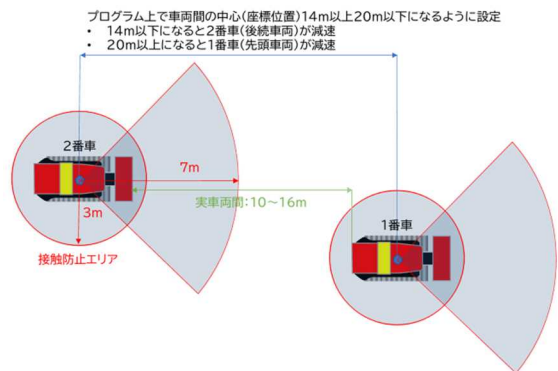


図-12 協調運接触防止機能

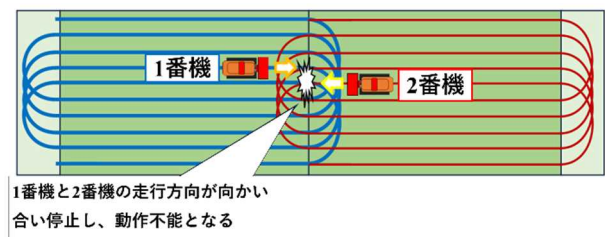


図-13 自動走行不能(デッドロック)状態

と同時に2番機が減速, 更に接近を確認すると先行している1番機の運転を継続した状態で2番機をその場で一度停止, 1番機との距離が一定以上離れてから2番機は徐々に速度を上げ, 運転を再開させることで接触を防止できる協調運転接触防止機能を構築, この機能により接触を防止出来ることを確認した。図-12

2台協調運転(別エリア運転)において, 2台それぞれの作業エリアが隣接している場合, 重複区間で衝突を防止するため一時停止することがあるが, 互いの進行方向が向かい合う時は自動走行不能(デッドロック)となる事が判明した。図-13

4.4 出来形計測技術の確認

出来形計測技術にて記録された施工記録データを, 「集計表」「施工エリア」「数量調書」「写真」としてエクセルシートに出力, 工事用帳票に活用できる電子データを作成する出来形計測システムを構築した。

表-2 計測面積精度比較

計測面積精度比較			
計測パターン	実際の設定施工 エリア面積 (m2)	システム 計測面積 (m2)	計測精度 (%)
1	860.2	859.8	99.95
2	860.2	859.6	99.93
3	716.6	716.3	99.96
4	716.6	716.2	99.82
5	860.2	859.8	99.95
6	860.2	859.6	99.93
計測面積精度平均値			99.92

また、出来形計測システムにて設定した 20cm のメッシュサイズによる処理を行った面積と実際の施工エリア面積を比較した結果、計測精度が 99% 以上であることを確認した。表-2

5. 運用に向けた実証試験

令和 6 年度は平坦な実験フィールドでの「非矩形エリアでの走行検証」のほか、直轄河川堤防において機器構成の簡素化や廉価化に向けた「方位検出技術の比較検証」及び前年度判明した 2 台協調運転における「デッドロック防止機能」の試験を行った。

「方位検出技術の比較検証」及び「デッドロック防止機能」の現場実証試験場所については、昨年度までの試験現場よりも急な傾斜地において自動走行精度を検証するため、最大法勾配 1:2 (26.6 度) の直轄河川堤防を選定した。

5.1 非矩形エリアでの走行検証

直轄河川堤防の除草現場条件を模した矩形以外のエリアでの自動走行について、スイッチバック動作による単独運転及び雁行運転にて検証を実施、いずれも自動走行が可能であることを確認した。

単独運転での除草エリア面積に対する実除草面積の割合（以下、「刈取率」という）は 90%，雁行運転では 87.4% の刈取率であった。図-14

5.2 方位検出技術の比較検証

現状で使用している方位検出技術は、受信機 1 台とアンテナ 1 基で 1 組となるシングルアンテナタイプの GNSS 受信機を 2 組（以下、「シングルアンテナ」と言う）と、測定性能が高く高価格な IMU（以下、「高精度 IMU」と言う）1 基の機器構成である。

機器の簡素化や廉価化（ランクを下げた機器の採用等）について検討するため、受信機 1 台につきアンテナ 2 基で構成されるデュアルアンテナタイプの GNSS 受信機（以下、「デュアルアンテナ」と言う）及び高精度 IMU よりも測定感度誤差・精度が劣っているが小型軽量で安価な IMU（以下、「低価格 IMU」と言う）を用いて、機器の方位検出精度・実用性について比較検証を行った。図-15

現状システムのシングルアンテナ+高精度 IMU は過年度の試験結果より刈取率は 99% 以上であり

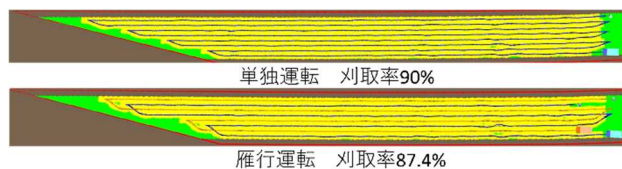


図-14 非矩形エリア刈取率

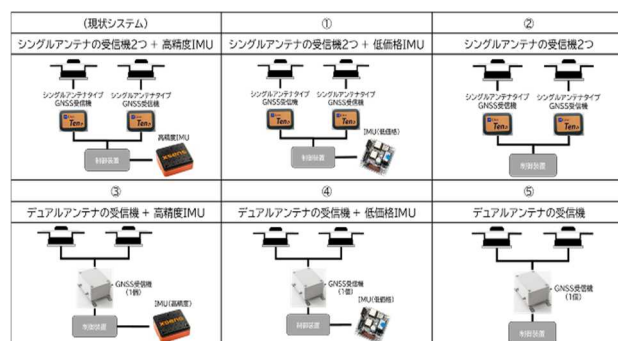
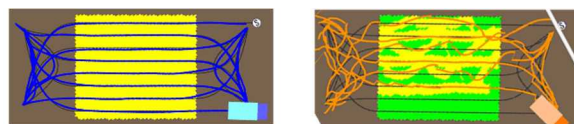


図-15 方位検出技術の比較



低価格IMU（1回目走行時） 低価格IMU（5～6回目走行時）

図-16 低価格 IMU 経路ズレ

使用可能と考えられる。

①、④の低価格 IMU を用いた場合、シングルアンテナ、デュアルアンテナ共に走行を重ねる毎に本来の自動走行ルートから逸脱することが確認された。図-16

②、⑤の IMU を用いない場合においてシングルアンテナは誤差の目標値内で刈取率 99% 以上となったが、デュアルアンテナでは刈取率 94% 以上で直線及び旋回において大きく蛇行することが確認された。

③のデュアルアンテナ+高性能 IMU において刈取率 97% 以上となったが直線において蛇行することが確認された。

①、④における自動走行ルートからの逸脱原因は使用した低価格 IMU が高精度 IMU と比較して、作動後の回転角が安定するまでに 0.5 秒程度の遅延があり、出力データについても実際の動作に対して同様の遅延が発生しているためと想定される。このため繰り返し走行により地面が掘れ起伏振動が大きくなるにつれて測定誤差が蓄積され、正確な方位検出が出来なくなったと考えられる。

③、⑤におけるデュアルアンテナによる蛇行の原因として、検証で用いたデュアルアンテナが製品仕様上 Windows 対応版測位ソフトウェアをインストールした PC を介す必要があり、測位情報の伝送時にバッファ遅延が発生するものと考えられる。自動化システムで用いる場合は選定する機器仕様について検討が必要であることを確認した。

表-3 IMU 内蔵デュアルアンテナ

パターン	スイッチバック		αターン		スパイラル	
	平均	最大	平均	最大	平均	最大
誤差 (mm)	88	169	90	143	83	153
全平均	121					

表-4 機器構成比較表

	シングルアンテナ + 高精度IMU	シングルアンテナ + 低価格IMU	デュアルアンテナ + 低価格IMU	IMU内蔵 デュアルアンテナ
走行精度の 平均誤差 (数値が低い ほど高精度)	102mm	116mm	142mm	121mm
簡素化 (機器の個数)	5個 GNSSアンテナ×2 GNSS受信機×2 IMU×1	5個 GNSSアンテナ×2 GNSS受信機×2 IMU×1	4個 GNSSアンテナ×2 GNSS受信機×1 IMU×1	3個 GNSSアンテナ×2 GNSS受信機×1
廉価化	現状	現状の約 $\frac{2}{3}$	現状の約 $\frac{1}{3}$	現状の約 $\frac{1}{5}$

①～⑤とは別に、機器構成の簡素化及び廉価化として、平坦な実験フィールドにてIMU内蔵型デュアルアンテナの検証も行った。

走行速度は6km/hで設定、検証の結果、各自動走行パターンにおいて誤差の目標値±250mmを超えないことを確認した。表-3

現状の機器構成よりも簡素化及び廉価化を狙うことができる機器構成について総合的に比較し、IMU内蔵型デュアルアンテナが走行精度を確保しつつ簡素化及び廉価化に有効であると考えられる。

表-4

5.3 デッドロック防止機能

2台の草刈機が隣接する作業エリアにおいて、縦断方向や横断方向で作業エリアが重複する区域を「フィックスエリア」と設定し、走行状態・走行場所・フィックスエリアへの侵入の有無について2台が相互に共有し走行制御することで、1台がフィックスエリアに侵入した場合に、もう1台の草刈機は先に侵入した草刈機がフィックスエリアから離脱するまでフィックスエリア手前で停止する機能を構築した。図-17

この機能により縦断方向及び横断方向共にデッドロックを回避出来ることを確認した。

6. 堤防除草自動化の評価

堤防除草自動化の評価として、サイクルタイムの比較による生産性の評価を行った。

サイクルタイムには堤防除草工事受注者の操作員を対象に、大型遠隔操縦式草刈機を用いた施工における手動運転と別エリア運転のスイッチバック動作での2台協調自動運転を比較した結果、20歳代のサイクルタイム比率は約0.59、60歳代のサイクルタイム比率は約0.49となった。表-5

自動運転では1人で2台の運転が可能であるため、草刈作業中は操作員1名分の省人化が可能であること、出来形計測技術による除草後の出来形計測の自動化により、さらなる生産性の向上が期待出来る。

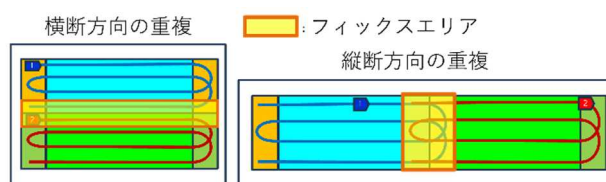


図-17 フィックスエリア

表-5 サイクルタイム(一人1000m2 当たり施工)

操作員 年齢	手動運転	自動運転	比率 (手動/自動)
20歳代	16分05秒	9分33秒	0.59
60歳代	24分28秒	12分04秒	0.49

7. まとめ

堤防除草の自動化について、2台協調運転による走行精度及び安定性、自動運転時のデッドロック防止機能、自動運転追加機能(エンジンストール防止、協調運転接触防止)及び出来形計測技術の実用性を確認することが出来た。

自動運転及び出来形計測技術により、作業中の操作員及び出来形計測に必要な人員の省人化へ繋がることから、生産性向上のほか人件費のコストメリットが期待できる。

方位検出技術において自動走行の高精度化、機器構成の簡素化及び廉価化を目的としてIMU内蔵型デュアルアンテナの有効性を確認したが、平坦なフィールドでの検証であったため、河川堤防現場などにおいて傾斜による影響の確認が必要である。低価格IMUはデータ遅延による走行ルート逸脱が見られたが、廉価化を考慮し走行パラメータ(最大旋回加速度、最大旋回速度、目標地点への到達判断など)の設定値の調整による自動走行精度向上の検討が必要と考える。

今後は、試行工事として堤防除草工事受注者による堤防除草現場において自動運転の実施、及び令和6年度までの成果と課題を踏まえた現場実証試験を実施し、令和8年度の運用開始を目指して新たな課題の抽出のほか、安全対策や操作マニュアル等の施工者の支援体制を構築していく予定である。

これら堤防除草自動化の取組を引き続き進め、スマートで持続可能なインフラメンテナンスの早期実現を目指す。

参考文献

- 1) 東・三浦・石道:ICT活用による堤防除草現場省人化技術の開発に向けて、第68回(2024年度)北海道開発技術研究発表会論文

14. ICT 除雪機械の現場導入に向けた取組状況と今後の展望について

国土交通省大臣官房参事官（イノベーション）グループ施工企画室 小池 喬
国土交通省大臣官房参事官（イノベーション）グループ施工企画室 ○ 細川 太暉

1. はじめに

近年、除雪機械の熟練オペレータの減少および担い手不足が深刻化している。

令和4年度に国土交通省の除雪作業を受注した会社に対して行ったアンケート調査の結果では、全国の除雪作業従事者の年齢構成は、20代以下が7%にとどまる一方で、50代以上が49%を占めており、高齢化の進行が顕著である（図-1）。また、従事者の経験年数に関しては、10年未満が45%を占めている（図-2）。この傾向は今後の除雪作業体制の維持に深刻な影響を及ぼすことが懸念される。

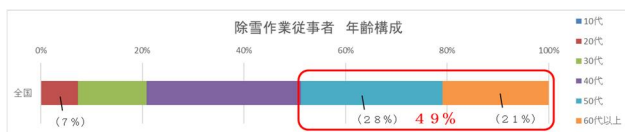


図-1 除雪作業従事者の年齢構成



図-2 除雪作業従事者の経験年数

さらに除雪機械の操作は、複数のレバーやジョイスティック等を用いて作業装置を制御する必要があるほか、作業中には周囲の安全を確認しながら操作を行わなければならない、熟練した高度な運転技術が求められる。

そのため国土交通省では、熟練オペレータの減少や担い手不足といった課題の解決に資する取り組みとして、熟練した技術や経験が無くても一定精度で除雪作業が行えるよう、作業装置を自動化した除雪機械（以下、「ICT 除雪機械」という）の開発を進めている。

2. 除雪機械の作業装置自動化の概要

現在開発中の作業装置を自動化するシステムは、高精度の3次元地図上（図-3）に作業装置の動きをあらかじめ記録し、除雪作業時にはGNSSから得られる高精度な位置情報を用いて、各作

業装置の動作を自動的に再現するものである。

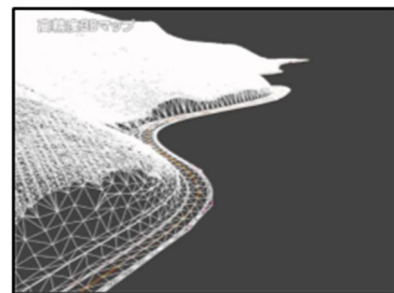


図-3 高精度3次元地図

自動化に対応する除雪機械本体には、油圧系統に電子制御可能なセンシングシリンダーや油圧バルブを採用している。さらに運転席にはタブレット型のガイダンス装置を設置し、オペレータは表示されるガイダンス画面上で、道路線形や作業装置の自動動作タイミングなどを確認することができる（図-4）。

これにより、作業装置を操作するオペレータの負担が軽減され、車両の運転や周囲の安全確認に注力できるようになる。また経験の浅いオペレータでも一定の精度で除雪作業が可能になることが期待される。

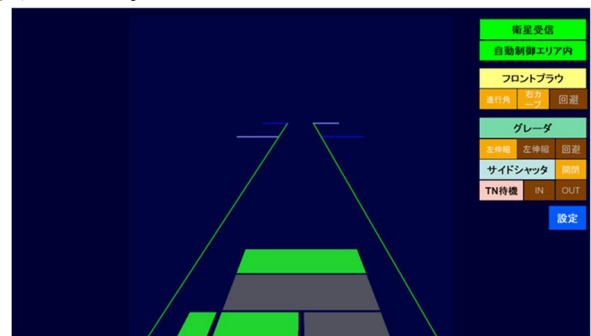


図-4 ガイダンスシステム（除雪トラック）

令和4年度から、北海道開発局、東北地方整備局、および北陸地方整備局にて、ICT 除雪機械を実現場に配備し、実証試験により課題の抽出と解決に取り組んでいる。次章では、各機械に適用されている自動化技術について紹介する。

3. 各機械における自動化技術

3.1 除雪トラック

除雪トラックの作業装置は、新雪などを除去する「フロントプラウ」、圧雪や凍結路面を整正する「グレーダ装置」、交差点など雪を堆積させることができない区間で一時的に雪を抱え込む「サイドシャッタ」で構成されており、これら作業装置を自動的に制御する技術開発を進めている。

フロントプラウについては、交差点等で雪を前方に送る進行角の制御動作や、マンホールや橋梁ジョイントなどの障害物を回避するための上下動作を自動化している。

グレーダ装置では、道路幅が広い区間等におけるブレードの伸縮量調整、および障害物回避のための上下動作を自動化している(図-5)。

サイドシャッタについては、交差点等における雪の残留を防ぐため、作業装置の開閉動作を自動化している。

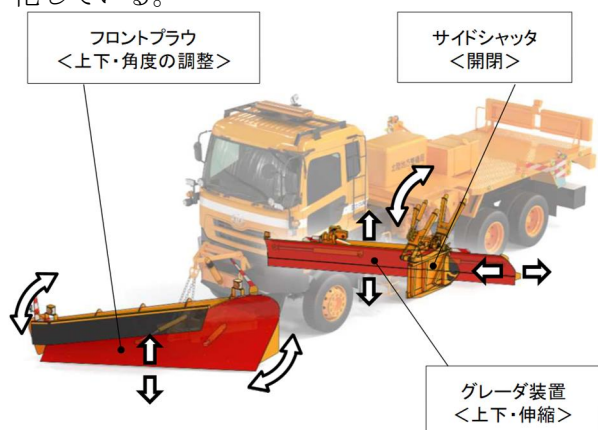


図-5 除雪トラックの作業装置自動化

また、上記の基本的な動作の自動化技術を応用し、現在は、郊外部において路外へ雪を排出する装置である「サイドウィング」についても、作業装置の自動化に着手している。具体的には、「昇降動作」「推進角動作」「チルト動作」を自動化している(図-6)。

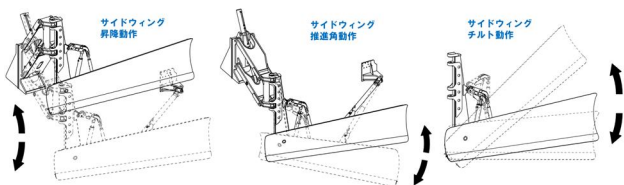


図-6 サイドウィングの自動化

3.2 除雪グレーダ

除雪グレーダの作業装置は、新雪除去や路面整正を行う「グレーダ装置(ブレード)」、交差点など雪を堆積させることができない区間で一時的に雪を抱え込む「シャッターブレード」、およびブレードの推進角を調整する「サークル」で構成され

ており、これら作業装置を自動的に制御する技術開発を進めている。

ブレードについては、マンホールや橋梁ジョイントなどの障害物を回避するための上下動作を自動化しており、シャッターブレードは交差点等における雪の残留を防ぐため、開閉動作を自動化している(図-7)。

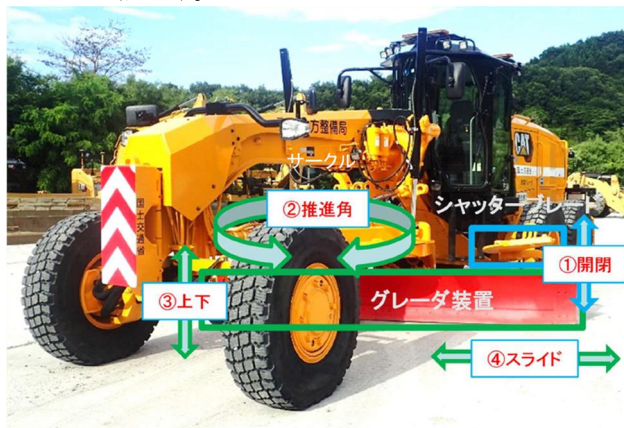


図-7 除雪グレーダの作業装置自動化

また、実証試験の結果を受けて新たなニーズとして挙げられた、「バックアシスト制御」および「回送アシスト制御」の2つの自動制御を検討している。「バックアシスト制御」は、駐車帯除雪時の後退動作においてブレードを自動で上昇させ、前進時には自動で降下させる制御である。また、「回送アシスト制御」は、回送走行開始時にブレードの推進角を自動で調整し、車幅を最小限に抑えることで、通行性の向上を図るものである(図-8)。

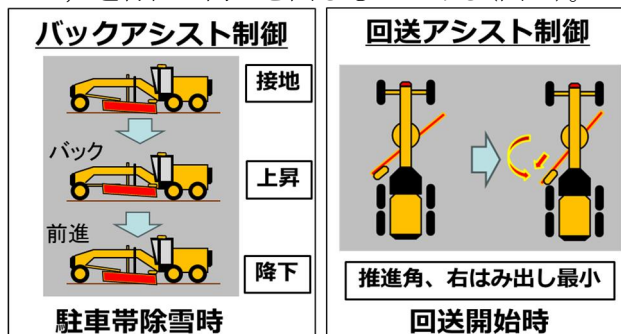


図-8 バックアシスト制御・回送アシスト制御

3.3 ロータリ除雪車

ロータリ除雪車の作業装置は、雪堤を崩して装置内に掻き込む「オーガ」、砕いた雪を投雪する「ブロア」、および投雪方向を調整する「シュート」「シュートキャップ」で構成されており、これら作業装置を自動的に制御する技術開発を進めている。

これらの装置は、車両の位置情報に基づき、ブロワ旋回、シュート旋回・伸縮、シュートキャップ開閉を自動制御することで、投雪位置の自動変更が可能となっている(図-9)。



図-9 ロータリ除雪車の作業装置自動化

また、雪堤頂部への的確な投雪を実現するため、3D-LiDARを用いて雪堤の高さを検知し、シュートキャップの開閉を自動制御し、投雪角度を調整する機能も開発している（図-10）。

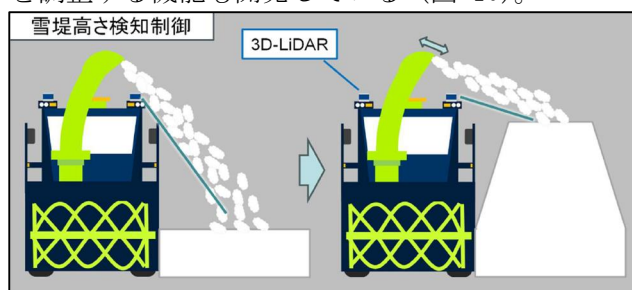


図-10 3D-LiDAR による投雪高さ制御

ロータリ除雪車では、これまで熟練オペレータが手動で行ってきた複雑な操作を再現するため、「ならい制御」と呼ばれる制御方式を採用している。この方式は、実際のオペレータによる操作を各作業装置に設置されたセンサにより計測・記録し、自動制御用のデータを自動で作成、記録し、同様の動作を自動で再現するものである。

3.4 小形除雪車

小形除雪車はロータリ除雪車と同様に「オーガ」「ブロー」「シュート」「シュートキャップ」で構成されており、これら作業装置を自動的に制御する技術開発を進めている。（図-11）。

これらの装置については、位置情報に基づいてオーガおよびシュートを自動で動作させる機能のほか、オーガが歩道の不陸に自動的に追従できる機構を開発している。

さらに、オペレータがあらかじめ設定した投雪高さに応じて、シュートキャップの開閉を自動制御し、投雪角度を調整する機能についても現在開発中である（図-12）。

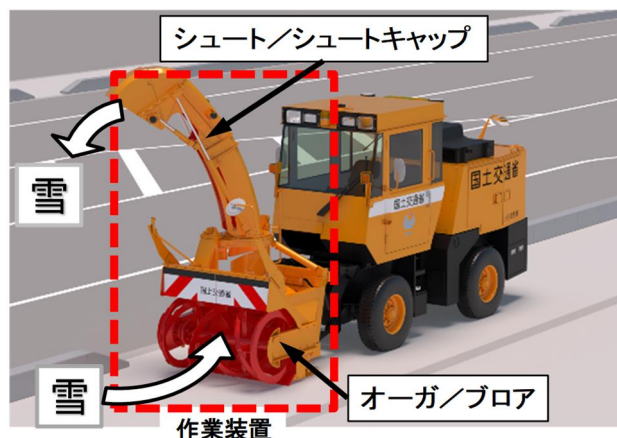


図-11 小形除雪車の作業装置

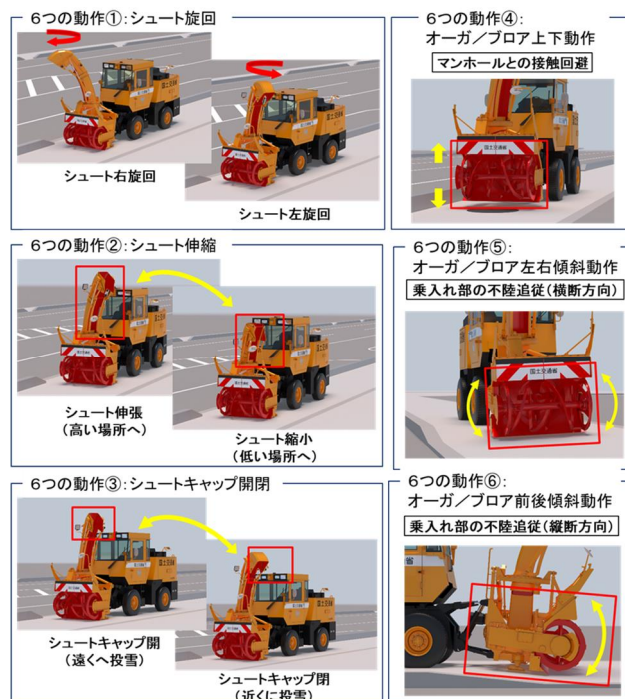


図-12 小形除雪車の作業装置自動化

3.5 不感地帯対策

ICT 除雪機械の位置情報は、準天頂衛星「みちびき」により測位しているが、樹木、高架橋、トンネル等の遮蔽物の影響により、自車位置の把握が困難となる場合がある。

これに対処するため、ネットワーク型 RTK による補完的な測位機能を追加している。みちびきによる測位が不安定な間は RTK による位置情報を暫定的に用いて自動制御を継続し、測位が安定次第、みちびきによる位置把握へと切り替えるものである。（図-13）

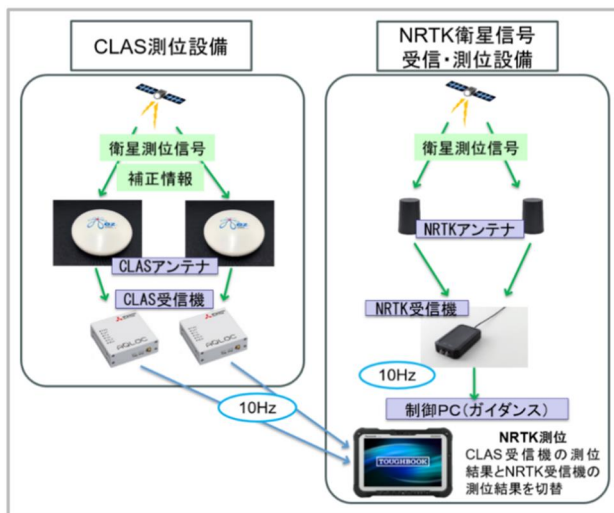


図-13 ネットワーク RTK の補正信号の受け方

4. 運用面の課題とその克服に向けた取り組み

これまでさまざまな条件下で ICT 除雪機械の実働配備を実施し、機械本体に関する技術的課題の抽出と解決に取り組んできた。現在は、さらなる配備拡大を見据え、運用面での課題に対しても検討を進めている。主要な課題とその克服に向けた現在の取り組みについて紹介する。

4.1 ICT 除雪機械へのイメージ

実働配備にあたり除雪作業従事者への説明を行った際、「除雪装置の自動化がどの程度効果を発揮するのか不明である」「機械構成が複雑で扱いづらい」といった否定的な意見が寄せられた。今後の配備拡大に向けては、こうしたネガティブなイメージを払拭し、ICT 除雪機械について理解を深めていただくことが重要である。

そのため、ICT 除雪機械の特徴や実際に使用したオペレータの感想を紹介する動画の作成や導入マニュアルの策定に取り組んでいる（図-14）。



図-14 ICT 除雪機械の紹介動画

4.2 メンテナンス体制

ICT 除雪機械は、作業装置の自動化に必要な機器類が追加されており、従来の除雪機械とは整備内容が異なることから、メンテナンスに対する懸念がある。ICT 除雪機械に不具合が発生した際、機械

本体と自動化システムのいずれかに原因があるのかを即座に特定することは困難であり、迅速な原因究明を可能とするメンテナンス体制が必要である。

そのため、不具合・故障発生時の対応手順、トラブルシューティングの手引きなど、メンテナンスに関するマニュアルの策定に取り組んでいる。

5. 今後の展望

除雪機械の熟練オペレータの減少や担い手不足が深刻化することが想定される中、冬期の除雪体制を維持するためには、ICT 除雪機械のさらなる配備拡大が必要となる。

その実現に向けては、多くの現場で円滑に運用されるよう、今後も現場から寄せられる意見を丁寧に収集・分析し、逐次課題の解決を図っていく。さらに、除雪作業従事者の理解促進を目的として、各種マニュアルの改良、ならびに説明会や実演会を通じた周知活動を継続的に実施する。

6. おわりに

将来的には、除雪機械の自動走行やAIを活用した作業装置の自動化の導入により、除雪作業の安全性および効率性が一層向上されることを期待する。国土交通省ではこうした将来像を見据え、今後も技術開発と現場実装の両面から取り組みを進めていく。

最後に、持続的かつ安定的な除雪体制を維持していくためには、除雪機械メーカーや除雪作業従事者をはじめとする多くの関係者の協力と連携が不可欠である。今後も、除雪業務の質的向上が図れるよう、引き続き技術と現場実情の調和を関係者で図っていききたい。

参考文献

- 1) 柿崎俊裕・遠藤天生：除雪機械作業装置の自動化に関する現状と今後の展望について、令和5年度 建設施工と建設機械シンポジウム発表論文
- 2) 新川剛・石道国弘：【i-Snow】除雪機械の作業装置自動化に向けた取組、第23回建設ロボットシンポジウム発表論文

15. ICT と GNSS を活用した簡易測量支援アプリの精度検証と生産性向上事例について

大成建設株式会社

○ 石井 崇充
片山 三郎
石井 亘

1. 背景

我が国の建設業を含む産業界では、労働人口の減少や労働者の高齢化が進む中、2024年に改正労働基準法が建設業にも適用されるなど、労働環境が著しく変化している。労働力不足の解消や生産性向上は極めて重要な課題であり、建設現場においても、限られた人員で多種多様な施工管理を行う必要がある。

建設現場では、GNSS (Global Navigation Satellite System) 測量機やトータルステーション、レベルを用いた基準点測量や墨出し等の詳細な測量作業のほか、施工場所の現況把握や構造物の位置出し、出来形・高さ等の確認、距離・面積・体積を算出するための測量など、多種多様な「簡易測量作業」が行われている。これまでの簡易測量作業は、測量者が二人一組となり、詳細な測量作業と同様に、大型で重量のある測量用機器を運搬・設置しながら作業を行っていた。これらの測量用機器は高価であり、設置や運搬に細心の注意が必要だけでなく、操作にも技術的に高度な知識や技量が求められる。また、これらの測量結果等の記録は、現場で野帳や図面などに記入し、事務所に帰って書き写す場合が多く、簡易測量作業およびそのデータ整理に多大な労力と時間を要していた。これらは、測量ミスなどの要因にもなる上、工事関係者間での計測データの情報共有にもタイムラグが発生し、課題となっていた。

このような背景から、建設・測量関連各社では、測量機器の補正機能の向上や、ワンマン測量が可能な自動追尾型測量システムの開発・導入、測量データの自動記録及び外部出力機能の追加など、簡易測量作業の省力化に向けた取り組みが進められてきた。一方で、これらの機器は高価であり、繊細な取り扱いが求められるうえ、複雑な機能を使いこなすためには高度な習熟が必要であった。

そこで、GNSSを利用して明かり工事における簡易測量作業を支援するために、施工管理業務を支援する現場管理システム「T-iDigital Field」(略称TiDF) (大成建設開発技術) をデータ取得基盤とし

て活用した測量支援アプリケーション「Field Checker」を開発した¹⁾²⁾。これにより、これまで二人一組で行っていた簡易測量作業を一人で効率よく行うことが可能となった。

本論文では、Field Checkerの詳細な機能について記載する。それに加え、既知点に対するField Checkerの測位精度検証を行った結果や現場活用事例、さらにその際の生産性向上について評価した結果を述べる。

2. 概要

2.1 システム構成

Field Checkerは、TiDFのデータ共有基盤を活用し、拡張開発したシステムである。TiDFは、建設現場の「ヒト」、「モノ」、「コト」の情報をCPS (Cyber-Physical System) の概念に基づいてクラウドに集積・統合する現場管理システムである。これまで、ダム工事やトンネル工事などの主に土木分野における各工種に応じてシステムを拡張しながら複数の施工現場に適用してきた結果、現場状況の可視化にTiDFが有効なことを確認している³⁾。

TiDFのシステム全体概要を以下に示す。本システムは図-1のようにデータ層、基盤クラウド層、アプリケーション層の三層で構成されている。

まず、データ層では、現場の「ヒト」、「モノ」、「コト」の位置情報・稼働状況などのデータを

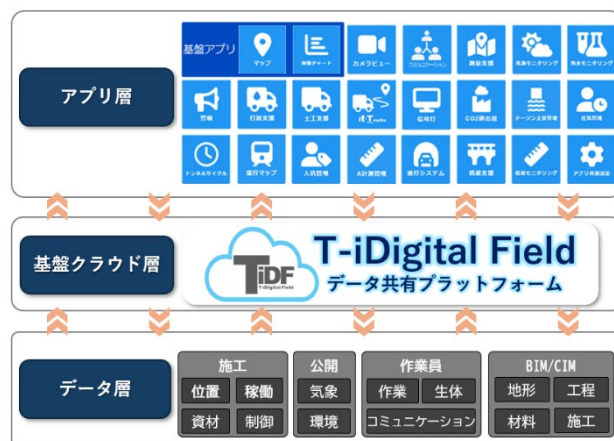


図-1 TiDigital Field 全体概要図

GNSS 端末やビーコンなどの様々なセンサーやデバイスを用いて取得する層である。次に、基盤クラウド層では、データ層で取得したデータをネットワークを介してクラウド上で整理・集約する。そして、アプリケーション層では、基盤クラウド層で集約した様々なデータを抽出・加工・可視化し、アプリケーションとして提供する。

これにより、工事関係者のニーズに合わせたアプリケーションを順次追加することができる。また、開発済みのアプリケーション間の連携も可能であるため、これまで様々なツールを併用しながら行ってきた現場管理を一つのプラットフォーム上に集約できる。

2025 年 6 月現在では各工種に対応した 37 種類のアプリケーションが実装されており、インターネット接続端末を用いることで、アプリケーションを通して、いつでもどこでも現場のデータを閲覧でき、工事関係者の QCDSE 管理（品質・コスト・工程・安全・環境）の支援が可能となっている。

Field Checker では、このプラットフォームを活用し、データを取得する測量機器、取得データをクラウドへ集約する TiDF 機器、集約データを利用するアプリケーションを構成することで簡易測量支援が可能なシステムの拡張開発を行った。

本技術の GNSS 測量は、既知点である基準局からリアルタイムに位置補正を受信・解析しながら観測点の測位を行う「RTK-GNSS 方式」を採用した。そのため、GNSS 信号の受信および携帯回線などを利用した位置補正情報の受信が可能なエリアでの利用を対象としている。なお、RTK-GNSS 方式は、条件さえ満たせば詳細測量に適用可能な高精度の測位を行うことが可能であるが、Field Checker では可搬性を考慮して軽量なカメラ一脚

を採用しているため簡易測量作業用として運用している。

以下に Field Checker の測位機器・アプリ構成、簡易測量機能および特徴について示す。

2.2 Field Checker の機器構成

Field Checker は市販品を組み合わせて構成している。以下に主な機器構成を示す。

- ① GNSS 測量機器
- ② TiDF 端末
- ③ アルミ製一脚
- ④ 水準器
- ⑤ モバイルバッテリー
- ⑥ TiDF 端末・バッテリー用ホルダー

GNSS 測量機は、国土地理院登録の 1 級 GNSS 測量機として公共測量にも利用可能な高精度な機器を使用している。また、図-2 に示すように GNSS 測量機は軽量なアルミ製一脚の頭部に固定され、制御用 TiDF 端末やバッテリーとともに一式がパッケージングされている。重量は 1.1kg、全長は 0.6m（延長時 1.8m）で、現場巡視中の可搬性を考慮して小型・軽量化されている。なお、肩掛けスリングケースに収納することで手を塞がずに運搬できる。また、一般的なモバイルバッテリーによる DC5V の USB 給電で稼働し、標準バッテリー（5,000mAh, 3.7V）で 7 時間の連続使用が可能である。

TiDF 端末は、携帯回線を通じて位置補正情報を受信し、Bluetooth を介して GNSS 測量機に送信する。GNSS 測量機は複数の GNSS 衛星からの信号を受信し、位置補正情報を基に自身の 3 次元位置を高精度に特定する。得られた位置情報は TiDF 端末を通じてインターネット経由でウェブアプリに送信され、表示・記録される。

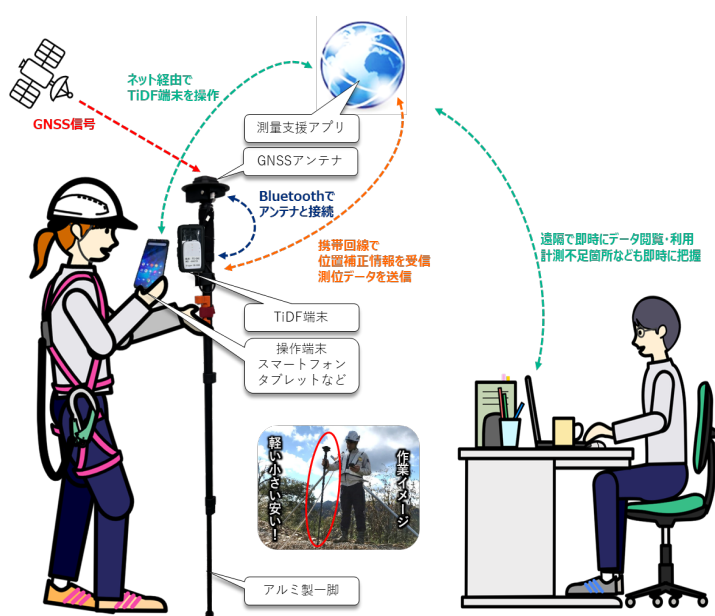


図-2 Field Checker のシステム概要と機器構成

2.3 ウェブアプリ（測量支援アプリ）

Field Checker のウェブアプリ（以下、測量支援アプリ）について以下に述べる。TiDF を基盤として活用することで、測量支援アプリの操作は専用端末を必要とせず、スマートフォンやタブレットなど各個人の任意の端末のウェブブラウザを使用できる。そして、測量支援アプリは ID とパスワードでログインすることで利用可能であり、計測結果はセキュリティに配慮された形でクラウドに保存される。これにより、データの安全性とアクセスの容易さが確保される。

従来の測量では、測量機器の読み値を野帳に記録し、手計算によって計測結果を算定、事務所に戻って計算チェックやデータ整理を行ったうえ、記録メディアを用いて PC にインポートし CAD 等に転記するなど、長時間かつ煩雑な作業が必要であった。一方で、本アプリでは、測定時にボタンを 1 タップすることで、測位・データ化・保存のすべての操作が即時に完了する。また、いつでもどこでもの機器で測量作業を実施したのか、測位記録に紐づけてクラウド上で工事関係者に即時に共有が可能となる。

測量支援アプリ画面の主な画面構成について図-3 に示す。操作したい Field Checker を選択することで、マップ画面中心に現在地がリアルタイム表示される。現在地アイコンは GNSS の受信状態及び端末通信状態に応じた色分けを行っている。そのため、位置補正情報が受信されており精度の確保状況、TiDF 端末の通信状況が正常かどうかの確認を視覚的に行うことができる。色分けについて、精度確保の状態は、緑は RTK FIX、橙は RTK FLOAT、赤は DGNSS 以下であることを示し、通信状態は、緑が正常、赤が異常、黒は不通を示している。

以下に、測量支援アプリの機能及び特徴を示す。

- ① 測位
- ② 測量チェック
- ③ 距離計測
- ④ 面積計測
- ⑤ 台形体積計測
- ⑥ 履歴機能
- ⑦ 図面設定
- ⑧ ローカル座標系設定
- ⑨ 3DCAD 連携

①測位では、Field Checker で得られている位置座標に対し、手動測位、連続測位（時間）、連続測位（距離）の主に 3 つの測位機能を備えている。まず、手動測位は、記録ボタンを 1 タップ押すと 1 度記録する機能である。次に、連続測位（時間）は、任意の設定の秒数毎に連続測位する機能である。そして、連続測位（距離）は、任意に設定の距離[m]を移動する毎に連続測位をする機能である。

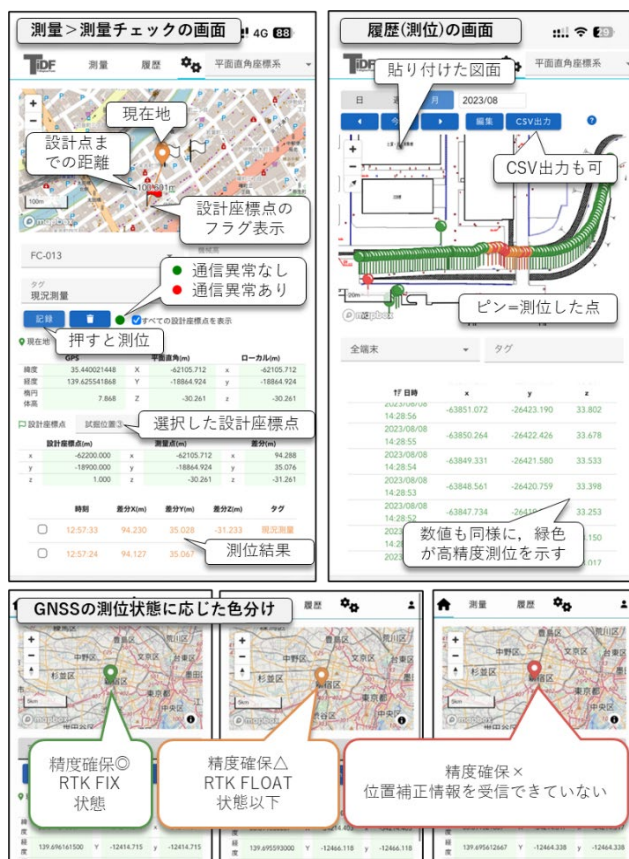


図-3 測量支援アプリの画面構成

②測量チェックでは、あらかじめ設定した設計座標点との差分をリアルタイム表示・記録する。また、その差分の大きさを 3 段階の音により表現する機能を備えている。

③距離計測では、始点と終点の 2 箇所を測位することで、水平距離・斜距離・高さ差分を計測する。

④面積計測では、多角形の頂点ごとに測位することで、平面面積を算出する機能である。

⑤台形体積計測では、オベリスク法を用いて 6 点を測位することで、成形された四角錐台の体積計算を行う機能である。

⑥履歴機能では、計測結果を一覧表示や地図に表示させ閲覧や CSV 出力機能を行うことができる。また、記録に対応したタグとメモを記載し、結果を絞り込むことも可能である。

⑦図面設定では、マップ画面上に図面や航空写真等をオーバーレイ表示する機能である。これにより測位結果と図面を照らし合わせることが可能となる。

⑧ローカル座標系設定では、施工箇所特有のローカル座標系を設定し、構造物の軸などの任意座標に換算することが可能である。

⑨3DCAD 連携では、3 次元 CAD と相互連携し、計測結果を 3 次元 CAD 上にリアルタイムに表示する機能である。

3. 精度検証

Field Checker は市販品を組み合わせる構成していることから出荷前に精度検証を行っている。精度検証は、技術センター（神奈川県横浜市）にて、既知点を Field Checker で「測量チェック」し、その差分を求めた。26 機の Field Checker にて延べ 51 回の測量チェックを実施し、すべてで RTK FIX 解を得られた。なお、既知点は 1 級 GNSS 測量機で公共測量作業規程準則に準じたスタティック測量方式により座標を算出している。水平差分を図-4 に、鉛直差分を図-5 に、計測結果を表-1 に示す。

水平成分は、51 回中 48 回が既知点との差分が 0.03m 以下であった。また、鉛直成分は、51 回中 47 回が既知点との差分が 0.03m 以下であった。

次に、距離計測・面積計測・台形計測機能を使用したときの設計値と実測値との差を表-2 に示す。

距離計測では、設計値 5.000m に対し実測値は 5.018m となり、差は 0.018m(0.4%)であった。

面積計測では、3 点計測し三角形の面積を算出した結果、設計値 12.500m² に対し実測値は 12.522m² となり、差は 0.022m² (0.2%)であった。

台形計測では、設計値 16.333m³ に対し実測値は 16.540m³ となり、差は 0.207m³ (1.3%)であった。

測量機器性能基準⁵⁾において、国土地理院登録 GNSS 測量機の公称測定精度は±30mm 以下（基線長 5km の場合）とされている。

RTK-GNSS 方式は一般的に水平誤差が 2～3cm、鉛直誤差が 3～4cm であると言われている⁴⁾。このことから FIX 解が得られるような使用環境の条件が良い場合には、センチメートル級の精度であることを前提として仮設工など簡易測量作業において用いる運用としている。

4. 現場活用事例と適用効果

4.1 現場活用事例

(1) 計測結果をリアルタイムに共有

Field Checker では、すべてのデータが自動的にクラウドに保存され、ボタンを 1 タップするだけでデータ化と工事関係者への共有が完了し、測量結果や設計座標点をリアルタイムに相互共有できる。

その例として埋設管協議が挙げられる。現地で作業者が試掘結果を測位すると同時に、事務所の図面管理者が結果を即時確認し、図面に反映することが可能である。そして、埋設物の情報を現場とリアルタイムに共有しながら発注者と協議し、作業を進めることに繋がる。

逆に、設計者が机上検討した座標を設計基準点として入力すると、現地作業者のスマートフォンに反映される。このため、即時に現地確認が可能となり、支障物の確認や計画変更などを素早く協

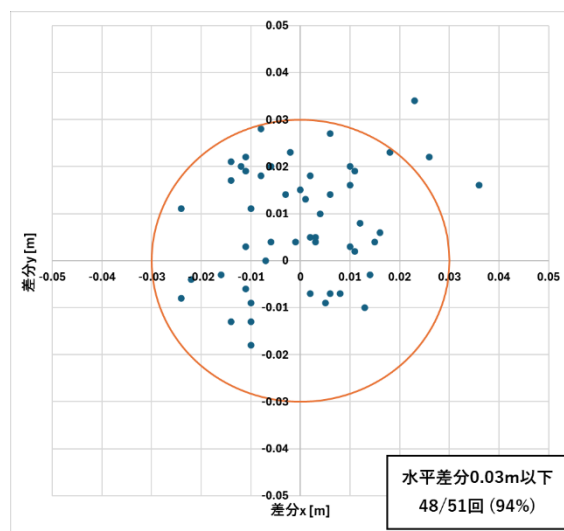


図-4 誤差検証における水平差分[m]

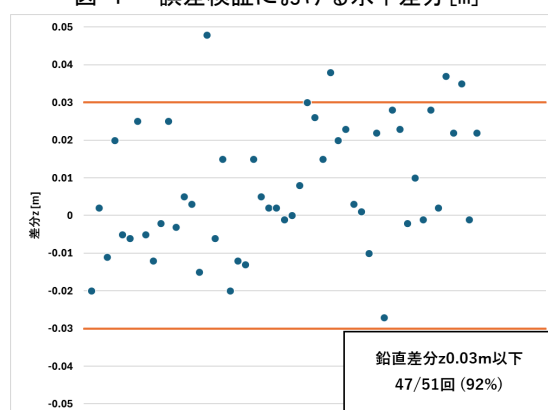


図-5 誤差検証における鉛直差分[m]

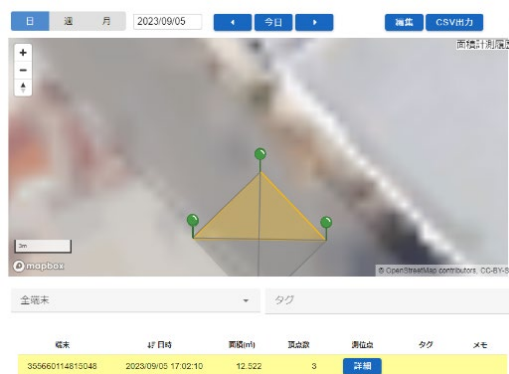


図-6 面積計測結果画面

表-1 測量チェック機能の計測結果

成分	X	Y	Z
データ数	51	51	51
平均[m]	0.0002	0.0079	0.0076
標準偏差[m]	0.013	0.012	0.017

表-2 距離計測・面積計測・台形計測機能の計測結果

機能	設計値	計測値	差
距離[m]	5.000	5.018	+0.018 (0.4%)
面積[m ²]	12.500	12.522	+0.022 (0.2%)
台形体積[m ³]	16.333	16.540	+0.207 (1.3%)

議やリアルタイムに共有しながら発注者と協議し、作業を進めることが可能となる（図-7）。

これら測量情報のリアルタイム相互共有により、関係者間の協議に要する時間を大幅に短縮でき、施工効率が高まり生産性向上に寄与する。

(2) 端末画面上で設計図面と測量結果を比較

端末機器の画面に表示した地図上に、設計図面を高精度に貼り付けて表示可能なため、従来のように事前に CAD ソフトウェアを用いて設計図面から座標値を取得することなく、位置出しや測量チェックを行うことが可能であり、設計図面と計測結果を容易に比較することができる。

その一例として、空港に隣接している工事では航空法により制限標高が定められており、クレーンの使用高さの管理が課題となる。そこで、図-8 のように測量支援アプリのマップ画面で制限標高を表示した。

コンタ図を貼り付け、現地で測位することにより、現位置の標高と制限標高が分かり、作業可能な高さの管理に活用することができた。

※作業可能な高さ＝コンタ図の数値－現位置標高



図-7 埋設管試掘後の測位結果共有例

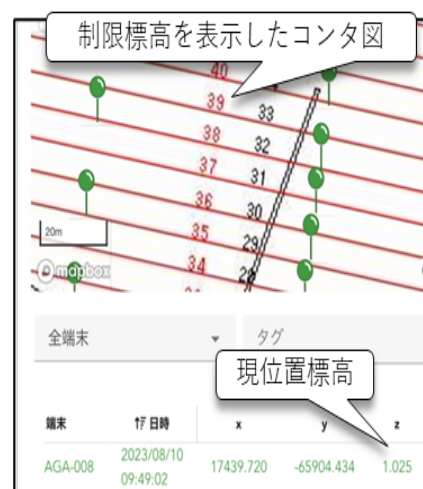


図-8 マップ画面へ図面と測量結果の表示例

表-3 TS と FC の作業時間比較（分）

作業内容		TS	FC
現場作業	機材準備	10	1
	測量（計 10 点）	50	20
	片付け	10	1
	人数	×2 人	×1 人
	小計	140	22
デスクワーク	データ整理	10	0
	人数	×1 人	×1 人
	小計	10	0
合計時間		150	22

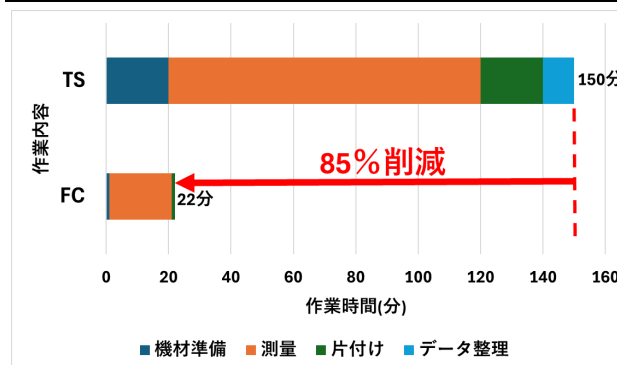


図-9 TS と FC の作業時間比較

4.2 現場適用効果

(1) 従来の測量方法との生産性向上効果

ワンマン測量の代表的な機器としては、自動追尾型トータルステーションが挙げられる。これは一度補足したターゲットを自動追尾することでワンマン測量を可能とするが、既知点への機器の設置と、視通が必要といった運用上の制約がある。これに対して Field Checker は GNSS 信号と補正情報を受信できれば場所や視通を問わないため、運用上の自由度が高く、簡易測量への適応性が高い。

また、RTK-GNSS 方式を用いた測量機器は様々な製品があり、測位機能や杭打ち機能を保有しているが、データは測量機器や操作端末に保存され、タイムリーに工事関係者へ共有する機能は有しない。これに対して、Field Checker は距離計測、面積計測、台形体積計測などの工事現場での計測機能を持ち、記録から共有まで 1 タップで完了できる。

Field Checker の導入による簡易測量作業について述べる。従来は二人一組で行っていた簡易測量作業を一人で効率よく行えるようになり、従来の測量機器を用いた作業と比較して作業時間を短縮できた。以下の表-3 と図-9 に、10 点の測量を想定し試算した場合のトータルステーション（TS）と Field Checker（FC）の作業内容時間の比較を示す。これは、従来の二人一組の作業が不要になったことでワンマン測量ができたこと、機器の据付などの事前準備や、その後のデータ整理・共有する時間が不要となったことにより合計作業時間が 150 分から 22 分へ削減できることから、85%の生産性向上が得られることを確認した。

(2) 経済的効果

Field Checker の導入により、1人で測位と記録が可能のため、ターゲットやスタッフなどを持つ測量補助員も不要となり、簡易測量に関わる労務者を大幅に削減でき、経済的なメリットとなる。また、従来は野帳や測量機器へ記録されたデータから人力で報告書等を作成していたが、Field Checker で計測後ただちにクラウド上に計測データが保存・共有され、差分算出結果などが Web ブラウザでいつでもどこでも閲覧可能であるため、報告書作成に要する業務を削減することができ、労務（費用）の削減に繋がる。

また、トータルステーションやレベルなどの詳細な測量機器は高価であり、工事現場ごとに1台が関の山であるが、Field Checker 一式は安価であるため、「現場に1台」から「1人に1台」が可能となる。

(3) 波及効果

従来のトータルステーションでは最小の測量点数で位置情報を管理していたが、Field Checkerでは従来の手法に比べ非常に手軽であり、時間当りの測量点数を飛躍的に増やすことが可能となる。そのため、利用ユーザーから「取れるだけ点をとっておく、思い立ったらすぐ取る、との形に管理方法が変わった」との意見もあり、その手軽さゆえに「測量DX」とも言うべき、測量に対する方針・概念の根本的な変革をもたらす波及効果があった。

また、同様の機材を用いて、重機の高さを連続測位することで、バックホウ等の高さをリアルタイムにオペレーターが把握することにより、粗掘削の丁張をすることなく掘削高さを把握可能な重機高さ管理アプリへ展開も進んでおり、他分野への波及効果も得られている。

(4) 現場導入実績

Field Checkerは、開発後約2年の2025年7月時点において、大成建設グループ会社の45現場に対し、延べ105機の導入実績がある。利用ユーザーによるロコミや異動先の現場にて利用が更に広がるなどの相乗効果も相まって、造成、ダム、道路、電力、鉄道など様々な工種の工事現場において活用されている。

5. まとめ

従来、二人一組で行っていた簡易測量作業の省人化・省力化を目指し、GNSS測量機器とクラウドを一体化させた測量支援アプリ「Field Checker」を開発した（図-10）。本論文では、Field Checkerの精度検証及び現場適用における生産性向上の評価を行った。その結果、使用条件が良好な環境においては水平誤差と鉛直誤差ともに概ね3cm以下であることからRTK-GNSS方式における一般的な誤差と

同等であることが確認された。また、トータルステーションを用いた場合と比較し作業時間を85%削減可能なことを確認できたことから、測量DXとも言えるような生産性向上に繋がることを確認した。

今後は、ビルや木々が立ち並ぶような上空視界率が低い環境での精度向上を目指すなど、Field Checkerが適用可能な範囲をさらに拡大し、引き続き簡易測量業務の省力化に貢献していきたい。

簡易測量作業でもトータルステーションなどを使用



T-iDigital Field の活用

簡易測量作業の省力化



ワンマン測量により生産性85%向上
(TSとの作業時間比較)

図-10 Field Checker の概要と効果

参考文献

- 1) 太田 兵庫・片山 三郎・石井 喬之・釜本 拓哉：衛星測位とクラウドを組み合わせた測量支援システムの開発，土木学会第79 回年次学術講演会，CS9-07
- 2) 大成建設株式会社：クラウドを活用した測量支援アプリケーション「Field Checker」を開発，2023，https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2023/231110_9817.html
- 3) 片山 三郎・石井 喬之・三谷 一貴・宮本 真吾・千葉 勇也：現場管理システム「T-iDigital® Field」の開発，大成建設技術センター報，第56号，46，2023
- 4) 国土交通省九州地方整備局：情報化施工を実現する技術，公共事業における情報化施工の概要，https://www.qsr.mlit.go.jp/ict/technology/jitsugen_3.html
- 5) 国土地理院：測量機器性能基準，国地達第28号（令和5年3月30日一部改正）

16. 重機搭載レーザー計測システム

共通データ環境と API 連携で監督・検査を効率化

株式会社フジタ

○ 上原 広行

1. はじめに

国土交通省はこれまで進めてきた i-Construction の取り組みを深化し、更なる抜本的な建設現場の省人化対策を「i-Construction 2.0」として、3つの柱に基づいて、建設現場のオートメーション化を実現するためのロードマップを策定した。とくに「データ連携のオートメーション化」では、現場データの活用による書類削減（ペーパーレス化）、施工管理の高度化、監督・検査の効率化を推進することが急務となっている。

当社は「i-Construction システム学寄付講座（東京大学）」に参画し、ICTの高度化と普及に関する技術の共同研究を推進している。このたび、協調領域 WG で開発されたブロックチェーンを活用した共通データ環境「R-CDE」¹⁾と、当社の独自 ICT 技術である重機搭載レーザー計測システムを API により連携し、施工管理データをリアルタイムで発注者と共有できるシステムを構築した。この技術を令和 5 年度玉島笠岡道路浜中地区中工区改良工事において現場試行し、監督・検査の効率化に寄与する効果を把握する取り組みを実施した。

2. 重機搭載レーザー計測システムの概要

本システムは、重機に搭載されたレーザースキャナを用いて、移動しながら現場内の任意位置で面状の出来形座標を取得するシステムである。重機オペレータは、バックホウに搭載した GNSS と 2D レーザースキャナ（表-1 参照）を用いて、重機を巡回して法面の出来形を計測し、土工事の法面整形工事を行う。従来の地上型レーザースキャナを用いた測量は、機器の盛り替えに時間がかかるという課題があるが、このシステムは自己位置を高精度で測位し、移動しながらの計測が可能となる。これにより、重機オペレータは作業中に出来形座標を取得可能なため、従来の丁張と補助員による計測機器を用いた方法で行っていた出来形確認作業が不要になる。本技術の導入により、計測作業が軽減され、施工の簡素化と効率化が期待できる（写真-1 参照）。なお、本技術は NETIS 登録技術である（登録番号 KT-200138-A）。

表-1 レーザースキャナ仕様

測定範囲	レーザー計測距離 3m～15m
測定視野	上方向 45° ～下方向 75° 水平方向 90°
測定頻度	25Hz
測定速度	12 万点/秒の 3D データ取得



写真-1 重機搭載レーザー計測システム

3. 共通データ環境「R-CDE」の概要

R-CDE (Reliable Common Data Environment) は、ブロックチェーン技術を活用した受発注者間の共通データ環境を指す。この取り組みは、i-Construction の推進を目的として東京大学に設置された寄付講座に基づいており、産業界、学術界、政府が連携して技術的な検討を行う i-Construction システム学寄付講座で共同研究開発が進められている。協調領域検討会は 2022 年 3 月に同講座内に設立され、各分野の協調領域について作業部会（WG）に分かれて検討が行われた。本現場試行は、協調領域検討会の活動の一環として実施された。以下に特長を示す。

- ①施工管理におけるデータ改ざん防止
ブロックチェーン技術を活用し、保存データの信頼性を確保。
- ②データの集中管理
改ざんが防止された施工管理データを一元的に管理し、関係者が共通データをいつでも確認。

③ICT 施工に関連する各種ソフトとのデータ連携
測量機器から取得したデータや解析ソフトで生成
されたデータを、API を利用して直接連携するこ
とが可能。

これらの機能により、実地確認や検査、帳票化を
行うことなく、データを活用した施工管理のワー
クフローを実現できる（図-1 参照）。

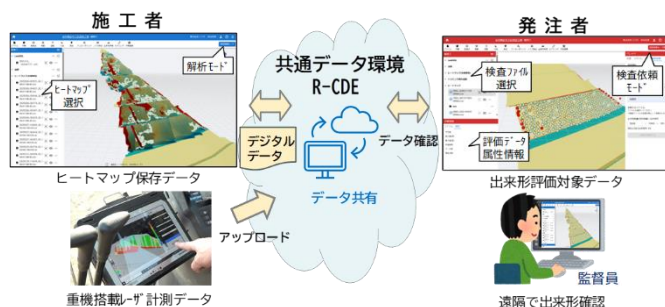


図-1 共通データ環境を活用した監督・検査の効率化

4. API 連携の概要

現在、複数現場で使用中の重機搭載レーザー計
測システムは、重機に取り付けたレーザースキャ
ナを用いて移動しながら法面の形状を三次元的に
測定する技術で、日常の出来形測量省人化を目指
して開発された。

しかし、計測後に重機 PC に保存された生デー
タの管理については、USB メモリなどによるデー
タ移行に依存せざるを得ず、次の 4 つ課題が生じ
ていた。①計測データ管理（データの検索手間、
誤って古いデータを使用など）の手間、②容易に
計測データの改ざんが可能なデータ自体の信憑性、
③データ移行の際、現場と事務所での移動時間に
時間を要する。④データのセキュリティ管理。

今回、重機側に保存された生データは、WebAPI
を通じて「R-CDE」に入力、具体的には運転席の PC
からアップロード操作を行うことでネットワーク
送信される。「R-CDE」は Web ブラウザを介してア
クセス可能であり、点群などの大規模な数値情報
や設計情報の保存・閲覧、ブロックチェーン技術
を利用した出来形検査システムによる検査依頼、受
付、検査承認の機能を備えている。これにより、発
注者と施工者のシステム間で出来形データが共有
され、実地確認や検査を行うことなくデータを活用
した施工管理のワークフローが実現された。

5. 従来の段階確認・立会の課題

従来の段階確認における課題として、ICT 施工
によるデータ活用が進展する中で、現場での段階
確認・立会やデータの書面化（帳票作成）が求めら
れ、発注者と受注者の双方にとって負担となって

いる。具体的には、発注者側では、①複数現場での
立会における時間調整が困難、②立会にかかる時
間が長い（事務所から現場までの移動を含む）、③
提出された各種書面整理や保管に多くの時間を要
することが挙げられる。

一方、施工者側では、①帳票作成に時間がかかる
こと、②立会の準備や待機時間が発生すること、③
ICT 施工に使用するさまざまなソフトウェアのデー
タを一元的に管理することが難しいといった課題
が存在している。

6. API 連携を用いた監督・検査

API 連携を用いた監督および検査のワークフ
ローは、以下の STEP1～4 に従って実施される。この
ワークフローの流れと各役割分担を表-2 に示す。

STEP1：重機にレーザースキャナを搭載し、3D
計測を行うことで施工中の出来形管理を実施（図-
2 参照）。

STEP2：重機から直接共通データ環境「R-CDE」
に計測データを送信することで、出来形計測作業
を省略する（図-3 参照）。

STEP3：ブロックチェーン機能を備えた共通デ
ータ環境「R-CDE」により、保存されるデータの真
正性が保証され、改ざんのない施工管理データを
一元的に管理し、関係者間で共通のデータをいつ
でも確認できる（図-4 参照）。

STEP4：監督員は、この共通データ環境「R-CDE」
で出来形データを確認することで、現地に赴くこ
となく検査を行うことが可能となる（図-5 参照）。

表-2 API 連携のワークフロー

重機レーザー計測と共通データ環境(R-CDE)連携のフロー			
システム利用時のワークフロー		作業所	
		現場	発注者 監督員
発注者	新規ユーザー登録・アカウント作成/企業設定	○	○
	新規現場を作成 契約項目の登録	○	○
施工者	重機LSIによる出来形計測 ・オペレータによる3D計測 ・ヒートマップで出来形確認	○ (オペレータ)	
	API連携(R-CDEアップデータ)		
	ファイルのアップロード ①点群データ ②設計三次元モデル	○ (オペレータ)	
	解析範囲選択	○	
	出来形評価・ヒートマップ生成	○	
	検査依頼	○	
発注者	検査受付 検査承認		○ ○
	・改ざんチェック ・測定規格値チェック		



図-2 STEP1 施工しながら出来形管理



図-3 STEP2 共通データ環境へデータ通信

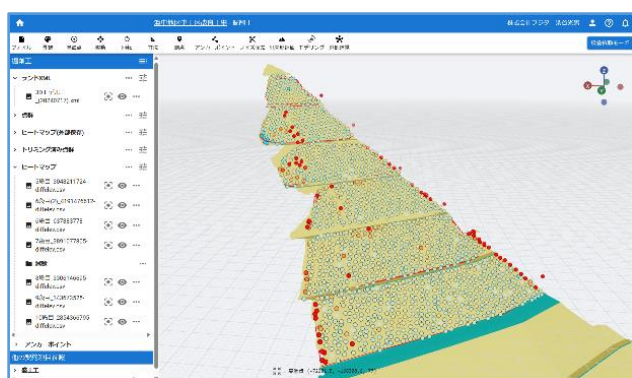


図-4 STEP3 共通データ環境で解析

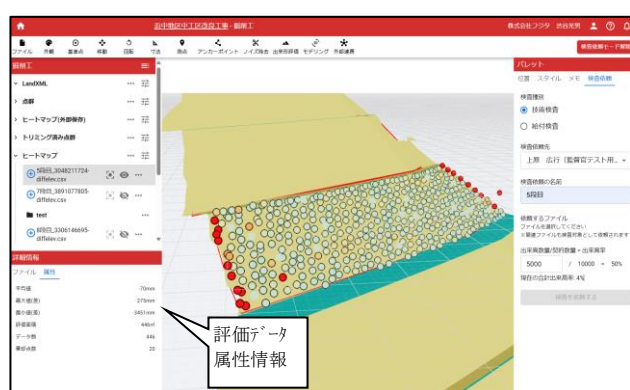


図-5 STEP4 共通データ環境で合否判定

7. 現場試行の目的と対象プロセス

共通データ環境「R-CDE」を活用した API 連携の現場試行目的と対象プロセスは下記に示す。

○API 連携のワークフロー（表-2 参照）で本当に立会や帳票の省略が可能か，検査・監督業務の高度化に寄与するか，R-CDE で対応できない業務は何かなど，懸念点や課題を抽出し整理する。

○従来の業務プロセスと将来のワークフローを比較することで，将来的に削減が見込まれる時間工数を定量的に把握する。

現場試行の対象プロセスは法面出来形検査に関連し，検査当日作業だけでなく，施工者による出来形計測，出来形管理図表作成，立会準備など，前後作業も含むものとする。

8. API 連携の特性と効果

重機に搭載されたレーザー計測技術と共通データ環境を活用した API 連携の特性とその効果について説明する（図-6，図-7 参照）。

○簡単な後付け：バックホウに 2D レーザースキャナを取り付け，旋回することで法面の出来形を 3D で計測する。

○計測作業の不要化：施工中にオペレータがいつでも計測を行い，現場でヒートマップを確認することが可能となる。

○臨場と帳票化の削減：監督員が改ざん防止機能を備えた共通データ環境「R-CDE」において法面の出来形データを確認することで，検査に関連する臨場や帳票化の省略が実現する。

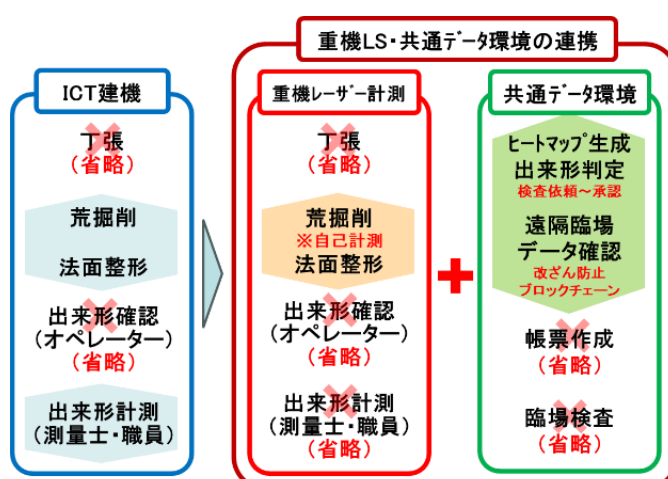


図-6 API 連携技術の効果（ICT 建機との比較）

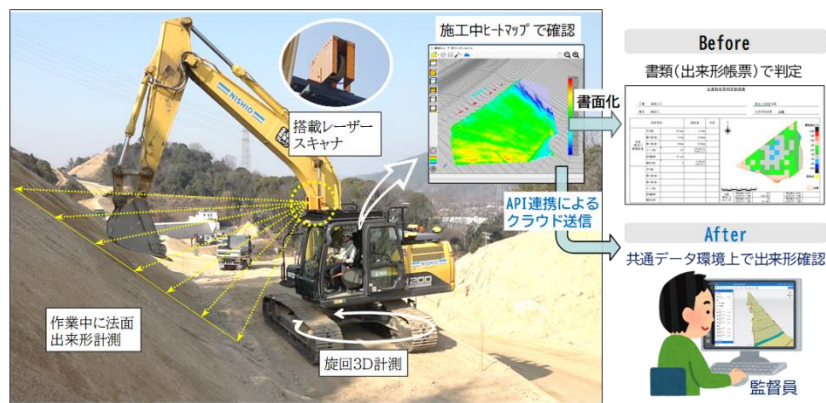


図-7 共通データ環境の現場試行（ビフォーアフター）

9. 現場試行の成果

現場試行は、国土交通省中国地方整備局が発注した玉島笠岡道路浜中地区中工区改良工事における土工事を対象とし、中間技術検査での時間削減効果について現場職員・検査官にヒアリングを通じて評価した。R-CDE 導入前後における時間削減効果の試算結果を表-3、表-4 に示す。

< 定量評価 >

受注者側では、出来形計測から検査にかかる時間のうち、合計で 23% 業務時間を削減（表-3 参照）できることが確認された。この内訳は、出来形の計測から解析にかけてのデータ保存手間削減、管理図表出力における帳票の削減、検査準備における自主検査の臨場の削減、実地検査における出来形寸法確認の業務削減が含まれ、効率化を実証した。発注者側では、検査準備から検査後にかかる時間の合計で 5.5% 業務時間削減（表-4 参照）という結果で、受注者側と比較して小さな効果となった。この要因は、技術検査の項目に出来栄など数値で測定できない要素が含まれ、これらの項目については実地での確認検査が必須なためである。

< 定性評価 >

検査を担当した関係者によると、施工が全て完了した後ではなく、受発注者間による確認が R-CDE 上で逐次可能であるため、施工管理の品質向上が期待される。また、現場状況を簡単に高頻度で共有できるため、若手育成に貢献し、技術伝承が促進されるという意欲的な意見が挙げられた。

表 3 R-CDE 導入前後の時間削減効果（受注者）

< 受注者側 >

	担当者	導入前の業務	人分	導入後の業務	人分	削減時間	人分
出来形計測	係員	重機LS精度確認 計測データ保存	460	計測データの保存 手間削減	380	-80	
出来形解析	主任	データ処理～管理 図表出力	75	帳票削減	45	-30	
検査準備	係員	自主検査～資料 印刷	315	臨場削減	170	-145	
書面検査	現場代理人 監理技術者	施工計画確認～ 品質書面確認	320		320	0	
実地検査	現場代理人 監理技術者 係員	現場往復～実地 検査（出来形、 出来栄え）	180	実地検査出来形 臨場削減	120	-60	
検査後	監理技術者	資料送付	30		30	0	
業務合計			1,380		1,065	-315	

削減率 23%

※業務時間について導入前はヒアリング、導入後は推定値

表 4 R-CDE 導入前後の時間削減効果（発注者）

< 発注者側 >

	担当者	導入前の業務	人分	導入後の業務	人分	削減時間	人分
検査準備	検査官	事前資料確認	90		90	0	
書面検査	検査官	施工計画確認～ 品質書面確認	160		160	0	
実地検査	検査官	現場往復～実地 検査（出来形、 出来栄え）	60	実地検査出来形 臨場削減	40	-20	
検査後	検査官	工事評点査定	55		55	0	
業務合計			365		345	-20	

削減率 5.5%

※業務時間について導入前はヒアリング、導入後は推定値

10. おわりに

今回試験的に導入した重機搭載レーザー計測システムと R-CDE の連携により、受発注者間の情報管理と共有作業における効率化が実証された。長期的には建設現場で実装が進む個々の ICT 新技術が、このように共通データ環境として活用できる WebAPI と連携することで 3D デジタルデータのプロセス横断的な活用がさらに進展することが期待される。

今後の課題として、本連携技術は臨場削減による効率化の効果が大きいですが、出来形管理に限定されているため、品質管理の観点から帳票やワークフロー削減を実現できるシステムへの改善が求められる。そのためには、ICT 土工以外の工種や品質管理に拡張、かつ有効なデジタルデータ取得解析を実現する新しいアプリケーション開発体制を構築することが重要である。今後も API 連携のメリットを最大限に活用しつつ、現場検証を通じて改良を重ね、施工管理と監督検査のさらなる効率化と生産性向上を図る所存である。

参考文献

- 1) 松下文哉・小澤一雅：施工管理情報の非改竄性を担保するブロックチェーンを用いた出来形検査システム，土木学会論文集 F4, Vol.77, No.1, 1-11, 2021

17. 小型 ICT 建設機械の刃先位置計測機能を用いた 効率的な出来形管理手法の構築について

近畿地方整備局 近畿技術事務所 技術活用・人材育成課 ○ 伊藤 亘佑

1. はじめに

国土交通省では、生産性向上に向けたプロジェクトの一つとして、「ICT 技術の全面的な活用」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「i-Construction (アイ・コンストラクション)」を平成 28 年度から推進し、更に令和 6 年には i-Construction2.0 を発表し、建設施工の DX (デジタルトランスフォーメーション) を加速する取り組みを実施している。DX 推進プロジェクトの一つである、ICT 施工については、R5 年度時点において、直轄工事で対象になり得る工事のうち約 8 割で実施され、その効果については、延べ作業時間が約 3 割縮減するなどの効果が現れている。

しかし、国内全体の対象工事件数(民間工事を除く)では、直轄工事の占める割合は 2 割程度で、地方自治体の発注工事が 8 割であり、地方自治体発注工事での実施率は約 3 割弱にとどまっていることから、中小企業への ICT 施工の普及拡大が建設業全体における生産性向上の課題となっている。

そこで、中小の建設業者が施工する比較的小規模な現場でも利用しやすい技術や管理手法の導入を積極的に推進していく必要がある。

本稿では、国土交通省が小規模施工での ICT 施工拡大の環境整備として令和 4 年度に策定した「ICT 土工 (小規模施工 1,000m³ 未満)・床掘工・小規模土工・法面整形工」¹⁾を対象として、都市部や市街地などの狭小現場での活用が期待されている小型のマシンガイダンス (MG) 技術搭載バックホウを ICT 施工だけでなく出来形計測システムとしても利用することで、計測作業の省力化と ICT 施工の機材費低減が期待できる手法を構築し、その効果検証および精度確認を実施した結果について報告する (図-1 参照)。

また、本検証結果を踏まえ、小規模工事における小型 ICT 建設機械の刃先位置計測機能を用いた効率的な出来形管理手法を ICT 活用工事における出来形管理手法の一つとして整備した内容についても併せて報告を行う。



図-1 マシンガイダンスの刃先計測機能を用いた出来形管理手法 (イメージ)

2. 刃先計測機能を用いた出来形管理手法の構築

2.1 小規模施工における既存の管理手法（施工履歴を用いた出来形管理）の適用課題

ICT 活用工事の出来形管理手法は「3次元計測技術を用いた出来形管理要領（案）（以下、既要領（案））」に規定されており、土工および河川浚渫工事で、ICT 建設機械（掘削はバックホウ、盛土はブルドーザおよびローラ）を用いた施工履歴データによる出来形計測による面的管理が認められている。

小規模施工の土工部においても、本手法を利用することは可能であるが、施工規模が小さい、施工期間が短い小規模施工への適用に関しては以下の課題があげられる。

- 土工部の施工履歴データを用いた出来形管理手法（面管理）では、通常の MG や MC の機能に加えて、ICT 建設機械の稼働中の刃先データを連続的に計測し取得するシステム、計測後の点群処理用の専用アプリケーションが必要となるため、日当たり施工量が少ない施工の繰り返しかつ施工期間の短い小規模施工では、データ処理作業の増加と機材の導入準備などの懸念がある。
- 点群での面管理に加えて 1 日の施工範囲に対して 3 箇所以上で TS 等光波方式を用いた検測の両方を実施することになっており、小規模な施工では検測と現場の出来形計測が同程度の頻度となり、施工履歴データによる計測が現場作業の効率化につながらない。
- 小規模施工に多く見られる床掘りなどの構造物設置に伴う土工では、バックホウが掘削、仮置き、積込み、埋戻し、吊り作業などの複合的な作業に利用されるため、出来形に係わる作業が離散的に実施される。このため、施工履歴などの連続的なデータ計測では、作業実施時以外のデータ計測が発生することや土工部のデータ抽出が必要となり、適用が困難なことが多い。
- 既要領（案）が主に対象としている土工では、0.45m³ 級や 0.8m³ 級バックホウにシステムを搭載して利用されることが多いと想定されるが、小規模施工で利用される小型バックホウは、作業中の揺れや振動などの影響を受け易いことから、安定した計測精度を確保できるか懸念される。

次に、「ICT 土工（小規模施工 1,000m³ 未満）・床掘り・小規模土工・法面整形工」では、面的な出来形管理手法ではなく、管理断面による出来形管理手法が標準的な出来形管理方法として適用されている。本手法は、ICT 施工（MC や MG を用いた施工）の実施に係わらず、TS 等を用いた出来形計測による出来形管理が必要となっている。小規模施

工での出来形管理をより効率化するためには以下の課題がある。

- 小規模施工では、掘削後に埋戻される作業が多いため、出来形計測を埋戻し前に頻繁に実施する場合もある。このため、TS 等を用いた出来形管理を実施した場合でも、出来形計測の機材や人員が必要となり、省力化につながり難い。
- 小規模施工で ICT 施工を行った場合、ICT 施工の位置計測技術と出来形管理用の位置計測技術の 2 種類の機材手配が必要となってしまう、ICT 活用工事に要する機材費の負担が大きくなる。

2.2 刃先計測機能を用いた出来形管理手法案

(1) 本手法の概要

小規模施工においても丁張り作業などの削減が期待できる ICT 施工は、省力化技術として普及が期待されている。そこで、上記課題を踏まえ、小規模施工での施工及び出来形管理を同時に効率化する手法として、ICT 施工を有効活用できる出来形管理手法を構築する。以下に、ICT 建機の刃先計測機能を用いた出来形管理手法のコンセプトを示す。

- ICT 建機に一般的に搭載されている刃先計測機能（連続計測ではない）を用いる。
- 作業と同時に、刃先を土工面に設置させマシンガイダンスシステムで出来形計測を行う。
- 計測は、従来の断面管理における計測と同様に、幅、長さ、高さの計測箇所とし、刃先を静止させた状態で出来形計測（単点計測）を行う。長さや幅は 2 点座標間距離から計測後に計算で求める。

(2) 本手法のメリット

本手法の利用による効果は以下が期待できる。

- ICT 建機に一般的に搭載されている刃先計測機能を用いることで、ICT 施工以外の機材（施工履歴や点群処理に必要な機材や専用アプリケーション）が不要である。
- 作業と同時に ICT 建機で出来形計測が可能となり、別途、出来形計測を行う人員、機材は不要で、出来形計測作業の省力化が可能である。
- 出来形の算出は、高さ、2 点間距離であり、一般的な表計算ソフト程度での演算が可能で専用のソフトウェアを必要としない。

2.3 刃先計測機能を用いた出来形管理手法の検証

本コンセプトの実現に向けて、以下の事項について検証の必要がある。

- 小型バックホウのマシンガイダンスシステムの静止状態による計測精度の確認：小規模施工においては、±50mm の点群を用いた断面管理手法が適用されている。そこで、本手法における刃先の要求精度を±50mm とした。

- 施工中の静止状態による刃先計測（単点計測）が小規模施工の作業を阻害していないかどうかの検証：施工と出来形計測を対象に、従来手法（施工後に TS 出来形管理を行う手法）と同等以下の作業時間で実施できるか検証する。

3. 刃先計測機能を用いた出来形管理手法の検証

3.1 計測精度の検証

(1) 検証機材

検証作業は、小規模施工での活用を前提として小型バックホウ（0.25m³ 級）を選定し、計測技術として下記の 3 種類のマシンガイダンス技術を対象に実施した。

表-1 刃先計測機能の検証機材

検証機材	計測システム
MG_A	自動追尾式TS
MG_B	RTK-GNSS（基地局設置）
MG_C	RTK-GNSS（VRS方式）

(2) 計測精度の検証条件

計測精度は、実現場での作業を想定し、移動と旋回作業を含む検証点での評価を行うこととした。真値は TS を用いた計測と刃先計測機能での計測結果の比較を行った。

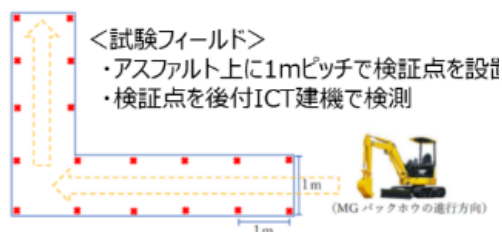


図-2 MGの刃先計測精度の検証

(3) 計測精度の検証結果

3 タイプについて、1 機種につき 18 箇所の検証点の差分の比較を行った。結果を表-2 に示す。

表-2 MGの刃先計測精度の検証

	MG_A			MG_B			MG_C		
	差分 (刃先-TS)			差分 (刃先-TS)			差分 (刃先-TS)		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
①平均値	0.019	0.012	-0.017	0.003	0.006	0.005	0.025	0.008	-0.009
②標準偏差の2倍	0.021	0.020	0.007	0.017	0.015	0.016	0.019	0.024	0.011
①+②	0.040	0.032	0.024	0.020	0.020	0.021	0.044	0.033	0.020

(4) 精度検証のまとめ

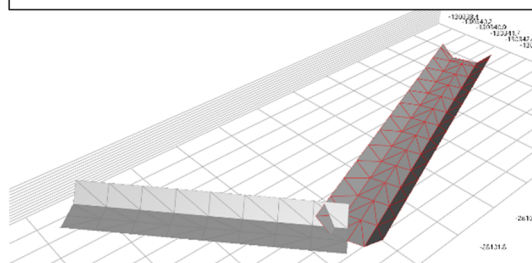
精度検証の結果、通信装置の不備や衛星補足状況の極端な悪化などの外的要因が無い場合は、TS 計測に比べて計測差は±50mm 以内を十分に満足できる結果が得られた。ただし、精度確保にはセンサ設置後の適正なキャリブレーションが重要であることが判明した。

3.2 構内実験による作業性の検証

(1) 検証フィールドの概要

刃先計測機能を用いた出来形管理手法の実現に向けて、近畿インフラ DX 推進センター（近畿技術事務所）構内の小規模施工の U 型側溝の敷設に伴う掘削工事を想定した検証フィールドを設け、本手法の作業性について検証を実施した。検証フィールドの概要を図-3 に示す。

床掘幅：1m×深さ：0.3m×延長：20m
折れ線上の施工とする。
出来形管理は、約2m間隔で16断面
施工数量：約15m³



床掘りの 3D 設計データ（上）・施工後の写真（下）

図-3 検証フィールドの概要

(2) 作業時間の検証結果

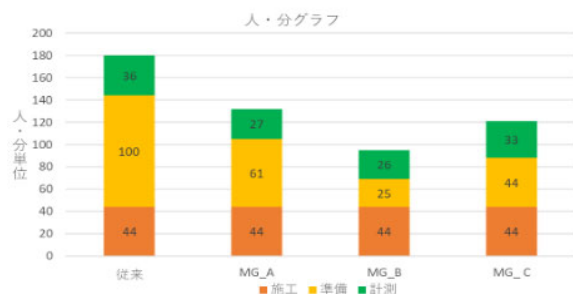
検証フィールドの掘削作業について、従来手法（丁張りをを用いた通常施工と TS 出来形による出来形管理）と、本手法（マシンガイダンスと刃先計

測機能を用いた出来形管理)の比較を行った。比較は、精度検証と同様に3タイプについて実施した。

各手法の作業性比較グラフを図-4に示す。施工管理に要する人工数・作業時間について比較した。

MGを用いた出来形計測では、計測時間が増加するが計測員が削減(オペレータが実施)できることにより、人工としては、従来手法に比べて省力化が期待できる。

また、MGを利用することで、丁張り作業などの施工準備作業の人工がおよそ半分程度になっている。



※従来手法の準備時間：丁張り計算・TS等の設置・丁張り設置

※MGの準備時間：データ作成・基準点への機材設置、始業前点

図-4 検証フィールドでの作業性の検証結果

(3) 作業性の検証結果まとめ

施工中に刃先計測機能を用いる出来形計測を実施することで、作業単体としての時間は増えるものの、施工後に出来形計測を行う従来手法に比べて全体として省力化が可能である。

また、MGを導入することで、丁張り作業などの準備作業の省力化が可能である。

3.3 刃先計測機能を用いた出来形管理手法の検証結果まとめ

刃先計測機能を用いた精度および作業性の検証結果より、本手法が小規模施工の省力化に寄与できることを確認した。また、本手法を現場適用するためには、刃先計測機能の適正な精度確保が重要であることから、事前精度確認方法を定め、試行要領(案)を作成した。

4. 刃先計測機能を用いた出来形管理手法の現場適用性検証

前節までの検証結果を基に策定した試行案に基づいて実現場での試行を実施し、実施工における計測精度の確保と適用効果、試行要領(案)に対する改善要望について調査を実施した。

4.1 検証現場の概要

本手法の適用対象は、小規模施工であることから、0.45m3級以下のバックホウが利用されている

構造物工の床掘り作業や側溝設置のための掘削作業を対象に10現場で試行を実施した。

表-3 試行現場の工種と利用機械

	現場の作業種別	MGのタイプ
1	掘削工	自動追尾TS
		RTK-GNSS(基地局設置)
2	上水道の送配水管埋設工事	自動追尾TS
3	コンクリートブロック積の床掘工(土工)および仮設坂路	自動追尾TS
4	床掘試験施工	RTK-GNSS(VRS)
5	斜面撤去工事	RTK-GNSS(VRS)
6	水路管敷設工事	自動追尾TS
7	床掘試験施工	自動追尾TS
8	床掘試験施工	RTK-GNSS(VRS)
9	床掘工	RTK-GNSS(VRS)
10	床掘試験工	自動追尾TS



図-5 試行現場の状況(抜粋)

4.2 実施工における精度検証結果

10現場での試行において、刃先での出来形計測を行うと同時に同位置へのマーキングを行い、別途TSでの計測を行った結果との比較により刃先計測精度を確認した。各現場での計測結果を図-6に示す。

MGの導入時の適正なキャリブレーションと事前精度確認を実施することですべての現場において要求精度の±50mm以内であることが確認された。

4.3 実施工における作業性の確認結果

各試行現場のうち2現場においては、従来手法(丁張り設置を行い、TS出来形管理)を行う区間と、本手法(MGによるICT施工と刃先計測機能を用

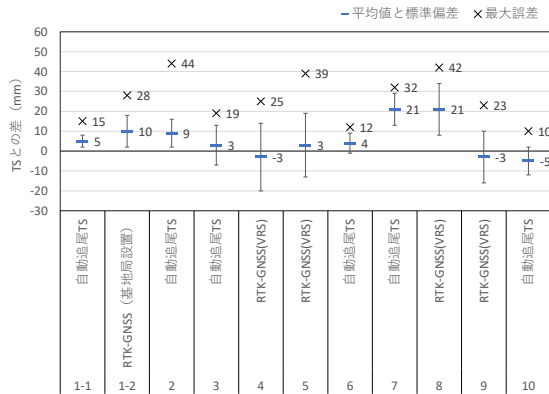


図-6 試行現場での精度確認結果一覧（高さの差）

単位（人・時間）									
現場	種別	種別	丁張り	施工	出来形計測	施工と刃先位置の計測	合計	削減率	（計測断面数）
1	L=10	従来	0:30	1:00	0:10		1:40		3断面
	自動追尾TS	刃先		0:35		0:10	0:45	55%	11断面
	GNSS	刃先		0:35		0:12	0:47	53%	8断面
2	L=6	従来	2:02	0:36			2:38		6断面
	自動追尾TS	刃先	1:23			0:42	2:05	20%	6断面

図-7 試行現場での作業人工の結果一覧

いた出来形管理)を行う区間を設定し、作業時間・人工を比較した。比較結果を図-7に示す。

検証の結果、全ての現場で従来施工に比べ2～5割の人工（人・分）の省力化が実現されている。刃先計測は、常に1人工で作業ができ、従来施工と比較して、作業人工を削減できたため人工時間の削減に繋がった。また、MGの導入による丁張り削

減効果の影響が大きく、出来形計測員の確保、計測機材の確保が不要であることも確認できた。

4.4 試行要領（案）に対する要望等

本手法の適用性および試行要領（案）に対する改善要望について実施者へのヒアリングを実施した。
(1)実施者の意見

試行現場の実施者へのヒアリングを行った結果を以下にまとめた。

■ 掘削作業から出来形計測まで1人工で作業が行えるため、本来は施工後、現場代理人が現場に行き出来形計測を行っていたのが無くなり、現場代理人の移動時間の削減や出来形計測までの待ち時間がなくなる。その結果、作業効率に期待できるとの意見が挙がった（掘削作業から出来形計測まで1人工で作業が行えるため省人化に繋がるため、本省が掲げるi-Construction2.0の達成に繋がると期待できる）。

■ モニターの操作ミスや計測忘れがないか不安。
■ オペレータが出来形計測も行う手法であるため、ICT建機の機能に加えて施工管理についての知識も必要になる。人材育成が課題となる。

(2)試行要領（案）に対する要望

試行要領（案）に対する要望を以下にまとめた。

■ 計測精度の確保に向けては、事前精度確認だけでなく、日々の精度確認（簡易なもの）が必要である。

総括表

工種	出来形 管理方法	ICT活用工事における適用範囲										3次元計測技術（技術概要集）												精度確認・ 出来形算出 ガイド
		実施事項（別紙1）										3次元計測技術（別紙2）												
		起工測量	設計データ作成 データ チェック	出来形 計測	計測点群 データ 処理	出来形 管理資料 の作成	部分 払い 計測	量算 計測	出来 ばえ 評価	面状地 把握	計測性能 及び 精度管理	UAV	TLS	地上移動 計測機 LiDAR	無人機 搭載型 LiDAR	音響測 深機	施工 管理 データ	地上写 真測量	モバイル 端末	TS（ノ ンプリ）	TS等 光波方 式	RTK- GNSS	ICT建 機の刃 先計測 機能	
土工	多点計測管理 ¹⁾	○	○	●	○	○	○	△	△	△	□	○	○						○	○	○	○	○	
	単点計測管理 ²⁾	○	○	●		○		△	△	△	□									○	○	○	○	
舗装工	多点計測管理 ¹⁾	○	○	●	○	○					□	○	○							○	○	○	○	
	単点計測管理 ²⁾	○	○	●					△		□									○	○	○	○	
路面切削工	多点計測管理 ¹⁾	○	○	●	○	○					□									○	○	○	○	
	単点計測管理 ²⁾	○	○	●	○	○			△		□						○			○	○	○	○	
河川浚渫工	多点計測管理 ¹⁾	○	○	●				△		△										○	○	○	○	
	単点計測管理 ²⁾	○																		○	○	○	○	
付帯構造物設置工	多点計測管理 ¹⁾	○		○	○	○					□		○	○	○					○	○	○	○	
	単点計測管理 ²⁾										□													
表層安定処理等・ 固結工（中層混合処理）	その他管理 ³⁾	○		●		○	△	△							○					○	○	○	○	
	その他管理 ³⁾		○	●			△									○								
固結工（スラリー攪拌工・ バーチカルドレン工・ サンドコンパクションパイル工	その他管理 ³⁾		○	●			△									○								
			○	●																				
法面工	多点計測管理 ¹⁾	○				○					□	○	○	○						○	○	○	○	
	単点計測管理 ²⁾	○									□		○	○						○	○	○	○	
トンネル工	単点計測管理 ²⁾			○		○					□									○	○	○	○	
基礎工（先板工・既製杭工・ 場所打杭工・鋼管矢板基礎工）	多点計測管理 ¹⁾		○	●	○	○					□		○	○						○	○	○	○	
	単点計測管理 ²⁾										□									○	○	○	○	
擁壁工	多点計測管理 ¹⁾	○		●	○							○	○							○	○	○	○	
	単点計測管理 ²⁾		○	●								○	○							○	○	○	○	
構造物工（橋脚・橋台）	多点計測管理 ¹⁾	○		●	○				△	△	△	□	○		○					○	○	○	○	
	単点計測管理 ²⁾	○		●					△	△	△	□	○							○	○	○	○	
土工（1,000m～3,000m・ 床掘工・小規模土工・法面整形工	多点計測管理 ¹⁾	○		●	○	○			△	△	△	□	○							○	○	○	○	
	単点計測管理 ²⁾			●					△	△	△	□								○	○	○	○	

出典：国土交通省 HP 3次元計測技術を用いた出来形管理要領（案） R7.3改訂 総括表

図-8 刃先計測機能を用いた出来形管理の全国運用について

- ICT 建機の刃先精度確認試験の手間が大きいので簡略化して欲しい。
- ICT 建機のトラブルなどに備えて、従来手法での出来形管理も併用可能な記載として欲しい。

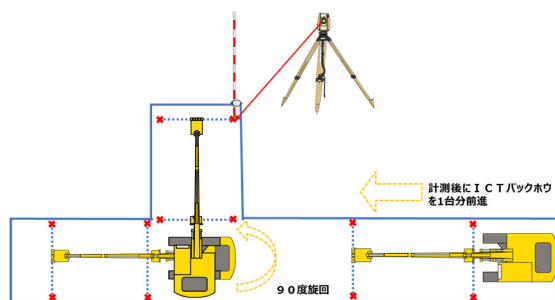
5. 刃先計測機能を用いた出来形管理手法の全国運用に向けた基準類の整備

上記結果を踏まえ、本手法は、ICT 活用工事で利用される 3 次元計測技術を用いた出来形管理要領（案）の「土工（1,000m³ 未満）・床掘工・小規模土工・法面整形工編」にて、出来形計測手法の一つとして位置づけられた。（図-8 参照）

また、同要領（案）において、本手法の適用においては、以下に示す事前の刃先計測精度の確認が必要である。

(1) 計測精度を担保するための精度確認方法

MG ガイダンスバックホウが有する刃先計測機能を用いて出来形計測（断面管理）を行う際、施工前にこの機能が正しく座標値を計測できているか確認する必要がある。事前精度確認試験は 1 工事につき 1 回実施する。また出来形計測を行う場合は日々の精度確認（既知点での確認）も実施する。（図-9 参照）



ブーム・アームを最も縮めた状態で 1 断面（2 点以上）の計 2 断面で計測。その後、建機 1 台分前進させ同姿勢で 2 断面、90 度旋回させた姿勢で 2 断面の計 6 断面（12 点以上）を計測。

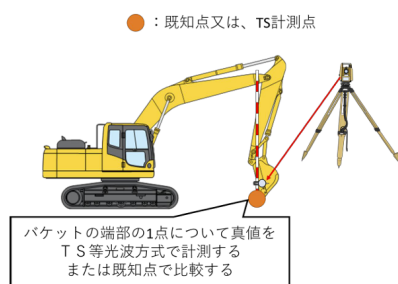


図-9 刃先計測精度の事前確認方法例（上）と日々の精度確認（下）

(2) 出来形管理基準及び規格値案

本手法は、断面管理手法における出来形管理と

なることから出来形管理基準及び規格値に変更はない。

6. おわりに

近畿地方整備局として刃先位置計測機能を用いた出来形管理手法に着目し、検証フィールドにおける現場検証を踏まえ、小型 ICT 建設機械の効率的な出来形管理手法が構築できたことは、ICT 活用が進んでいない地方自治体における中小規模工事での生産性向上に向け、省力化が大きく期待でき、中小規模工事への ICT 施工の導入・活用への更なる期待もできる。

更に、近畿技術事務所では本手法の活用促進に向けて、近畿地方整備局インフラ DX 推進センターでのインフラ DX 研修（ICT 活用研修、BIM/CIM 施工研修等）や講習会を通じて、地方自治体、中小企業を含め小型 ICT 建設機械による刃先計測技術の普及推進を進め、ICT 活用を広く普及していくとともに、地域の建設業に向けて ICT 施工に長けた人材育成にも力を注いでいく。

謝辞：本編を執筆するにあたり、現地適応性検証の現場を提供して頂いた国、府県、自治体の皆様に心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省 HP

18. ニューマチックケーソン工法における排土設備自動化

株式会社大本組
株式会社大本組
株式会社大本組
株式会社大本組
株式会社アクティオ
株式会社アクティオ

○坂本 浩平
橋 伸一
藤原 啓
南坂 義雄
浅利 和輝
荒地 智晴

1. はじめに

近年、日本社会は急速な少子高齢化に直面しており、建設業界においてもその影響は顕著である。特に、熟練作業員の高齢化と若年層の労働力不足により、人手不足や技術継承が課題となっている。このような状況において、施工現場の生産性を向上させるためには、従来の人手依存型の作業から脱却し、先進的な技術を導入した自動化施工への移行が求められる。

ニューマチックケーソン工法における掘削土の排土作業は、排土クレーンによって揚重された排土用バケットを、マテリアルロックを介して函内に搬入し、掘削土を積込んだ後、再び函外へ搬出する行程を繰り返すことで行われ、マテリアルロック操作員の配置が必要であった。

本報告では、マテリアルロック操作員の作業負担軽減の課題を解決するため、排土作業を自動化するシステムを開発した。開発したシステムの構成、仕様および実証結果を報告する。

2. 概要

本工法の特徴は、掘削中に断続的にケーソン本体が沈下と傾斜を繰り返すことである。これにより排土クレーンとマテリアルロックの位置関係は常に変動する。また排土用バケットの搬入出時にはマテリアルロック内に設置された上下扉の動作に接触しないよう、所定の格納範囲内で正確に停止させることが重要である。

開発した「排土設備自動化システム」は、排土クレーンとマテリアルロックに搭載したセンサーにより、排土用バケットの位置を自動検出することで、上記の揚重・扉開閉・加減圧を一括制御し、排土用バケット搬入出の一連動作を自動化するものである。

排土作業の流れは以下のとおりであり、概念図を図-1に示す。

① 排土用バケットへ掘削土積み込み、排土開始

- ② 排土クレーンにて排土用バケット揚重、マテリアルロック内搬入
※マテリアルロックの下扉閉
マテリアルロック内減圧
- ③ 減圧後、マテリアルロックより排土用バケット搬出
※マテリアルロック上扉開
- ④ 転倒装置で排土用バケットの転倒排土
※排土クレーン横行
- ⑤ 排土用バケットをマテリアルロック直上へ移動
※排土クレーン横行
位置合わせ
- ⑥ 排土用バケットをマテリアルロック内へ搬入
※マテリアルロック上扉閉
マテリアルロック内加圧
- ⑦ 加圧後、排土用バケットを函内まで降下、着地
以後①～⑦の繰り返しである。

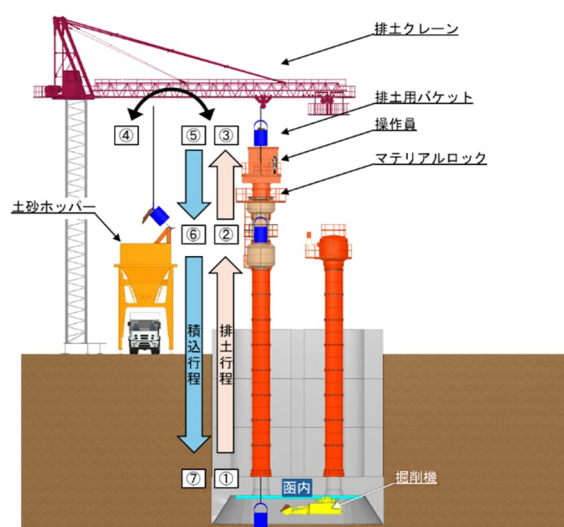


図-1 排土作業概念図

排土用バケットをマテリアルロック内へ搬入する際の詳細について図-2に示す。

マテリアルロックは排土用バケットを搬入後、加圧のために上扉を閉鎖するが、その時の排土用バケットの弦との離隔は40cm程度である。

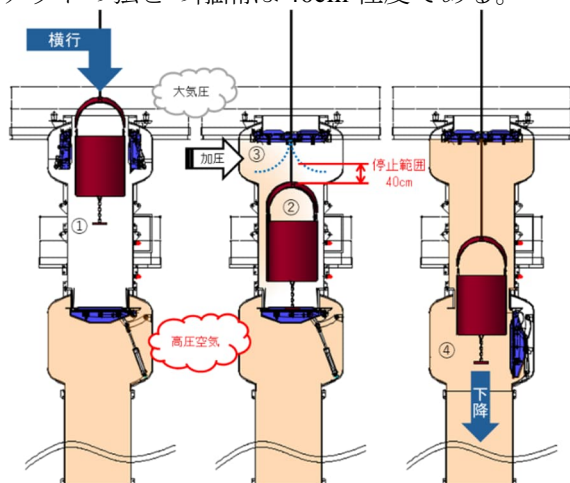


図-2 各行程詳細図

2. 機器構成および仕様

(1) 自動化対応マテリアルロック

自動化に対応する機器構成を図-3 に示す。

- ・マテリアルロック加減圧操作：電動送排気弁
- ・上下扉開閉検知：近接スイッチ
- ・排土用バケット検出：排土用バケット検知センサー
- ・マテリアルロック圧力計測：デジタル圧力計
- ・各種信号受け渡し制御：自動運転制御盤 (PLC)

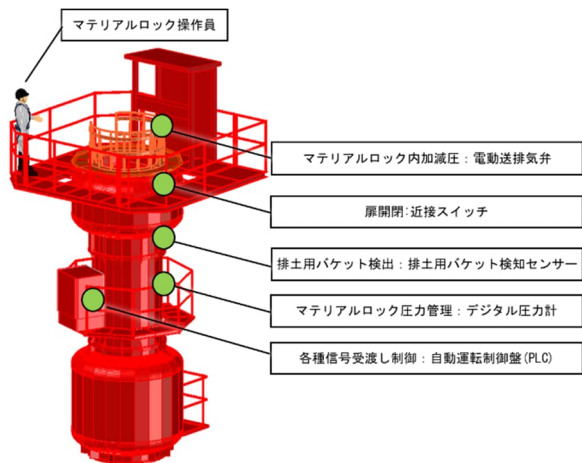


図-3 マテリアルロックおよび制御用機器

(2) 自動化対応排土クレーン

自動化に対応する機器構成を図-4 に示す。

本システムで採用した排土クレーンは、マスト横にジブを備えた水平クレーンであり、マスト後方までの吊荷移動と、旋回が可能である。

この特徴を活かし、沈下掘削に伴いマテリアルロックが偏心した場合には吊芯を合わせることが可能である。

- ・揚程長、横行長計測：回転エンコーダ

- ・吊荷重量計測：ウインチ荷重計
- ・たわみ量計測：ロードセル
- ・荷振れ防止制御：荷振れ防止インバータ
- ・排土用バケット位置計測：位置計測カメラ

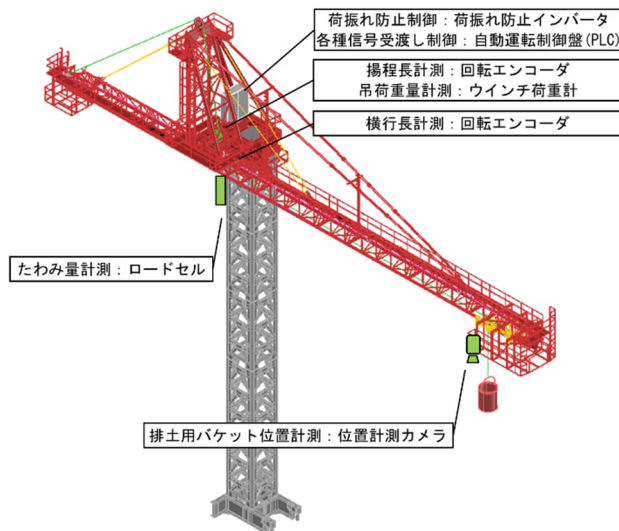


図-4 排土クレーンおよび制御用機器

4. 自動運転フローおよびシステム構成

(1) 自動運転フロー

図-5 に示す自動運転フローは、排土設備自動化における一連の動作手順である。本フローは、排土用バケットの搬入・搬出、マテリアルロック内の加減圧、扉の開閉、排土動作までを含む全行程を対象としており、各ステップはセンサー情報に基づく制御信号により自動的に実行される。

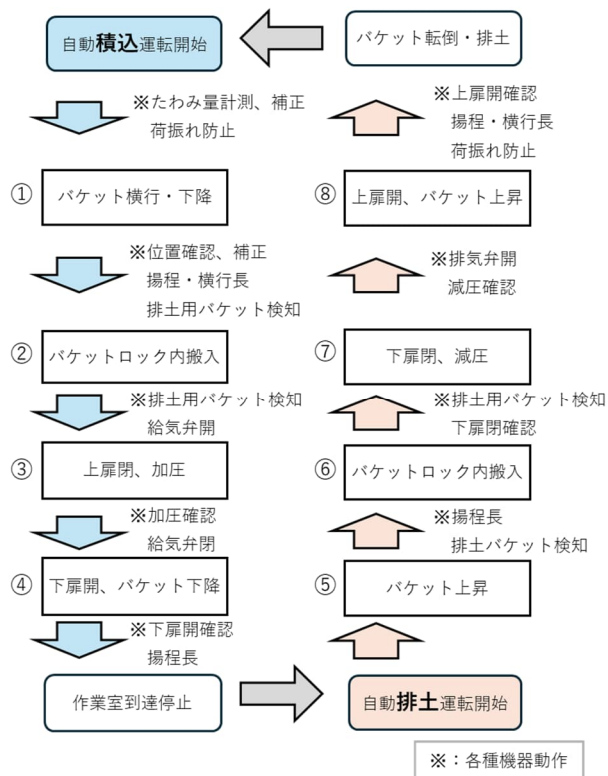


図-5 自動運転フロー

(2) システム構成

主なシステム構成は以下①～⑤である。

- ① 巻上げ・横行長の計測
- ② ロードセルによるクレーン全体のたわみ量計測
- ③ 荷重変動によるワイヤーの伸縮長算定

様々な要因により排土クレーンの吊芯はマテリアルロック中心からずれるため、各要素に対して上記①～③のセンサーにより変動値を計測している。位置変動要素と計測方法について図-6 に示す。

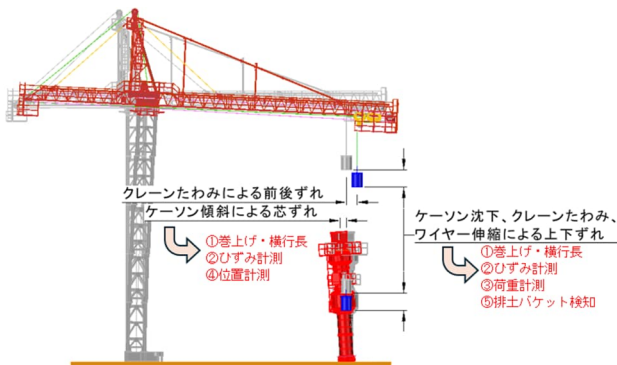


図-6 位置変動要素と計測方法

④ カメラによるマテリアルロック位置計測

マテリアルロック搬入口の直径は、排土用バケット外径+40cm であり、排土用バケットをマテリアルロックへ安定して搬入するために、排土クレーンジブに搭載した位置計測カメラで相対位置を計測し、ずれに応じて位置補正する。

水平方向ずれの許容範囲について図-7 に示す。

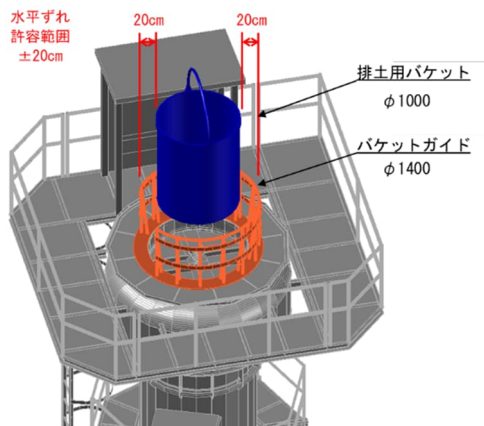


図-7 水平方向ずれ許容範囲

⑤ マテリアルロック内排土用バケット上下位置計測

排土用バケットをマテリアルロック内へ搬入時には、上扉の閉鎖動作に接触しない高さで停止させる必要があり、その許容範囲は図-2 に示すように 40cm である。停止位置は揚程高で管理しているが、巻上げ、横行長の計測に加えて、マテリア

ルロック内に設置した排土用バケット検知センサーにより排土用バケットの位置を直接検出することで、位置検出の信頼性を向上させている。排土用バケット検知センサーの使用内容は以下のとおりである。また排土用バケット検知センサーによる制御について図-8 に示す。

- ・センサーはマテリアルロック内の上下2か所に設置している。
- ・上下どちらかのセンサーが排土用バケットを検知すると、巻上げ（下げ）速度を「2速」から「1速」に減速する。
- ・上下センサー同時検知により排土用バケットの所定位置停止を判断しており、これは次ステップへと移行するトリガーでもあるため、インターロックの役割も担っている。

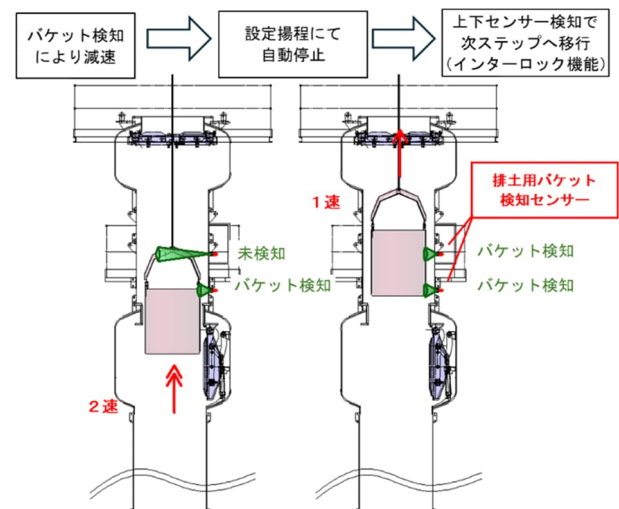


図-8 排土用バケット検知センサー

これらの検出値をフィードバックし、リアルタイムで次ステップの目標値を更新することで補正された動作量を指示することが可能である。

5. 実証

自動化施工を実現するにあたり、自動化（一部）施工による実証を行い、排土クレーンの搬出入工程の動作安定性や手動操作と比較したサイクルタイムを計測した。

5.1. 定義「自動化施工」と「自動化（一部）施工」

便宜上、自動化施工と自動化（一部）施工を図-9 のように区分した。

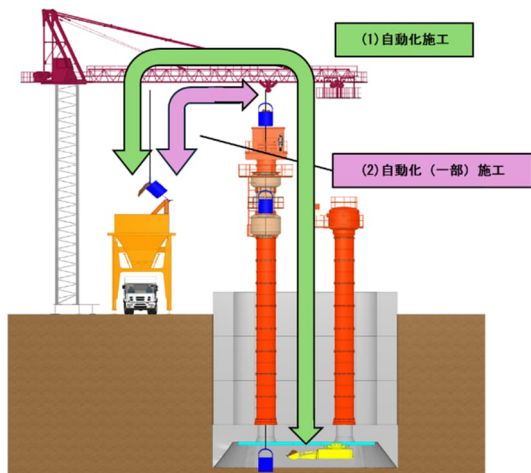


図-9 自動化施工と自動化（一部）施工区分

(1) 自動化施工について

自動化施工とは、「函内で積込み、マテリアルロックから出た排土用バケットを移動し排土クレーン後部の排土設備で排土させ、排土完了した排土用バケットを函内まで移動させる」システムである。

(2) 自動化（一部）施工について

自動化（一部）施工とは、「マテリアルロックを介さずに排土用バケットを移動しクレーン後部の排土設備で排土させ、排土完了した排土用バケットをマテリアルロック上まで移動システムである。

5.2 自動化（一部）施工

自動化（一部）施工の動作行程を図-10 に示す。

行程①（搬出）と行程②（搬入）について、自動運転と手動運転でそれぞれサイクルタイムを計測した。計測結果を表-1 および表-2 に示す。

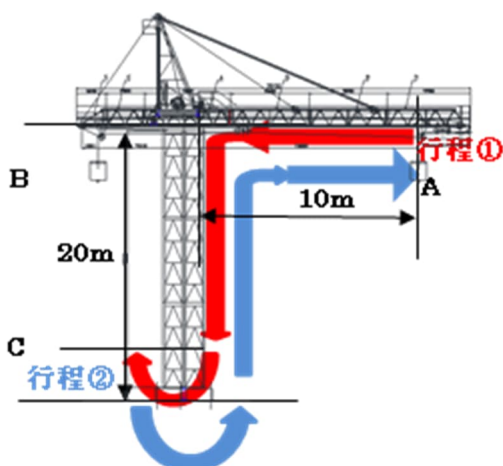


図-10 自動化（一部）施工行程

(1)条件

- ・吊荷は空荷排土用バケット（約 0.4t）
- ・A⇔B 横行（10m）
- ・B⇔C 巻き上げ下げ（20m）

(2)サイクルタイム

表-1 自動化（一部）施工

実施回数	1 回目	2 回目	3 回目	平均
工程①	1分25秒	1分24秒	1分25秒	1分24秒
工程②	1分15秒	1分15秒	1分15秒	1分15秒

※A⇔B「2 速」、B⇔C「2 速」

表-2 手動運転

実施回数	1 回目	2 回目	3 回目	平均
工程①	1分36秒	1分35秒	1分31秒	1分34秒
工程②	1分34秒	1分31秒	1分33秒	1分32秒

※A⇔B「2 速」、B⇔C「3 速」

(3)結果

- ・自動運転では、手動運転に比べ同等以上のサイクルタイムであった
- ・自動運転は、横行の加減速による排土用バケットの荷振れが大きい
- ・手動運転は、荷振れ抑制のためのインching操作分時間ロスがある

(4)荷振れ防止インバータ

排土用バケットをマテリアルロック内へ自動搬入するためには、マテリアルロック中心±20cm 以内で荷振れなく停止させることが重要であるため、横行用ウインチに荷振れ防止機能を備えたインバータを採用した。

荷振れは、吊荷の加減速により発生し、その振動周期は吊荷の固有振動数（共振周波数）による。固有振動数は吊荷の重量とワイヤー長により算定できるが、重量パラメータは影響が少ないと判断し、ワイヤー繰り出し長のみをリアルタイム計測しインバータへフィードバックした。

① 制振制御によるクレーン動作の変化

制御有効時と無効時のインバータ出力周波数波形を図-11 に示す。

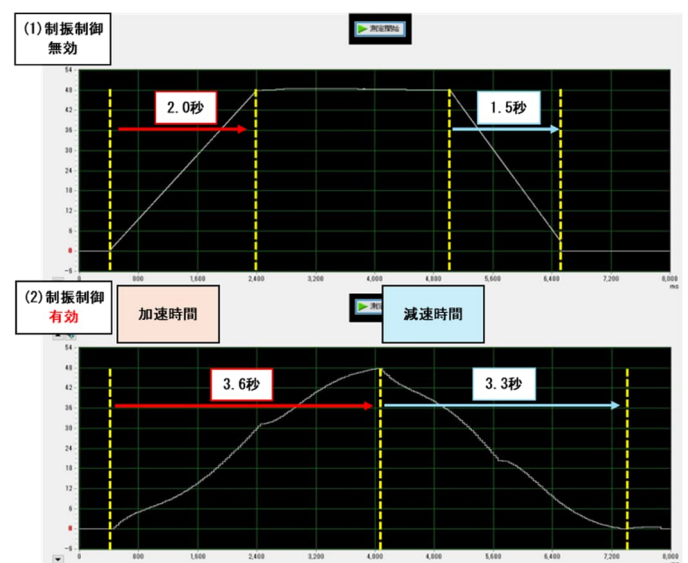


図-11 インバータ出力周波数

縦軸がインバータ周波数、横軸が加減速に要した時間である。横行「2速」を入力し、最高速度到達時間と減速停止時間を計測した。

制御有効時は、加速時間・減速時間ともに約1.7秒長くなっている。また加速度も一定ではなく、手動運転のインching操作に近い動作が含まれていることがわかる。

② 荷振れ検証結果

実際に排土用バケットを横行した際の荷振れ防止効果について表-3に示す。また制振制御有効時と無効時の荷振れ状況を図-12および図-13に示す。

＜条件＞

- ・地上揚程 5m
- ・横行「2速」
- ・5m 横行後停止

表-3 制振制御結果

吊 荷	荷振れ防止結果	振 幅
バケットのみ (400kg)	有効	4cm
	無効	92cm
バケット+錘 (計 1100kg)	有効	7cm
	無効	157cm



図-12 制振制御 無効時（バケット+錘）



図-13 制振制御 有効時（バケット+錘）

③ 荷振れ防止インバータ効果

- ・制振制御機能により、荷振れ幅が95%低減した
- ・吊荷重量による荷振れの変化はなく、重量変化にも追従する制御である。

5.3. 自動化施工

排土クレーンの排土動作に加え、マテリアルロックへの搬入出と、実際の排土作業を想定し実証を行った。

自動化施工の工程を図-14に、実証時の設備配置を図-15に示す。

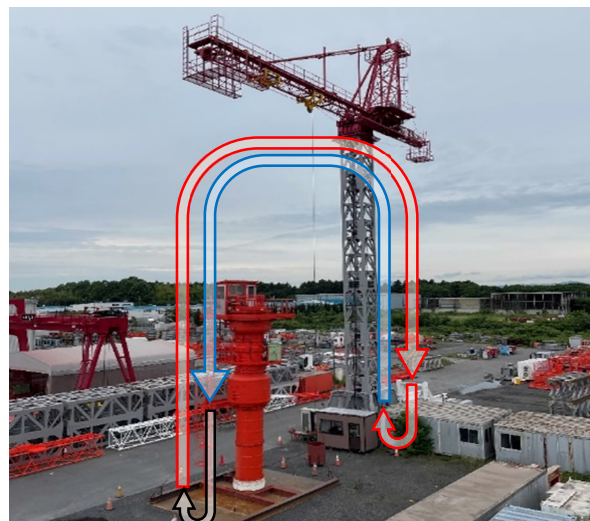


図-14 自動化施工行程

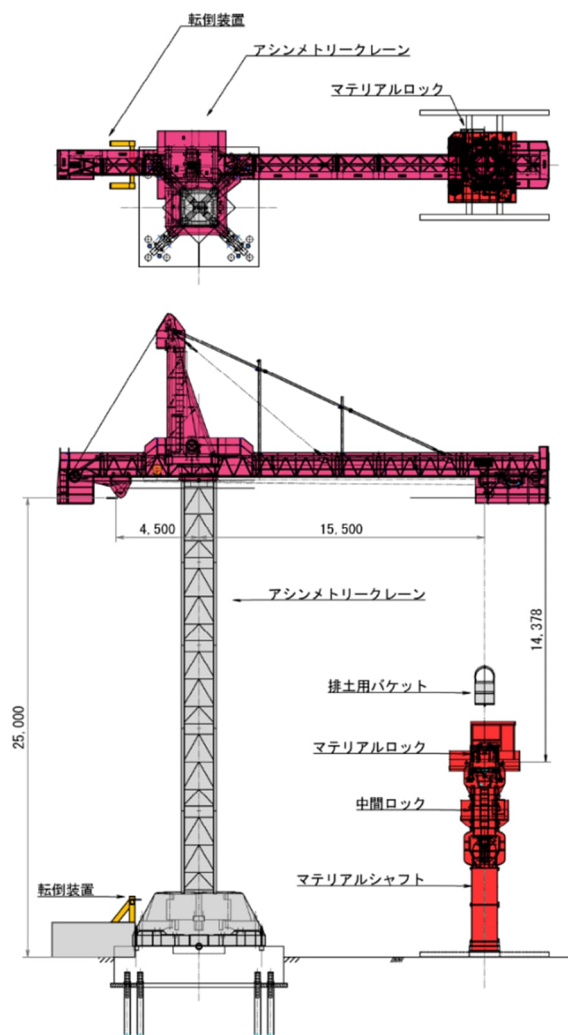


図-15 設備配置

計測結果を表-4 および表-5 に示す。

- ・ 巻上げ（下げ）（20m）
- ・ 横行（20m）
- ・ マテリアルロック搬入出
- ・ 給気・排気（各 20 秒）
- ・ 排土用バケット転倒（転倒装置）

表-4 自動化施工

吊 荷	1 回目	2 回目	平均
バケット単体	4分47秒	4分48秒	4分47秒
バケット＋錘	4分33秒	4分31秒	4分32秒

表-5 手動運轉

吊 荷	1 回目	2 回目	平均
バケット+錘	5分04秒	5分09秒	5分06秒

- ・自動運転は、手動操作と比較しサイクルタイムは約 15%短縮した
- ・自動運転では、サイクルタイムのばらつきが小さい
- ・自動運転は、ステップごとの移行がほぼ 0 秒のシームレス動作であり、位置合わせは演算で得られた目標値に向けて動作と停止を行うため、無駄のない運転が可能である

7. フェイルセーフの設計

ニューマチックケーソン工法では、函内圧力の適正管理が最重要事項である。本システムではフェイルセーフとして以下を採用し、発動条件を図-16に示す。

- (1)電動送排気弁は停電や通信障害等発生時、自動で弁を遮断する緊急動作アクチュエータを採用した。
- (2)下扉開閉検知センサーの誤作動時に、函内圧力の誤排気防止のため、排気時間の上限値を設定した。設定時間以上排気が継続した場合には、排気弁を閉鎖し自動運転中断、異常警報を報知する。

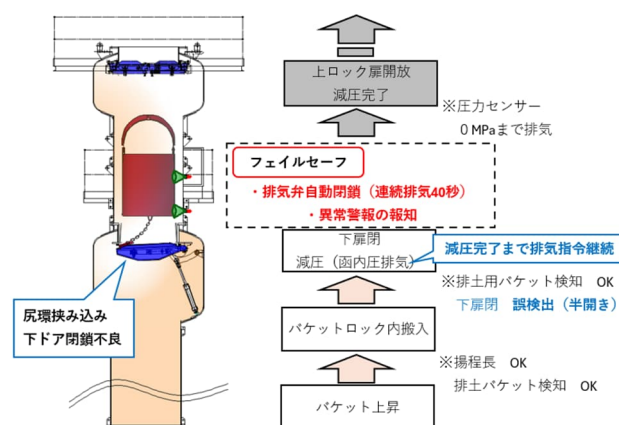


図-16 センサー誤作動時のフェイルセーフ

7. おわりに

排土設備自動化施工システムの活用により、サイクルタイムが短縮され施工効率向上による工期短縮が期待できる。

また、従来必要であったマテリアルロック操作員の常時配置が不要になり、吊荷との接触リスクも低減され安全性が向上する。

本技術は、建設現場における省力化と安全性向上に資するものであり、労働力不足が深刻化する建設業界において働き方改革の推進に寄与するものと考えられる。

今後は現場適用を通じて実用性を検証するとともに、異なる施工条件への適用性やシステムの汎用性について検討する予定である。

19. 高速道路リニューアルにおける床版取替技術の開発

高速・安全施工を可能にする床版更新工法

鹿島建設株式会社

○吉崎 伸
古川 紗也加
早房 昭人

1. はじめに

高度経済成長期に整備された道路橋は、大型車の通行量の増加や凍結防止剤の散布などにより、現在急速に劣化が進行しており、床版取替えなどの適切な更新が喫緊の課題となっている。

一方、道路橋の床版取替工事は供用中の施設を対象としたものであることから、交通規制等によるソーシャルロスを最小限とすることが最重要課題である。具体的には、規制期間を最小限とする「工程短縮」技術や、規制範囲を最小限とする「安全施工」技術が求められている。

このような社会的要請に対処すべく、鹿島では、ソーシャルロスの大幅な低減を可能にした「スマート床版更新（SDR※1）システム※2」を開発した。（以下、SDR システムという）

既に実工事に導入し、その効果を確認している。本論文では、実際の床版取替工事に適用した SDR システムの実績について報告する。


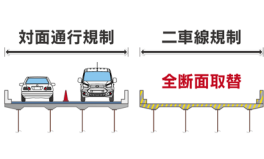

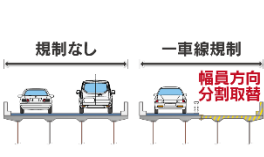
※1 Smart Deck Renewal

2. 床版取替工事の種類

床版取替工事には、「全断面取替」と「幅員方向分割取替」の2種類の取替工事がある（表-1）。

全断面取替は、上下線のうち一方を全面通行止め（二車線規制）して床版取替を行う。それに対し、幅員方向分割取替は、上下線のうち一方の片側一車線のみを規制して床版取替を行う。

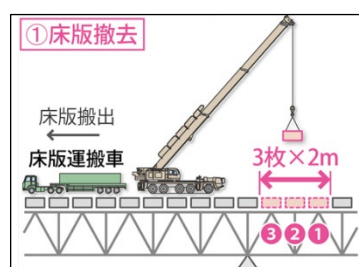
表-1 床版取替工事の種類

工事 タイプ	平面図	断面図
全断面取替		
幅員方向分割取替		

3. SDR システムの開発

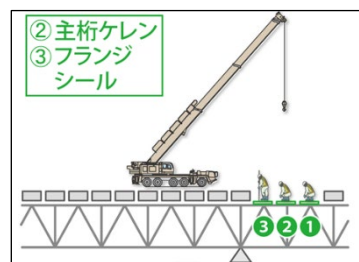
3.1 床版更新工事の標準的な施工方法と課題

標準的な床版更新工事の施工方法（図-1）では、次に示す①～④の作業を順次実施し、床版取替を行う。



①床版撤去工

既設床版を予めコンクリートカッタによって適当な大きさに切断し、主桁から引き剥がして、トラッククレーン（120～160t 吊）にて積込み搬出する。

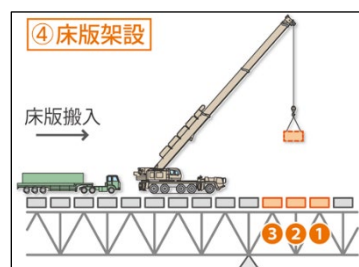


②主桁ケレン工

主桁フランジ上面のケレン清掃作業を行い、防錆塗料を塗布する。

③フランジシール工

床版高さ調整用の硬質ゴムと無収縮モルタル漏れ止のソールスポンジを貼り付ける。



④床版架設工

搬入された新設床版をトラッククレーンにより主桁上に設置する。

図-1 標準的な施工方法

①～④の作業を終えた後、次の施工範囲に移動する。1 サイクルに施工できる範囲はトラッククレーンの能力に依存するため、1 方（7 時間）の床版取替は3 枚（道路延長方向長さ 6m）である。

また、標準的な施工方法では、既設床版の搬出、新設床版の搬入時にトラッククレーンによる旋回作業を要し、吊荷を道路幅員の外側に大きくはみ出すことによる周辺に対する安全性や、アウトリガの反力による主桁への負荷も課題となる。

3.2 SDR システムの概要

本システムは、床版取替にかかわる4つの作業、①既設床版の縁切り・撤去、②主桁ケレン、③高さ調整工、④新設床版の搬入・架設を、それぞれ専門の作業班が前進しながら並行して作業する、いわば「移動式工場」を目指した施工システムである（図-2）。①から④までの作業を順次に繰り返して施工する標準的な工法に対し、各作業班による並行作業が可能となり、床版取替工程の短縮を図れ、高速施工を実現した。

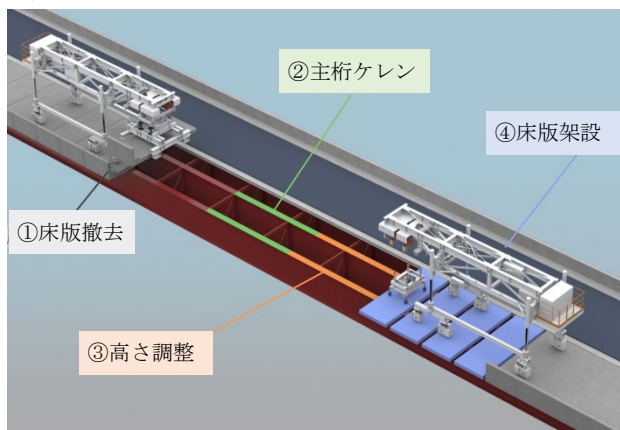


図-2 SDR システム概要図

3.3 施工機械の構成・概要

SDR システムでは、①床版撤去機、②床版架設機、③床版運搬台車、④床版移載用リフトの4台の機械を使用する（図-3）。

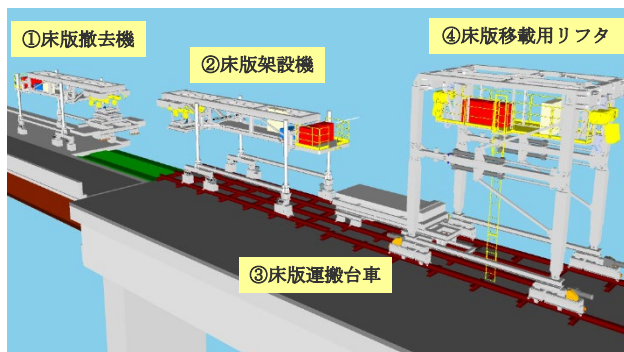


図-3 SDR システム機械構成

床版撤去機・架設機、床版移載用リフトの3台は特殊型橋形クレーンに分類される。床版の搬入・搬出車両や床版運搬台車が内側を通過できる門型構造のため、床版の旋回を伴う揚重作業が不要となる。これにより、最小規制範囲での施工が可能となり、一車線規制による幅員方向分割施工においても、近接する交通や周辺施設に対する安全性が確保できる。以下に、各機械の詳細を示す。

(1) 床版撤去機

床版撤去機（写真-1）の総重量は22～25tであり、複数の車輪によって荷重を分散させるため輪荷重は10t以下となる。従って、主桁へ作用する

荷重はクレーンを使用する場合に比べて大幅に低減され、主桁の補強を不要とする、もしくは大幅に減らすことができる。

床版撤去機（写真-1）は、橋桁から引き剥がした既設床版を吊り上げ、搬出車両に積み込むためのクレーンである。ウレタン巻き車輪により地面を直接走行することができ、操舵機能も有している。

また、専用吊具は旋回機能を有し、吊り上げた床版を基準位置から左右に各90度回転できることが特徴である。



写真-1 床版撤去機

既設床版を橋桁から引き剥がす作業には、油圧ジャッキを搭載した「引き剥がし装置」を用い、引き剥がし装置ごと既設床版を吊り上げる。油圧ジャッキ用の油圧ユニットは、床版撤去機に搭載する。4台の油圧ジャッキ（写真-2）は単独運転や同調運転が可能で、専用アプリを使用してタブレットから操作するシステムである。

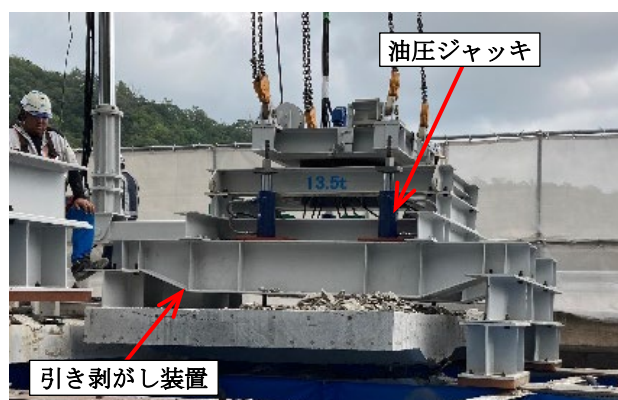


写真-2 床版撤去状況

(2) 床版架設機

床版架設機（写真-3）は、新たに架設する床版を床版運搬台車から吊り上げ、架設位置に設置するためのクレーンである。床版撤去機と同様にウレタン巻き車輪を採用している。また、機械の総重量及び輪荷重は床版撤去機と同等であり、設置した床版間の間詰部分を乗り越えるために、H形鋼を走行レールとして使用している（写真-4）。走行時

の安全設備として、逸走防止装置やガイドローラ、浮き上がり防止機能なども装備している。

また、自動開閉フックの導入により、新設床版の玉掛け、玉外し作業時に技能労働者が床版上に昇降する必要がなくなり、生産性と安全性の向上を図った。

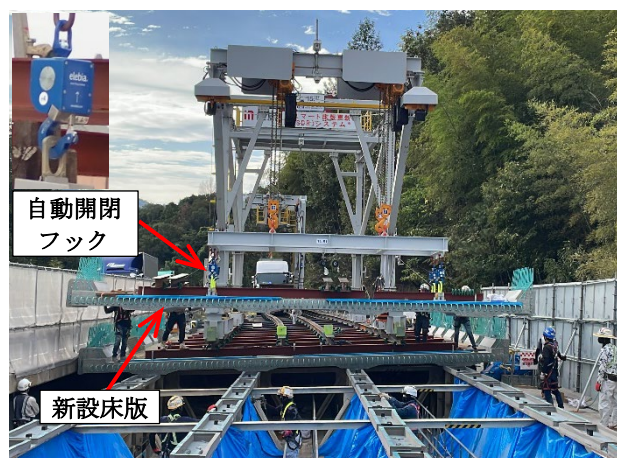


写真-3 床版架設機



写真-4 走行レール敷設状況

(3) 床版運搬台車

床版運搬台車（写真-5）は、床版移載用リフトと床版架設機の間を往復し、新設床版を床版架設機に供給するための機械で、ターンテーブルで床版を左右に各 90 度回転する。床版撤去機及び床版架設機と同様にウレタン巻き車輪を採用しており、走行レールにはH形鋼を使用している。

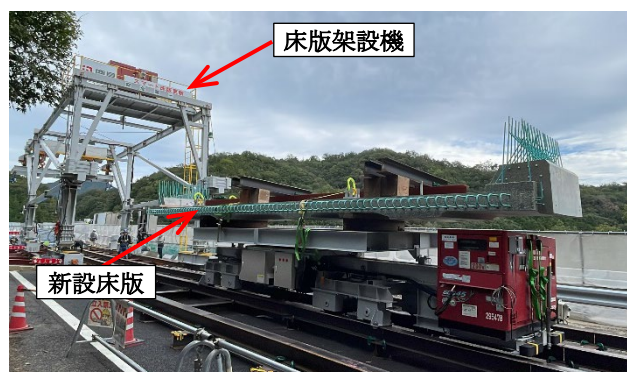


写真-5 床版運搬台車

(4) 床版移載用リフト

床版移載用リフト（写真-6、7）は、新設床版を搬入した車両から床版運搬台車へ積み替えるためのクレーンである。また、機械幅（スパン）の変更を可能とし、全断面取替工事と幅員方向分割取替工事の両方に対応可能としている。



写真-6 床版移載用リフト



写真-7 新設床版積み替え状況

4. 幅員方向分割取替工事への対応

4.1 工事の特徴・施工条件

幅員方向分割取替では、一車線規制の限られたスペースで施工を行う（図-4）。また、隣接車線は一般車が高速で通行しており、大型クレーンを使用して機械を組み立てることができない。そのため、コンパクトかつクレーンを使用せずに組立可能な機械が必要となる。



図-4 幅員方向分割取替工事の施工条件

そこで、クレーンを必要とせずに安全かつ高速で組立可能な「車載運搬型」を採用した。

車載運搬型機械は、機械を輸送した車両上で組立解体可能であり、走行フレームと上部本体フレームの2つのフレームで構成されている（図-5）。走行フレームは10tトラック、上部本体フレームは20tトレーラーの2台で搬入可能なため、規制内へ入退場する車両台数を最低限に抑えている。

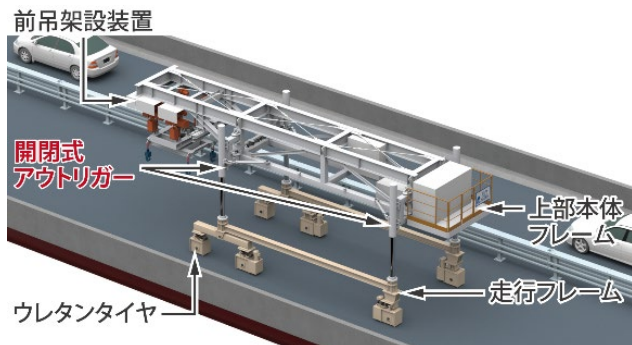


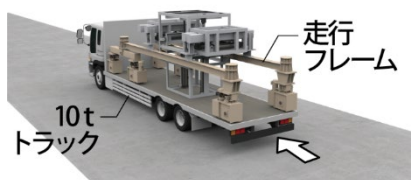
図-5 車載運搬型機械の構造

各フレームの組立方法を以下に示す。

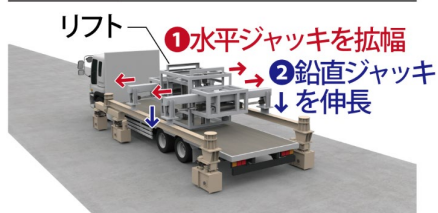
【走行フレーム】

走行フレームの組立は、トラックに搭載した専用リフトの水平ジャッキでスパンを拡幅し、鉛直ジャッキで設置位置に降下させる（図-6、写真-8）。

STEP① 走行フレーム搬入



STEP② 走行フレーム設置



STEP③ トラック退場

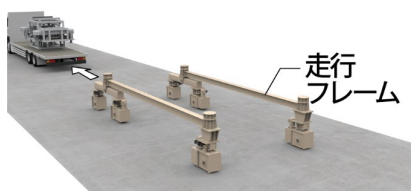


図-6 走行フレーム組立ステップ

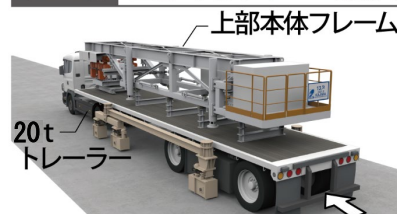


写真-8 走行フレーム組立状況

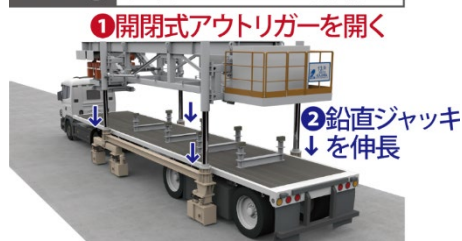
【上部本体フレーム】

上部本体フレームの組立は、開閉式アウトリガーを開き、走行フレームの位置に合わせ、鉛直ジャッキを伸ばして接続する。その後、鉛直ジャッキをさらに伸ばして組立完了となる（図-7、写真-9）。

STEP④ 上部本体フレーム搬入



STEP⑤ 走行フレームに搭載



STEP⑥ 組立完了、トレーラー退場



図-7 上部本体フレーム組立ステップ



写真-9 上部本体フレーム組立状況

上部本体フレームに開閉式アウトリガを採用することで、1車線規制と狭隘なスペースでもクレーンを要さない組立解体を可能にした（図-8）。

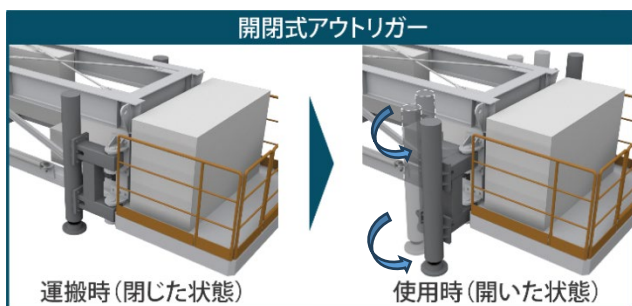


図-8 車載運搬型機械の特徴

車載運搬型機械は、幅員方向分割取替に使用するすべての機械（①床版撤去機、②床版架設機、③床版移載用リフト）に採用している。

5. SDR システムのラインナップ

SDR システムには、主に大規模橋梁を対象とした「フル SDR」と中小規模橋梁を対象とした「シングル SDR」の2つのタイプがある。

フル SDR とは、「床版架設機」と「床版撤去機」の2台の機械を使用して、床版撤去、主桁清掃、高さ調整、床版架設を並行作業で行い、一方向に床版取替を進める工法である（図-9）。

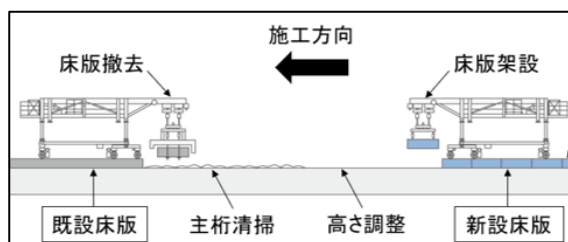


図-9 フル SDR の概要

それに対してシングル SDR は、「床版架設・撤去機」の1台の機械を使用して、床版撤去と床版架設作業を行い、一方向に床版取替を進める工法である（図-10）。

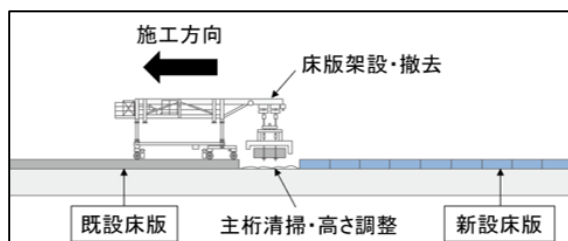


図-10 シングル SDR の概要

2つのタイプの SDR システムを、工事のニーズに応じて使い分け、より効率的な道路橋更新工事を行うことで、工事に伴うソーシャルロスの最小化を実現する。

6. 施工実績

6.1 適用工事

これまで SDR システムは、関越自動車道 阿能川橋上り線（写真-10）、広島自動車道 奥畑川橋上り線（写真-11）、広島自動車道 伴高架橋 上り線（写真-12）の3橋に適用した。



写真-10 阿能川橋（上り線）



写真-11 奥畑川橋（上り線）



写真-12 伴高架橋（上り線）

6.2 全断面取替の実績

阿能川橋の三期工事において、標準的な工法で39日間（1日あたり3枚）かかるところ、SDR システムを適用した結果、13日間（1日あたり平均9枚、最大では18枚）となり、床版取替にかかる期間を約67%短縮した（写真-13）。



写真-13 阿能川橋施工状況

6.3 幅員方向分割取替の実績

(1) フル SDR

伴高架橋の一期工事において、標準的な工法で 21 日間（1 日あたり 3 枚）かかるところ、SDR システムを適用した結果、6 日間（1 日あたり平均 10 枚、最大では 20 枚）となり、床板取替にかかる期間を約 70%短縮した（写真-14）。

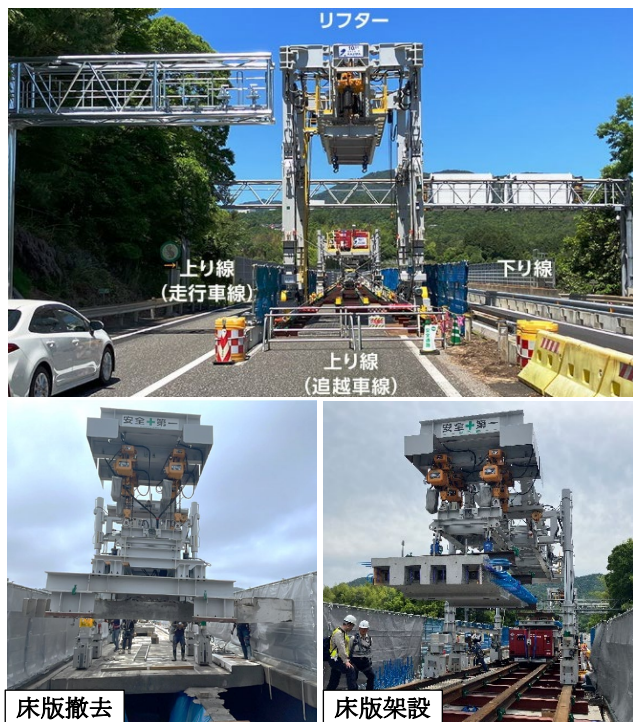


写真-14 伴高架橋（フル SDR）施工状況

(2) シングル SDR

伴高架橋の二期工事において、標準的な工法で 21 日間（1 日あたり 3 枚）かかるところ、SDR システムを適用した結果、11 日間（1 日あたり平均 6 枚、最大では 7 枚）となり、床板取替にかかる期間を約 46%短縮した（写真-15）。

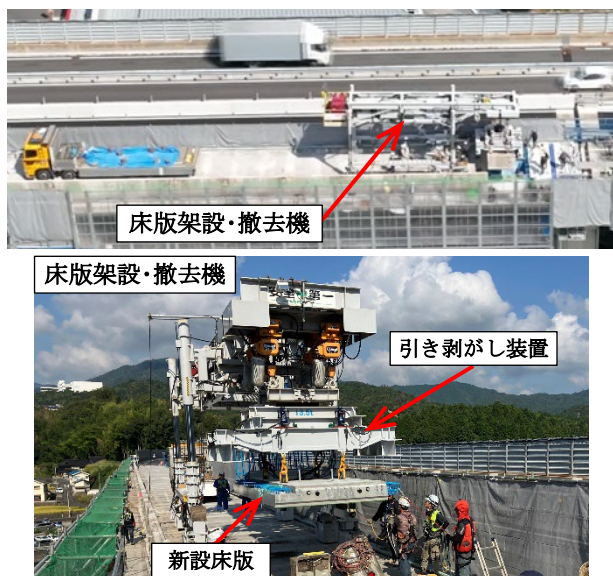


写真-15 伴高架橋（シングル SDR）施工状況

床版架設・撤去機は、床版撤去に使用する引き剥がし装置を常時取り付け付けた状態で、新設床版の揚重を可能とした。床版撤去・架設時の玉掛け回数の減少により、サイクルタイムの短縮を図り、高速施工を実現した。各施工実績を表-2 にまとめる。

表-2 SDR システム施工実績

項 目	標準工法	全断面	幅員方向分割	
		フル SDR	フル SDR	シングル SDR
日施工量	3枚/日	9枚/日	10枚/日	6枚/日
短縮効果	—	67%	70%	46%

6.4 SDR システムのコストについて

床版取替（床版撤去～床版架設）にかかるコストについて、標準工法との比較を行った。床版サイズは 2 車線断面を想定し、幅 11m、長さ 2m、床版面積は全断面 22m²/枚、幅員方向分割 11m²/枚（全断面の半分）とする。日あたり施工量は、標準工法 3 枚/日、SDR システムは施工実績とし、1 日の施工面積あたり単価で工事費の比較を行った結果、SDR システムでは、機械費は若干増加するが労務費を大幅に削減できるため、床版取替にかかる工事費を 2～3 割低減することが可能である。

7. おわりに

本論文では、SDR システムの概要を示し、一車線規制の限られたスペースでの床版取替工事に必要な施工機械を紹介した。

また、本システムを適用した工事では、本システムの特徴である、①高速施工の実現、②近隣への安全施工、③既設橋梁への負荷の低減について、その有用性を示し、令和 6 年度土木学会 技術開発賞を受賞した。

今後は、特殊規制条件（毎週末 2 車線解放）や特殊橋梁（3 車線の床版取替）、機械台数を減らした施工（機械 1 台による床版撤去・架設）など、施工条件の異なる工事への SDR システムの展開に向けて、新たな機械の開発、現行機械の改良などを進め、ソーシャルロスを最小限にとどめる道路橋床版更新工事の適用範囲拡大に寄与していきたい。

20. トレンチャー掘削による掘削断面積と施工速度の関係

(国研)土木研究所寒地土木研究所 ○ 永長 哲也

1. はじめに

道路の無電柱化は、防災性の向上、交通安全の確保、景観の改善などを目的として、全国的に推進されている。しかし、その普及には施工コストの低減が依然として重要な課題となっている。特に電力・通信の需要密度が低く、延長の長い区間が多い北海道の郊外部において、機械施工による効率化と低コスト化が強く求められてきた。

寒地土木研究所ではトレンチャーを用いた試験施工¹⁾²⁾を実施し、効率的な施工方法の検証を行っており、国のマニュアル等³⁾⁴⁾にも反映されている。さらに近年では、直轄国道⁵⁾や高速道路⁶⁾、さらには電力・通信事業者⁷⁾による実施工への導入も進みつつある。

本研究では、これらの試験施工および実施工から得られたデータを基に、掘削断面積とトレンチャー施工速度の関係を分析した。その結果、日施工延長を定量的に算定できるようになり、電線類地中化工事における工期算定や施工計画策定に資する基礎的知見を得たので報告する。

2. 使用機械の概要

トレンチャーとは一定の幅と深さを連続的かつ高速で掘削可能な機械の総称である(写真-1、表-1)。施工に用いた機械は、掘削刃の取付位置を変更することで、最小 200 mm～最大 610 mmまでの掘削幅に対応可能である(写真-2)。また、オプション仕様として、Wカッティング⁵⁾にも対応することで、最大掘削幅 1000 mmまで施工可能である。

掘削深さは標準仕様で最大 1000 mmまで対応している。また、オプション仕様として浅層掘削用の 700 mmおよび深層掘削用の 1200 mmを選択可能であり、施工条件に応じた最適な掘削深さの設定が可能である。

3. 試験施工および実施工の概要

寒地土木研究所では、トレンチャーの施工性能を把握するため、試験施工および実施工においてデータを収集し、整理・解析した。以下その概要について述べる。



写真-1 トレンチャー試験施工状況



写真-2 掘削刃（幅 610 mm）

表-1 機械諸元

機械名	トレンチャー
機関出力(本体用)	55.2kW (74PS) 軽油
機関出力(コンベヤ用)	19.8kW (26.5PS) ガソリン
掘削機構	チェーン式
掘削刃	カップ型/超硬ビット型
全長	10600mm
全幅	2520mm
全高	2470mm
車両総質量	7400kg
最大掘削深	1000mm (標準) 700mm/1200mm (OP)
最大掘削幅	200～610mm (標準) 610+390=1000mm (OP)
掘削機オフセット量	390mm
その他	排出コンベヤ付き



図-1 施工箇所（上段：試験施工，高速道路，直轄国道）
（下段：県道（沖縄県八重山郡竹富町））

3.1 試験施工の概要

試験施工は、令和3年10月、令和4年11月、令和6年6月、寒地土木研究所石狩吹雪実験場構内（北海道石狩市）において実施した（図-1）。

試験にあたっては、実施工を想定した掘削断面を再現するため、管路条数が数本収められる内空や道路構造を確保し、現場条件を踏まえた7パターンの断面構成を設定した。試験条件を以下に示す。

- 掘削幅：150～610 mm
- 掘削深さ：500～1200 mm
- 掘削条件：舗装版を撤去後、トレンチャーによる路盤及び路床の一括掘削（図-2）

3.2 実施工の概要

(1) 電線共同溝工の概要

電線共同溝工事での施工は、令和3年9月、北海道七飯町で、北海道開発局函館開発建設部が発注する電線共同溝工事の施工延長1.6 km区間の内、上下線130mでトレンチャー施工を行った（図-1）。なお、管路材は角型多条電線管（φ130）4条である（図-3）。

施工は、幅670 mm厚さ80 mmの舗装を撤去後、土

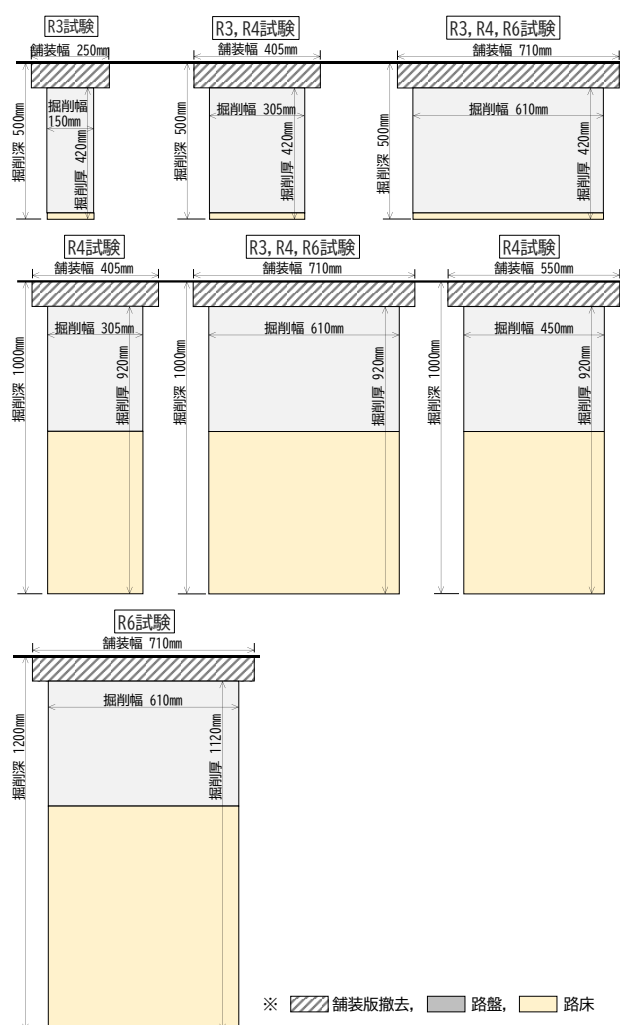


図-2 試験施工掘削断面一覧

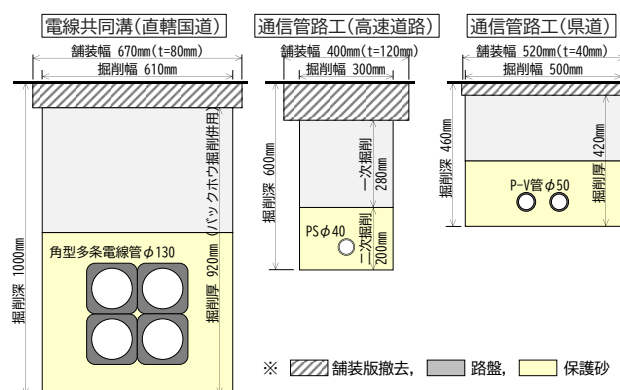


図-3 実施工掘削断面一覧

砂掘削を行い、掘削幅610 mm、掘削深さ1000 mmとし、トレンチャー施工に適したコンパクトな断面とした。掘削方法は路盤及び路床を一括で掘削し捨土とした。

(2) 通信管路工の概要

通信管路工での施工は、令和5年4月～10月に、北海道白老町から苫小牧市の高速道路で、東日本

高速道路株式会社北海道支社が発注する床版取替工事の付帯工事（通信管路工）として行われた。総延長 10 km の区間で日々車線規制（4 月）や終日対面通行規制（6 月以降）の条件で施工を行った（図-1）。なお、管路材はねじ込み式塗覆装鋼管（PS40）1 条である（図-3）。

幅 400 mm、厚さ 120 mm の舗装を撤去し、土砂掘削は掘削幅 300 mm、掘削深さ 600 mm とした。また、掘削方法は上部の上層路盤、下層路盤を路盤材として再利用するため、一次掘削（すき取り 280 mm）を行い、下部（路床）を再度、二次掘削（200 mm）し捨土とした。

(3) 通信管路工（県道）の概要

通信管路工での施工は、令和 3 年 3 月～12 月に、通信事業者による単独地中化工事として沖縄県八重山郡竹富町の県道で行われた。総延長 16 km の区間の内 7.2 km で行った（図-1）。なお、管路材は P-V 管（φ50）2 条である（図-3）。

幅 520 mm、厚さ 40 mm の舗装を撤去し、土砂掘削は掘削幅 500 mm、掘削深さ 460 mm とした。

4. 施工速度の算定と解析

試験施工および実施工で得られたデータを整理・解析し、掘削断面積と施工速度の関係を把握した。その結果を図-4 に示す。施工速度として掘削のみの場合と掘削に加えてダンプトラックの入替時間を考慮したものを示している。以下に施工速度とダンプトラック入替時間の算定方法について述べる。

掘削断面積は 0.033～0.683m² の範囲であり、施工条件や土質条件の違いにより一定のばらつきがみられたが、解析の結果、掘削断面積が大きくなるに伴い、施工速度が低下する傾向が確認された。

施工時に計測した項目は、施工延長、積込時間、ダンプトラックの入替時間、ならびに不具合発生時の稼働停止時間である。また、掘削開始から掘削終了まで連続したデータを 1 データとして整理した。ここで掘削終了とは、ダンプトラックが満載となった場合や、掘削中に埋設物等の影響で作業が中断した場合を指す。試験施工および実施工で得られた施工延長および施工速度を、掘削断面積ごとに集約したものを示す（表-2）。

施工速度は、各データの施工延長および積込みに要した時間を基に算定し、試験箇所・断面積ごと

表-2 試験データ一覧

No.	年度	箇所	掘削幅	掘削厚	掘削断面積	計測延長	データ数	断面積毎	
								計測延長	施工速度
								m	m/h
1	R5	高速 4月	300	110	0.033	24.0	1	24.0	108.0
2	R5	高速 4月	300	200	0.060	634.0	12	858.9	144.0
3	R5	高速 6月	300	200	0.060	224.9	4		
4	R3	試験	150	420	0.063	9.4	1	9.4	103.0
5	R5	高速 4月	300	280	0.084	704.8	19	1016.8	140.0
6	R5	高速 6月	300	280	0.084	312.0	5		
7	R6	試験	610	190	0.116	19.3	3	19.3	140.0
8	R5	高速 4月	300	400	0.120	4.2	1	4.2	116.0
9	R3	試験	305	420	0.128	20.0	1	20.0	109.0
10	R5	高速 4月	300	480	0.144	382.4	12	551.4	104.0
11	R5	高速 6月	300	480	0.144	169.0	4		
12	R3	県道 1期	500	420	0.210	72.6	7	195.6	119.0
13	R3	県道 2期	500	420	0.210	123.0	10		
14	R3	試験	610	420	0.256	40.7	6	121.0	116.0
15	R4	試験	610	420	0.256	20.0	3		
16	R6	試験	610	420	0.256	60.3	12		
17	R3	国道	610	620	0.378	21.8	5	21.8	96.0
18	R4	試験	450	920	0.414	21.5	6	21.5	86.0
19	R3	試験	610	920	0.561	40.8	15	118.1	61.0
20	R3	国道	610	920	0.561	20.3	12		
21	R4	試験	610	920	0.561	19.8	6		
22	R6	試験	610	920	0.561	37.2	13		
23	R6	試験	610	1120	0.683	21.0	5	21.0	57.0
		合計				3003.0	163		

※ 掘削断面積、施工箇所（試験施工・実施工）毎に並び替え

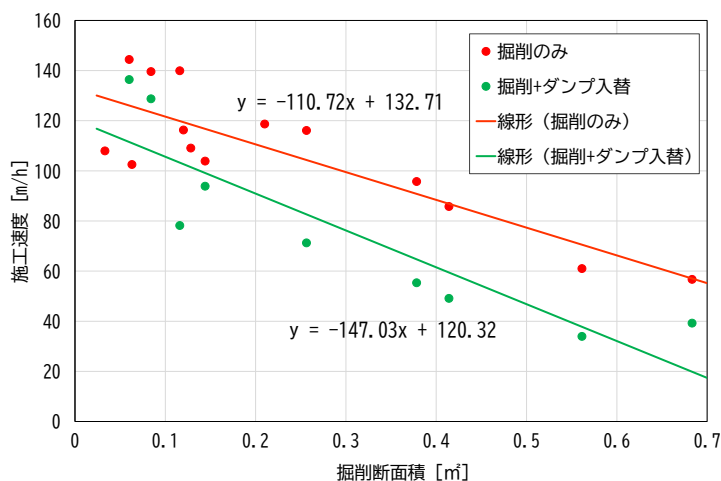


図-4 施工速度と断面積

平均値を算出した。なお、計測延長約 3400m のデータのうち、計測ミスや機械トラブルによる異常値を除外し、最終的に 163 データ（計測延長約 3003 m）を解析対象とした。また、掘削速度の算定にあたっては、施工延長の大小による影響を考慮する必要があるため、今回、個別の計測値を単純平均するのではなく、延長を重みとした加重平均を採用することで、長延長の施工における安定的な傾向

を反映させた。これにより、施工速度の評価が局所的なデータに左右されることを防ぎ、より実態に即した結果を得ることができた。

また、ダンプトラックの入替時間は、施工条件に大きく依存する項目であり、特に、掘削箇所から土捨て場までの距離や運用台数の違いによって変動が生じる。そのため、条件のばらつきを排除する観点から、「トレンチャー施工中に1台が待機している状況」での計測値を分析対象とした。さらに、4tおよび10tダンプトラックの双方を使用したため、全計測値を平均化して代表的な入替時間として整理した。

例えば、掘削断面積が約 0.6m^2 （幅610mm、掘削深さ1000mm）の場合、掘削速度（掘削土砂の積込を含む）は約66m/hであるが、ダンプトラックの入替時間を考慮すると、施工全体の平均速度は約32m/hに低下することが確認された。

以上のように、実施工における各種作業を含めた施工速度を把握することで、より実態に即した施工計画が可能となる。また、これらの結果を基に、施工条件に応じた掘削速度の目安が得られ、必要工期把握など施工計画立案の基礎データとして活用できる。

5. 施工の手引きの改訂

トレンチャーによる試験施工および実施工のデータの収集・解析から、前項の施工速度や施工上の知見が蓄積したことから「電線埋設用掘削機械（トレンチャー）を活用した施工の手引き」⁷⁾（図-6）の改訂を行った。本手引きは、国内における郊外部の電線類地中化を検討するための技術資料となっている。なお、施工の手引きは当研究所寒地機械技術チームのホームページに掲載している

（<https://kikai.ceri.go.jp/>）。

6. おわりに

電線類地中化のスピードアップに資するトレンチャー掘削の掘削断面積と施工速度の関係について、試験施工および実施工に基づきデータを収集・解析した。

トレンチャー掘削が、実施工においてその導入効果が確認されている一方、導入に向けた詳細な技術資料が十分に整備されていない状況にあった。そのため、施工速度の提示、施工上の留意点、一連の施工フロー、適切な掘削断面、発注・設計段階における検討事項など、得られた技術的知見を施工の手引きに反映した。本手引きはトレンチャー工法の導入促進に資する実践的技術資料として再構成しており、今後の電線類地中化の推進に寄与することが期待される。



図-6 ケーブル埋設用掘削機械（トレンチャー）を活用した施工の手引き

参考文献

- 1) 永長・中島：単独地中化に向けたトレンチャーによる狭隘断面試験，第35回日本道路会議，2023.11
- 2) 永長・中島：郊外部の無電柱化施工のためのトレンチャーによる掘削試験とその評価，令和6年度建設施工と建設機械シンポジウム，2024.11
- 3) 国土交通省道路局環境安全・防災課：無電柱化のコスト縮減の手引き，pp.84-89，令和6年3月
- 4) 北海道無電柱化推進協議会：電線共同溝技術マニュアル第5.0版，pp.89-90，令和7年3月
- 5) 永長・中島：電線埋設用掘削機械（トレンチャー）による赤松街道での現場施工について，第65回北海道開発技術研究発表会，2022.2
- 6) 永長・大部：電線類地中化におけるトレンチャーの効率的な運用方法の検証，第70回土木計画学研究発表会，2024.11
- 7) 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所寒地機械技術チーム：ケーブル埋設用掘削機械（トレンチャー）を活用した施工の手引き（第2版），2025.3

21. DX技術を活用した除雪オペレータの担い手確保の取り組み

～除雪シミュレータによる技術伝承～

国土交通省 東北地方整備局 東北技術事務所 佐藤 信之
国土交通省 東北地方整備局 東北技術事務所 ○田中 孝之

1. はじめに

除雪作業を行う除雪機械オペレータには、除雪機械と一般車両及び歩行者の安全確保や除雪した雪による危害にも注意が必要である。さらに、担当する除雪区間の道路環境に関する知識のほか、変化する路面状況への対処など作業経験に基づく高い運転技術が求められる。

一方で、様々な業界において担い手不足が叫ばれているが、除雪オペレータにおいても、不安定な作業量や不規則な就業時間という悪条件も加わって担い手不足が深刻であり、将来的な担い手確保が困難になると想定される。

本稿では、除雪作業に係る高い運転技術の確保、将来の担い手となる新規オペレータ等の円滑な育成を行うために開発した、除雪グレーダ操作シミュレータについて報告するものである。



写真-1 除雪グレーダ

2. 担い手確保対策のアプローチ

2.1 課題

道路除雪作業は、一般交通がある中での作業となり高い運転技術が求められ、緊張感を維持しながら作業することを強いられている。さらに連続降雪となれば、少ない人数での対応が求められる。このような作業環境を改善するために、新人オペレータ等の円滑な育成の課題に取り組み、解消することが、担い手確保対策にも繋がるものと考え

2.2 対象機械

除雪作業は、新雪除雪、路面整正、拡幅除雪等に分類され、各作業の実施に適した各種除雪機械が配備・運用されている。その中でも除雪グレーダ（写真-1）は、東北地方整備局における主力機械である一方、操作には多様な動きが必要なことから技術習得の難易度が高く、最も対策が求められる機種である。また、現在調達できるのは一人乗りであり、10年後には機械更新に伴い、除雪グレーダはほぼ一人乗りのみになる見込みのため、熟練オペレータが同乗しての運転技術伝承が出来ないことなどから、当該機械を対象とした（写真-2）。



従来型（二人乗り）

新型（一人乗り）

写真-2 運転室の比較

3. 除雪グレーダ操作シミュレータについて

オペレータ育成用のツールとして数多くの分野で活用されている訓練用シミュレータを開発し、操作方法の習得のほか、機械特性、作業時の挙動、安全確認等の留意点等を実作業前に把握することを目的として開発した。

3.1 開発スケジュール

令和3年度は基本設計を検討、令和4年度は基本設計を基に東北地方整備局管内の実作業工区をモデルに試作機を製作、除雪オペレータによる試用・意見徴収を伺った。令和5年度は前年度のオペレータ試用での意見を基に改良を行った。開発した除雪グレーダ操作シミュレータを写真-3に示す。



写真-3 開発した除雪グレーダ操作シミュレータ

3.2 ハードウェアの開発

操作方式は、現在、調達可能な除雪グレーダ2メーカーに対応し、コックピットの構成パーツをモジュール化することで、パーツの入替えて操作方式を切替え可能とした（写真-4）。

モニターの構成・配置については運転席の視野等について調査し（写真-5）、重機メーカーへのヒアリングや配置位置の計算を行い、運転席の視野を再現した（図-1）。



ジョイスティックレバー操作方式



ハンドルおよびレバー操作方式
写真-4 各種操作方式



写真-5 運転席視野等の調査状況

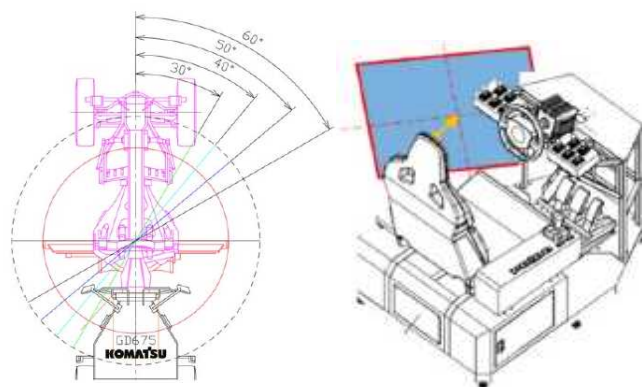
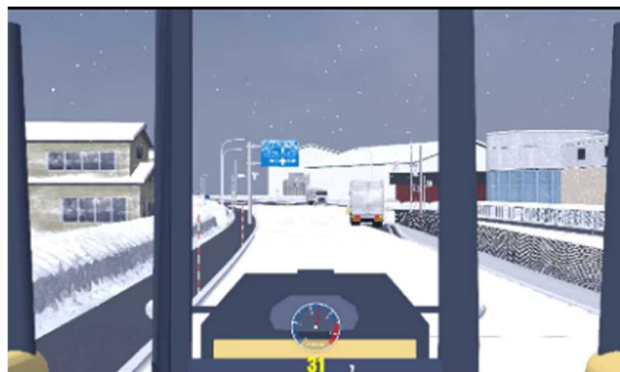


図-1 モニタ構成・配置等の検討

3.3 運転環境の再現

道路環境の再現にはMMSデータ（モバイル・マッピング・システム）で取得した点群データを基に実作業工区のモデルを作成した。

様々な現場条件での訓練を可能とするため、交差点や道路上の支障物、他車線区間等を再現した「市街地」、急な道路勾配や見通しの悪い道路線形等を再現した「山間地」を設定した。他にも、「天候・降雪の多少」、「昼・夜間」「一般車両の有無」等のモードを設定した（図-2）。



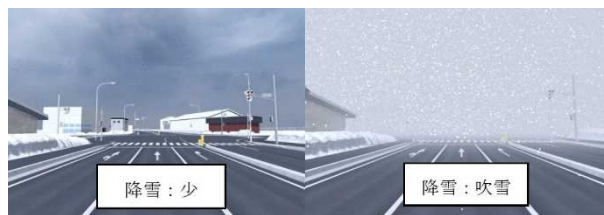
市街地（片側二車線）



山間地（片側一車線）



ハンドホール通過手前



降雪条件



夜間



一般車両（追い越し）

図-2 様々な現場条件の設定

また、オペレータへのヒアリング等を通じて、作業時に注意が必要な橋梁ジョイント等の支障箇所、勾配に応じたブレード接地圧操作等、作業上必要な事項を学習できるようにした（図-3）。



橋梁ジョイント通過手前

図-3 作業上の必要な注意事項例

3.3 利用者ニーズへのマッチング

オペレータ経験 5 年未満を対象として習熟度に合わせてガイダンス付きで基本的な操作方法を学習できる「練習モード（図-4）」，実践形式で各種運転状況下で操作訓練できる「運転訓練モード」の 2 段階のシナリオを設定した。



図-4 シナリオ例（練習モード）

シミュレータとしての機能を活かした、車両・歩行者の飛び出しや対向車との接触事故回避などヒヤリハットの項目を設定した（図-5）。



図-5 ヒヤリハット事例（対応車との接触事故回避）

また、運転時の左右の寄り具合や、ブレード角度の空間的な理解を補助するため、ワイプ画面を追加して俯瞰的に確認できるようにした（図-6）。

操作訓練終了後に熟練オペレータによる指導ができるように操作シミュレータで運転した内容を記録・動画再生を可能とする走行プレビューモードも設定した。



図-6 俯瞰的視点（ワイプ画面）

4. 操作シミュレータの活用

「除雪グレーダ操作シミュレータ」は、通常、令和5年3月に開所した「東北インフラ DX 人材育成センター」に設置しており、一般の来場者も含め幅広く利用している。

また、除雪オペレータの育成のため、令和6年度より、本操作シミュレータを東北地方整備局の事務所や除雪ステーションに搬入し、管内の除雪作業を担当する受注業者を対象に訓練を実施している。

令和6年度は青森県内の大釈迦除雪ステーションおよび秋田県内の秋田防災ステーションで90名の操作訓練を実施し、今回初めて訓練で運用する取り組みが注目され、多数の報道関係から取材があった（写真-6）。

訓練した除雪オペレータからは、「運転操作を覚

えるために有効」、「新オペレータでは、初めから路上で運転操作するのは難しいと改めて感じた」などの感想があり、利用者アンケートでは操作シミュレータを利用した満足度が9割を超える評価となり有用性が確認できた（図-7）。



写真-6 現地運用状況（マスコミ取材）

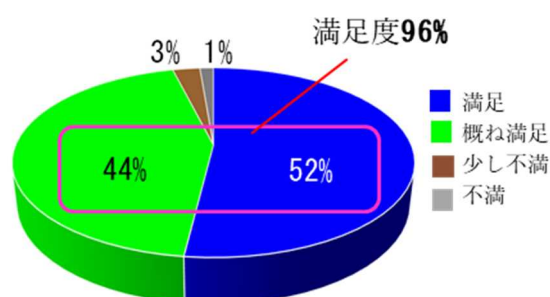


図-7 操作シミュレータ利用の満足度

5. 最後に

令和7年度は本操作シミュレータを福島県内、山形県内、岩手県内にて運用し、令和6年度運用および常設している宮城県内を除き、東北管内6県にて運用を行う予定である。

本操作シミュレータ技術を活用することにより、道路上で除雪グレーダを操作する前に、熟練オペレータの指導の下、安全に訓練できるため、新規オペレータが未経験の除雪機械を操作する機会を創出することで、煩雑な操作への不安な気持ちの軽減になり、作業の安全性向上にも寄与するため、担い手の確保に期待できる技術であると考えている。新規にオペレータとなる人材や操作の習熟度を高めたい人材を対象に、順次、オペレータの育成に努めていく。

22. マスプロダクツ型排水ポンプの現場実証と新たな研究開発について

国土交通省 大臣官房 参事官（イノベーション）グループ 施工企画室 ○ 吉崎 雄一
能登 眞澄

1. はじめに

河川ポンプ設備は高度経済成長期に整備されたものが多く、設置後 50 年以上経過する施設の急増が見込まれている。また、河川ポンプ設備は複数の機器がシステムとして一体となり機能を発揮するプラント設備であることから、老朽化が進行すると、部品・機器等の部分的な交換による機能回復が限界を迎え、システム全体の更新が必要となる。よって、今後全国で老朽化した施設が一斉に更新時期を迎え、施設の機能低下や更新費用の増大が懸念されている。

加えて、河川ポンプ設備を構成する機器は特注・受注生産品であるため、扱える技術者が限定されるとともに、故障時の部品供給や更新に時間を要するなど、維持管理性も課題となっている。

そこで国土交通省では、河川ポンプ設備の経済性、維持管理性等の向上を目的とし、個別設計・一品生産品から部品の規格化・量産品の活用へ転換を図る「マスプロダクツ型排水ポンプ」の開発に着手した。

令和 3 年度に 100kW 級の量産品エンジンとして自動車用エンジンを使用した、排水量 1m³/s のマスプロダクツ型排水ポンプ（以下、「100kW 級マスプロポンプ」という。）の実証試験を国立研究開発法人土木研究所の水中環境実験施設で実施して技術の成立性を確認した。その後、令和 4 年度から令和 5 年度末までに、秋田県大仙市、京都府福知山市、広島県三次市、高知県四万十市、福岡県みやま市及び福智町の 6 箇所に 100kW 級マスプロポンプの試験設備を設置し、将来の社会実装に向けた現場実証を行っているところである。

さらに、マスプロダクツ型排水ポンプの適用範囲拡大を目的に、200kW 級の量産品エンジンを使用した、排水量 2m³/s のマスプロダクツ型排水ポンプ（以下、「高出力型マスプロポンプ」という。）の研究開発を令和 4 年度末から進めているところである。

本稿は、100kW 級マスプロポンプと、高出力型マスプロポンプの研究開発や現場実証等について経過報告するものである。

2. 100kW 級マスプロポンプの現場実証

ここでは、令和 4 年度より進めている 100kW 級マスプロポンプの現場実証について報告する。

2.1 現場実証の目的

今後の社会実装に向け、現場に試験設備を設置し、実運用に近い環境下における排水運転等の各種試験を通じて、耐久性、操作性、維持管理性等を確認することが現場実証の目的である。

2.2 現場実証の内容

現場実証では、出水時の排水運転による操作性や耐久性の確認、点検やエンジン交換試験により点検や交換保全の容易性等の維持管理性の確認を行うものである。

2.3 試験設備の設置状況

6 箇所の試験設備の主要諸元は表-1、設置状況は表-2 のとおりである。

表-1 試験設備の主要諸元（100kW 級マスプロポンプ）

項目		秋田県大仙市	京都府福知山市	広島県三次市	高知県四万十市	福岡県みやま市	福岡県福智町
ポンプ	メーカー	電業社 機械製作所	西島製作所	クボタ	荏原製作所	日立インダストリアル プロダクツ	鶴見製作所
	仕様	φ 700mm 横軸斜流ポンプ（1m ³ /s×6m）					
エンジン	メーカー	三菱ふそう トラック・バス	三菱ふそう トラック・バス	三菱自動車	豊田自動織機	豊田自動織機	三菱自動車
	定格出力	98kW	98kW	107kW	105kW	100kW	109kW
	最大トルク	520N・m	520N・m	360N・m	450N・m	450N・m	360N・m
	定格回転数	1,900min ⁻¹	1,900min ⁻¹	3,400min ⁻¹	3,400min ⁻¹	3,400min ⁻¹	3,400min ⁻¹

表-2 試験設備の設置状況

実証箇所	秋田県大仙市	京都府福知山市	広島県三次市
設置場所	雄物川水系丸子川左岸 1.0k 付近 (大曲浜町地先)	由良川水系蓼原川左岸 25.5k 付近 (大江町河守地先)	江の川水系江の川 149.4k 付近 (秋町亀甲地先)
設置時期	令和 5 年 12 月	令和 5 年 7 月	令和 6 年 3 月
写 真			
実証箇所	高知県四万十市	福岡県みやま市	福岡県福智町
設置箇所	渡川水系中筋川左岸 8.4k 付近 (楠島地先)	矢部川水系矢部川左岸 12.5k 付近 (瀬高町本郷地先)	遠賀川水系彦山川左岸 3.6k 付近 (草場地先)
設置時期	令和 5 年 5 月	令和 5 年 12 月	令和 5 年 5 月
写 真			

2.4 現場実証の状況

(1) 操作性

出水時に試験設備を使用して排水運転を実施し、操作の難易について確認した。設置後令和 6 年度末までの間に、台風等の影響により、福知山市以外の 5 箇所の試験設備において、延べ 55 時間程度排水運転を実施した。マスプロダクツ型排水ポンプは、一つのボタンで関連機器が自動で起動する「連動運転」が可能となっており、操作員へのヒアリング結果から、操作性に問題が無いことが確認できた。

(2) 点検

月点検、年点検を実施し、点検の難易や作業性を確認した。全般的に従来技術とほぼ変わらないが、エンジンがパッケージ式のため確認しづらい箇所や、パネルの一部を取り外す必要がある等、設計における留意事項も確認することができた。なお、試験設備に大きな不具合等は確認されていない。

(3) 交換保全

試験的にエンジンを予備機と交換し、交換保全の難易や作業性について確認した。建屋や屋根がある試験設備の交換作業では、エンジンを水平移

動させる必要があった。一方、一部のエンジンにおいてユニバーサルジョイントから分割が可能な構造としたことで、時間がかかる芯出し作業が不要となり作業時間の短縮につながったことも確認できた。



写真-1 エンジン交換作業の状況（福智町）

(4) 耐久性

設置して間もないこともあり、現時点で大きな劣化や損耗等はない。

(5) 今後の予定

6 箇所の試験設備について、本年度も引き続き現場実証を行っていく予定であり、現場実証で確認

した課題や知見等を取りまとめる予定である。

3. 高出力型マスプロポンプの研究開発

続いて、令和4年度末より着手した高出力型マスプロポンプの研究開発について経過報告する。

3.1 試験設備の概要

試験設備の主要諸元を表-3に、据付断面図を図-1にそれぞれ示す。(以降、エンジンについては記号A、Bを付して表記する。)

表-3 試験設備の主要諸元（高出力型マスプロポンプ）

項目		諸元	
ポンプ	メーカー	荏原製作所	
	仕様	φ1000mm 立軸斜流ポンプ (2m³/s×6m)	
エンジン	記号	A	B
	メーカー	Y社	K社
	定格出力	200kW	275kW
	定格回転数	1,500min⁻¹	1,500min⁻¹

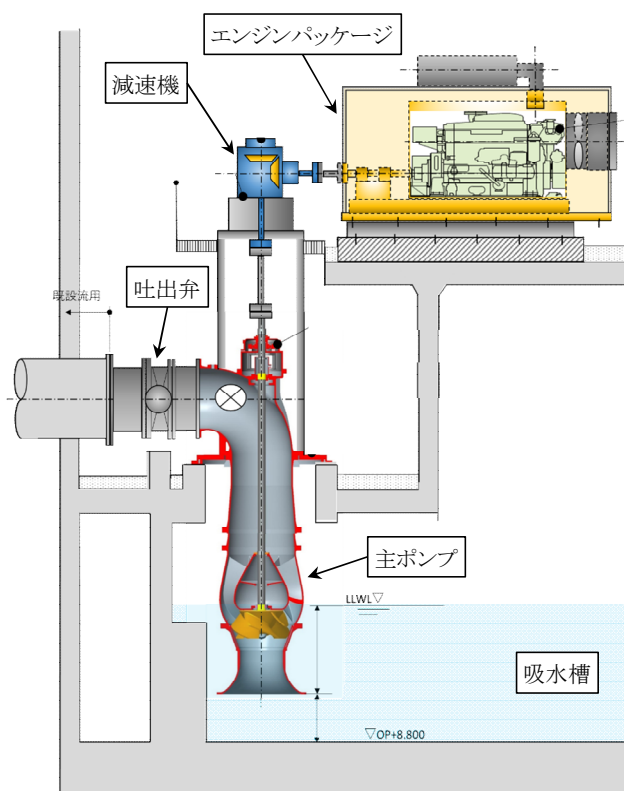


図-1 試験設備据付断面図

エンジンには量産品の発電機用ディーゼルエンジンを採用した。発電機用エンジンは一定負荷状態において一定回転数で連続運転するもので、使用条件が類似していること、自動車用エンジンでは必要だったエンジン制御装置との信号調整が不要であることから、主ポンプ駆動用としての適合性が期待できる。なお、エンジンについては交換が

容易となるよう、100kW級マスプロポンプと同様にパッケージ化し、後述の交換試験のため、予備機を含めて異なるメーカーの2台を使用している。また、エンジンと減速機を接続する中間軸継手は、着脱の容易性やミスアライメントの許容範囲の広さを考慮したカップリングを採用した。

実証現場は、過去の排水実績や設置スペースを考慮し、近畿地方整備局淀川河川事務所が管理する針ノ木排水機場とした。針ノ木排水機場は計画排水量6.0m³/sのうち、現在の必要排水量3.0m³/sの主ポンプ1台が昭和51年度に設置され、現在まで運用されている。将来の主ポンプ設置予定箇所を利用して令和7年1月までに試験設備を設置し（写真-2）、同年3月まで実証試験を実施した。



写真-2 主ポンプの据付状況

3.2 実証試験の内容

(1) 排水性能試験

針ノ木排水機場は自然流下ゲート利用循環方式による管理運転が可能であり、これを活用して始動試験、負荷変動試験、連続運転試験を実施し、排水性能の確認を行った。エンジンA、Bそれぞれの通常据付（後述）での計測結果を図-2～4に示す。

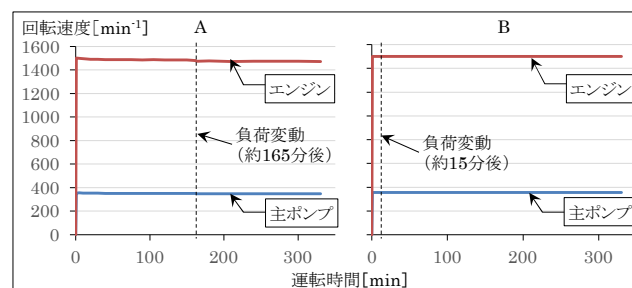


図-2 主ポンプ、エンジンの回転速度

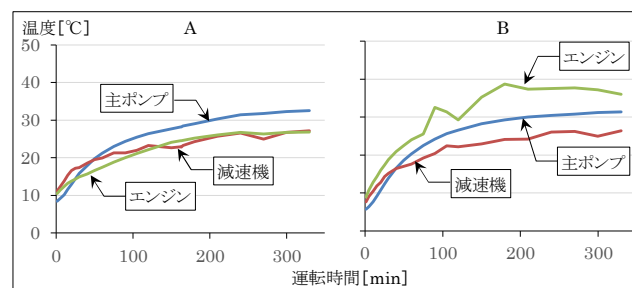


図-3 軸受温度

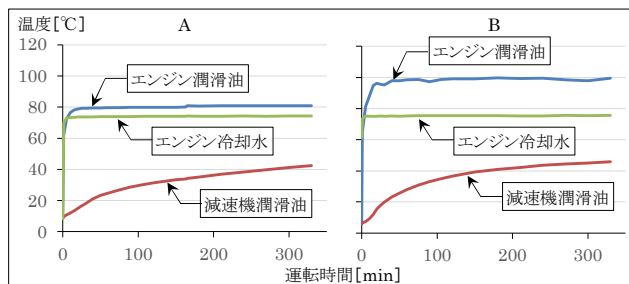


図-4 潤滑油、冷却水温度

エンジン始動後、ポンプと接続した際のエンジンストールもなく、所定の回転速度で安定して推移しており、吐出弁の開度を100から40%に絞ることによる負荷変動後も安定している。また、潤滑油、冷却水、軸受の温度も規定値内で、異常な騒音や振動も無く、約5.5時間の連続運転において排水性能に問題が無いことを確認した。

(2) エンジン交換試験

最初に設置したエンジンAからBに試験的に交換し、交換保全における作業性や互換性について確認した（写真-3）。



写真-3 エンジンBの搬入状況

また、芯出し作業の迅速化について検証するため、従来の管理基準値（機械工事施工管理基準（案））による据付（以下、「通常据付」という。）と、それより許容値を大きくした管理基準値による据付（以下、「簡易据付」という。）の2通りを試験的に実施した。通常据付と簡易据付の管理基準値を表-4に示す。

表-4 芯出しの管理基準値

区分	芯ずれ	面振れ
通常据付	0.15mm	0.1 mm
簡易据付	0.9 mm	0.47mm

エンジンの交換作業に要した時間を表-5に示す。針ノ木排水機場特有のスペースの制限から搬入・搬出に時間を要しており、特にエンジンAは筐体を分割しなければならなかったため、時間を要した（写真-4）。芯出し作業については簡易据付が通常据付の1/4程度に短縮されることを確認した。

表-5 エンジンパッケージ交換に要した時間

作業内容	作業時間	
	A	B
搬入	32 時間	20 時間
搬出	12 時間	(作業無し)
芯出し(通常据付)	32 時間	16 時間
芯出し(簡易据付)	8 時間	4 時間



写真-4 エンジンAの搬出状況

先述の通常据付と同様、簡易据付についても排水性能試験を実施し、問題が無いことを確認した。

3.3 現在の進捗と今後の予定

令和7年8月末現在、引き続き現場実を進めており、同年9月までにエンジンA、Bそれぞれ50時間程度の排水性能試験とエンジン交換試験を実施し、令和7年度内に結果をまとめる予定である。

4. おわりに

マスプロダクツ型排水ポンプは、全国の河川機械設備の「大更新時代」到来が懸念されているなかで、個別設計・一品生産品から部品の規格化・量産品の活用という発想の転換により生み出され、ポンプ業界と自動車業界の異業種連携の試みで開発が始まった。これまでの実証試験等の結果から、今後の治水対策の選択肢の一つとしての可能性が示されている。

国土交通省では、引き続きマスプロダクツ型排水ポンプの実証試験を行い、そこで得られた知見を集積し、導入のための技術指針（案）を取りまとめていく所存である。

参考文献

- 1) 国土交通省，社会資本整備審議会河川分科会河川機械設備小委員会答申 河川機械設備のあり方について，令和4年7月

23. 電動化排水機場の信頼性等を考慮した発電機構成の比較検討

(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 ○ 澤口 重夫
永長 哲也
岸 寛人

1. はじめに

河川用排水機場ポンプ設備は、内水被害から国民の生命と財産を守る重要な社会基盤設備である。本設備は、昨今の老朽化の進行による故障の懸念や線状降水帯の発生など降雨の激化による運転機会の増加など、取り巻く環境が厳しい状況でも出水時には確実な運転が求められる。このようなことから施設管理者、点検技術者等は設備の維持管理に多くの労力と時間を要しており、その負担は大きい。一方、設備の管理を担う技術者の担い手不足への対応が喫緊の課題となっており、本設備の維持管理の省力化、効率化による生産性向上が求められている。

これらの課題に対する技術的な対応としては、排水機場ポンプ設備の主原動機を現在の主流であるディーゼル機関から比較的簡素な構造の電動機へ転換を行う電動化を図ることで、点検の省力化と故障の低減が期待できる。なお、過年度の検討結果から主原動機を電動化するうえで必要となる電源設備は、ディーゼル発電機が最も実用的であることがわかっている。

そこで、小規模排水機場（5 m³/s 以下）を例としてディーゼル発電機構成（発電容量と設置台数の組み合わせ）について、信頼性、経済性を考慮して検討したので報告する。

2. 排水機場ポンプ設備構造と維持管理の概要

排水機場ポンプ設備の主要機器は、ポンプを駆動するための主原動機（ディーゼル機関、ガスタービン機関等）、動力を適正なトルクと回転数でポン

プに伝達する減速機（平歯車又は遊星歯車減速機等）、羽根構造で回転力により排水を行う主ポンプ（横軸斜流又は立軸斜流等）で構成され、その他機器は、原動機の運転に必要な系統機器やポンプの運転停止を指令する操作制御設備、停電時でも運転に必要な設備内電源を確保できる自家発電設備などで構成される（図-1）。ポンプ特性は現場条件等により様々である。また、ポンプは通常、複数台設置されている。緊急時の確実な運転に万全を期するため、施設管理者は常日頃からポンプ設備の運転状態及び機器の調子を確認する必要があるが、その一環として管理運転による月点検や年点検を操作員や点検技術者に委託している。なお、故障の際には、速やかな復旧対応が求められる。

3. 主原動機の電動化

3.1 排水機場ポンプ設備の装置別故障割合

昭和 57 年から令和 2 年における国土交通省の排水機場ポンプ設備の装置別故障割合は図-2¹⁾のとおりであり、主原動機の故障割合が最も高いことから、この装置に着目した改善検討が維持管理性の向上に大いに貢献できると考えられる。

また、国土交通省における主原動機の機関別設置割合は図-3 に示すとおりであり、ディーゼル機

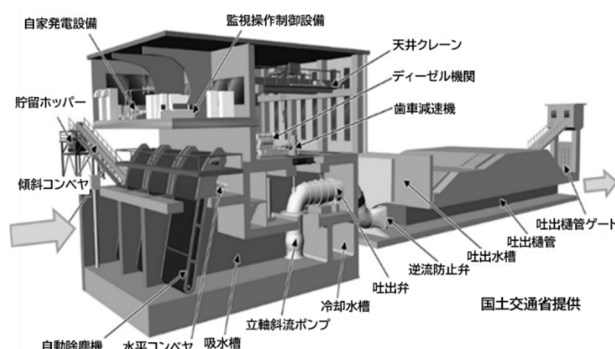


図-1 排水機場ポンプ設備の機器構成事例

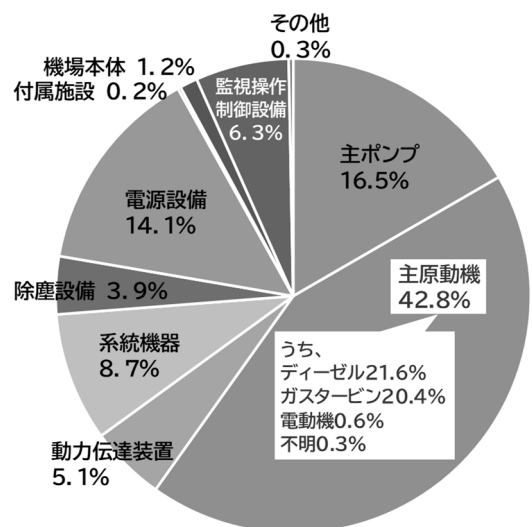


図-2 排水機場ポンプ設備の装置別故障割合（S57～R2）

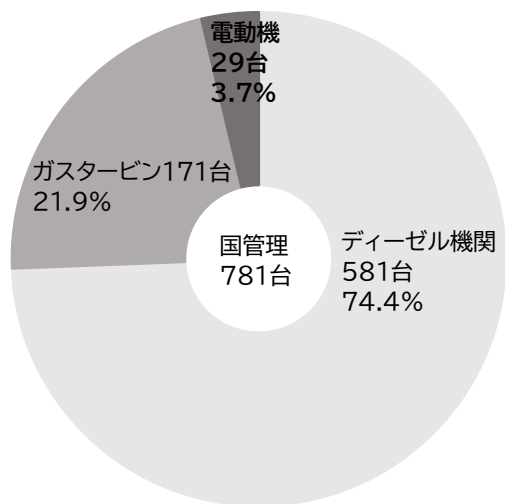


図-3 主原動機の機関別設置割合（国土交通省）

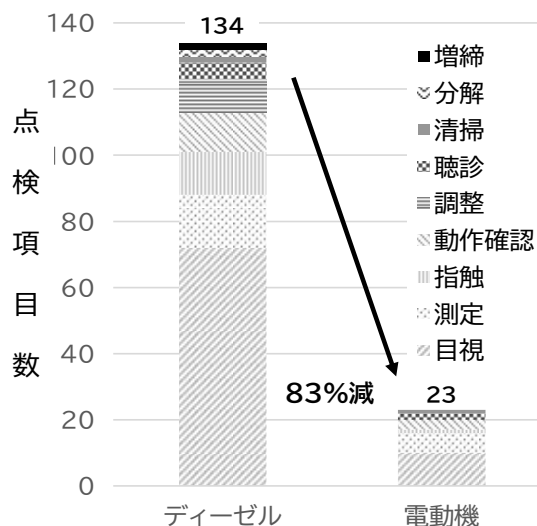


図-5 主原動機の年点検項目数の比較

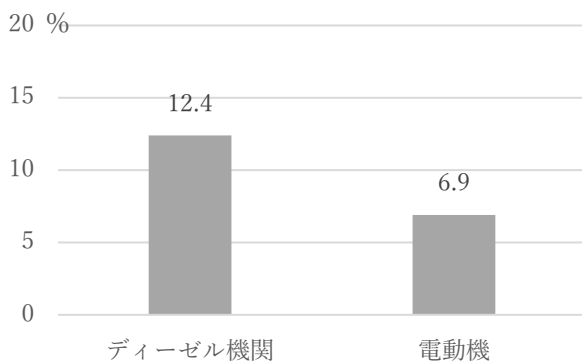


図-4 主原動機故障割合の比較（件数／総台数）

関が 74.4%と大半を占めるほか、ガスタービンが 21.9%、電動機はわずか 3.7%となっている。

3.2 ディーゼル機関と電動機の故障割合の比較

国土交通省が管理する排水機場の主原動機の機関設置割合を図-3 に示す。主原動機の設置台数当たりに換算すると図-4 に示すようにディーゼル機関が 12.4%、電動機は 6.9%となり、電動機はディーゼル機関に比較し、半分程度の故障割合となっている。

3.3 ディーゼル機関と電動機の年点検項目の比較

ディーゼル機関と電動機の点検項目数を比較するため、河川ポンプ設備点検・整備標準要領（案）（H28.3 版）²⁾に基づき集計した結果を図-5 に示す。図-5 から、電動機はディーゼル機関に比較し、点検項目数が 83%少ないことがわかる。その理由として電動機はディーゼル機関に比較し、構造が簡素なのに対し、ディーゼル機関は構造が複雑かつ始動、冷却、潤滑など補機類の装備が多いことによる。また、主原動機の年点検における標準工数に占める割合は国土交通省機械設備工事積算基準（令和 5 年度版）³⁾によると、ディーゼル機関では全体工数の約 3 割なのに対し、電動機では約 1 割に収まる。

表-1 電動化機場想定モデルの機器構成（現行 想定総排水量 5 m³/s）

種別	主機関	出力	台数
主原動機	ディーゼル機関	300kW	2 台
自家発電機	ディーゼル機関	50kVA	2 台（予備含む）

このことから主原動機をディーゼル機関から電動機に転換できれば維持管理性の向上への貢献が期待できる。

4. ディーゼル発電機の構成と信頼性の評価

排水機場ポンプ設備の電動化をするに伴い必要となる自家発電設備の設置台数と電気容量の構成について信頼性を考慮して検討した。

4.1 電動化で必要となる電気の総容量

検討の対象とする電動化機場想定規模は、施設数の多い小規模排水機場（排水量 5 m³/s 以下）とし、その構成はディーゼル機関出力 300kW（2 台）、自家発電機 50kVA（1 台）とした。（表-1）なお、この排水機場を電動化した場合、電動機 2 台分（300kW）の運転に必要な電気容量に制御装置などの排水機場内で使用する電気容量を加えると総容量として 725kVA 必要であると試算する。

4.2 ディーゼル発電機の構成と信頼性の評価

排水機場ポンプ設備の構成機器の故障率から運転できるポンプ台数の確率を求め、信頼性を評価した。故障率は、設備を構成する主要機器の故障件数を推定総運転時間で除した値を%指標に換算した。故障率の試算例を図-6 に示す。なお、本故障率は国土交通省の直轄排水機場のデータに基づき算出した。

4.2.1 予備機ありの場合

検討した発電機の構成は以下のとおりである。

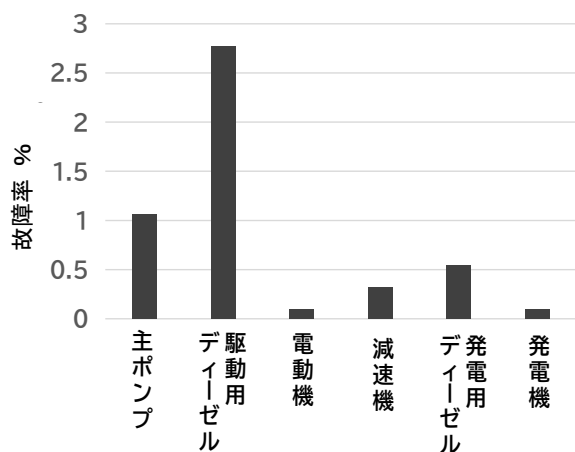


図-6 主要機器故障率（運転時間当たり）

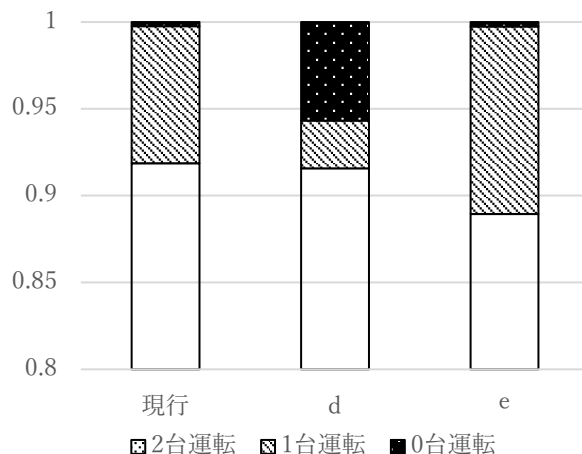


図-8 発電機台数とポンプ運転可能台数の試算（予備機なし）

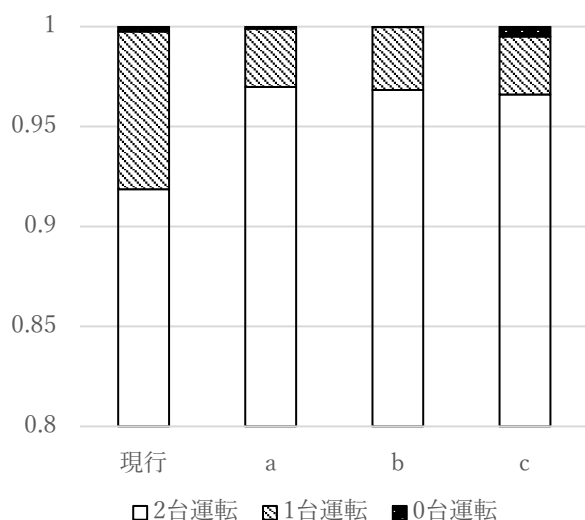


図-7 発電機台数ごとのポンプ運転可能台数の試算（予備機あり）

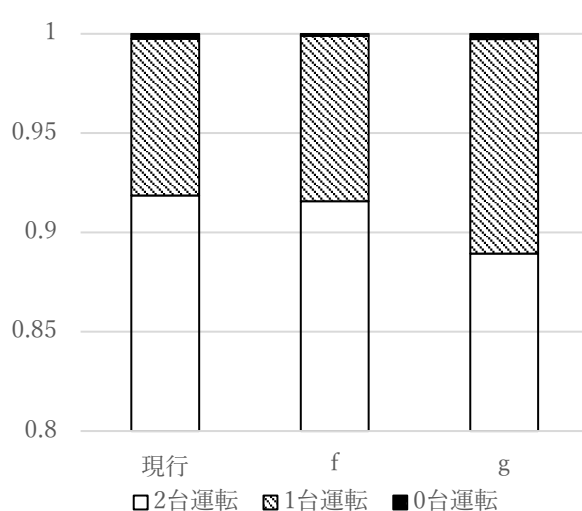


図-9 発電機台数とポンプ運転可能台数の試算（予備機なし容量増）

- ・ a 750kVA×2 台（常用 1 台＋予備 1 台）
a は、常用発電機 1 台で必要となる電気の総容量を発電する。同容量の発電機を予備とする。
 - ・ b 375kVA×3 台（常用 2 台＋予備 1 台）
b は、常用発電機 2 台で必要となる電気の総容量を発電する。発電機 1 台分の容量を予備とする。
 - ・ c 250kVA×4 台（常用 3 台＋予備 1 台）
c は、常用発電機 3 台で必要となる電気の総容量を発電する。発電機 1 台分の容量を予備とする。
- 発電機台数ごとの運転可能台数を試算した結果を図-7 に示す。いずれの構成でも現行よりも主ポンプ 2 台運転できる確率が向上している。以上のことからディーゼル機関と比較して、電動機の信頼性が高いことがポンプ運転の信頼性の向上に直接的に寄与していると認識できる。

4.2.2 予備機なしの場合

検討した発電機の構成は以下のとおりである。

- ・ d 375kVA×2 台（常用 2 台＋予備なし）
d は、b の構成のうち予備機を除いたもので常用

2 台で総容量を発電する。

- ・ e 250kVA×3 台（常用 3 台＋予備なし）
e は、c の構成のうち予備機を除いたもので常用 3 台で総容量を発電する。

発電機台数と運転可能台数を試算した結果を図-8 に示す。d の構成では、現行の 2 台運転できる可能性と同等であるが、0 台運転（運転できない）確率が現行より上がる結果となった。e の構成では現行よりも 2 台運転できる可能性は低下し、現行と 0 台運転の確率も同等程度の結果となった。発電機の予備機を設けていないため、発電機が故障した際、必要とする電気容量が賄えず電動機を運転できる台数が減るため、信頼性が低い結果となった。

4.2.3 予備機なしで容量増の場合

検討した発電機の構成は以下のとおりである。

- ・ f 400kVA×2 台（常用 2 台＋予備なし）
f は、d の台数のまま発電容量を増やした構成として常用 2 台で発電する。

- ・g 300kVA×3台（常用3台＋予備なし）
g は e の台数のまま発電容量を増やした構成として常用3台で発電する。

発電機台数と運転可能台数を試算した結果を図-9に示す。fの構成では、2台運転できる可能性は現行と同等程度で、0台運転の確率は現行より下がる結果となった。gの構成では現行よりも2台運転できる可能性は低下し、0台運転の確率は現行より上がる結果となった。今回の構成では予備機ありに比べると信頼性は向上しなかったものの2台運転できる確率は現行と同等か下がる場合もあるが、発電容量によっては、0台運転の確率が現行より下がるものもあった。

5. ディーゼル発電機の構成と経済性の評価

前項で評価した発電機の構成について、経済性を評価した。経済性としては、機器費用（購入費）と維持管理費用（点検費用）から50年間のライフサイクルコストを算出した。機器費用は見積とし、点検費用は「国土交通省機械設備工事積算基準 令和6年度版」を使用して月点検・年点検の工数から算出した。発電機の構成別のライフサイクルコストを算出した結果を図-10に示す。

aを除く各発電機構成で現行よりもライフサイクルコストが低く良好な結果となった。現行よりも電動化機場の方が点検費用を抑えられるためと考えられる。aの構成では、点検費用は抑えられるものの容量の大きな発電機を必要とするため、機器購入費が高価となり現行よりも高い結果となった。

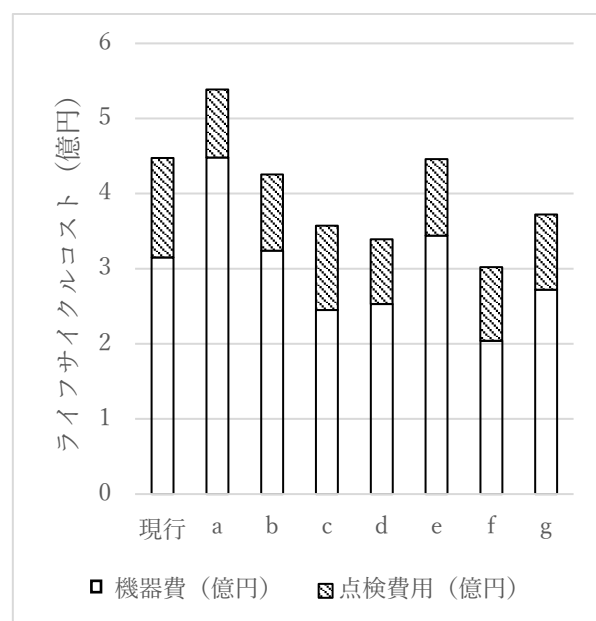


図-10 発電機構成別のライフサイクルコスト(50年)

6. まとめ

本報告では、排水機場ポンプ設備の主原動機を電動機とした場合の電源となる発電機の容量と台数の構成について信頼性、経済性について評価を行った。

① 信頼性

- ・発電機の予備機を設置する場合、ディーゼル機関よりも故障の少ない電動機を使用することで信頼性は向上する。
- ・発電機の予備機を設置しない場合、全台数運転できる確率は現行と同等程度でも構成によっては0台運転の可能性が高く信頼性が低下することがある。

② 経済性

- ・今回の構成では電動化によりライフサイクルコストは点検費用が抑えられるため減少する。ただし、発電機の容量と台数によっては、機器購入費が大きく増加しライフサイクルコストが増加するので信頼性と機器購入費のバランスを考慮する必要がある。

7. 最後に

本報告では、排水機場ポンプ設備の電動化に向けて電源設備となる発電機の構成について信頼性と経済性について検討したが、発電機の台数や大きさによっては設置面積や重量等も増え建屋内に設置できない場合もあり、設置場所の検討を要する場合もある。引き続き電動化機場の提案に向けて、様々な課題の解決に向けて検討をすすめていきたい。

参考文献

- 1) 国土交通省 社会資本整備審議会 河川分科会 河川機械設備小委員会 第2回：配布資料 資料4 中間報告(案)説明資料, P12, 2021.5.21
- 2) 国土交通省 総合政策局 公共事業企画調整課施工安全企画室：河川ポンプ設備点検・整備標準要領(案), pp.41-45, pp.51-53, 2016.3
- 3) 一般財団法人建設物価調査会：令和5年度版国土交通省機械設備工事積算基準, pp.423-425, 2023.5

24. 国民公園（皇居外苑）における電動建機試用に関する報告

環境省 水・大気環境局 モビリティ環境対策課 脱炭素モビリティ事業室 ○ 栗原 幸大
須山 友貴

1. はじめに

環境省では、国土交通省及び経済産業省と連携して建設機械の電動化を促進するため、令和6年度に、「産業車両等における脱炭素化促進事業（建設機械の電動化促進事業）」¹⁾を開始し、今年度からは、GX 経済移行債を財源とした「商用車等の電動化促進事業（建設機械）」の中で、補助事業を実施している。この事業はグローバル市場への展開も念頭に置きながら、ミニ・小型ショベル等の開発・普及を促進するため、国内の需要喚起と、多様な現場における電動建機による施工のモデルケースの形成、今後の電動建機の普及拡大に必要な知見の収集を目的としている。本論文では環境省管轄では全国初となる電動建機の試験運用を国民公園（皇居外苑）にて実施した結果を報告する。電動ミニバックホウ1台及びバッテリー駆動式の電動マイクロショベル1台を現場に導入し、掘削や整地作業の試用を通して電動建機の可用性及び効率的な使用方法について検証した。

2. 電動建機試験運用の実施概要

2.1 試用期間及び場所

令和6年12月16日から令和7年1月10日において、環境省自然環境局皇居外苑管理事務所が管轄する「令和6年度皇居外苑馬場先作業構台撤去工事」にて環境省管轄で全国初となる電動建機の試験運用を実施した。図-1に施工現場を示す。



図-1 電動建機を試験運用した皇居外苑の施工現場

2.2 使用した電動建機

図-2に示す電動ミニバックホウ（竹内製作所製、TB20e）及びバッテリー駆動式電動マイクロショベル（コマツ製、PC317）を試験運用に用いた。これらの電動建機は園路広場整備における防護柵の復旧作業や歩道舗装の復旧作業に用いた。



(a) TB20e

運転質量	1,930 kg
稼働時間	最大8時間（連続使用時）
バッテリー容量	24.7 kWh
充電時間	2時間（急速充電）、6時間（普通充電）
特徴	<ul style="list-style-type: none">・ 低騒音、低振動、低排熱・ エンジン搭載機と同等パワー・ 密集地工事、地下、屋内工事にも対応



(b) PC317
(カタログ名 PC01E-2)

運転質量	330 kg
稼働時間	約2時間（連続使用時）
バッテリー容量	1,314 Wh
充電時間	約6時間（普通充電）
特徴	<ul style="list-style-type: none">・ 着脱式可搬バッテリー Honda Mobile Power Pack e : を使用・ 専用充電器を家庭用100V電源に接続するだけで充電可能・ 低騒音、低振動、低排熱・ エンジン搭載機と同等パワー

図-2 試用した電動建機

(a) 電動ミニバックホウ（竹内製作所製、TB20e）

(b) 電動マイクロショベル（コマツ製、PC317）

現場では充電に必要な 200 V 電源が確保できず、外部からの充電サポートが必要であった。このため、試用期間中は電動建機の充電に 2 種類の異なる方式を行った。1 つ目は現場充電であり、作業現場に可搬式蓄電池を持ち込み、バッテリー残量に応じて現場にて継ぎ足し充電を実施した。図-3 に使用した蓄電池（Himoinsa 社製、EHR45/60）を示す。本蓄電池は日本仕様のモデルであるが、ベース機種は欧州市場で販売実績がある。図-4 に示すように本蓄電池を現場の空きスペースに直置きした。



公称出力	45 kVA
蓄電容量	56.8 kWh
周波数	50 Hz
電圧	400 V

図-3 使用した蓄電池



図-4 現場に設置した蓄電池

2 つ目は回送充電であり、バッテリー残量に応じて電動建機のレンタル会社が建機を引き取り、ヤード（機材置き場）の電源を用いて夜間充電を実施した。

2.3 試用に関する評価方法

試用後に担当事業者から従来建機と比較した場合の使用感やメリット、デメリット等を作業内容ごとにヒアリングし、結果をまとめた。その結果を元に、電動建機の有効活用が可能な施工現場を検討し、電動建機の更なる普及促進を図るために必要となる政策を検討した。

3. 結果及び考察

3.1 ヒアリングから得られた現場の評価

電動建機は防護柵の復旧、歩道舗装工事における掘削や整地作業に試用した。図-5 に現場での試用作業の様子を示す。また、実際に電動建機を使用した作業員からヒアリングして得られた結果を表-1 にメリット（効果）、表-2 にデメリット（課題）としてまとめた。



(a) 防護柵の設置に向けた掘削・整地作業



(b) 歩道のベンチ再設置に向けた掘削土の埋戻作業

図-5 現場での試用作業の様子

電動建機の試用を通じて、施工現場における排ガスゼロや静音性のメリットを実感できた評価を得た。特に作業中でも普通の声量で会話でき、指示し易かった。緊急時に声が届きやすく、事故を未然に防げる可能性もメリットと考えられた。その他、従来機と同等の操作性であり理解しやすく、施工にも問題はなかった。

デメリットとしては静音が故に動作音が小さく、周囲の手元作業員が建機の動作に気付かない可能性があることが示唆された。この対策としては接近を知らせる電子音等の利用が考えられる。そして、最大の課題は充電対応である。使用者は、現場条件に応じた創意工夫を重ね、利用可能な範囲を広げていくことや、提供者は充電インフラの課題解消に向けて対応機器やサービスの範囲を拡充することが重要であると考えられる。

表-1 電動建機のメリット（効果）

項目	メリット（効果）
周辺環境	<ul style="list-style-type: none"> ・排ガスが無いいため、現場周辺の大気環境が大幅に改善。 ・排ガスによる周囲の作業員に対する配慮や、植栽、壁及び塀への養生措置等が不要。 ・周辺が静かで、普通の声量で会話（指示）可能。 ・静穏であり、精神的負荷が軽減し、リラックスして作業可能。
安全性	<ul style="list-style-type: none"> ・静かな作業現場で、作業中の指示や緊急時の声が届きやすく、事故の未然防止に繋がる。
操作性	<ul style="list-style-type: none"> ・従来と大きな変更なく、操作を理解できた。
可用性	<ul style="list-style-type: none"> ・既設電源があり、1日の使用時間が限定された補助的な作業で使用する場合には、活用の可能性は十分あり。

表-2 電動建機のデメリット（課題）

項目	デメリット（課題）
周辺環境	<ul style="list-style-type: none"> ・特段なし。
安全性	<ul style="list-style-type: none"> ・アームの昇降、旋回時の油圧システムの動作音が無いため、周囲の手元作業員にとって危険。接近を知らせる疑似音（電子音）がある方が良いのではないかな。
操作性	<ul style="list-style-type: none"> ・特段なし（大きな違和感はない）
可用性	<ul style="list-style-type: none"> ・充電対応が最大の課題。既設電源が無い場合は、レンタル会社等の外部からのサポート等が必要。 ・日中の継ぎ足し充電が必要な場合、作業工程に影響を及ぼす。

3.2 政策検討

電動建機の有効活用が可能な施工現場を今回のヒアリング結果を元に、その適性ごとに分類した結果を表-3に示す。騒音や排ガスが問題となる密閉空間や人が多い環境に適し、短時間稼働にて効果的であると考えられる。環境配慮と作業快適性が求められる現場において適性が高いことが示唆された。

表-3 電動建機の適性分類

適性	観点	特徴・例
換気・通気性が悪い +	排ガス	排ガスの排出自体が難しい施工現場 <ul style="list-style-type: none"> ・ 屋内、坑内、トンネル内、地下空間等 ・ 防音パネル、養生シートで囲われた閉鎖環境
人の往来・滞留が多い +	排ガス 騒音	人の往来が多い、人の集中しやすい場所 <ul style="list-style-type: none"> ・ 市街地、商業地区 ・ 観光地、景勝地、公園等 ・ 住宅地、学校や病院の近隣等
自走必要性が低い* * 自走時にバッテリー消費が大きい場合がある +	節電	固定位置、狭小空間での施工 <ul style="list-style-type: none"> ・ 屋内作業や施設内改修工事 ・ 既存構造物の補強工事等
1日あたり稼働時間が短い	充電対応	断続的な使用で1日の稼働時間が限定的 <ul style="list-style-type: none"> ・ 小規模な掘削、整地作業 ・ 各種補助的作業

次に、電動建機普及の課題である充電方式について、その方式によって分類した結果を表-4に示す。施工現場では機材の運用時間や充電計画を立案する際に、表-4の充電方式の特徴及び留意点を考慮し、その現場に適切な充電方式を導入する作業計画の最適化が必要である。充電ソリューションの多様化により電動建機の活用領域も拡大すると考えられる。

表-4 電動建機の充電方式による分類

分類	特徴	留意点	外部からの充電サポート
現場充電 敷地内充電	固定式電源	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 必要な電圧の確保。適合しない場合、昇圧トランスによる変換が必要。 ✓ 電源場所まで電動建機を移送するための導線確保。 	不要
	可搬式蓄電池 *1	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 電動建機の充電を目的に外部から持ち込んだ蓄電池。車両や人手により運搬可能。 ✓ 現場の使用規模に応じて大小様々な蓄電池が存在。 ✓ 設置場所を要検討。直置き使用の場合は移動式クレーン必要。 	必要
	その他（パトリール給電*2）	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 移動型電力供給サービス。蓄電池を積んだ車両が電力供給が必要な場所を移動しながら、電力提供。 ✓ 民間によるサービスとして商用化されていない。災害時、停電時、企業のBCP（Business Continuity Plan、事業継続計画）対策として使用。 	必要
回送充電 敷地外充電	レンタル会社による回送	<ul style="list-style-type: none"> ✓ バッテリー残量に応じて電動建機をレンタル会社に引き渡し、翌朝フル充電の状態で見入。 ✓ 建機の使用状況に応じてバッテリー残量を把握し、余裕ある回送手配が必要。 	必要
	自社回送	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 建設会社自社にて充電に必要な電圧の電源場所の確保及び回送手配が必要。 	不要

*1 従来の電源用ディーゼル式発電機は除く。

*2 CaaS（Charging as a Service）の一環として、BEV（Battery Electric Vehicle）が普及した地域にて商用化が進む動きが確認できる。顧客が充電インフラやサービスを購入するのではなく、充電関連サービスを包括的に利用する形態を目指すものである。

充電の必要性が導入障壁となる中、現場での創意工夫や試行錯誤を通じて、適用可能な領域を拡大し、有用なモデルケースと具体的なメリットを発信することが必要である。また、現場での充電ソリューションといった顧客ニーズを追及するマーケットインの発想のみならず、実際に使用しなければ体感できない「排ガス、騒音のない施工現場」の価値を広めるために、プロダクトアウトでの展開がこれまで以上に求められる。建設施工現場の人材不足や労働環境改善は重要な課題であり、建設産業の持続的成長に向けた人材確保及び技術継承の観点から、「排ガス、騒音のない施工現場」は潜在ニーズとして大きいと考えられる。マーケットイン及びプロダクトアウトの双方をバランス良く組み合わせたアプローチが必要不可欠である。また、個社の自助努力だけではイノベーションは実現しないので、ステークホルダーと一体となり、理念・目標を共有した取り組みを進めることが電動建機の普及促進の鍵になると考えられる。

昨年度は環境省直轄の皇居外苑工事のみであったが、今年度は直轄工事に加えて自治体や団体、

工事受注者に働きかけ、電動建機試用によるモデルケースを増やそうとしている。現場の声やメリットを引き続き発信することで、電動建機の試用に取り組む発注者を増やしていきたいと考える。

4. おわりに

施工現場における排ガスゼロや静音性のメリットを実感した一方で、課題である充電インフラ対応には建機の利用者による利用可能範囲の拡大や、提供者による対応機器やサービス範囲の拡充が重要であることが示唆された。

我が国では電動建機に関する検討が引き続きおこなわれており、例えば2024年6月の「経済財政運営と改革の基本方針2024」及び「新しい資本主義のグランドデザイン及び実行計画2024年改訂版」では、電動建機の導入促進について言及されている。引き続き、関係省庁と連携し、建設建機の電動化を推進していく。

最後に、日頃より建設施工分野の関係機関、関係団体等の皆様にはご協力をいただき、感謝申し上げます。より良い地球温暖化対策の施策実行のため、引き続きご指導ご鞭撻のほど、よろしくお願いいたします。

参考文献

- 1) 環境省ホームページ, 2025, 令和6年度補正予算商用車等の電動化促進事業（建設機械）公募について, https://www.env.go.jp/press/press_04761.html（最終閲覧日2025年7月14日）

25. 舗装用電動ローラの運用に関する考察と適用事例

舗装工におけるカーボンニュートラルへの一助

(株) NIPPO 総合技術部 機械統括グループ ○ 田中 翔悟
(株) NIPPO 総合技術部 機械統括グループ 小川 亮太
(株) NIPPO 総合技術部 機械統括グループ 大西 秀樹

1. はじめに

2050 年カーボンニュートラルを実現するため、建設分野でも CO₂ 排出削減に向けた取り組みが進められている。建設施工現場における CO₂ 排出量の約 7 割は、建設機械等のエンジンに使用する燃料由来とされている。国土交通省は、エンジン式建設機械から電動建設機械への転換を促進する目的で、令和 5 年 10 月に GX 建設機械認定制度を開始した。舗装用機械で認定された機種はまだ無いが、当社は海外メーカ製の舗装用電動ローラを導入し施工現場で試行を開始した。また国内メーカにおいても舗装用電動ローラの開発が進んでいる。

本報文は、これら舗装用電動ローラを、本州および冬季の北海道の実現場にて検証した結果を述べるとともに、他メーカの舗装用電動ローラを試用して確認された課題等について述べるものである。

2. 舗装用電動ローラの現状

舗装用電動ローラについては、欧州において重量 3t 級の小型舗装用電動ローラが 2023 年より市場投入されている。これよりも大きい舗装用電動ローラは、建設会社等が自主的に舗装用エンジン式ローラを電動化改造している例がいくつか確認されている。一方、国内メーカによる搭乗式舗装用電動ローラの市場投入は、現時点で確認されていない。

3. 舗装用電動ローラと舗装用エンジン式ローラの性能比較

舗装用電動ローラの性能を検証するため、当社は 2023 年 12 月に欧州メーカ製の搭乗式 3t 級の舗装用電動ローラを導入した。外観を写真－1 に、概略諸元を表－1 に記載する。走行および操舵、補器を含め、従来の舗装用エンジン式ローラと比較しても違和感なく操作することが出来る。

3.1 騒音値の比較

当社の試験場において、舗装用エンジン式ロー

ラとの騒音比較試験を実施した。測定状況を写真－2 に、測定結果を表－2 に記載する。



写真－1 舗装用電動ローラ外観

表－1 舗装用電動ローラ概略諸元

運転質量	約 3 t
バッテリー形式	リチウムイオン
バッテリー容量	約 20 kWh



写真－2 騒音値測定状況

表－2 騒音値測定結果(※1)

	舗装用 電動ローラ	舗装用 エンジン式ローラ
アイドリング	52.5 dB	75.0 dB
無振走行	63.0 dB	76.2 dB
有振走行	73.5 dB	96.5 dB

※1 測定条件：舗装用エンジン式ローラエンジン回転数 2,000 rpm，走行速度 3 km/h，測定距離 4 m

舗装用電動ローラは舗装用エンジン式ローラと比較し、無振走行時では約 13 dB 騒音を低減できることが確認できた。アイドリング時においてはローラから出る騒音はほぼ無音となり、暗騒音が記録された。実際に現場で舗装用電動ローラに搭乗したオペレータからは、エンジン音が無いことから、「舗装用電動ローラは乗った後の疲れが少ない、周囲の状況が把握しやすくなった」との評価も得た。

3.2 エネルギー効率と CO₂ 排出量

施工現場で当該舗装用電動ローラと舗装用エンジン式ローラを併用し、一日（8 時間）稼働した場合のエネルギー効率と、CO₂ 排出量についての比較を実施した（表－3 参照）。舗装用電動ローラへの電力の充電方法は主に商用電源と発電機があり、発電機による充電では、舗装用エンジン式ローラ同様に燃料に軽油を使用する。舗装用エンジン式ローラの燃料消費量が 27 L であったのに対し、舗装用電動ローラは、満充電までの発電機の燃料消費量が 11 L となり、エネルギー効率が約 2 倍向上することが確認された。

一方、排出 CO₂ 比較では、商用電源による充電で 6.2 kg-CO₂/日に対し、舗装用エンジン式ローラでは 69.7 kg-CO₂/日であることから、CO₂ 排出量が約 91%削減できることとなる。なお、発電機燃料に 100%バイオ燃料を使用した場合や、商用電源にグリーン電力を使用した場合の CO₂ 削減量は 100%になる。

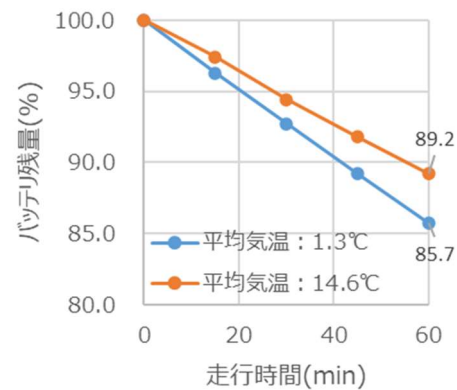
4. 寒冷地での舗装用電動ローラの活用

4.1 リチウムイオンバッテリーの特徴

導入した舗装用電動ローラに搭載されるリチウムイオンバッテリーは、従来の鉛蓄電池やニッケル水素バッテリーと比較してエネルギー密度が高く、また充電・放電のサイクル寿命が長いことから、産業機械や建設機械のような厳しい使用環境下でも信頼性の高い電源として利用されている。一方、低温下での使用時はバッテリー性能の低下が懸念される。

4.2 バッテリー消費への影響

気温によるバッテリーへの影響を確認すべく、当該ローラを平均気温 1.3℃の北海道の舗装現場に搬入し、連続走行試験を実施した。結果、平均気温 14.6℃の埼玉県において、同条件で実施した内容と比較して、バッテリー消費量が 1 時間当たり約 32%増加した（図－1 参照）。この消費量から舗装用電動ローラの稼働時間を計算すると 6.9 時間となり一日稼働の目安となる 8 時間に届かないことが確認された。しかしながら、一日の施工時間におけるローラの稼働率は 50%程度で、実際の稼働時間は 1 日 4 時間ほどであることから、低気温下の現場でも一日の施工に十分対応できることが確認された。



図－1 気温とバッテリー消費量比較

4.3 バッテリー充電への影響

低気温下における舗装用電動ローラのバッテリー充電への影響を確認すべく、「4.2」の現場と同じ条件下にて、舗装用電動ローラへの充電状態の比較を実施した（表－4 参照）。

結果として充電量はほぼ同じ値となり、気温の違いによるバッテリー充電への影響は見られなかった。このことから、導入した舗装用電動ローラは低気温下においても、バッテリーの充電にはほぼ影響が無いものと考えられる。

表－3 舗装用電動ローラと舗装用エンジン式ローラの燃費（電費）等比較

	舗装用 エンジン式ローラ	舗装用電動ローラ	
		発電機(10KVA, 軽油)	商用電源
エネルギー源	軽油	発電機(10KVA, 軽油)	商用電源
日あたり燃料（電力）使用量	27 L	11 L	15 kw
排出 CO ₂ 比較(※2)	69.7 kg-CO ₂ /日	28.4 kg-CO ₂ /日	6.2 kg-CO ₂ /日

※2 軽油の CO₂ 排出係数は 2.58 kg-CO₂/L, 商用電源の CO₂ 排出係数は 0.408 kg-CO₂/kwh(東京電力、環境への取り組み, <https://www.tepco.co.jp/ep/company/warming/keisuu>, 2025 年 10 月 14 日)に設定

表－４ 気温の違いによるバッテリー充電比較

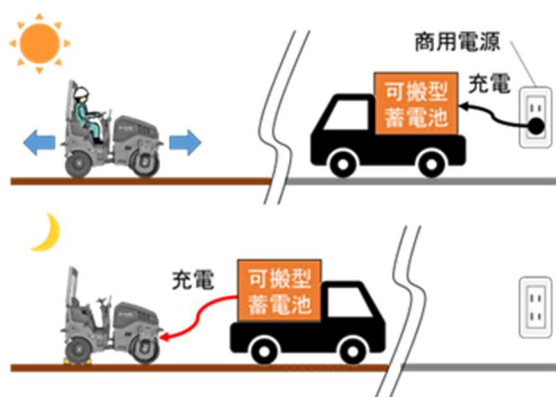
電源	発電機(※3)	
平均気温	14.6℃	1.3℃
充電時間	バッテリー充電量 (%)	
0－15 分	2.3	2.3
15－30 分	2.6	2.6
30－45 分	2.6	2.6
45－60 分	2.4	2.2
平均	2.5	2.4

※3 発電機は 10 kVA、単相 200 V 出力を使用

５．舗装用電動ローラの運用に関する課題

5.1 夜間の充電方法

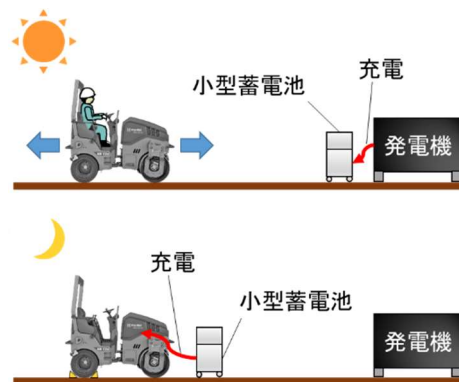
導入した舗装用電動ローラは、充電の電圧として単相 AC100 V～400 V が使用できるため、電源には発電機や商用電源など様々な選択肢がある。舗装用電動ローラを日中に連続運用する場合、夜間に充電する必要があるが、商用電源の確保が難しい場合が多い。また、発電機による夜間充電作業は、騒音や無人管理の面で安全上好ましくない。このため、施工現場では現場外の商用電源等から充電された可搬型蓄電池の活用が有効であると考えられる（図－２参照）。



図－２ 充電サイクルイメージ

実施例として、日々のバッテリー消費量と同等の容量を持ち、単相 AC200 V 出力を備えた小型蓄電池を準備した。夜間にはこの小型蓄電池から充電を行い、日中は発電機から小型蓄電池に充電を行うことで、舗装用電動ローラの日々の連続施工に対応した（図－３参照）。

また別の課題として、蓄電池を夜間の無人エリア等で使用する場合の盗難リスクがある。このため、現場周辺に仮設の格納場所を設置するか、施錠できる車室内に蓄電池を格納するなどの対策が必要となる。車室内での保管は、現場の進捗に応じて容易に蓄電池を移動できる利点がある（写真－３参照）。



図－３ 実施例イメージ



写真－３ 充電設備を積載したWキャブトラック

表－５ 各社舗装用電動ローラの充電規格に関する比較

メーカー	A 社	B 社	C 社
車格	3 t 級	4 t 級	4 t 級
充電電圧	単相 AC100 V～400 V	三相 AC200 V	三相 AC400 V
充電ソケット形状と規格	 CEE	 コンセント（引掛け型）	 GB/T
専用充電器	不要	不要	必要

5.2 異なる充電規格

導入した舗装用電動ローラの現場試用と同時期に複数メーカー協力のもと、国内外の舗装用電動ローラを試用する機会を得た。運転操作方法は舗装用エンジン式ローラと変わらなかったが、表－５に示すように充電規格に違いがみられた。そのため、導入した舗装用電動ローラの充電機器等を転用することが出来ず、その都度適合する機器を準備することとなった。今後、同じ現場内で複数メーカーの電動建機を運用する場合、機種ごとに充電コネクタや出力電圧、通信プロトコルが異なるため、統一された設備で一括管理・充電を行うことが困難となる。また、充電器や蓄電池の持ち込み・設置場所の確保、さらには現場内の動線や安全管理にも影響を及ぼすのではないと思われる。

6. まとめ

当社が導入した舗装用電動ローラと、他メーカーから借り受けた舗装用電動ローラの試用で確認されたことを、舗装用エンジン式ローラと比較した観点で以下にまとめる。

- ① 導入した舗装用電動ローラは、従来の舗装用エンジン式ローラと遜色無く操作ができる
- ② 騒音が少なく、運転操作後の疲れが少ない
- ③ エネルギー効率が約２倍となり、充電に係る燃料が軽減できる
- ④ 電源の選択によっては、排出 CO₂ ゼロを達成できる
- ⑤ 導入した舗装用電動ローラは、低気温下ではバッテリー消費量は増加するが、一日の稼働には対応できる
- ⑥ 導入した舗装用電動ローラは、低気温下でのバッテリー充電への影響はほとんど見られない
- ⑦ 夜間の充電には蓄電池が有効と考える
- ⑧ 各メーカーにより充電規格が異なる

7. アスファルト舗装機械の電動化に関する考察

7.1 アスファルト舗装工事現場のカーボンニュートラル

締固め作業を実施するローラの電動化については、本論文に記載の通り確認されているが、アスファルト舗装工事は、アスファルト混合物を敷きならすアスファルトフィニッシャーと組み合わせられ、最低でも２台編成で施工される。切削オーバレイ等の修繕工事においては、これに追加して路面切削機が組み合わせられる。舗装工事現場においてのカーボンニュートラル達成のためには、これらの電動化も必要となることから、メーカーによる今後の開発が期待される。

7.2 アスファルト舗装工事の特徴と電動化対応

現在、アスファルト舗装発注工事の約７割を占めるアスファルト舗装修繕工事は、供用中の道路を交通規制し実施される場合が大半であり、交通開放のため施工時間に制約があるのも特徴である。そのため施工中における電力欠乏での作動停止は、絶対に防ぐ必要がある。これに対する対策として、急速充電設備の充実化や、電動建設機械に入れ替え可能な、カセット式充電電池など対応が必要になると考える。

8. おわりに

今回の検証で、舗装用電動ローラの運用に関する効果や課題がいくつか明らかになった。静粛性が高いため都市部における夜間作業や、排気ガスを排出しないことから建屋内やトンネル内などでの活用が期待できる。道路用電動建設機械はまだ市場には出ていないが、将来の普及促進に向けて充電規格の統一が望まれる。今後、カーボンニュートラルの達成のためにも、エネルギー効率の高い電動建機を現場で積極的に活用していく所存である。

26. 建設機械分野の脱炭素化に向けた政府の取組について第2報

環境省 水・大気環境局 モビリティ対策課
脱炭素モビリティ事業室

○ 植竹 康朋
須山 友貴

1. はじめに

環境省では、国土交通省、経済産業省と連携して、建設機械の電動化を促進するため、令和6年度から建設機械の電動化促進事業を開始した。

2050年カーボンニュートラルの実現に向けた脱炭素戦略が求められる中、日本のCO2総排出量のうち約0.5%が建設機械の稼働により排出されており、カーボンニュートラルの達成には、抜本的な動力源の見直しが必要である。この事業では、電動建機による施工のモデルケースを形成するとともに、今後の電動建機の普及拡大に向けた必要な知見を得ることを目的として実施した。

本論文は、事業概要と導入により得られた幾つかのケースを紹介し、その実情を見るとともに、どのようにすれば電動建機の導入に寄与するかを考察する。令和6年度補正予算にて新たに衣替えされた「商用車等の電動化促進事業（建設機械）」の紹介も含めて、建設機械の脱炭素化推進の一助としての施策をまとめたものである。

2. 建設機械の電動化促進事業について

まず、令和6年度「建設機械の電動化促進事業」について概観する。

2.1 事業背景

「2050年カーボンニュートラル宣言」ならびに「2030年度46%削減目標（2013年度比）」の達成に向け、政府は地球温暖化対策推進法に基づく総合的な計画を閣議決定している。電動機械については、2024年6月発表の「経済財政運営と改革の基本方針2024」および「新しい資本主義のグランドデザイン及び実行計画2024年改訂版」において、導入促進策が明記されている。令和5年度（2023年度）の日本のCO2排出量は約9億8,872万トンで、産業部門が34.3%を占めている。建設機械による排出はその1.7%（約577万トン）とされる。国土交通省の主導にてICT施工や燃費向上で省CO2に取り組んでいるが、カーボンニュートラル達成には動力源の見直しなど抜本的対応も求められている。

2.2. 令和6年度「建設機械の電動化促進事業」

このような背景を踏まえ、国土交通省が令和5年10月に建設機械認定制度の認定（GX建設機械認定制度）を創設した。環境省では国土交通省、経済産業省と連携して、令和6年度に「産業車両等における脱炭素化促進事業（建設機械の電動化促進事業）」を開始した。この事業は建設施工現場における電動建機の普及を促進し脱炭素化を図るため、GX建設機械認定制度で認定を受けた建設機械を導入する事業者に対し、建設機械や充電設備の購入に係る経費の一部を補助するものである。



図-1 令和6年度 建設機械の電動化促進事業

2024年度の補助事業の予算は約2.1億円であり、補助対象はGX建設機械とその充電設備（2025年3月時点で、電動油圧ショベル15機種、電動ラフテレーンクレーン1機種、充電設備3機種）であった。建設機械の補助率は、車両本体価格に対して同等仕様の従来機との差額の3分の2、充電設備は本体価格の2分の1を、民間事業者・団体などに対して補助する。

この補助事業では電動建機の普及のため、施工管理と電動建機の使用方法を一体で考えて、様々

な工種・地域、多様な現場における電動建機による施工のモデルケースを見出そうとした。また、建機の稼働は同一年度内に複数現場で使用される可能性が高いため、工事現場での稼働に加えて、保守体制等を含む実運用の観点からの情報収集も有益と考えられた。これらのような、電動建機の導入に寄与する知見を合わせて収集、考察した。

3. 導入事例と事業で得た知見

建設機械の電動化促進事業は 2024 年 5 月に補助事業の概要を公表し 11 月末まで受付けた。採択審査を経て合計 42 台の G X 建設機械の導入を補助、予算額 2.1 億円に対して、執行率 98.56% となった。以下、この事業の具体的な導入例と得られた知見を紹介する¹⁾。

3.1 電動ラフテレーンクレーン導入例

(1) 購入した事業者

25 トン吊り電動ラフテレーンクレーン「eGR-250N-1」を導入したこの事業者は、千葉県を主要な商圏として様々な規模のクレーンを多数所有しており、重量物の運搬、荷役、作業を一貫して手掛けている。共同事業者であるゼネコンの要望により、補助事業を利用して電動ラフテレーンクレーンを購入した。ゼネコンとの共同実施期間を、機械の減価償却期間を基準に設定した 6 年間で定め、ゼネコンの複数現場に継続的に提供する。機械の運用や充電方法に関する課題を抽出、今後の G X 建設機械導入拡大に向けた検証を行う方針である。

(2) 工事事例：江東ポンプ所

隣接地にタワーマンションが建つポンプ所内に沈砂池棟という深さ 20m 程度の沈砂池を建設する工事の一部に使用された。

作業においては、油圧そのものの音はするがエンジン音がないので、作業中も走行時も静かである。オペレーターの話として、「ブームの起伏、巻き取り、フックの上げ下げに違和感はなく、従来のラフタークレーンといい意味で変わらない」とのことである。

一方で、機械の運用面では、従来機であれば毎朝自社ヤードを出発し現場に自走し、夕方にヤードに帰着する。しかし、本機は公道走行時にバッテリーを多く消費するため、自走による往復移動ができず、現場に夜間留め置きとした。また、給油給電対応は、従来機は、現場やヤードにおけるパトロール給油などで補充できるが、電動建機の場合、日々の稼働を実現するには、現場で充電できる電源設備が必須であった。この現場では敷地条件や延長ケーブルの取り回し等の問題から、200V 充電設備 2 か所の追加仮設作業が発生した。

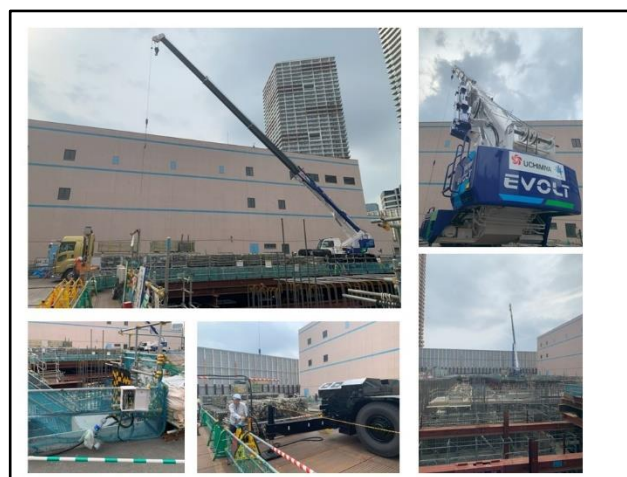


図-2 電動ラフテレーンクレーン稼働例

(3) 事業者の意見

『従来機と同等性能の G X 建設機械に対し、少なくとも 3 倍、場合によってはそれ以上のレンタル料金を承諾してもらうことは現状では難しい。SDGs など社会全般の意識変化や各社のサステナビリティ対応が追い風となる可能性はあるが、具体的な方策については依然として手探りの状況である』

『補助金を活用しても、G X 建設機械は従来機に比べて非常に高価であり、イニシャルコストの差額回収が主要な課題である。当該 G X 建設機械の場合、内燃機関式よりランニングコスト削減が可能と試算しており、稼働率を上げることで差額回収の実現を目指している。』

『また、従来のエンジン機では導入が難しかった、屋内・閉鎖環境（例：トンネル内、テーマパーク建屋内など）や、音や振動への配慮が求められる現場（例：病院、市街地、住宅街、夜間工事など）にも適用範囲を広げ、稼働率の向上を目指している。』

『静音性については、クレーン作業音よりも走行時のエンジン音の方が効果は大きい。市街地などを走行する際の騒音軽減が期待できる。』

3.2 マイクロパワーショベル導入例

(1) 購入した事業者

電動マイクロショベル「PC05E-1」を導入した事業者は、沖縄本島にて回収した古紙を原料とし、トイレットペーパーを中心とした消費者向け製品を製造している。生産工程に、古紙に付着したインクを除去しやすくするため、溶解炉に古紙を投入する作業がある。この作業は従来、作業員 2 名が 1 トン程度の古紙ブロックをほどもき、「地球釜」と呼ばれる釜の投入口へ人力で投入する方法であった。しかし、投入作業については、一度

に約 15 トンの古紙を投入するため足腰への負担が大きく、転倒や落下の危険性も高いため、安全かつ効率的な作業方法を模索していた。作業内容に適した機械使用の提案を受けたことを契機に、試験的に同等クラスの油圧ショベルをリース導入した。古紙ブロックを電動建機のアーム先端のタッチメント（はさみ）で解きほぐし、アームの旋回により釜に古紙を投入する作業を実施し、作業内容との適性が高いと判断した。さらに電動機種との提案により、建屋内という作業環境において排ガスが発生しない点や、2 階部分での作業の耐荷重に対する適切な機械自重・出力を備えている点、補助金の対象であることなどを、総合的に判断し導入した。

充電は、バッテリーを電動マイクロショベル本体から取り外し、建屋内に置いた専用充電器を使用して充電する。1 日にバッテリー 2 個で 2 セット、計 4 個を使用する。残量が僅かとなったタイミングにて、満充電のバッテリーに差し替えることで対応している。

（２）事業者の意見

①作業の安全性・効率性の向上

『これまで釜への古紙投入は、作業員 2 名での人力作業であり、転倒や落下といった事故のリスクが高かった。機械導入により、こうしたリスクが大幅に軽減された。また、操作を 1 名で行えるようになったことで、もう 1 名は同区画内にて天井クレーンの操作など別業務に従事できるようになり、全体として作業効率が大きく向上した。人力による作業は足腰への負担が大きく、特に夏場は熱中症の危険性もあったが、機械化により作業員の身体的負担が軽減され、健康面への配慮にもつながっている。』

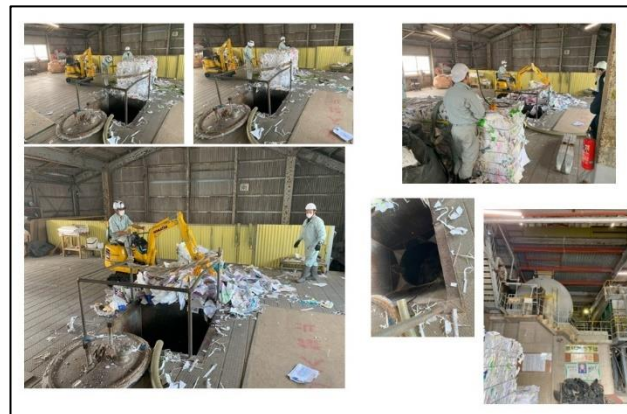
②排ガスのない作業環境

『作業場所は建屋の最上部に位置しており、風が強い日には古紙が舞い散るため窓を閉め切ることがある。そうした環境において、排ガスが発生しない点は非常に大きなメリットである。また、年間を通じて高温な気候である沖縄において、ディーゼルエンジンのように高温にならず、排気熱が発生しないことは、作業環境の改善にとってもプラス要因である。』

（３）普及促進に向けた意見

『電動建機は、建設、土木工事といった屋外での使用よりも、屋内での作業に適している。一部の取引先では、屋内での排ガス発生に対してこれまで以上に敏感になっており、排ガスによる悪影響に対する意識の変化が見受けられる。当社のように建屋内で作業を行う製造業や中間処理施設においては、電動建機との相性は良いように思える。』

『また他業種においても導入効果が期待できるのではないかと。例えば農畜産業におけるビニールハウス内での畝づくりなどの作業には、今回導入したような小型機種であれば適性が高いのではないかと。さらに近年ではアニマルウェルフェアの観点から、養豚場や養鶏場といった畜産施設においても、内部での排ガス・騒音に対する対策が求められるようになっている。電動建機は、こうした課題解決に資する有効な手段となり得る。』



図・3 マイクロパワーショベル導入例

3.3 電動建機導入事例からの知見

その他の事業者へのヒアリングなどの調査を含めて、事業者からは様々な知見を得た。

（１）購入した事業者

電動建機の購買動機として、複数のレンタル事業者のように、実需に基づくよりも、脱炭素に積極的な、先進的な取り組み、先行投資的な意味合いが多かった。また、電動建機を使いこなすための効率的な使用方法の検証や、長期使用による独自の発見を目的として、レンタルではなく自社所有を決定する企業も見受けられた。さらには、建設業以外の業種、産業廃棄物の中間処理施設も複数あった。

（２）メリット

電動建機の試用を通じて「静粛性」や「排出ゼロ」といった特性が作業環境そのものに本質的な価値を与えている。こうした特徴は、騒音や排ガスの削減にも寄与し、施設内や密閉空間、住宅に近い現場など、多様な現場で作業性向上へとつなげることができる。様々な屋内作業や農畜産業などの異業種でもその効果は十分に発揮できる可能性がある。

また、労働環境の改善や雇用の確保という長期的な視点からも、電動建機は解決の切り札となり得る。さらに、GX 建設機械の普及はカーボンニュートラル目標の達成に貢献し、DX 化と並んで建設産業の持続可能性向上や業界全体の課題解消にも価値がある。古紙投入作業現場のように、電動建機の導入によって作業の安全性や効率性、快適性が向上した事例も報告されている。

(3) デメリット

一方で、課題も少なくない。例えば日中の充電が必要となる場合が多く、電源確保が難しい現場では作業工程に変更や調整が生じ、電動建機の導入は容易ではない。日中に継ぎ足し充電を行うための効率的な運用方法や、工程などのソフト面の検討や、クレーンの事例における仮設電源設置や電動化による改造に伴うアタッチメントの変更など、ハード面での対応が必要となり、追加コストが発生する場合もある。

また、建設機械は用途が特殊であるため、レンタル会社が所有し必要に応じてレンタルされる形態が多い。レンタル価格は、本体価格や稼働率、その機械を中古として売却する際の再販価格などをもとに設定されるが、本体価格が高く、稼働率が悪く、再販価格がまだ見通せないため明確な価格方針を決められないという。今回の補助事業に対しては複数のレンタル事業者から申請があり、多数の電動建機が導入されたが、従来機との価格差が大きく、レンタルの引き合いが薄かったのが実情である。

(4) 普及に向けた施策

これらの課題に対しては、現場条件に応じた選択肢を増やししながら、GX建設機械の可用性を拡大していくことが必要である。現場ごとの創意工夫や試行錯誤を通じて可用領域を広げ、有用なモデルケースの発信が求められている。地方自治体・業界団体・商工会などを通じた啓発活動や情報発信も重要となるであろう。

また、国や自治体による政策支援も不可欠である。政策の後押しが波及効果を生む可能性が高く、導入により効果の見込まれる公共事業での加点措置など、インセンティブの付与や義務づけなども普及拡大策として効果的だと考えられる。

4. 今後の方向性について

4.1 商用車等の電動化促進事業の概要

令和6年度の「建設機械の電動化促進事業」を受けて、新たに令和6年度補正予算にて「商用車等の電動化促進事業（建設機械）」を、令和7年11月28日までを申請期間として実施している。建設機械に関係する予算規模は、従前の補助事業から拡大し約18億円とした。補助対象は従前同様、GX建設機械認定された建設機械と充電設備である。補助率も同様に、車両本体価格に対して同等仕様の従来機との差額の3分の2、充電設備については本体価格の2分の1である。また、これまで補助対象外としていた建設機械販売業者、建設機械製造又は建設機械販売を行う企業と資本関係がある者についても、「利益等の排除」の手続きを行うことで申請を可能とすることとして、商習慣の実情に合わせた。

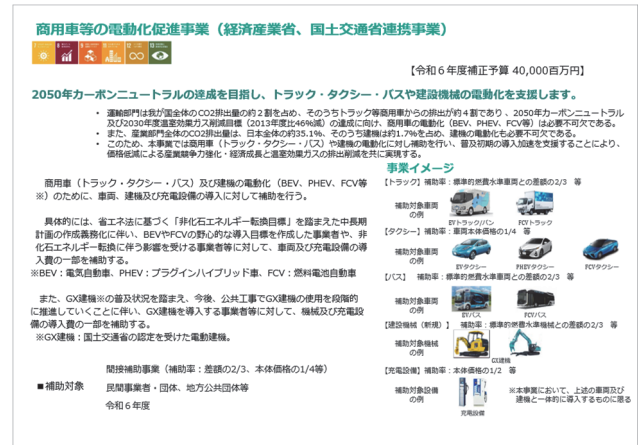


図-4 令和6年度補正 商用車等の電動化促進事業

また、環境省におけるカーボンニュートラルに資する建機の普及促進を図る政策検討に向け、海外も含む世界全体における電動建機の動向やメリットを整理し、必要な情報を得ることを目的とした、委託事業を引き続き実施している。用途拡大に向けた各種の実証事業や、ユースケースのパンフレット作成など、可用性のあるケースの掘り起こしとその周知拡大に努めている。

4.2 GX建設機械活用推進工事(仮称)

国土交通省では「建設機械の脱炭素化」に向け、国土交通省の発注する土木工事において、脱炭素化に向けて先進的に取り組むことで、建設現場の取組をけん引すべく、CO2排出の過程に応じたリーディング施策のロードマップを定めたアクションプランを作成した。このロードマップにおいて、GX建設機械の現場での導入を促進するため、認定型式を使用する、「直轄工事におけるモデル工事・促進工事の実施（GX建設機械活用推進工事（仮称）」を令和7年度より促進することとした。

5. おわりに

引き続き、関係省庁と連携しつつ、建設機械の電動化を促進してまいりたい。

日頃より、建設施工分野の関係機関、関係団体等の皆様にはご協力を頂き、感謝申し上げます。現在進行中の補助事業もあり、引続きより良い地球温暖化対策施策を実施するべく、ご指導ご鞭撻のほど、よろしくお願いいたします。

参考文献

- 1) 株式会社矢野経済研究所編：令和6年度電動建機等に関する事例調査及び政策検討等のための調査委託業務、pp.46～85、2025年3月

27. 重機におけるエンジン回転数と燃料消費量の相関関係について

CO₂削減及び現場施工性の実現に向けて

西松建設株式会社

○ 吉田 千智
井上 洸也
齋藤 貴之

1. はじめに

近年の世界情勢として、気候変動問題への取り組みが加速している。特に地球温暖化を起因とする気候変動（気温上昇や集中豪雨の増加、台風の大型化・強力化による災害発生）は我々の生活に大きな影響を及ぼす。地球温暖化の要因は温室効果ガスの濃度が上昇したことが大きく、その中で7割以上占めているのが二酸化炭素（CO₂）である。¹⁾

これらの現状から、わが国は2050年までにカーボンニュートラルの実現を宣言しており、CO₂排出量の大幅削減に取り組んでいる。

建設業で排出される二酸化炭素の約70%が重機・大型車両の燃料である軽油に起因している。²⁾そこでエンジン高回転抑制やアイドリングストップによる省燃費運転に着目し、重機のエンジン回転数削減と燃料消費量削減効果について検証実験を行った。加えて、燃料消費量に着目し燃料消費量とエンジン回転数を回帰し、燃料消費率・稼働時間などから導出する推定燃料消費量及び実燃料消費量との比較検証を行った。

本論文ではエンジン回転数と燃料消費量の相関関係についてエンジン回転数削減における省燃費運転の効果及びエンジン回転数が燃料消費量に与える影響について検証結果を報告する。

2. 検証実験測定方法

2.1 エンジン回転数計測システム

本検証実験にて使用したエンジン回転数計測システムは弊社で開発を行った『N-ECOMS(ネコムズ)』はNishimatsu - ECo Optimize Monitoring System（重機エコ最適化モニタリングシステム）の略で、エンジン回転数や位置情報、稼働時間から建設機械をモニタリングするシステムである。本実験では、エンジン回転数のみをモニタリングするものとした。

システムの全体構成は図-1に示す。



図-1 『N-ECOMS(ネコムズ)』システム構成

(1)エンジン回転数測定

エンジン回転数は各重機のエンジンと連動した回転部（フライホイールやオルタネータ）に反射シールをセットし、光ファイバーセンサにて照射し反射光を計測することでエンジン回転数を取得する。

取得したデータは無線通信 Wi-Fi または LTE 通信を利用し、表形式でデータを管理するリレーショナルデータベース MySQL に集約される。MySQL はクラウド環境下にあるため、スケーラビリティが高く1秒に1回送信されるデータを格納することが可能となる。

(2)燃料消費量測定

本検証実験にて実際に使用された燃料消費量の計測については満タン法を用いた。満タン法とは、重機へ燃料を満タンにしてから再度燃料を満タンにしたときの給油量を使用した燃料消費量を計算する手法である。

3. エンジン回転数削減における省燃費運転の効果

3.1 検証実験概要

本検証実験では、エンジン回転数削減における燃料消費量と作業効率の関係に着目した。0.8m³ 級

バックホウによる残土搬出ダンプトラックへの積込作業を対象とした。バックホウに前述したエンジン回転数計測システムを取付け、エンジン回転数を監視する。燃料消費量が給油量にて決定するため、作業時間は満タンから再度満タンまでにおける重機稼働時間とした。

作業エンジン回転数[rpm]を 10%下げたときの、エンジン回転数と燃料消費量の相関としてエンジン回転数[rpm]と燃費[L/h]、その際の作業効率として回転数[rpm]と作業量[m³/h]について調査した。

以下の回転数を 3 パターンに分けて実験を行った。最大回転数を基準とし、回転数 90%の定義については、無回転状態 0[rpm]とした時とアイドリング時の回転数 1050[rpm]を最低回転数とした時の 2 パターンの実験を行った。

- ①エンジン回転数 100% 1750[rpm]
- ②エンジン回転数 90% 1570[rpm]
(最低回転数を 0[rpm], 最大回転数 1750[rpm]とした時の 90%)
- ③エンジン回転数 90% 1670[rpm]
(最低回転数を 1050[rpm], 最大回転数 1750[rpm]とした時の 90%)

また、1 台あたりの 10t 積ダンプトラック作業量を計測した。作業に要する時間、0.8 m³ 級バックホウの積込回数をそれぞれ計測した。このとき、作業量[m³/h]への換算は、積載土砂の比重を 2.6 及びダンプトラックの積載重量を 10t として 1 回あたりの作業量を 3.8[m³]とした。

3.2 検証実験結果

3 パターンの回転数から得られた燃料消費量について表-1 に示す。

表-1 エンジン回転数ごとの燃料消費量

作業日	回転数 [rpm]	給油量[L] ※タガの給油	稼働時間[h]	燃費 [L/h]	平均燃費 [L/h]
Day1	1750	129	7.3	17.8	17.6
Day2	(0~1750rpmの100%)	118	6.7	17.5	
Day3	1570	73	6.4	11.5	10.8
Day4	(0~1750rpmの90%)	71	7.0	10.1	
Day5	1670 (1050~1750rpmの90%)	80	5.8	13.9	13.8
Day6		94	6.8	13.8	
Day7		88	6.4	13.8	

表-2 ではエンジン回転数が最大であるパターン①作業時から各パターンの燃料消費量削減率を示す。エンジン回転数をパターン①作業時からパターン③作業時にエンジン回転数を低下させたとき 21.8%(3.8[L/h])燃費が向上した。また、パターン①作業時からパターン②作業時にエンジン回転数を低下させたとき、38.7%(3.0[L/h]) 燃費が向上した。

およそ 100[rpm]下げると 3[L/h]程度の燃料消費量削減効果があることを確認した。

表-2 エンジン回転数ごとの燃料消費量削減率

作業日	回転数 [rpm]	エンジン回転数 削減率[%]	燃費 [L/h]	燃料消費量 削減率[%]	燃料消費量 平均削減率 [%]
Day1	1750	0	17.8	0.0	0.0
Day2	(0~1750rpmの100%)	0	17.5	0.0	
Day3	1570	10	11.5	34.9	38.7
Day4	(0~1750rpmの90%)	10	10.1	42.5	
Day5	1670 (1050~1750rpmの90%)	5	13.9	21.5	21.8
Day6		5	13.8	22.0	
Day7		5	13.8	21.8	

図-2 では 1 台あたりの 10t 積ダンプトラック作業量に要する作業時間[s]を 1 台あたりの積込土量 3.8[m³]にて除算したものを各エンジン回転数で比較したグラフを示す。エンジン回転数をパターン①作業時からパターン③作業時にエンジン回転数を低下させたとき平均 11.0%(12.5[m³/L])燃料消費量[L]あたりの作業量[m³/L]が低下した。パターン①作業時からパターン②作業時にエンジン回転数を低下させたとき、平均 18.4%(18.4[m³/L])燃料消費量[L]あたりの作業量[m³/L]が低下した。平均値から比較するとエンジン回転数を低下させることで作業効率は低下しているが、図-2 の全体ばらつきに着目すると特にパターン②作業時及びパターン③作業時ではデータばらつきが少ないように見受けられる。

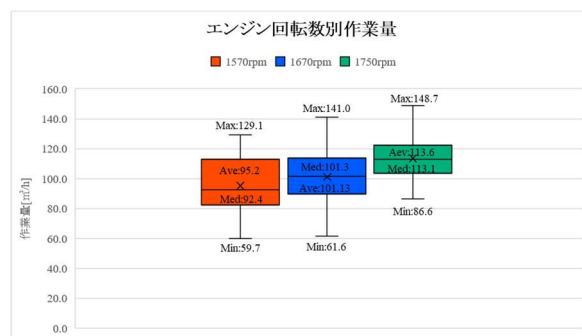


図-2 エンジン回転数別作業量

また、図-2 に燃料消費量を加えたグラフを図-3 に示す。

図-3 らはエンジン回転数が低下すると、燃費が向上していることが見て取れる。あわせて、積込回数が少ないほど作業効率がよい結果となっている。これらは、1 台あたりの積込時間にかきあげ作業も含まれていることが考えられる。先ほどの考察から、パターン②作業時とパターン③作業時には作業量[m³/h]のばらつきが同等であり、かつ図 4 からパターン②作業時はパターン③作業時より明確に燃費がよい。そのため、本検証実験で用いた 0.8 m³ 級バックホウでは最も燃費が良く、作業効率低下をより最小限に留められるエンジン回転数はパターン②作業時である 1570[rpm]を推奨されることが考えられる。

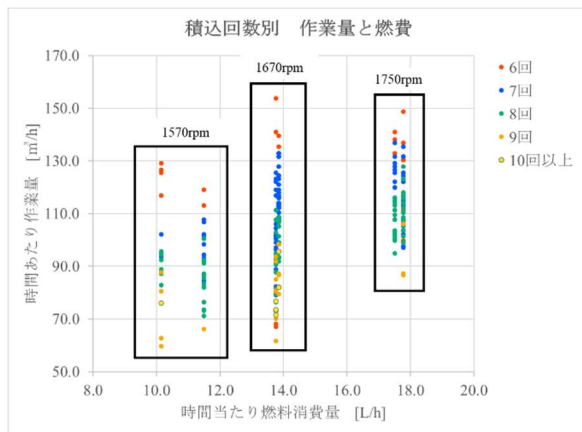


図-3 積込回数別 作業量と燃費

4. エンジン回転数が燃料消費量に与える影響について比較検証

4.1 比較検証実験概要

本検証実験では、エンジン回転数が燃料消費量に与える影響について検証するため、回帰分析を行った。また、比較対象として実際の燃料消費量及び機械の燃料消費率や稼働時間などから導出される燃料消費量を用いた。

対象は土砂積み込み用の1.4 m³級バックホウ、土砂運搬用の20t重ダンプトラック、搬入骨材仕分け用の2.0 m³級ホイールローダの3種類の重機とした。各重機にエンジン回転数計測システムの取付け、エンジン回転数の監視を行う。

4.2 回帰分析

回帰分析は、ある結果に関連する要因がどのくらい影響を与えているか、その因果関係を関数の形で明らかにする統計手法である。本実験では目的変数を燃料消費量、説明変数をエンジン回転数とし回帰分析を行った。式(1)に示すように y を目的変数、 x を説明変数とした一次関数を回帰することで係数 α 及び切片 β を探索する。

$$y = \alpha x + \beta \cdots \cdots \cdots (1)$$

式(1)を元に F を燃料消費量[L/日]、 E をエンジン回転数[rpm]として回帰し係数 α 、切片 β を求める。このときエンジン回転数を毎秒毎に計測しているため、 E (エンジン回転数)を作業時間において積分を行う。エンジン回転数が0[rpm]のとき燃料消費量は0[L]であることから切片 β は0である。よって、回帰式は式(2)となる。

$$F = \alpha \int E dt_0 \cdots \cdots \cdots (2)$$

式(2)から導出された係数 α 、切片 β (=0)、説明変数 E (エンジン回転数の積分)を式(1)に代入し、式(3)とし燃料消費量 F_r を求める。

$$F_r = \alpha \int E dt_0 \cdots \cdots \cdots (3)$$

燃料消費量 F_r を統計的に求めるために、目的変数(燃料消費量)と説明変数(エンジン回転数)の無次元化処理を行った。標準偏差等の各値において除算することで無次元化を行った。

4.3 推定燃料消費量

エンジンにおける燃料消費率 S [g/kWh]及び定格出力 P [kW]、動力負荷率 L 、重機稼働時間 T [h]、軽油比重 C [g/cc]から、燃料消費量 F_e を推定する。

$$F_e = (S \times P \times L \times T) / C \times 1000 \cdots \cdots \cdots (4)$$

消費率 S [g/kWh]: メーカー公称値, 定格出力燃料力 P [kW]:
 メーカー公称値, 動力負荷率 L : 機種や作業条件を考慮
 した1時間当たりの平均負荷率, 重機稼働時間 T [h], 軽
 油比重 C [g/cc]: 0.86[g/cc]

4.4 検証結果

実燃料消費量 F 、回帰分析により求めた燃料消費量 F_r 、推定燃料消費量 F_e を1.4 m³級バックホウ、2.0 m³級ホイールローダ、40t重ダンプトラックにおいて比較した。

図-4、図-5、図-6に各重機の燃料消費量比較を図に示す。特に図-5、図-6では実際の燃料消費量 F (赤線)と F_r (緑線)の波形に着目すると類似性が認められるため、燃料消費量とエンジン回転数は相互関係にあり比例関係に近いことが示される。また、図-4においては波形から推定燃料消費量 F_e と回帰燃料消費量 F_r の比例関係を確認した。これは、アクセルワークのないバックホウにおいて他の重機と異なり回転数に変動が少ないことが考えられる。そのため、式(3)及び式(4)より F_r 及び F_e どちらにおいても稼働時間[h]が影響していると考えられる。また、実際の燃料消費量との比例関係が他の重機2つと比べ弱いことが挙げられる。他重機と比べバックホウには前述の通りアクセルワークがなく、エンジンを動力に作用するのは油圧システムのみである。そのため、油圧システムへのエンジン回転数と燃料消費量関係には他の要素への検討が必要と考えられる。

また、各重機における実燃料消費量 F との相対誤差は、バックホウでは F と F_r の相対誤差29.11%、 F と F_e の相対誤差35.25%、ホイールローダでは F と F_r の相対誤差13.35%、 F と F_e の相対誤差370.36%、重ダンプでは F と F_r の相対誤差21.54%、 F と F_e の相対誤差55.95%であった。いずれにおいても、 F と F_r の相対誤差は20%前後(±10%以内)であり、 F_e よりも相対誤差が低く正確な値を示している。データ数を

増やし、回帰を繰り返し行うことでより正確な値を導出すると考えられる。

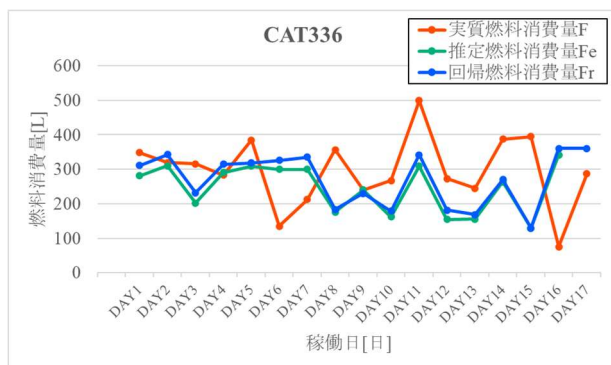


図-4 1.4 m³級バックホウ (CAT336) 燃料消費量比較

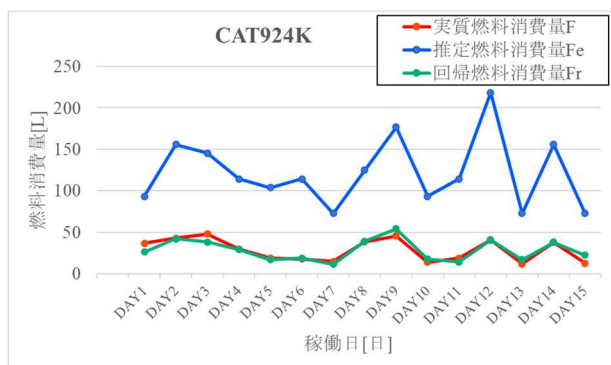


図-5 2.0 m³級ホイールローダ (CAT924k) 燃料消費量比較

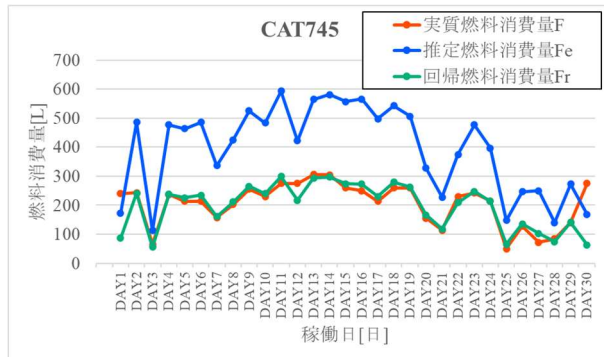


図-6 40t 重ダンプ (CAT745) 燃料消費量比較

5. 課題及び展望

本実験ではエンジン回転数に着目し、燃料消費量について検証を行った。今回の結果を受けて、重機の大きさや機種によらずエンジン回転数が燃料消費量に密接に関係することが認められた。また、比例関係も見取れることからメーカーや重機によらず、容易にかつ正確に燃料消費量を推定することが可能である。また、CO₂削減に向け作業効率が課題となるが、正確な燃料消費量を容易かつ正確に算出することが実現すれば、「施工性」や「コスト」面を考慮したシミュレーションが容易に行えるようになり CO₂削減に向けた取り組みが活発化することと思う。

作業効率との相関関係では0.8 m³級バックホウ、燃料消費量との相関関係では1.4 m³級バックホウ、2.0 m³級ホイールローダ、40t 積重ダンプトラックについて検証したが、まずはより多くの機種やメーカーについて検証し容易に扱えるデータを示したいと考える。

建設業界における CO₂削減には電動機械やハイブリッド機械の導入等、機械側で対策されることが多いが、本検証においてエンジン回転数の制御（＝省燃費運転）が、効果的であることが検証されたと考える。ユーザー（施工）側ができる対策である省燃費運転だが、今後は作業性と両立されるような手法が確立できる方法を模索していく必要がある。

参考文献

- 1) IPCC: Sixth Assessment Report/WG3,SPM B.1.2
- 2) 日本建設業連合会:「わたしたちにできる地球温暖化防止」, pp.10, 2019 年

28. 複合噴射攪拌式深層混合処理工法の出来形確認ならびに 環境負荷低減に関する検証

三信建設工業株式会社
三信建設工業株式会社
三信建設工業株式会社
株式会社エヌ、アイ、テイ

○山口 洋
島野 嵐
熊田 大地
中西 康晴

1. はじめに

スラリー攪拌工法に代表されるセメント系固化材を用いた深層混合処理工法は、我が国で開発された代表的な軟弱地盤対策工法であり、多くの実績を有している。近年の建設市場における工期短縮や工費削減といったニーズの増加に伴い、改良径の大口径化が求められている。これを実現するためには、ベースマシンやスラリープラントの大型化、セメントスラリーの注入時間や攪拌時間の増加などが課題となっている。筆者らはこれらを鑑み小型地盤改良機に高圧噴射攪拌工法の技術を応用し、大口径・高速施工による施工効率の向上を可能とした複合噴射式大口径深層混合処理技術のHCM工法（Hybrid Control Mixing Method）を開発した。本稿では実大実験での改良体の出来形確認結果を述べると共に、地盤改良体造成に伴うCO₂排出量を従来工法と比較し、大口径化ならびに高速施工による排出量低減効果を示す。

2. 工法概要¹⁾

本工法は、写真-1に示す25tクラスの小型地盤改良機にて、固化材スラリーを高圧噴射できる特殊ノズルと攪拌翼を組み合わせた写真-2に示す攪拌装置を用いて噴射攪拌を行うことで、φ2,000mmクラスの大口径改良体を造成可能な深層混合処理工法である。また、本工法はこの攪拌装置を用いることで、図-1に示す2タイプ（M1、M2）を選択できる。M1タイプは、2段の攪拌翼（上段φ1,600mm、下段φ1,200mm）を有し、下段翼下部に位置した噴射ノズルから下段翼外周部に向けて固化材スラリーを噴射する。さらに下段翼外周から上段翼外周部に向けて固化材スラリーを噴射する。M2タイプは、2段の攪拌翼（上段φ1,600mm、下段φ1,200mm）を有し、下段翼下部に位置した噴射ノズルから下段翼外周部に向けて固化材スラリーを噴射する。さらに下段翼外周から上段翼外周部に向けて固化材スラリーを噴射する。上段翼

の外周部には外側に噴射できるノズルを装備して、最大2,400mmでより大きな改良体の造成ができる（拡張施工）。各タイプの改良体出来形を写真-3に示す。

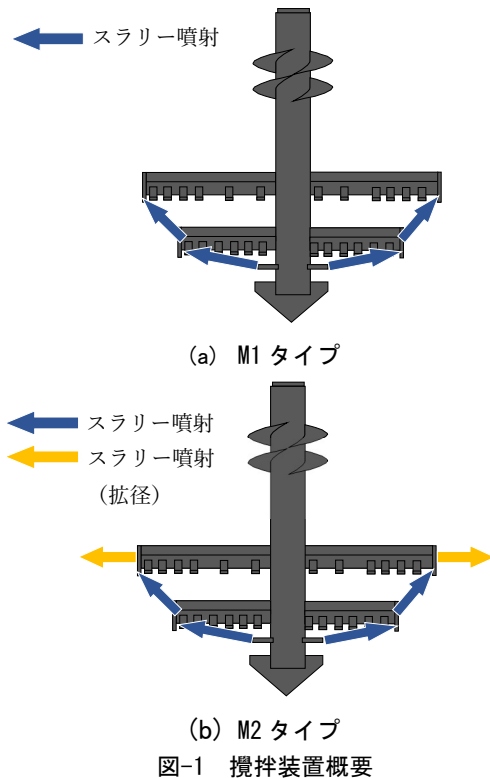
次に本工法の施工時の周辺環境への影響を、孔内傾斜計および地表面の動態観測により測定した結果を図-2に示す。測定位置は図-2(a)に示す通りで孔内傾斜計の下端は硬質粘性土に固定し不動点とした。地中変位は図-2(b)に示す通り、M1・M2タイプともに改良体の外周から1.0m離れた位置で最大4mmであった。図-2(c)に示す地表面変位についてはM1タイプは改良体外周部から2.0m離れた位置で3mm、M2タイプは変位は見られなかった。これは攪拌装置上部に装備した排土を促すパイラルスクリー、さらには固化材スラリーの高圧噴射により土の細粒化・土の泥濁化などにより、盛上り土がスムーズに排出されたことによるものであり、地中や地表面の変状が少ない低変位工法であることが確認されている。



写真-1 施工機全景



写真-2 攪拌装置全景



(a) M1 タイプ



(b) M2 タイプ

写真-3 改良体出来形

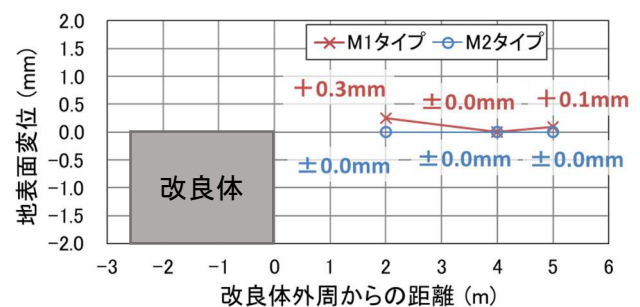
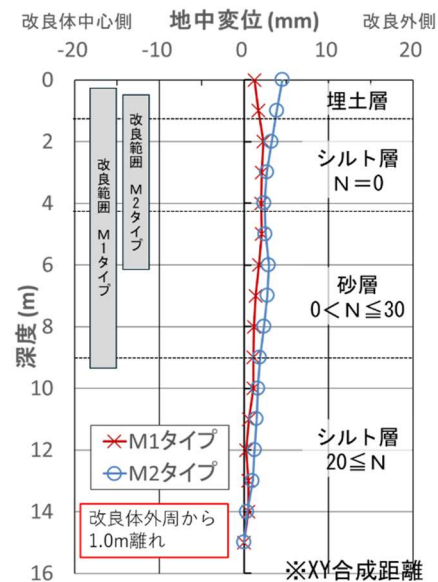
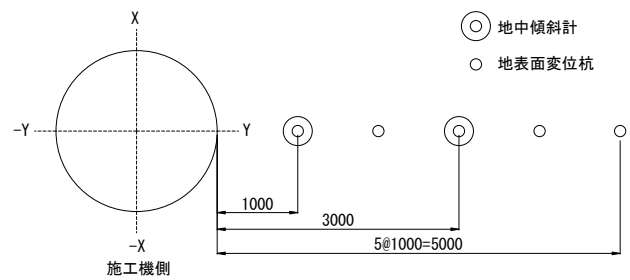


図-2 地中・地表面変位 測定結果

3. 実大実験による出来形確認²⁾

3.1 実大実験概要

実大実験では、実験土槽内に人工的に作製した地盤にて、改良体の造成を行い、養生後に改良体を掘り出し、改良体出来形・品質を確認した。出来形確認では、3D スキャナーを用いて改良体の点群データを取得し、改良径を計測した。品質確認では、改良体の断面に対して針貫入試験を実施し、換算一軸圧縮強さを計測した。本実験で用いた実験土槽の寸法は、平面 6 m×8 m、深さ 4.5 m である。作製した人工地盤の土質は火山灰質粘性土であり湿潤密度 1.43 g/cm³、含水比 33%、SWS 試験結果からの換算 N 値は 2<N≤4 であった。施工仕様は表-1 に示す通り本工法の標準仕様¹⁾と固化材添加量より、貫入時間を 1.7 分/m とし、引上時間は概

ね下限値である 2.1 分/m と上限値の 3.0 分/m を採用し、上下 1 m で施工仕様を変更とした。

表-1 実大実験 施工仕様

施工タイプ		M2 タイプ
改良径	外径	φ 2,400 mm
	内径	φ 1,600 mm
攪拌翼径		φ 1,600 mm
改良長		2,000 mm
改良材噴射圧力		35 MPa
改良材吐出量		320 L/分
水セメント比		80%
貫入時間		1.72 分/m (0.58 m/分)
引上時間	上部	3.03 分/m (0.33 m/分)
	下部	2.13 分/m (0.47 m/分)
回転数 (貫入)		25 rpm
回転数 (引拔)	上部	35 rpm
	下部	25 rpm

3.2 実験結果

改良体の出来形確認では、掘削により改良体を露出させ、3D スキャナーにより改良体をスキャンし、点群データを取得した。掘削後の改良体を写真-4、改良体の点群データを図-3 に示す。取得データは点群処理ソフトを用い、深度方向に 10 cm 間隔の断面を作成した。各深度の改良径は、等角度で 8 分割した箇所で中心から外周までの距離を計測し、その最小値を半径とした。各深度の改良径の計測結果から描いた改良体概形を図-4 に示す。

計測結果より、改良径は上部 1 m の区間：φ 2,412 ~ 2,616 mm，下部 1 m の区間：φ 2,408 ~ 2,588 mm で、計画改良径 φ 2,400 mm 以上であり、引上時間の長い方が若干大きく、いずれの深度も設計径に対して、+10%以内で制御することができた。



写真-4 掘削した改良体（側面）

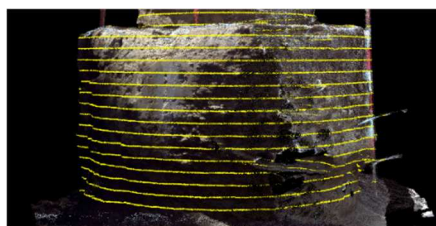


図-3 改良体の点群データ（側面）

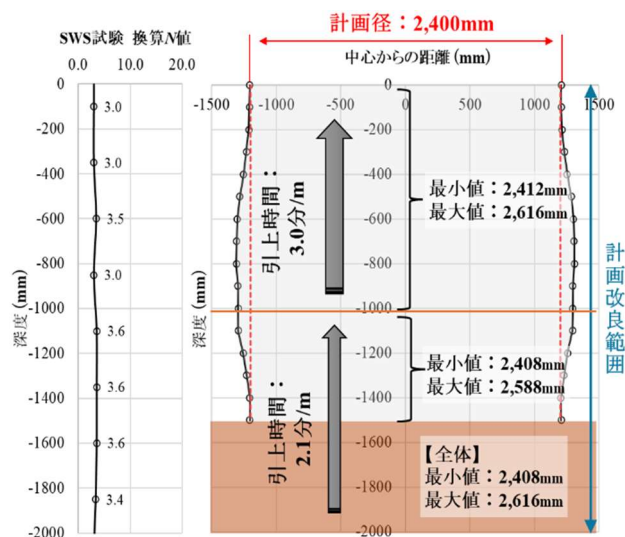


図-4 改良体概形図
(左：SWS 試験，右：改良体断面)

3.3 品質確認

改良体の品質確認では、ワイヤーソーを用いて、掘削した改良体を深度方向に垂直に切断し、改良体断面を露出させた。

この断面において、同一仕様にて施工した上部 1 m 区間の改良上端から -200 ~ -600 mm の深度にて、改良体断面を縦横 200 mm × 200 mm で 15 分割し、写真-5 に示すように軟岩ペネトロ計を用いて針貫入試験を実施し、換算一軸圧縮強さを測定した、試験結果および換算一軸圧縮強さの変動係数を表-2 に示す。また、換算一軸圧縮強さと改良体中心からの距離との関係を図-5 に示す。

換算一軸圧縮強さは 1,500 ~ 3,500 kN/m² の範囲に分布しており、内径部と拡張部の平均値は同程度であった。また、換算一軸圧縮強さの変動係数は、31.1% (内径部：33.2%，拡張部：27.8%) であり、一般的なスラリー攪拌工法の変動係数 25 ~ 35% の範囲³⁾と同等の品質を有していることを確認した。

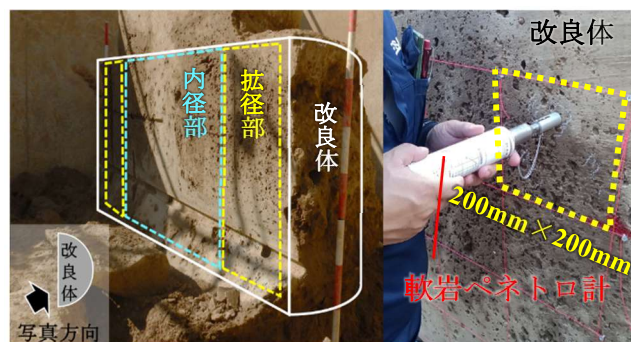


写真-5 改良体断面と針貫入試験状況

表-2 針貫入試験結果と変動係数

箇所	検体数 (個)	換算一軸圧縮強さ (kN/m ²)		変動 係数
		平均値	標準偏差	
全体	90	2,517	783	31.1%
内径部	54	2,501	830	33.2%
拡張部	36	2,542	706	27.8%

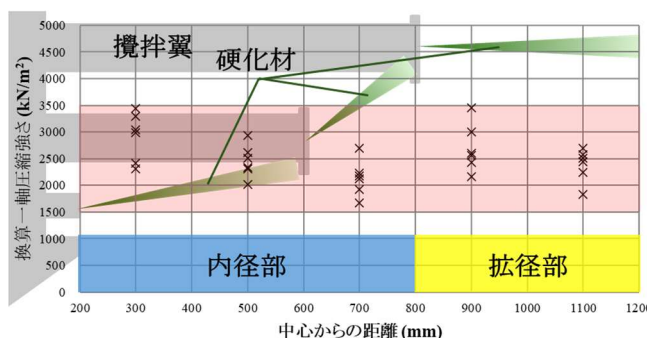


図-5 換算一軸圧縮強さと改良体中心からの距離の関係

4. 環境負荷低減に関する検証

本工法は、従来のスラリー攪拌工法と比較して低出力の小型施工機適用と大口径化・高速施工による施工プロセスの最適化により CO₂ 排出量を削減できる。本章では表-3 に示すように改良径の異なる従来のスラリー攪拌工法と本工法の M1, M2 タイプの 5 タイプによる改良長 15 m とした場合の改良土量 1 m³ あたりの燃料消費量を比較した。表-3 に示す通り施工機械の機関出力が同程度なので燃料消費量に大きな差はないが、表-3 および図-6 に示す通り 1 日当り施工土量が最大で 4 倍程度になることから改良土量 1 m³ 当り燃料消費量は図-7 に示す通り従来工法と比較して M1 タイプで最大で 1/3 程度、M2 タイプで最大で 1/4 程度となり環境負荷低減に寄与していることを確認した。

表-3 施工能力・燃料消費量比較表

工法種別		スラリー攪拌工法			HCM工法	
					M1	M2
改良径	(m)	1.00	1.60	2.00	1.60	2.40
機関出力	(kw)	90×1	90×1	90×2	92×1	92×1
機械質量	(t)	76.8	76.8	129	25.5	25.5
改良面積	(m ²)	0.79	2.01	3.14	2.01	4.52
施工本数 ^{1) 4)}	(N/日)	5	5	4	6.5	3.4
施工土量	(m ³ /日)	59	151	189	197	231
燃料消費量 ^{1) 4)}	(L/日)	52	52	83	51	51
	(L/m ³)	0.88	0.34	0.44	0.26	0.22

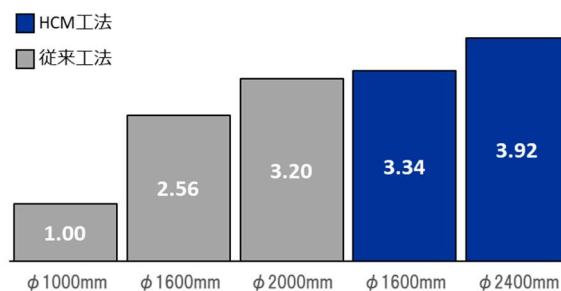
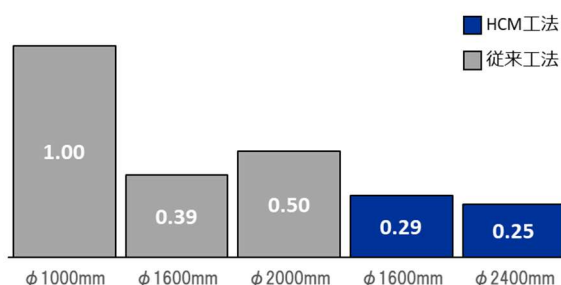


図-6 1 日当り施工土量の比較

図-7 改良土量 1m³ 当り燃料消費量の比較

5. まとめ

複合噴射式大口径深層混合処理技術の HCM 工法 (Hybrid Control Mixing Method) は最大 φ2,400 mm の大口径改良体を造成可能であり、地盤変位は少なく周辺環境への影響が少ない工法である。実大実験による出来形確認ならびに環境負荷低減に関する検証を実施した結果、出来形確認では、造成した改良体は計画改良径 φ2,400 mm 以上であり、設計径に対して、+10%以内で制御できることを確認した。品質確認では、換算一軸圧縮強さは 1,500~3,500 kN/m² の範囲に分布し、内径部と拡張部の平均値は同程度であり、変動係数については一般的なスラリー攪拌工法と同等の品質を有していることを確認した。環境負荷低減に関する検証として改良土量 1 m³ 当り燃料消費量の比較を行った結果、従来工法と比較して、M1 タイプで最大で 1/3 程度、M2 タイプで最大で 1/4 程度となり環境負荷低減に寄与していることを確認した。

参考文献

- 1) 複合噴射攪拌協会：HCM工法技術・積算資料（第1版）.2024.
- 2) 熊田大地，山口洋，中西康晴：複合噴射攪拌式深層混合処理工法の施工性および改良体出来形・品質確認，第60回地盤工学研究発表会，p.23-3-1-04，2025.
- 3) 地盤工学会：地盤改良効果の予測と実際，pp.215-216，2000.
- 4) （一財）建設物価調査会：国土交通省土木工事積算基準，pp.48-56，2025.

29. 建設現場におけるカーボンニュートラルに向けた取組について

国土交通省大臣官房参事官（イノベーション）グループ施工企画室
国土交通省大臣官房参事官（イノベーション）グループ施工企画室

○ 伊藤 彩也香
中根 亨

1. はじめに

環境問題への関心が高まる中、地球温暖化を抑制し、持続可能な社会を実現するための取組が世界中で進展している。特に「カーボンニュートラル」は、温室効果ガス排出の削減を目指す最も重要な目標として、国際的にも注目を集めている。2023年には日本においても、「脱炭素成長型経済構造への円滑な移行の推進に関する法律」（GX 推進法）が成立し、脱炭素社会の実現に向けた政策が加速している。この法律は、経済成長と環境保護を両立させるための枠組みを提供し、特に公共部門での先進的な取組が強調されている。

こうした動向は建設分野にも大きな影響を与えている。日本の CO2 排出量全体の概ね 3 分の 2 がインフラ分野に関連しており、その中でも建設業界が果たす役割は極めて大きい。特にインフラ分野の建設段階における CO2 排出量が建設機械からの直接排出とサプライチェーンを通じた間接排出を含めて、約 13% となっている。しかしながら、インフラ分野の建設段階における脱炭素化は民間に委ねられており、計画的な取組はなされていなかった。そこで、国土交通省では、建設現場におけるカーボンニュートラルの実現を目指し、「国土交通省土木工事の脱炭素アクションプラン」¹⁾（以下アクションプラン）を 2025 年 4 月に策定・公表した。本プランは地球温暖化対策計画や品確法改正を踏まえ、建設分野における CO2 排出削減のための具体的なロードマップを示すものである。本稿では、アクションプランの全体像と施策内容について述べるとともに、これまでの取組と現在行っている取組、今後の展望を述べる。

2. アクションプランについて

アクションプランは、国土交通省が発注する土木工事における CO2 排出削減を推進するための包括的な施策を定めたものであり、本プランにおいては、CO2 排出削減方針（図-1）、リーディング施策（図-2）、脱炭素化に向けたロードマップを示している。

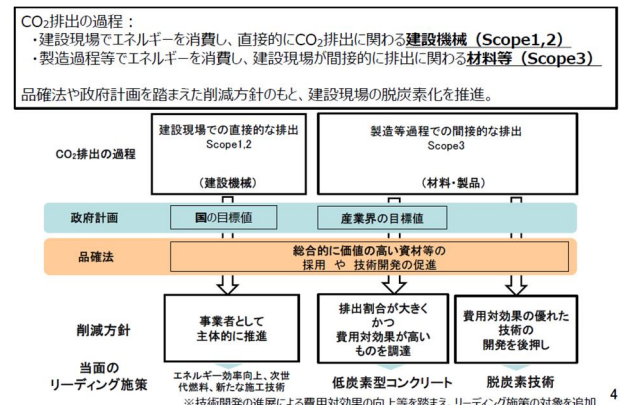


図-1 アクションプランにおける CO2 削減方針

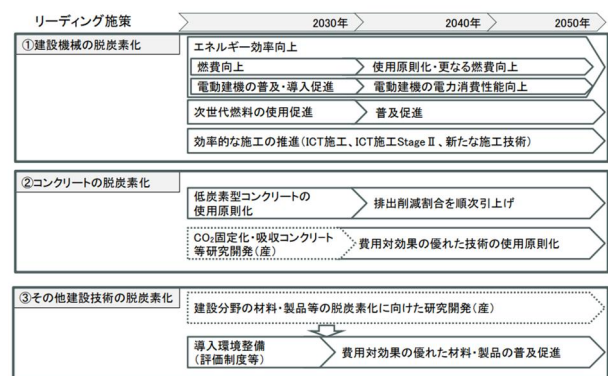


図-2 アクションプランのリーディング施策

CO2 排出削減方針については、直接的に CO2 排出に関わる建設機械のエネルギー消費（Scope1,2）を削減するために、エネルギー効率の高い建設機械や次世代燃料の導入を進め、また材料の製造過程や運搬などのエネルギー消費による間接的な排出（Scope3）を削減するために、低炭素コンクリートや環境負荷の低い材料を調達する方針が定められている。

この方針を踏まえ、リーディング施策として、「建設機械の脱炭素化」「コンクリートの脱炭素化」「その他の建設技術の脱炭素」の 3 つが位置付けられている。建設機械の脱炭素化を促進し、施工効率を高める新技術の導入、さらに脱炭素技術の普及を後押しするために、インセンティブ制度や技

術開発支援を強化していくこととしている。最後に、ロードマップでは、短期から長期にかけて段階的な目標を設定し、地球温暖化対策計画に定められている2030年、2035年、2040年に向けた排出削減計画と連動させて、技術開発の進展や市場の変化に応じて柔軟に施策を見直し、実行していくこととしている。

以下では、1つめのリーディング施策である「建設機械の脱炭素化」について詳しく述べる。

3. 建設機械の脱炭素化

アクションプランでは、建設機械の脱炭素化に向けて、「燃費の向上や電動化によるエネルギー効率の向上」、「ICT施工や建設現場のデジタル化・見える化、チルトロータータ等の新たな施工技術の活用による施工の効率化」、「次世代燃料の活用促進」を図ることとしている。これらの取組について、以降順に紹介する。

4. 燃費向上・エネルギー効率向上に向けた取組（各種建設機械認定制度）

国土交通省 大臣官房 参事官（イノベーション）グループ 施工企画室では、これまでも脱炭素化に向けていくつかの建設機械認定制度を運用してきた（図-3）。具体的には、低炭素型建設機械認定制度、燃費基準達成建設機械認定制度、GX建設機械認定制度である。

4.1 低炭素型建設機械認定制度

燃費性能の優れた建設機械の普及を目的とし、軽油ディーゼルエンジンと蓄電池を搭載したハイブリッド機構等の建設機械を認定していた。本制度は、平成22年度に認定を開始し、令和6年5月には新規認定を停止している。令和4年3月までに計51型式を認定している。

4.2 燃費基準達成建設機械認定制度

燃費基準達成建設機械への関心と理解を深め、二酸化炭素排出低減に資する燃費基準達成建設機械の普及促進を図るとともに、地球環境保全に寄与することを目的に燃費基準達成建設機械認定制度を運用している。

燃費基準達成建設機械認定制度の燃費基準値を達成した建設機械を型式認定しており、認定された建設機械はラベル表示が可能となる。

現行燃費基準値（2020年基準値）は、各クラスにおけるエネルギー消費効率が最も優れている建設機械の値（トップランナー値）を採用した。次期燃費基準値（2030年基準値）は、従前のトップランナー値を考慮しつつ、普及台数等を考慮して燃費性能が良くかつ普及しやすい、バランス（燃費性

能、導入コスト、施工性等）のとれた基準値を設定している。

本制度は平成25年4月より油圧ショベル、ブルドーザ、ホイールローダの認定制度を開始し、令和4年4月よりホイールクレーンの認定制度を開始した。以上4機種については、令和7年8月末時点で計201型式を認定している状況である。

認定の対象となる建設機械の普及率は、令和4年において、油圧ショベル29%、ホイールローダ6%、ブルドーザ16%であり、CO2排出削減量は12.4万t-CO2である²⁾。燃費基準達成建設機械の普及率は、平成29年から一貫して上昇している。

4.3 GX建設機械認定制度

カーボンニュートラルに資するGX建設機械の普及を促進し、以て建設施工において排出される二酸化炭素の低減を図るとともに、地球環境保全に寄与することを目的にGX建設機械認定制度を運用している。電動建機（有線式、バッテリー式）の型式認定を受けた建設機械は認定ラベル表示が可能となる。

本制度は令和5年10月より油圧ショベル、ホイールローダ、ホイールクレーンの認定制度を開始した。以上3機種については、令和7年8月末時点で計21型式を認定している。

本制度は、電動建機市場が十分に成熟した後の制度検討では、制度創設時期が著しく遅くなりかねないため、令和5年の認定制度創設時には電力消費量（電費）基準を設けない暫定規程という形で早期制度創設を図っており、2030年頃を目途として追って電費基準を設定する恒久規程に移行する予定である。

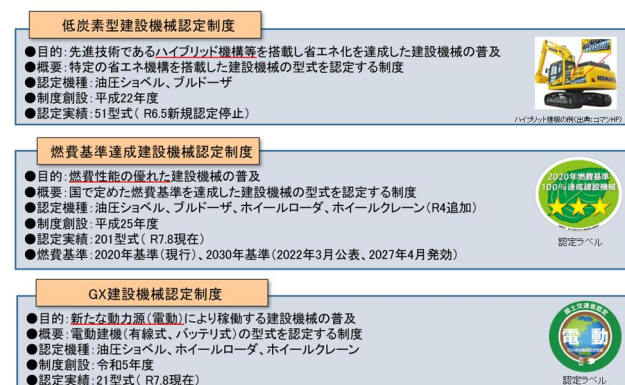


図-3 各種建設機械認定制度

4.4 今後の取組

燃費向上については、燃費基準を段階的に強化し、燃費性能向上に係る技術開発を促すための「燃費基準達成建設機械」の認定制度を継続的に進めていく。現行の2020年基準から引き上げた、次期の2030年基準を2027年4月から発効し、更なる燃費向

上を目指した基準の検討を行う予定である。また、他の機種種の認定型式についても普及状況等を鑑み、順次使用原則化の検討を行う。さらに、アクションプランでは、2030年度頃を目途に燃費基準達成建設機械の認定型式のうち油圧ショベルについて、直轄工事における使用原則化を行うことを掲げている。使用原則化にあたっては、現行の燃費基準達成建設機械認定制度においては、燃費試験を実施した日以降しか認定適用日を設定できなかったが、令和7年4月に認定適用日を任意で設定できるように改正し、既出荷の未申請型式を改めて申請可能とする改正を行った。また、2030年度を目途とした直轄工事の使用原則化では、燃費基準達成建設機械認定型式に代えて、低炭素型建設機械認定型式やGX建設機械認定型式も使用可能とする予定である。

電動建機については、普及促進を図るために2023年度にGX建設機械認定制度を創設し、2024年度から同制度の認定型式の購入への補助金制度を関係省庁と連携し創設した。同制度においてエネルギー効率の良い電動建機を認定・普及促進すべく、電力消費量基準値を、2030年度を目途に設定することとしている。また、直轄工事において、令和7年度より導入促進のためのモデル工事を実施している。電動建機の工事現場での使用にあたっては、エンジンの静音性により夜間工事を積極的に行えることや、周辺環境への負荷が軽減されることがメリットとして考えられる。一方で、従来機に比べ建設機械の連続稼働時間が短いことや、充電作業が必要になること、さらに建設機械のレンタルでの調達が難しいといった課題も明らかになっている。今後はこれらの課題を踏まえた上で、GX建設機械の活用工事の推進に向けた検討を進めてまいりたい。

5. 新たな施工技術の活用による施工の効率化

機械施工におけるCO2排出量の削減は、建設業が脱炭素社会の実現に貢献するうえで不可欠な課題となっており、その手段としては、単に動力源を従来の化石燃料から電動式やバイオ燃料、合成燃料などの環境負荷の少ない代替エネルギーに転換するだけでなく、施工プロセス全体を見直し、無駄を省いてエネルギーの使用効率を高める「施工の効率化」が重要である。

この「施工の効率化」とは、例えば、作業手順や稼働計画の最適化、ICT建機や自動化技術の活用による精度向上、アイドリングの削減、稼働時間の適正化、現場内の資機材や人員の配置の見直しなど、多岐にわたる改善策を含む（図-4）。これらの施策を通じて、無駄な稼働や燃料の浪費といった「ロス」を減らし、1つの工程あたりに必要なエネルギー

消費量を低減することで、結果としてCO2排出量の削減につながる。

さらに、これらの効率化は環境面のメリットだけでなく、施工期間の短縮やコスト削減、労働負担の軽減といった経済的・人的なメリットも併せ持つため、持続可能な建設現場の構築に資する多面的な効果をもたらすものである。今後は、施工データの活用による見える化やフィードバック体制の構築により、機械施工のPDCAサイクルを強化し、より高度な効率化と排出量削減を両立させていくことを目指していく。

5.1 ICT施工

ICT施工は、ICTを活用することで建設現場の生産性向上を目指す取組である。作業装置の施工を自動化するマシンコントロール等のICT建設機械は、施工の効率化に効果的であり、現場条件にもよるが従来機と比較して土工での機械稼働時間を約3割削減することができることがわかっている。

アクションプランでは、令和7年度より、直轄工事において土工及び河川浚渫工よりICT施工の原則化を行うこととしている。その他の工種についても順次原則化を拡大する予定である。

今後は更に進んだ取組として、ICTにより建設現場における建設機械の位置情報や稼働状況、施工履歴など様々な情報（施工データ）をリアルタイムに集約し活用することで、建設現場のデジタル化・見える化を進めるとともに、必要な資機材配置や作業工程などを見直すことで作業の効率化を図る取組（ICT施工StageII）の普及を促進していく³⁾。

5.2 省人化施工（チルトローテータ）

さらに、チルトローテータ等による新たな施工技術の活用の促進も期待されている。チルトローテータとは、油圧ショベル（バックホウ）などの建設機械の先端に取り付けるアタッチメントで、「チルト（傾ける）」と「ローテート（回転する）」の機能を組み合わせた装置である。チルトローテータを活用することで、狭小な現場での掘削や小規模土工を中心として省人化効果が期待される。通常建機とチルトローテータによる管路設置の床掘施工（都市部の小規模工事）を想定した施工の比較実験を実施したところ、建設機械の切削面に対する正対のための移動減少や稼働時間削減により、燃料消費量にも効果があることがわかった。作業内容で見ると掘削・埋戻しの短縮効果が高かった。このような、新たな施工技術の活用を促進することで施工の効率化を推進し、CO2排出削減に寄与させていく。

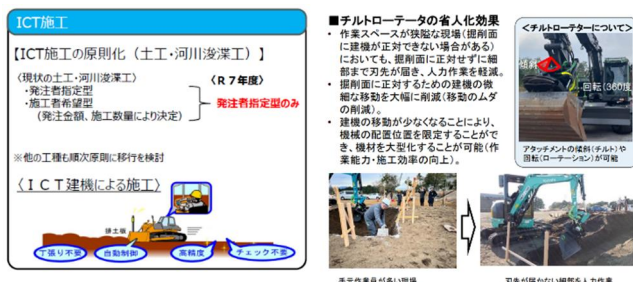


図-4 新たな施工技術の活用による施工の効率化

6. 次世代燃料の活用

カーボンニュートラルの達成に向けては、CO2排出量の大きい化石燃料の使用を可能な限り削減することが求められており、その中で軽油に代わるクリーンなエネルギー源として、バイオ燃料や合成燃料などの活用が強く期待されている。再生可能資源を原料とするこれらの代替燃料は、既存の内燃機関技術を活用しながらも、ライフサイクル全体での温室効果ガス排出量を大幅に低減できる可能性があるため、移行期における実効性の高い選択肢とされている。例えば、バイオ燃料の一種であるHVO（Hydrotreated Vegetable Oil）は、廃食油や植物油などを水素添加分解することで生成される次世代バイオディーゼル燃料であり、従来の軽油と物理的・化学的性質が非常に近いため、代替燃料として使用可能であるという利点を有する。この特性から、HVOは建設機械やトラックといった陸上輸送部門にとどまらず、航空分野では持続可能な航空燃料（SAF：Sustainable Aviation Fuel）として、また船舶分野では代替船用燃料としての利用も進められており、エネルギー転換を支える重要な技術として注目が高まっている。アクションプランでは今後、このような次世代燃料を土木工事において導入促進するため、直轄工事でのモデル工事を実施することとしている。

7. ロードマップ

以上の「建設機械の脱炭素化」に向けた取組について、ロードマップを示す（図-5）。政府の計画である地球温暖化対策計画には、2030年目標、2035年目標、2040年目標が定められており、また、2027年度に排出権取引の開始が予定されている。これらの政府の計画と整合を図りながら、短期・中期・長期のロードマップに基づき各取組を進めていく。なお、これらの内容は、現時点での想定であり、今後の技術開発の状況等に応じて適宜見直すものとする。



図-5 「建設機械の脱炭素化」に向けたロードマップ

8. おわりに

本稿では、「国土交通省土木工事の脱炭素アクションプラン」について、リーディング施策の1つである「建設機械の脱炭素化」における取組について紹介した。建設現場における脱炭素化は、気候変動への対応や環境負荷の低減といった地球規模の課題に対し、持続可能な社会資本の整備・維持管理を実現するために極めて重要な取組である。その実現には、建設機械の脱炭素化が不可欠であり、これらの取組は建設業界のカーボンニュートラルを効果的に推進するものとして期待されている。現在、先進的な取組を行う技術者により、「試行」段階から「実現場適用」への移行が進んでおり、建設現場での脱炭素化は大きな変革期を迎えている。今後は、社会実装と技術開発を一体的に推進し、脱炭素化と生産性向上の両立を目指すことが求められる。今後も、地球温暖化対策計画の目標達成を目指して、建設現場における脱炭素化に向けた取組を推進していく。

業務委託先の開示

本報文にて報告した検討を実施するにあたり、基礎的な情報収集及び資料整理の一部を日本建設機械施工協会及び先端建設技術センターに業務委託して行った。

参考文献

- 1) 国土交通省：国土交通省土木工事の脱炭素アクションプラン ～建設現場のカーボンニュートラルに向けて～、2025.4
- 2) 環境省：中央環境審議会地球環境部会地球温暖化対策計画フォローアップ専門委員会・産業構造審議会産業技術環境分科会地球環境小委員会 合同会合（第2回）、2024.5
- 3) 国土交通省：ICT導入協議会（第21回）、2025.7

30. 油圧ショベル用エリア限定型自動停止システム

鹿島道路株式会社 技術開発本部 機械部 ○大竹 元志
齋藤 光陽

1. はじめに

油圧ショベルを使用する現場では、架空線など上空障害物との接触事故が後を絶たない。その対策として、危険箇所への注意喚起を目的としたのぼりの設置や監視者の配置、また接触事故の防止を目的とした安全装置や自動停止機能を備えた油圧ショベルを現場条件に合わせて使用している。

しかし、接触事故を完全に排除するには至っていない。その主な要因はヒューマンエラーである。作業に集中するあまり上空障害物の存在を失念する、周囲の変化に気を取られてしまい判断が遅れる、安全装置やシステムの電源入れ忘れるなど、事故につながる懸念があった。

そこで当社では、こうした状況に対応するため、現場内の限定されたエリア内において、あらかじめ設定したブーム角度に達すると警報を発する「エリア限定型警報システム」を開発した。

本稿では、この安全システムに新たに自動停止機能を追加したことによる成果を紹介する。

OFF となり、設定角度に達しても警報は発せられない。このように、このシステムは必要な場所で、必要な条件に達した時のみ警報を発し、従来システムが抱えていたヒューマンエラーに起因する課題を解決することが可能となる。

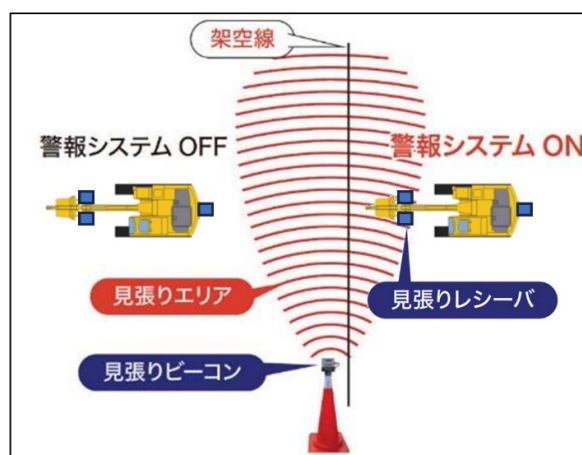


図-1 エリア限定型警報システム作動イメージ

2. 概要

油圧ショベルに採用されている既存の安全装置は、上空障害物の有無に関わらず、事前に設定したブーム角度に達すると作動してしまう。そのため接触の危険性がない場所でも警報が鳴り作業の妨げとなるため、オペレータが電源を切ってしまうことがある。その結果、本来警報が必要な場所で電源を入れ忘れ、システムが機能しないまま作業を行うという事態が生じてしまう。

また、警報型の安全システムでは、オペレータが警報を聞いてから反応するまでにタイムラグが生じ、衝突を避けきれない課題も残されている。

3. エリア限定型警報システム

今回紹介するエリア限定型警報システムは、現場内に設置したビーコンによって設定されたエリア(図-1にある「見張りエリア」)内に油圧ショベルが侵入すると、システムの電源が自動でONとなり、傾斜センサの角度が事前に設定した角度に達すると警報を寄せられる仕組みである。一方、油圧ショベルがエリア外に出るとシステムは自動で

3.1 機器構成

本システムは、現場で実績のあるブーム角度を監視する傾斜センサを基に開発した。これにより、見張りビーコンと見張りレーザバ、無線受信機を追加する形で構成される。機器構成を図-2に示す。

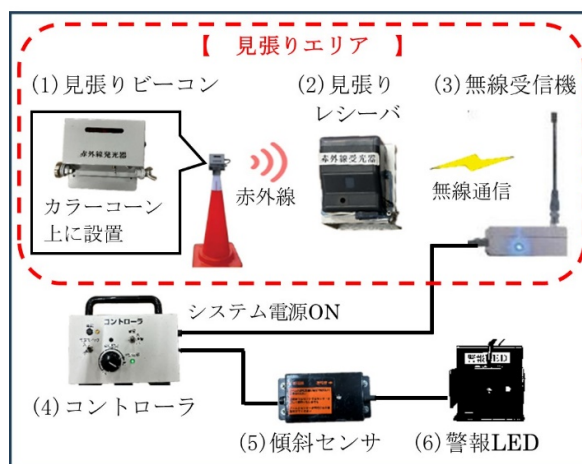


図-2 機器構成

(1) 見張りビーコン

赤外線発光器とバッテリーで構成されており、重機に取り付けられた見張りレシーバと組み合わせて使用することで、安全システムの見張りエリアを構成することが可能となる。

また、見張りビーコンはカラーコーンの上部や単管パイプなど、現場内の任意の場所に設置できる。障害物が点在する現場では、見張りビーコンを追加することで、より広範囲をカバーすることが可能である。さらに、雨や砂塵の影響も受けにくく、悪条件下でも使用できる。

(2) 見張りレシーバ

見張りビーコンが発する赤外線を受光する受光器であり、無線送信機とバッテリーで構成されており、強力磁石で重機に取り付けて使用する。

(3) 無線受信機

コントローラと接続し、見張りレシーバからの信号を受信することで、システムの電源を自動でON/OFFする役割を担う。

(4) コントローラ

傾斜センサの角度設定ボリューム、警報器、バッテリーで構成される。ボリュームを操作することで、警報を発する角度を指定することができる。

(5) 傾斜センサ

ブームに設置され、傾斜角度を監視する。

(6) 警報 LED

オペレータから見やすい位置に取付けし、ブームがコントローラで設定した角度に達すると、赤色 LED が点灯し、オペレータに危険を知らせる。

3.2 検知エリア

見張りビーコンが構成する見張りエリアを図-3に示す。このエリアには長距離モード(最大 幅 16m × 長さ 19m)と短距離モード(最大 幅 9m × 長さ 12m)の2種類があり、現場状況に応じて使い分けることが可能である。エリアの構築に赤外線を用いているため、周囲の建物などの構造物に反射しやすいという特徴がある。したがって、広い場所では長距離モード、狭い場所では短距離モードを選択することで、赤外線の反射によるシステムの誤作動を抑制できる。

見張りレシーバの検知範囲を写真-1に、重機への取付け状況を写真-2に示す。見張りレシーバは4つの赤外線受光センサを備えており、これにより正面 270° の広範囲を検知することが可能である。また、見張りビーコンが発する赤外線が見張りレ

シーバに受光死角を生じさせないように、見張りレシーバをアームの左右両側と車体後方の計3箇所に取り付ける。

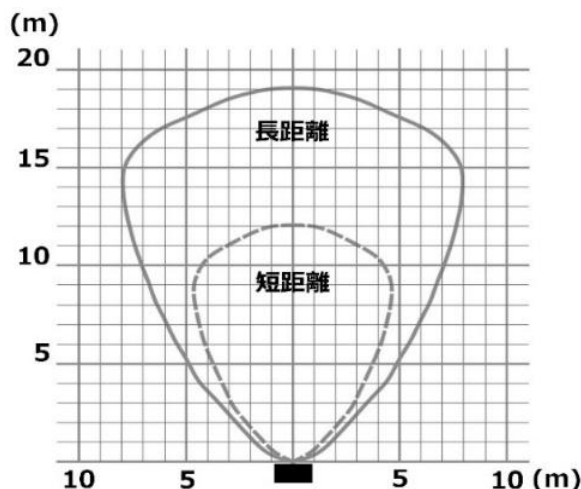


図-3 見張りビーコン構成する作動エリア

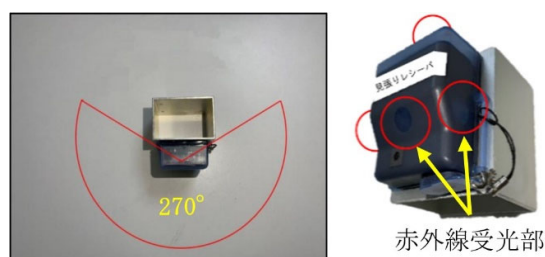


写真-1 見張りレシーバ検知範囲

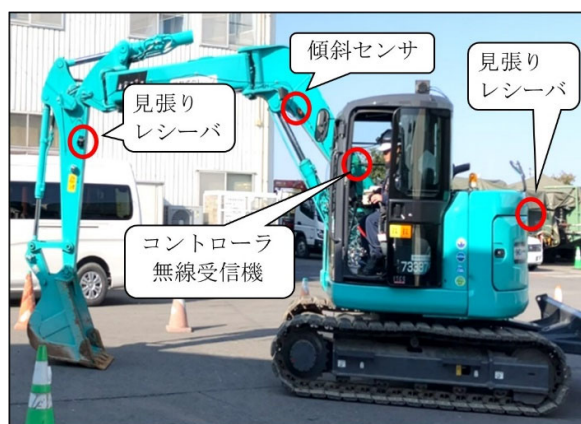


写真-2 油圧ショベルへの機器取付け状況

4. エリア限定型自動停止システム

前述のエリア限定型警報システムに、新たに自動停止機能を追加した。見張りエリア内でシステムの電源がONの状態、傾斜センサの角度が事前に設定した角度に達すると、警報が鳴ると同時に作業装置と走行を自動的に停止する。これにより、

機械的に上空障害物との接触を確実に防ぐことが可能となる。

4.1 機器構成

機器構成を図-4に示す。

(1) 外部出力ユニット

コントローラからの出力信号を制御ボックスに伝える役割を持つ。

(2) 制御ボックス

運転席に搭載され、コントローラからの信号を受け取ると、油圧ショベルを自動停止させる。信号受信中はLEDライトが点灯し、自動停止状態であることをオペレータに知らせる。

また、一時解除用スイッチが備え付けられており、このスイッチを押すと予め設定された数秒間は自動停止が解除され、重機の操作が可能となる。この一時解除機能により、自動停止状態からスムーズに作業を再開できる。

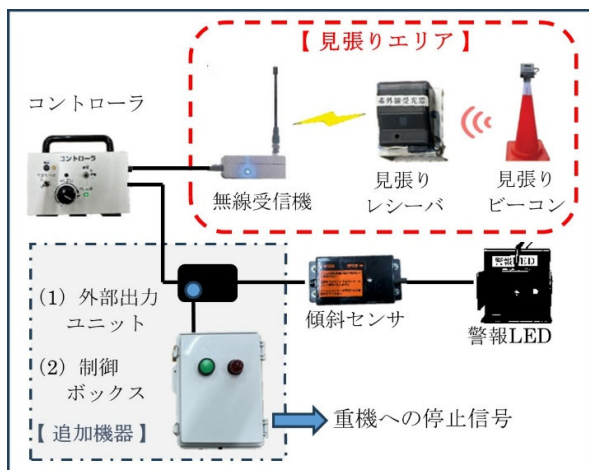


図-4 機器構成

4.2 自動停止機能の流れ

自動停止機能は、油圧ショベルのセーフティレバーの電気回路を介して作動する仕組みである。

作動イメージを図-5に、システム取付け状況を写真-3に示す。

見張りエリア内で傾斜センサの角度が設定値に達すると、コントローラから停止信号が出力される。この信号により、油圧ショベルのセーフティレバーが電氣的に解除され、作業装置および走行装置の操作を受け付けられない状態となり、重機が自動で停止する。自動停止状態を解除するため、制御ボックスにある一時解除用スイッチを押すことで、一時的に数秒間だけ危険信号を無効化される。その間にブームを安全な位置まで操作し、緊急状態から安全かつ迅速に離脱して作業を再開できる。

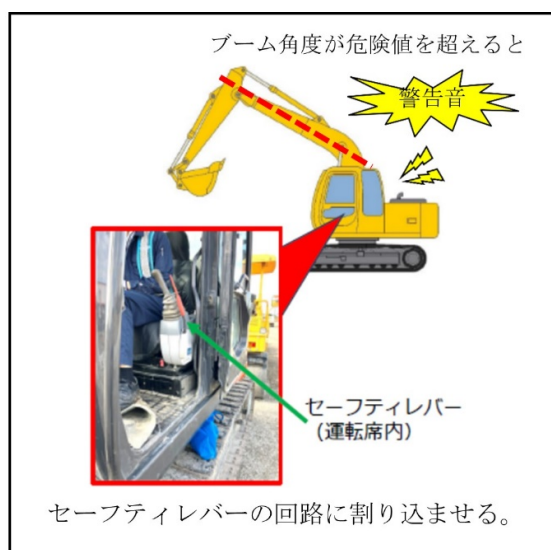


図-5 自動停止割り込みイメージ



写真-3 自動停止システム取り付け状況

5. 実機検証試験

油圧ショベルにエリア限定型自動停止システムを取り付け、検証試験を実施した。

5.1 検証試験1「見張りエリア侵入検証」

写真-4のように、油圧ショベルのブームを設定角度以上に上げた状態で、見張りエリアの外側から内側へ侵入し、走行装置の自動停止について検証した。エリア内に侵入した瞬間に走行装置が自動停止することを確認した。

5.2 検証試験2「バケット上げ検証」

写真-5のように、空荷状態のバケットを地面から勢よく上げて、作動装置の自動停止状況を検証した。慣性により傾斜センサが検知した位置から約150mm上で停止した。このような極端な検証条件でも安定して自動停止させられることを確認できた。

5.3 検証試験3「旋回検証」

写真-6のように、ブームを設定角度以上に上げた状態で勢いよく旋回させ、作動装置の自動停止を検証した。視覚的に確認できるように、見張りエリアの境界はカラーコーンの位置となるように調整して行った。結果は見張りレシーバが検知した位置からバケット1つ分だけ惰性で旋回し停止した。こちらも極端な条件下でも旋回動作を確実に停止させられることが確認できた。



写真-4 検証試験1「見張りエリア侵入検証」



写真-5 検証試験2「バケット上げ検証」



写真-6 検証試験3「旋回検証」

6. エリア限定型自動停止システム想定現場

本システムの活用現場を紹介する。写真-7は交差点での道路修繕工事において、エリア限定型警報システムを活用した際の現場状況である。この工事では交差点の一部を誘導員とカラーコーンで規制し、油圧ショベルで既設アスファルトの剥ぎ取り作業を実施した。作業場所の上空には地上から約5mの高さに多数の架空線が通っており、オペレータは規制内で架空線に接触しないように注意を払いながら作業を進める必要があった。

現場での使用感としては、上空に障害物が存在しない場所では警報を発しない点が、オペレータから好評価を受けた。これまでのシステムのように

に電源をON/OFFする手間や、不要な警報による作業の妨げが減り、オペレータは集中して効率的かつ安全に作業を行うことができた。

そのほか今回紹介した架空線だけでなく、橋梁や複数の信号機、建物の突出部（庇、看板など）にも対応が可能である。複数の見張りビーコンを設置することにより、広い現場をカバーすることもできる。写真-8に橋梁下の作業にシステムを導入した際の状況を示す。

本システムは既にレンタルで運用されている機器をベースとしており、機材を追加導入することにより、本稿で紹介したような仕様へバージョンアップできることも特長の一つである。



写真-7 交差点アスファルト剥ぎ取り



写真-8 橋梁下の作業

7. おわりに

本稿では、新たに開発したエリア限定型自動停止システムと、現場での実証結果について紹介した。本システムにより、これまで接触事故の多かった油圧ショベルと上空障害物との接触を防ぐことができると期待している。いかに優れた機械を現場に導入しても、それを人が扱っている以上、今後もヒューマンエラーによる労働災害はどの現場でも起こりうる。そのような状況を改善する一つの手段として活用していきたいと考えている。

今後さらに現場での運用を展開し、機能の改善・追加を進め、より良いシステムへと発展させていく所存であり、油圧ショベルだけではなく、それ以外の重機の応用も進めていきたいと考えている。

31. 現場地耐力試験を用いた地盤安全性評価の基礎的研究

(独)労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所 ○ 堀 智仁
(独)労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所 玉手 聡

1. はじめに

近年、建設現場では高い定格荷重を備えた移動式クレーンの需要が高まっている。これらは資材搬送の効率化と省力化を同時に実現する施工機械として位置付けられ、工期短縮および労務負荷低減に大きく寄与している。

一方、支持地盤の沈下に起因する移動式クレーンの転倒災害は依然として発生している。安全な施工を確保するためには、クレーン設置地盤が作用接地圧に対して十分な支持力を有することを定量的に確認する必要がある。地盤支持力の評価には平板載荷試験が広く用いられ、通常は沈下量 30mm に対応する載荷圧力が極限支持力とされる。しかし、沈下量 30mm は多くの場合で地盤が塑性域に到達しており、弾性域を超えた小さな荷重増分でも急激な沈下を誘発する可能性がある。そのため、少なくともクレーンの接地圧が地盤の弾性域内に収まることが望ましい。

本研究では、重機本体を反力として短時間で実施可能な現場地耐力試験¹⁾に着目し、複数の施工現場で試験を行った。得られた荷重—沈下曲線を解析し、クレーン転倒防止のための支持力照査について考察した。

2. 試験方法および試験の概要

2.1 現場地耐力試験

表-1 に、平板載荷試験（以下、PLT）と現場地耐力試験（以下、BCT）の概要を比較して示す。両試験で使用する載荷板は直径 30cm の円形であり、形

状・寸法に相違はない。両者の主な相違点は載荷方法である。PLT では計画最大荷重を 5～8 段階に分割し、各段階で 30 分荷重を保持した後に沈下量を計測する段階載荷法を採用している。一方、BCT では変位制御による連続載荷法を用い、載荷速度を 5mm/min に設定している。この速度は現場 CBR 試験の載荷速度 1 mm/min を基準とし、載荷板直径のスケール比を考慮して決定した値である。

沈下量の計測手法も異なる。PLT では、載荷点から所定距離を隔てた位置に基準点を設置し、基準梁を介して、載荷板上 4 点の沈下量を測定し、その平均値を採用する。これに対し、BCT では反力装置（重機）の前後浮き上がり量と載荷シリンダの伸張量から沈下量を算定する。このため、PLT で必要となる重機下部での基準梁設置作業が不要となり、試験準備時間を大幅に短縮できる。

試験に要する時間も顕著に異なる。PLT は載荷ステップ数に依存するが、一般に 3 時間以上を要する。これに対し、BCT の載荷時間は約 10 分であり、準備を含めても 1 箇所当たり約 20 分で完了する。

図-1 に BCT の概要を示す。載荷ジャッキは取り外し可能な移動用架台に装着され、現場内における手押し移動が容易である。

2.2 試験の概要

試験は 4 箇所の現場において実施した。地盤は砂質土、シルト地盤、ローム地盤の 3 種類であった。表-1 に各地点で採取した土の物理特性を示す。

表-1 平板載荷試験と現場地耐力試験の比較

	平板載荷試験 (PLT) (JGS 1521-1995)	現場地耐力試験 (BCT)
載荷板	直径 30cm の円形	
載荷方法	荷重制御 (計画最大荷重を 5 から 8 段階で載荷)	変位制御 (5mm/min)
反力装置	重機又はアンカー	重機
沈下量の計測	基準梁から載荷板上の沈下 4 点を計測	載荷装置の伸張量から重機の浮き上がりを引いた値
所要時間 (1 箇所)	3～5 時間	約 10 分

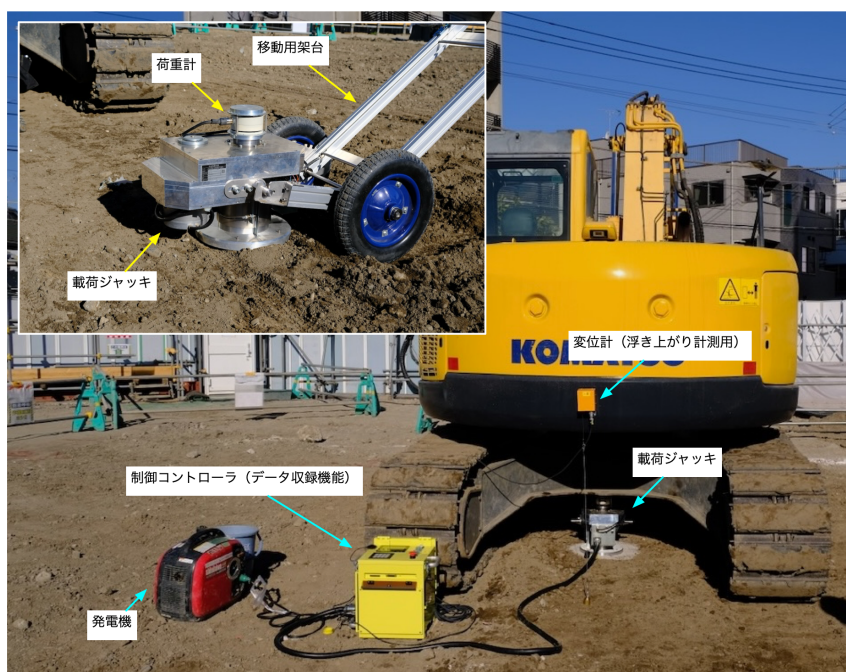


図-1 現場地耐力試験(BCT)の概要

表-2 各調査地点における土の物理特性

計測点	地域	ρ_s (g/cm ³)	w (%)	ρ_{dmax} (g/cm ³)	w_{opt} (%)	D_{max} (mm)	地盤材料の分類名
Site-1	愛知	-	24.4	1.535	20.2	26.5	礫まじり細粒分質砂
Site-2	埼玉	2.587	61.3	1.046	39.2	37.5	シルト (高液性限界)
Site-3	埼玉	2.686	46.7	1.077	49.1	26.5	シルト (高液性限界)
Site-4	東京	2.539	40.5	0.914	63.0	4.75	ローム

3. 試験結果

3.1 BCT 試験結果

地盤工学会基準では、平板载荷試験から極限支持力 q_u を判定する方法が規定されている。いくつか条件があるが、沈下量が 30mm を超えない範囲において次のうちのいずれか小さい载荷圧力を q_u とする。

- ①沈下量の増加が大きくなり、沈下が直線的に増加する载荷圧力
- ②log p - S 曲線が沈下軸にほぼ並行となる载荷圧力

沈下量が 30mm の範囲内において、①または②のいずれの状況も認めたい場合には、基本的には、「沈下量が载荷板直径の 10%の点における载荷圧力」が q_u とされている²⁾。本研究では、沈下量が 30mm の範囲内でピークが確認された場合の q 、もしくは $s=30\text{mm}$ に相当する q を極限支持力 q_u と定義した。

図-2(a)～(d)に BCT 試験結果を示す。図-2(a)に Site-1 (砂質土) における BCT 試験 (No.1～No.4)

および PLT 試験における载荷圧力 (q) と沈下量 (s) の関係を示す。各 BCT 試験結果にはばらつきが見られ、特に、No.1 は q が 600kN/m^2 に達した後に沈下量が急激に増加している。それに対して、No.3 は他の試験と比較して高い支持力を示している。図-2(a)における q_u の最大値 $q_{u\max}$ と最小値 $q_{u\min}$ の比を求めると、その値は $q_{u\max}/q_{u\min}=2.12$ であった。また、Site-1 では、PLT 試験の結果も図中に示したが、PLT 試験結果と No.3 は良好に一致し、両者の整合性が高いことが確認された。

Site-2 (シルト) の結果を示した図-2(b)は、Site-1 に比べ、全体的に支持力が低く、支持力のばらつきは小さい。 q_u の最大値と最小値の比を求めると、その値は $q_{u\max}/q_{u\min}=1.17$ であり、Site-1 に比べばらつきが非常に小さいことが確認できる。

Site-3 (シルト) の結果を示した図-2(c)は、 q と s の弾性域での傾きはほぼ同じである。すべての結果で q - s 関係にピークが見られるが、No.1 は No.2 および No.3 に比べやや支持力が高い結果である。同様に、 q_u の最大値と最小値の比を求めると、

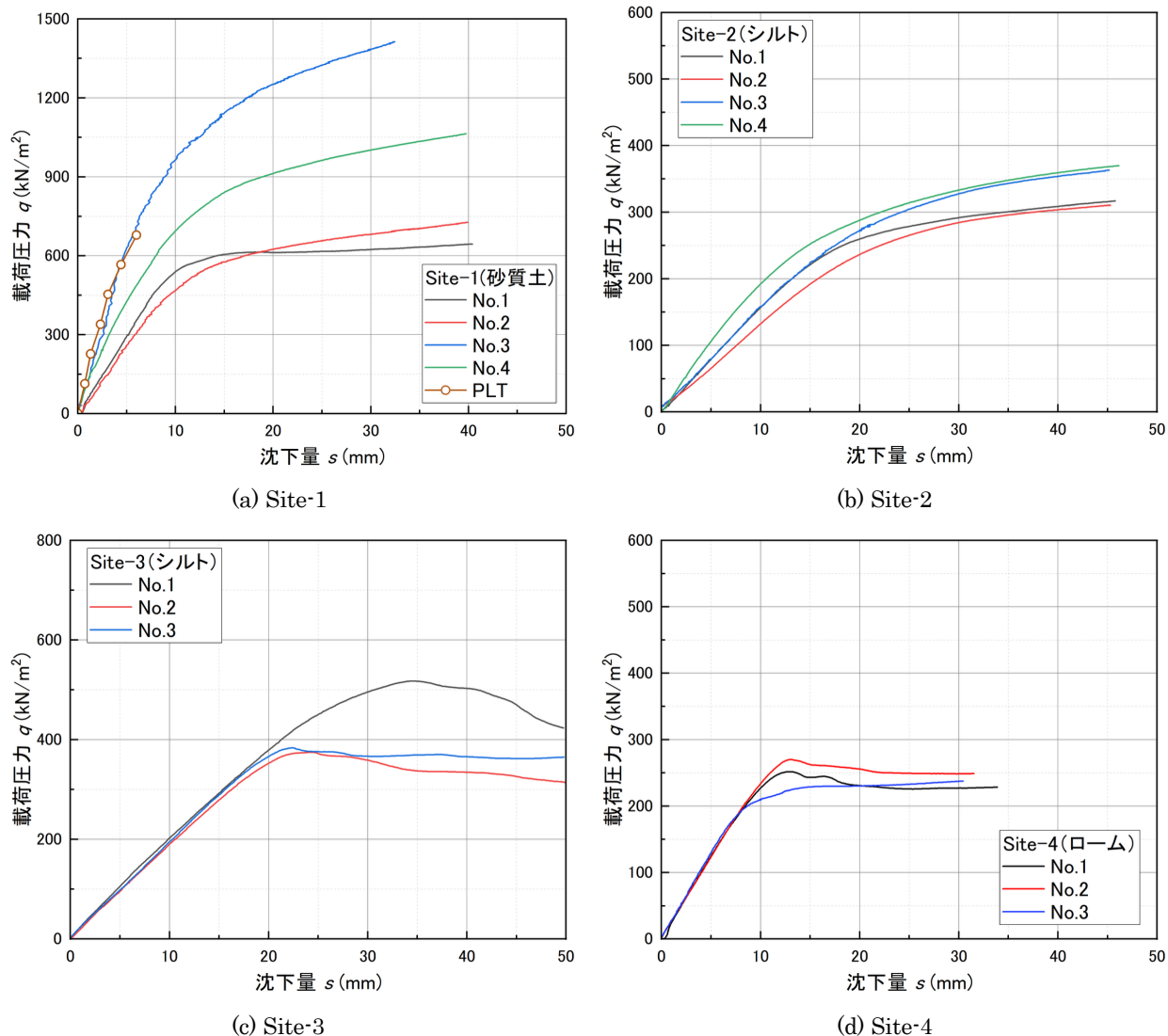


図-2 BCT 試験結果

その値は $q_{\text{umax}}/q_{\text{umin}}=1.32$ であった。

Site-4 (ローム) の結果を示した図-2(d)は、最も支持力が低く、弾性域での q - s 関係の傾きはほぼ等しい。No.1 および No.2 は q - s 関係にピークが確認できるものの、No.3 には明確なピークが確認できない。しかしながら、 q_u の最大値と最小値の比を求めると、その値は $q_{\text{umax}}/q_{\text{umin}}=1.14$ であり、最もばらつきの小さい結果であった。

ここで、本研究では、載荷初期の q - s 関係が直線関係を示す領域を「弾性域」、弾性域より沈下量 s が大きな領域を「塑性域」定義する。塑性域では q の増加に伴う s の増加量が弾性域よりも大きく、地盤条件によっては s の増加量が著しく大きく、機械が転倒に至る可能性が高い領域である。以上のことを踏まえて結果を見ると、すべての結果において q_u は、 q - s 関係が直線ではない領域、すなわち塑性域であることが確認できる。

3.2 許容支持力

本研究では、 q - s 関係が載荷初期の直線関係を示

す弾性域の最大の載荷圧力を降伏強度 q_y と定義し q_u との関係を検討する。

図-3 に q_y と q_u の比較を示す。白抜きで示した結果は、既報³⁾の結果である。全体的に $q_u=q_y$ のラインより上に分布している。 q_y は弾性域における最大の q であることから、すべての結果において q_u は塑性域の値であることがわかる。また、 q_u は q_y の概ね 1.5~2.5 倍であった。

一般に、移動式クレーンの転倒防止に関する検討では、作用荷重が短期荷重であるため、地盤支持力の評価には短期の許容支持力(安全率 $F_s=1.5$)が用いられている。すなわち極限支持力 q_u を安全率で除した値 $q_a=q_u/1.5$ を、短期の許容支持力 $q_{a1.5}$ として採用するものである。

図-4 には、 q_a と q_y の比較を示す。短期の許容支持力の結果を図-4(a)に示す。図より、 $q_a=q_y$ のラインよりも上に分布しており、 q_a は q_y よりわずかに大きいことが確認できる。すなわち、安全率 1.5 で評価された多くの q_a は、塑性域に位置づけられる

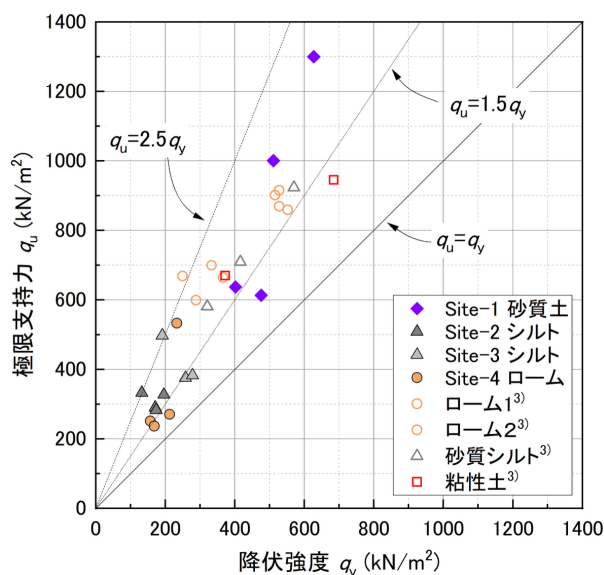
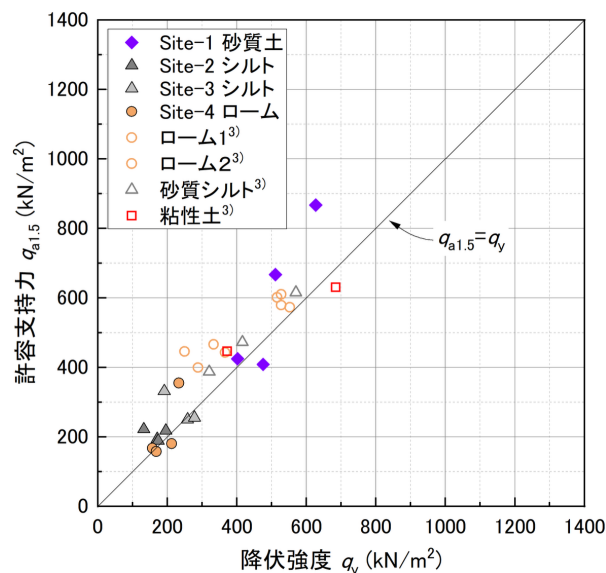


図-3 q_y と q_u の比較



(a) 短期許容支持力 $q_{a1.5}$

値である。

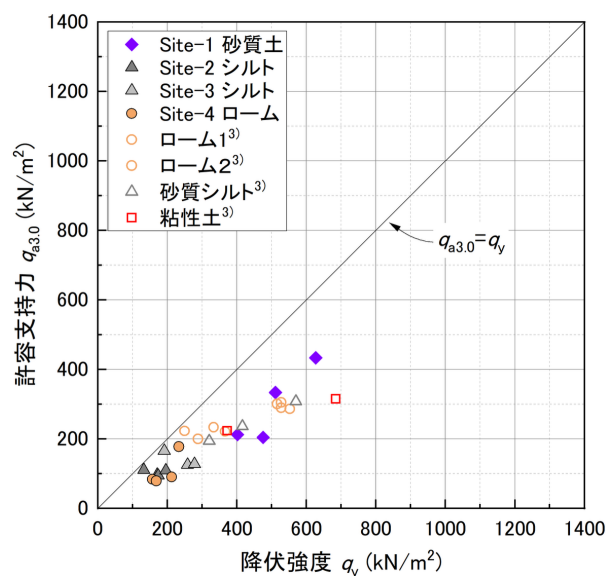
一方、筆者らのこれまでの検討では、地盤の耐力および载荷圧力に伴う不確実性を考慮し、安全率を $F_s > 3.0$ とすることを提案してきた¹⁾。この値は、構造物の基礎設計において長期的な安全率として用いられる水準である。図-4 (b) は、長期安全率 $F_s = 3.0$ を用いて算出した長期の許容支持力 $q_{a3.0}$ を示している。長期の許容支持力はすべて $q_a = q_y$ のラインより下に分布しており、 q_u を長期安全率で除した q_a は、弾性域に収まる値であることが明らかとなった。

4. まとめ

本研究では、移動式クレーンの転倒災害防止を目的として、現場地耐力試験 (BCT) の実用性を検討した。BCT は従来の平板载荷試験 (PLT) と比べ、試験時間が短く、現場適用性に優れるとともに、試験結果の整合性も高いことが確認された。試験の結果、短期安全率 ($F_s = 1.5$) に基づく許容支持力 $q_{a1.5}$ は塑性域に位置する例が多く、機械の転倒リスクが十分に低減されない可能性があることが判明した。一方、長期安全率 ($F_s = 3.0$) を採用した場合、許容支持力 $q_{a3.0}$ は弾性域に収まり、より高い安全性を確保できると考えられる。したがって、支持力照査においては BCT のような簡便な試験とあわせて、地盤の不確実性も考慮した長期安全率の採用が重要である。

謝辞

本研究の実施にあたり、東洋スタビ技術部設計試験課の皆様には、現場調査等に多大なるご尽力を賜りました。ここに、深く感謝の意を表します。



(b) 長期許容支持力 $q_{a3.0}$

図-4 q_y と q_a の比較

参考文献

- 1) 玉手聡・堀智仁：作業現場における地耐力確認の方法，労働安全性総合研究所技術資料，JNIOOSH-TDNO.3，pp.39～62，2015.
- 2) (公社)地盤工学会：地盤調査の方法と解説，pp.697-731，2013.
- 3) 堀智仁，玉手聡，片岡裕二，田村繁雄：クレーン転倒防止のための支持力照査に関する一考察，24-4-2-06，2024.

32. 自動化リジッドダンプおよび施工管理支援基盤システムを用いた 土砂運搬作業のオートメーション化の実証

大成建設株式会社

○ 市川 裕駿
遠藤 亮雄
田村 道生

1. はじめに

建設業界は少子高齢化の影響を強く受けており、生産年齢人口の減少に加え、「きつい・汚い・危険」という3Kのイメージから若年層の参入が減少し、就業者の高齢化が進んでいる。近い将来には高齢者の大量退職が予想され、担い手不足は一層深刻化する見込みである。このため建設業界では、労働環境の改善と作業員一人当たりの生産性向上が急務となっている。

これに対応するため、国土交通省は2016年に「i-Construction」、さらに2024年にはこれを発展させた「i-Construction 2.0」を発表し、2040年度までに建設現場の省人化を少なくとも3割、すなわち生産性を1.5倍に向上させることを目標に、「施工・データ連携・施工管理」の各段階におけるオートメーション化が掲げられた。¹⁾

このような社会的・政策的背景を踏まえ、当社では自動運転・遠隔操作が可能な建設機械「T-iROBO」シリーズおよび施工中に取得する膨大なデジタルデータを活用して施工管理業務を支援する基盤システム「T-iDigital Field」の開発と実証を進めてきた²⁾³⁾。本論文では、自動運転リジッドダンプ「T-iROBO Rigid Dump」と「T-iDigital Field」を組み合わせ、「i-Construction 2.0」が提唱する3本の柱、「施工のオートメーション化」、「データ連携のオートメーション化」、「施工管理のオートメーション化」を実際の建設現場において適用・実証した事例について、その技術概要、実証内容および結果を報告する。特に、事故防止策や安全運用体制といった安全面での実証結果に焦点を当てる。

2. 技術概要

2.1 T-iROBO Rigid Dump

T-iROBO Rigid Dumpは、小松製作所製HD465をベースに電制化改造を施した自動化リジッドダンプである。その外観を図-1に示す。機体には制御

用PCを中心に、自己位置認識用のRTK-GNSS方位計、周囲を検知するLiDARや車載カメラ、外部通信用の無線装置、非常停止用の受信機などが搭載されている。

図-2に自動運転システムの構成を示す。制御用PCに搭載されたソフトウェアは走行計画に従って各コントローラを制御し、ダンプトラックを動作させる。走行計画は、あらかじめ有人走行で取得した経路・速度データを基に走行する「経路走行」、積込機械や排土位置の座標情報を利用して接近経路を自動生成する「接近走行」、ホーンを鳴らす「合図」やダンプアップ・ダウンを行う「排土動作」を組み合わせて構築される。これにより、多様な作業に柔軟に対応できる。加えて、車速や操舵角をセンサで常時監視し、誤差を逐次補正するフィードバック制御によって安定した自動運転を実現している。制御用PCへは遠隔でのアクセスが可能であり、設定変更や走行開始・停止の指示をすることができる。さらに、遠隔操作モードに切り替えることで、ゲームコントローラを用いて前進・後退や排土操作を行うこともできる。

図-3に安全対策の概要を示す。本システムでは以下の4重の安全対策を講じることで、高い安全



図-1 T-iROBO Rigid Dumpの外観

性を実現している。

(1) 障害物検知による停止

機体の前方・後方に緊急停止エリア、減速エリアが設定されており、機体の前後に取り付けたLiDARセンサによって走路上の障害物の場所を検出し、エリアに応じて減速・停止を行う。

(2) 機器・センサ異常による停止

機体に搭載された機器やセンサの故障やケーブルの接続不良、GNSSの測位精度低下や制御室との通信途絶などが発生した場合、これらの異常を即座に検知し、機体の走行を自動的に停止させる。

(3) 逸走による停止

機体が設定された走行経路から逸脱した場合に自動で停止する。

(4) 遠隔非常停止

万が一制御が効かなくなった場合に備えて、遠隔非常停止装置を搭載している。操作者や監視者が保持している携帯型の非常停止ボタンを押下することで、強制的に走行を停止させることができる。このシステムは電波の混信を防ぐ目的で、自動運転の通信システムとは異なる周波数帯を使用している。また、機能安全の考え方に基づいて、非常停止装置の送信機と受信機は常時接続確認を行っており、通信が途絶えた場合にも自動運転を停止することで、ボタンを押下しても停止信号が届かず、停止しない等のリスクを排除している。

2.2 T-iDigital Field

T-iDigital FieldはCPS（Cyber Physical Systems）の概念に基づき、建設現場に点在するヒト・モノ・コトのデータをクラウド上に集積・統合する現場

管理システムである。

図4に本システムの概要を示す。本システムはデータ層、基盤クラウド層、アプリケーション層の三層から成る。データ層では、IoT 端末やビーコン、

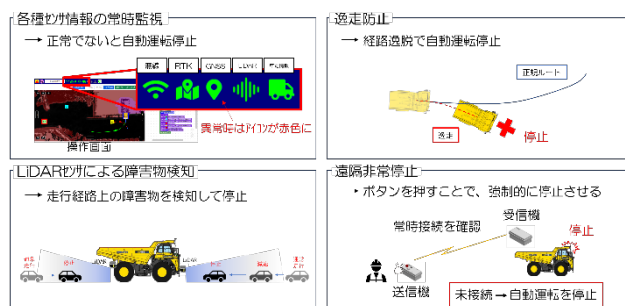


図-3 T-iROBO Rigid Dump の安全対策

センサによって現場のヒト・モノ・コトの情報を取

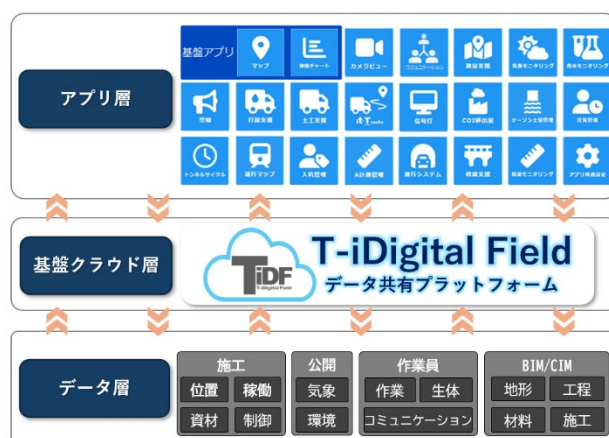


図-4 T-iDigital Field のシステム構成

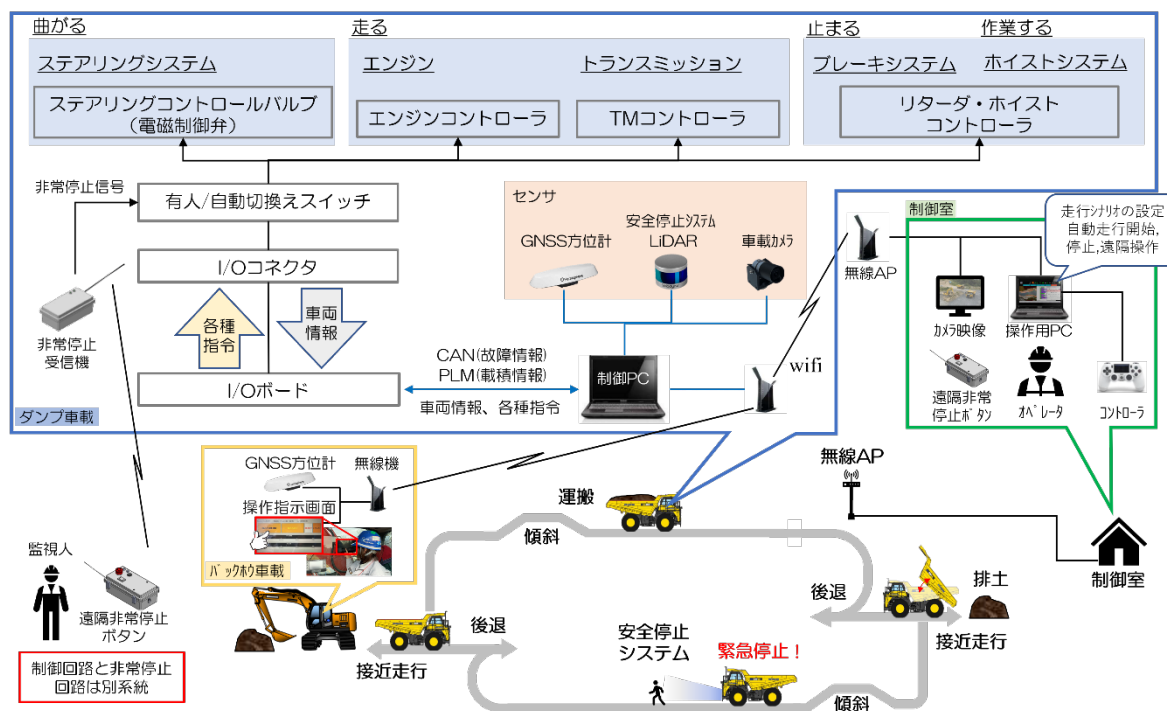


図-2 T-iROBO Rigid Dump のシステム構成

得し、基盤クラウド層ではそれらをクラウド上に一元化・整理する。アプリケーション層では、基盤クラウドに集約したデータを抽出・加工し、ユーザが直感的に利用できる形で提供する。2025年6月現在、各工種に対応した37種類のアプリケーションが提供されており、インターネットブラウザ経由で現場の情報をいつでもどこでも閲覧できる。

今回の実証では、T-iDigital Field が提供する以下のアプリケーションを主に活用した。

(1) マップアプリケーション

建設機械と人の位置情報を地図上に表示し、工事現場のどこで、だれが・どの建設機械が稼働しているかを可視化できる。これらの情報は現場全体の稼働状況を一目で把握するための基盤となるものであり、他のアプリケーションでも活用される。

(2) 土工支援アプリケーション

土運搬作業全般のサイクルを自動的に記録し、運搬量や運搬効率、実運搬距離などを逐次データ化して施工の進捗を可視化する。従来手作業で行っていた運行記録や出来高集計をデジタル化することで、日々の作業管理を効率化する。また、計画値と実績値を比較し、作業改善に資する情報を提供する。

(3) 軌跡アプリケーション

建設機械の走行経路や待機位置をリアルタイムに記録・表示し、その軌跡をわかりやすく可視化する。土工支援アプリケーションと併用することで、施工の平滑化や効率的な運行計画の立案に役立てる。

(4) 警報アプリケーション

現場の安全管理を支援する機能を持ち、作業員の立入禁止区域への侵入や重機との接近、重機の速度超過、エリア逸脱を検知すると、マップアプリケーション上に警報を視覚的に表示するとともに、メールで通知することができる。

3. 実証内容

3.1 概要

本実証は、成瀬ダム原石山採取工事(秋田県東成瀬村)において、ダム用骨材を運搬する作業を対象に、無人化施工を実施した。実証期間は2024年5月から6月の約2か月間であり、国土交通省が提唱する「i-Construction 2.0」の3本の柱「施工のオートメーション化」、「データ連携のオートメーション化」、「施工管理のオートメーション化」の実現、および「自動施工における安全ルール Ver.1.0」の実現を目指して実施した。

3.2 作業内容

i-Construction 2.0における3つのオートメーション化の適用状況を図-5に示す。

図-6に作業の概要を示す。作業は遠隔操作バッ



図-5 3つのオートメーション化の適用状況

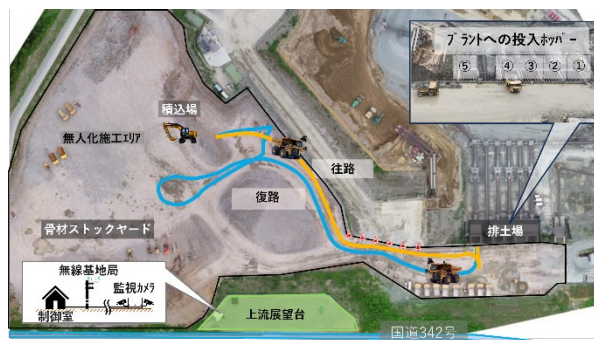


図-6 骨材運搬作業の全体概要

クハウ1台とT-iROBO Rigid Dump 2台を組み合わせ、遠隔操作バックハウのオペレータ1名と自動運転ダンプトラックのオペレータ1名の計2名体制でストックヤードでの積込から運搬・プラントへの投入ホッパーでの排土までの一連を無人で完結させた。

片道の運搬距離は約250mで、積込場で積み込んだ骨材原石を自動走行で運搬し、ホッパーへ投入した後、積込場付近まで戻り、バックハウの位置情報を基にした接近走行で積込地点に進入するサイクルを繰り返した。

リジッドダンプのすれ違いが困難な狭隘部やホッパー前では自動運転を一時停止し、安全確認後に制御室のオペレータが再開操作を行った。これにより、2台の自動運転ダンプトラックを滞りなく交互に運行させた。すれ違いのための待機時間はT-iDigital Fieldによって可視化を行い、走行経路の最適化に活用した。

上流展望台には機械の制御室や無線基地局、監視カメラを設置し、図-7に示す制御室内からバックハウの遠隔操作や自動運転ダンプトラックの設定・操作・状態監視を行った。

T-iROBO Rigid Dumpによる骨材原石の運搬量、運搬効率、実運搬距離はT-iDigital Fieldによってデジタルデータ化し、リアルタイムにクラウド上に集約、自動解析を実施し、ブラウザ上で容易に確認ができるようにした。蓄積した作業データは客観

的な検証・評価に利用し、作業の見直しに活用した。

3.3 安全対策

「自動施工における安全ルール Ver.1.0」では自動施工を行うため、人が立ち入らない「無人エリア」、無人エリアの周囲に配置し、自動建設機械が予期せぬ動作をした場合に機械がその範囲を逸脱しないための「立ち入り制限エリア」、有人建設機械が施工を行うための「有人エリア」が定義されており、自動・遠隔建設機械と有人建設機械が混在して作業を行わないように定めている⁴⁾。本実証では、「自動施工における安全ルール Ver.1.0」を参考に、夜間作業時間帯に運搬エリアを無人化専用エリアとして設定した。これにより、重機のみが稼働し、人が立ち入らない安全な環境を確保した。また、無人化専用エリアに作業員が立ち入る際には非常停止スイッチを動作させるようにした。

制御室には非常停止スイッチを1台、リジッドダンプ2台にそれぞれ受信機を設置し、万が一の際にはリジッドダンプ2台を即時かつ一斉に緊急停止できる体制を整えた。加えて、図-8のようにT-iDigital Fieldのマップアプリケーションによって、建設機械・作業員の位置・ストックヤードのエリアをマップ上に可視化し、警報アプリケーションによって作業員がストックヤードに立ち入った際、遠隔操作バックホウおよび自動化リジッドダンプに接近した際にはマップ左上にその旨を示す警報を表示し、制御室のオペレータにメールで発報した。この画面は制御室のモニタに表示しリアルタイムに確認できるようにした。

4. 実証結果

試行期間中に988回の運搬を行い、合計47,217.8トンの骨材原石を無事故で運搬した。自動化リジッドダンプのセンサ異常検知は正常に機能し、非常停止装置も確実に作動する状態で待機していたが、トラブル対応のためにエリアに立ち入る際を除いて作動させる場面はなく、重大なトラブルは発生しなかった。また、従来の監視カメラによる目視での施工エリアの確認に加え、T-iDigital Fieldによる施工エリアの常時監視によって、バックホウの遠隔操作と自動化リジッドダンプによる作業中に作業員が現場に侵入していないことが確認できた。加えて始業前点検や、施工中のトラブル対応後に無人化専用エリアから確実に退出したことを制御室から確認する手段として活用できた。

5. まとめ

自動化リジッドダンプ「T-iROBO Rigid Dump」と施工管理支援システム「T-iDigital Field」を組み合わせ、成瀬ダム原石山採取工事において、「i-Construction 2.0」が提唱する3本の柱、「施工のオ



図-7 制御室内の状況



図-8 マップアプリケーションによる立ち入りの確認

ートメーション化」、「データ連携のオートメーション化」、「施工管理のオートメーション化」を小規模ながら実証した。結果、T-iROBO Rigid Dumpの非常停止システム、T-iDigital Fieldによるエリア監視によって無人エリアの安全性向上を確認できた。

今回の実証では施工エリアを完全無人としたため、有人機械の競合は生じなかった。一方で将来的には自動化機械と非自動化機械が混在する現場も想定される。その際には有人機械に自動化機械の緊急停止装置を常備することや、「T-iDigital Field」による施工エリアの監視が重要になると考えられる。

今後は本実証で得た知見を踏まえ、「T-iROBO」シリーズと「T-iDigital Field」の連携を進め、生産性・安全性の高い建設現場の構築と共に、「i-Construction 2.0」の実現に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 国土交通省：i-Construction 2.0 ～建設現場のオートメーション化～，
<https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/content/001738240.pdf>, 2024
- 2) 遠藤亮雄，青木浩章：55t級ダンプトラックHD465を用いた自動化リジッドダンプの開発，土木学会第77回年次学術講演会，VI-354，2022
- 3) 片山 三郎・石井 喬之・三谷 一貴・宮本 真吾・千葉 勇也：現場管理システム「T-iDigital® Field」の開発，大成建設技術センター報，第56号，46，2023
- 4) 国土交通省：自動施工における安全ルール Ver.1.0，
<https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/content/001730920.pdf>, 2024

33. 自動自律機械施工への取組に向けた課題とエコシステムの構築

4つの課題と解決策に向けた取組み

株式会社 大林組

○ 杉浦 伸哉

1. はじめに

2024年4月に発表された「i-Construction2」の中で、省人化というキーワードを中心とし、三本の柱として「施工のオートメーション化」「データ連係のオートメーション化」「施工管理のオートメーション化」が掲げられている。

2018年に発表された i-Construction は主に「生産性の向上」に力点が置かれていたが、今回の施策では、生産性向上の次の視点として「省人化」が明確に打ち出されたことが記憶に新しい。

その「省人化」を進めるにあたり、この自動自律施工機械を活用した取組に注目が集まってきたことは理解できるが、その取組を技術開発の領域から、現場施工での利用に定着させるためには、多くの課題をクリアしなければならないと筆者は考えている。

本論文ではこの課題を整理し、その課題をどのような観点で誰がクリアすることが可能なのかを示すことで、特殊な人や組織のみが使える技術としての位置づけではなく、業界としてのデファクトスタンダード技術として使える環境を構築できればと考えている。

昨今、協調領域と競争領域の分離が様々な部分で叫ばれているが、本報文は協調領域としての部分としてお考えいただければ幸いである。

2. 現状の課題

自動自律施工機械を業界標準にするためには4つの課題をクリアする必要があると考える。

図1を見ていただきたい。こちらの図は主に最新技術を施工現場などで利用する場合、技術開発的に試すフレームワークとして考えたのではなく、技術をつかって施工現場での生産性向上や省人化を行うために必要なフレームワークとして考えた図である。

はじめに技術課題について述べてみたい。新技術を現場で使うためには、まず現場で求めている課題を解決するための「技術課題」が明確であり、その技術が課題を解決できるものでなければならないと考えている。

次に、その技術がある場合は、この技術を最大限効率的に利用するための施工方法やそれを使うための運用方法を明確にすべきである。これは言い方を変えると「工法開発」とも言えるかもしれないが、この工法開発が今回 i-Construction2 で求められている「省人化」を実行するためには重要な部分だと感じている。

さらには、これらの「技術」と「工法」を定常的に、安定的に利用するためにはどのように収益がきちんとでるビジネスモデルに作り上げることができ、という課題があり、これをクリアできなければ、PoC から脱却出来ないであろう。

最後に、今回のような最新技術を使うにあたり重要な「安全基準」や業界全体として最低限共有項として考えておかねばならないガイドラインについて述べたい。これら4つの課題とそれを解決するための、考え方や示唆を以下述べていきたい。



図1 最新技術の現場適用時に考えるべき4つの課題

3. 課題解決に向けた4つの柱

3.1 技術課題について

重機を自動自律で稼働させるためには、以下の技術課題があると考えている。

- ① 製造メーカー(OEM)が強みをもつ DBW(Drive By Wire)の開示
- ② 複数の重機を制御するための FMS(FleetManagementSystem)の開発
- ③ 建設プロセスをデジタルで管理 CMS(ConstructionManagementSystem)の開発
- ④ 複数のセンサーデータを統合活用するセンサーフュージョン
- ⑤ 自律機能の品質管理・品質保証

上記5つの課題を研究開発段階から、施工利用に耐えられるような進化させ、最終的に産業界に提供することで常にこれらの技術を安心して使える環境を構築することが重要だと考える。その観点で図2を見ていただきたい。

この図は何が技術開発レベルなのか、どこからが次のステップに進んでいるのか等を示した図である。

縦軸には機械種類（例えばエクスカベータとかドーザーといった機械の種類）と台数を表現し、横軸には、開発している機能の稼働状況や施工場所、操作主体となる組織を記した。

この二軸の表現の中で、機械制御がどのようなレベルとなれば使えるようになると、施工会社は考えるのかということを技術開発、工法開発、事業開発というエリア分けをして表現している。

実施工として「使えるのではないかと」思えるレベルはどこかという議論があるが、レベル3以上から右のエリアに入るものは「使える」と思える技術になるのではないかと想定している。実際に施工現場での利用を調査してみるとほぼこのレベル3

以上のものがそれに当たる。実際の利用については、最低でもレベル4以上もしくはレベル5以上でなければ難しいと感じるが、まずはこの技術の可能性を確認する上ではレベル3以上が妥当だと判断する。

3.2 工法課題

技術課題をクリア出来たとしても、このような最新重機を使いこなすための使い方、「施工工法」が重要な鍵になると考えている。

- ① 費用対効果の見込める初期投資と利用者の利益が出せる工法
- ② 自律運転を前提とした新しい施工計画の作成（安全対策、工区割、歩掛の向上、休憩なし、24時間駆動など）
- ③ 工事に合わせた自律建機工法の開発
- ④ 効率を高める多様なステークホルダーの全体コーディネート

主にこれらの技術を使って省人化を出す側の考えが重要である。ここで一番重要な考え方は「プロセスを変えずにこの技術を使う事を考える」かこれらの最新技術を理解した上で「プロセスをどのように変えて施工を行うことが可能かを考える」かの違いだと思っている。

鉱山業界でこの技術をいれた場合の話を現地の関係者と長く会話をしてきたが、このような最新技術を使いこなしている担当者は「人と同じ動きをして単なる人の代わりをするのではなく、どうやったら省人化して効率化をあげられる使い方ができるのか」を利用者側が工夫できるかが重要だ、と言っていたのが印象的だった。

この自動自律機械施工を人の代替え技術として使う技術としての意識が強い間は、利用するための環境を工夫するといっても単に業務改善レベルにとどまってしまう可能性が高い。抜本的な省人化技術として使うためには、利用者側の相当な意

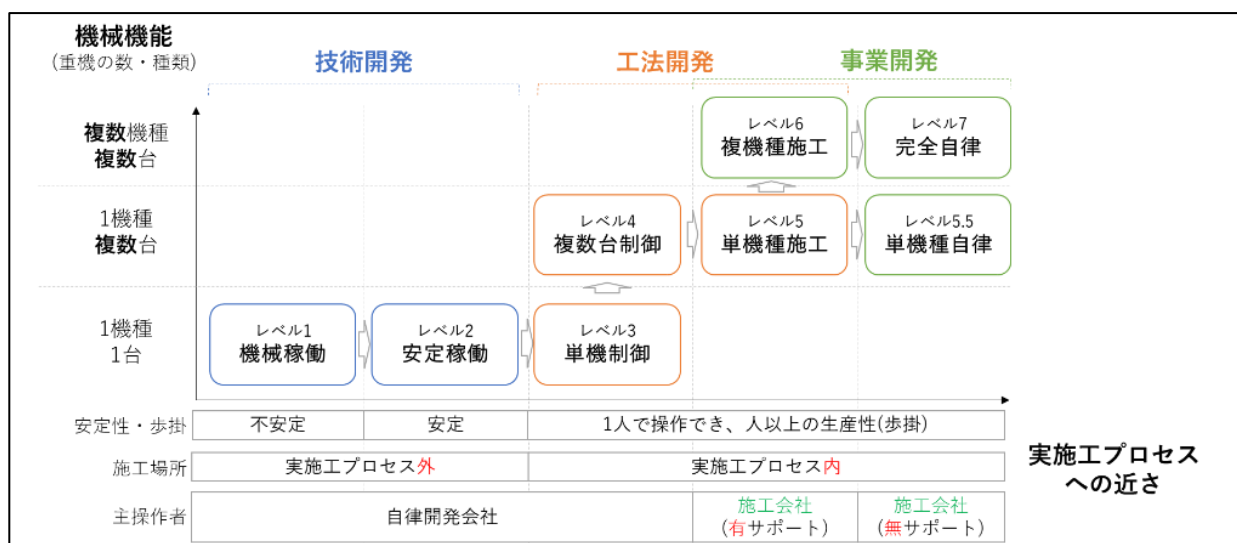


図2 技術開発から事業開発までの技術変遷相関図

識変革が必要であろう。このようなマインドを持つ人もしくは組織が肝である。多様なステークスホルダを全体コーディネート出来る人材も必要となると思われる。

3.3 事業課題

技術と工法をクリア出来たとして、結果的にこの業界のデファクトとして使える環境を構築するためには、持続可能な事業性を意識し諸問題への解決をすべきであると考ええる。

- ① 自律運転事業が持続可能であること
- ② 初期投資に見合った利益が得られること
- ③ 事業をするために必要な十分な組織能力があること（HWメンテ、SWメンテ、現場プロセス変更、規制）
- ④ 継続的な成長をする事業拡張性を創り上げることが出来る環境を構築出来ること

長くこの部分の課題で、特に大きな問題がコストであったが、この5年ほど世界の状況をみながら各企業と個別会話を進めている中で、コスト問題については大きな変化が見られてきた。図3を見ていただきたい。第3象限はまだまだ技術開発レベルの取組でこの段階ではコストは度外視、技術が確立できるのかという観点で対応していた企業が多く2021年4月現在で第3象限に多く存在していたが、技術の進化と開発会社が自らの技術が本当に産業界で使ってもらえるのかという観点で意見を聞いて改善するだけではなく、自らが利用産業界に「請負業」として契約をし、その中でコスト低減の課題などを見つけクリアする「Tech Enable Company」として活動したことにより2025年4月には第1象限に移動している企業が出てきた。このトレンドが今後も続くと考えられるがやはりプロセスを深く理解出来るところまでは難しいため、このコスト

を含めた事業継続の為の課題をクリアするには施工会社の存在が重要である。

3.4 規制（安全）課題

最後の大きな課題の1つは、利用するための環境を技術提供者や利用者ではない、第三者として安全をだれがどのように考えるのかという点である。

- ① 自律運転を製品として実用化するための製品側のガイドラインの構築
- ② 自律運転を実利用するための利用側のガイドラインの構築
- ③ 各国で安全の方向性を示している行政側のガイドラインの構築

何事もそうであるが、新しいツールを単に業務改善レベルで使うのではなく、新技術や新工法として扱うためには、なにがしかのガイドラインや基準を求める人や組織が多い。

製品提供側の主に安全に関するガイドラインについてはすでに製品製造提供者に課せられているガイドラインや基準があり、提供リスクを明確化し、残留リスクを利用者に示すという観点で、この考えは一般化されている流れである。

それに比べ、利用者側のガイドラインとして特に安全については、日本において現存する労働安全衛生法を中心とした、労働安全がしっかり構築されており、それが逆に新しい技術の利用を阻害してしまう場合も多く報告されている。

それらを全体としてクリアするため、行政側の主に安全の考え方が明確になる必要があるが、新しいツールや技術の利用が、通常の労働安全を前提とした内容を凌駕する場合、新しいものの見方や発想をもとに新しい安全を定義する必要があると感じる。

その新しい安全の定義は、建設業界のみの課題で

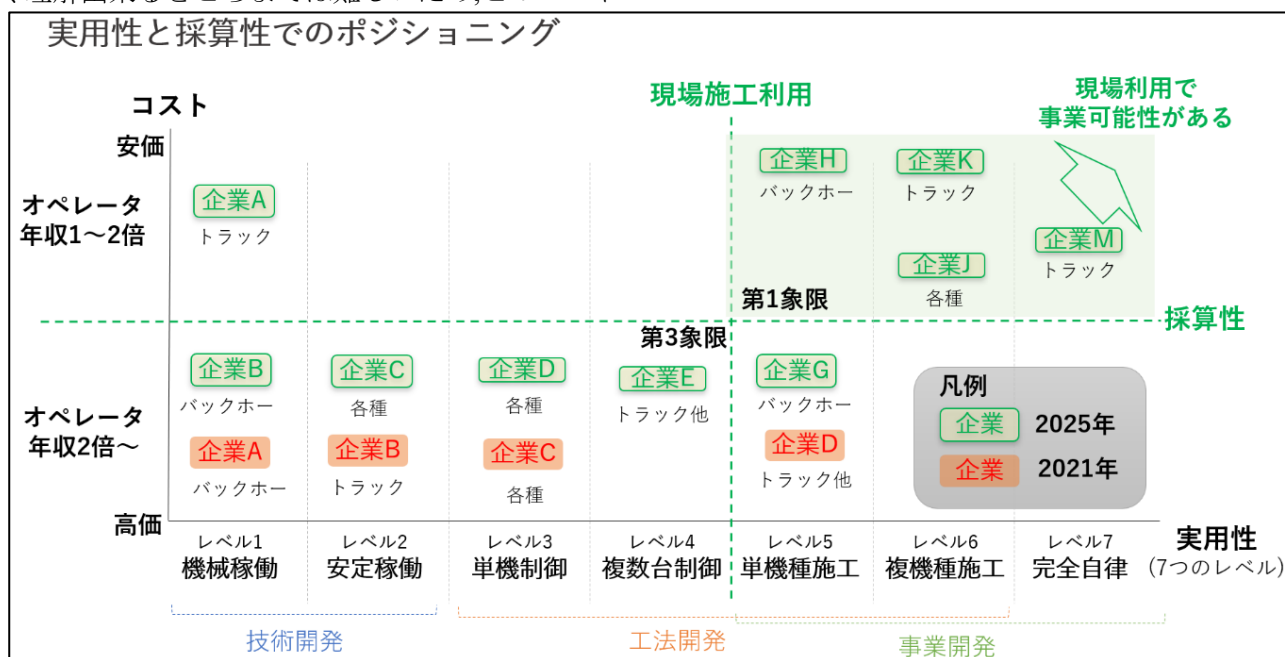


図3 技術レベルとコストの相関図

はなく、実は産業ロボットを中心として進める安全にも課題として現在上げられており、昨今この分野の議論が広く行われている。

キーワードは「協調安全」であり、この定義をどこまで作り上げることができるかが今後の大きな鍵となるであろう。その対応を含め、現在、一般社団法人セーフティグローバル推進機構の建設委員会を中心として、現在議論が進められている。

さらに安全だけではなく、これらの技術を賢く使うための利用者ガイドラインとして、海外における鉱山業界団体（図4）が「GUIDELINE FOR THE IMPLEMENTATION OF AUTONOMOUS SYSTEMS IN MINING」（図5）という資料を出している。

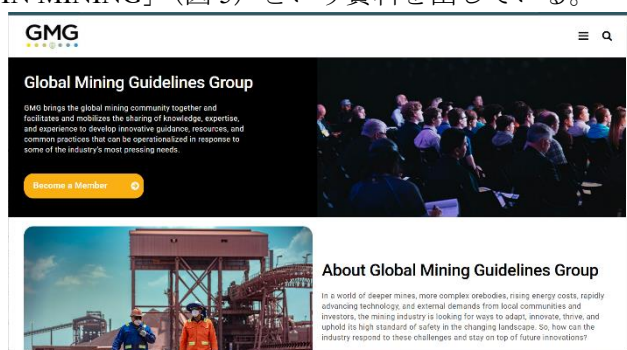


図4 Global Mining Guidelines Group のサイト

<https://gmgroup.org/>

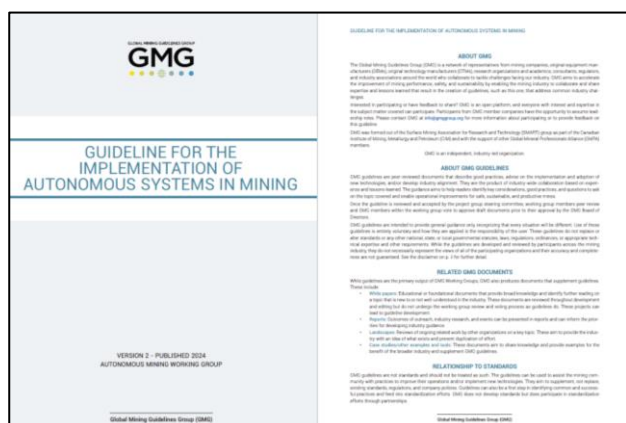


図5 GMG のガイドライン

https://gmgroup.org/wp-content/uploads/2024/08/GUIDELINE_Implementation-of-Autonomous-Systems-1.pdf

自動自律重機を利用する為に、誰がどのような観点で何を理解していく必要があるのかがまとめられている資料である。このようなガイドラインを参考に日本の建設業から建設分野におけるガイドラインを作っていくことが必要ではないかと思われる。

4. エコシステムのあり方について

これらの4つの課題をクリアするために、それぞ

れの課題解決を進める動きが各所で進められているが、市場でこの技術が使われるようにするためには、以下の標準化が重要ではないかと考えている。

図6はその概念を示しているものであるが、日本でもSIPで進められているOPERAの取り組みの拡張版である。自動自律施工の重機を開発しているOEMやStartupが多い中で、現在稼働している自動自律重機とペアで動いているCMSやFMS、TMSなどとの連携を相互利用できる様なAPIがあれば、利用者が利用目的毎にそれらのハードソフトを有する関係者と協議をしなければならないという非効率的な業務を行うことになりかねない。

ハードソフト提供者を主眼において、システムの関連性を語るのではなく、利用者視点で、市場を拡大することも視野にいれて、業界全体としてこの分野の成長を進めていく必要がある。

そのためにも、各企業や利用企業のそれぞれが自分だけがよければという発想を捨て、関係者全員がOEMやソフトの関係性を意識せず、利用することを主眼にツールが使えるエコシステムを構築すべきである。

データのエコシステムとしてはISO15143が提唱され、実装も進み始めているので、同様な動きも今後は業界あげて取り組んでいくべきであろう。

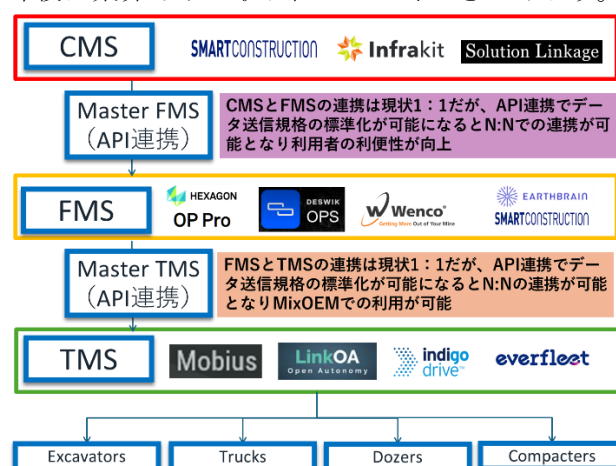


図6 ハードソフトのエコシステム構造図

5. まとめ

一般的にはイノベーションが起こることで、新しい価値をもたらすビジネスが産まれると言われていたが、この技術については、多くの課題をクリアする必要がある、その課題をクリアするためには、エコシステムの構築が重要である。

技術を正しく公平な観点で評価し、その評価結果を全体最適で組み合わせ、建設業界全体で日本の建設インフラ構築を進めための真の省人化技術として推進していきたいものである。

34. 建設現場におけるマニピュレータ型耐火被覆吹付ロボットの開発

鹿島建設株式会社

○ 高木 良介
石田 武志
松田 陸

1. はじめに

現在、耐火被覆吹付工事は密閉空間内で行われており、防護服及び防塵マスクを着用した劣悪な環境下での作業である。また、高所作業車を使用した高所での作業が主であり、身体的負担が大きく墜落リスクを伴う工事である。加えて、技能者の技量に頼った感覚的な作業が大半を占めることもあり、技能者不足に伴う技術の伝承が困難になっていることも課題である。そこで、苦渋作業からの解放、安全性の向上、安定した吹付品質の確保を目的として、梁全断面の耐火被覆材を自動で吹付可能な「耐火被覆吹付ロボット」を開発した。

本稿では、劣悪な環境下での作業を代替する、梁全断面の耐火被覆材を自動で吹付可能な耐火被覆吹付ロボットのシステム概要と機能、及び現場での現場試行結果について報告する。

2. ロボットシステム概要

本ロボットシステムは、当社で施工実績の多い延床面積 1 万㎡以上の中～大規模の事務所ビルを対象としている。フロア内の施工範囲は、ロボットが入ることのできない狭隘なコア部及び外周周り、タワークレーンや工事用エレベータの開口周りを除く専有部の執務エリアとしている（図-1）。ここで、ロボットの繰返しの施工単位として、4本の柱と大梁に囲まれたエリアをグリッド（図-2）と定義し、そのグリッドに含まれる大梁・小梁の全断面に対して、耐火被覆材を連続して吹付けを行う¹⁾。本章では、開発したロボットのコンセプト、仕様、機能、施工フローについて報告する。

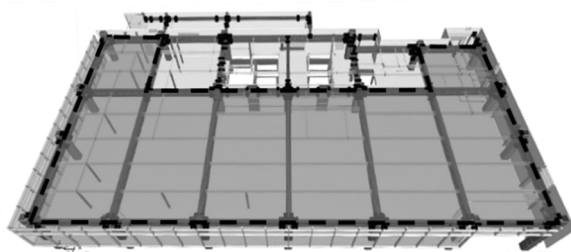


図-1 施工範囲（塗りつぶし部）

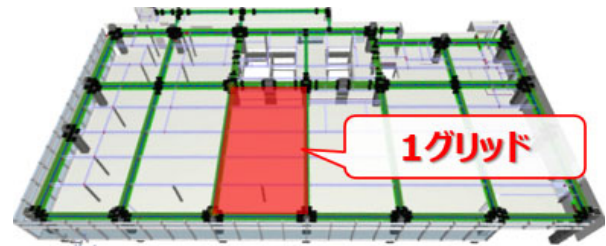


図-2 施工単位（1グリッド）

2.1 ロボットのコンセプト

2020年に当社が開発した耐火被覆吹付ロボット²⁾を写真-1に示す。高所作業車の荷台に汎用7軸マニピュレータとスライドラールを搭載している。スライドラール上をアームが左右に動きながら吹付を行うことで、技能者による作業と同等品質での施工が可能となった。しかし、現場での取り回しが悪く、事前準備に専門知識が必要なため、扱いが難しかった。そこで、本ロボットは普及展開を見据え、小型・軽量化及び事前準備作業の削減を可能とし、誰でも扱えることをコンセプトとして機能開発を行った。



写真-1 耐火被覆吹付ロボット(2020年)

2.2 ロボット仕様

ロボット外観を写真-2に示す。小型・軽量化のため、昇降装置にはシザース型ではなく水圧式昇降ポールを採用し、重量増加を招くスライドラールは使用しなかった。施工可能高さは標準オフィスの基準階の階高（4.0～4.5m）をカバーする4.8mとした。複雑な吹付動作を実現するため、協働型6

軸ロボットアーム先端に吹付ノズルを装着している。自己位置推定用の2D-LiDARを車体下部に、位置補正用のデプスカメラを上部に搭載し、跳ね返りによる汚損防止のためカメラには自動開閉カバーを設けた。走行には履帯ではなく全方向移動可能なメカナムホイールを採用し、細かな位置調整を実現した。外形寸法と質量は表-1に示すとおり、工事用エレベータで搬送可能な仕様とし、現場での取り回し性を確保している。

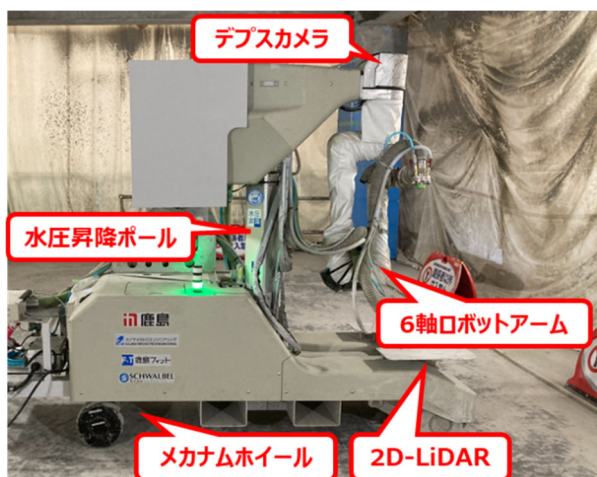


写真-2 ロボット外観

表-1 ロボット仕様

本体サイズ	W:2,830×D:850×H:1,700(mm)
本体質量	900kg
対応高さ	4.8m
走行部	4輪メカナムホイール
センサ	LiDAR・デプスカメラ×2
アーム	協働6軸ロボットアーム
昇降装置	水圧式升降ボール

2.3 点群を用いた施工対象形状の認識

ロボットによる吹付には、施工対象梁の位置・姿勢・寸法などの幾何情報が必要であり、従来は3D設計データ(BIM)から寸法情報を抽出していた。しかし、BIMには不要な情報が多く、抽出作業に時間を要するうえ、専門知識を持つ技能者に依存するため、普及の妨げとなっていた。本システムでは、施工開始時に図-3に示す3Dスキャナーで対象グリッドをスキャンし、得られた点群から、床・柱・梁・設備スリーブ等を認識し、位置・姿勢を含む形状情報を自動算出する機能を開発した¹⁾。スキャンには小型で携帯性に優れたLeica社BLK360 G1を使用し、ボタン操作のみで施工対象の幾何情報を取得可能である。

その場で取得した点群データから梁形状を自動

で計算するため、BIMデータからの抽出と比較して、事前準備作業を削減することが可能となった。

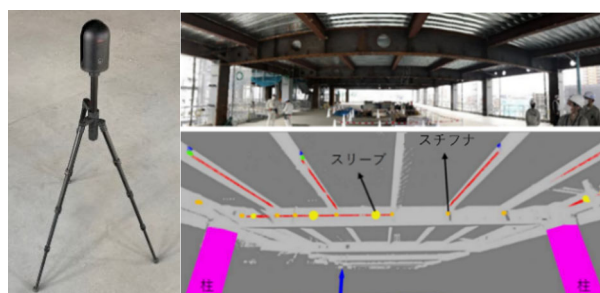


図-3 3Dスキャナーと検出結果例

2.4 アーム軌道計算機能

従来のロボットは、アームの角度を固定し、スライドレールで横行させて吹付を行っていた。しかし、スライドレールは重量が大きく、車体上部も大型化する課題があった。そこで、小型化と吹付範囲の維持を両立するため、アームの可動域を最大限に活用し、横行レール不要で広範囲の吹付を可能とするアーム軌道計算機能を開発した。

2.4.1 格子点モデルの作成

アームの軌道計算には、ノズルの位置・方向を示す姿勢情報と、移動順序を決める経路情報が必要である。これらを計算するため、梁形状に沿って姿勢情報を格納した格子点モデルを作成し、これに基づく吹付経路計算手法を考案した³⁾(図-4)。

各格子点には吹付姿勢を定義し、対象ごとの属性情報も付与できる。例えば、吹付面のない配管スリーブ円内の格子点には“吹付対象外”といった情報を設定することで、後述する経路計算時に自動で回避することが可能となる。

2.4.2 吹付経路の計算

吹付経路の計算には、深さ優先探索(DFS: Depth-First Search)アルゴリズム⁴⁾を適用した。DFSは、設定した優先順位に基づき、始点から可能な限り深く探索し、行き止まりに達すると分岐点に戻って探索を続ける手法である。図-5に設定した探索方向の優先順位を示す。例えば貫通孔周辺の探索では、吹付開始位置から優先度の高い方向に進み、行き止まりに達した場合は直前の分岐点に戻って探索を続けることで経路を決定する(図-6)。

本手法により、吹付対象の格子点を順次移動し、塗り残しを防ぎつつ効率的な経路を構築できる。特に、貫通孔周辺など複雑な形状においても、優先順位に従った探索により連続的な経路が得られる。

また、格子点モデルにはノズル位置とアーム姿勢情報が格納されているため、探索結果を時系列順に並べるだけで吹付動作を生成できる。この仕組みにより、アームの可動域を最大まで活用しつつ広範囲かつ柔軟な自動経路生成が可能となった。

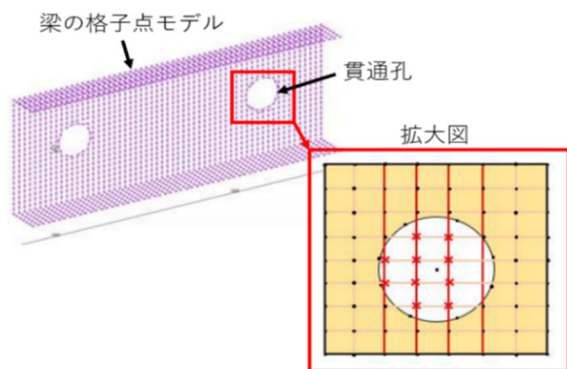


図-4 格子点モデル

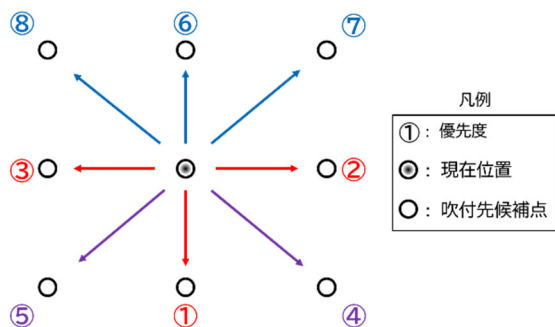


図-5 探索の優先順位

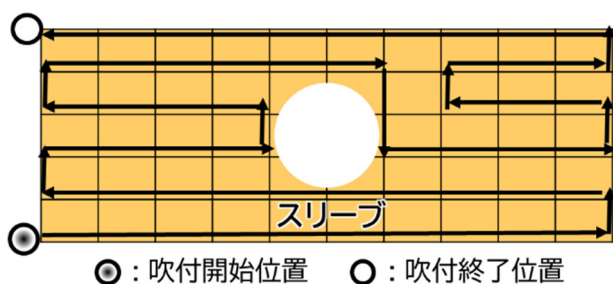


図-6 貫通孔周辺の吹付経路イメージ

2.5 モーション・シミュレータの適用

従来、吹付経路生成アルゴリズムの評価や吹付姿勢などの動作パラメータ調整は、ロボット実機を用いて実施していた。しかし、実機による検証は開発サイクルが長期化し、実験補助などの人的コストも増大する。また、予期せぬ動作による鉄骨との干渉でアームが破損する、あるいは転倒による人的災害のリスクも存在する。そこで、図-7 に示す干渉チェック機能に加え、吹付状況を可視化する機能を備えたモーション・シミュレータを開発した。本シミュレータは、図-1 の施工対象の幾何情報と図-6 の吹付動作情報を取り込み、図-7 のようにソフトウェア上で現場環境を再現できる。これにより、車体移動を含む吹付動作全体の確認が可能となる。また、吹付ノズルから噴射される仮想吹付材料と梁との干渉点を紫色の円錐で表示し、吹付方向と位置を視覚的に確認できる。

このシミュレータの活用により、開発・検証サイクルの効率化と安全性の向上を実現した。

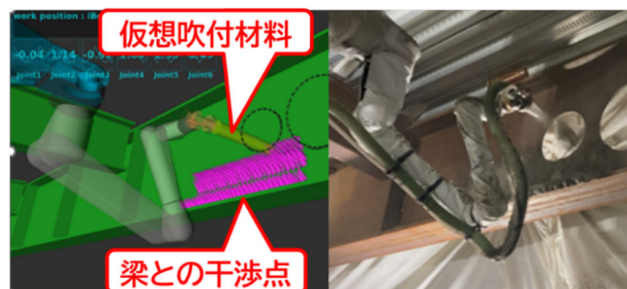


図-7 モーション・シミュレータと実際の吹付

2.6 自己位置推定

車体の盛替え作業による施工速度低下を防ぐため、本ロボットでは2D-LiDARを用いた自己位置推定と自律走行を行う機能を開発した⁵⁾。参照するマップは、施工対象形状の認識時に取得した点群データからマップを自動的に作成することで、吹付直前の現場の状況を反映している(図-8)。このマップと2D-LiDARで取得した点群をマッチングさせることで自身の位置を推定する。これにより、日々マップが変わる建設現場の環境でも、安定して自己位置を推定することが可能となる。

ここで、2D-LiDARによる自己位置推定には±50 mm程度の誤差が生じる。そこで、施工直前に車体上部に搭載したデプスカメラで梁のウェブ面を検出し、車体位置を補正する機能を開発した(図-9)。デプスカメラを車体の前と左の2箇所に取付けることで、前後左右の位置補正を±10 mm以内の精度で行うことが可能となった。

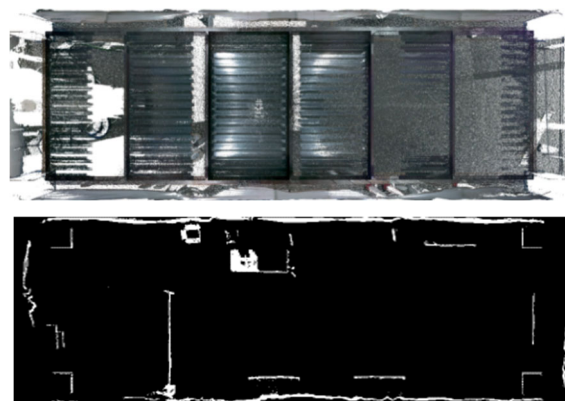


図-8 取得した点群(上)と作成したマップ(下)

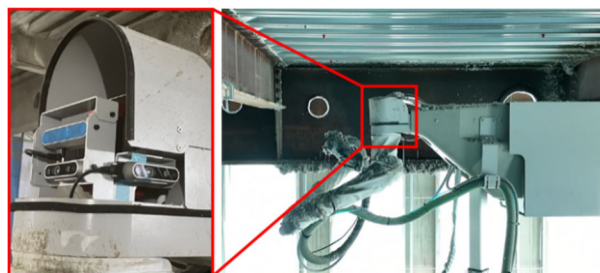


図-9 開閉カバーとデプスカメラ

2.7 施工フロー

本ロボットの施工フローを図-10 に示す。まず、メカナムホイールにより吹付開始位置まで自律移動し、昇降装置でロボットアームを含む上部フレームを吹付予定高さまで上昇させる。次に、デプスカメラによる位置補正及び材料吐出などの準備が整った後、ロボットアームでノズル先端位置を制御しながら耐火被覆材を自動吹付する。なお、材料の吐出と停止といったプラント制御も、ロボットからの指令により自動で行う。

ロボットの搬入・搬出を除き 3D スキャンから吹付完了までのオペレータによる作業指示は専用のタブレット PC で行う。吹付開始から完了までの一連の動作は、車体移動も含め全自動で実行可能である。これにより、従来は吹付技能者とコテ押さえ技能者の 2 名で行っていた作業を、図-11 に示すようにコテ押さえ技能者がロボット操作を兼務することで省人化できる。

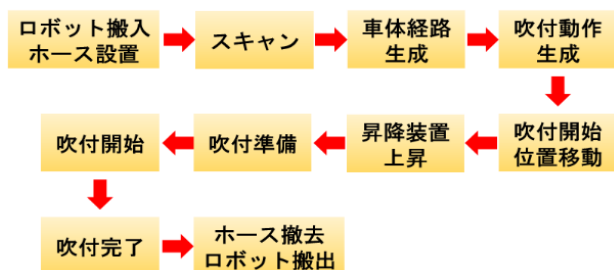


図-10 ロボットによる施工フロー

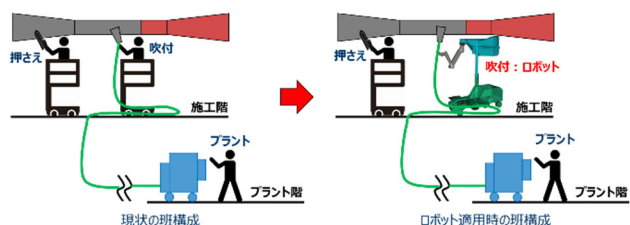


図-11 ロボットによる吹付作業の代替

3. 現場試行計画

本ロボットシステムを当社施工現場にて試行した。本章では適用工事の概要、施工対象及び施工実績の取得方法について説明する。

3.1 適用工事の概要

本ロボットを延床面積 25,810.6 m²の事務所ビルにて試行した。詳細な工事概要を表-2 に示す。地上 13 階のうち基準階は 2～13 階で、本ロボットは図-12 に示す基準階平面図 4～5 階の計 2 フロアの一部に適用した。敷地条件による後施工範囲や、タワークレーンや工事用エレベータの開口周りはロボットの施工範囲外とした。

表-2 工事概要

工事名	オフィスビル
工期	2023/12/1～2025/10/15(22.5 ヶ月)
工事場所	愛知県名古屋市中区
建築面積	1,845.5 m ²
延床面積	25,810.6 m ²
構造	S 造, 地下 SRC 造
階数	地上 13 階・PH1 階・地下 1 階
最高高さ	59.9m

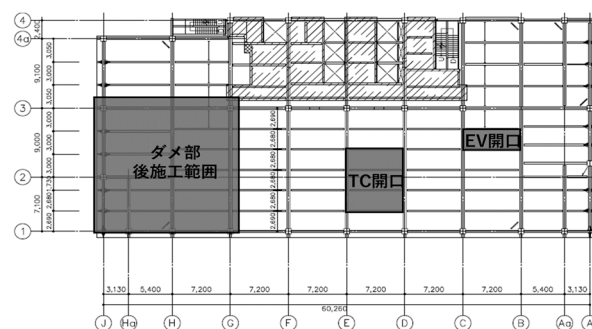


図-12 基準階平面図

3.2 施工対象

施工対象梁を図-13 及び図-14 に示す。対象は大梁・小梁であり、小梁スパンは 2,680～3,000 mm とした。施工範囲はロボットの施工能力、工事のタクト工程、技能工の施工範囲を考慮して決定した。

ロボット施工階の耐火時間は全て 2 時間耐火(吹付厚さ 45 mm)である。ロボットの吹付面積は、対象梁の表面積に基づき算出した。図-15 に吹付パターン別の対象部を示す。図-15(a)は梁全断面を吹付する場合、図-15(b)はロボットが一部施工できない外周部を対象とする場合である。対象面積の合計は 523m²となる。



図-13 4F 施工範囲（黒塗り部）



図-14 5F 施工範囲（黒塗り部）

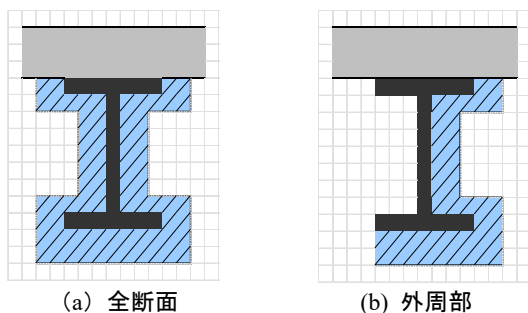


図-15 吹付面積計算範囲例（斜線部）

4. 現場試行結果

4.1 車体動作の評価

現場環境において、ロボット搬入から吹付までの一連の動作を確認した。自己位置推定と事前シミュレーションによる動作確認により、写真-3 に示すように手先と梁の距離は一定に保たれ、吹付中にアームと梁が接触することなく、安全性の向上を確認した。一方、吹付中に工事用エレベータが昇降すると、エレベータのゲージと昇降路の間に風が発生し、写真-4 に示す開口を覆う養生材（ブルーシート等）が揺れる。その結果、2D-LiDAR で取得した点群がマップと合わなくなり、一時的に自己位置を見失う事象が発生した。エレベータの通過後は自己位置が復帰するが、通過中は車体移動を停止する必要があった。自己位置を喪失した状態での移動は危険であるため、周囲環境の変化に対してより堅牢な自己位置推定アルゴリズムの開発が必要であると分かった。



写真-3 ジョイント部吹付の様子



写真-4 エレベータ開口周り等の養生

4.2 評価方法

従来の耐火ピンによる測定はピンポイントでの評価に限られ、被覆全体の品質把握が困難であった。そこで、物体検出時に使用した 3D スキャナーを用い、吹付後に点群データを取得し、吹付前の点群との差分解析により吹付厚さを定量評価した。ロボット施工歩掛については、作業内容ごとにシステム内でログを自動収集し、解析を行った。ログは移動時間、吹付時間、待機時間を記録し、後日実際の施工面積を基に吹付速度を算出した。

4.2.1 吹付厚さ及び比重

吹付前後の点群差分解析結果の例を図-16 に示す。被覆厚が薄い部分は青系、厚い部分は赤系で表示される。図-16 より、ウェブ面及び下フランジの大部分が 2 時間耐火基準の 45 mm 以上であることを確認した。また、本システムのアーム軌道計算機能により、梁交差部（ジョイント）やスリーブ周辺も吹付可能なことを確認した。しかし、下フランジ小口やスリーブ周辺、ジョイント付近では一部 45 mm 未満の領域が生じ、人による補修を要した。

この原因は、複雑な動作時にアームの加減速により吹付速度が部位ごとに変化したためと考えられる。補修時間の増加は施工効率を低下させるため、より均一な吹付を実現するモーション改良が必要である。

また、ロボットが一度に吹付可能なスパンは約 1m であり、図-16 の範囲は 3 スパンに分けて吹付を行った。スパンの継ぎ目も凹凸が発生しやすく、一部は目標の 45 mm を大きく上回る 90 mm 程度の厚みとなっていた。基準値は満たしているが、極端に厚みがあると次工程の作業の支障となるため、折返し部分のモーション改良が必要と分かった。なお、比重は 0.30~0.50 の間となっており、基準の 0.28 以上を満たしていた。

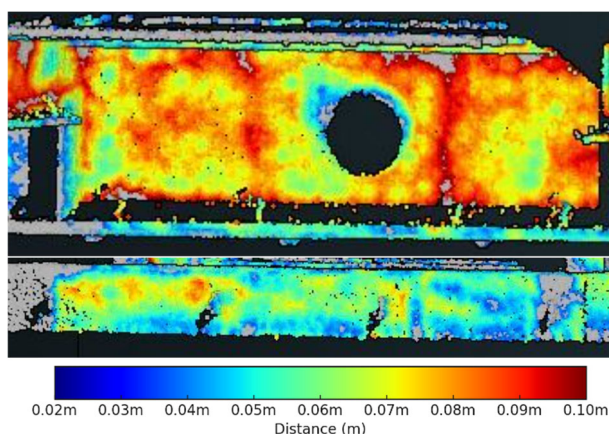


図-16 吹付厚さの可視化

4.2.2 施工歩掛

ロボットのログや施工実績から算出した、日々の単位時間当たりの吹付速度と吹付面積の推移を

図-17に示す。技能者の施工範囲との調整で、日によって施工本数に制限があったため、ロボットの吹付面積は日によって変動が大きい。反対に、吹付面積と稼働時間から計算した吹付速度から、吹付面積に関わらずほぼ一定速度で施工可能なことが分かった。

施工速度は最大で約 $20\text{m}^2/\text{h}$ 、施工期間の平均では約 $15.6\text{m}^2/\text{h}$ となった。また、一日の最大施工面積は、ロボットが5時間稼働した日において約 70m^2 であった。ここで、一般的な技能者の1日の施工面積を $130\text{m}^2/\text{日}$ （5時間吹付）とすると、技能工に対しロボットは約53%の施工能力をとなることが分かった。

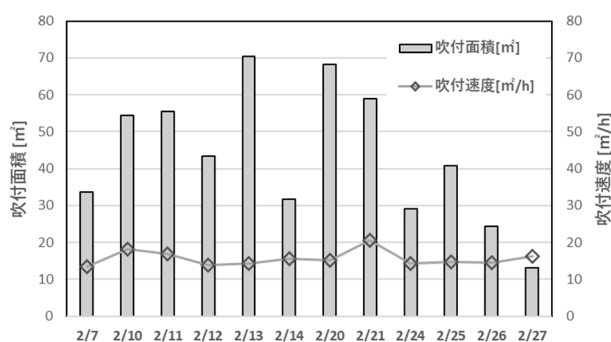


図-17 単位時間当たりの吹付速度

施工速度が伸び悩んだ原因としては、稼働時間に対し車体の移動時間の占める割合が高いことが原因と考えられる。図-18に稼働時間における移動時間（車体移動、ポール上昇）と吹付時間（材料吐出開始～吐出終了の時間）の割合を示す。表から、ロボット動作時間の内、約50%が車体移動に費やされていることが分かる。これは、ロボットアームが一度に吹付可能な範囲が1mと短く、頻繁に車体位置移動を行う必要があるためである。また、移動時は安全のためポールを下げてから移動するため、ポールの上下移動にも時間がかかる。したがって、施工歩掛改善には移動やポール速度の高速化や吹付可能範囲の拡大による、車体移動時間の削減が必要だと分かった。

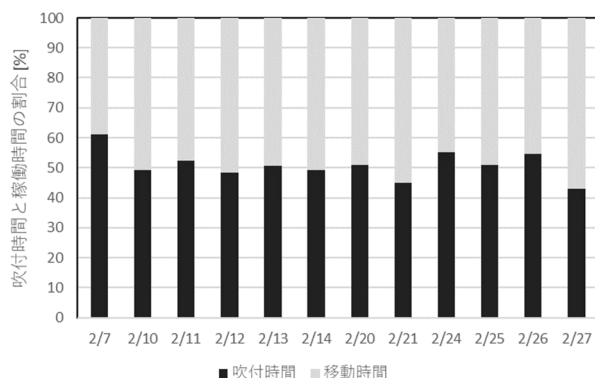


図-18 ロボット稼働時間に対する
吹付時間と移動時間の割合

5. まとめ

物体検出機能、モーション生成機能、マップ作成及び自己位置推定機能による、環境変化の大きな現場環境にも柔軟に対応可能なロボットシステムを開発した。そして、施工計画を元に現場試適用に取り組んだ。本システムを用いて梁全断面の連続吹付を行い、吹付作業をロボットで代替可能なことを確認した。また、点群を用いた吹付厚さの可視化や、歩掛計測による施工能力の評価も行った。

今後は、より周囲の環境変化に対して頑健な自己位置推定アルゴリズムの開発や、均一な出来形を実現するためのモーション改良に取り組み、動作の安定化と施工品質の向上に取り組む。また、施工歩掛向上に向け、車体移動速度の向上や吹付範囲の拡大に取り組む予定である。

引き続き、システムの改良と現場適用を進めて生産性向上を図り、苦渋作業からの解放、安全性の向上、安定した施工品質の確保に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 松田陸・吉田武史・清水宏太・石田武志：耐火被覆吹付工事のロボット化に関する研究 その1：耐火被覆自動吹付のためのロボットシステム，日本建築学会2025年度大会（九州），pp.1405～1406，2025年
- 2) 鹿島建設株式会社：建築の生産プロセスを変革する「鹿島スマート生産ビジョン」を策定，<https://www.kajima.co.jp/news/press/201811/12a1-j.htm>，2018年。
- 3) 吉田武史・松田陸・清水宏太・石田武志：耐火被覆吹付工事のロボット化に関する研究 その2：耐火被覆吹付動作の自動生成機能の開発，日本建築学会2025年度大会（九州），pp.1407～1408，2025年
- 4) 篠埜功・胡振江・武市正人：グラフの探索関数の再帰的定義と変換，コンピュータソフトウェア，Vol.17，No.3，pp.2-19，2000年
- 5) 松田陸・清水宏太・吉田武史・石田武志：耐火被覆吹付工事のロボット化に関する研究 その3：自律走行のための自己位置推定機能の開発，日本建築学会2025年度大会（九州），pp. 1409～1410，2025年

35. 自動運転ショベルの開発と現場運用

現場人員で運用できる自動運転技術

安藤ハザマ
コベルコ建機株式会社

○ 小田 銀河
藤原 翔
野田 大輔

1. はじめに

日本における生産年齢人口の減少は建設業に大きな影響を及ぼしている。特に 50 歳以上の労働者が多くを占める一方で、若年層の就業割合も低下しており、労働力不足が深刻な問題となっている。この労働力不足の解消を目的に国土交通省は 2016 年、ICT を活用して建設現場の生産性向上を目指す取り組みとして i-Construction¹⁾ を発表した。さらに 2024 年には、ICT の活用と普及が進んだとして i-Construction2.0²⁾ を発表した。ここでは建設現場のオートメーション化を推進して 2040 年に現場の生産性を 1.5 倍に拡大し、3 割以上の省人化を目指すとしている。今後は取り組みの 3 つの柱である「施工」「データ連携」「施工管理」のオートメーション化を実現するための技術開発が活発になることが予想される(図-1)。

安藤ハザマにおいては、省人化と生産性向上を目的に 2016 年から建設機械の自動運転技術の開発に取り組み、振動ローラ³⁾、ブルドーザ⁴⁾の自動化を行ってきた。2019 年からは現場での適用頻度と作業の汎用性が高い油圧ショベルの自動運転技術をコベルコ建機と共同で開発してきた。自動運転ショベルは複数の現場で実証を行い、技術面だけでなく、現場での運用面でも現場適用に問題のないことが確認できた。本稿では、自動運転ショベルが一定の完成段階となったことから、開発から現場検証についての経緯を報告する。

2. 自動運転技術の開発課題

自動運転油圧ショベルの開発にあたっては、建設現場で使用するために次の課題が考えられた。

2.1 センサ技術の活用とデータ処理

建設現場では、掘削する土砂の形状や積み込み対象であるダンプトラック荷台の位置は都度変化し、一定ではないため決められた動作では作業を行うことができない。そのため、形状や位置の変化を認識するためのセンサが必要となる。また、センサで認識した情報をもとにリアルタイムに動作を調整するデータ処理技術も必要となる。

2.2 安全性の確保

現時点では、全ての作業を自動運転建機で行うことができないため、有人運転の建機や作業員と協働で作業することとなる。作業の安全性を確保するため、フェイルセーフ機能や冗長性を持たせることで、万が一の故障時にも備える必要がある。

2.3 開発コストと経済性

センサやコンピュータを搭載するため、通常建機に比べて自動運転建機は調達コストが高くなる。複雑な作業に対応するために自動運転建機を高度化するとさらに調達コストは増加し、現場での適用が現実的ではなくなるため、経済的に実現可能な用途で使用する事が重要である。

2.4 現場人員の教育と訓練

新しい技術を導入する際には、現場の作業員に対する教育と訓練が欠かせない。自動運転技術を理解し、現場で適切に操作できるようにするための対策が必要である。

3. システム概要

自動運転油圧ショベルの用途として、建機が移動することなく同じ動作を繰り返すような運転手が苦渋に感じる作業に着目し、人に代わって作業を行う自動運転システムを開発することとした。このシステムでは、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運転を自動化している。外部認識機能として油圧ショベルに LiDAR とカメラを搭載

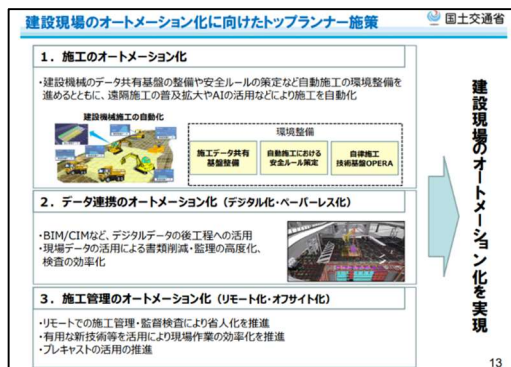


図-1 i-Construction2.0

して外部にある対象物の形状と位置を計測し、その情報をもとに動作の制御を行うことで効率的な自動運転を行っている。このとき、制御システムの開発は MBD（モデルベース開発）、外部認識機能の開発は ROS（Robot Operating System）環境を適用して全体的な開発効率の向上を図った。

3.1 システム構成

自動運転に使用した油圧ショベルはコベルコ建機製の SK135SR-5（13t 級 写真-1 左）および SK200-10（20t 級 写真-1 右）である。油圧ショベルには位置・姿勢情報を取得する角度センサ、加速度計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）。外部情報は LiDAR とカメラから取得し、その情報は周囲認識コントローラ（写真-3）に集約され、対象物の認識を行っている。対象物の認識情報とバケット、アーム、ブーム、旋回状態などを把握し、それぞれの部位を制御することで自動運転を行っている（図-2）。

3.2 制御概要

運転手の動作内容を記録し、動作を再現指示することで繰り返しの自動運転をするティーチング・プレイバック方式を採用している。動作内容の記録と再現指示はタブレットから遠隔で行うことができ、タブレットを複数台のショベルと接続し、1人で同時に作業指示を行うことができる。

3.3 外部認識機能

掘削対象の土砂は油圧ショベルに搭載した LiDAR（写真-4）の点群情報から、土砂山を判別して位置と高さを検知している。ダンプトラックの荷台は、カメラと LiDAR の情報を併用して位置を検知している。

3.4 安全支援装置

許容動作範囲を逸脱しないように、記録した動作内容と自動運転中に計測された動作内容を表示するシステムを搭載している（写真-5）。また操作タブレットとは別に、無線により自動運転を停止させる非常停止装置を設けている。さらに、外部に設置したレーザーバリア等と連携し、干渉した場合は機体を非常停止させることが可能である。

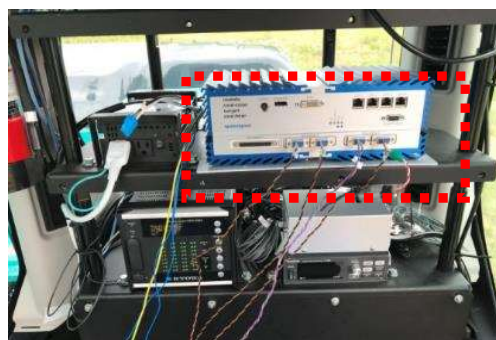


写真-2 制御コントローラ



写真-3 周囲認識コントローラ

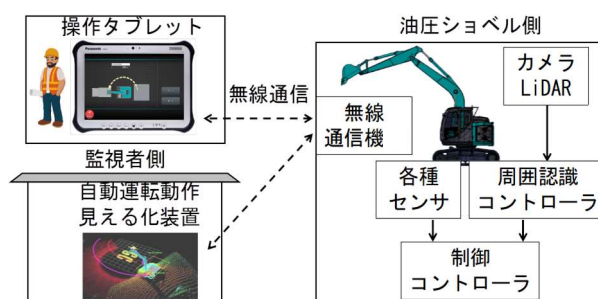


図-2 機器構成



写真-4 搭載した LiDAR



写真-1 自動運転に使用した油圧ショベル

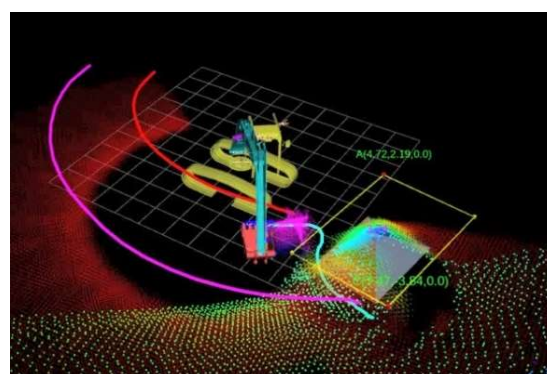


写真-5 自動運転動作の見える化

4. 実証実験と結果

4.1 外部認識機能の動作実験

(1) 実験方法

開発した外部認識機能が対象物を正しく認識・判断でき、人の運転操作と同様に自動運転できることを実験により確認した。実験では積み上がった土砂をダンプトラック荷台へ繰り返し積み込む一連の動作について検証した（写真-6）。

自動運転の動作手順は次の通りである（図-3）。

- ・自動運転システムで油圧ショベルの各部位の挙動であるセンサデータの記録を開始する。
- ・運転手が油圧ショベルを操作し、バケットの刃先位置によって掘削対象となる土砂の作業範囲を指定する（①）
- ・運転手が土砂の作業範囲からダンプトラック荷台に積み込むまでのショベルの動作軌跡を記録する。（②→③→④）
- ・自動運転システムの記録を停止する。
- ・運転手が通常の油圧ショベルを操作しながら操作タブレットで自動運転ショベルへ記録した動作の再現を指示する。（⑤）
- ・AIによる外部認識機能で検出、認識した掘削対象の土砂山の形状・位置と積み込み対象のダンプトラック荷台を特定する。（⑥→⑦）
- ・特定した情報と記録したセンサデータから、自動運転システムが掘削位置と動作経路を自動生成して自動運転の動作を実行する。（⑧→⑨→⑩→⑪）
- ・自動運転システムは荷重計量機能と連携し、バケットにすくい取った土砂重量を計測でき、ダンプトラックへの土砂積み込み重量が設定値を超えると積み込み動作を自動的に終了する。

(2) 実験結果

図-4のように、LiDARで計測した情報とAIを用いて土砂山を認識することができた。LiDARの点群情報から判別した土砂山の位置形状は、基準となる地点で比較して±200mm以内の差異であり、自動運転に問題のない精度で位置形状を認識できていると考える。また、LiDARとカメラによる情報からAIが算定したダンプトラックの荷台位置は、ショベルとの相対位置で実測に対して±50mm以内の差異であり、現場適用に問題のない精度で認識できていることを確認した。

4.2 現場での動作実験

外部認識機能を装備した自動運転ショベルの現場環境下での安全性と作業時間について検証した。

(1) 実験方法

実証実験は、シールド工事現場においてピットに貯留している掘削土砂をダンプトラックに積み込む作業を自動運転で行い、安全性や有人運転との速度比較などを検証した（写真-7）。



写真-6 自動運転の状況

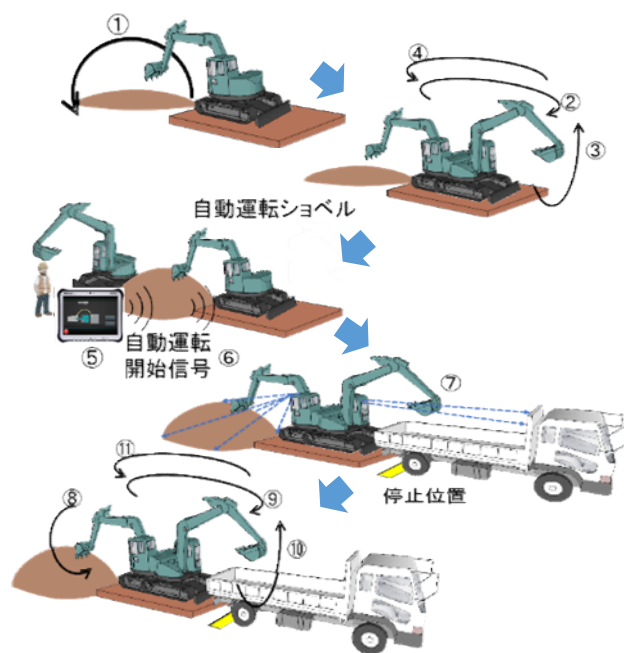


図-3 自動運転の動作手順

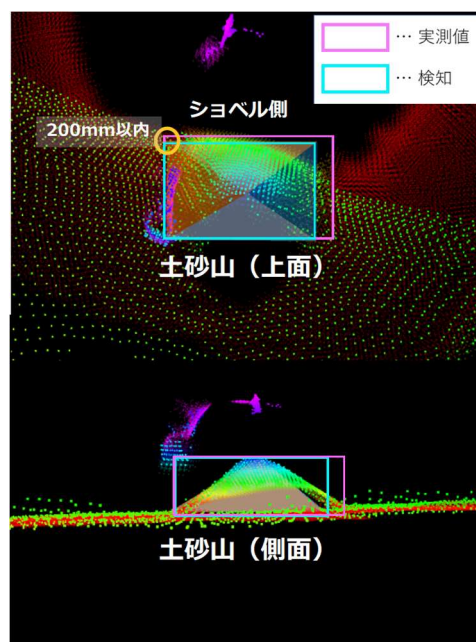


図-4 土砂形状・位置の認識結果

自動運転の動作手順は図-3 で示した通りである。このうち①～④は事前に実施しておき、⑤～⑪は自動積みを行うダンプトラック毎に実施した。

(2) 実験結果

安全面に関して、稼働中の現場であることから、人や物への接触防止を重点的に対策した。現場は油圧ショベルの動作範囲に余裕がない条件であったが、機械側の旋回角度検知やレーザーバリア設置等で稼働範囲を制限した。これにより、周囲と接触することなく積み動作を行うことができた。特に旋回軌道上の飛散防止シートを回避するため、ブーム上げながら旋回する同時動作が必要であったが、目標通りに動作して接触することはなかった(写真-8)。

また、現場で実証実験を開始時した直後の自動運転システムによるダンプトラックへの土砂積み込みに要した時間は、有人運転と比較して約2倍となっていた。その後、制御方法と動作設定を見直すことで、約1.6倍の作業時間で積み込み作業を自動化することができた(図-5)。自動運転に際しては、別途ティーチングや準備作業に時間を要するが、これらの作業は何度も行う必要がないため、サイクルタイムへの影響は小さいと考えている。



写真-7 自動運転の現場実証

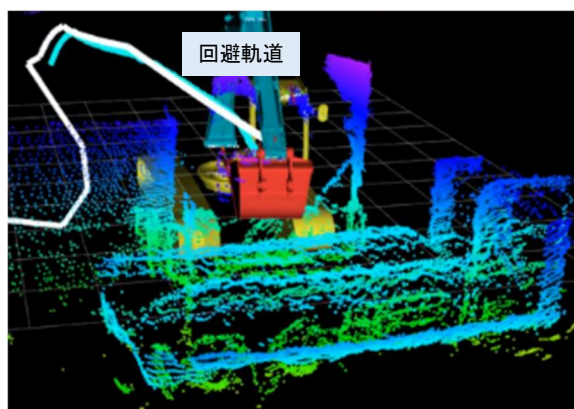


写真-8 飛散防止シートの回避

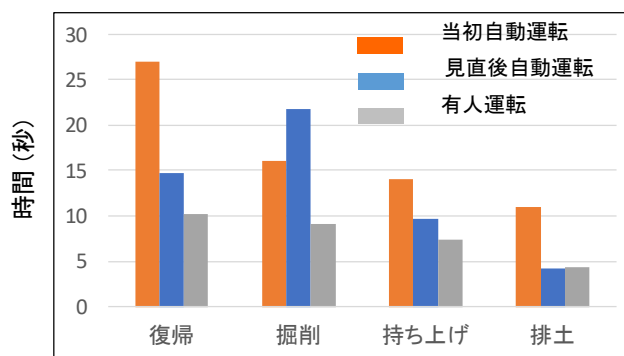


図-5 積み込み作業の時間

4.3 複数台管理機能の実証実験

自動運転では動作制御や安全面から有人運転に比べて動作速度が劣り、生産性の向上には課題がある。そこで、運転手1人で複数の自動運転ショベルを同時稼働・作業監視させることで生産性を向上させる機能を開発した(写真-9)。

(1) 実験方法

1人の操作者が2台の自動運転ショベルへ作業指示・監視することで掘削土砂をダンプトラックに積み込みが可能か実証実験を行った(写真-10)。その際、自動運転ショベルでの作業時間を計測し、有人運転と比較した。各自動運転ショベルへの動作指示は図-3で示した通りである。

(2) 実験結果

有人運転と自動運転によるダンプトラックへの土砂積み込み作業に要する時間を計測した(表-1)。有人運転では233秒に対して、自動運転はティーチング時間ほかを含めると604秒と大幅に時間を要した。この時、有人運転(運転手1名に対し油圧ショベル1台)では人日当たりの積み込み台数が100台であったのに対して、自動運転では1人の運転手が2台の自動運転ショベルの同時稼働を行ったとすれば128台となり、3割増加することが分かった(図-6)。今回は2台のショベルの同時稼働だったが、台数を増やすことでさらなる積み込み台数の拡大も期待できる。



写真-9 操作タブレットの画面

4.4 運用面を考慮した実現場での試行

(1) 実験方法

技術面では自動運転として実用化レベルに達したものの、現場人員だけでは自動運転システムを設定するのは難しく、稼働開始までに時間が掛かってしまい、自動運転の操作も難しいという運用面での課題が残っていた。そこで、それら2つの

課題について、シールド工事現場において、検証した。具体的な検証項目は次の5点である。

- ①現場搬入後の準備立ち上げ時間：現場搬入から自動運転システムが立ち上がるまでの時間
- ②日常点検の試行・評価：現場職員、作業員だけで日常点検ができるか
- ③自動運転操作の試行・評価：現場職員、作業員だけで自動運転操作、運用ができるか
- ④施工の品質評価：自動運転で荷こぼしなく積込みができるか
- ⑤自動運転の安定性：自動運転システムが安定して稼働し、かつ継続して操作、運用ができるか

(2) 実験結果

①現場搬入後の準備立ち上げ時間

自動運転システム立ち上げまでの確認項目および、各項目の所要時間を表-2に示す。自動運転システムの初回設定手順書を作成したことに加えて、タブレット画面に沿って操作すれば確認が完了するようにユーザーインターフェースを再設計したことで、ショベルの搬入からシステム稼働までの設定、動作確認に開発担当者がこれまで1日程度要していたものが、1.5時間で完了させることができた。

②日常点検の試行・評価

自動運転システムの日常点検は、各項目の詳細内容を記載した日常点検リストを作成したことで、現場人員でも問題なく実施することできた。

③自動運転操作の試行・評価

①に記載のように画面指示に沿って操作することで設定が完了するようにユーザーインターフェースを設計した。これにより直感的にタブレットを扱うことができ、2時間弱の指導で、現場人員のみでエリア設定やティーチング、自動運転の指示操作が実施できるようになった(写真-11)。

④ 施工の品質評価

エリア設定、ティーチング、および掘削対象物と積込み対象場所の検知に従い動作することで、荷台への接触やバケットからの土砂の荷こぼしもなくダンプトラックの荷台へ自動運転により積込むことができた(写真-12)。積込んだ土砂をバケットの背で均す動作も自動で行うことで、荷姿は良好であった。



写真-10 自動運転ショベル2台への動作指示状況

表-1 積込み作業の時間

有人運転の積込み時間

作業内容	所要時間(秒)
ダンプ位置確認	10
積込み	201
均し	22
計	233

自動運転の積込み時間

作業内容	所要時間(秒)	
ティーチング	93	127
エンジン始動	29	
機械の切り替え	5	
ダンプ検知	50	477
積込み	395	
均し	32	
計	604	

表-2 確認項目ごとの所要時間

確認項目	所要時間(h:m)
自動運転機器の通信確認	0:07
カメラ, LiDARおよび各種センサ動作確認	0:06
作業場所の決定	0:30
非常停止装置の動作確認	0:08
自動運転動作設定(エリア, 動作ティーチング)	0:18
自動運転動作の事前確認	0:25
合計	1:34

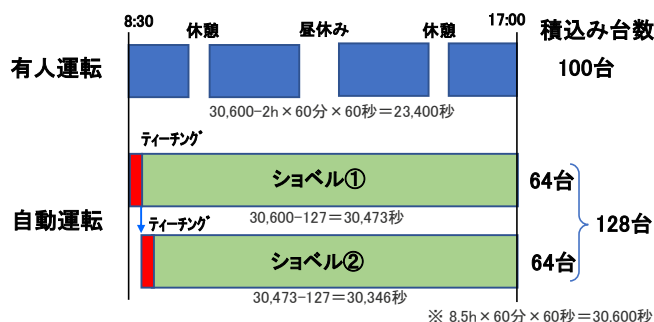


図-6 有人運転と自動運転の積込み台数比較(算定)



写真-11 タブレットによる自動運転の様子



写真-12 自動運転での積込み状況

⑤自動運転の安定性

現場での2週間の連続使用の結果、自動運転システムの不具合による停止は発生せず、安定して稼働したことで、現場人員だけで問題なく土砂の掘削・積込みを行うことができた。

5. 考察

5.1 技術面での評価

開発した外部認識機能が対象物の形状や位置を施工に問題ない精度で検知でき、より効率的な自動運転が可能であることを確認した。また、実現場での検証では外部認識機能で得た情報をもとに掘削位置や積込み位置を調整することで変化する現場状況にも対応し、効率的な運転ができることを確認した。加えて、システムが誤動作することなく、動作の信頼性でも現場適用に安全面の問題はないことを確認した。このことにより技術面では現場適用レベルに到達し、一定の完成をみたと考えている。

しかし、現時点では有人運転に比べて自動運転の動作速度は劣っており、動作速度向上に向けて制御面での改善を継続的に行う必要がある。複数台の同時稼働や休憩なしの連続稼働など現場での運用方法も合わせて検討すべきである。

5.2 運用面での評価

運用面を考慮した実現場での試行により、自動運転のシステム稼働までの時間を短縮し、現場人員だけで運用できることが確認できた。また、

開発担当者だけが操作、運転できるような取り扱いが難しいシステムではなく、広く現場に展開できる汎用性を備えていることを確認できた。このことにより、技術開発段階から、実用・普及段階に移行できたと考えている。

5.3 安全面での評価

安全性確保のためフェイルセーフ機能を持たせたシステムとしたことで、実現場での実証実験、試行では人や物との接触もなく実施できた。また自動運転システムも安定して稼働したことから、現場適用に問題はないと考えている。

国土交通省では、「建設機械施工の自動化・自律化協議会」を2022年3月に設置し、2024年3月には「自動施工の安全ルール Ver.1.0」を策定した。一方、両社はこれまでの実証を通じて様々なリスクアセスメントを行い、既に安全ルールに合致した安全性を確保していた。このこともあり、安全ルールの策定に参加し、我々の考える装備すべき安全装置やリスクアセスメントについて提言を行いながら、存在感をアピールする活動を行っている。

6. おわりに

本技術は油圧ショベルが移動することなく、同じ動作を繰り返すような単純作業の自動化を行ったものである。このような自動運転ショベルであっても、適用できる作業は少なくないと考えている。シールド掘削土の積込み、トンネルずりの2次搬出などで適用できると考えている。

このような作業であれば、複数台のショベルを1人で操作することも可能であり、人日あたりの作業量を増大させることもできる。単純作業は自動運転で行い、それ以外の作業は有人運転で行うことで限られた人員を最適配置でき、作業の効率化と生産性の向上が実現できると考える。

自動運転では、技術面だけでなく現場における運用面でも、自動運転ショベルの実用化について一定の目途がついたと考える。これらの共同開発の成果をもとに、今後、自動運転の適用工種の拡大と現場運用に向けた取り組みを加速させていく。

参考文献

- 1) <https://www.mlit.go.jp/common/001137123.pdf>
- 2) <https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/content/001738240.pdf>
- 3) 武石学ほか：振動ローラの自動運転システムに関する実験報告，土木学会第73回年次学術講演集，2018,VI-701
- 4) 武石学ほか：ブルドーザの自動運転システムに関する撒き出し実験報告，土木学会第74回年次学術講演集，2019,VI-357

II 梗概集

Ⅱ-1 ポスターセッション要旨

1. 機械学習を用いた RC 構造物の異常検知手法および

自動測定ロボットの開発

五洋建設株式会社

○バルガス ルベン

同上

池野 勝哉

東北大学

内藤 英樹

大分工業高等専門学校

木本 智幸

1. はじめに

高度経済成長期に建設された既存インフラは建設後 50 年が経過するものが増加しており、広範に整備されたインフラの健全性を効率的に調査し、維持管理に資するデータを蓄積することが求められている。従来、コンクリート構造物の点検は、検査員による目視や打音といった主観的な評価が行われており、近年では超音波法、電磁波レーダなどの非破壊検査も併用されるようになった。しかし、これらの検査方法は表面付近の内部空洞等を検出できるものの、ひび割れを含む部材内部の健全性を評価することは難しいと考えられる。そこで、著者らは動電式の小型加振器を用いた局所振動試験法¹⁾(図-1 参照)に着目し、RC 構造物に入力した弾性波の応答スペクトルの変化から内部損傷を評価する異常検知システムの開発を行った。

2. 従来技術の課題

2. 1 応答スペクトルの評価における課題

通常、局所振動試験法では、応答スペクトルのピーク周波数(=共振周波数)の変化に基づいて異常を検知する。しかし、実構造物では複雑な境界条件や損傷状態により、得られた応答スペクトルには複数のピー

ク周波数が出現するため、客観的に共振周波数を特定することが難しいことが多い。そこで、機械学習モデルのオートエンコーダを用い、共振周波数のみならず応答スペクトル全体の変化を捉える手法を提案する。

2. 2 現場測定における課題

局所振動試験法における各測定の測定時間は約 1 秒以下²⁾と僅かであるものの、広範囲なインフラ検査には効率的な測定方法が望ましい。そこで、本手法を実装した自動測定ロボットを開発し、測点移動・測定・評価までをオートメーション化した異常検知システムを構築する。

3. 異常検知システムの概要

3. 1 機械学習モデルを用いた異常検知手法

前述の応答スペクトルの評価における課題に対し、図-2に示すオートエンコーダによる機械学習モデルを用いる²³⁾。オートエンコーダは、中間層のノード数を減らして次元削減(エンコード)を行い、逆処理によって元の次元データを再構成(デコード)する。RC 構造物の健全データのみで学習済みオートエンコーダを構築した場合、健全データを再構成ができるが、学習していない損傷データの再構成は著しく精度が低下する。この性質を利用して、検査対象の測定データを学習済みオートエンコーダに入力し、入力層と出力層の再構成誤差より異常度を評価する。ここで、オートエンコーダの学習には比較的大量の健全データが必要となるが、検査対象の健全データを事前に取得することは現実的に難しい。そこで、適当な RC 構造物から取得した健全データを用いて学習したオートエンコー

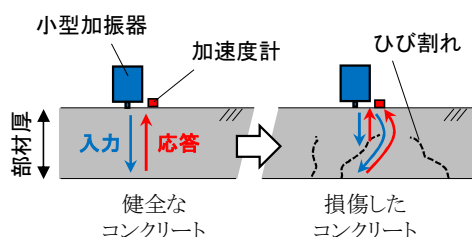


図-1 局所振動試験法の概念図

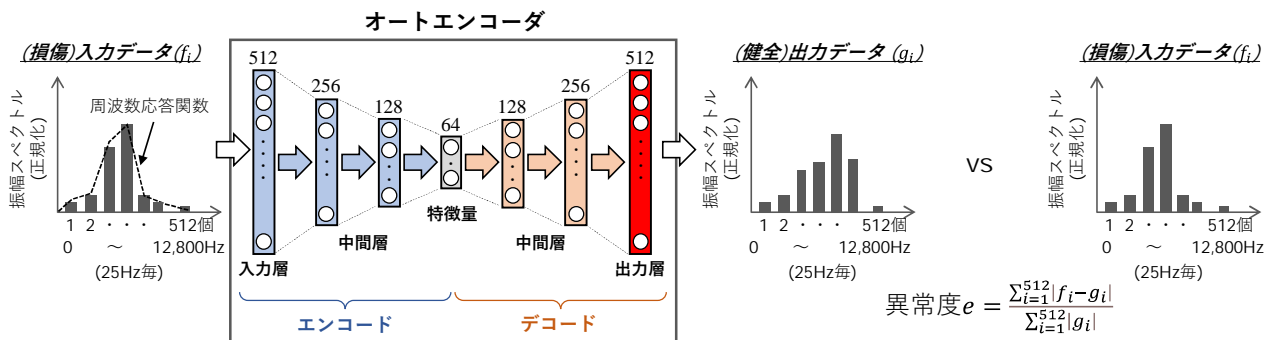


図-2 異常検知手法の概要

ダを検査対象の RC 構造物用にカスタマイズする手法として転移学習を用いる³⁾。この手法は、検査対象である RC 構造物の全てが損傷していないことが前提であり、少量でも健全なデータが取得できる場合に適用可能となる。転移学習は、一般的なデータセットで学習したモデルに対して、再学習した新しい分類器を追加するだけで、再学習された特徴を活かしたモデルにカスタマイズできる特徴をもつ。本手法の転移学習は図-2に示すオートエンコーダの最終出力層を再学習する。これにより、検査対象の健全データがない場合でも、異常検知が可能となる。

3. 2 自動測定ロボット

現場測定の課題に対し、図-3に示す自動測定ロボットを開発した。本ロボットは、GNSS および IMU が搭載されており、事前に設定された座標へ自律走行し、小型加振器の昇降および加速度計による応答加速度のピックアップ、さらにはFFT処理による応答スペクトルから前述した異常検知まで自動で行う。測定部には、小型加振機と加速度計を部材面に一定圧で接触させる昇降装置が搭載されており、測定データの再現性を確保している。なお、DC ブラシレスモーターを用いてバッテリー消費を抑え、オムニホイールを採用することで、狭隘エリアでの走行性を向上させている。

4. おわりに

本稿では、局所振動試験法、オートエンコーダおよび転移学習を用いた異常検知手法、そして自動測定ロボットを統合した RC 構造物の異常検知システムについて述べた。本システムは、従来、困難であった部材



図-3 自動測定ロボットの概要

内部の損傷を効率的かつ客観的に評価できるものと期待される。今後は、本システムを数多くの実構造物に適用し、部材を構成する境界条件や材料特性の影響、および様々な劣化状態に対する適用性を検証し、実務的なシステムへと改良を重ねる予定である。

REFERENCES

- 1) 内藤英樹, 小林珠祐, 土屋祐貴, 杉山涼亮, 山口恭平, 早坂洋平, 安川義行, 鈴木基行: 局所振動試験に基づく道路橋 RC 床版の内部損傷評価, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), 73 巻, 2 号, pp. 133-149, 2017.
- 2) 内藤英樹, 木本智幸, 藤岡光, 藤倉修一, 運上茂樹: 振動測定とオートエンコーダによる RC 部材の地震時損傷の検知, AI・データサイエンス論文集, Vol.3, No.J2, pp.134-144, 2022.
- 3) Vargas R., 池野 勝哉, 内藤 英樹, 木本 智幸: 転移学習によるオートエンコーダモデルを用いたコンクリート構造物の異常検知手法, 構造工学論文集 A, 71A 巻 p. 592-602, 2025.

2. ホイールローダの衝突検知ブレーキシステムの開発

コマツ ○内海 将広
コマツ 内藤 亨

1 はじめに

当社で把握しているホイールローダの事故種別データによると、“衝突”が最も多く、全事故の約4割を占め、そのうち約7割が後進中に発生している。ホイールローダの主な用途は土砂や碎石の掘削、積込であり、前方のダンプトラックなどに注意しながら前後進を繰り返すため、後方の障害物への注意が散漫になりやすいことが事故発生要因と考えられる。このようなホイールローダの後進時の衝突事故を減らすべく、後方障害物への衝突の危険性を検知した場合には、警報やブレーキを自動で作動させる“衝突検知ブレーキシステム”を開発した。また、転倒事故を防止する“転倒警報システム”も併せて開発した。

2 衝突検知ブレーキシステム

2.1 システム構成



ホイールローダに 24GHz 帯準ミリ波レーダ (2基)、警報ブザー、ブレーキ EPC バルブを搭載。現在の車両状態と、レーダにより取得した障害物の位置から衝突危険度を3段階で判定し、その結果に応じて警報ブザーやブレーキ EPC バルブに電気信号を送信し、警報やブレーキを作動させる。

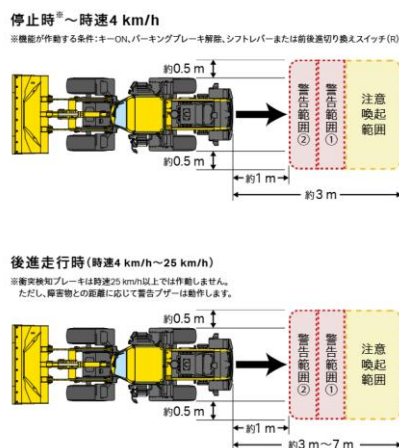
警報ブザーの断続音の変化で危険度をオペレータに知らせ、危険度が上昇した場合には自動的にブレーキが作動する。

2.2 誤検知抑制機能

本システムは、警報やブレーキの不要な作動による作業性悪化を低減するために、ブレーキの作動タイミングは可能な限り遅く設定しており、さらに次の誤検知抑制機能を備えている。

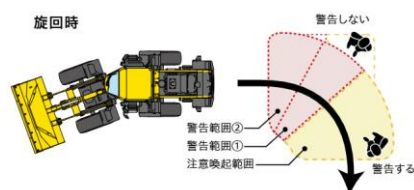
• 車速連動機能

障害物までの距離だけでなく、相対速度も考慮し衝突危険度を判定することで、不要な警報、ブレーキの作動を抑制



• ステアリング連動機能

ステアリング角度から進行方向を予測し警報範囲を変化させることで、不要な警報、ブレーキの作動を抑制



• かき上げ連動機能

かき上げ作業（土砂の積み上げ作業）中であることを検知し、自動で警報機能・ブレーキ作動機能をOFFにし地面を検知してしまうことによる作業性の悪化を抑制



2.3 転倒防止制御

車両が不安定な状況で、衝突検知ブレーキシステムを作動させると転倒するおそれがある。これを防ぐために、IMU（慣性計測装置）を搭載し、車体傾斜角度（ロール・ピッチ角）を取得できるようにし、車速、車体傾斜角度、作業機姿勢、ステアリング角度から、ブレーキを作動させると転倒するリスクがある場合には、衝突検知ブレーキ機能を無効化する制御を導入している（警報のみ継続）。機能無効時は、モニタ上のアイコンを以下のように切り替え、無効であることをオペレータに通知する（2.4の無効化スイッチ操作時も同様）。



2.4 一時キャンセル機能と動作モード

衝突検知ブレーキの無効化スイッチ



狭所走行時には、実際には衝突リスクの低い障害物を検知してしまうことが起こり得る。このような場面でも衝突検知ブレーキに煩わされずに走行できるようアームレスト部にスイッチを設け、衝突検知ブレーキを一時的に無効化できるようにした。無効化後は、前後進レバーの切替で自

動復帰する仕様とし、スムーズな操作性を実現した。さらに、モニタ操作によりオペレータが任意に動作モードを「警報のみ」または「OFF」に切替できるようにしており、様々な現場、環境に対応できるようにしている。

動作モード	作動中アイコン	検知時アイコン
警報+ブレーキ		
警報のみ		
OFF		

3 転倒警報システム

衝突検知ブレーキシステムと同時開発した転倒警報システムは、車体傾斜角度、作業機姿勢、ステアリング角度からタイヤ接地反力を計算し、閾値を下回った場合に警報ブザーで転倒の危険をオペレータに知らせる機能である。かき上げ作業は、未熟なオペレータには難しく、車両を転倒させるおそれがある。このような作業で、本システムは効果を発揮する。衝突検知ブレーキシステムで搭載したIMUにより、車体傾斜角度を取得できるようになったことを利用し、追加機器なく、本システムを導入することができた。



4 おわりに

衝突検知ブレーキシステムおよび転倒警報システムの開発により、ホイールローダを使用する建設現場の安全性向上が期待できる一方で、使ってもらうことで新たな課題が生じることも予想される。今後もそれらの課題に対処し、ホイールローダの事故低減を目指していく。

3. ICT除雪機械の開発

歩道除雪車の作業装置自動化機構の開発

国土交通省北陸地方整備局北陸技術事務所

同

同

○深澤 慶

畑山 啓

以倉 直隆

1. はじめに

北陸地方整備局では、管内3県（新潟県・富山県・石川県）の直轄国道14路線、管理区間延長約1,092kmの冬期道路交通を確保するため、約530台の除雪機械を配備し、除雪作業を実施している。そのうち、149台の歩道除雪車を配備している。

除雪機械の運転は路面状況、道路構造、沿道状況等の変化に適応した操作が必要であり、経験と熟練した技能を必要とするが、昨今は、熟練技能を持つオペレータの高齢化や、新規入職者の減少により、担い手の確保及び技能の維持が課題となっている。

このような背景のもと、北陸技術事務所では、オペレータの負担軽減、経験の浅いオペレータの作業支援を目的として、ICT（情報通信技術）を活用し、作業装置の操作を自動化した除雪機械の開発に取り組んでいる。

本稿では、作業装置の自動制御機能を装備した歩道除雪車について概要を報告するものである。

2. 作業装置の自動制御

2-1) 歩道除雪車作業装置の概要

歩道除雪車は、歩道に降り積もった雪をかき込み、かき込んだ雪を飛ばす「オーガ／ブロー」、投雪位置を調整する「シュート」で構成されている。（図-1）

オペレータは、車両本体の運転と同時に7本のレバーにより作業装置の操作を行わなければならないが、熟練した技能が求められる。歩道除雪車の作業装置（オーガ／ブロー、シュート）の操作を自動化することにより、オペレータは車両の運転に専念できるため、作業の安定性が向上する。また、オペレータの負担軽減も図られることにより、担い手の確保にも寄与するものと考えている。



図-1 歩道除雪車の作業装置および操作レバー

2-2) 自動制御機能の概要

作業装置を自動化するための制御は、GNSS受信機（準天頂衛星システムみちびき対応型）で取得した自車位置情報と、事前のMMS（モバイルマッピングシステム）による調査から得た構造物情報、除雪作業用地図データに反映させたオペレータの運転操作情報とを照合し、作業装置を動作させる位置へ到達した際、自動制御装置から除雪車本体の作業装置制御ユニットへの制御信号を出力し、作業装置の動作を行う仕組みとしている。

自動化を図る装置の動作は、①シュートの旋回 ②シュートの伸縮 ③シュートキャップの開閉 ④除雪装置枠の上下動作 ⑤除雪装置枠の左右傾斜動作 ⑥除雪装置枠の前後傾斜動作の6つの動作としている。（図-2）

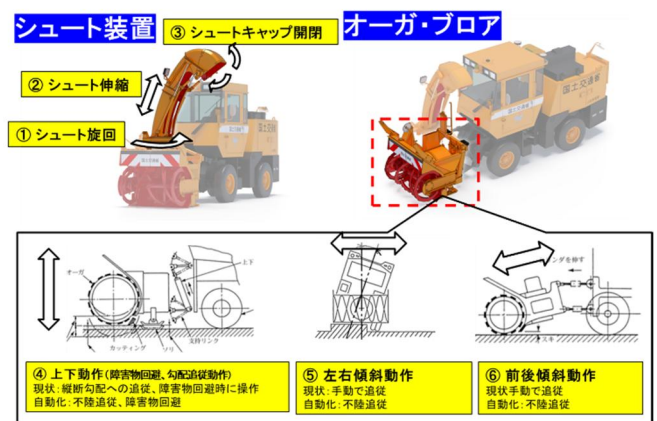


図-2 自動化を図る除雪作業装置の動き

2-3) 自動制御プログラムの概要

オペレータの手動運転操作情報を自車位置情報とともにリアルタイムに記録し、そのまま再現する「ならい制御」および、投雪したい線上の座標へ投雪することができる「ライン制御」があり、これら2つの自動制御プログラムを構築している。

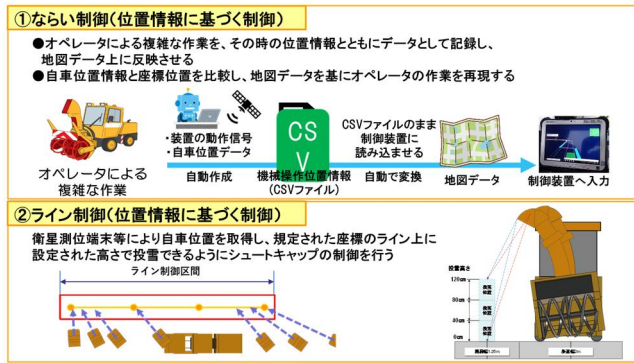


図-3 自動制御プログラムの概要

3. 自動制御機能の精度確認

自動化した作業装置の動作精度について、現道上で動作の実証試験を実施した。

3-1) 現道上での実証試験 (投雪制御機構)

降雪期前の無負荷試験(投雪なし)と、降雪時の負荷試験(投雪あり)をそれぞれ実施した。

ならい制御については、特に大きな問題はなく、覚えた動作をそのまま再現できた。手動操作とならい制御による作業装置の動作位置ズレ誤差については、縦断方向-1.35m~0.57m、横断方向0.00m~0.27mとなった。衛星受信状態が悪い箇所では位置ズレが1.0mを超える箇所があったが、受信状態が良い状態では位置ズレ1.0m以内で良好な結果を得ることができた。

ライン制御については、「車体進行方向の左右のズレ」「マウントアップ歩道の車両乗入部や残雪による不陸部分を走行する際の作業装置の左右の傾き」などによる横断方向の車体姿勢変化に対して、ライン制御が十分機能しているか、誤差と再現性について検証した。

投雪ラインの位置に対する横断方向の誤差については、-1.07m~0.09mであり、本制御の有効性が確認できた。



図-4 ライン制御での投雪状況

3-2) 現道上での実証試験 (不陸追従)

ならい制御により、歩道上で最も除雪がしにくいマウントアップ歩道の頂点を基準に、頂点の前後5mで残雪高さを計測した。

出来形管理基準としては「通学児童等の歩行に支障がない程度であれば許容可能」と考え、新潟県の歩道除雪の出来形管理基準「除雪後の残雪深は5cm以下を標準とし、除雪工法からやむを得ない場合は10cm以下とする」に準拠することとした。

試験の結果、手動操作とならい制御では残雪の高さに大差はなく、手動操作による除雪時に残雪高さが、出来形管理基準(5cm以下)を満たしたときのデータをならい制御で用いた場合、ならい制御による除雪後の残雪は、出来形管理基準を満たす結果となった。

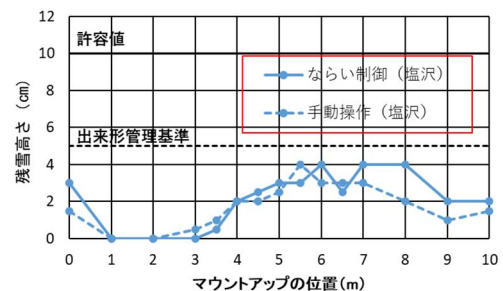


図-5 除雪後の残雪高さ

4. まとめ

位置情報に基づく制御が歩道除雪作業に有用であり、精度も十分実作業で耐えられると判断できた。

今後の課題としては、実証試験で得られたような良好な結果を得るための条件を詳細に調査し、様々な条件がある実作業現場での運用方法等について検討を深めることで、自動化した歩道除雪車が活用できる条件を整理する必要があると考えている。

4. 除雪作業等の安全作業の促進を目的としたメタバースプロジェクト

「JAMP」とスマートフォンを用いたAR点検支援ツールの紹介

一般社団法人日本建設機械施工協会施工技術総合研究所・長岡技術科学大学工学研究科 システム安全工学分野

○酒井龍之介

長岡技術科学大学 システム安全系 高橋憲吾

一般社団法人日本建設機械施工協会施工技術総合研究所 佐野昌伴

本プロジェクトの位置づけ

長岡技術科学大学および豊橋技術科学大学（両技科大）は、令和4年に国立大学経営改革推進事業に採択され、「メタバースの活用と技科大リソースマネジメントによる研究教育システムの価値向上と財政基盤の拡大」に取り組んでいる。この取り組みの一環として、長岡技術科学大学では、システム安全工学系の教員・大学院生を中心とした「除雪足場メタバースプロジェクト」

（通称：JAMP）を展開している。JAMPは、除雪作業や足場作業における安全作業の促進と人材不足の解消を目的としている。情報通信白書[1]によれば、メタバースはインターネット上に構築された仮想世界であり、アバターを通じて利用者が相互に交流する空間と定義される。メタバースの実現を支える、現実と仮想を融合させた技術はXR（Extended Reality）と総称され[2]、特にAR（Augmented Reality）は、スマートフォンやスマートグラス等を用いて現実世界に仮想情報を重畳表示する技術である。本研究では、このAR技術を活用し、除雪機械の点検支援ツールを開発した。

現状の点検作業における課題

建設機械、特に除雪機械は、公道を走行し作業を行う。除雪機械は、その大きな機関出力や運転質量、および作業装置の存在から、事故発生時の危害が大きいことが懸念され、労働安全衛生規則では始業時点検が義務付けられている[3]。点検項目と方法はメーカーの取扱説明書に示されているが、以下の課題が存在する。取扱説明書を持って点検作業を行うことは現実的ではないことから、以下の課題が存在するといえる。

① 新規入職者は作業装置名や点検項目を事前に

習得する必要がある。

- ② 除雪機械は50時間点検や100時間点検などの定期点検が必須であり、その都度点検の内容が異なる。
- ③ 運転手や作業者が危険源に接近するため機体には多数の警告表示ラベルが存在する上、過酷な使用環境を考慮すると、QRコード等の新たなマーカを増設することは現実的ではない。

AR点検支援ツールの開発要件と機能

現状の課題を解決するため、AR点検支援ツールでは以下の要件を達成することとした。

- ① 作業装置名称や点検項目を表示する
- ② 管理者と作業者がリアルタイムで点検状況を共有する
- ③ マーカ型ARを用いて、警告表示ラベル等の画像に基づくAR表示を行う

AR点検支援ツールは、Unity AR Foundationパッケージを用いて開発し、Android OS搭載スマートフォン向けアプリケーションであり、以下の機能を持つ。

- ① ツール起動後、任意のマーカ（図1）を読み込むと、マーカが貼り付けられた装置の名称と点検項目が画面上に重畳表示される（図2）。なお、マーカは任意の色や形状を指定できるため、既存の警告表示ラベルなどを活用することが可能である。
- ② AR点検支援ツールにより表示する点検項目は、一般的なフォーム作成ツールにより作成可能である。管理者はブラウザ上で点検項目の編集が可能であり、点検作業員に対して、最新の点検項目を即時に共有できる（図3）。



図 1 マーカの例



図 2 AR 点検支援ツールの動作状況
(作業装置名と点検項目の重畳表示)

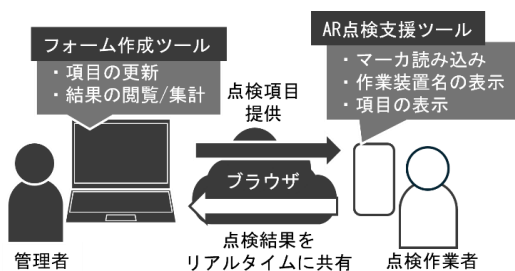


図 3 AR 点検支援ツールの運用イメージ

AR 点検支援ツールの有用性と課題解決

AR 点検支援ツールにより仮想空間を介して点検状況を共有することで、従来の点検手法の課題であった以下の点を解決することが可能である。

- ① 作業装置名称や点検項目を表示することにより、新規入職者事前に点検項目を習得する負担を軽減する
- ② 作業者と管理者間で点検項目をリアルタイムで共有できるため、機械の状態や運用期間に応じて随時変更される点検項目にも柔軟に対応することが可能となる
- ③ マーカ型 AR を活用し、既存の警告表示ラベルなどの画像に基づいて AR 情報を表示することで、過酷な環境下で使用される機械に対する新たなマーカ増設が不要である。

今後の展望

本研究で開発した AR 点検支援ツールは、除雪機械に限定せず、幅広い建設機械への点検項目共有および点検作業支援に応用可能であると考えられる。

今後の課題として、本ツールの実機（建設機械等）への適用を行い、従来の点検手法と比較した有効性を検証するための実証実験を実施する。この実験を通じて、ツールの実用性と課題解決効果を定量的に評価する必要がある。

参考文献

1. 総務省. (1) 仮想空間（メタバース・デジタルツイン）. 令和 6 年度版 情報通信白書. 千代田区：総務省, 令和 7 年.
2. RX Japan Ltd. XR とは？VR・AR・MR との違いや市場規模・事例を紹介. XR・メタバース総合展. (オンライン) (引用日: 2025 年 9 月 16 日.) <https://www.xr-fair.jp/hub/ja-jp/about/blog01.html>.
3. 厚生労働省. 労働安全衛生規則 第 170 条. e-Gov. (オンライン) 厚生労働省, 令和 7 年 6 月 1 日. (引用日: 令和 7 年 9 月 29 日.) <https://laws.e-gov.go.jp/law/347M50002000032>. Law RevisionID:347M50002000032_20250601_507M60000100057.

5. 宇宙を利用した現場管理が当たり前の時代に

「GNSS 動態観測システム GeoLoc」

株式会社レンタルのニッケン ○ 湯島 一郎

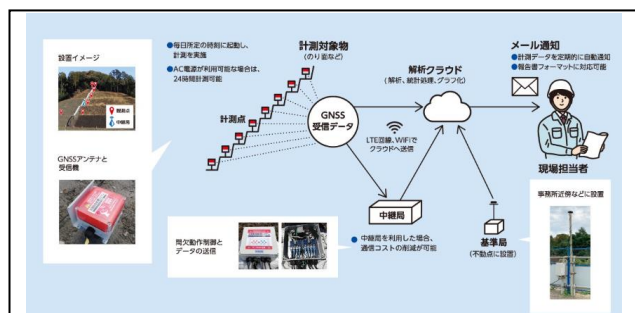
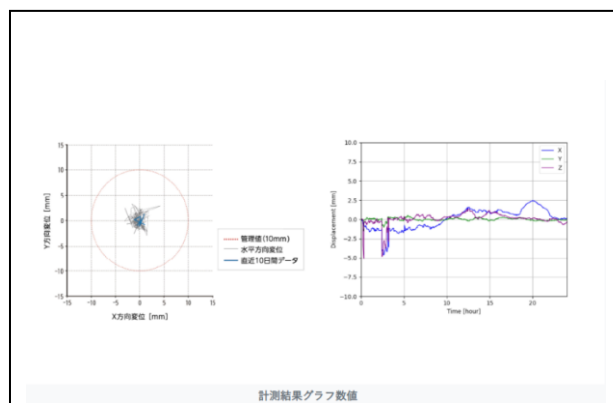
上空視野が狭い環境下でも活用可能な
GNSS 動態観測システム

従来はトータルステーションで行っていた、建設工事現場の法面や補強土壁などの動態を上空視野が狭い場所でも高精度で計測ができる RTK 測位アルゴリズムを用いてクラウドサーバーで常時・遠隔計測可能なシステムである。

主に法面などの斜面の動態観測、擁壁/補強土壁、土留めなど壁面の動態観測、埋立地などの地盤の動態観測、ダムや橋梁の付帯設備などの構造物の動態観測、高層ビルなどの建造物の動態観測に適用できる。

またクラウドサーバーを利用することで常時遠隔で計測することが可能で解析結果をメール等で配信できる。

期待される効果は上空視野が狭い場所でも高精度で計測ができる RTK 測位アルゴリズムを用いてクラウドサーバーで常時遠隔計測可能なシステムに変えたことにより光波測量を行う必要がなくなり、省人化による経済性の向上が図れる。また荒天時や夜間でも人手をかけず安全性の向上が図れる。閾値を超える変位を計測した際のアラート自動発出により、関係者への異変の周知が円滑化し、安全性の向上が図れる。都度計測器の設置・撤去がなくなるので工程の短縮が図れる。



また RTK 測位アルゴリズムを用いることで上空視野が開けていないことで一般的な GNSS 技術が適応できない場所でも計測ができる (ただし上空視野が完全にさえぎられている場所では適用できない)

ただし適用できない範囲もあり、電力供給が担保できない場所。4G、Wifi の電波が届かない場所、屋内や森林の中など上空視野が完全に遮られてる場所、重機などが GNSS アンテナの上部を頻繁に遮る可能性のある場所では難しく従来のトータルステーションでの測位になる。

6. 建設機械の遠隔運転シミュレータ（切羽ずり出し作業）

ホイールローダ切羽ずり出し作業の遠隔運転をサイバー空間で練習する

西松建設（株）技術研究所 ○平野 享

西松建設（株）技術研究所 高原裕介

西松建設（株）技術研究所 辻岡高志

1. 開発目的

当社では、安全性や生産性の向上を目的として、山岳トンネル切羽作業の抜本的な改善に取り組んでいる。その一環として、自律機械を用いた無人化および基盤技術となる機械運転の遠隔化を推進している。もっとも自律運転が困難な状況では、人の遠隔運転が引き続き必要で、運転スキルの習得が不可欠である。この課題に対して、安全性に優れるシミュレータ訓練での練習機会の提供が有効と考える。シミュレータ訓練は遠隔カメラ映像の視認を主体としており、遠隔運転との親和性は高い。今回、新たに自律機械化を目指すホイールローダのずり出し作業について、前作¹⁾のブレーカー作業に続きシミュレータを開発したので紹介する。

2. 本シミュレータの構成

本シミュレータは、表1および表2の構成である。

表1 前作と共通する本シミュレータの概念

目的	人とAI 双方へ練習環境の提供 デジタルツインでのテスト環境の提供
内容	自由練習、課題提供型練習
実装	パソコンソフト ゲームデバイス/現場コックピット両対応
付帯機能	遠隔カメラ位置の変更 運転レコーダーとリプレイデモ

表2 ホイールローダとブレーカーシミュレータ

仕様	ホイールローダ	ブレーカー
運転目的	発破ずりの搬出	発破露岩のはつり
運転行程	前進・積込み・後退・ 積下し	前進・位置合せ・ 打撃・後退
運転の認知情報	遠隔カメラ映像8画面ウォールの視認	
補助的な情報提示	積載量・姿勢角度	(なし)
運転評価	所要時間 衝突回避 荷こぼし	所要時間 位置合せ
モデル稼働部	タイヤ 中折れステアリング エンジンアクセル 前進後退ギア ブレーキ アーム	左右独立クローラ ブーム アーム バケット

	バケット ダンプ	
ワーク表現	ずりを独立 300 個の 不定形ブロックで 簡略表現	露岩凸部をリング状 に簡略表現 打撃粉の表現



図1 仮想再現した遠隔運転席からの視野

3. AI エージェントによるシミュレータプレイ

シミュレータにおける強化学習の活用が現実のものとなっている²⁾。本シミュレータに対しても、人と同様にAI を訓練して実作業に適用する、あるいはデジタルツインで未知の最適運転を探索する、といった活用を検討している。現時点で遠隔カメラ映像に着目させた強化学習を設計すると、原理的に実施は可能で、学習効率を高めた実装が課題となっている。

4. まとめ

山岳トンネル切羽作業における自律機械を活用した無人化や機械運転の遠隔化の一環として、遠隔運転シミュレータを開発した。次の目標は、AI エージェントによるシミュレータプレイの実装である。

参考文献

- 1) 平野享ほか：9. 建設機械の遠隔運転シミュレータ，建設施工と建設機械シンポジウム ポスター発表，2024.
- 2) 久保隆宏：Python で学ぶ強化学習 改訂第2版，講談社，2019.

7. AI 姿勢検知システム「AI's (アイズ)」

AI を使って合図者の意思をジェスチャーで瞬時に伝達する

西尾レントオール株式会社 通信測機機材部 西野 公貴

1. 開発経緯

建設現場ではジェスチャーによって意思を伝達する場面がたくさんあります。AI を使って合図者の意思をジェスチャーで瞬時に伝達する事ができる「AI 姿勢検知システム AI's (アイズ)」はこぶし建設株式会社（以下、こぶし建設）及び株式会社ネクステラス（以下、ネクステラス）が共同開発したシステムで、「人の姿勢」や「ジェスチャー」といった従来アナログであった情報をデジタル化し、ジェスチャーコミュニケーションを効率化する事ができます。例えば、重機の死角で不安全な状況が発生した際、それに気づいた人が合図(ジェスチャー)をすることにより、AI がリアルタイムに認識し、重機のオペレーターに音と光で警報を発することができます。声などでは伝えることが難しい状況でも、このシステムを使うことにより意思の伝達を補助する事ができます。重機のオペレーターは平常時は作業に集中しながら、不安全な状況が発生した際はすぐに気づき安全処置をとる事ができる為、作業効率を損なうことなく安全性の向上に貢献する事ができます。

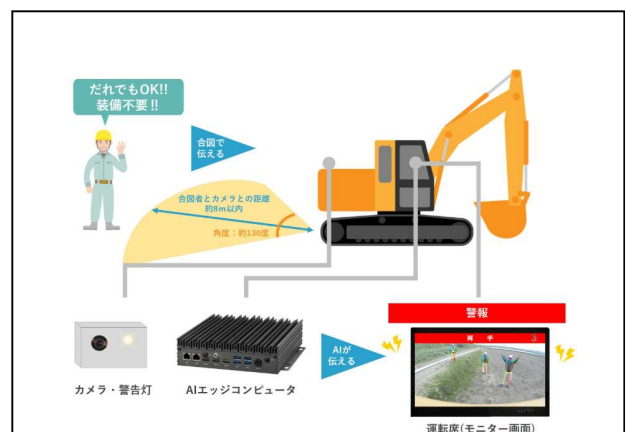
2. 特徴

重機のオペレーターが周辺の状況や人数等をモニターで確認できるだけでなく、作業側からも重機のオペレーターへ存在を即座に伝える事ができます。また、AI が人物を検知するだけでなく片手を挙げた場合は注意、両手を挙げた場合は警告と判定し、重機のオペレーターにモニターとブザー音で発報する事ができます。

このシステムは AI カメラを取り付けた重機の真後ろ約 130 度の範囲で、8m以内の距離に入るとシステム

が検知します。また画像認識AI 技術の活用により、合図者は特別なマーカーやセンサーなどを持つ必要がないため、常に安全性の向上が図れます。

■システム構成



■運転席のモニター画面例——片手を挙げた場合



■運転席のモニター画面例——両手を挙げた場合



3. 追加機能の開発・実装

西尾レントオールでは下記4つの追加機能を開発・実装しました。

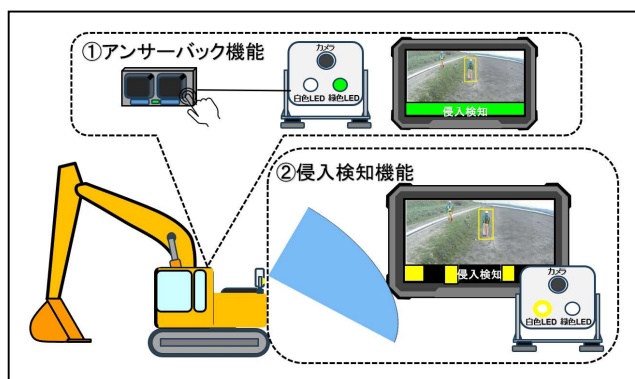
① アンサーバック機能

合図者からのジェスチャーをモニターで確認した重機オペレーターは、運転席に設置された専用のボタンを押すことでLED点灯（緑色）による合図者へのアンサーバックが可能です。

② 侵入検知機能

予め任意で設定した距離に人が近づいた際に、重機オペレーターへはモニターとブザー音で、侵入者へはLED点灯（白色）で発報する事が可能です。

■追加開発・実装機能 ① ②



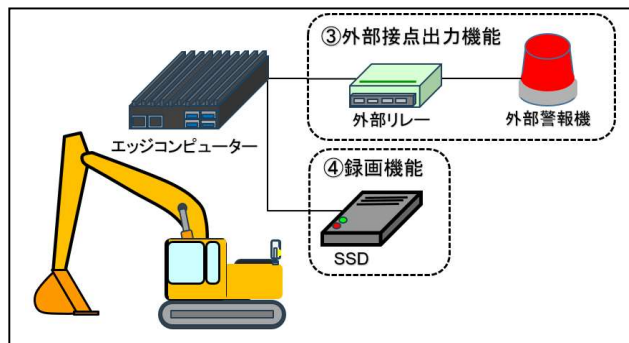
③ 外部接点出力機能

回転灯やブザー等を別途接続し、設定した距離に侵入した人物について注意喚起を行う事が可能です。

④ 録画機能

SSD接続により重機用ドライブレコーダーとして映像を記録に残すことが可能です。

■追加開発・実装機能 ③ ④



4. 導入により期待される効果

- 1) 重機オペレーターが死角の状況や緊急事態等をリアルタイムに把握することができる為、安全性の向上が図れます。
- 2) 画像認識AI技術を活用している為、騒音が大きい現場の環境下でも使用が可能です。
- 3) 従来の「手合図」ではお互いに目視できる位置まで走っていくという、現場内での「移動のムダ」や「合図の遅れ」がなくなり、より安全で効率的な作業を行うことが可能です。

5. 今後について

ソフト及びハードのバージョンアップを行う事により検知範囲の拡大を検討しております。また、重機に限定せず活用できるシーンへの対応も検討しております。

8. 建設現場におけるレンタルできる自動施工

西尾レントオール株式会社 建設 DX 営業課 ○ 佐藤芳和

【クローラダンプ自動運転システム】

本システムは従来オペレーターによって操作していたクローラダンプを一部自動化できるシステムです。

概要

クローラダンプに GNSS を搭載し、専用 PC で位置情報をもとに事前に設定したルートを自動走行し、旋回、ダンプアップの一連の動作を自動で行うシステムです。

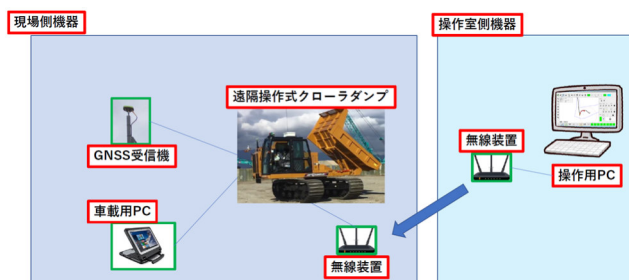
ルート設定はすべてを手動で作成する『設計モード』と予め走行ルートを走らせ記憶させる

『ティーチングモード』があり運用も簡単に扱えます。

また、さまざまなセーフティ機能も搭載。

- ① エリア逸脱防止機能・・・事前に決められたエリアから出ると停止します。
- ② GNSS 測位エラー停止機能・・・GNSS が FIX 状態にない場合停止します。
- ③ 通信不良停止機能・・・各種センサーとの通信が途絶えた場合停止します。
- ④ LiDAR センサーを搭載・・・検知エリアに障害物が入った場合停止します。

システム構成



【自動（無人）油圧ショベル RX ヨイショ投入くん】

ARAV 社が開発した油圧ショベルによる掘削・積込工程を自動化するソリューションです。

本システムは電子制御式油圧ショベルに後付けすることが可能で

掘削範囲と排土の場所を指定し、無人エリアを設定した上で安全確認後に

作業を自動化となります。



【クローラダンプ自動運転システム】と

【自動（無人）油圧ショベル RX ヨイショ投入くん】

を組み合わせることで

掘削積込から運搬排土の自動化施工をレンタルで提供。

・特徴

油圧ショベルによる掘削、クローラダンプへの積込、

指定場所への排土までを重機に搭載した PC で自動連携し、効率的な土工を実現。

各システムは独立して運用することが可能なため、現場ニーズに合わせた柔軟な活用が可能です。

ベースであるクローラダンプ、バックホウは専用リモコンで遠隔操作も可能（実質50m）

本システムを利用することでもたらす効果

- ・オペレーターの負担軽減（
- ・省人化と作業全体の効率化
- ・働き方改革への貢献
- ・CO2 排出量の削減

5. 今後について

ソフト及びハードのバージョンアップを行う事により検知範囲の拡大を検討しております。また、重機に限定せず活用できるシーンへの対応も検討しております。

- ・導入へのハードルを軽減するレンタル方式
- ・国土交通省『i-Construction2.0』への貢献



9. 水素専焼ジェットヒーターの戦略的導入による 建設現場のCO₂排出量削減の推進

～水素利用の建設現場への実装～

株式会社カナモト ○畑中 淳
宮坂建設工業株式会社 今井 貴寛
日工株式会社 長谷川 修磨

1. 開発背景

近年、気候変動の深刻化に伴い、温室効果ガス（GHG）排出削減は国際的に最重要課題の一つとなっている。

その中で、北海道では環境省が進める脱炭素先行地域の第1回選定（2022年6月1日）において、北海道から3つの自治体選ばれ、そのうち十勝地域では士幌町と鹿追町が採択対象となった。

十勝地域では、家畜ふん尿由来のカーボンニュートラル（以下、CNと記述）水素を製造する、しかおい水素ファーム（鹿追町）を起点に、地産地消でCN水素の利用促進が進められている。

そこで宮坂建設工業は、カナモトと水素エネルギーの地産地消を推進するため、このCN水素を活用した建設現場の脱炭素化を目指し、寒冷地の建設現場で必需品ともいえるジェットヒーターに着目、日工に開発を依頼した水素専焼ジェットヒーターでCN水素の燃料利用を検討した。

2. 水素燃焼技術の開発

日工は、2050年のカーボンニュートラルを目指す国の「グリーン成長戦略」に基づき水素バーナの開発を進めており、この度アスファルトプラント（以下、AP）での水素専焼を実現するバーナを開発した。水素燃焼時の懸念点は、主に以下の3点です。

① 燃焼速度

② サーマルNO_xの生成

③ 熱による機器損傷

日工では、これら3点の課題を解決し、水素燃料を安全かつ安定的に利用できる500kWの小型のバーナを開発した。（図2-1）



図2-1 水素バーナ（出力500kW）

3. 水素ジェットヒーターの開発

(1) Hydro H₂eat(ハイドロヒート)

温風用バーナに求められる30℃程度の温風を発生させるため、水素専焼ヒータ「Hydro H₂eat(ハイドロヒート)」の開発を行った。（図3-1）



図3-1 ハイドロヒート試作機

本実証試験は、国内で最も気温が低くなる陸別町（図3-2）の山間部と、幕別町の川辺の2か所で行い、寒冷地コンクリート養生の現場を想定した囲いの中で、ハイドロヒートと灯油を燃料とする従来ジェットヒーターを同条件で24時間連続稼働させて性能を比較した。



図3-2 実証試験の様子（陸別）

(2) 試験結果

今回の試験でハイドロヒートと従来灯油ジェットヒーターの昇温性能を比較した。囲い内の温度維持は灯油と同様の傾向が見られた。湿度の比較では、図3-3に示すようにハイドロヒートはテント内を灯油使用よりも高湿度に保つことができた。今回の実証試験での灯油ジェットヒーターのCO₂排出量は陸別町試験ヤード：115.8kg、幕別町試験ヤード：91.4kgとなった。ハイドロヒートはCO₂を排出しないため、灯油からの代替でCO₂排出量（陸別町115.8kg、幕別町91.4kg）をゼロにできると確認した。

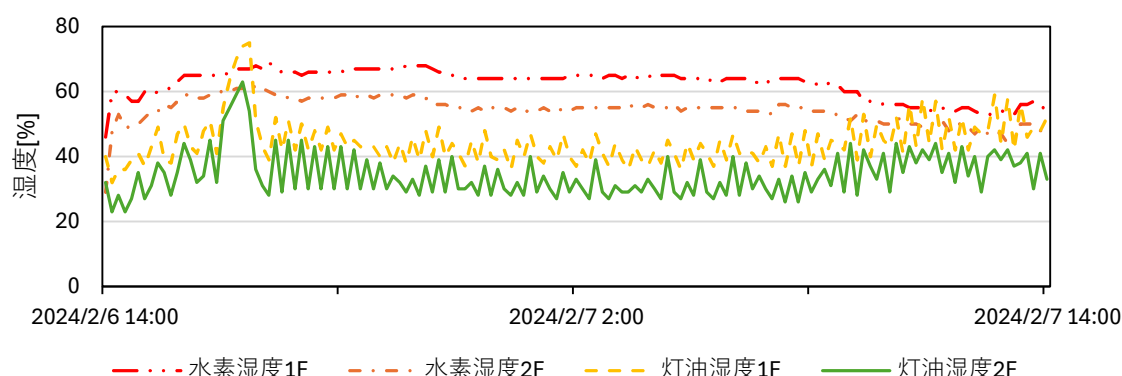


図3-3 囲い内湿度

4. ハイドロヒートの特長

開発したハイドロヒートの特長は下記の点が挙げられる。

- ① 排ガス中の水蒸気によって高湿度維持
- ② 燃焼排ガスの無臭
- ③ 環境への負荷低減

5. おわりに：今後の展望

寒冷地実証試験により、ハイドロヒートは灯油ジェットヒーターと同様に温度を維持でき、水分による問題も確認されなかった。CN水素使用で温室効果ガス削減が確認できた一方、設置スペースや重量による利便性の改善が課題となった。今後は、これらを改善し、建設現場でのコンクリート養生、極寒地での採暖に計画的に導入することで建設現場でのCO₂排出量の削減を実施していく予定である。



図5 開発したハイドロヒート

10. 小型照明車の開発

国土交通省 中部地方整備局 中部技術事務所 防災・技術課 川 田 明 男
国土交通省 中部地方整備局 中部技術事務所 防災・技術課 野 口 徹 也
国土交通省 中部地方整備局 中部技術事務所 防災・技術課 ○炭 谷 佑 介

1. はじめに

現在、国土交通省では多様な災害対策用機械を保有しており、中部地方整備局では約 100 台の機械を保有している。その中でも夜間作業現場で照明支援を行う照明車は排水ポンプ車に次ぐ 2 番目に出動数が多く、即応性が求められる非常に重要な車両である。

しかし、昨今の災害対応において、「令和 3 年熱海市伊豆山土石流災害」に代表される狭隘な現場への派遣において既存照明車では進入できないといった迅速な支援ができない事態が度々発生している。また、少子高齢化に伴う人材不足や運転免許制度の改正により、オペレータの確保や照明車を運転するために必要な中型免許以上を有する運転手の確保が困難な状況であり、災害支援における即応性の低下が懸念されている。

これらの問題を解決するために当事務所で進めている機動性・運用性・柔軟性を向上させた小型照明車の開発状況について紹介する。

2. 小型照明車開発における課題と対策

以下に小型照明車開発における機動性・運用性・柔軟性向上に向けた課題と対策について述べる。

2-1. 機動性向上に向けての課題と対策

照明車はトラックの荷台に照明装置を架装した構造の車両が広く使用されている。既存照明車は中型自動車に分類され、狭隘な現場への進入は困難である上、運転手が制限される。したがって、機動性を向上させるために普通運転免許で運転が可能な小型トラックに架装できるよう架装部（照明装置等）を小型化する必要がある。

2-2. 運用性向上に向けての課題と対策

既存照明車は、地上から 10m 又は 20m の高さから点灯が可能であるが、風圧による転倒のリスクが大きくなるためアウトリガーを装備している。アウトリガーの展開にあたり強固な地盤と設置スペースが必要であることから設置場所の選定、かつ水平度や油圧ジャッキの効き具合等の確認作業が多く、現場到着から照明点灯までに時間を要している。したがって、照明点灯までの設置時間を短縮するためにアウトリガーレスで風圧や傾斜面で転倒しない安定性及び必要照度を確保した照明高さ（ポール高さ）にする必要がある。

2-3. 柔軟性向上に向けての課題と対策

既存照明車は、車両寸法制限の関係から二輪駆動の車両が配備されているが、豪雪地域への派遣時は走行安定性に懸念があるため、四輪駆動を求めるニーズがある。また、雨天時における車外での照明装置の操作はオペレータへの肉体的負担も大きいいため車内からの遠隔操作を求めるニーズもある。したがって、小型照明車を配備する場所の地域特性に応じた駆動方式を選択でき、かつ車内から遠隔で照明装置の操作ができる環境にする必要がある。

3. 小型照明車の仕様

前項の課題と対策を踏まえて、小型照明車の開発コンセプトは次のとおり決定し、試作機を製作した。

- ・普通運転免許にて運転が可能
(車両総重量 3.5ton 未満)
- ・必要照度、照明灯連続点灯時間を確保した照明装置の小型化
- ・アウトリガーレス化
- ・車内からの照明装置操作が可能

以下、表-1 に既存照明車と試作機 の仕様を示す。

また、写真-1 に試作機の外観写真を示す。

表-1. 既存照明車と試作機（小型照明車）の仕様

	ブーム式 20m	ポール式 10m	小型照明車※
車両仕様	<ul style="list-style-type: none"> ・車両総重量 7.4～7.8t (準中型・中型免許) ・エンジン出力 100kW 以上 ・軽油燃料 タンク 70L 以上 ・駆動方式 2WD ・全長 6.6～6.7m ・全幅 2.0～2.1m ・全高 3.2～3.3m ・定員 3 名 	<ul style="list-style-type: none"> ・車両総重量 5.2～6.8t (準中型免許) ・エンジン出力 100kW 以上 ・軽油燃料 タンク 50L 以上 ・駆動方式 4WD ・全長 4.6～6.3m ・全幅 1.7～2.2m ・全高 3.1～3.5m ・定員 3 名 	<ul style="list-style-type: none"> ・車両総重量 2.98t (普通免許) ・エンジン出力 85kW 以上 ・ガソリン燃料 タンク 50L 以上 ・駆動方式 2WD ・全長 4.64m ・全幅 1.67m ・全高 2.76m ・定員 6 名 (ダブルキャブ)
照明設備	<ul style="list-style-type: none"> ・LED1.2kW・133,900lm × 6 灯 ・最大点灯高さ 20m (3 段ブーム・先端折曲げ式) ・発動発電機 13/10.5kVA、軽油燃料 タンク 55L 以上 ・19 時間以上連続運転 ・アウトリガ前後左右 4 基 	<ul style="list-style-type: none"> ・LED1.3kW・130,000lm × 6 灯 ・最大点灯高さ 10m (5～6 段伸縮式) ・発動発電機 15/12.5kVA、軽油燃料 タンク 55L 以上 ・19 時間以上連続運転 ・油圧ジャッキ前後左右 4 基 	<ul style="list-style-type: none"> ・LED1.5kW・172,000lm × 2 灯 ・最大点灯高さ 5.9m (4 段伸縮式) ・発動発電機 7.5/6.5kVA、軽油燃料 タンク 40L 以上 ・19 時間以上連続運転
その他	<ul style="list-style-type: none"> ・支柱緊急停止装置、自動展開・自動格納機能 ・風速 10m/s 警報 ・監視カメラ 	<ul style="list-style-type: none"> ・支柱緊急停止装置、自動格納機能 ・有線・無線リモコン操作 ・風速 10m/s 警報 ・監視カメラ 	<ul style="list-style-type: none"> ・自動格納機能 ・有線リモコン操作 ・風速 10m/s 警報 ・監視カメラ



写真-1. 試作機（2灯LED×1.5kW×5.9m）外観

4. 性能試験

4-1. 照明性能試験

製作した試作機を用いて、河川堤防での排水ポンプ車による内水排除作業を想定し、光源から 25m 離れた作業範囲（幅 50m・奥行 15m）内における照明性能結果を図-1 に示す。図-1 より幅 40m の範囲においてはポンプ排水作業が可能となる明るさ 15lx 以上を確認できたが、照度不足となった幅 40m～50m の範囲は照明装置の向きを変えることで明るさを確保することとした。

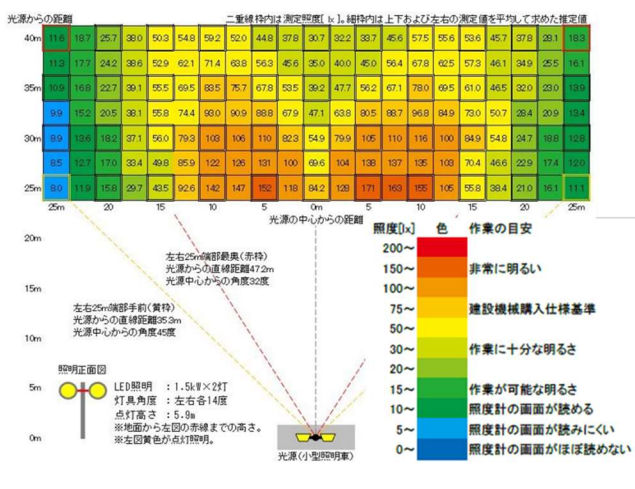


図-1. 照明性能結果（小型照明車2灯LED×1.5kW×5.9m）

4-2. 車両安定性能試験

強風下（風速 10m/s 以上）における車両安定性能確認のため、ジェットファンを用いて風速 14m/s かつ床面傾斜角 5 度下での安定性（車両揺れ最大 3mm）を確認し、アウトリガーレスで問題ない事を実証した。（写真-2）



写真-2. 安定傾斜角試験（左）、風圧転倒試験（右）

4-3. 照明連続運転試験

照明灯を全点灯させ、発電機運転時間とその燃料消費量より時間当たり燃料消費量を算出し連続運転時間（最大点灯時間）を算出したところ、最大で 25 時間となることから、十分に仕様を満足することを確認した。

5. 作業環境の改善

車両はダブルキャブを選定し、オペレータの休憩、資機材運搬等のスペースを確保し、また悪天候時に車内で照明操作ができるように操作リモコン及び風速計器、発電機起動スイッチを車内に設置したことでオペレータへの負担軽減を図った。（図-2）



図-2. 小型照明車 車内

6. おわりに

小型照明車の試作機による試験により実機化に向けて前進することができた。今年度は新規発売された小型トラック（軽油＋四輪駆動）への照明装置架装検討、安全装置・オプションの整理、及び購入仕様書の作成を行い、実機導入に向けた検討を行うものである。

11. リアルタイム平坦性センサー

コンクリート床打設時の面的可視化による平坦性精度向上

株式会社トプコン

○西田 信幸

背景・目的

建築物のコンクリート床打設では、一般的に 3m 間隔で 7mm 以内の高さ誤差に収めることが求められ、測量用回転レーザーレベルなどを用いた点測定で高さを確認し、均し作業が行われる。しかし、打設段階で全面を十分に確認できない場合があり、その後の検査で修正作業が必要となるケースが生じていた。さらに近年の物流倉庫では、より高度な平坦性が求められる一方で、熟練工不足の問題も顕在化している。

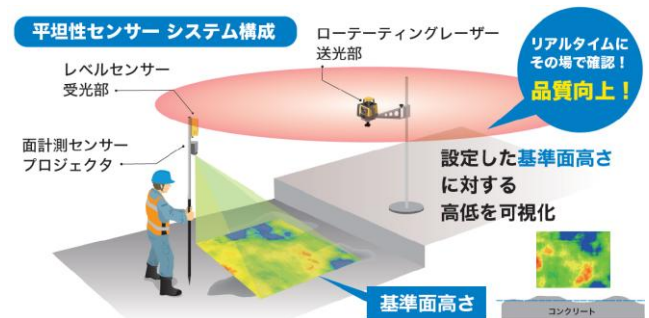
そこで本研究では、コンクリート打設基準面に対する高さをリアルタイムで測定・可視化し、誰でも現場で打設状況を即座に把握、打設精度の向上が可能な装置を開発した。



手法

本装置は、測定したい場所に向けると高低差をヒートマップで直接リアルタイムに可視化する。高低差は予め設定した施工面の高さに対する相対値で表し、高いと暖色系、低いと寒色系で投影される。打設作業場所を移動できるよう可搬性があり、斜めになっていても測定可能。打設作業の粗均しから最終均しにおいて、その場で確認・修正を行うことができる。

開発により、更新レート 10Hz、高さ精度 3mm、投影範囲約 2×2m の装置を実現することができた。



実験

本装置を用いた現場での検証でリアルタイムに可視化することに成功した。

特に、プロジェクタで現場に直接投影する効果は大きく、複数人で同時に状況を把握することができた。またリアルタイムに表示されることで、コンクリート打設に求められる作業の早さに対応できることがわかった。



まとめ

リアルタイム平坦性センサーを導入することで施工品質が向上し、熟練工不足に対しての課題解決にも期待される。また土木分野への応用も期待される。

令和 7 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 7 年 11 月 26 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