令和３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 3 年 12 月 1 日 ～ 12 月 2 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３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３年 12 月１日～12 月２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・会社名等 |
|---|---|---|
| 委 員 長 | 建山 和由 | 立命館大学 理工学部 教授 |
| 副委員長 | 高橋　弘 | 東北大学大学院 環境科学科 教授 |
| 委　　員 | 阿部　里視 | 機械部会 副部会長（(株) 小松製作所 商品企画本部 商品企画室 主幹技師） |
| 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 技師長 |
| 委　　員 | 岡本　由仁 | 国土交通省 関東地方整備局 企画部 施工企画課 課長 |
| 委　　員 | 北山　孝 | 西尾レントオール（株）取締役 通信測機営業部 部長 |
| 委　　員 | 木下　洋一 | 鹿島道路（株）生産技術本部 機械部 次長 |
| 委　　員 | 鈴木　博士 | 建設業部会 部会長（(株)大林組 ロボティクス生産本部 企画管理部 部長） |
| 委　　員 | 玉石　修介 | （一社）日本機械土工協会 技術委員長（玉石重機(株) 代表取締役社長） |
| 委　　員 | 行川　恒弘 | 前田道路（株）工事事業本部 工事技術部 担当部長 |
| 委　　員 | 西脇　徹郎 | （一社）日本建設機械施工協会 標準部部長 |
| 委　　員 | 畑田　健 | （一社）日本建設機械施工協会 技術部長 |
| 委　　員 | 藤島　一雄 | 日立建機（株）マーケティング本部 市場開拓商品戦略部 部長 |
| 委　　員 | 本田　肇 | （株）トプコンポジショニングアジア ICT 施工ソリューション部 ｼﾆｱｴｷｽﾊﾟｰﾄ |
| 委　　員 | 増　　竜郎 | 国土交通省 総合政策局 公共事業企画調整課 企画専門官 |
| 委　　員 | 丸山　克哉 | コベルコ建機（株）マーケティング事業本部 営業促進部 部長 |
| 委　　員 | 森川　博邦 | （国研）土木研究所 技術推進本部 先端技術チーム 上席研究員 |
| 委　　員 | 山本　茂太 | 製造業部会 幹事長（キャタピラージャパン（同）販売促進部 部長） |
| 委　　員 | 渡部　純 | レンタル業部会 部会長（(株)カナモト ﾚﾝﾀﾙ事業部 広域特需営業部 部長） |

令和３年度

# 「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．無電柱化のためのトレンチャーを用いた施工試験　・・・・・・　1
（国研）土木研究所 寒地土木研究所　○　永長　哲也、中島　淳一

２．海上地盤改良工事における施工の自動化および
3D 施工管理システムの導入事例報告　・・・・・・　5
東亜建設工業株式会社　○那須野　陽平

３．硬質地盤に対応したオープンケーソン工法
－硬質地盤が掘削可能な水中掘削機の開発－　・・・・・・　9
アーバンリング工法研究会　○小倉　剛、内山　敬二、本田　啓

４．圧入施工データを利用した圧入機の自動運転と地盤情報の推定　・・・・・・・・　15
(株)技研製作所　○岡田　浩一、石原　行博

５．ICT 活用による除雪トラック作業装置自動化の取り組みについて　・・・・・・　21
国交省　北陸地整　北陸技術事務所　○武石　清一、前原　正之

６．自動式墨出しシステムによる墨出し精度および実用有効性の検証　・・・・・・　25
西尾レントオール（株）　○野瀬　健一
日立チャネルソリューションズ（株）　堀　盛豊

７．台形 CSG ダムにおける保護コンクリート構築の合理化施工システム　・・・・・・　29
鹿島建設（株）　○ 丹　秀男

８．ケーブルクレーン自動運転システムの開発
～GNSS 測位技術を活用したシステムの構築及びダム堤体工への適用～　・・・・・・　33
西松建設（株）　○井上　洸也、戸田　泰彰、田中　勉

９．機械式ビット交換技術の開発　・・・・・・　39
大成建設（株）　○田村　憲、志田　智之
日立造船（株）　吉川　健一

10．ICT バックホウの施工履歴データを用いた土工の出来形管理に関する検討　・・・・・・　43
国交省　国土技術政策総合研究所　○大岩　憲史、山下　尚、大槻　崇

11．路面切削工における施工履歴データを用いた出来形管理の検討　・・・・・・　45
前田道路（株）　○宮内　賢徳、宇田川　健治、葛原　淳

12．重機の履歴データを用いた出来形管理に関する考察
～ICT 施工の効率化へ向けて～　・・・・・・　49
（株）大林組　○田島　僚

13．建設現場へのアシストスーツ導入の可能性について
～建設現場への導入促進のための検証の取組み～　・・・・・・　53
国交省総合政策局　○味田　悟
（株）日本能率協会総合研究所　平石　浩之

14．ＩＣＴ施工に関する人材育成の取組について　・・・・・・　57
国交省　公共事業企画調整課　○古川　伸一

15. 新技術情報提供システム（NETIS）のオンライン統合化等の改良 ・・・・・・ 61
国交省 総合政策局 ○ 明野 光運、渡邊 俊彦
16. 橋梁下部工事における 3D 点群データを用いた出来形管理
～検査監督業務の効率化～ ・・・・・・ 65
国交省 関東地整 ○木村 匡、篠崎 真弘
株木建設（株） 池谷 孝之
17. 測量と施工の双方に貢献する汎用性の高い ICT ショベルシステムの開発 ・・・・・・ 69
(株)トプコンポジショニングアジア ○小林 雅佳
18. 振動ローラとタイヤローラによる締固め後の平坦性の点群による評価 ・・・・・・ 73
国交省 国土技術政策総合研究所 ○古明地 隆浩、大槻 崇
（国研）土木研究所 橋本 毅
19. 転圧ローラのコーン指数と締固め性能について ・・・・・・ 77
酒井重工業（株） ○内山 恵一、眞壁 淳
20. 拡張現実(AR)を用いた船舶航行ナビゲーションシステムの開発 ・・・・・・ 81
東亜建設工業（株） ○宮本 憲都
21. バランスアームを用いたコンクリート二次製品の敷設機械 ・・・・・・ 85
鹿島道路（株） ○中渡瀬 圭吾、伊藤 圭祐、岩田 真幸
22. 油圧アタッチメントの交換容易化による解体現場の安全性・環境性・生産性の向上
・・・・・・ 89
（株）小松製作所 ○山本 宏
23. モータグレーダのブレーキアシストシステム
～高速走行可能な建機のブレーキ補助システム開発～ ・・・・・・ 95
鹿島道路（株） ○野田 哲也、鈴木 泰、伊藤 圭祐
24. トンネル覆工コンクリートの補修工事に適用する曲面天井用研掃システム ・・・・・・ 99
（株）奥村組 ○石井 敏之、西山 宏一、田中 寛大
25. 打音検査を用いたアスファルト内部欠陥検出への AI 手法導入に関する実験報告 ・・・・・・ 105
立命館大学 ○佐々木 優一、横山 隆明
大林道路（株） 光谷 修平
26. 地中探査結果を搭載したＩＣＴ建設機械の活用による地下埋設物の保護 ・・・・・・ 109
(一社)日本建設機械施工協会 ○八木橋 宏和
コベルコ建機（株） 関口 伸吾
ジオ・サーチ（株） 神代 晃治
27. 河川機械設備におけるパラダイムシフト型更新の取組について ・・・・・・ 113
国交省 総合政策局 ○東山 遼、門屋 博行、宮下 学
28. 誘導電動機電流徴候解析による救急排水機場ポンプの状態監視手法について ・・・・・・ 117
(国研)土木研究所寒地土木研究所 ○小林 勇一、永長 哲也
29. 排水機場の状態監視モニタリングシステム構築と
異常データ検知 AI 手法に関する研究(第 2 報) ・・・・・・ 123
（株）ニュージェック ○長谷 東子
国土交通省 黒田 浩章
(国研)土木研究所 上野 仁士
30. 河川インフラ（水門設備）の維持管理シミュレーション装置の開発
～シミュレーション装置，AR，VR 活用による水門設備等の操作・点検体験～ ・・・・・・ 127
国交省 近畿地整 近畿技術事務所 寺田 一秋

31. ランブルストリップスを用いたラウンドアバウトエプロン構造の
被験者評価試験について ・・・・・・ 131
(国研)土木研究所 寒地土木研究所 ○吉田 智、舟橋 誠、新保 貴広
32. ロータリ除雪車における投雪作業自動化の検討について【i-Snow】
～除雪現場の省力化による生産性・安全性の向上に関する取組～ ・・・・・・ 135
国交省 北海道開発局 ○白瀬 和暁、佐藤 信吾
国交省 総合政策局 小野寺 敬太
33. 遠隔臨場ドローンシステムの開発
～リアルタイム映像で遠隔臨場を高度化・効率化～ ・・・・・・ 139
(株)フジタ ○林 秀晃、松岡 祐仁
(株)センシンロボティクス 吉井 太郎
34. 距離計カメラを搭載した小断面積込機械の開発
～トンネル機械の遠隔操作に向けた取り組み～ ・・・・・・ 143
(株) 熊谷組 ○坂西 孝仁、宮川 克己、手塚 仁
35.「全自動ドローン」で測量と安全巡視を無人化
～目視外補助者なし飛行（レベル 3）による測量と安全巡視を実現～ ・・・・・・ 147
(株) フジタ ○上原 広行、松岡 祐仁
(株)センシンロボティクス 長尾 建
36. 四足歩行ロボットによる建設現場の生産性や安全性の向上に関する開発 ・・・・・・ 151
鹿島建設（株）○三室 恵史、大浜 大、村瀬 諒介
37. 四足歩行ロボットによる現場管理業務の遠隔化・自動化に関する研究 ・・・・・・ 155
(株)竹中工務店 ○錦古里 洋介、戸田 武
(株)竹中土木 千葉 力
38. 無人移動体画像伝送システムの性能調査及び汎用型 Wi-Fi との比較検証 ・・・・・・ 159
大成建設（株） ○遠藤 亮雄、青木 浩章、田村 道生、後藤 洸一
ハイテクインター（株） 松井 仁志、新井 隆弘
39. 無人化施工における生体情報を活用した
分析評価システム構築による作業定量化 ・・・・・・ 163
立命館大学 ○児玉 耕太、橋口 伸樹、小林 泰三、林 永周、曹 剣飛
（株）熊谷組 黒石 真一、畑本 浩伸、飛鳥馬 翼、竹下 嘉人、宮崎 康弘、北原 成郎
東京工業大学 仙石 慎太郎
東京工業高専 松林 勝志
40. 外部認識機能を搭載した自動運転油圧ショベルの実証実験報告 ・・・・・・ 169
安藤ハザマ ○武石 学
コベルコ建機（株） 土井 隆行、野田 大輔
41. 遠隔操作型油圧ショベルの自動化へ向けた制御手法の開発 ・・・・・・ 173
(国研)土木研究所 ○遠藤 大輔、山内 元貴、橋本 毅
42. 自律施工における協調領域の提案と自律施工技術基盤の開発 ・・・・・・ 179
(国研)土木研究所 ○山内 元貴、遠藤 大輔、橋本 毅、山口 崇
43. 自律走行式土工用振動ローラの開発
～共同開発プロジェクトによる試験研究 ・・・・・・ 183
酒井重工業（株） ○櫛田 成基、遠藤 涼平、青山 雅規
JIG-SAW（株） 志賀 太生
44. バッテリ駆動式ミニショベルの開発 ・・・・・・ 185
(株) 小松製作所 ○富澤 美帆、永嶋 芳明、奈賀 宏司

# Ⅱ　梗概集

## Ⅱ－１　ポスターセッション要旨


１．簡易遠隔操縦装置（ロボＱＳ）の高度化について　・・・・・・ 191
国交省　九州地整　九州技術事務所　○岡島　朝治、福川　雅章

２．緊急車両等を通行させることのできる排水ホースの検討について　・・・・・・ 193
国交省　中国地整　中国技術事務所　○山川　史、田村　秀之

３．排水ポンプ車状態監視システム（ＤＳシステム）の紹介
～作業員の安全を確保した排水作業の継続に向けて～　・・・・・・ 195
国交省　中部地整　中部技術事務所　○福万　敏行、林　学

４．お手持ちの UAV で手軽に空中写真測量。SfM のクラウドサービス
～「Solution Linkage Point Cloud」 を使った現況管理～　・・・・・・ 197
日立建機（株）　○田中　一博

５．建設現場の非接触・リモート化を実現する「遠隔協議」および「遠隔臨場」
～データ共有クラウドサービス「CIMPHONY Plus」による施工データ一元管理～　・・・・・・ 199
福井コンピュータ（株）○谷澤　亮也、深山　あい子、池場　謙次

６．地盤改良工法の自動打設システムの開発
～GeoPilot®-AutoPile(ジオパイロット・オートパイル)～　・・・・・・ 201
（株）不動テトラ　○伊藤　竹史、廣畑　憲史、今給黎　健一

７．油圧アタッチメントの交換容易化による解体現場の
安全性・環境性・生産性の向上　・・・・・・ 203
（株）小松製作所　○山本　宏

８．AI 人物検知・距離検知・クラウド録画に対応した 重機から作業員を
守る安全システム「ドボレコ JK」　～カメラによる人・距離検知～　・・・・・・ 205
西尾レントオール（株）　○荻野　裕昭

９．カーテンウォールをより安全により早く取付できる専用機の研究
～カーテンウォーカーEV～　・・・・・・ 207
（株）レンタルのニッケン　○湯島　一郎、研　次郎

10．高高度隊列飛行 3 次元空間情報収集ドローン型ロボットを
使用した施工現場の環境測定　・・・・・・ 209
（株）カナモト　○勝部　義之、植木　良
（株）ｅロボティクス　皆川　好則

11．建設機械搭載型レーザスキャナによる出来形管理システム　・・・・・・ 211
前田道路（株）　○ 若佐　和美
法政大学　今井　龍一
三菱電機エンジニアリング（株）　平　謙二

# Ⅰ　論文集

# １．無電柱化のためのトレンチャーを用いた施工試験

（国研）土木研究所　寒地土木研究所　○　永長　哲也
中島　淳一

## １．はじめに

防災機能の向上，安全で快適な通行空間の確保，良好な景観の形成や観光振興等の観点から，市街地等を中心に電線類地中化による無電柱化が進められている。その代表的な整備手法は電線共同溝方式であるが，限りある予算の中で電線共同溝方式だけでは無電柱化の迅速な推進を図ることは難しい。また，景観を活かした観光振興面では，郊外の農村自然域において無電柱化の潜在的なニーズは高く，今後様々な整備手法や低コスト工法活用による，より一層の普及拡大が期待される。

一方，無電柱化が進んでいる諸外国では，無電柱化にケーブル埋設用の専用掘削機械（トレンチャー）を使用しており，日本の主工法であるバックホウによる掘削と比較し，大幅なスピードアップが図られている。バックホウによる掘削を**写真-1** に示す。

そこで，国内における郊外部への無電柱化推進に寄与するため，トレンチャーを用い，掘削から埋戻し，締固めまで一連の作業を想定した試験施工のうち掘削機械及び締固め機械について報告する。試験フロー及び使用機械を**図-1** に示す。

## ２．トレンチャーを用いた掘削試験

試験は，令和 2 年 11 月 13 日から 16 日の 4 日間，北海道苫小牧市にある，苫小牧寒地試験道路の路体（未舗装部）にて実施した。試験箇所を**写真-2** に示す。

図 - 1　試験フロー及び使用機械

写真-1　バックホウによる掘削

写真-2　試験箇所

### 2.1　使用機械

歩道又は路体での作業を想定し機械の選定は「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（案）」により，機械総質量 7.5t 未満，日本国内でレンタル可能な専用機械を使用した。また，掘削幅が 305 ㎜から 610 ㎜に拡大した機種を用い試験を行った。トレンチャーの機械諸元を**表-1** に示す。

### 2.2　試験結果

トレンチャーでの掘削状況を**写真-3**，掘削深さと掘削速度の関係を**図-2** に示す。比較のために過年度に試験[1)]を行った，専用機械チェーン式の掘削幅 150 ㎜及び 305 ㎜についてもグラフに示す。

掘削幅 610mm になっても，バックホウに比べて大幅に掘削速度が速いことが確認できた。掘削幅 610mm は，掘削幅 305mm と比較して，約 4 割の施工速度となった。これは，施工箇所の不陸や降雨による泥濘みにより，運転操作に支障が生じたことが影響していると考えられる。

また，トレンチャーを使用することにより掘削底部が平坦かつ滑らかな仕上がりとなった。これはバックホウが上下に円弧を描いて掘削するのに対して，トレンチャーは刃が溝断面に対し平行移動する動作のためである。出来映えに関しては，バックホウとは異なりオペレータの熟練度の影響は少ないことがわかった。**図-3** にバックホウとトレンチャーの掘削イメージ，**写真-4** にトレンチャーの掘削後の仕上がり状況を示す。

表-1　トレンチャーの機械諸元

| | |
|---|---|
| 機　械　構　成 | 専用機械 |
| 掘　削　機　構 | チェーン式 |
| 最　大　掘　削　深 | 1,000mm |
| 掘　削　幅 | 610mm |
| 全　長 | 8,850mm |
| 全　幅 | 2,310mm |
| 全　高 | 2,450mm |
| 機　械　質　量 | 7,000 kg |

写真-3　トレンチャーの掘削状況

## 3　締固め試験

締固めの効率化を目的に，掘削幅 150 ㎜及び 610 ㎜に対応可能な２機種について試験を行った。

### 3.1　使用機械

掘削幅 150 ㎜は，従来ランマでのみ締固めが可能であったが，掘削幅 150 ㎜に対応した締固めが可能な専用機（コンパクタ）について試験を行った。コンパクタは転圧部の円盤の外周に装着している，転圧盤の幅を変更することにより，150 ㎜から 280 ㎜まで変更可能で，今回は掘削幅と同等の 150 ㎜幅を試験した。また，機械側面の操作レバーにより操作を行う方式のため，操作員は，掘削溝を目視で確認しながら作業が可能となり，締固め機械にみられる振動など，操作員の負担も少ないため，従来のランマと比較して，長距離の作業に適していると考える。機械諸元を**表-2** に示す。

また，掘削幅が 610 ㎜になったことにより，一般的な締固め機械のバイブロコンパクタが使用可能になったため，合わせて試験を行った。機械諸元を**表-3** に示す。

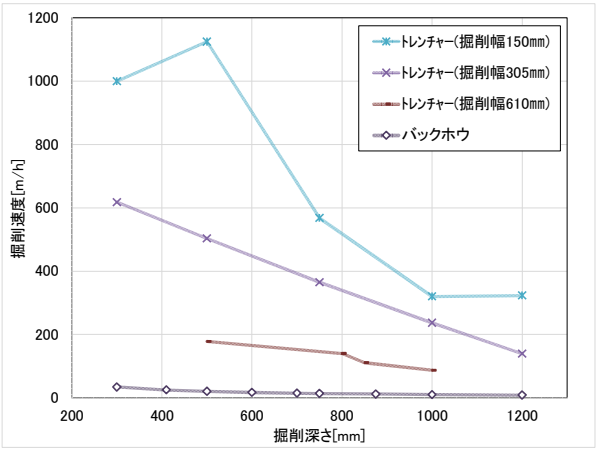



図-2　掘削深さと掘削速度

図-3　バックホウ（左）トレンチャー（右）の掘削イメージ

写真-4　トレンチャーの掘削後の状況

表-2　コンパクタの機械諸元

| | |
|---|---|
| 全　　長 | 1,540 ㎜ |
| 全　　幅 | 445㎜ |
| 全　　高 | 1,030㎜ |
| 機 械 質 量 | 341 kg |
| 転 圧 盤 幅 | 445㎜ |
| 転 圧 盤 長 | 860㎜ |
| 機 関 出 力 | 4.8kW |

表-3　バイブロコンパクタの機械諸元

| | |
|---|---|
| 全　　長 | 2,532㎜ |
| 全　　幅 | 1,450㎜ |
| 全　　高 | 1,582㎜ |
| 機 械 質 量 | 1,343 kg |
| 転 圧 盤 幅 | 150㎜ |
| 最大転圧深さ | 660㎜ |

### 3.2　試験結果

試験結果を**図-4**，コンパクタでの施工状況を**写真-5**，バイブロコンパクタでの施工状況を**写真-6** に示す。比較のために過年度に試験[1)]を行った，ランマ，バックホウ用アタッチメント型振動コンパクタについてもグラフに示す。

試験の結果，コンパクタは，ランマ（締固め幅 150 ㎜）と同程度の締固め速度となった。しかし，機械側面からの操作であるため，ランマのように操作員が直接振動を受けなく，負担が軽減されるため，有効な機械であると考える。ただし，最大転圧深さが 660 ㎜までであり，使用に当たっては作業条件など締固め深さに注意が必要である。ランマの締固め状況を**写真-7** に示す。

バイブロコンパクタは，試験結果からも締固め深さが深いほど時間を要する傾向にあるが，従来の施工方法と比較しても，締固め幅が広いにも関わらず，締固め速度が速いことが確認できた。

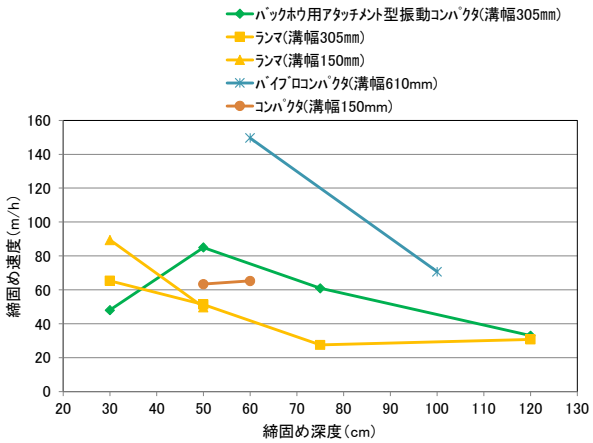



図-4　締固め深度と締固め速度

写真-5　コンパクタの締固め状況

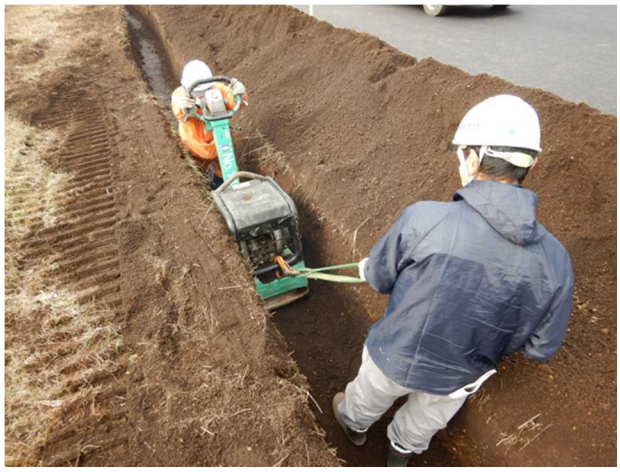


写真-6　バイブロコンパクタの締固め状況

写真-7　ランマの締固め状況

## ４．考察

トレンチャーを用いた掘削試験を実施し，掘削幅が 305 ㎜から 610 ㎜に拡大しても，従来のバックホウより施工速度が速くなることを,また,トレンチャーを使用することにより掘削断面がきれいに仕上がることを確認した。

コンパクタは，ランマと施工速度にあまり違いが生じなかったが，操作員の負担の軽減につながることが確認できた。

掘削幅が 610 ㎜に広がったことにより，一般的な締固め機械であるバイブロコンパクタが使用でき，締固め速度も向上していることかが確認できた。

締固めに関して，掘削幅 150 ㎜は締固め深さに制限はあるがコンパクタ, 305 ㎜はバックホウ用アタッチメント型振動コンパクタ, 610 ㎜はバイブロコンパクタと，それぞれの掘削幅に対する締固め機械の省力化が可能となったため，施工の効率に貢献できたと考える。**写真-8** にバックホウ用アタッチメント型振動コンパクタの締固め状況を示す。

写真-8　バックホウ用アタッチメント型
振動コンパクタの締固め状況

## ５．まとめ

トレンチャーによる掘削試験を実施し，掘削幅が広くなっても，従来のバックホウより施工速度が速いことを確認した。また，トレンチャーを使用することにより，掘削断面がきれいに仕上がるため，床均しなどの作業も不要になる。

掘削幅が広くなったことにより，多様な配管埋設が可能となった。また，コンパクタ，バイブロコンパクタなどの締固め機械が使用可能になり，施工が効率的に行える。

今後は，無電柱化のための電線類地中化の普及に向けては，掘削幅 610 ㎜から更に拡大する方法について検討を行うことで，多条な配管埋設が可能となるよう検討を進めていく。また，トレンチャーによる掘削速度を活かすためには，埋戻しから締固めまでの一連の施工速度の向上が必要となるが，掘削に付随する関連作業も含めた効率化を念頭に，検討を進めて行くことで，無電柱化のための電線類地中化の普及に貢献できると考える。

## 参考文献

1)（国研）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（案）https://kikai.ceri.go.jp/download/, 2021

# ２．海上地盤改良工事における施工の自動化および 3D 施工管理システムの導入事例報告

東亜建設工業株式会社　　○ 那須野　陽平

## １．はじめに

名古屋港金城ふ頭では，我が国の基幹産業である自動車関連産業の国際競争力を維持・強化することを目的とし，施設利用の再編に合わせて水深-12m の国際物流ターミナルの整備を進めている（図-1）[1]。平成 29 年度から整備が開始された新規岸壁は，災害発生後の緊急物資輸送を担う耐震強化岸壁にも位置付けられており，その性能を確保するため，地盤改良（CDM 改良）を伴うハイブリッドケーソン式構造が採用された。

図-1　金城ふ頭地区における整備位置図

当該工事で採用された地盤改良工法である深層混合処理工法（以下，CDM 工法）は，軟弱土そのものを現位置で硬化材とともに攪拌混合・固化させ，軟弱地盤を堅固な地盤に改良する工法で，港湾では防波堤，岸壁，護岸などの基礎地盤で適用されている。港湾では，専用の作業船（深層混合処理船＝CDM 船）による施工が行われており，1 サイクル当たりの改良面積（5.47m$^2$）で水面下 52m まで改良することができ，陸上の地盤改良工事で用いられる施工機械（改良面積=1.5m$^2$，適用深度=45m）の 3 倍以上の施工能力を有する。

本稿では，i-Construction の推進に向けた取り組みとして，東亜建設工業（株）が保有する深層混合処理船「黄鶴」（写真-1，表-1）による海上地盤改良工事で実施した

① 施工の自動化による省人化，品質安定化および担い手育成・早期自立の実現
② リアルタイム3D施工管理システム導入による施工の見える化と受発注者間の情報共有
③ 帳票・BIM/CIMモデルの自動作成による業務効率化

について報告する。

写真-1　深層混合処理船「黄鶴」

表-1　「黄鶴」船体諸元

| | | |
|---|---|---|
| 船体主要寸法 | 長さ [m] | 70.0 |
| | 幅 [m] | 32.0 |
| | 深さ [m] | 4.5 |
| | 喫水 [m] | 2.65 |
| 処理機 | 改良面積 [m$^2$] | 5.47 |
| | 改良深さ（水面下） [m] | 52.0 |
| | 処理能力 [m$^3$/h] | 90以上 |
| | 処理機位置 | 船首 |
| | 処理機重量 [t] | 275 |
| | トルク [kgm] | 7,500 |
| 排水トン数 [t] | | 5,700 |
| 櫓高さ [m] | | 61.0 |

## ２．工事概要

本工事は，名古屋港金城ふ頭において輸送の効率化，大型船への対応，大規模地震発生時の物流機能の維持に対応するために行う，ふ頭再編改良事業による耐震強化岸壁整備に伴う海上地盤改良工である。工事概要と工事内容及び数量は，以下のとおりである（表-2，3）。

表-2　工事概要

| | |
|---|---|
| 工事名 | 令和元年度名古屋港金城ふ頭岸壁（-12m）地盤改良工事 |
| 発注者 | 国土交通省中部地方整備局 |
| 受注者 | 東亜・大本特定建設工事共同企業体 |
| 工期 | 令和元年9月13日 ～ 令和2年3月27日 |
| 施工場所 | 愛知県名古屋市港区金城ふ頭地先 |

表-3　工事内容及び数量（実施）

| 工事名称 | 規格 | 数量 | 単位 | 参考数量 |
|---|---|---|---|---|
| 海上地盤改良工 | | | | |
| 固化工 | | | | 4軸φ1,400 |
| 深層混合処理杭 | 長杭 | 323 | 本 | 改良土量 |
| 1工区（壁式） | | | | 35,932m$^3$ |
| | 短杭 | 152 | 本 | 改良土量 |
| | | | | 4,221m$^3$ |
| 深層混合処理杭 | 長杭 | 19 | 本 | 改良土量 |
| 2工区（壁式） | | | | 1,988m$^3$ |

## ３．施工上の課題と解決のための取り組み内容

### 3.1　施工の自動化

近年，建設業就業者の高齢化と若年入職者の減少による，次世代への技術継承が課題となっている。港湾工事で使用する作業船においても，熟練技術者が減少しているという事実を鑑み，少人数でも施工が行える環境の構築が必要であった。ここでは，深層混合処理船を対象とした「セメントスラリーの製造」，「処理機の引抜速度（改良速度）や翼回転数の調整」，「施工データの記録」，「作業負荷に応じて運転する発電機台数の増減」など，オペレータのノウハウをプログラム化し，これらの作業を自動化すると共に，省人化や品質の安定化，担い手の育成と早期自立を実現した。具体的な取り組み内容は，以下のとおりである。

① 支持層に着底すると，改良深度（改良長）に合わせてセメントスラリー（硬化材）の製造量を自動で計算し，製造・注入。

② 処理機の引抜速度や翼回転数の調整，施工データの記録を施工フローに従い，自動で実施（図-2）。

③ 地盤の拘束力の違いによる作業負荷に応じて，運転する発電機台数を自動で増減できる発電機自動発停機能を開発・導入（図-3）。

④ 船内機器の作動状況や作業状況を一元管理するため，WEBカメラを32台設置（写真-2）。

図-2　施工状況監視モニター表示例

図-3　発電機自動発停装置表示例

写真-2　Webカメラによる設備監視画面モニター

### 3.2　ネットワーク化されたリアルタイム 3D 施工管理システムの導入 [2), 3)]

港湾工事におけるCDM 工法は，作業船位置誘導システム，スラリープラント制御機器，施工管理機器や計器類をオペレータが監視しながら運用しているが，遠隔地で工事関係者が施工状況・進捗などの情報をリアルタイムに共有したいというニーズがあった。そこで，水中及び海底地盤中といった不可視部分の見える化に焦点を当てた「リアルタイム3D施工管理システム」（図-4）を開発し，以下に示す項目の実現を図った。

① 設計データを基に作成した改良体（杭）の3Dモデルに，作業船から得られる施工情報（施工時間や打設管理データなど）を取込み，不可視部分をリアルタイムに3D描画して可視化した。
② これらの情報を，ネットワークを介して複数拠点（発注者，現場事務所，本支店等）で同時に閲覧可能とした（図-5）。

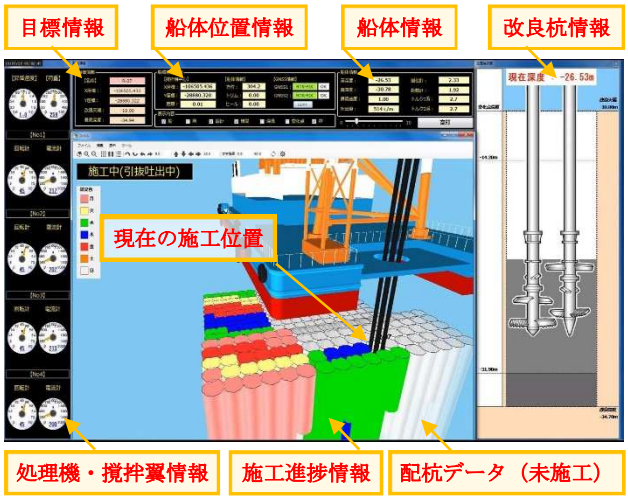



図-4　リアルタイム3D施工管理システム画面例

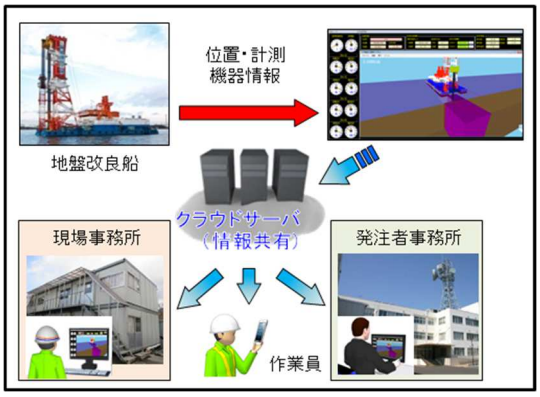



図-5　見える化による施工管理情報の共有イメージ

### 3.3　帳票やBIM/CIM モデル自動出力機能の導入 [2)]

これまで，出来形管理帳票を作成するためには，打設日報と施工データから転記する方法を採用していたが，転記ミスなどのヒューマンエラーが発生する可能性もあり，作業効率や確実性の面で課題があった。そこで，書類作成等の業務の効率化を目指し，以下に示す項目の実現を図った。

① BIM/CIMモデルで，各々の改良杭の打設位置，杭出来形，スラリー量，着底時トルク・荷重などの施工データを，属性情報として確認・活用できるようにした（図-6）。
② 出来形管理帳票や，改良体のBIM/CIMモデルの自動出力機能を開発・導入した（図-7）。

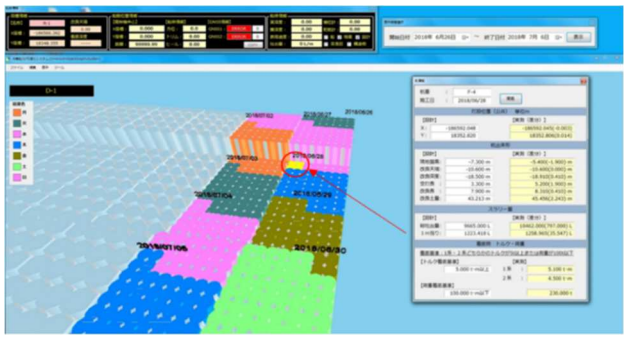


図-6　属性情報の表示イメージ

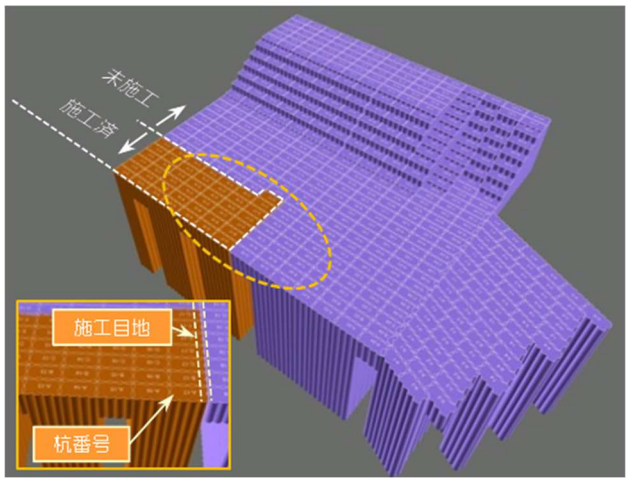



図-7　BIM/CIMモデルイメージ

## 4．本取り組みの成果

### 4.1　施工の自動化

1982 年に建造した CDM 船「デコム 7 号」では，他社に先駆けて 60%程度の施工の自動化を行ってきたが，2010 年に建造した「黄鶴」では，オペレータのノウハウをプログラミングしたことにより，セメントスラリーの製造及び改良作業の完全自動化を実現。これにより，以下の成果が得られた。

① オペレータのノウハウをプログラミング化し，施工の自動化を進めたことにより，3 名体制から 2 名体制にできた（33%の省人化）。

② 操作にオペレータが介在しないため，品質のばらつきが無くなり，品質の安定化を実現した。
③ 施工の自動化に伴い，オペレータは運転操作に気を取られることなく，施工のポイントを習得できるため，技能習熟期間が従来 5 年以上必要だったものが，2 年程に短縮した。
④ WEB カメラによる操作室からの一元管理により，監視業務省力化，安全性向上，トラブル等の早急対応に繋がった。
⑤ 発電機自動発停機能の開発・導入により，機関部員の作業負担軽減とエネルギーの効率化（5～15%）を実現した。

作業船の乗組員は，陸上の一般作業員とは異なり，特殊な施工機械のオペレートを行う必要がある。また，海の法律の知識や海域ごとの海象・気象情報，海底形状など，多くの知見が必要なため，誰もがすぐになれるものではない。施工の自動化は，省人化や習熟期間の短縮など，担い手不足対策として，今後ますます必要となる技術である。

### 4.2 ネットワーク化されたリアルタイム 3D 施工管理システムの導入

ネットワーク化されたリアルタイム 3D 施工支援システムは，ICT 活用工事の工種拡大に先駆けた取り組みとして，港湾の地盤改良工において業界で初めて開発・導入した。本システムの導入により，以下の成果が得られた。

① 水中や海底地盤中の不可視部分の状況をリアルタイムに 3 次元で確認可能になった。
② 複数拠点での同時閲覧により，受発注者間の連携が強化され，施工の確実性が向上すると共に，打ち合わせ回数の削減や移動時間の削減につながるなど，省力化を図ることができた。
③ トラブル発生時，複数拠点において状況把握が可能となり，復旧体制を早期に整えることができる。

この取り組みは，現場の施工状況や材料の立会確認に適用することで，遠隔臨場が可能となり，大幅な監督・検査の省力化が図れ，広く波及するものと考えている。

### 4.3 帳票やBIM/CIMモデルの自動出力機能の導入

帳票や BIM/CIM モデルの自動出力機能の導入により，以下の成果が得られた。

① 帳票作成時のデータ転記ミスがなくなった。
② 施工管理や書類作成等の時間を約 80%削減することができた。

帳票や BIM/CIM モデルの自動出力機能は，ネットワーク化されたリアルタイム 3D 施工支援システムを含め，今後，海上地盤改良工の ICT 活用工事における電子納品データとして，直接活用できるようになるものと考える。

## 5．おわりに

現在，インフラ分野の DX の推進が図られている中，当該工事を通じて実施したこれらの取り組みは先進性に富み，作業船による他の地盤改良工法や浚渫工事にも応用が可能である。施工の自動化は，省人化や習熟期間の短縮など，担い手不足対策として必要不可欠な取り組みである。また，「作業船 3D 施工管理システム」の活用は，海上地盤改良工事において水中および海底地盤中といった不可視部分における地盤改良状況の確認に加え，現場事務所や発注者事務所などの遠隔地においても施工の進捗確認が可能で，遠隔臨場のための有効なツールにもなりうる。熟練技術者が減少して人手不足が深刻化していく中，本技術の導入により，管理精度や作業効率の向上が図れるため，生産性向上に寄与できる。

本取り組みを通じて得られた成果に基づき，更なる生産性向上を推進するため，以下の取り組みを進めている。

① 撹拌翼等に付着した泥の洗浄作業の AI による自動化により翼洗浄要員の削減
② スラリープラント洗浄作業の自動化
③ 属性情報を付与した BIM/CIM モデルの活用による，後続工事での施工検討や維持管理等での活用
④ 作業日報や完成書類の自動作成機能の付加

施工の自動化や効率化を図る取り組みは，CDM 船のみにとどまらず，その他の作業船においても推進していくことが望ましい。少人数でも安全な施工が実現できるよう，港湾工事全体の生産性向上を目指し，今後も更なる技術開発に取り組んでいく所存である。

### 参考文献


1) 国土交通省港湾局：名古屋ふ頭再編改良事業，https://www.mlit.go.jp/common/001082489.pdf
2) 若松宏知・那須野陽平・田中孝行・藤山映：海上地盤改良工事におけるBIM/CIMを活用した取組事例の紹介，土木建設技術発表会 2019.
3) 久米由起・東方真次：CDM船の施工生産性の評価と今後の開発の方向性，令和元年度 中部地方整備局管内事業研究発表会，2019.

# ３．硬質地盤に対応したオープンケーソン工法

## －硬質地盤が掘削可能な水中掘削機の開発－

アーバンリング工法研究会　　○ 小倉　剛
内山　敬二
本田　啓

### １．はじめに

ケーソン工法は基礎工法の一種であり，ケーソンと言われる円形や矩形，小判形の筒状構造物を陸上に構築して所定の支持地盤まで沈設させ，基礎あるいは地下構造物を構築する工法である。ケーソン工法は，オープンケーソン工法とニューマチックケーソン工法に大別される。

オープンケーソン工法は，ケーソン内の地盤を大気中または水中においてグラブバケットなどにより掘削を行い，ケーソン自体の重量及び圧入アンカーによる沈下荷重を利用して沈設させるものである。

ニューマチックケーソン工法は，ケーソン下部に隔壁を設けて気密作業室をつくり，この中に圧縮空気を送り込み地下水の浸入を防ぎ，人力または専用機械により掘削を行い，ケーソン自体の重量及び気密作業室に発生する揚圧力を調整して沈設させるものである。

オープンケーソン工法は地下における有人作業はないので安全性に優れる一方，掘削地盤が硬質な場合，ケーソン刃口部の直下を掘削しないとケーソンを沈下できない。しかし，グラブバケットでは刃口部直下を直接掘削できないため，ケーソンを陸上に構築する前に地上から刃口部の硬質地盤を掘削の容易な砕石などに置き換える必要がある。そのため，オープンケーソン工法は平面形状や深度，対象地盤など適用範囲を限定されたり，硬質地盤の置換掘削の費用増加や工期の延長などの課題があった。この課題解決を目指し，新たな水中掘削機（**写真-1**）を開発した。

### ２．水中掘削機の概要

水中掘削機は，通常のグラブバケットなどにより直接掘削できない硬質地盤が出現した時に，地上部からクローラクレーンを用いて投入し，ケーソン刃口部直下の沈設に必要な範囲を掘削する（**図-1**）。

さらにケーソン刃口部直下だけではなく，ケーソン中心部の硬質地盤を先行削孔して緩めることによって，グラブバケットなどによる掘削作業の効率化を可能とする。そして，掘削土砂は水中掘削機に搭載された排土ポンプを使用してケーソン中心側に集めることによって，グラブバケットや水中サンドポンプなどを使用して地上への効率的な搬出を可能としている。

水中掘削機の概略仕様（**図-2**，**図-3**）は次のとおりである。

**写真-1　硬質地盤対応水中掘削機**

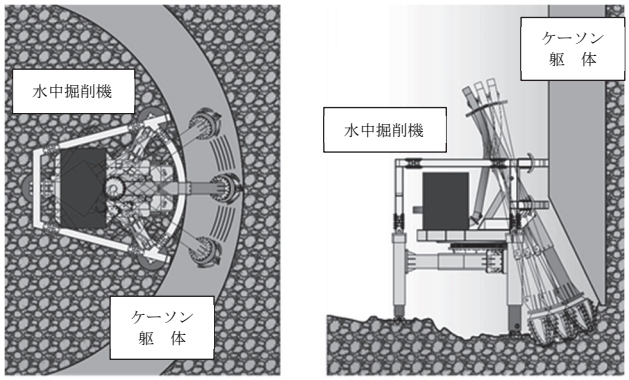



**図-1　ケーソン刃口部掘削イメージ図**

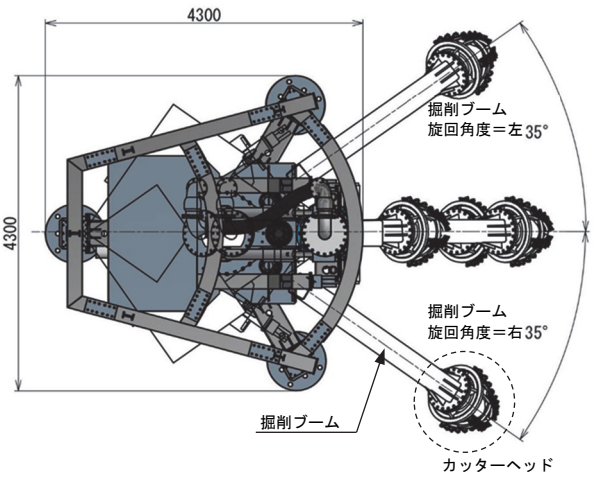



図-2　水中掘削機平面図

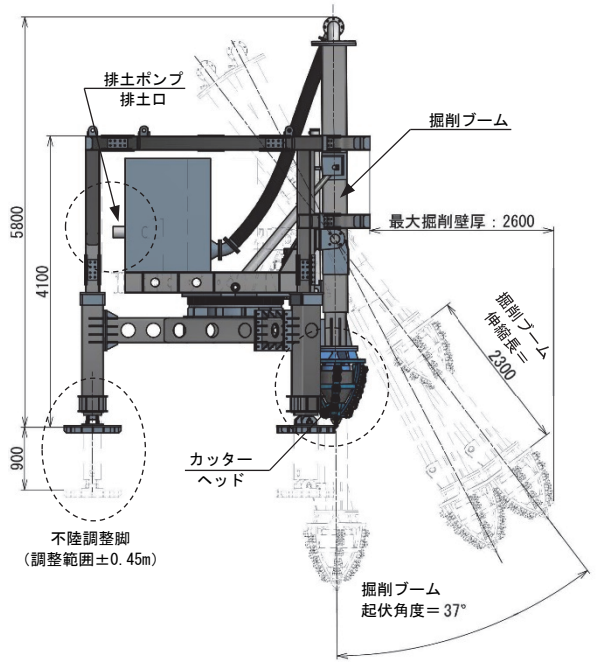



図-3　水中掘削機側面図

| | |
|---|---|
| 外　形　寸　法 | ：L4.3m×W4.3m×H5.8m |
| 重　　量 | ：14.8ｔ(水中：約 13.0ｔ) |
| 掘削ブーム旋回角度 | ：70°（左右 35°） |
| 掘削ブーム起伏角度 | ：最大 37° |
| 掘削ブーム伸縮長 | ：2,300 ㎜ |
| カッターサイズ | ：φ945 ㎜×H1,110 ㎜ |
| カッター回転数 | ：最大 60rpm |
| カッタートルク | ：最大 8,000Nm |
| 不陸調整範囲 | ：0.90m(±0.45m) |
| 掘削可能壁厚 | ：最大 2,600 ㎜程度 |
| 使用可能水深 | ：100m |

水中掘削機は，ケーソン立坑内の掘削位置に設置完了後，3 本の不陸調整脚（調整範囲±0.45m）で水中掘削機本体が水平になるようにレベル調整し，硬質地盤の掘削を開始する。

硬質地盤の掘削は初めにカッターヘッドを右回転または左回転（最大 60rpm）させる。次に掘削ブームを伸長（最長 2,300 ㎜）させ，掘削ブームを 0 度から徐々に倒し（最大 37 度），カッターヘッドを掘削位置に合わせる。そして，掘削ブームを左右に旋回（左右 35 度）させながら硬質地盤を掘削する。

掘削土砂は，水中掘削機に搭載された排土ポンプを使用してカッターヘッドから吸い込み，掘削ブーム内を通し水中掘削機後方へ排土する。

## ３．水中掘削機の特長

水中掘削機の主な特長は，以下のとおりである。

### 3.1　機動性に優れ，メンテナンスも容易

水中掘削機は，通常のケーソン工事に使用する掘削設備の一部であるクローラクレーンにより揚重，移動できるため，機動性に優れ，ケーソンの規模や平面形状に関係なく使用できる。

また，水中掘削機は掘削時の反力を自重により保持する機構であり，水中掘削機をケーソン本体に固定する必要はないため，グラブバケットによるケーソン内掘削に移行する時やメンテナンスの際の地上への引上げは容易である。

### 3.2　GNSS や各種センサーによる姿勢管理

水中掘削機の設置深度や平面位置，姿勢は，GNSS（測位衛星を利用した全世界測位システム）や水中掘削機に搭載された各種センサーの情報を遠隔操作室に集約し，遠隔操作モニタ画面（**図-4**）に表示して視覚的に把握することによって，精度よく掘削することを可能としている。遠隔操作モニタ画面には，画面左側に掘削ブームの旋回トルクやカッターヘッドの回転トルク，水中掘削機の姿勢，不陸調整脚の伸縮ストロークなど各種センサーや計測機器の出力値を表示する。そして，画面右側に水中掘削機の姿勢や掘削状況をグラフィックにより確認することができる。さらに，掘削深度は 10 ㎝ごとに色分け表示しているため，直感的に掘削状況を把握することもできる（**図-5**）。

また，高性能水中音響カメラなどを用いて，施工前や施工完了後の掘削状況を確認することも可能である。

### 3.3　硬質地盤に対応

硬質地盤が出現する地盤条件でのオープンケーソン工法は，刃口部直下は地上部から硬質地盤部まですべての深度において事前に砕石への置換えを必要としたが，出現した硬質地盤を直接掘削できるように硬質地盤を一軸圧縮強度 5.0N/㎜$^2$ 程度と想定し，機械の設計及び製作を行った。

これにより，事前の置換えは不要となり、コストダウンと工期短縮を図ることができる。

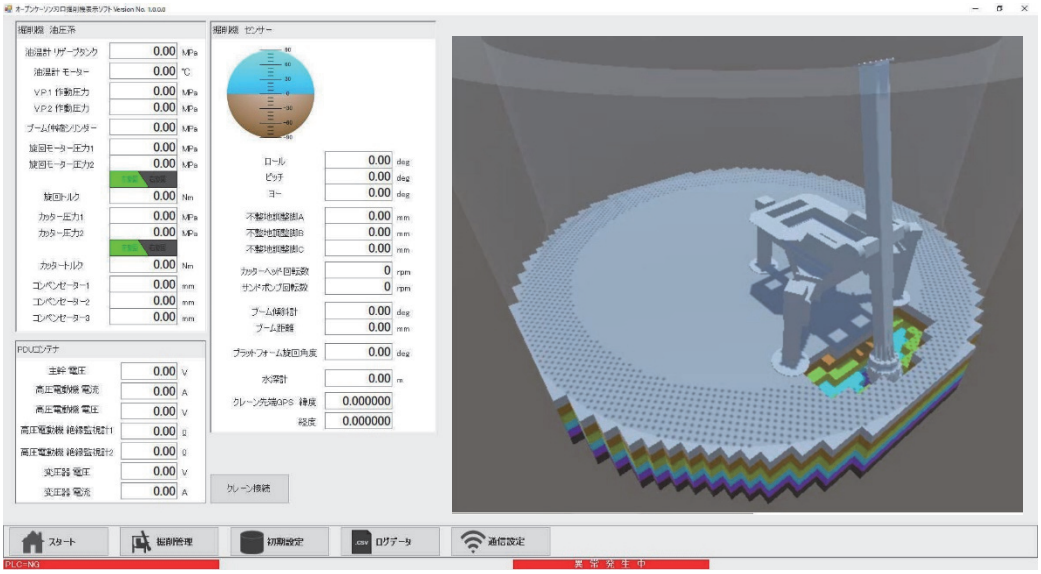


図-4　遠隔操作モニタ画面

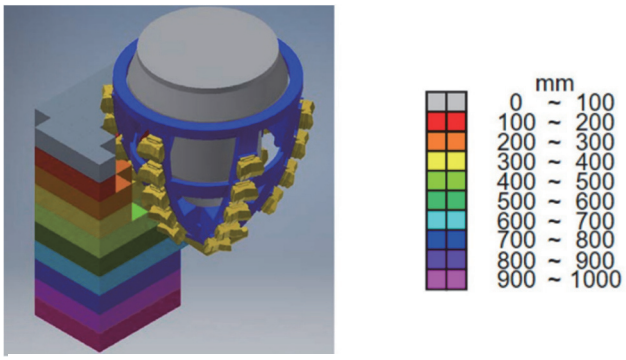



図-5　掘削深度表示モニタ画面拡大図

## 4．性能確認試験の実施

新規製作した水中掘削機が設計した動作や要求する能力を満たしているか確認する必要があるため，性能確認試験を実施した。性能確認試験は陸上（大気中）と水中の 2 回に分けて実施した。

### 4.1　陸上性能確認試験の確認項目と結果

陸上性能確認試験では，水中掘削機の基本的な動作である掘削ブームの旋回や起伏，伸縮，不陸調整脚の伸縮の確認，水中掘削機本体の安定性確認，掘削位置精度確認，事前に構築した模擬地盤（一軸圧縮強度 5.0N/㎟ $^2$ 程度）を用いた掘削能力確認を実施した。

試験項目は，以下に示す①～⑥を実施した。

①水中掘削機の吊重心位置の確認
②無負荷状態における各アクチュエータの動作及びセンサー作動の状況確認
③インターロックの作動可否確認
④水中掘削機本体を最大 3 度傾斜させた状態における安定性確認
⑤実掘削位置（＝カッターヘッド先端位置）と遠隔操作画面表示値の精度確認
⑥水中掘削機の掘削能力（旋回・起伏・伸縮・正転逆転）確認及びサイクル計測

試験項目①～③については，各アクチュエータ，各センサーやインターロックが設計どおり作動することを確認した。

試験項目④は，**写真-2** のように水中掘削機を最大 3 度傾斜させた状態においても安定的に掘削できることを確認した。

試験項目⑤は，掘削位置（＝カッターヘッド先端位置）の実測値と遠隔操作画面の表示値の比較による精度確認を実施し，最大誤差 19 ㎜以内であり，許容値 20 ㎜以内であることを確認した。

試験項目⑥は，試験ヤード内の L5.5m×W3.5m×H1.5m×3 箇所を掘削した後，設計強度 5.0N/㎟ $^2$ のエアモルタルを打設して模擬地盤を構築した。この模擬地盤を使用して水中掘削機の掘削能力（旋回・起伏・伸縮・正転逆転）確認を実施した結果，掘削ブームの旋回掘削による純掘削能力は 3～5m3/h であることを確認した。

模擬地盤を掘削している状況を**写真-3** に示す。

写真-2　水中掘削機安定性確認状況（3度傾斜）

写真-3　模擬地盤（qu=5.0N/㎜2程度）掘削状況

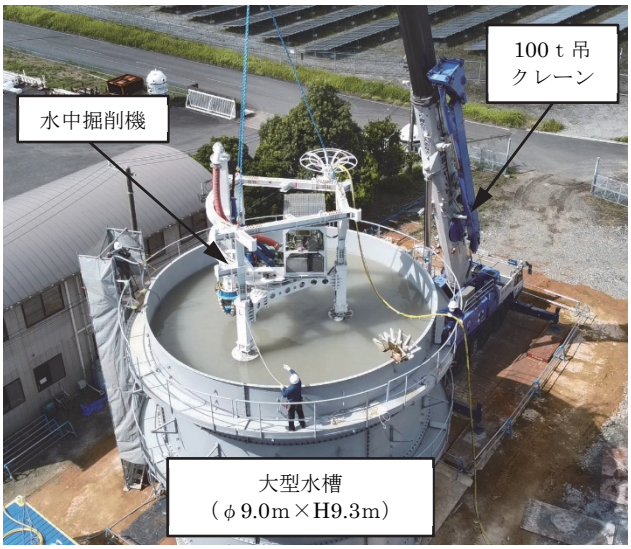



写真-4　大型水槽内へ水中掘削投入状況

### 4.2　水中性能確認試験の実施状況と実績

水中性能確認試験は陸上性能確認試験終了後，陸上性能確認試験に使用した模擬地盤を撤去，地盤を復旧して内径φ9.0m×高さ 9.3mの大型水槽を組み立てた。大型水槽内には，砕石を 1.0mの厚さに敷き均し，水槽天端から約 1.5m下がり（約 420 $m^3$）まで注水した。そして，水中掘削機を大型水槽内に投入し，水中掘削機に搭載された水中油圧ユニットを稼働させ，陸上性能確認試験により確認した動作確認と排土ポンプの作動確認を実施した。

試験項目は，以下に示す①～⑤を実施した。

①水中における水中掘削機の吊重心位置の確認
②水中油圧ユニットの稼働による無負荷状態における各アクチュエータの動作及びセンサー作動の状況確認
③水中油圧ユニットの稼働によるインターロックの作動可否確認
④水中掘削機本体を最大 3 度傾斜させた状態における安定性確認
⑤排土ポンプの作動状況確認

試験項目①～③は，水中掘削機に搭載された水中油圧ユニットを稼働させて実施したが，陸上性能確認試験と同様に各アクチュエータ，各センサーやインターロックが設計どおり作動することを確認した。

試験項目④は，水中において水中掘削機を最大 3 度傾斜させて動作確認を実施し，安定して稼働することを確認した。

**写真-4** に大型水槽内への水中掘削機投入状況を示す。

試験項目⑤は，排土ポンプを作動させ掘削ブームを旋回と起伏，伸縮させて水槽底面に敷き均した砕石を掘削して作動状況を確認した。大型水槽内は強い水の濁りにより目視や光学カメラによる確認はできないため，濁水中においても可視化できる音響カメラや 3D ソナーを使用して確認作業を実施した。

水中掘削機の掘削ブームを左右 35 度旋回させながら，掘削ブームを 0 度から 37 度まで起伏させて連続的に掘削した後，3D ソナーによって撮影した結果を**図-6** に示す。掘削した跡は，ほぼ掘削ブームを旋回・起伏させた軌跡どおりの形状（そら豆ような形状）を確認した。そして，砕石を掘削したため掘削した跡は再び埋め戻されていることも考えられたが，掘削前の基準面に対し最大 30 ㎝程度掘り下げられ，排除された砕石は周りへ 30 ㎝程度の山となっていた。

## ５．現場への適用計画

通常のオープンケーソン工法に必要な建設機械は，ケーソンの組み立てやケーソンの圧入に必要となる圧入装置の組立解体，グラブバケットによる掘削作業などに必要な 100ｔ吊級クローラクレーン，掘削残土の搬出に必要な油圧ショベルとコンテナダンプである。

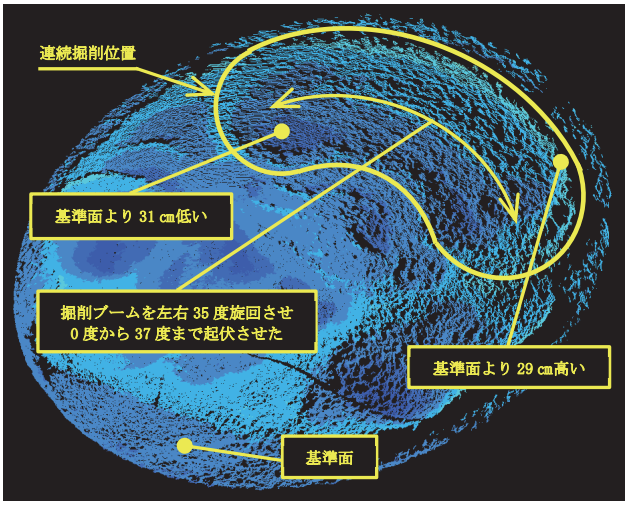



図-6　3Dソナー撮影による連続掘削状況図

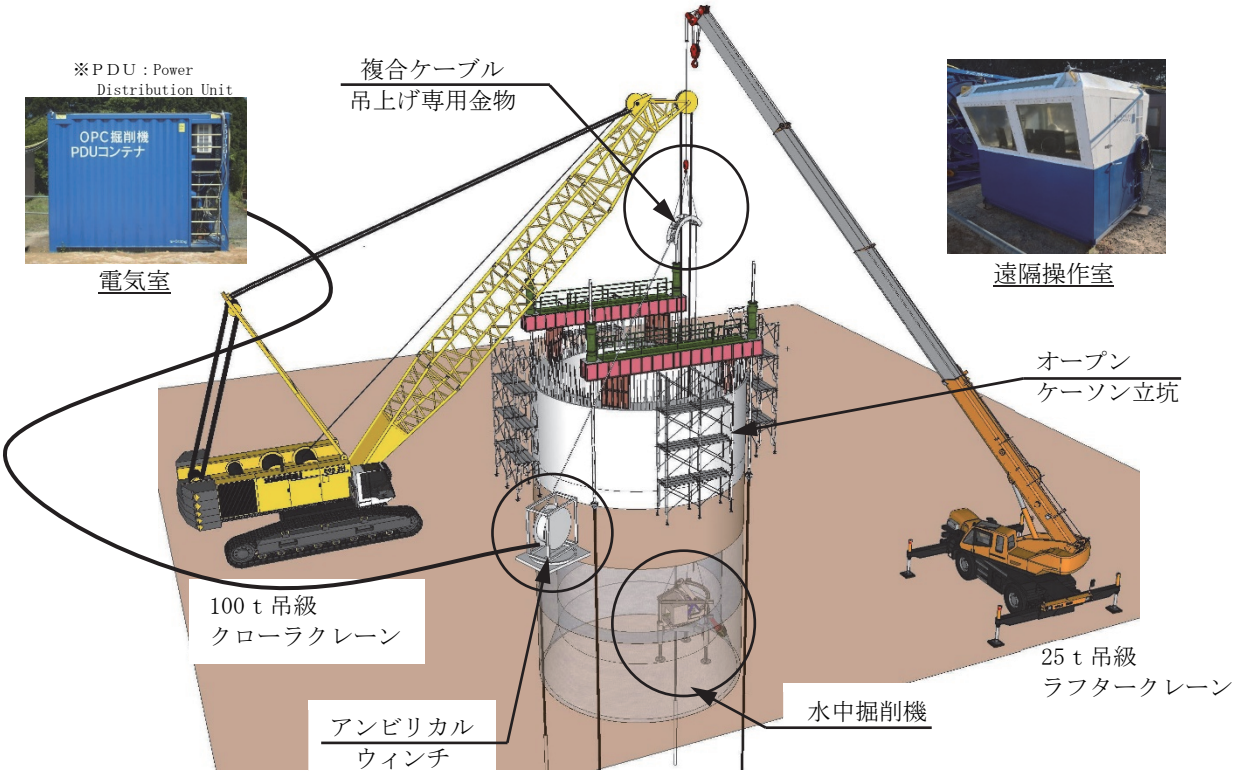



**図-7　現場での資機材配置計画（案）**

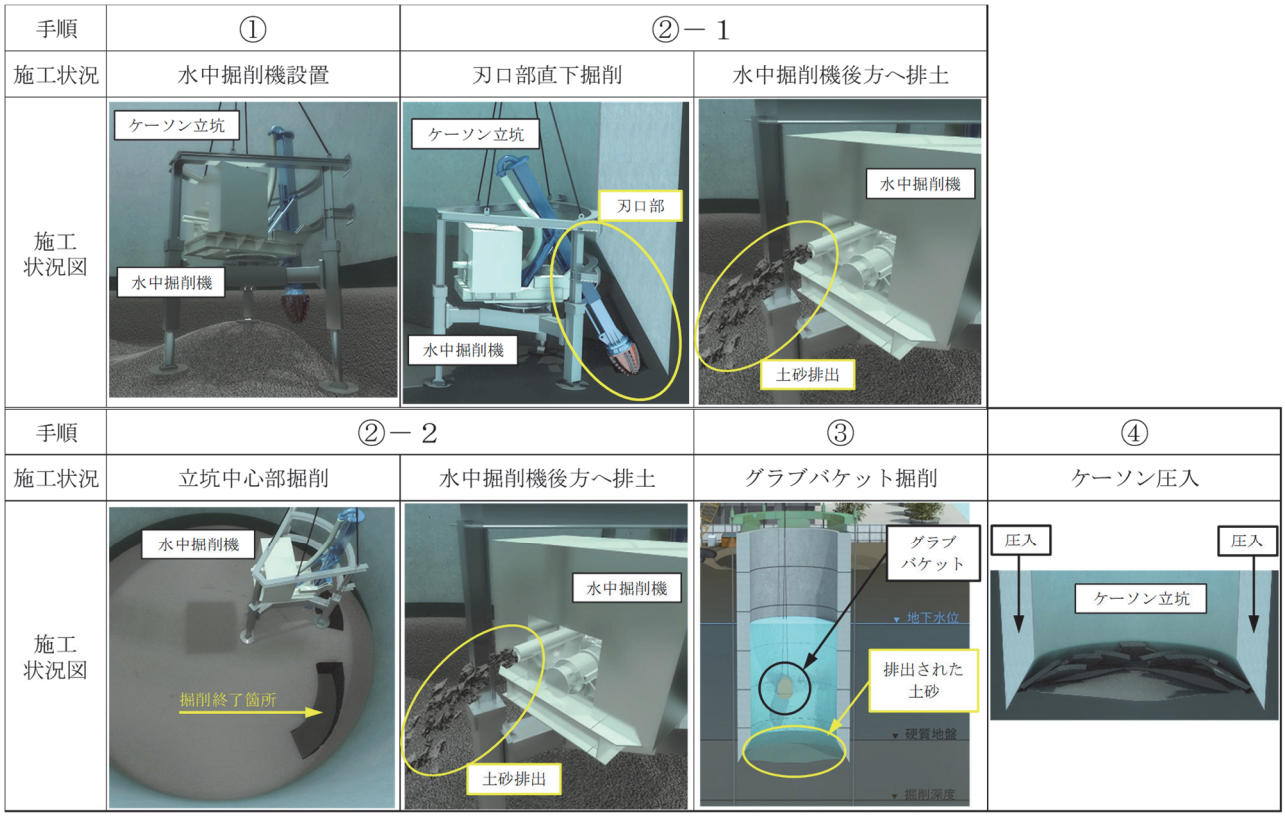



**図-8　水中掘削機の施工手順**

そして，硬質地盤が出現し水中掘削機を使用する場合，水中掘削機本体のほか電気室，電気室から水中掘削機へ電源供給するための複合ケーブルを巻き取るアンビリカルウィンチ，立坑上において複合ケーブルを吊り上げるための専用金物を吊る25ｔ吊級ラフタークレーンを必要とする。現場における資機材配置計画図を**図-7**に示す。

この水中掘削機はケーソン立坑深度 100m，ケ

ーソン刃口部の躯体壁厚約 2,600 ㎜まで掘削可能である。

水中掘削機のケーソン立坑内の掘削及びケーソン圧入の手順は次のとおりとなる。通常はグラブバケットによってケーソン立坑内を掘削するが，硬質地盤の出現によりケーソン刃口部直下，立坑中心部の掘削及びケーソン圧入も不可能となるため，水中掘削機を必要とする。水中掘削機の施工手順図を**図-8** に示す。

①100 t 吊級クローラクレーンにより水中掘削機を吊り込み，ケーソン立坑内に設置する。

②ケーソン刃口部直下（②-1）や立坑中心部（②-2）を掘削する。ケーソン立坑内において水中掘削機の移動・設置・掘削を繰り返し，ケーソン沈設に必要な範囲を掘削する。掘削した土砂は水中掘削機に搭載された排土ポンプにより，水中掘削機後方へ排出する。

③水中掘削機をケーソン立坑内から引上げる。100 t 吊級クローラクレーンはグラブバケットを吊り込み，ケーソン立坑内の中心側に排出された土砂を掘削し，立坑外へ排土する。

④グラブバケットによる掘削完了後，ケーソンの圧入を実施する。圧入完了後は再び手順①へ戻り，手順を繰り返す。

## ６．おわりに

今日，労働環境と環境負荷に対する制約は，これまでになく強まっている。たとえば，欧州においては洋上風力発電設備の建設から潜水作業を排除し，すべて ROV 作業に置き換えられている。これはヒトを危険作業に従事させないという社会の意思を請負契約として具現化したものである。立坑や基礎の建設も例外ではない。世界最大のシールドマシンメーカーである Herrenknecht 社は，オープンケーソン工法を念頭に全自動・無人・岩盤対応可能の掘削構築システムを商品化し，安全・高速・環境負荷ゼロを前面に出して世界に事業展開している。

欧米におけるこの傾向は徹底的かつ圧倒的であり，かつて日本の建設業界は同様の経験をしている。1960 年代，日本ではいまだ人力掘削作業を主流としていた頃，フランスのポクレン社からパワーショベルを導入し，建設現場の様子は一変した。そのころは，ポクレンという固有名詞はパワーショベルを意味する普通名詞として使われるほどであった。1970 年代に日本国内において小型のディーゼルエンジンや油圧ポンプの製造を始めて，都市部の狭隘な現場においても国産の油圧パワーショベルが活躍するようになった。

今回の当研究会において開発した硬質地盤を掘削可能な水中掘削機は，上記のポクレンにも相当すると考えている。今後，当研究会は水中掘削機の現場適用を繰り返すとともに，オープンケーソン工法に係わる周辺技術開発や水中掘削機の軽量化・コンパクト化などをさらに図っていく所存である。

当研究会の活動によって，特殊環境における有人作業を排除した安全性に優れるオープンケーソン工法の適用範囲は確実に広がっていくものと考えている。

## 参考文献

1) 小倉　剛・内山　敬二・本田　啓：硬質地盤の沈下掘削を可能とする水中掘削機の開発，建設機械施工，通巻852号，pp.42～49，2021年

# 4．圧入施工データを利用した圧入機の自動運転と地盤情報の推定

(株)技研製作所　　石原　行博
〃　　○ 岡田　浩一

## 1．背景

圧入工法は，施工済みの杭／矢板から反力を得ながら新たな杭／矢板を静荷重で地盤に貫入させる施工技術である（図-1)。施工に伴う振動騒音が限定的で，施工に必要なスペースも小さくて済む。近年ではウォータージェット併用圧入やオーガー併用圧入（硬質地盤クリア工法)，先端刃付きの鋼管杭を回転させながら押し込む回転切削圧入（ジャイロプレス工法）といった工法が開発され，硬質な地盤への適用性が大幅に向上している。

国内では近年，労働人口や熟練技術者数の減少を背景として，自動化･省力化によって建設工事の生産性や魅力を向上させることが i-Construction という名のもとに推進されている[1)]。また，最近の建築基礎杭工事における支持層未到達問題を受け，適切な施工体制の確保・現場立ち合いや施工データの活用を通じた支持層到達確認，施工記録の管理が求められるようになった[2)]。

## 2．圧入施工データの利用

圧入工法では一本一本の杭／矢板の施工データを取得可能である。各圧入機には情報端末が取り付けられており（図-2)，施工時の様々なデータが杭一本ごとに電子データとして自動的に記録される。施工時のデータには圧入力，トルク，貫入深度，時間，回転数，機械傾斜などが含まれ，これらを総称して圧入施工データと呼ぶ。圧入施工データはこれまで杭の施工管理記録としてそのまま使用されてきたが，筆者らは，施工データを加工することにより，杭／矢板で構成される構造物の設計や施工の合理性を高める技術の開発に取り組んでいる。圧入施工データの利用技術の概念の一例[3)]を図-3に示す。

1 つ目の活用方法の「施工条件の選定」とは，貫入技術（単独圧入，WJ 併用圧入，オーガー併用圧入，回転切削圧入）の選定や，各貫入技術における圧入機の運転パラメータ値（圧入速度，引抜速度，回転数，圧入長，引抜長など）の選定のことを指す。圧入機の自動運転技術は，この活用方法の好例である。

2 つ目の活用方法の「地盤情報の推定」は，圧入中の杭／矢板の先端部の地盤に関する情報を推定することを意味する。打止め管理の信頼性の向上や，工法変更（他の貫入技術への変更）や設計変更（杭／矢板の根入れ長の変更）の客観的な判断材料の提供といった効果を期待している。

3 つ目の活用方法の「杭／矢板の性能の推定」では，鉛直支持力，剛性，水平抵抗などの杭／矢板の性能を施工データから推定することを想定している。これにより，通常の載荷試験に要する付加的な時間とコストを軽減しつつ全ての杭／矢板の品質を一定のレベルで保証できると考えられる。

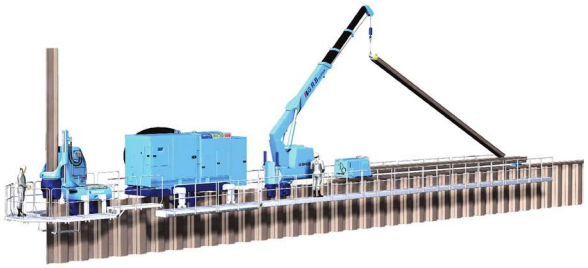


図-1　圧入工法

図-2　圧入機に装備された情報端末

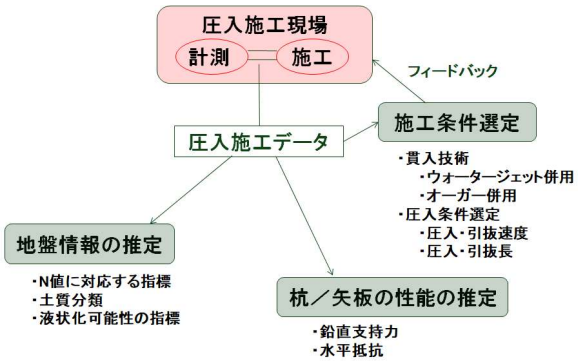



図-3　圧入施工データの利用技術の概念の例

表-1　圧入施工データの利用技術の現時点での適用範囲

| | 施工条件選定（自動運転） | 地盤情報の推定 | 杭／矢板の性能の推定 |
|---|---|---|---|
| 単独圧入 | — | ○ | — |
| WJ 併用圧入 | — | — | — |
| オーガー併用圧入 | ○ | ○ | — |
| 回転切削圧入 | △ | ○ | — |

筆者らは現場データの収集や実証試験・模型実験の実施などを通じてこれらの方法論の開発を進めてきた。圧入施工データを活用した技術は 2017 年に NETIS[4]に登録され（登録番号：SK-170006-A），現在の適用範囲は表-1 のようになっている。次節では，圧入施工データの 3 つの活用方法のうち「施工条件の選定（自動運転技術）」と「地盤情報推定技術」について，最近の実施事例を含めながら報告する。

## ３．自動運転と地盤情報推定

### 3.1　自動運転技術

#### 3.1.1　従来の運転方法

最初に述べた通り，圧入工法は施工済みの杭／矢板から反力を得ながら新たな杭／矢板を静荷重で地盤に貫入させる施工技術である。圧入機の運転では，杭／矢板を貫入させるのに必要な圧入力やトルクが，施工済みの杭／矢板の引抜抵抗力などから得られる反力よりも十分に小さくなるように，運転パラメータの値（押込み・引抜の距離や速度，ウォータージェットの吐出流量やオーガーの回転数など）を管理する。これには一定の技術レベルが必要とされる。

圧入機の自動運転技術は従前から存在していたが，従来の自動運転は，オペレータ自身が設定した運転パラメータの値に従って圧入機が自動的に動作するという運転方法であった。より完全に近い自動運転を実現するためには，圧入機が適切な運転パラメータ値を自動的に決定するようなシステムが必要であった。

#### 3.1.2　新しい自動運転システムの開発

施工データを活用することにより，運転パラメータの設定自体を自動化した新しい自動運転を開発し得ることに着目し，2007 年に本格的なデータ収集を開始した。新しい自動運転では，圧入施工データをもとに地盤条件や施工状態を推定し，それらに応じた適切な運転パラメータ値を逐次自動的に選定し，圧入機にフィードバックする（図-4）。リアルタイムに変化する地盤条件や施工状態に対応するためには，施工時に高い頻度で圧入施工データを分析し，パラメータを更新する必要がある。これを可能にするために，データ処理性能を高めた最新機種を用いて開発を進めた。

圧入工法の 4 つの貫入技術のうち，まずはオーガー併用圧入を対象として開発を行った。オーガー併用圧入は，N 値が 50 を超えるような硬質地盤を対象とした圧入技術で，オーガーヘッド部で地盤を掘削しながら矢板を圧入する。オーガー併用圧入の場合の主な施工データは，時間，貫入深度，圧入力，トルク，圧入機傾斜，である。これらの施工データから，矢板の先端位置の地盤条件（地盤の場合は N 値，岩盤の場合は一軸圧縮強度）や現在の施工状態（鋼矢板の継手部の嵌合状態など）を推定し，これらの推定結果に基づいて適切な運転パラメータ値を選定して，圧入機にフィードバックする。

最近は，新しい自動運転の開発対象を回転切削圧入にも拡大し，現場での試運用を進めている。回転切削圧入では，杭の先端にビットと呼ばれる切削刃を取り付け，鋼管杭を回転させて地盤を切削しながら圧入を行う。

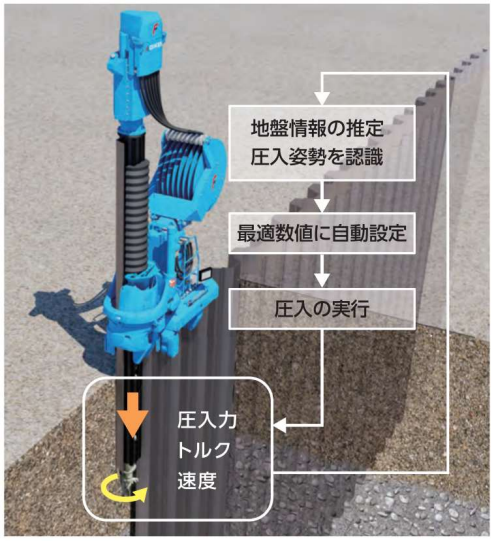



図-4　新しい自動運転のイメージ

### 3.1.3　実施事例

**①オーガー併用圧入**

図-5 は，オーガー併用圧入で矢板を施工した際の圧入時間（圧入以外に要した時間を除外した時間）を比較したものである。矢板は III 型鋼矢板，圧入機は F201，オーガーヘッドは外径 330mm・羽根数 3 のものを使用した。地盤は砂礫で構成され，最大 N 値は 30 程度である。新しい自動運転では，手動運転と比較して所要時間がやや短縮され，平均値で比較すると 17%の時間短縮となった。なお，表層から 1.6m は手動運転となっているため比較対象から除外した。

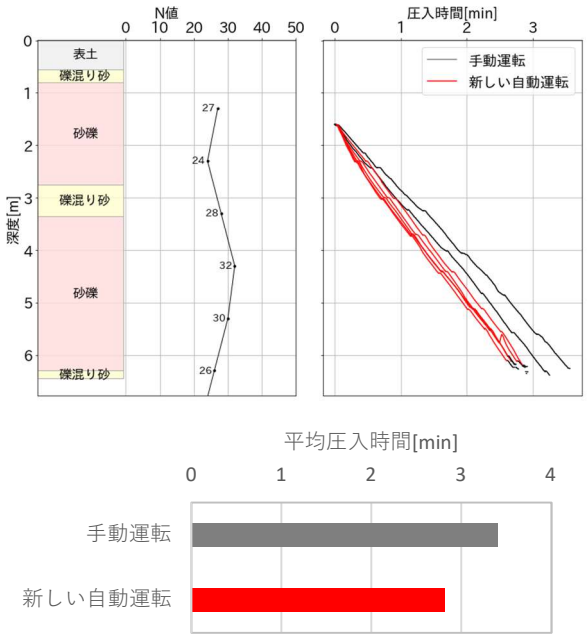



図-5　自動運転方法による圧入時間の違い
（オーガー併用圧入・砂礫地盤）

図-6 は，オーガー併用圧入で矢板を施工した際の圧入時間を比較したものである。矢板は III 型鋼矢板，圧入機は F201，オーガーヘッドは外径 330mm・羽根数 3 のものを使用した。地盤は主に花崗岩で構成され，最大 N 値は貫入不能である。結果として，従来の自動運転と比較して 20%程度の時間短縮効果を得られた。

これまでの運用を通じて，深度方向に地盤条件の変化が大きい場合ほど，新しい自動運転の効果が大きい（圧入時間が短縮される）ことを確認している。オーガー併用圧入の場合には，たとえば礫・玉石まじりの典型的な地盤条件において，30%程度の時間短縮効果が得られている [5]。

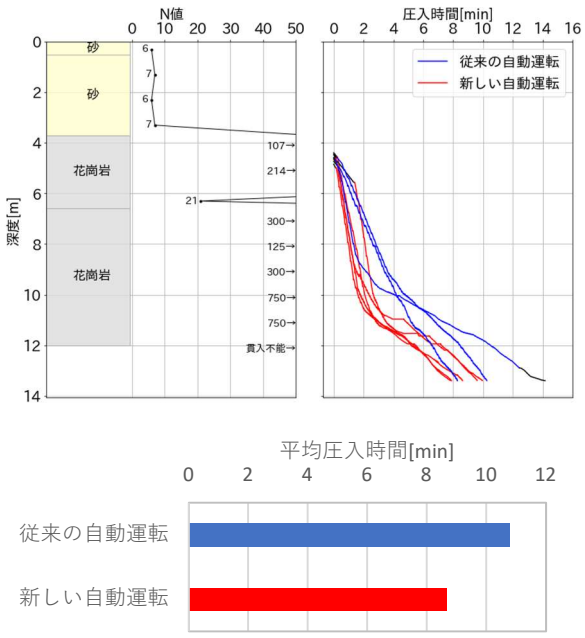



図-6　自動運転方法による圧入時間の違い
（オーガー併用圧入・岩盤）

**②回転切削圧入**

図-7 は，回転切削圧入で杭を施工した際の圧入時間を比較したものである。杭は外径 1000mm・板厚 10mm，圧入機は F401 を使用した。地盤は砂礫で構成され，最大 N 値は 45 である。結果として，従来の自動運転と比較して 35%程度の時間短縮効果を得られた。なお，深度 7m までは障害物を撤去する目的で先行削孔が行われたため，比較の対象外とした。

**③今後の課題**

本節で紹介した事例では，いずれの場合にも圧入時間が短縮された。他方，地盤条件や現場条件に

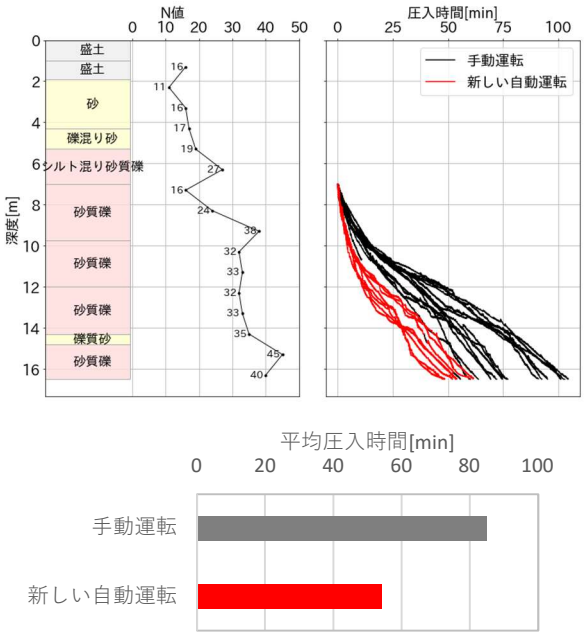



図-7　自動運転方法による圧入時間の違い
（回転切削圧入）

よっては，時間短縮効果が得られないケースや，限定的ではあるが圧入時間が増えるケースも確認されている。新しい自動運転の特徴を踏まえて現時点の適用範囲を見極めながら運用を進めつつ，自動運転プログラムの改良の努力を継続して信頼性のさらなる向上や適用範囲の拡大に取り組むことが，今後の課題である。

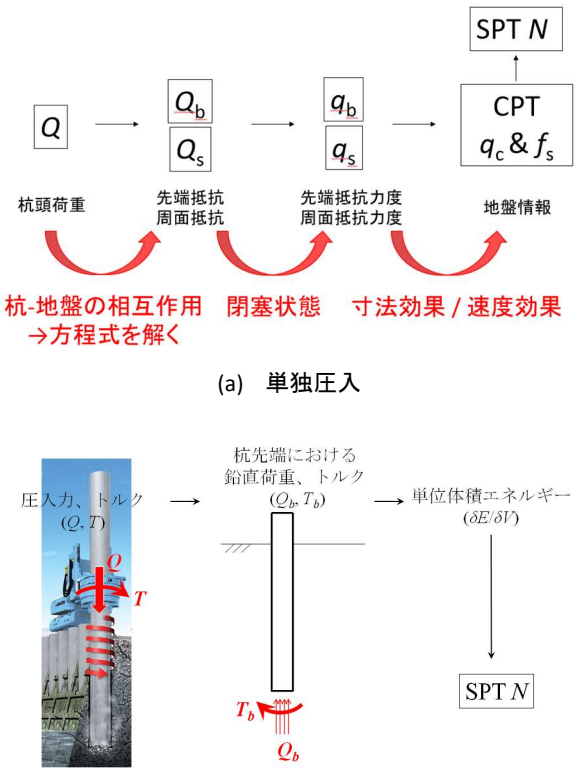
### 3.2　地盤情報推定技術

#### 3.2.1　地盤情報の推定方法

圧入工法では，施工データを全数取得することが可能である。施工データを利用することにより，施工管理や，施工時に想定外の地盤条件に遭遇した際の工法変更の判断を，より合理的・客観的に行うことが可能となると考えられる。筆者らは，圧入施工データの利用方法の一つとして地盤情報推定技術の開発を進めており，単独圧入（通常の圧入），オーガー併用圧入，回転切削圧入の場合の施工データを用いて地盤情報を推定する方法を構築している。これまでの知見は，国際圧入学会（International Press-in Association, IPA）の技術委員会による評価を受け，技術資料[6]としてとりまとめられている。

通常の圧入（単独圧入）では，杭／矢板は補助工法（ウォータージェットやオーガ）なしで静荷重により地盤に押し込まれる。すなわち，杭／矢板の貫入過程は，地盤調査方法の一つである CPT のコーンの貫入過程と似ている。この類似性に着目し，寸法や貫入速度の違いを考慮することにより，圧入中の杭の先端抵抗（$Q_b$）と周面抵抗（$Q_s$）を CPT のコーン指数（$q_c$）と周面摩擦（$f_s$）の情報に読み替えることが可能である[7]。しかし，施工時に全ての杭に計測装置を取り付けて先端抵抗を計測するのは費用と手間がかかり，非現実的である。そこで，圧入施工時の「打抜」（圧入・引抜きの繰返し）と呼ばれる動作を活用することで，杭／矢板に計測装置を取り付けることなく先端抵抗を推定する方法を開発した[8]。この方法では，ある深度を杭／矢板の先端が 1 回目に通過する際の杭頭荷重と 2 回目に通過する際の杭頭荷重との差として，杭／矢板の先端抵抗を得る。単独圧入の施工データから N 値を推定する流れをまとめると，図-8(a)のようになる。

オーガー併用圧入については，岩盤掘削の分野の知見を参考に，圧入施工データから SPT の N 値を推定する 2 つの方法を構築した[9]。1 つ目の方法では，パラメータ $T_b/(d_c)^\gamma$（$T_b$ はオーガーヘッドに作用するトルク，$d_c$ は切り込み深さ，$\gamma$ は係数）と岩盤の一軸圧縮強度との間の線形関係[10)11)12)]を活用する。2 つ目の方法では，MWD（Measurement While Drilling）と呼ばれる地盤調査方法で用いられている推定方法[13)]を活用する。いずれの方法においても，推定式に含まれている係数の値を，オーガー併用圧入の施工データと SPT の N 値とのデータセットを用いて逆解析して得た値に置き換える。




(a)　単独圧入

(b)　回転切削圧入

図-8　圧入施工データから地盤情報を推定する流れ

回転切削圧入では，杭先端直下の地盤を体積 $\delta V$ だけ変形させるのに要するエネルギー$\delta E$ と SPT の N 値との間に線形的な相関があると仮定することにより，施工データから SPT の N 値を推定する[14)]。この仮定は，岩盤掘削における単位体積エネルギー（$=\delta E/\delta V$）と岩盤の一軸圧縮強度との間の線形的な相関性に関する知見[15)16)]に基づいている。単位体積エネルギーの算出には，杭頭に付与される荷重（$Q$）とトルク（$T$）ではなく杭先端に作用する荷重（$Q_b$）とトルク（$T_b$）の情報が必要となる。$Q_b$ と $T_b$ を先端抵抗力度 $q_b$ によって表し，かつ，杭の外周面に作用する摩擦力が貫入速度と回転速度との比によって鉛直方向と水平方向に分配される[17)]ことを考慮すると，$Q$ と $T$ から $Q_b$ と $T_b$ を推定することができる。回転切削圧入の施工データから N 値を推定する流れをまとめると，図-8(b)のようになる。

#### 3.2.2　推定方法の改良

**①オーガー併用圧入**

前節で述べたように，オーガー併用圧入の場合，推定式に含まれている各係数の値は，施工データと SPT 結果のデータセットから逆解析して得られたものである。この場合の施工データは，「外径

450mm・羽根数 3」のオーガーヘッドを用いた施工データに限定されていた。結果として，IPA 技術資料 [6]では，オーガーヘッドの規格が「外径 450mm・羽根数 3」に限定されている。

地盤推定技術の実用性を高めるためには，この制約を緩めて様々な規格のオーガーヘッドに対応する必要がある。そこで，任意の規格のオーガーヘッドに作用するトルクを図-9 に示すようなモデルで計算し，「外径 450mm・羽根数 3」のオーガーヘッドに作用するトルクに換算することにより，前節で述べた推定式をそのまま適用することを考えた [18]。

図-10 は，7 種類のオーガーヘッドを用いた施工データから推定した N 値と SPT で得られた N 値を示したものである。トルクの補正をしない場合（図-10(a)），推定 N 値は大きくばらつき，大きな外径のオーガーヘッドを用いた場合の推定値が課題となる傾向が確認できる。他方，トルクを補正した場合（図-10(b)）には，推定値のばらつきが抑えられていることが分かる。

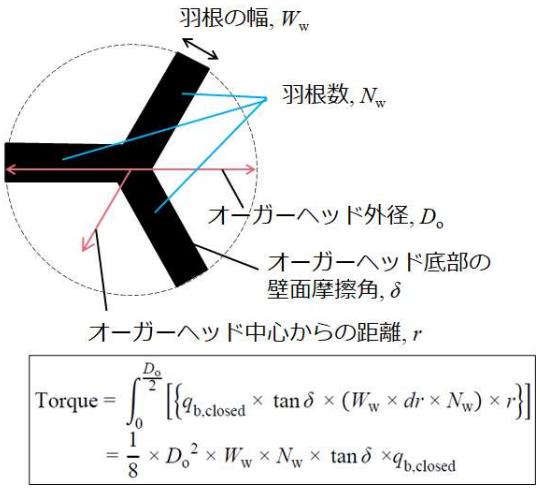
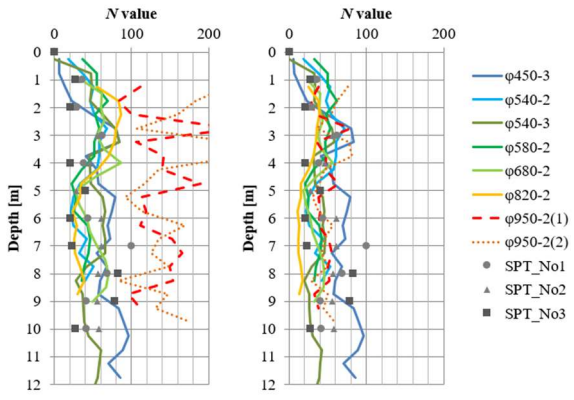



図-9　オーガーヘッドに作用するトルクの計算モデル




(a) 補正なし　(b) 補正あり

図-10　トルクの補正の有無による推定結果の違い

**②回転切削圧入**

回転切削圧入の場合，推定 N 値は施工時の閉塞状態の影響を強く受けることが指摘されている [6]。前節で紹介した通り，回転切削圧入の場合には，単位体積エネルギー（$\delta E/\delta V$）を介して SPT の N 値を推定する。$\delta V$ は，鋼管の閉塞状態を加味した有効断面積 $A_{b,eff}$（次式）に貫入深度増分 $dz$ を乗じて求める。

$$A_{b,eff} = \frac{\pi D_o^2}{4} - IFR \times \frac{\pi D_i^2}{4} \quad (1)$$

ここで，$D_o$ および $D_i$ は杭の外径および内径，$IFR$ は閉塞状態を表す指標で管内土長増分と貫入長増分の比，である。$IFR$ の把握には管内土長の連続計測が必要となるが，施工時に連続計測が難しい場合には，$IFR$ のかわりに $PLR$（施工完了時の管内土長と貫入長の比）を用いることが考えられる。しかしながら，閉塞状態は深度とともに変化するのが一般的であり，例えば図-11 に示すように深度 10m 以深で完全閉塞状態となるような場合，$PLR$ を用いるとこの深度区間で推定結果が過大となる（図-12）。他方，$IFR$ を用いると 10m 以深の過大評価傾向は解消されるが，他の深度では深度方向に大きく増減を示すような推定結果となる。この主要因として，式(1)が閉塞状態（$IFR$）に対して過剰に敏感であることが考えられる。

閉塞状態を $IFR$ により評価する支持力推定法として，UWA-05 法が知られている。この方法におけ

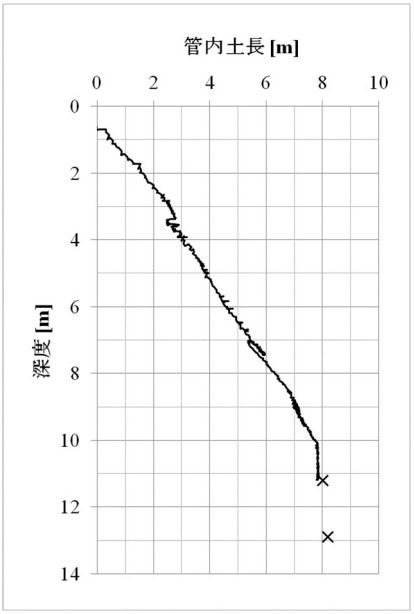



図-11　閉塞状態が急激に変化する事例

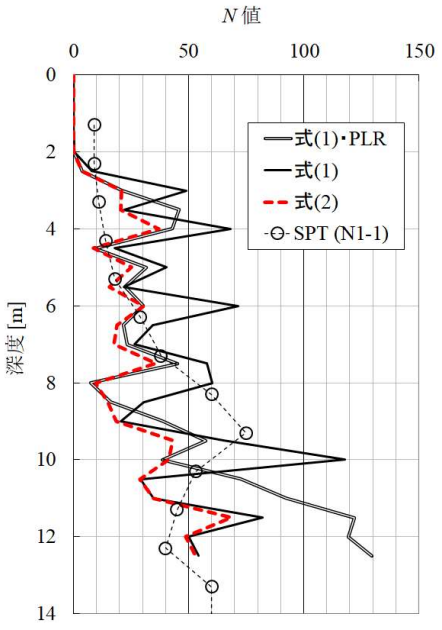



**図-12　推定結果に対する $A_{b,eff}$ の影響**

る先端支持力推定式を参考にして，$A_{b,eff}$ を

$$A_{b,eff}=\frac{\frac{\pi D_o^{\,2}}{4}\left[0.15+0.75\left(1-IFR\frac{D_i^{\,2}}{D_o^{\,2}}\right)\right]}{0.9} \qquad (2)$$

と表現すると，図-12 で確認できるように，推定 N 値の深度方向の過剰な増減傾向はある程度解消される。

## 4．まとめ

圧入施工データを利用した圧入機の自動運転と地盤情報の推定技術について，実施事例や最近の改良の取り組みを含めて報告した。今後は，現時点の技術レベルでの適用範囲を見極めながら現場での運用を進めつつ，適用範囲を拡大するための技術研鑽を継続する。また，他の計測技術やデータ加工技術などを活用して当技術の信頼性・応用性をさらに高める所存である。

## 参考文献


1) i-Construction委員会：i-Construction～建設現場の産業性革命～，2016
2) 国土交通省：国土交通省告示第四百六十八号, 2016
3) Ishihara, Y.・Ogawa, N.・Kinoshita, S.・Kitamura, A.・ Tagaya, K.：Study on development of the pile penetration test system based on press-in construction data. Society for Social Management Systems, CD-ROM. 2008
4) 国土交通省：NETIS・公共工事における新技術活用システム，2014
5) Ishihara, Y : Use of press-in piling data for automatic operation of press-in machines and estimation of subsurface information. Proceedings of the First International Conference on Press-in Engineering 2018, Kochi，pp. 651-660，2018
6) 国際圧入学会（IPA）：圧入工法における施工データの利用に関する技術資料 I. 地盤情報の推定，63p，2017
7) 石原行博，尾川七瀬，木下三郎，多賀谷宏三. 2009. PPTデータに基づく土質分類および換算N値に関する研究. 最近のサウンディング技術と地盤評価シンポジウム発表論文集, pp. 85-90.
8) Ogawa, N.・Nishigawa, M.・Ishihara, Y.：Estimation of soil type and N-value from data in press-in piling construction. Testing and Design Methods for Deep Foundations，IS-Kanazawa 2012，pp. 597-604，2012
9) Ishihara, Y.・Ogawa, N.・Lei, M.・Okada, K.・Nishigawa, M.・Kitamura, A.：Estimation of N value and soil type from PPT data in standard press-in and press-in with augering, Press-in Engineering 2013: Proceedings of 4th IPA International Workshop in Singapore，pp. 116-129，2013
10) Nishimatsu, Y.：The mechanics of rock cutting，International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, Vol. 9, Issue 2，pp. 261-270，1972
11) 福井勝則・大久保誠介・本間直樹. : TBMの掘削抵抗を利用した岩盤強度の推定－二軒小屋トンネルの事例－，資源と素材，Vol. 112，pp. 303-308，1996
12) 藤本明生・竹之内康昭・小倉靖之・小林暁・配野均：道路トンネル分岐合流部の合理的な構築工法の開発，トンネル工学報告集，第15巻，pp. 323-330，2005
13) 地盤工学会：その他のサウンディング，地盤調査の方法と解説，pp. 329-337，2004
14) Ishihara, Y.・Haigh, S.・Bolton, M. D.：Estimating base resistance and N value in rotary press-in，Soils and Foundations，Vol. 55，No. 4，pp. 788-797，2015
15) Hughes, H. M.: Some aspects of rock machining, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences，Vol. 9，pp. 205-211，1972
16) Li, Z.・Itakura, K.：An analytical drilling model of drag bits for evaluation of rock strength，Soils and Foundations，Vol. 52(2)，pp. 206-227，2012
17) Bond, T.：Rotary jacking of tubular piles，M.Eng. Project Report，Cambridge University Department of Engineering, 50p，2011
18) Okada, K.,・Ogawa, N.・Ishihara, Y.: Case study on estimation of ground information with the use of construction data in press-in method. Proceedings of the First International Conference on Press-in Engineering 2018, Kochi: 371-378, 2018

# 15. ICT 活用による除雪トラック作業装置自動化の取り組みについて

国土交通省北陸地方整備局北陸技術事務所施工調査・技術活用課　○ 武石　清一
同　前原　正之

## 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 1,073km の冬期道路交通を確保するため，約 500 台の除雪機械を配置し，除雪作業を実施している。

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，経験と熟練した技術を必要とするが，昨今は，熟練技能を持つオペレータの高齢化に伴う引退や，新規入場者の減少により，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，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）を活用した除雪機械の情報化施工技術の検討に取り組んでいる。

本稿では，除雪トラック作業装置自動化の検討における 2020 年度までの取り組みについて報告するものである。

## ２．除雪トラック作業装置自動化の検討

### 2.1　作業装置自動化の検討方針

除雪トラックによる新雪除雪は，路面に降り積もった雪を路側にかき寄せるもので，作業装置としては，新雪などを除雪する「フロントプラウ」，圧雪などの路面を整正する「グレーダ装置」，交差点や沿道施設の出入り口といった雪を置いてはいけない区間において，一時的に雪を抱え込む「サイドシャッタ」で構成されている。（図-1）

除雪トラックのオペレータは，車両本体の運転と同時に 8 本のレバー，20 個のスイッチにより作業装置の操作を行わなければならず熟練した技能が求められる。（写真-1）

このため，除雪トラックの作業装置（フロントプラウ，グレーダ装置，サイドシャッタ）の操作（動作）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，作業の安全性が向上し，また，オペレータの負担軽減が図られることにより，担い手の確保に寄与するものと考えている。

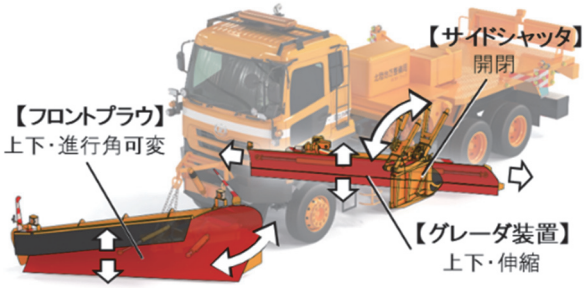



図-1　除雪トラック作業装置

写真-1　除雪トラック作業装置操作パネル

表-1　自動化開発計画

| 作業装置名 | 動作内容 | 実施／開発計画 | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 2019年 | 2020年 | 2021年以降 |
| フロントプラウ | 進行角可変 | | ○ | ○ |
| | 上　下 | | | ○ |
| グレーダ装置 | 左右伸縮 | | ○ | ○ |
| | 上　下 | | | ○ |
| サイドシャッタ | 開　閉 | ○ | ○ | ○ |

### 2.2　制御方法

作業装置を自動化するための制御方法は，モービル・マッピング・システム（以下「MMS」という）で取得した 3 次元点群データから，自動化に

必要となる地物等の情報を抽出したベクタデータを生成し，これにオペレータの操作位置情報（実操作での操作記録）を反映させた①除雪作業用地図データを作成し，②GNSS 受信機（準天頂衛星システムみちびき対応型）を組み合わせることにより，作業装置の動作を自動化することとした。（図-2）

自動化に用いる機器としては，①作業用地図データをインストールした「自動操作制御装置」，②GNSS 受信機（準天頂衛星システムみちびき対応型），③各作業装置へ動作信号を出力する「除雪トラック制御装置」で構成し，自車位置と地図上の動作位置情報が一致した際に動作信号を出力する。

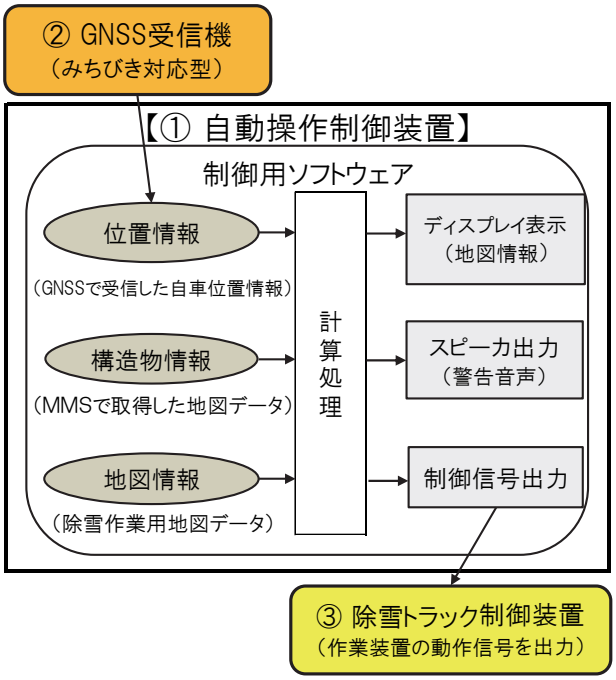



図-2　制御ユニット概念図

また，今回の試作機では自動操作制御装置の表示機能として，衛星信号の受信状態，作業装置自動制御のオン・オフ，作業装置の状態と縁石等の地物情報と作業装置の動作位置を線画で模式化して表示し，作業装置の状態をオペレータが認識できるようにしたほか，作業装置の動作位置接近に合わせ，ブザー音で動作を予告する機能を搭載した。（写真-2）なお、作業装置の状態表示としては，フロントプラウの進行角の角度，グレーダ装置の伸縮量とした。

写真-2　自動操作制御装置

## 2.3　除雪作業用地図データの作成

前述の除雪作業用地図データに反映させる作業装置の操作情報は，フロントプラウの進行角変更，グレーダ装置の伸縮，サイドシャッタ開閉のそれぞれについて登録を行った。（図-3）

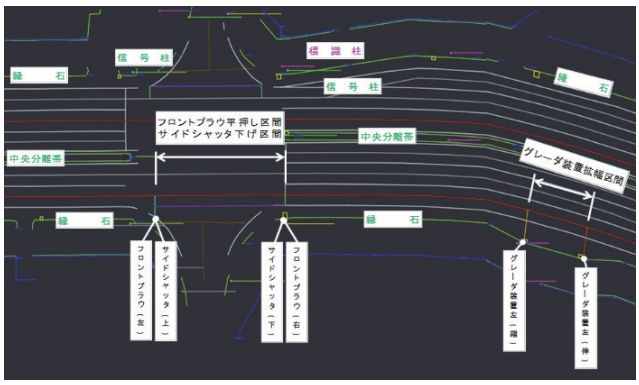



図-3　除雪作業用地図データの例

## 3．サイドシャッタの自動化検討

2019 年度に着手したサイドシャッタの自動化は，降雪期前に現道上の駐車帯を利用して試験調整を行った。

試験の当初，除雪トラックの走行速度の変化や，動作信号発信後に作業装置が動作し始めるまでのタイムラグにより，あらかじめ設定した動作位置からずれる不具合が生じた。この不具合への対応として，走行速度の変化に追従させるための演算方法や，作業装置が動作を開始するまでの時間を

写真-3　サイドシャッタの動作

見込んだプログラムへの改良を行った。

その結果，不具合は改善され，改良後の試験に参加した除雪トラックのオペレータから，実操作と違和感が無い位置で開閉しているとの評価を得た。

2020 年 2 月 7 日の降雪時には，一般国道 49 号において，サイドシャッタの自動制御を使用した除雪作業を実施し，現道試験においても，実際の除雪作業で使用できる技術レベルであることを確認した。

## 4．フロントプラウ、グレーダ装置自動化検討

### 4.1　制御方法の検討

サイドシャッタに続き、2020 年度においてはフロントプラウの進行角を変化させる動作及びグレーダ装置を伸縮させる動作の自動制御に着手した。

フロントプラウ及びグレーダ装置の自動化に向けては，それぞれの作業装置について操作している場所や操作の目的を，ドライブレコーダーやデータロガーにより作業実態を記録し整理した。

フロントプラウの操作は，交差点，バス駐車帯，沿道施設への出入り口など，雪を残せない箇所でフロントプラウの向きをまっすぐにして，雪を前送りにする場合に行われている。

グレーダ装置では，車線数の増減や導流部（ゼブラゾーン），バス停車帯など，道路の幅が変化する箇所で操作が多く行われていた。

これらの操作実態から，フロントプラウについては，雪を残せない箇所において，雪を前送りする一連の動作の自動化を，また，グレーダ装置については，部分的に道路幅が広くなる箇所において，一時的にグレーダ装置を外側に張り出し，通過後には縮小させる一連の動作の自動化をそれぞれ取り組むこととした。（図-4）

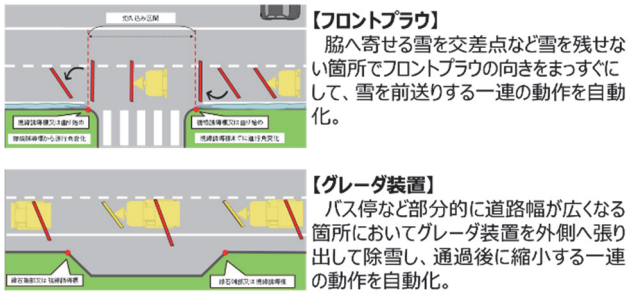



図-4　作業装置の動作イメージ

### 4.2　除雪トラック試験機の改良

フロントプラウ及びグレーダ装置の自動化を図るためには，それぞれの作業装置の状態を把握する必要があるため，作業装置を動作させる油圧シリンダの伸縮量を計測できるよう，ストロークセンサー付き油圧シリンダに改良を行った。これにより，フロントプラウでは，車両本体の進行方向に対しての角度，また，グレーダ装置については，左右それぞれのブレードの伸縮量を把握できるようにした。なお，フロントプラウの進行角は，35°，25°，15°，0°（水平），-15° の 5 段階で設定，また，グレーダ装置は左右とも最大 570mm の伸縮を把握できるものとした。（図-5）

図-5　除雪トラック試験機改良箇所

### 4.3　自動操作制御装置の改良

前年度までに試作した自動操作制御装置について，フロントプラウ及びグレーダ装置を自動化するための改良を行った。

基本的な制御方法はサイドシャッタの自動化と同様に，作業用地図データ上に設定した動作地点を目標として，作業装置に所定の動作を行わせるものとしている。また，除雪トラックの運転室に設置している自動操作制御装置のモニター表示についても改良を加え，フロントプラウ及びグレーダ装置の状態と動作状況をオペレータに知らせる内容を追加した。

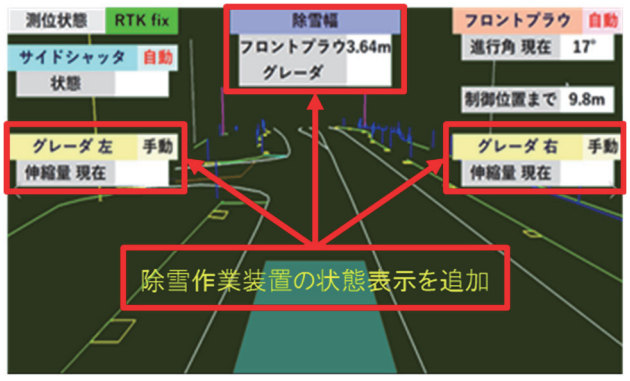



図-6　自動操作制御装置の表示画面例

### 4.4　構内での動作試験

改良した除雪トラック試験機及び自動操作制御装置が所定の動作となるかどうかを検証するため，降雪期前に除雪ステーション構内（新潟県南魚沼市塩沢地内）で動作試験を実施した。試験は，フロントプラウ及びグレーダ装置について，あらかじめ設定した角度や伸縮量となる動作が完了する位

置を基準として，自動操作制御装置で動作させた時に，その基準位置とのずれを計測する方法とした。作業（走行）速度を25km/h，15km/hの2パターン設定し，それぞれの動作状況を確認した。

除雪ステーション構内での試験結果は，それぞれ0.1m程度のずれが生じたが，概ね設定どおりに動作することを確認した。

### 4.5　現道上での動作試験

除雪ステーションでの構内試験に続き，降雪期における現道上での動作試験を実施した。現道上での試験は，一般国道17号及び一般国道49号に試験区間を設定し，動作確認を実施した。（写真-4）

写真-4　国道 17 号での現道試験の実施状況

動作試験の方法は，道路上にある目標物（交差点手前の停止線やデリニェータポールなど）と一致する位置までに，作業装置が所定の動作を完了させるよう設定し，その動作状況をドライブレコーダーに記録した画像から，設定どおりに動作しているかどうかを検証した。

目標とした動作完了位置に対し，概ね良好に動作することを確認できたが，積雪が無い時期に行った除雪ステーションでの構内試験では見られなかった目標地点とのずれが発生した。目標地点とのずれが生じた原因は，除雪トラックの走行（作業）速度の変化，作業装置の動力である油圧出力の変化によるものと推定された。油圧の変化はエンジン回転数の変化に起因するもので，これらは除雪トラック特有の機構であり，作業装置の動作特性に応じた制御プログラムの改良を検討することとしている。

また，国道17号の試験区間において，GNSS受信機から現在位置とは大きくかけ離れた座標値が出力されるという異常が発生した。この異常値の出力は受信機固有の特性もあり，完全に無くすことはできないため，自動操作制御装置に座標の異常値を排除するフィルタリングプログラムを追加した。その後，誤動作は発現せず，設定どおりに作業装置が動作することを確認した。

## ５．除雪作業における課題への対応状況

フロントプラウ及びグレーダ装置についても，熟練オペレータが行っている作業装置の操作情報をGNSSにより取得した自車位置情報に基づき，道路上で再現できることが確認された。

現状，車両本体の運転操作と複数のレバー及びスイッチを同時に操作しながら行っている除雪作業に対して，作業装置の動作を自動化することで，オペレータは車両本体の運転操作に専念することができるため，安全性の向上につながり，除雪作業の新規入場者であっても一定レベルの安全作業が可能になると考えている。

## ６．今後の計画

2020年度までに，フロントプラウの進行角可変動作，グレーダ装置の伸縮動作，サイドシャッタの開閉動作の自動化に取り組んできた。2021年度においては，フロントプラウ及びグレーダ装置の，路面の構造物（橋梁ジョイント，マンホール等）への接触を回避する上下動作や，トンネル，同門，消融雪区間等，除雪の必要が無い区間で行われている，上下（一時格納）動作にについて自動化の検討を行う予定としている。（図-7）

また，上空遮蔽区間等のGNSS不感帯における，自車位置測位を補完する技術について検討を行い，作業装置自動化の取り組みを進めていく計画である。

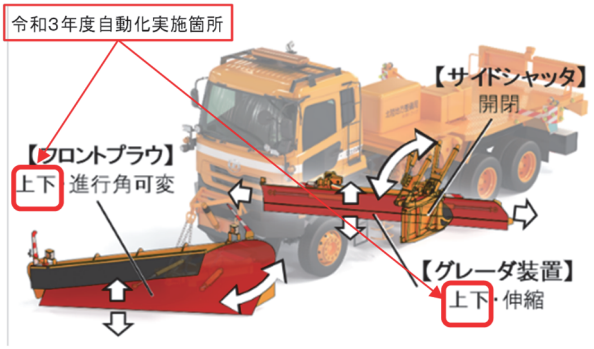



図-7　2021 年度自動化検討箇所

# ６．自動式墨出しシステムによる墨出し精度および実用有効性の検証

西尾レントオール株式会社　　○ 野瀬　健一
日立チャネルソリューションズ株式会社　　堀　　盛豊

## １．はじめに

建築設備工事において，配管やダクト，生産設備などの墨出し作業は，熟練技術者が補助作業員とともにレーザー墨出し器などの測量機を用いて位置を確認しながらの手作業となり，膨大な手間と時間を要す上，墨出し作業でのミスは，据付工事での手戻りにもつながるという課題がある。ITシステムを活用した墨出し作業を自動化するシステムにより，従来よりも効率が上がり熟練技術者と変わらない高精度な作業が実現できれば，この課題解決に有効と考え，今般弊社は日立チャネルソリューションズ株式会社が開発した自動式墨出しシステム（以下，本システム）を導入した。

本システムは，自動追尾型測量機（以下，測量機）との通信により，墨出し位置に移動・到達した後，ロボットに内蔵されたインクジェットプリンターで直線や文字情報を自動で描くことができるシステムである。建設工程の中で付随作業となる墨出しの効率化により本作業の時間を増やし工程全体の生産性向上に貢献するシステムであると期待している。本稿では，現場での実用有効性を確認するために実施した検証結果について報告する。

## ２．本システムについて

### 2.1　システムの構成

本システムの構成は，写真-1 に示す，「墨出しロボット」，「測量機」，「コントロールアプリ（タブレット）」に加え，「墨出しデータ作成アプリ」の 4 つで構成されている。ロボットへ指示する図面情報は，CAD データを活用し，効率良く作成できる。表-1 に墨出しロボットの主な仕様を示す。ロボットは，図面に基づき，測量機と連携して自分の位置を認識し，高精度な位置決めを行う。最大約 5 時間の自動運転が可能でありバッテリも交換可能なため長時間となる作業でも運用可能である。また，障害物を検知する機能により，動かない障害物であると判断した場合は，回避ルートを探索して作業を継続するため，ロボットのみでの自動走行も可能となり，ロボットが墨出し中の時間を他の作業に有効活用できる。 空調や電気など，各設備の墨出しが同時に行えることも特徴であり，墨出し工程の作業効率向上に貢献する。

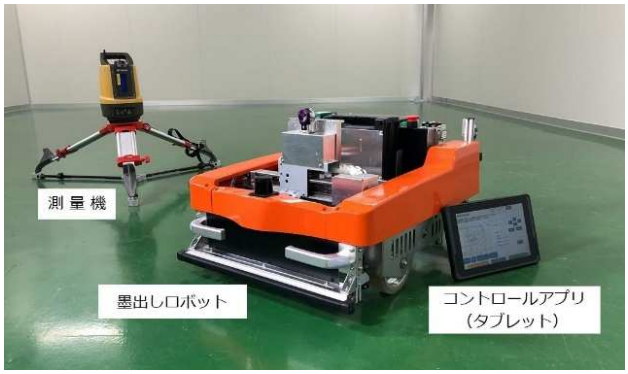



写真-1　自動式墨出しシステム構成

表-1　墨出しロボットの主な仕様

| No. | 項目 | 仕様 |
|---|---|---|
| 1 | 外形寸法 | W553×L720×H413　mm |
| 2 | 質量 | 約 25Kg（バッテリ除く） |
| 3 | 走行速度 | 360mm/s |
| 4 | 乗越え段差 | 最大 20mm(段差状態による) |
| 5 | 墨出し範囲 | 測量機から 50m の範囲 |
| 6 | 連続稼動時間 | 約 5 時間（バッテリ） |
| 7 | 印字サイズ | φ120mm |
| 8 | 印字位置精度 | ±0.6mm（測量機精度含まず） |
| 9 | 安全機能 | ・前方障害物検知センサ<br>・衝突検知用バンパセンサ<br>・落下防止センサ<br>・非常停止スイッチ |

### 2.2　運用手順

本システムの運用手順については，図-1 に示すとおり，以下の手順で行われる。

①墨出しデータの準備：墨出しデータ作成アプリで CAD データを読み込み，ロボットへの指示データを作成し，コントロールアプリに登録する 。

②測量機の準備：通り芯が広く取れる場所に測量機を設置し電源を入れる。測量機とプリズムを使い，コントロールアプリの指示に従いながら，墨出し作業の基準となる通り芯を計測し登録する。
③墨出し作業の開始：墨出しボタンを押すと，測量機がロボットに搭載された 360°回転型のプリズムを自動的にサーチし，捕捉が完了すると測量機の自動追尾が開始され，ロボットが動き出し自動墨出しが開始される。
④墨出し結果の確認：コントロールアプリの機能によって，測量機連動の確認計測を実施する。

図-1　運用手順

## 2.3　システムの特徴

以上に説明した構成，運用手順により本システムは以下の特徴を持つ。
① ヒューマンエラーのない高精度墨出し
測量機の操作はタブレットのコントロールアプリで行うため，作業者が測量機の専門知識が無くとも設定でき，データに基づき全墨出しポイントに対して測量機と連動した自動作業により，計測ミスや操作ミスによる墨出しの失敗がなくなる。
② 省力化を実現する連続自動運転
タブレットのコントロールアプリによる稼動（禁止）エリア設定と，ロボット自身の踏破性能（段差走行），障害物回避機能が連続自動運転性を高めている。また，万が一，自動墨出し中に測量機と墨出しロボット間の自動追尾が途切れた場合でも，ロボットが自動的にプリズムをサーチし自動追尾を復帰させ，人に頼らずに墨出し作業を自動的に再開する機能を備えている。
③ 導入を容易化するスキルフリーな運用
タブレットのコントロールアプリのナビゲーションにより，直感的に操作可能なため，現地作業は比較的容易に運用開始できる。CAD データからロボットへの指示データを作成する作業は，詳細な手順があるが，半日程度のレクチャーにより運用可能である。
また，墨出しロボットの重量はバッテリ搭載時約 30kg であるが，本体下部にキャスターが取り付けられているため，一人で現場内の移動をすることが可能である。

## 3．精度検証

本システムを実際の現場で活用するためには，ロボットの墨出しした結果の位置精度を確認する必要があるため，テストフィールドにおける実験により検証を行なった。

### 3.1　テストフィールド実験内容

実際の現場での運用を想定し測量機と墨出しロボットとの距離を 3 段階で確認するために，Y 軸基準芯上の 10m，30m，50m ポイントからそれぞれ X 軸方向に 200mm，400mm，600mm の合計 9 点の墨出しポイントを設定したデータ（図-2）を準備し，テストフィールドを設定して実施した。
また，ロボットが移動する際に誤差が蓄積される可能性を考慮し，移動距離が長くなるように墨出しの順番を設定した（図-2 の①～⑨の順）。
なお，検証はロボットが墨出ししたポイントを基準芯からの距離をスケールで計測する方法により比較した（写真-2）。

### 3.2　テストフィールド実験結果

実験結果は，測量機と墨出しロボットとの距離 50m の場合においても 2mm 以内に収まった。なお，測量機単体での精度は測距精度±3mm，測角精度 5”となっている。本システムの精度について，測量機の精度と同様の精度が得られることが確認できた。

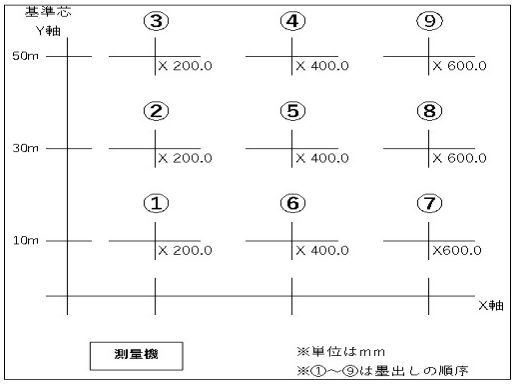


図-2　実験用墨出しデータ

表-2　テストフィールド実験結果

| Y 軸 | 墨出し順 | 設定値 | 結果 | 較差 |
|---|---|---|---|---|
| 10m | ① | 200mm | 198mm | 2mm |
| | ⑥ | 400mm | 398mm | 2mm |
| | ⑦ | 600mm | 598mm | 2mm |
| 30m | ② | 200mm | 198mm | 2mm |
| | ⑤ | 400mm | 398mm | 2mm |
| | ⑧ | 600mm | 599mm | 1mm |
| 50m | ③ | 200mm | 198mm | 2mm |
| | ④ | 400mm | 398mm | 2mm |
| | ⑨ | 600mm | 599mm | 1mm |

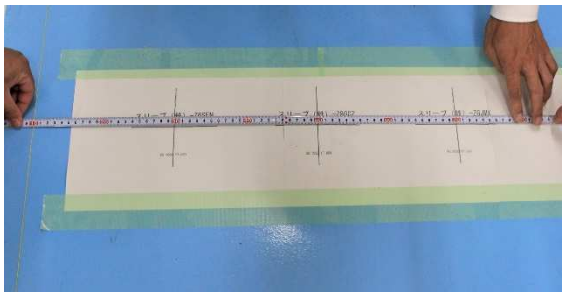


写真-2　テストフィールド実験風景

## 4．連続自動運転に必要な機能の検証

本システムには，現場において無人の自動墨出し作業を想定し，障害物や小さい段差があっても作業が継続できるよう，障害物を回避する機能と，段差を乗り越える機能が備わっている。現場での実用有効性を判断する要素として，これら機能の性能を検証した。

### 4.1　障害物回避

墨出しを行なうエリア内に，柱などの予め分かっている障害物がある場合，墨出しデータ作成時に禁止エリアとして設定しておくと，障害物をスムーズに避けて墨出しを行なうことができる。しかし，実際の建築現場では資機材の残置など想定外の障害物がある場合がある。連続自動運転性のためには，そうした障害物を回避できる必要性がある。ここでは，3 種類の大きさの段ボールを障害物と仮定し,障害物回避機能の検証を実施した。結果は，どのサイズにおいても障害物回避機能が有効に動作した（表-3）（写真-3）。

表-3　障害物回避実験結果

| | 障害物 A | 障害物 B | 障害物 C |
|---|---|---|---|
| 1 回目 | ○ | ○ | ○ |
| 2 回目 | ○ | ○ | ○ |
| 3 回目 | ○ | ○ | ○ |

＜障害物のサイズ＞

A：W240×D140×H165mm

B：W390×D250×H270mm

C：W660×D550×H370mm

写真-3　障害物回避実験風景

### 4.2　段差乗越え

建築現場を想定し，墨出しを行なう範囲内にキャブタイヤケーブルが残置されていたと仮定し段差乗越え性能の検証を実施した。実際の現場を想定しロボットの進行方向に対し 90°で横切るように外径の異なる電線を置き，ロボットの乗越え可否の確認，および乗越え直後にロボットが墨出ししたポイントを測量機により検測した。

結果は φ20mm の電線までは乗越えが可能であり，乗越えた後でも計測精度に影響が出ないことを確認できた（表-4）（写真-4）。さらに，ロボットによる墨出し精度の再現性を確認するため，墨出しした印刷面を消去せずに，3 回続けて φ20mm 電線の段差乗越え検証を行なう実験を追加で実施した。写真-5 に示すように，3 回の印字は，ほぼ完全に重なっており誤差は 1mm 未満であった。表-4 の検証結果の較差は，測量機による計測の誤差を含んでいることが考えられる。

表-4　段差乗り越え実験結果

| 障害物 | 計測回数 | 乗越 | 本システム | | 較差 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | x | y | x | y |
| 電線 A φ15mm | 1 回 | ○ | 0.431 | 0.419 | 1mm | 0mm |
| | 2 回 | ○ | 0.429 | 0.420 | 1mm | 1mm |
| | 3 回 | ○ | 0.429 | 0.420 | 1mm | 1mm |
| 電線 B φ20mm | 1 回 | ○ | 0.430 | 0.419 | 0mm | 0mm |
| | 2 回 | ○ | 0.428 | 0.419 | 2mm | 0mm |
| | 3 回 | ○ | 0.428 | 0.428 | 2mm | 1mm |
| 電線 C φ25mm | 1 回 | × | 0.429 | 0.419 | 1mm | 0mm |
| | 2 回 | × | 0.429 | 0.419 | 1mm | 0mm |
| | 3 回 | × | 0.429 | 0.419 | 1mm | 0mm |

比較値は x=0.430，y=0.419 とする。

＜使用した電線＞

電線 A：CVV-S　2sqx6c（外径約 14.5mm）

電線 B：VCT　14sqx2c（外径約 20mm）

電線 C：VCT　22sqx2c（外径約 25.8mm）

写真-4　段差乗り越え実験風景（電線 B）

写真-5　3回連続墨出し後の印字面

### 4.3　安全センサ

本システムは，安全機能として4.1に述べた非接触の障害物検知センサの他に，表－1 No.9に示したものを備えている。表-5に機能検証した結果を示す。ロボット単体での各安全機能が正しく働き，安心して連続運転を行えることを確認した。

表-5　安全センサの検証結果

| 安全センサ | 目的 | 検証方法 | 検証結果 |
|---|---|---|---|
| 衝突検知用バンパセンサ | 万が一の，人と接触時に素早く停止させる | バンパ接触して停止する様子を動画撮影し，停止するまでの時間を測定 | ○<br>0.2s 程度で動作停止 |
| 落下防止センサ | 床面開口部から誤って落下することを防ぐ | 深さ 50mm の窪み部に向かって走行させ，停止時の窪みまでの距離を測定 | ○<br>窪み～タイヤ部 100mm 手前で停止 |
| 非常停止スイッチ | 異常時に監視員によって動作を停止させる | スイッチ押下して停止する様子を動画撮影し，停止するまでの時間を測定 | ○<br>0.1s 程度で動作停止 |

## ５．現場試験運用における検証

これまでの検証により墨出し精度および機能の性能確認ができたことから，次に実際の設備工事において試験運用を行ない，本システムによる墨出し作業の実用有効性を確認した。

### 5.1　現場試験運用における精度検証

実際の現場での試験運用として，建築設備工事において，機器設置位置の墨出し作業を実施した。現場での運用における実用上有効である精度として，従来の手法により墨出しした場合と，ロボットが墨出しした場合との差を比較し，検証することとした。

その比較を行なうために，事前に従来の手法で墨出しした後で，ロボットによる墨出しを実施した。例として3か所の結果を写真-6に示す。黒い文字と線はロボットが描いたものであり，青い文字は事前に従来の手法にて墨出ししたものである。2色の線がきれいに重なっており，誤差はいずれも1㎜未満であり，本システムの実用有効性が確認できた。また，従来2人作業で実施する作業が1人の作業で実施できたことについて，省人化に貢献するとして評価を得られた。

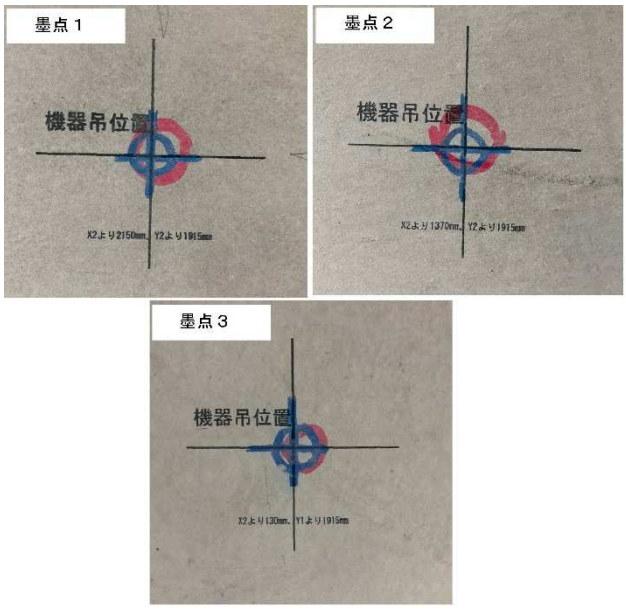



写真-6　現場試験運用の墨出し結果

## ６．おわりに

本システムは，十分な墨出し精度を確保できるだけでなく，連続自動運転を実現するための障害物回避機能やさまざまな安全機能も備わっており，現場での運用に対して，実用有効性があることが実証できた。

本システムの現場への展開が進んでいくことは，運用の習熟度向上とともに，省人化の効果，生産性向上効果の拡大に繋がると考える。レンタル会社として展開の加速へ繋がるようなサポートを行ない，業界への貢献を目指したい。

# ７．台形 CSG ダムにおける保護コンクリート構築の合理化施工システム

鹿島建設（株）　　○ 丹　秀男

## １．はじめに

台形 CSG ダムの施工では，CSG の高速打設技術は確立されており，追随して打設する上下流面の保護コンクリートの型枠設置作業が堤体の打設速度に対するクリティカルとなっている。型枠の吊り上げや設置には堤体打設面にクレーン等の揚重機械の設置を必要とし，CSG 打設作業と干渉するため施工速度の低下や安全面の課題であった。また，目地・止水板設置は，狭隘空間における作業となるため手間がかかることに加えてコンクリートの締固め不足による品質低下の懸念もあった。

これらの課題を解決するため，型枠および目地・止水板の設置を自動化・合理化する「保護コンクリート構築の合理化施工システム」を開発・実用化した。本システムは，置き型枠自動スライドリフタ，止水板台車，おもり台車の 3 種類の台車により構成され，安全性，生産性の向上を実現するものである。今般，秋田県において施工中の成瀬ダム堤体打設工事に初適用し有効性を確認した。

本稿では，台形 CSG ダムにおける保護コンクリート構築の合理化施工システムの概要について紹介する。

## ２．台形 CSG ダムの概要

台形 CSG ダムとは，現地発生材（石や砂れき）とセメント，水との混合材料である CSG（Cemented Sand and Gravel）を使用し，堤体の断面を上流面，下流面とも同様の勾配をもつ台形形状にしたダムである。現地の材料を有効活用し，環境に配慮するとともに低コストの材料である CSG の外側に従来のコンクリートを使用した耐久性の高い保護コンクリートによって覆うため，永久構造物としての品質基準も満たす最新のダム形式である。

図-1 に台形 CSG ダムの概要図を示す。

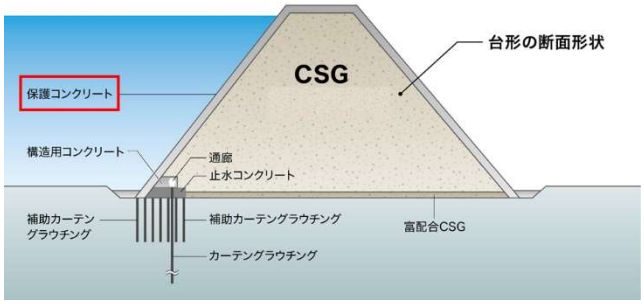



図-1　台形 CSG ダムの概要図

## ３．保護コンクリート構築の合理化施工システム

### 3.1　開発の背景

国土交通省東北地方整備局発注の成瀬ダム堤体打設工事は，堤高 114.5m，堤頂長 755m，堤体積 4,850,000m³ の超大型台形 CSG ダムを施工するものであり，堤体内部の CSG は 1 層 75cm をブルドーザにより敷き均し，振動ローラによって締固めて高速打設する計画である。

これに対し，上下流面の保護コンクリートの高速施工方法として，これまでは，保護コンクリートの型枠としてプレキャスト型枠を使用し施工速度向上に効果を発揮してきたが，プレキャスト型枠の搬入に際し堤体内に揚重機を設置する必要があり，CSG 打設をはじめ堤体における作業と干渉することから課題であった。

高速施工を行う成瀬ダムでは，外部からの型枠搬入が発生しないこと，型枠を鉛直とすることによって型枠際における作業性を向上させる等の利点から，上下流面の保護コンクリートを階段形状とし，H 型鋼を置いて型枠とする打止め型枠（以下、置き型枠）を採用して，保護コンクリートの打設進捗に合わせて置き型枠を盛替えることにより，外部からのプレキャスト搬入に伴う揚重機設置を不要とする計画とした。

図-2 に置き型枠を用いた保護コンクリートの概要図を示す。

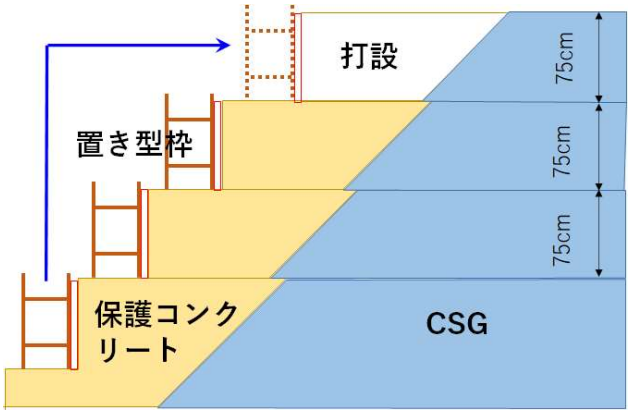



図-2　置き型枠を用いた保護コンクリートの概要図

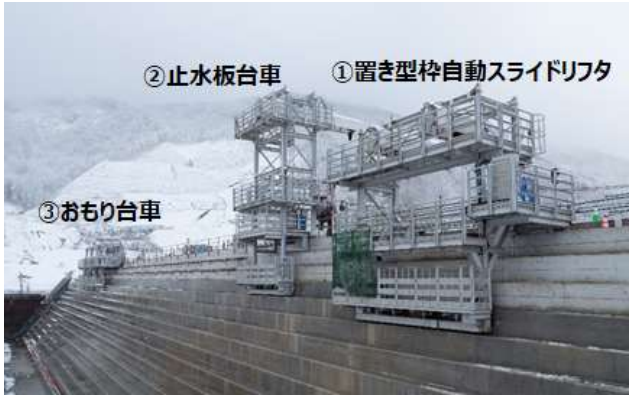



写真-1　置き型枠自動スライドシステム

置き型枠は，保護コンクリート 1 層の打設高さ 75cm に対して H 型鋼（H-400×400）を 2 本積み重ね，高さ 80cm，1 本あたりの長さ 5m の構造とした。また，保護コンクリートの養生期間を確保するため置き型枠を 3 段設置することとした。CSG を 1 層（75cm）打設した後に，最下段（3 段下）の置き型枠を吊り上げ，最上段の所定位置に設置し，置き型枠と CSG との間に保護コンクリートを 1 層（75cm）打設することを繰り返して堤体を構築する。通常は，3 段下の置き型枠に玉掛けし，CSG 打設面に配置したクレーン等の揚重機により最上段の所定位置に位置合わせを行い設置して，保護コンクリート打設時に置き型枠を動かないよう固定する手順である。

置き型枠の採用により外部からの型枠材の搬入は不要となったが，置き型枠盛替えのために CSG 打設面にクレーン等の揚重機を配置する必要があり，CSG 打設との干渉による施工速度の低下や安全面の課題は残った。これらの解決のため，置き型枠の設置から保護コンクリートの打設までの一連の作業を合理的に施工するシステムを開発した。

### 3.2　システムの概要

本システムは，

①置き型枠を自動で吊り上げ，所定の位置に設置する「置き型枠自動スライドリフタ」

②保護コンクリートの打設進捗に合わせて止水板を吊り上げる「止水板台車」

③保護コンクリートの打設時に，置き型枠の滑動・転倒を防止する「おもり台車」

の 3 種類の台車によって構成される，保護コンクリート構築の合理化施工システムである（写真-1）。各台車は，置き型枠として用いる H 形鋼をレールとして，電気モータ駆動の車輪により走行する構造であるため，堤体打設面のクレーン等の揚重機を配置する必要は無いことにより，CSG 打設や堤体上における作業と干渉することなく保護コンクリートの構築は可能である。

(1) 置き型枠自動スライドリフタ

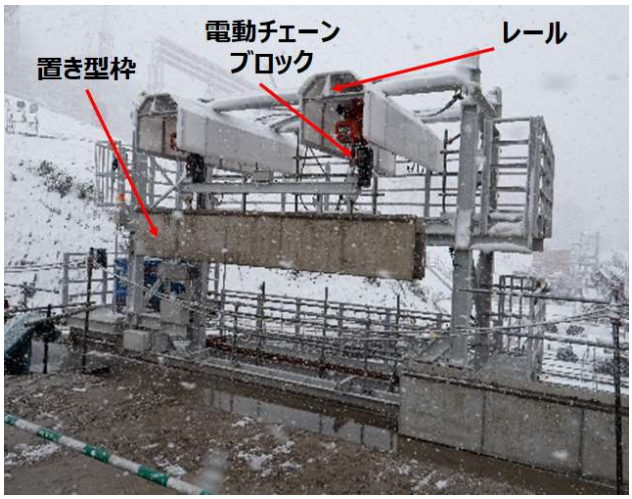
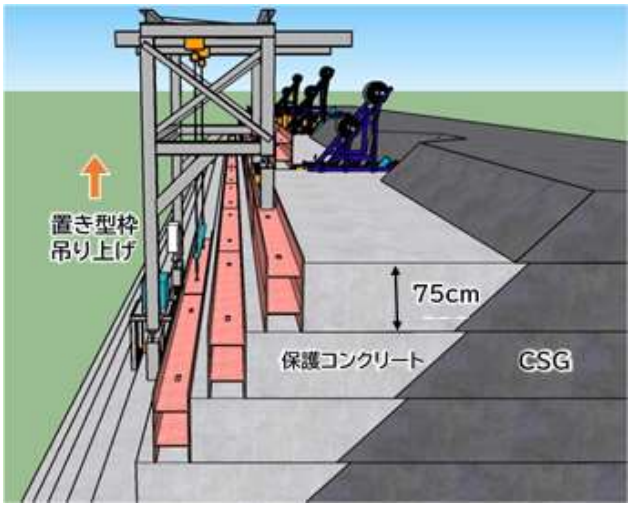



写真-2　置き型枠自動スライドリフタ

置き型枠自動スライドリフタは，保護コンクリート打設完了部の最下段（3 段下）の置き型枠を 1 本（長さ 5m）毎に吊り上げ，最上段の所定位置に位置合せを行い設置する台車である（写真-2）。

置き型枠自動スライドリフタには，上部に 2 本のレールとそのレールに沿って走行する電動チェーンブロックを有し，置き型枠に設けた玉掛け部に吊りフックを掛けて玉掛けを行った後に，置き型枠を吊り上げ最上段の所定位置に移動し，位置合せを行い先行して設置した置き型枠に合わせて設置する（図-3）。

設置完了後，自動スライドリフタは 5m 走行し次に吊り上げる置き型枠の位置に横移動し，同様の作業を繰り返し行う。これら一連の作業は，タブレット端末のボタン表示をワンタッチすることによって自動的に行うことが可能であり，置き型枠の吊り上げ・設置作業をワンマンによりで合理的かつ安全に行うことを可能としている。なお，置き型枠端部には自動で位置決め可能な調芯機構を設けている。



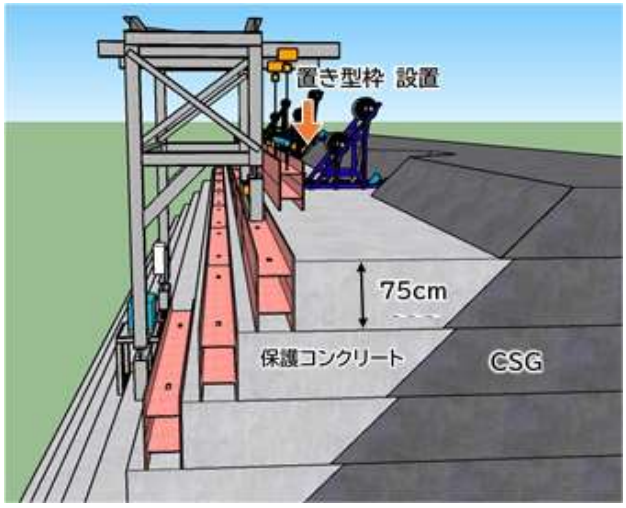




図-3　置き型枠の吊り上げ・設置

(2) 止水板台車

保護コンクリートは，堤体左右岸方向 15m 毎に鋼製目地板と 2 枚の止水板を設置する構造である（図-4）。

止水板台車は，上部に 1 本のレールとそのレールを走行する電動チェーンブロックを有し，ロール状に巻いた止水板を保護コンクリート打設の進捗に合わせて吊り上げ，鋼製の止水板固定架台に設置する（図-5 および写真-3）。

止水板の設置完了後，止水板台車を 15m 走行させ次の止水板位置に横移動し同様の作業を繰り返し行う。止水板台車はリモコンによる遠隔操作を可能とし，止水板の吊り上げを CSG 打設面の外側から行うことができるため，CSG 打設を阻害することなく作業を行えるとともに，保護コンクリートの打設面にスペースを確保できるため，コンクリートの締固め作業を十分に行えることから，止水板周りの作業の合理化と、品質の確保を可能とした。

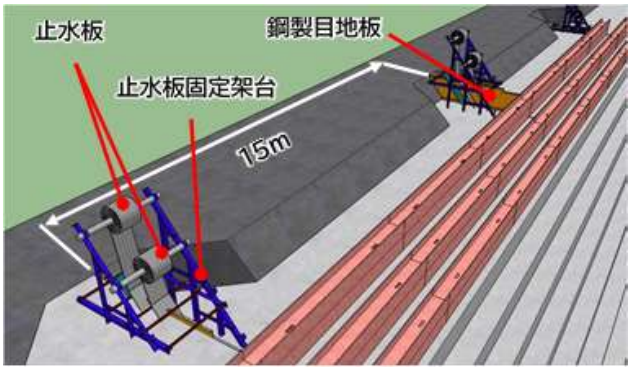



図-4　保護コンクリートの止水構造

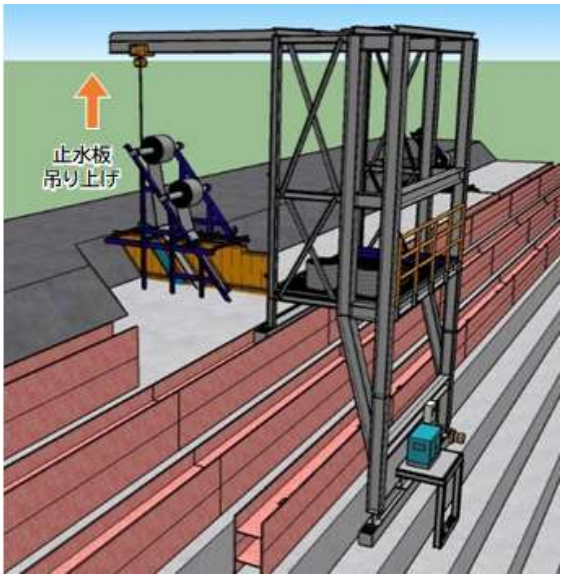



図-5　止水板の吊り上げ

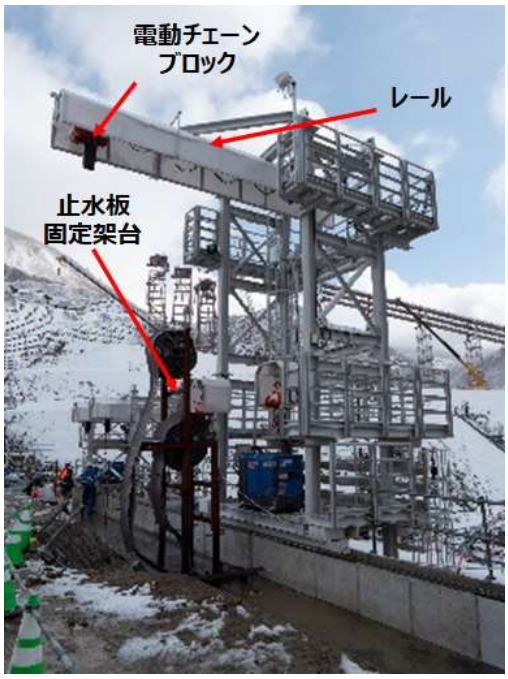



写真-3　止水板台車

(3) おもり台車

おもり台車は，保護コンクリートの打設時に発生するコンクリートの側圧による置き型枠の滑動・転倒を防止するための「おもり」として，置き型枠に荷重を掛ける台車である。これにより，サポートやセパレータ溶接等による固定作業を不要とした。保護コンクリートの打設は，幅 5m のおもり台車を 3 台並べて，1 ブロック（幅 15m）の保護コンクリートを一度に打設する（写真-4）。

打設時に打設箇所の置き型枠上に自走により移動させ，置き型枠に荷重を掛けることにより発生するコンクリート面との静止摩擦力によって打設時のコンクリート側圧に対抗する。（図-6）また，摩擦力は置き型枠の設置面の状況により変化するため，おもり自体を水タンクとし加水により荷重を増加させられることが可能である。また，おもり台車の移動は，リモコンによる遠隔操作により行う事ができることから，安全性の向上と省力化も図った。

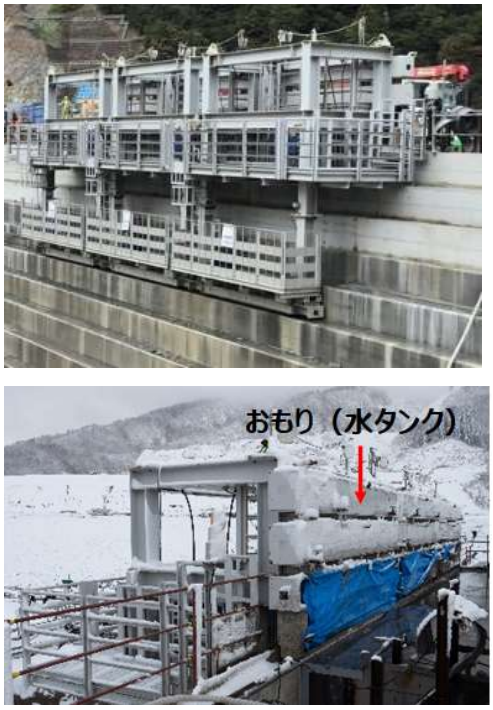



写真-4　おもり台車（上：全景，下：設置状況）

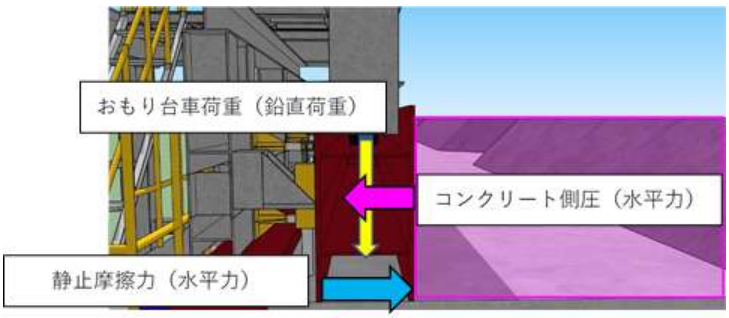



図-6　おもり台車によるコンクリート側圧への対抗

## 4. システム導入の効果

本システムの導入効果として，置き型枠の設置作業と止水板設置作業について，クレーン等の揚重機を用いた従来の作業方法を行った場合との比較を行った（表-1）。

作業時間短縮による保護コンクリート構築速度の向上及び，CSG 打設との干渉回避による安全性・生産性の向上により，保護コンクリート構築の合理化に効果があることを確認した。

表-1　従来の作業方法との比較

| 項　目 | 従来の作業方法 | 本システム | 効　果 |
|---|---|---|---|
| 置き型枠設置（15m） | | | |
| 作業時間 | 150 分 | 30 分 | 1/5 に短縮 |
| 揚重設備 | 25tクレーン | リフタ | CSG 打設に支障なし |
| 作業人員 | 特殊作業員 4 人<br>クレーンオペ 1 人 | 普通作業員 1 人 | 1/5 に削減 |
| 止水板設置（1 ヵ所） | | | |
| 設置時間 | 90 分 | 30 分 | 1/3 に短縮 |
| 揚重設備 | 4.9tクレーン | 止水板台車 | CSG 打設に支障なし |
| 作業人員 | 溶接工 3 人<br>クレーンオペ 1 人 | 普通作業員 2 人 | 1/2 に削減 |

## 5. おわりに

本稿では，台形 CSG ダムにおける階段状の保護コンクリート構築の合理化施工システムについて，概要と導入効果を報告した。

台形 CSG ダムは，今後も上下流面を階段状にすることを想定しており，本システムによる施工の合理化は期待できる。

また，台形 CSG ダム以外においても堤防，防潮堤，護岸など，階段形状による延長の長い構造物の構築にも適用可能であり，さらなる普及・展開を期待している。

# ８．ケーブルクレーン自動運転システムの開発

## GNSS 測位技術を活用したシステムの構築及びダム堤体工への適用

西松建設株式会社　　戸田　泰彰
○ 井上　洸也
田中　勉

### １．はじめに

我が国における労働人口の減少の流れは今後さらに加速するとされており，特に建設業における施工の省人化，無人化への取り組みは喫緊の課題である。このような状況の中で，ダム堤体工における生産性向上，CIM や ICT 技術を活用・組み合わせる「i-Construction」の実現を目指し，今回ケーブルクレーンを使用したコンクリート打設の自動化技術開発に取り組んだ。

開発したシステムはコンクリート打設作業の際に都度遷移する打設位置や，バケット積載重量の変化に応じて，運搬の軌道や速度を変化させ，最適化された自動運転を実現する。システムの特徴は GNSS 測位技術を活用した高精度な位置決めと，状態フィードバック制御を利用したバケット振れ止め制御である。

本システムは，熊本県 立野ダム建設工事の堤体工において試験運用を実施し，コンクリート打設作業への適用性を確認した。

### ２．開発システムの構成

#### 2.1　軌索式ケーブルクレーン

ダムコンクリート打設で用いられるケーブルクレーンは，左右岸にかけ渡したワイヤーロープ（主索）を軌道として横行トロリが移動するクレーンである（写真-1）。本開発で対象としている軌索式ケーブルクレーンは，片岸の上下流方向に軌索鉄塔を設置することで，主索を移動する横行トロリと，軌索を移動する走行トロリの位置を調整し，ケーブル固定塔を結ぶ平面上の任意の位置に吊荷を移動させる。（図-1）。

#### 2.2　開発システムの概要

本システムは GNSS（衛星測位システム）から受信した信号を利用してコンクリートバケットの位置を測位し，ダム堤体 CIM（Construction Information Modeling）データと連携させることで，目標位置となる打設点までの運搬を自動制御するシステムである。主に以下の 3 つのサブシステムで構成される（図-2）。

(1) 堤体打設オペレーティングシステム

ダム堤体 CIM データが包含するブロック区分，3 次元位置データを利用し，タブレット端末のタッチパネル上に打設エリアの平面図を表示させて，自動運転の目標位置となるコンクリート打設点を指定する。

(2) 自動運転システム

軌索式ケーブルクレーンにおける横行トロリ，走行トロリ，フックブロック（バケットを吊るす装

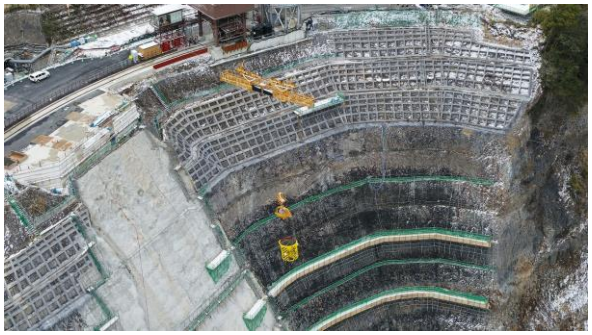


写真-1　ケーブルクレーンによるコンクリート打設

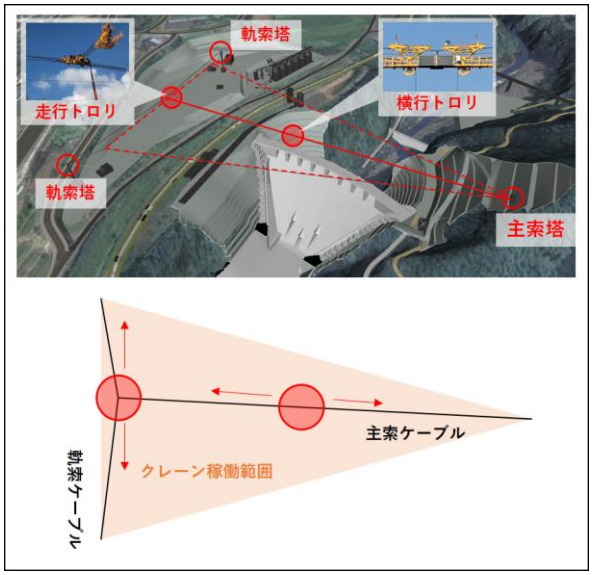



図-1　軌索式ケーブルクレーン

置）に GNSS 受信装置を設置してバケット位置を測位し，指定された打設点に向けて自動でコンクリートを運搬する。

(3) 統合管理ディスプレイ

自動運転中の打設進捗状況をリアルタイムで確認できる。さらにコンクリート品質情報，打設位置等の打設結果データを取得し，ダム堤体全域のコンクリート品質データを蓄積・管理する。

## 2.3 開発システムのハードウェア構成

システムを構成するハードウェアの情報を，設置個所毎に示す（図-3）。以下の(1)～(6)で各設置機器とその機能について説明する。

(1) 横行トロリ／走行トロリ

GNSS 受信モジュールを内蔵した制御ユニットと，GNSS アンテナを各トロリに搭載している。取得した測位データ等の各種データ伝送用として無線アクセスポイントを設置している。各機器への給電については，ソーラーパネルからの電力を，充放電コントローラを介してバッテリーに蓄電して利用する（写真-2,3,4）。全ての設置機器はボルト締結による固定に加えて，ワイヤーロープによる脱落防止を施しており，万が一のトロリからの機器の落下を防いでいる。

(2) フックブロック及びコンクリートバケット

前述のトロリと同様の機器によって GNSS 測位及び無線によるデータ伝送を行う。給電については既設のコンプレッサを利用する。コンクリートバケットの側面にレーザー距離計を下向きに設置し，出力値によってバケットの地面への着床を検出している（写真-5,6）。

(3) GNSS 基準局

クレーン操作室の近傍で上空の見晴らしの良い場所に，GNSS アンテナと制御ユニットからなる基準局を設置する。クレーン操作室へのデータ伝送

図-2　ケーブルクレーン自動運転システムの概要

図-3　システムを構成する機器及び設置個所

は有線（LAN ケーブル）で行う（写真-7）。

(4) クレーン操作室

操作室内には自動運転制御用 PC とデータ管理用 PC を設置する. 室外には無線アクセスポイントを設置し，横行/走行トロリ，フックブロックからのデータを取得して制御用 PC に伝送する。制御用 PC はケーブルクレーン制御用 PLC と有線（LAN ケーブル）で接続し，産業用オープンネットワーク規格（FL-net）を使用して，自動運転システムからケーブルクレーンへ動作指令を伝送する（写真-8）。

(5) バッチャープラント

骨材供給／コンクリート製造設備制御用 PLC からのデータ取得用として，伝送用 PLC 及び PC を設置する。各 PLC 間の通信は FL-net を使用しており，バッチャープラントの稼働状況，コンクリート配合情報等の各種データを，自動運転システムのデータ管理用 PC に伝送する。

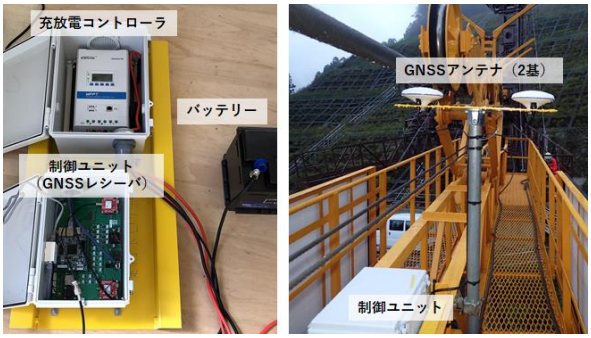



写真-2　GNSS 受信装置（横行トロリ①）

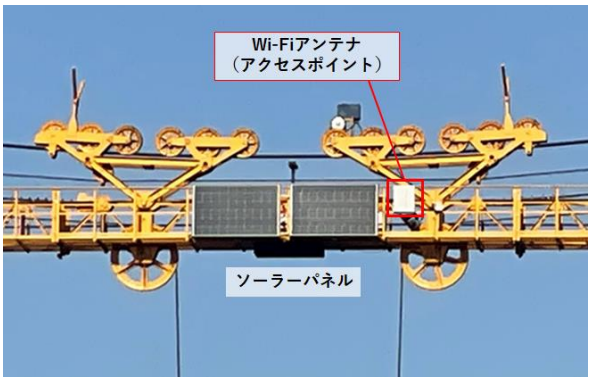



写真-3　GNSS 受信装置（横行トロリ②）

写真-4　GNSS 受信装置（走行トロリ）

写真-5　GNSS 受信装置（フックブロック）

写真-6　コンクリートバケット

写真-7　GNSS 基準局

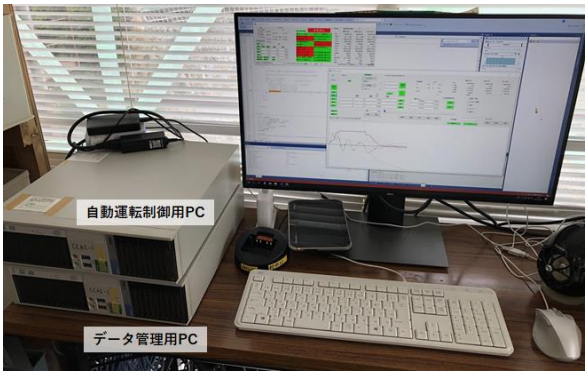



写真-8　クレーン操作室

(6) トランスファーカ管制盤

バッチャープラント操作室内に設置されている，トランスファーカ管制盤に伝送用 PLC を接続し，トランスファーカ稼働状況等の各種データを取得する。取得データは FL-net で自動運転システムのデータ管理用 PC に伝送する（写真-9）

写真-9　バッチャープラント通信機器

## ３．自動運転システムの制御

### 3.1　自動運転による打設フロー

本システムの打設 1 サイクルにおける動作フローを示す（図-4）。ケーブルクレーンとバッチャープラント・トランスファーカの各システムが連動して，動作信号をやり取りすることで，一連サイクルの自動運転を実現する。

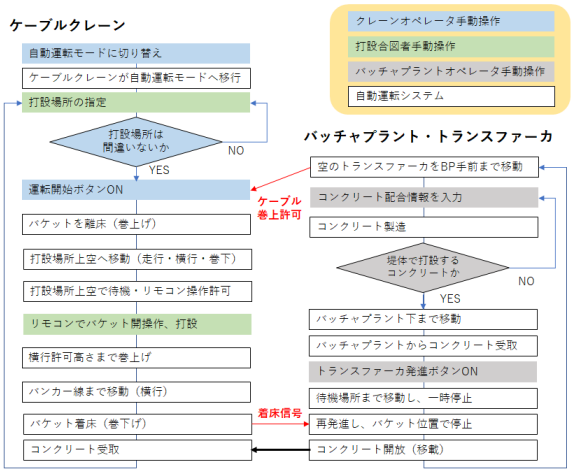



図-4　自動運転打設フロー

### 3.2　バケット位置制御

前述の横行トロリ，走行トロリ，フックブロックに設置した GNSS 受信装置を使用して，リアルタイムの測位データを取得する。本システムでは現場に設置した基準局との相対測位（RTK 測位）により，誤差数センチメートルでの測位を可能としている。

測位データはグローバル座標系で与えられるため，ケーブルクレーン動作ベクトル（横行方向，走行方向，鉛直方向）と整合したローカル座標系への座標変換を行う。自動運転の目標位置（打設点）についても同じ座標変換を行う。変換後の位置データを使用してケーブルクレーンの 3 次元方向の制御（横行トロリ移動，走行トロリ移動，バケットの巻上下げ）を行うことで，バケットを目標位置に向けて自動で運搬する。

### 3.3　バケット振れ止め制御

横行トロリとそこから吊り下げられたフックブロックの測位データを 0.1 秒毎に計測することで，バケット振れの挙動をリアルタイムで取得する（図-5）。得られたバケット振れ角度及び角速度，振れ方向（横行トロリ進行方向の成分を算出）を制御パラメータとして使用し，横行トロリを加減速する制御（状態フィードバック制御）をシステムに実装している。

自動運転において，バケットを高い位置精度で打設点に停止させ，且つその地点でバケットの振れを十分抑えることが必要であり，その複合的な制御を状態フィードバック制御によって実現している。

具体的には目標位置に近づいた際の横行トロリ減速停止制御において，（横行トロリとフックブロック，バケットの機械的な機構を単振動の振り子として扱い）振り子の周期 T と，減速開始前の初速度 V の 2 つの既知の値から，規定の振れ止め制御を与えた場合の停止までに必要な距離（制動距離）L を算出している。横行トロリの減速停止制御プログラムにおいてこの L を使用することで，バケットの振れを抑え，且つ目標位置に高精度で停止させる，複合的なバケット停止制御を実現する。

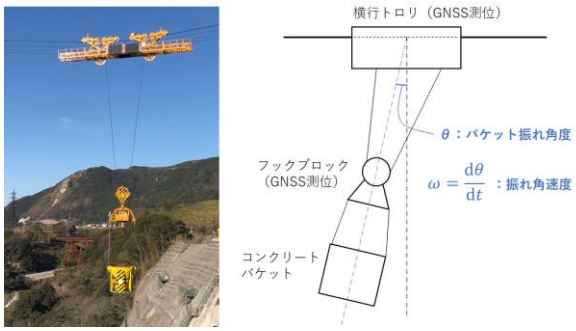



図-5　バケット振れ止め制御

## ４．適用試験

### 4.1　立野ダム建設工事への適用

本開発にあたって，試運転から導入までを熊本県内の立野ダム建設工事にて実施した。本工事は，熊本県内白川 沿川の洪水被害を防ぐことを目的とした洪水調節ダム（流水型ダム）を建設する工事である。

工事概要及び立野ダム諸元を示す（表-1,2）。

表-1　工事概要

| | | |
|---|---|---|
| 工事名 | 立野ダム建設（一期）工事 | |
| 発注者 | 国土交通省　九州地方整備局 | |
| 施工者 | 西松・安藤ハザマ・青木あすなろ特定建設工事共同企業体 | |
| 工期 | 平成３０年２月１６日～平成３３年３月３１日 | |
| 工事内容 | 基礎掘削 | V=約710,000㎥（全体V=約710,000㎥） |
| | 堤体工打設 | V=約33,000㎥（全体V=約350,000㎥） |
| | 減勢工打設 | V=約18,000㎥（全体V=約50,000㎥） |
| | 基礎処理工 | L=約80,000m（全体L=約120,000m） |

表-2　立野ダム諸元

| | | | |
|---|---|---|---|
| 位置 | 左岸　熊本県菊池郡大津町大字外牧地先<br>右岸　熊本県阿蘇郡南阿蘇村大字立野地先 | | |
| 河川名 | 白川水系白川 | 堤高 | 約 90　m |
| ダム名 | 立野ダム | 堤頂長 | 約 200　m |
| 型式 | 曲線重力式コンクリートダム | 堤体積<br>(減勢工を含む) | 約 40万　㎥ |
| 集水面積 | 約 383　㎢ | 天端高 | 標高 282.0　m |
| 湛水面積 | 約 0.36　㎢ | 洪水時最高水位 | 標高 276.0　m |
| 貯水容量 | 約 1,000　万㎥ | 計画堆砂量 | 約 60万　㎥ |
| 目的と役割 | 洪水調整専用ダム（流水型ダム） | | |

## 4.2　試験内容と結果

(1) バケット到達位置精度の検証

堤体打設オペレーティングシステムにより，タブレット端末から目標位置（打設点）を指定して（図-6）自動運転を行い，指定した目標位置とバケット停止位置を比較した結果，X 方向（東）及び Y 方向（北）いずれも±150mm 以内であることを確認した。この位置精度は，際の打設作業において打設点付近でのバケット位置の修正を必要としないため，スムーズな作業を実現し，打設サイクルタイムの短縮に寄与する。

(2) バケット着床動作の確認

コンクリート打設後は，トランスファーカから次のコンクリートを受け取るために，バンカー線上にバケットを着床させて待機する必要がある。このバケット着床動作の自動運転プログラムを作成し，適用試験を実施した。

着床プログラムの中で，バンカー線の上空付近でバケットの振れを抑えながら高い位置精度で停止させるために，前述の状態フィードバック制御を使用している。約 120m に及ぶバンカー線上において着床試験を行い，上流部，中央部，下流部でいずれも安定して自動運転でバケットを着床できることを確認した。

(3) 自動化による打設サイクルタイムの短縮

上記の自動運転での打設点への到達及びバンカー線上への着床では，概ね手動運転と同等の作業時間で一連の動作ができることを確認している。

手動運転における作業上の制約として，クレーン運転士が目視確認でバケットを着床させる際に死角となるため，トランスファーカをバケット着床位置よりも 60m 後方で一旦停止して待機させる必要がある。これを自動運転では目視確認が不要なため，待機位置を近づけることができる。

待機位置を 6m まで近づけた場合の打設サイクルタイムの短縮効果について，実打設での計測結果を示す（表-3）。トランスファーカの動作シーケンスから算出した理論値には及ばないものの，1 サイクル当たり 18.8 秒の作業時間短縮が可能であることが確認できた。今後は理論値との差異の分析を行い，さらに作業時間を短縮させるための検討を進める。

打設サイクルタイム短縮に関してはこの他にも，専用のリモコンを使用したバケット位置調整機能をシステムに実装しており，打設点近くでの合図者のリモコン操作によって（クレーン運転士を介せずに）最終的なバケット位置調整を可能としている（写真-10）。自動運転制御による高精度の

図-6　打設位置指定画面

表-3　自動化による作業時間の短縮

トランスファーカ待機状態からバケット接近までの所要時間

| 運転モード | 待機位置 | 所要時間 [s] | |
|---|---|---|---|
| | | 理論値 | 実測値（5回平均） |
| 手動 | 60m 後方 | 40.5 | 43.3 |
| 自動 | 6m 後方 | 12.5 | 24.5 |

写真-10　自動運転によるコンクリート打設

位置合わせと，合図者によるリモコン操作を組み合わせることで，柱状打設において発生するクレーン運転士が目視確認出来ないエリアに対しても，作業を迅速かつ安全に進められ，サイクルタイム短縮に寄与する。

### 4.3　統合管理ディスプレイ

(1) デジタルサイネージによる打設進捗管理

ケーブルクレーンやバッチャープラントなどの，各設備の稼働状況を示す動作信号を収集してグラフィック表示する（図-7)。デジタルサイネージとして統合的に情報を表示することで，現場職員及び作業員が自動運転中の打設進捗状況をリアルタイムで確認できる。

(2) コンクリート品質情報管理

バッチャープラントからコンクリート品質データ（配合データ及び試験データ）を取得し，これを打設位置データ（GNSS 測位データ）と紐付けることで，ダム堤体全域のコンクリート品質データの蓄積と管理を行う。この蓄積データをダム堤体 CIM モデル上に付与・表示させることで，日々の打設データの管理を効率化できる。

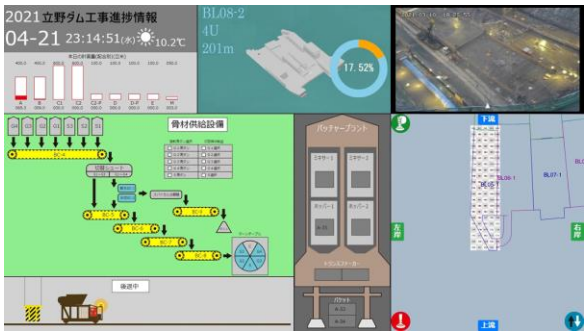



図-7　統合管理ディスプレイ

### 4.4　安全対策

システムの現場導入にあたって，予期しないシステム不具合等による事故発生を未然に防止するための安全対策を実装しており，その内の主な３項目について以下に記載する。

(1) 横行トロリ移動制限域の設定

自動運転中に横行トロリが移動できるエリアを設定し，エリアの境界ではソフトリミットによってトロリを非常停止させる。具体的にはバンカー線付近のプラント設備や通路等のエリアを進入不可とすることで，バケットとの接触等の事故を未然に防止する。

(2) バケット巻下げ高さ制限の設定

打設位置（バケット目標位置）情報から，堤体面のエレベーションを取得する。堤体面から5m上部をバケット接近不可エリアとすることで、自動運転中の巻下げ時に，バケットが堤体面や重機と接触することを防止する。

(3) レバー操作による手動モードへの切替機能

自動運転中であっても，クレーン運転士が手動運転用の操作レバーを作動させた瞬間に自動運転は終了され，手動運転によるクレーン操作が可能となる。これにより緊急時に運転士がクレーン異常動作を認知したと同時に，手動運転による回避行動を取ることができる。

## ５．まとめ

本開発で得られた成果を以下に記載する。

(1) GNSS測位（RTK測位）によってトロリやバケットの位置を取得し，得られた位置データを使用してコンクリートバケットを打設点まで自動運搬することが可能である。

(2) 開発したバケット振れ止め制御を用いることで，目標位置（打設点）で振れを十分抑えつつ，高い位置精度でバケットを停止させることが可能である。また戻り動作についても同様に，バンカー線上の既定位置に安定してバケットを着床させることが可能である。

(3) デジタルサイネージにより，自動運転中の打設進捗状況をリアルタイムで確認でき，さらに日々の打設データを蓄積し，ダム堤体全域のコンクリート品質データを管理できる統合管理ディスプレイを開発した。

本システムの現場運用について，実打設での試験運用を通してサイクルタイム短縮効果が確認できたことで，さらに本格的な運用を進めている段階である。今後は制御プログラムの作り込みや，運用する中での改善検討を進めることで，ダム堤体工の生産性向上に寄与する，自動運転システムの構築を加速させる。

# ９．機械式ビット交換技術の開発

大成建設株式会社　　○田村　　憲
大成建設株式会社　　志田　智之
日立造船株式会社　　吉川　健一

## １．はじめに

近年、都市部での施行となるシールド工事では、地下構造物の輻輳、振動・騒音や交通渋滞の誘発により中間立坑の築造が困難であり、またその築造コストを削減するために掘削径を問わず長距離化する傾向にある。

一方、長距離化と併せて、大深度化により砂礫や軟岩等の硬質な地盤が掘削対象となり、カッタービットの摩耗量は増大している。これに対応するため、ビットの耐摩耗性、耐衝撃性を向上させる技術が開発されてはいるが、ビット無交換での施工には限界があり、掘進に伴い許容摩耗量を超えるカッタービットに対しては、交換が必要となる。

従来のビット交換には、地盤改良等により安定化した域内にシールド機を停止させた後に人が切羽に出て交換する方法や立坑を築造して交換する方法、シールド掘進機に特殊な装置を取り付け交換する方法等がある。前者は危険作業、工期の長期化、高コストといった問題があり、後者は機械設備が高額であるものや、小口径シールドに適用が困難なもの等がある。このような状況から、地上工事を必要とせず、補助工法の省略により経済的に、かつ安全に行える機械式ビット交換工法は、今後、益々需要が高まると考えられる。

本稿では、「大口径シールドはもとより中小口径シールドにも適用可能」で「地盤改良等の補助工法が不要」かつ「任意の場所で全ての先行ビットを無制限に交換可能」をコンセプトに開発した新しい機械式ビット交換技術について報告する。

## ２．従来のビット交換工法との比較

従来の機械式ビット交換工法は、カッタースポーク内に人が入って交換する方法[1)]や、カッターヘッド内部に機械式の交換装置を装備する方法[2)]等がある。

これらは、カッター自体が大きい大口径シールド機には容易に適用可能であるが、中小口径シールド機の場合は、形状寸法の制約から、全てのビット交換に適用することは難しいのが現状である。

一方、上記課題の解決を目指し開発した本工法は、シールド機隔壁（バルクヘッド）に設けた可動式マンホールをカッタースポーク背面に接続することで、シールド機内と連続したビット交換用の作業スペースを確保して、地山を先行掘削しティースビットの保護を担う「先行ビット」を全て交換可能としている。（図１参照）

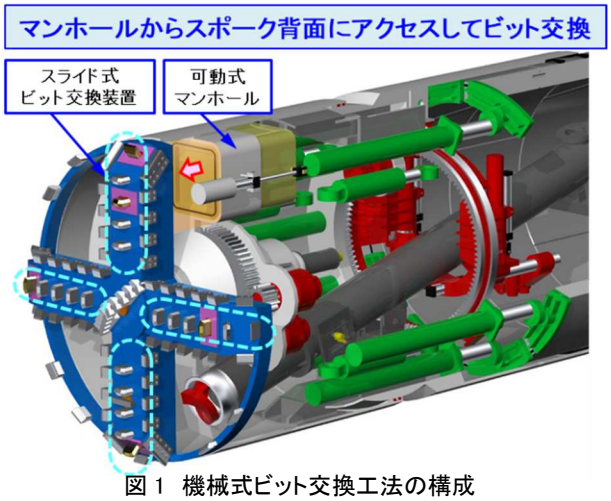



図１　機械式ビット交換工法の構成

ここで、可動式マンホールは、バルクヘッドにカッターモーターや排土装置（土圧式：スクリューコンベヤー　泥水式：送排泥管）に干渉しないように配置することが必要であり、ビット交換時の作業性からは、水平直径位置に配置することが望ましい。また、可動式マンホールとカッタースポーク背面との接続箇所は、機械的な凹凸の噛み合せ構造である印籠継手で構成し、カッタースポークにはシャッタースライド機構（図２参照）を装備することで、止水性を確保している。

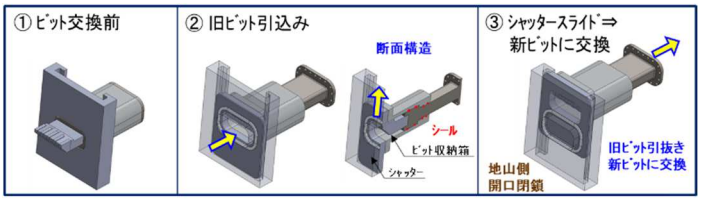



図２　シャッタースライド機構

本工法の特徴を以下に示す。

(1) 任意の場所でビット交換可能
ビット交換を非開削で行うための地盤改良や、交換用の立坑の構築が不要となるため、地下構造物や沿道環境に左右されることなく、任意の位置でビット交換が可能。このため、予め位置を定めることなく、摩耗状況に応じてビット交換を行うことも可能になる。

(2) 全ての先行ビットを繰り返し交換可能
外径 4mを超えるシールド機では、可動式マンホールから手が届かない位置の先行ビットもあるが、後述するビット交換機械（カッタースポーク内を横行し先行ビットを交換する機械装置）を用いることで、全ての先行ビットを交換することが可能となる。

(3) 小口径シールドへの適用が可能
外径 3mを超えるシールド機であれば、シールド機駆動部と干渉せずに可動式マンホールを配置可能であり、小口径シールド機にも装備可能である。

(4) カッタースポーク形状の変更不要
本工法はビット交換時にカッタースポーク内に人が立ち入る必要がないため、小口径シールド機の場合でも、スポーク形状寸法（幅、厚さ）を大幅に変更する必要がなく、掘削に影響のないカッター形状での装備が可能。

(5) 交換時間の短縮
ビット交換のための準備作業は、可動式マンホールをカッタースポーク背面に接合し、それぞれのハッチを開放するのみである。このため、準備のためのシールド機の部品撤去・復旧や交換装置の取付け・取外し等に要する時間が不要となり、ビット交換期間の短縮に寄与する。

## ３．実証試験

外径 3mのシールド機のカッタースポークを模試した試験装置を製作し、可動式マンホールとカッタースポーク背面との接合部の止水性およびビット交換の効率を確認した。

試験装置は、カッタースポーク部、チャンバー部、可動式マンホール部からなり、チャンバー部には水を封入し、その上方に設けたシリンダーにより加圧できる構造とした。（写真１）

実証試験の手順を以下に示す。

(1) 可動式マンホール押出し（カッタースポークと接合）

チャンバー部を 0.5MPa に加圧した後、可動式マンホールを押し出し、カッタースポーク背面と接合する。接合後、両者のハッチを取外し、加圧下においても止水性が確保できていることを確認した。（写真 2~4）

写真 2　接続前状況

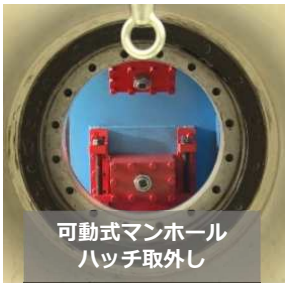



写真 3　接続後状況

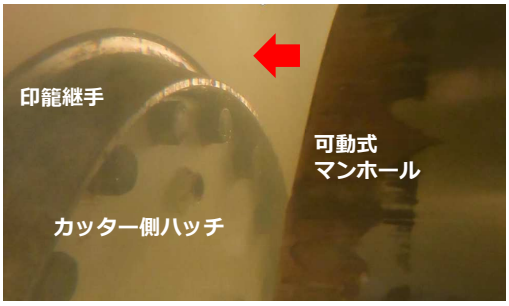
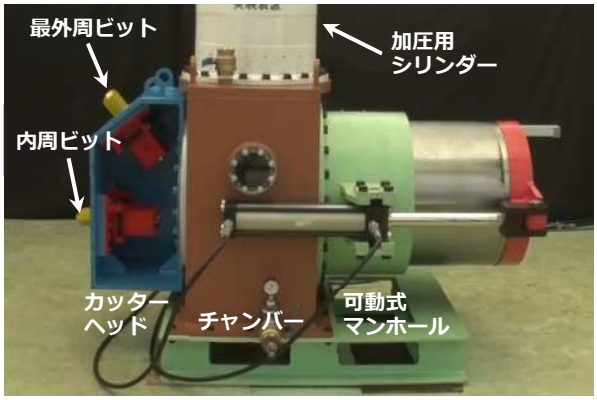



写真 4　可動式マンホール接続中状況（水中）



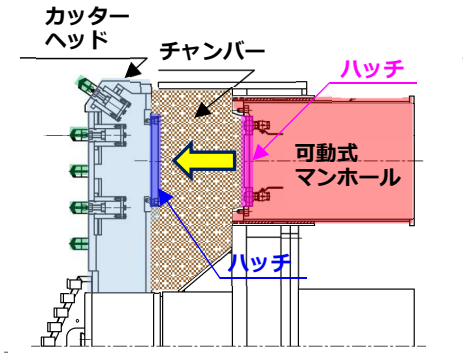




写真 1　試験装置

(2) 内周側ビット交換

内周側のビット交換は、①旧ビットをビット収納箱に引込み（写真 5）②ビット収納箱を上側にスライドさせてビットを地山と分離（写真 6）③ビット収納箱の背面蓋を外し、旧ビットを機内に回収（写真 7）④ビットをビット部、台座部、収納背面蓋に分解（写真 8）した後、ビット部を新品に交換し、回収と逆の手順で戻す（写真 9）。

ビット引込みから交換して押出し完了まで、約 6 分であった。

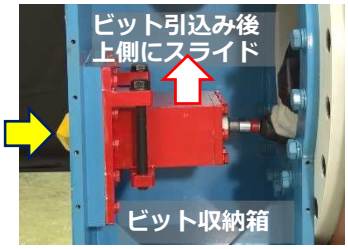



写真 5　旧ビット引込み

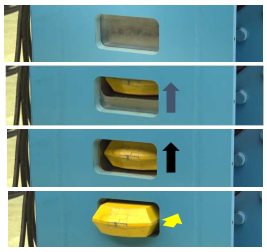


写真 6　前方シャッター閉

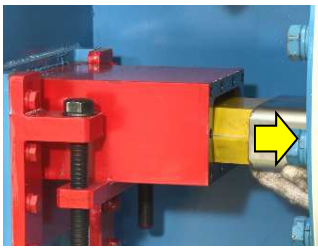


写真 7　旧ビット機内回収

写真 9　新ビット交換完了

写真 8　ビット分解

(3) 最外周ビット交換

最外周ビットも内周側と同様の手順で交換するが、交換時のスペース確保のために、ビット引込み方向を斜め下方向とした（写真 10）。交換時の滑落防止措置が必要となるため、一連の交換作業に約 19 分を要した（写真 11）

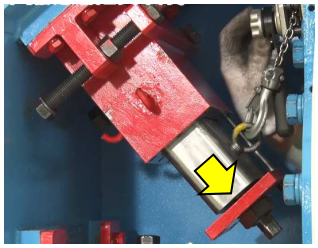


写真 10　旧ビット引込み

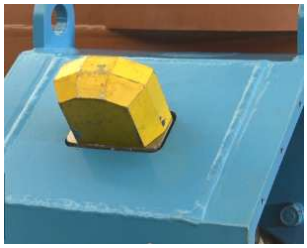


写真 11　新ビット交換完了

実証試験により、以下の内容を確認することができた。

① 本工法によるビット交換作業は、外径 3m の小口径シールド機においても適用可能であり、従来の機械式ビット交換工法と比較しても、短時間で交換が可能である。

② 地下 50m を想定した加圧下においても止水性が確保でき、シールド機内から大気圧下での交換が可能である。

## 4．実工事への適用

総合評価落札方式における技術提案において本工法を提案し、地方公共団体の下水道工事を受注した。

現在計画中のシールド機は、掘削外径 φ5.56m の複合式（スクリューコンベアを装備した泥水式）シールド機で、可動式マンホールから手が届かない範囲にもビットが配置されることから、遠隔操作によりビットを交換可能とする機械装置を考案した。これにより、外径 5m を超えるシールド機であっても、全ての先行ビットを交換することが可能となり、特に大口径シールドでは可動式マンホールを複数個所に配置することで、作業効率の向上が見込まれる。

考案したビット交換機械（以下、交換機械）のイメージ図を図 3 に示す。

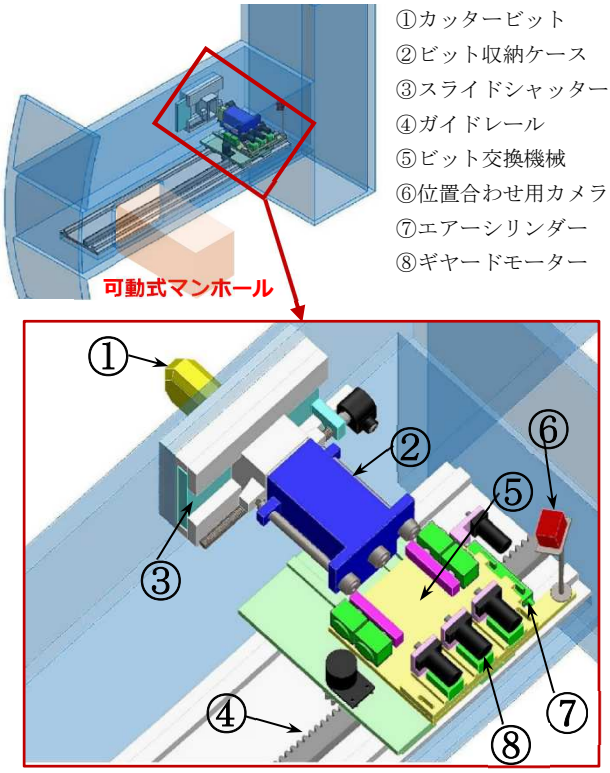



図 3　ビット交換機械

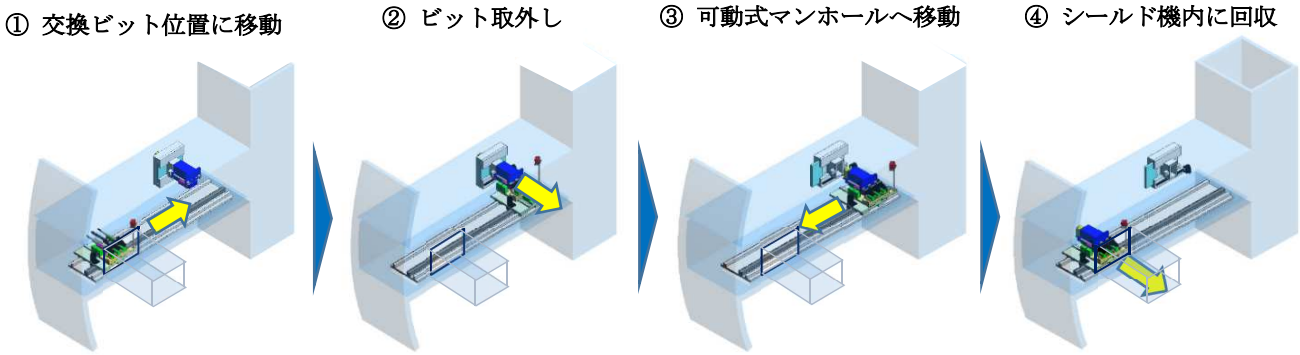



図 4　カッタースポーク内での交換機械の動き

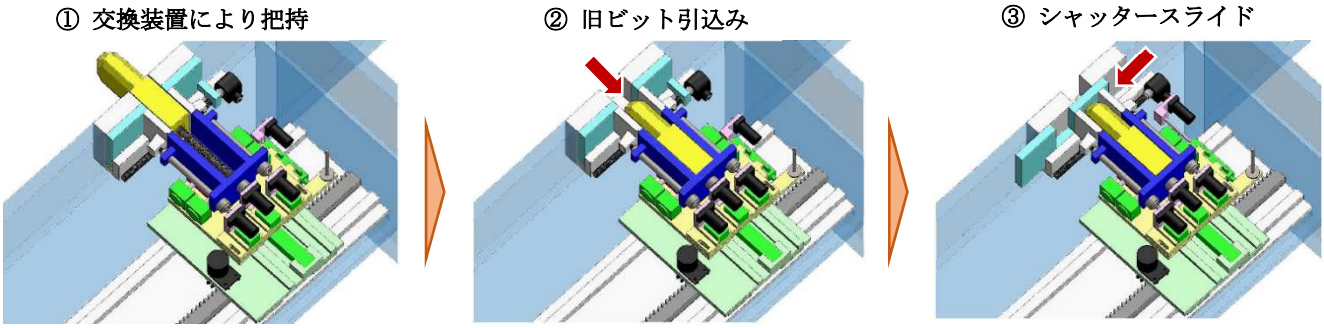



図 5　交換機械によるビット取外し手順

可動式マンホールをシールド機の水平直径位置に 1 基装備し、カッタースポークが水平となる位置で交換を行う。カッタースポーク内には交換機械が横行するためのラック式ガイドレールを装備しておき、ビット交換時に交換機械を可動式マンホールより装着する。目視できない場所でビットの取外しを行うために、カッタースポークの所定位置に目印となる位置合わせ用のマーキングを施しておき、交換機械に装備したカメラで視準して位置合わせを行う。

ビット収納箱ごと交換機械で把持し、後方に移動することで、カッタースポークから先行ビットが分離される。

交換機械によりビット収納箱を可動式マンホール位置まで横移動することで、ビットを交換できる。（図 4 参照）

## ５．まとめ

本工法は、可動式マンホールをカッタースポークに接続して作業スペースを確保するため、小口径シールド機でもカッターヘッドの厚みや、カッタースポークの幅を極端に大きくする必要がなく、シールド機の掘削性能として重要な要素である掘削土のチャンバーへの円滑な移動を妨げることなく装備が可能である。

このため、安定した掘削性能と安全なビット交換機構を兼ね備えたシールド機を実現することが可能である。

また、中口径以上のシールド機においては、先行ビットの交換を遠隔で可能にする交換機械を開発し、これを利用することで、ビット交換作業の効率化をはかることもできる。

今後は実証試験により得られた知見を改善し、実施工にフィードバックしていくとともに、更なる作業の効率化と安全性の向上に努めていく所存である。

## 参考文献

1)　永森邦博，真鍋 智，小林孝志：シールド掘削機カッタビット交換技術の適用実績と今後の展開，土木建設技術シンポジウム論文集，pp. 125-130，2003. 7

2）杉山雅彦，赤木朋宏：スライド式カッタビット交換システム（トレール工法）の開発，三菱重工技報，Vol. 36 No. 4，pp. 180－183，1999. 7

# 10. ICT バックホウの施工履歴データを用いた土工の出来形管理に関する検討

国土交通省国土技術政策総合研究所　○ 大岩　憲史
国土交通省国土技術政策総合研究所　　山下　尚
国土交通省国土技術政策総合研究所　　大槻　崇

## １．はじめに

国土交通省では，「ICT の全面的な活用（ICT 土工）」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，もっと魅力ある建設現場を目指す取組である i-Construction（アイ・コンストラクション）を進めている。令和 2 年度は，直轄土木工事の ICT 施工の公告件数、実施件数ともに増加しており、公告件数の約 8 割で実施されている。都道府県・政令市における ICT 土工の実施件数も，昨年度に対して増加している [1)]。また，ICT の活用のための基準類の拡充も順次進んでおり工種の幅が年々広がっており、ICT 建設機械の活用も求められている。

## ２．研究目的

本研究では，ICT バックホウの施工履歴データを用いた土工の出来形管理への適用を検討した。ICT バックホウの施工履歴データはバケット刃先位置などのログデータを用いて出来形を計測する技術である。したがって，施工しながらの計測が可能となることから，UAV や地上型レーザースキャナー（以下，TLS）等一般的に高価な計測機器を準備して改めての計測作業が省力化される。そのため，施工履歴データを用いた出来形管理が実施できると，工事期間の短縮だけでなく工事費用の減少が見込め，生産性向上に大きく寄与することが期待出来る。

## ３．検証方法

施工履歴データの精度確認を実施し，既に策定されている土工の出来形管理要領 [2)]に規定されている出来形計測の要求精度±50mm 以内か確認した。また，施工履歴データと既に実用化が進んでいる TLS との出来形評価結果を比較し、土工の出来形管理へ適用可能であるか確認した。

使用した ICT バックホウは，法面バケットを装着し，マシンコントールにて施工した。衛星測位システムは固定局を設置し RTK-GNSS とした。

### 3.1　施工履歴データの精度確認方法

試験施工は平場（5m×5m）と法面（法長 4m×幅 5m×勾配 1 割 8 分）の掘削整形作業を掘削深さ約 0.1m で実施した（図-1）。

施工履歴データは以下の 2 つの記録方式で計測した。「切り土：バケット刃先が現状の施工履歴データより下を通るときのみ施工履歴データを更新」。「切り盛り：設計面データから規定された距離内のバケット刃先とバケット輪郭点の内，設計面データに最も近い箇所で施工履歴データを更新」。施工履歴データの精度評価方法は「3 次元計測技術を用いた出来形管理要領（案）【河川浚渫工編】」[3)]より，施工履歴データの計測点群で形成する TIN(不等三角網)とトータルステーション（以下，TS）により計測した点（真値）との標高較差とした。TS の計測点は試験施工範囲に対し，約 1m 間隔で検測した（図-1）。また，出来形評価の比較検証のため，施工後の出来形を TLS で計測した。

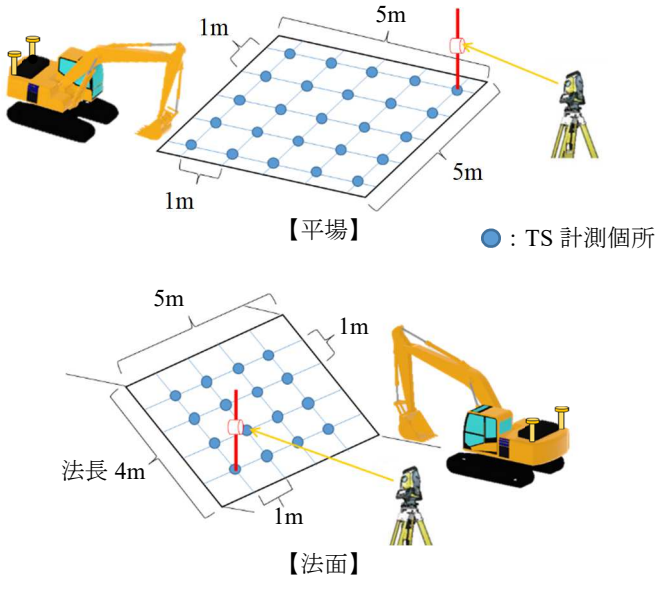



図-1　試験施工範囲とTSの計測個所

## ４．検証結果

### 4.1　施工履歴データの精度確認結果

施工履歴データと TS との標高較差の最大値，最小値の範囲を図-2 に示す。施工履歴データの記録方式「切り土」の結果を平場 A，法面 A。「切り盛り」の結果を平場 B，法面 B とする。標高較差は，平場 A は-1～32mm，平場 B は 21～43mm，法面 A は-16～43mm，法面 B は-6～44mm であり，全ての水準で出来形計測の要求精度±50mm 以内であった。

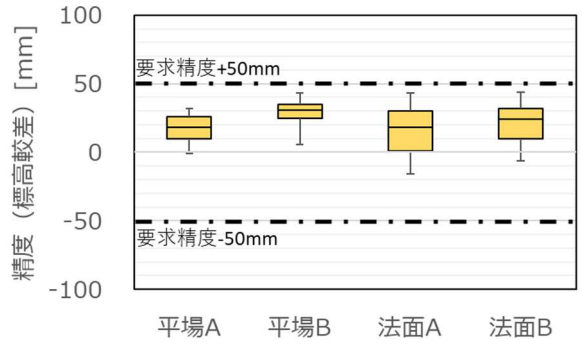



図-2　施工履歴データとTSの標高較差

平場と法面を比較すると，法面の誤差範囲が 2 倍ほど大きくなっている。これは法面の場合は，ICT バックホウの水平方向の誤差が標高較差に加わるためである（図-3）。そのため，施工履歴データの精度確認は TS の計測点との標高較差だけでなく，UAV など他の要領と同様に標高/水平方向の較差各±50mm 以内であることを確認する必要がある。

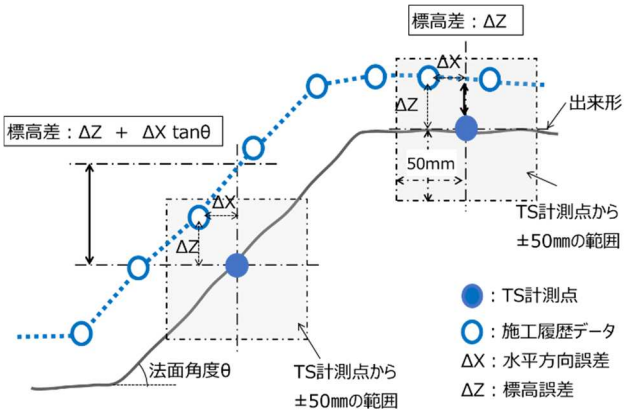



図-3　平場/法面の横断図での標高差イメージ

### 4.2　施工履歴データと TLS の出来形評価比較

出来形評価は，施工履歴データと TLS それぞれの出来形評価用データの各ポイントと設計面データとの標高較差により出来形の良否判定を行った。出来形評価用データは，1m×1m の平面正方形のグリッドを設定し，グリッド中央に評価点を設置し，評価点の標高値は，評価点を中心とする 1m$^2$ 以内の実計測点と設計面との差の最頻値を設計面に加算した値を用いた。

施工履歴データと TLS の出来形管理基準の管理項目である標高較差の規格値に対する-100％～+100％の範囲での平場 B と法面 B のヒートマップを図-4 に示す。出来形管理資料で記載する規格値の±50％以内，±80％以内に収まっている計測点数は，施工履歴データと TLS は同じ結果となっている。これは、平場 A と法面 A も同様であった。

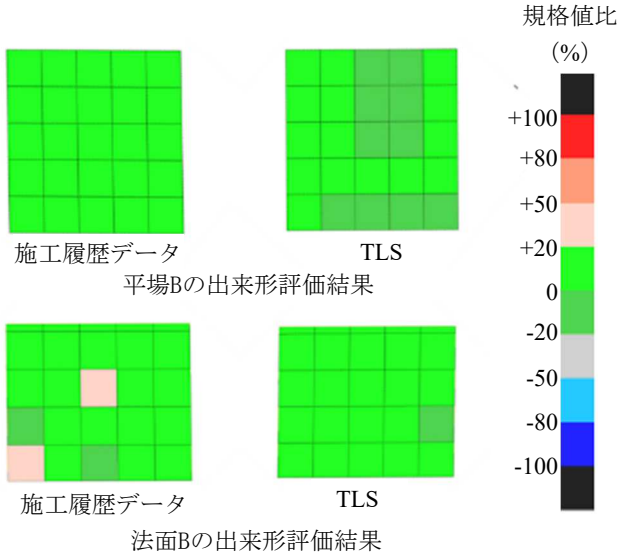



図-4　施工履歴データとTLSの出来形評価比較

## ５．結言

本試験での施工履歴データは，土工の出来形管理要領の面管理に必要な出来形計測精度±50mm 以内を達成できていた。また，施工履歴データと TLSの出来形評価は規格値の±50％以内まで同様の結果となっており，出来形管理図表の帳票も概ね相違ない結果となった。以上より，本試験の施工履歴データが土工の出来形管理へ適用可能であることを確認できた。ただし，今回の試験は施工場所や使用機械を限定して実施したものである。施工履歴データの精度はGNSSの受信精度やその他センサ，ICTバックホウの機械摩耗に依存するため，ICTバックホウの日々の精度確認，施工日ごとの施工範囲に対するTS等を用いた数点計測による出来形への影響を補完することが必要である。

### 参考文献


1) 国土交通省：ICT導入協議会（第11回），2021
2) 国土交通省：土木工事施工管理基準及び規格値（案），令和3年3月
3) 国土交通省：3次元計測技術を用いた出来形管理要領（案），pp5-1~5-76，令和3年3月

# 11. 路面切削工における施工履歴データを用いた出来形管理の検討

前田道路株式会社　○ 宮内　賢徳
〃　宇田川　健治
〃　葛原　淳

## １．はじめに

令和２年度から新たに追加されたICT舗装工(修繕工）では，路面切削工においてICT施工機械と作業装置の施工中の軌跡(以下，施工履歴データ）を組み合わせたデータを使って出来形管理を行う手法が、国土交通省の「3次元計測技術を用いた出来形管理要領(案)」(以下，管理要領)に示された。従来工法では必要な切削深さなどのマーキング作業や施工のための準備作業に時間を要しており，また，交通規制など時間制限があるなかで切削面の出来形計測作業を行っていた。管理要領で示された手法により，高精度の施工やデータ管理の簡略化・書類の作成に係る負荷の軽減等が可能となるため、出来形管理作業の大幅な効率化･省力化が期待できる。しかしながら管理要領に則った管理ができるシステムは少なく，現場へ普及していないのが現状であった。

既報[1)]では，路面切削機のICT施工方法としてGNSSを用いたマシンガイダンス(以下，GNSS式MG)についてのシステム構成や施工方法を紹介し，取り扱いの簡便さや施工精度などについて検証結果を報告した。その後，管理要領の内容を踏まえてGNSS式MGシステムを利用した施工履歴データの取得方法についての検討を重ねてきた。

本論文は，市販のレーザ距離計を使って路面切削工の切削深さを計測・記録するとともに，GNSS式MGシステムの位置情報とレーザ距離計による計測結果を時刻同期により施工履歴データを生成する方法について，その精度検証結果と実用性を報告するものである。

## ２．目的と概要

### 2.1　施工管理システムの要求性能

管理要領に示された施工履歴データによる出来形計測システムに求められる機能・精度を以下に示す。

① システム上にてリアルタイムに施工機械(刃先)の位置と該当位置における設計標高値と切削高さ，あるいは設計厚さと厚さ（切削深さ）の表示が得られること。

② 施工履歴データによる出来形計測は，計測対象範囲内で1m²（1m×1mメッシュ）あたり1点以上の計測点が得られる設定で計測を行こと。ただし，縦断方向においては切削方向1mごとに1点取得し、横断方向においては切削幅に応じて，施工履歴データを算出しても良い。

③ 各施工日の施工開始前に，作業装置位置の測定精度がx，y座標の各成分とも±50mm以下であることを確認すること。また，標高較差の管理を行う場合は履歴取得位置との較差が0mm以下であり，深さ管理を行う場合は履歴取得位置との較差が0mm以上である事を確認すること。

### 2.2　目的

ICT舗装工（修繕工）では事前測量として地上型レーザスキャナ（以下，TLS）による3次元測量を行う。既報[1)]では、3次元測量で取得した現況点群データから作成した3次元現況路面データを使ってGNSS式MGを行う方法を紹介した。この3次元現況路面データとGNSSによる3次元位置データ，そしてレーザ距離計による切削深さデータを組み合わせて3次元座標を持った切削面の施工履歴データを生成するシステムを構築し，得られた施工履歴データの精度を検証することとした。

### 2.3　GNSS式MGと施工履歴システムの構成

GNSS式MGシステムおよび施工履歴システムの設置状況を写真-1に示す。

写真-1　GNSS式MGと施工履歴システムの設置状況

GNSS式MGの施工および施工履歴システムに必要な機材類およびデータは以下のとおりである。

出来形管理用トータルステーション(以下, TS)は，作業開始時に施工履歴システムの精度確認試験で使用した後，作業中は GNSS 式 MG における施工精度の適宜チェックのために用いる。

表-1 は施工履歴システムで用いたレーザ距離計の諸元を示したものである。路面切削工は通常 10～15m/min の速度で作業を行うため，レーザ距離計によるデータ取得間隔は 1 秒に 1 点程度が望ましく，この要求性能を満足する装置を選定した。

【GNSS 式 MG システム】
- VRS 方式 GNSS ローバ
- ローバ用マスト
- ガイダンス表示用モニタ
- 出来形用 TS（用途：施工精度確認）
- 3 次元切削厚さデータ

【施工履歴システム】
- レーザ距離計　2 個
- 白色反射板　2 個
- 履歴取得用 PC　2 台
- 出来形用 TS（用途：精度確認試験）
- 3 次元現況路面データ

表-1　レーザ距離計の諸元

| 項目 | 内容・性能 |
|---|---|
| メーカ及び型式 | Leica 社製 DISTO X3 |
| 測距精度※ | 1mm |
| 測距範囲※ | 0.05～150m |
| 最小測定単位 | 0.1mm |
| Bluetooth® Smart の範囲 | 10m 未満 |
| 温度範囲 | -10～50℃ |
| ※：白の反射板(白塗りの壁)、周囲に強い光がなく、一般的な生活可能範囲の温度状態の条件の時 | |

## 2.4　施工履歴システムの概要

写真-1 に示したように施工履歴システムにおける計測装置は，切削ドラム左右のワイヤセンサ付近にレーザ距離計を，レーザ距離計直下のサイドカバー部分に白色反射板を設置したものである。

レーザ距離計による施工履歴取得方法の概念図を図-1 に示す。サイドカバーは常に既設路面の高さに位置しているのに対し，切削ドラムは切削深さに応じて上下移動するため，レーザ距離計でこの間の距離を計測すれば切削深さを測定していることになる。

路面切削工の施工履歴データを取得するには一定間隔の時間で切削深さを記録必要がある。そこでレーザ距離計と履歴取得用 PC を Bluetooth で接続し，計測した時刻（PC 時刻と同期）と距離を 1 秒間隔で Excel に自動記録するよう設定した。

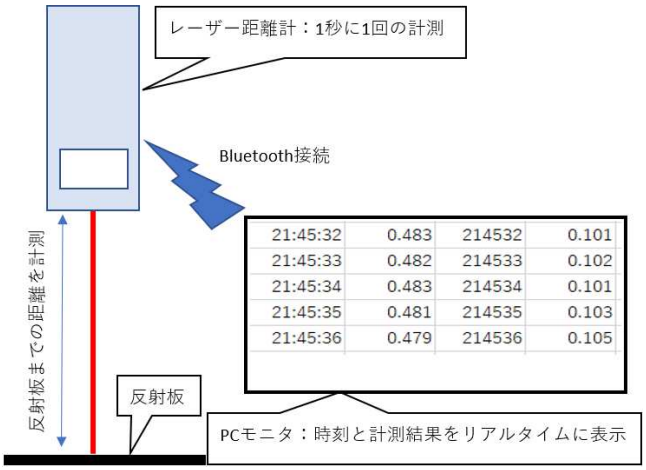



図-1　レーザ距離計による施工履歴取得方法の概念図

## 2.5　施工手順

施工履歴システムを使った GNSS 式 MG の施工フローを図-2 に示す。

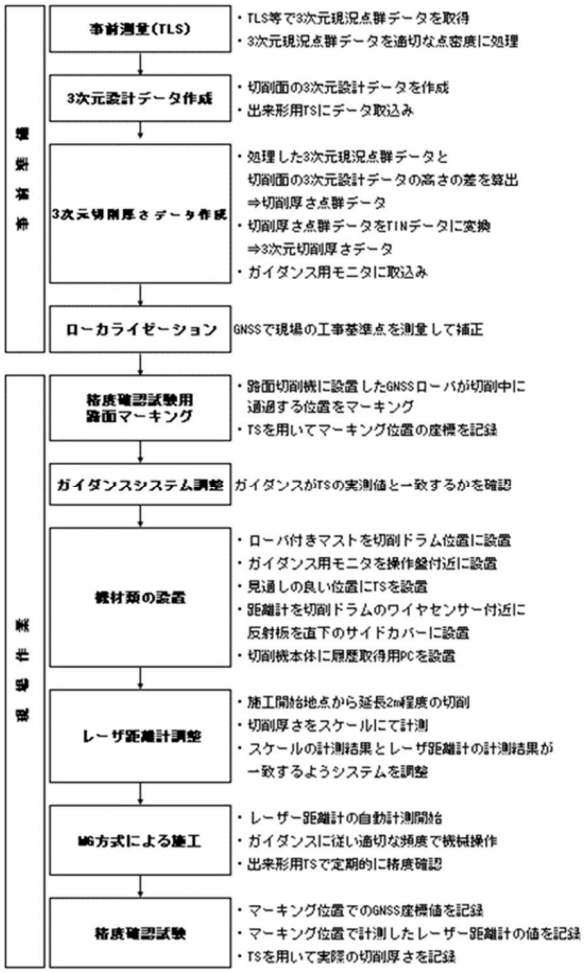



図-2　施工履歴システムを使った GNSS 式 MG の施工フロー

事前準備として，TLS で計測した 3 次元の現況点群データに基づいて切削面の設計を行い，3 次元設計データを作成し，これらのデータを用いて 3 次

元切削厚データを作成する。また，GNSS を使用するために現地においてローカライゼーション作業を行う。

現場作業における GNSS 式 MG システムのキャリブレーションは，MG のモニタ表示値と TS の表示値との差異を確認してシステムの調整を行う。その後，切削機の切削ドラム部分に GNSS ローバを付けたマストを，オペレータが操作する位置にガイダンス表示用モニタを設置する。

施工履歴システムの準備として，まず，施工履歴システムの精度確認用に日々の施工開始地点付近の GNSS ローバが通過する位置を選定し，その位置の設計値を路面にマーキングする。その後，切削ドラム左右のワイヤセンサ付近にレーザ距離計を，レーザ距離計直下のサイドカバー部分に白色反射板を，リアルタイムに計測結果を保存する PC をそれぞれ設置する。

施工履歴システムのキャリブレーションは，作業開始時に延長 2m 程度の予備切削を行って現況面と切削面の差（切削深さ）をスケールで計測し，PC に表示されたレーザ距離計の数値とスケールによる実測値が一致するようシステムを調整する。

GNSS 式 MG システムおよび施工履歴システムのキャリブレーションが完了後，施工履歴システムで計測を行いながら GNSS 式 MG の作業を行い，作業終了後に各装置を切削機から取り外す。

## ３．施工履歴データの生成手順

施工履歴データの生成に必要なデータを以下に示す。まず，GNSS ログデータの点群処理を行い，この高さデータを 3 次元現況路面データの値に置換する。次に，その処理データに対応する時刻の切削厚さをレーザ距離計のログデータから抽出し，両データを合成させるという手順で行う。

・3 次元現況路面データ
・GNSS のログデータ(時刻,x,y,z)
・レーザ距離計のログデータ(時刻,切削深さ)

### 3.1　GNSS ログデータの点群処理

GNSS ログデータは使用するシステムや計測時間によって異なるものの，1 日の施工あたり 10,000～100,000 点程度のデータが得られる。このデータには施工履歴として必要となる作業中のデータだけでなく，ノイズと呼ばれる路面を切削していない（切削ドラムが路面より高い位置にある）時のデータが含まれている。

点群処理方法を試行錯誤した結果，まず切削機の進行方向に対し 0.25～0.5m 毎に 1 点の GNSS ログが残るよう表計算ソフトで点群密度調整を行い，次に施工レーン毎にデータが得られるように点群処理ソフトで各点群の計測時刻に注意しながらノイズ処理を行い，最後に，施工レーン毎のデータとなるよう区分けを行う方法とした。施工履歴データをレーン毎に作成する概念図を図-4 に示す。

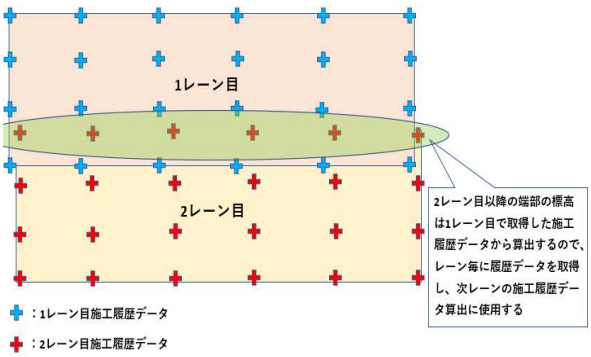



図-3　切削レーン毎の施工履歴データ

### 3.2　現況高さのログデータの生成

レーザ距離計は切削ドラムの両端に設置しているものの，GNSS ローバは切削ドラムの片側のみの設置である。そこで，GNSS ローバと反対側のレーザ距離計の位置は，GNSS ログデータから得られる切削機の進行方向に対して直角方向に 2.05m（切削ドラムの幅）の位置として新たに点群を設けた。

次に，GNSS 測量は ICT 舗装工（修繕工）で要求される高さ精度が確保できないため，TLS 測量で求めた 3 次元現況路面データを使って各点群の高さ（z 方向）データを置換して現況高さのログデータ（時刻 x,y,現況高さ）を生成した。

### 3.3　出来形評価用施工履歴データの生成

生成した現況高さのログデータ（時刻,x,y,現況高さ）とレーザ距離計のログデータ（時刻,切削深さ）を使って切削高さの施工履歴データ（時刻,x,y,切削高さ）を算出し，これを施工履歴データとした。

算出した施工履歴データは切削機の進行方向から直角に 2.05m 幅で配置されたデータ群である。管理要領では横断方向においては切削幅に応じて施工履歴データを算出して良いとなっていることから，前工程で得られた両端 2 点を使って点補間を行い，密度調整をすることで，出来形評価を行うための計測点が 1m²に 1 点以上となる施工履歴データを生成した。

## ４．施工履歴データの精度検証

### 4.1　検証内容の概要

今回の手法により取得した施工履歴データの検証を目的に，施工履歴システムを使った GNSS 式 MG を行った切削面について TLS 計測を行い，それぞれの面管理による出来形評価結果を比較した。

検証を行った工事概要を表-2 に，施工状況を写真-2 に示す。現場は片側 2～3 車線のうち上り追越

車線の直線部分で計測を行った。なお、路面切削機はホイール式の酒井重工業社製 ER552F であり，熟練オペレータが機械操作を行った。

表-2　施工履歴データの検証を行った現場概要

| 項目 | 内容 |
|---|---|
| 工事名 | Ｒ２神奈川出張所管内舗装修繕他工事 |
| 発注者 | 国土交通省　横浜国道工事事務所 |
| 施工場所 | 神奈川県横浜市戸塚区東俣野町付近 |
| 施工数量 | 上り車線、L=65.71m,W=約 3.5m |
| 施工内容 | 切削オーバーレイ工<br>路面切削（t≒100mm）<br>オーバーレイ（基層 t=50mm、表層 t=50mm） |

写真-2　施工履歴データ取得の施工状況

## 4.2　検証結果

施工履歴データと TLS 計測それぞれの面管理による測定結果一覧を表-3 に，出来形評価結果をヒートマップで比較したものを図-4 に示す。

なお，測定項目は標高較差であり，データ処理は管理要領に基づき以下の方法で行った。

① 計測対象面について 1m²以内のグリッドを設定し，グリッドの中央あるいは格子点に評価点（ｘ，ｙ）を設置する。

② 評価点の標高値は，評価点を中心とする 1m² 以内の実計測点と設計面との差の最頻値又は差の平均値を設計値に加算した値を用いる。

表-3　測定結果一覧

| 項目 | 施工履歴データ | TLS 計測データ |
|---|---|---|
| データ数 | 223 | 223 |
| 平均値 | 1mm | 0mm |
| 最大値 | 8mm | 10mm |
| 最小値 | -5mm | -8mm |
| ばらつき(±80%以内) | 100% | 100% |
| ばらつき(±50%以内) | 100% | 99.5% |
| ばらつき(±20%以内) | 81.1% | 81.1% |

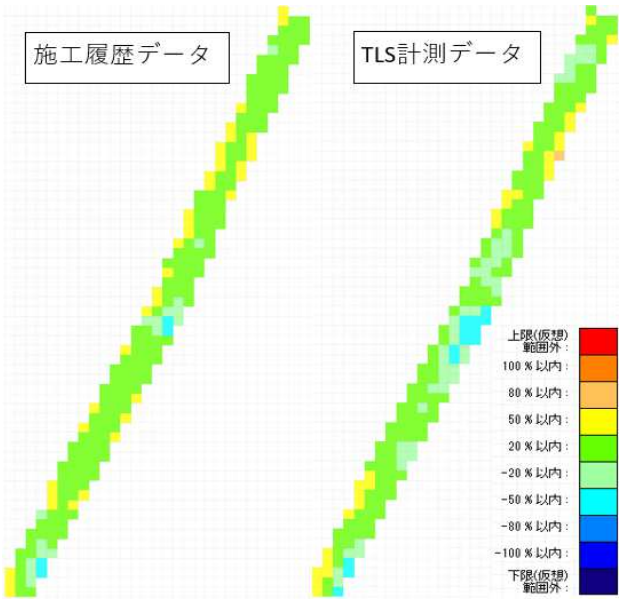



図-4　ヒートマップ

## 4.3　検証結果の考察

図-4 より，施工履歴データと TLS 計測データのヒートマップは色区分の分布が類似していることが分かる。施工履歴データのヒートマップにおいて青色よりも黄色が多い分布である理由は，点群データより平均値が 1mm 程度高くなったことが原因として考えられ，施工開始時のレーザ距離計の調整を正確に行うことで解決できると考えられる。

表-3 において平均値，最大値，最小値を比較すると，各項目とも非常に近い結果が得られている。最大値、最小値それぞれの差については TLS 計測の評価対象点数が約 21,000,000 点であるのに対し，施工履歴データの評価対象点数約 2,000 点と点密度に差があり，最大値，最小値の振れ幅に違いが出たと考えられる。しかし，評価点全点におけるばらつきはほぼ一致しており出来形評価に使用する施工履歴データとして，十分な精度が得られていると判断できた。

## ５．まとめ

今回得られた結果から，本手法による施工履歴データは出来形資料として十分利用できると判断できる。本技術を路面切削機の MC・MG と併用することで，従来の路面マーキング作業や切削面の出来形管理を削減することができ，生産性・安全性の向上に寄与できると考える。今後は様々な現場条件に適応できるよう改良を行い、路面切削工におけるさらなる生産性の向上を目指す。

## 参考文献

1)　宮内ほか：路面切削機での GNSS を用いたマシンガイダンス活用事例について,令和 1 年度　建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集

# 12. 重機の履歴データを用いた出来形管理に関する考察

## ICT 施工の効率化へ向けて

株式会社大林組　　○ 田島　僚

### １．はじめに

ICT 活用工事では最終的な３次元の出来形管理の方法として，UAV や LS などで計測することが必要である。このような計測方法は３次元計測における一般的な方法として活用が広まっている。本稿ではこのような計測作業に加えて、３次元計測をより効率的に実施するために検討した事例を報告する。

なお，本試行の取組み内容については，図-1 に示す 2020 年度国土交通省の「民間等からの提案に基づく ICT を活用した出来形管理に関する基準類整備」へ応募し採択され，検証した内容の一部である。

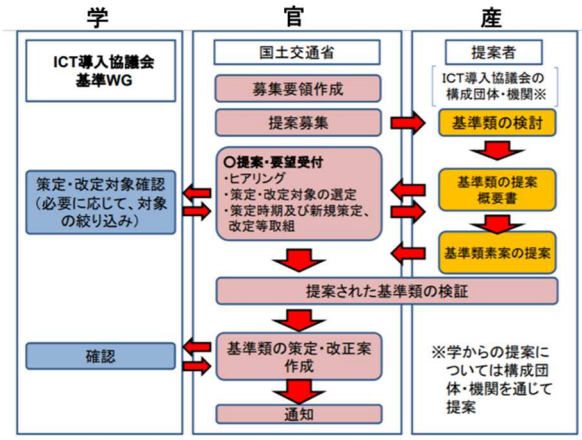



図-1　ICT 施工の基準類作成に関する募集体制

### ２．３次元計測にかかる課題と解決策について

土工事の出来形管理業務は，UAV や LS などを用いて効率化されているが，現場全域で実施するには天候などの状況に左右されやすく，現場情報を反映するのに時間を要するという課題がある。そこで，ICT 建機が取得する衛星測位の情報を活用することを検討することとした。

写真-1 及び図-2 に ICT 建機の概要について示す。ICT 建機は、通常の建機に衛星測位用のアンテナと角度センサーを取り付けることにより，リアルタイムに重機の施工箇所の計算を行っている。オペレータはこの計算された計測個所を運転席のモニターで確認することができる。また施工箇所に加えて，設計位置を重ねて表示することにより，所定の作業までの掘削深さなどを確認することができる仕組みとなっている。

このように計算された重機の計測データはログが記録されており，図-3 に示すように不要なデータを削除することで，施工箇所の計測データとして活用することができる。このようなデータを本稿では建機の施工履歴データと呼び，必要に応じて確認できるシステムを構築すれば，リアルタイムに近い出来形の確認を行うことが可能になり，業務の改善が望まれる。特に小規模な現場においては，計測業務にかかる時間が短縮され，業務改善になることが予想される。

写真-1　ICT 建機全景

図-2　ICT 建機オペレータ画面

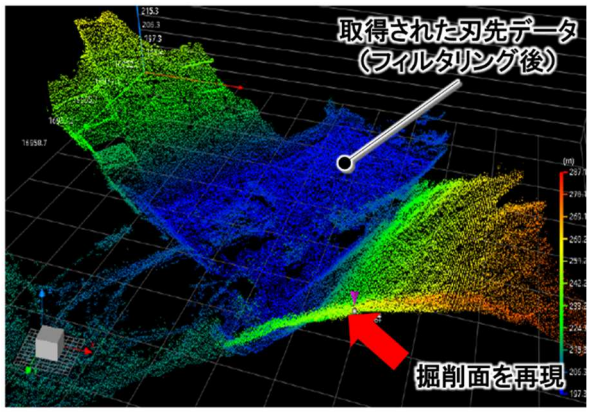



図-3　建機の施工履歴データ例

## ３．検証内容について

そこで，ICT 建機を使用して，盛土法面の施工を行い，ICT 建機から得られるデータを取得し，精度検証を行うこととした。

使用機械：0.7BH（日立建機製 ZX200X）
対象盛土面積：5,000 ㎡

写真-2 に示すように自己位置計測可能な ICT 建機を用いて法面での施工を行った。マシンガイダンス機能を用いて施工を行い，重機の刃先の測位データを取得した。施工方法は下記の 2 通りとした。

① 刃先を法面に押しつけながら施工，計測
② 刃先を法面に沿わせながら施工，計測

２通りの施工を実施した理由は、①の場合は実際の法面整形の施工途中を行っている状況を再現した状態、②の場合は法面整形後に計測のために再度法面をはわせるという状態を再現するためである。

写真-2　検証状況

また不要なデータを排除するために作業開始時及び作業完了時の時刻を記録した。重機の刃先位置の測位を記録した時刻からフィルタリングし，法面施工時の出来形点群の生成を行った。写真-3 に示すように，別途精度検証用にＴＳを利用して，地上に配置する検証点の真値計測を行った。履歴データから得られる 3 次元座標と TS にて計測した検証点の3次元座標を比較し，精度検証を行った。３次元データの確認のために，写真-4 に示すように従来の UAV を用いた計測についても実施した。

写真-3　TS 計測状況試験状況

写真-4　UAV 計測状況

## ４．検証結果

### 4．１　静止座標比較

刃先データの抽出し点群化したものが図-4 であ

る。点群は実際の施工期間中の時刻歴を用いて、該当箇所のデータをフィルタリングしたものを使用している。これをもとにメッシュを形成し，TS から得られるデータと標高値の比較を行った結果が図-5 である。TS との比較では最大 19mmであった。施工方法の比較では標高差の平均が押しつけで 0mm，なぞりが 9mmとなり，法面に対して押し付けて施工するほうが TS との標高差は少ない結果となった。

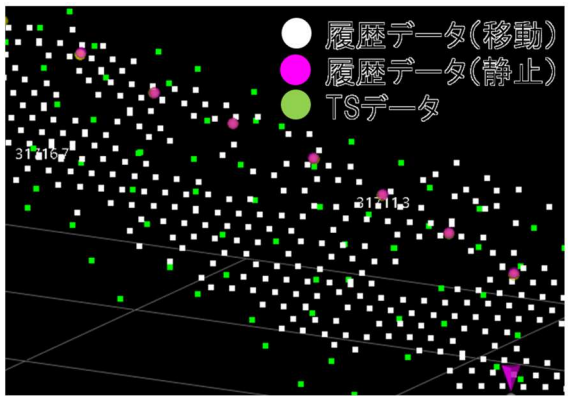



図-4　取得データ

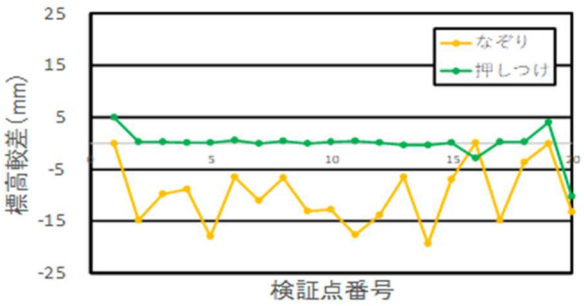



図-5　標高値比較結果

## 4．2　3 次元設計との比較

履歴データを施工時に使用した 3 次元設計データと比較したものが図-6 及び図-7 である。国土交通省が定める土工事の 3 次元出来形管理基準に従いヒートマップを作成した。出来形判定の結果，すべての対象において出来形が確保されていることを確認した。TS との比較から計測精度も±5cm を確保できているため，出来形計測についても十分に使用できるデータを取得できていることを確認した。

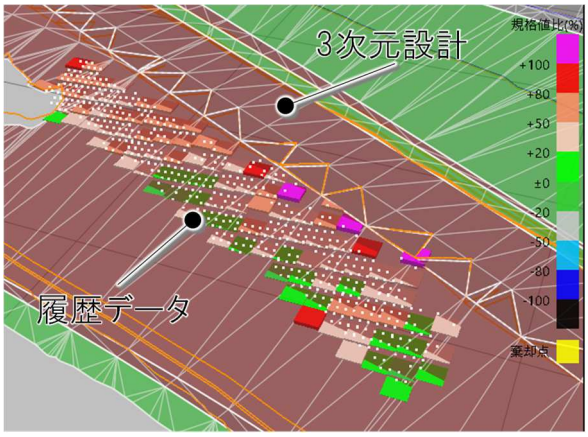



図-6　取得データ

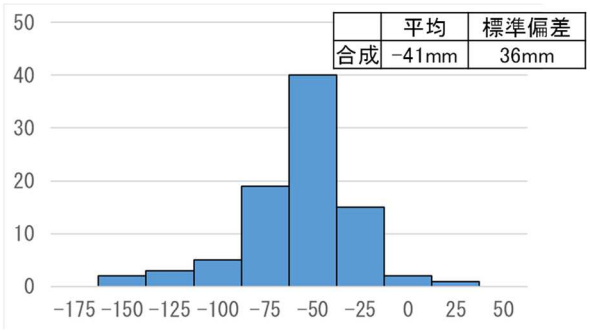



図-7　3 次元設計データ比較

## 5．検証結果

本検証から得られた結果を表-1 にまとめた。今回の手法を用いることで，土工事における出来形管理を効率的に計測することができた。特にこれまでは切土面への適用のみに限られていたが，時刻歴データによるデータフィルタリングを行うことで，盛土面へも適用が可能であることが確認できた。今後の課題は大きく 3 点ある。1 点目はデータ取得の確実性の向上である。今回の検証では衛星測位データが部分的に抜ける現象が発生した。最終的な出来形判定には大きく影響はしなかったものの，施工途中で確認するなどの対応が今後必要と思われる。2 点目はデータのフィルタリング方法についてである。今回は時刻歴を用いて行ったが，実際の施工を考えると運用は難しいと思われる。今後は時刻歴以外でのデータのフィルタリング方法を検討し，さらなる効率化を検討することとする。3 点目は出来形要領への記載取り組みである。計測方法としては現状では要領に記載がないため，本施工での適用が難しい。

表-1　検証結果まとめ

| | 既存の管理手法 | ＩＣＴを用いる新管理手法 | 評価 |
|---|---|---|---|
| 出来形品質（性能） | UAVやLSを用いた計測手法 | 重機の履歴データを用いて切土･盛土面の計測を行う手法<br>3次元の出来形管理の計測精度は±5ｃｍを確保 | ◎ |
| 効率 | 計測のための機材の準備や解析作業が必要 | ICｔ建機による施工を行った段階でデータの取得は完了しており，システム上でのデータ処理のみで計測データを取得することが可能 | ◎ |
| 安全性 | 計測のために施工現場内での作業が必要で，事故災害等の恐れがある。 | 計測データ取得は重機から行うことができ安全 | ◎ |
| コスト | UAVやLSの機器及びソフトウェアのコストがかかる | ICT建機の費用はかかるが，標準化できれば汎用品を使用する等でコスト縮減が可能。 | ○ |
| その他 | | これまで切土面のみの確認に限られていたが，盛土面への適用も可能 | ◎ |

図-8　出来形管理要領改訂概要

## ６．おわりに

本検証内容に関しては，日建連を通じて2020年度国土交通省の「民間等からの提案に基づくICTを活用した出来形管理に関する基準類整備」の提案に応募した。その結果，本検証内容が採択され，2021年度のICT活用工事の規準に反映された。改定内容の概要については図-8 に示す通りである。改定内容により，建機から得られる測位データから土工事における出来形管理を行うことができるようになった。

本検証にあたっては，日立建機株式会社様，福井コンピュータ株式会社様，株式会社宮本組様には多大なるご支援いただきましたことをこの場を借りて深く御礼申し上げることとし，本稿を終えることとする。

# 13. 建設現場へのアシストスーツ導入の可能性について

## 建設現場への導入促進のための検証の取組み

国土交通省総合政策局　　○ 味田　悟
株式会社日本能率協会総合研究所　平石　浩之

### 1．はじめに

建設業界特有の課題として就労者の高齢化、就労者数の減少、低い労働生産性などがある。その一方、災害対応やインフラの老朽化対策の必要性は高まっている。

国土交通省では、2016 年より i-Constrction として、機械施工における ICT 技術の活用等により建設現場の生産性向上に取組んでいる。しかし、建設現場には人による施工が多くあり、この人による施工の生産性向上を目的に農業や介護の現場に導入されているパワーアシストスーツ（以下、「PAS」と言う。）について着目し、導入を図るための取組みを始めた。

### 2．令和２年度検証試験の概要

本検証は令和２年度に建設作業の基本動作を検証するために模擬的な建設作業空間を設営し、PAS の効果検証を行った。

### 2.1　検証建設作業

検証は、以下の 3 種の模擬の建設作業（図-1）で行った。短期間での検証のため、作業間の疲労が蓄積しにくい負荷設定とし、一作業は概ね５分内で完結する作業とした。

① 人力土工：掘削及び一輪車運搬

多くの現場で作業される掘削及び一輪車による運搬作業。掘削時の腰負担や積込の土の持上げ、一輪車移動時の負荷への助力を検証。

② 小運搬：建物階段

通路幅がある建物階段において資材を抱えた運搬。約 15 kgの資材を持った状態で階段昇降における腰や脚部への負荷への助力を検証。

③ 小運搬：仮設足場

建物２階高の仮設足場において約 15 kgの資材を持った運搬。狭隘な足場内における動き易さや、助力による作業しやすさを検証。

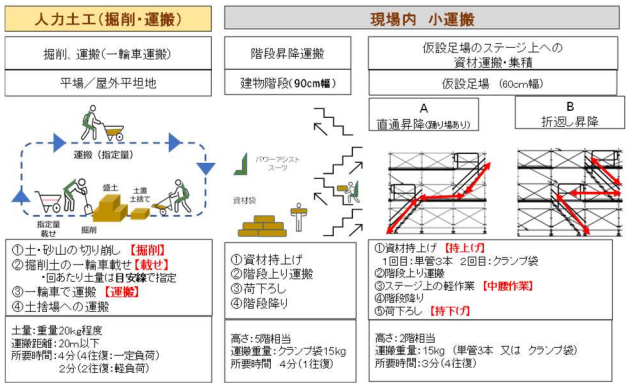



図-1　作業および負荷の概要

### 2.2　検証 PAS

検証対象 PAS は２種４タイプ（図-2）とした。ゴムや空気圧で助力を得るパッシブ型２タイプ（図-2）、モータなどにより助力を得るアクティブ型２種（図-3）で行い。助力部位はパッシブ方が腰、アクティブ型は腰と腿である。また、形状は外骨格型３種と身体フィット型１種である。

図-2　検証 PAS と機能概要

図-3　検証 PAS（パッシブ型２種）

図-4　検証 PAS（アクティブ型２種）

## 2.3　被験者と検証作業の対応

被験者は職能別に３群、年代も 20 代から 50 代の合計 12 人。経験状況、身体的な状態、PAS に関わる事前の認知状況などは表-1 となる。

表-1　被験者属性と検証作業の対応

| 模擬作業員の種類 | | | 普通作業員 | 監理者等注1) | とび工 |
|---|---|---|---|---|---|
| 年代 | | | 20～50代 | 20～50代 | 20～50代 |
| 人数 | | | 4人（各年代1人） | 4人（各年代1人） | 4人（各年代1人） |
| 経験年数 | | | 20代:4年、30代:9年<br>40代:1年、50代:5年 | 20代:1年未満、30代:4年<br>40代:15年、50代:34年 | 20代:6年、30代:12年<br>40代:24年、50代:34年 |
| 過去に大きなけが有無 | | | ない | ない | ない |
| 現状の腰痛 | | | ない1名（20代）<br>ある1名（30代）<br>ときどき痛み2名（40代、50代） | ない | ときどき痛み3名<br>（20代、40、50代）<br>ある1名（30代） |
| PASの事前認知 | | | 知ってはいたが<br>利用経験無し<br>（全年代） | 試着経験あり<br>作業経験なし<br>（全年代） | 知ってはいたが利用経験<br>なし2名（20代、40代）<br>未認知2名（30代、50代） |
| 模擬作業 | 人力土工 | | ●（一定負荷注2)） | ●（軽負荷注2)） | |
| | 小運搬 | 建物階段 | | ● | |
| | | 仮設足場 | | | ● |

## ３．検証結果と現状 PAS の評価

検証は、装着および未装着で同一作業を実施し、未装着と比べ装着したことにより作業の早さ、負荷に変化が生じるかアンケート方式で行った。また、グループヒアリングにより装着作業による各種の評価を得た。

### 3.1　作業の早さと負荷の軽減

(1) 人力土工：掘削と一輪車運搬

人力土工（図-5）では、監理者等で PAS を装着した土の持上げや中腰作業において、未装着時に比して作業が早くなるとの体感を得た（図-6）。特にアクティブ型ではその効果を強く感じた。実際の作業時間は、未装着での作業時間の方が早く（図―7）、身体負担が軽減し疲労感が低下する事で作業が早くなったと感じていると考えられる。新規入職者の移動を伴わない掘削作業に有効であることが確認された。

図-5　人力土工（掘削作業と一輪車への積込み）

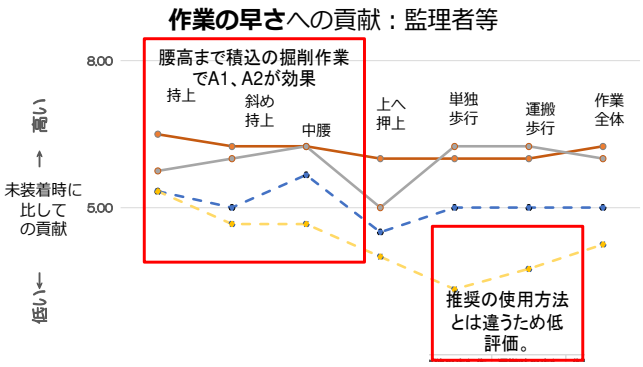



図-6　装着による人力土工作業の早さへの貢献：
監理者等（4 人平均）

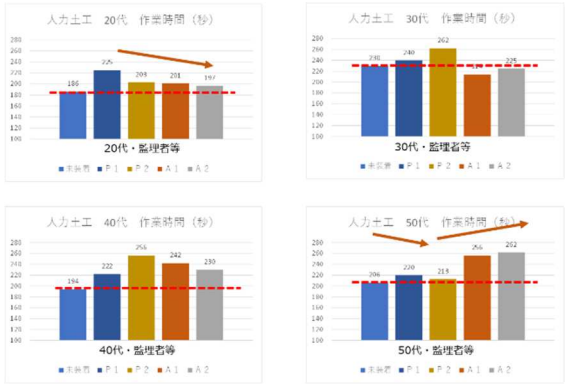



**図-7　未装着時と装着時の作業時間：**
**監理者等（年代別、作業に要した時間）**

監理者等（図-8）と普通作業員（図-9）で負担軽減の評価が異なった。

これは、掘削作業に慣れている普通作業員は各々の身体にあった動作が身についており、意図しない助力や普段と違う作業姿勢などを強いられることに抵抗感があったと思われる。

一方、新規入職者に相当する監理者等は、不慣れな作業で助力が働くことによる負担軽減が感じられこのような評価となったと考えられる。

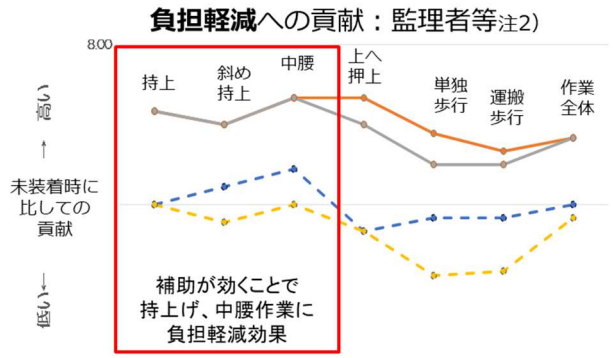



図-8　装着による人力土工作業の負担軽減の貢献：監理者等（4人平均）

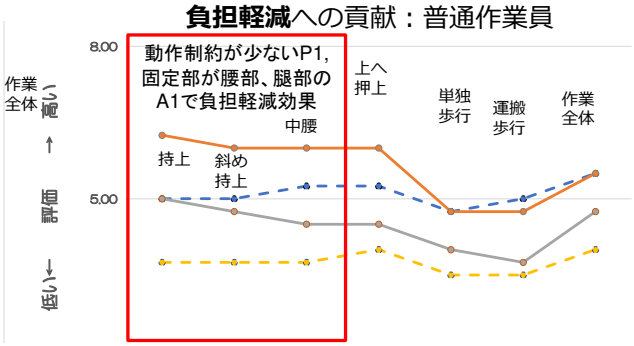



図-9　装着による人力土工作業の負担軽減の貢献：普通作業員等（4人平均）

(2) 小運搬（建物階段）

監理者等による建物階段の小運搬(図-10)では15kgの資材持上げ時に助力が働き、足にも助力が働くことで負担の軽減（図-11）になると評価された。アクティブタイプによる資材を抱えての運搬昇降に有効であることが確認された。

図-10　小運搬（建物階段の昇降と資材持ち上げ）

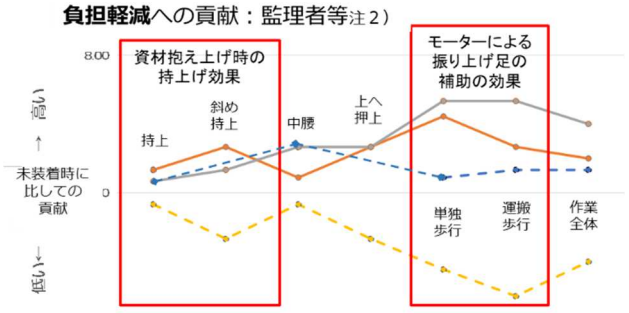



図-11　装着による資材抱えての建物階段の昇降負担軽減の貢献：監理者等（4人平均）

(3) 小運搬（仮設足場）人力土工

とび工による仮設足場内の小運搬では、単管パイプや資材を抱えての昇降移動、頭上に制約がある中で移動作業（図-12）を実施し、中腰作業、上への押上作業において負担軽減になるとの評価がされた。歩行時の助力による負担軽減（図-13）も評価された。重量物の持上げ、下げ作業に有効であることが確認された。

図-12　小運搬（仮設足場の昇降と中腰の潜抜け）

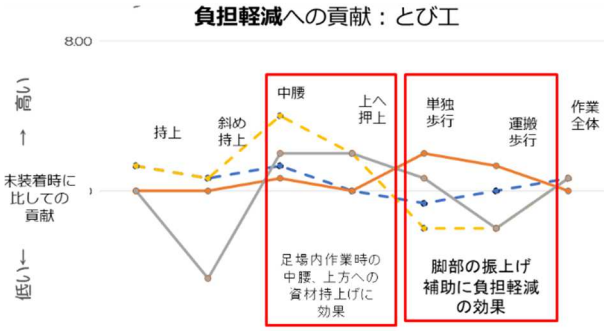



図-13　装着による仮設足場作業の負担軽減の貢献：とび工（4人平均）

## 3.2　装着感や活用全体

装着感や今後の利用意向等のヒアリングを実施した（表―2)。スーツの重さ等は概ね容認の範囲であり、掘削や重量物の持上げ作業、中腰が継続するような作業において継続利用の意向が示された。さらに操作性の改善などを行うと、利用度は高まるとの声が聞かれた。

一方、用具等をつける腰ベルトや、高所作業時のフルハーネス型安全帯との同時装着が１種を除き困難であり、現状の形状では高所作業に適していないとの意見が挙げられた。また、現状の価格面等からは個人購入が難しいのではないとの意見も聞かれた。

表-2　グループヒアリングなどからの評価

| パッシブ | | アクティブ | |
|---|---|---|---|
| P1　身体フィット型 | P2　外骨格型 | A1　外骨格型 | A2　外骨格型 |
| □ 現場で使用の意向。<br>□ 手軽でかつ一定のアシスト効果がある。<br>□ フルハーネス併用可で、建設作業対応しやすい。<br>□ 装着性、動きやすさなど比較的普及しやすい要素を有す。 | □ （会社などから）提供される場合に使用意向。<br>□ 特定の作業（中腰主体、動き回らない）には効果を発揮できる。<br>□ 意外と軽く、装着に抵抗感は少ない。 | □ 価格次第では購入の意向。<br>□ 持上げ、階段昇降、持ち運びで良好な評価。<br>□ 道具装着への対応、操作性の改善などを行うと、今後利用度は高まるとの声。 | □ 特定の作業（例えば持ち上げ作業）で効果を発揮。<br>□ 運搬歩行、階段昇降でも効果を発揮。<br>□ アシストが比較的強力である点に高評価。 |
| ➢ アシストがもの足りないとの声もある。 | ➢ 足場内では背中の突起が邪魔との声がある。<br>➢ （腰部への補助得るには）大腿部に反力が働き、歩行や階段昇降には、あまり向いていない。 | ➢ 操作の分かり難さ、装着時の圧迫感を感じる被験者もあった。<br>➢ 比較的良否の評価が分かれる。<br>➢ 高価なPASイメージから、壊してしまう懸念ももたれた。 | ➢ アシストが強力な分、その動きに違和感を持つ被験者もある。<br>➢ 複雑な作業で瞬時の動きがし難いとの声もある。 |
| | ➢ （装着位置により）スーツがズレて痛さ感じる場合がある。<br>➢ （使い慣れていないので）動作がしにくい場合がある。 | | |
| ➢ 指先や腕の補助もあるとよい（長尺や不定形の資材、資材袋や土のう袋の持上げや保持しての移動作業時） | | | |

## 3.3　現状 PAS の評価

建設模擬作業における動作要素を踏まえ、人力作業の適用において、現状の PAS は次の５種の動作に一定の適用可能性（図-14）がある点が確認された。

①連続の掘削：盛り土や床掘など
②中腰を維持しての作業
③重量物の持上・下げ（据付）等：　地面・床面からの重量資材等の持上げや、荷台などからの地面・床面への持下げ
④資材抱え上げの運搬歩行・昇降：鉄筋や鉄骨、建設構造材などを抱えての運搬歩行や昇降
⑤目線高さや頭上への持上げ

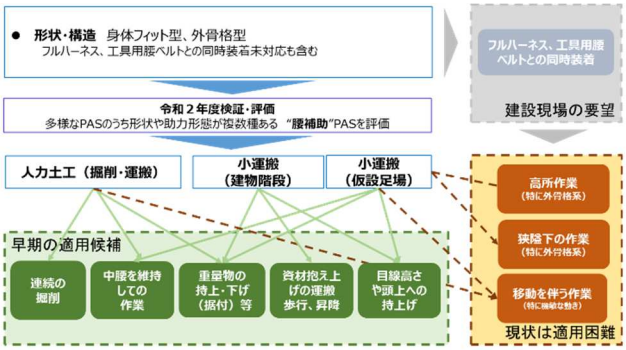



図-14　検証からの適用作業動作

## ４．令和３年度の試験検証の取組み

### 4.1　PAS 適用の作業工種候補

PAS の助力特性、５種の動作への適用が把握出来たことより、令和３年度は次の作業工種（図-15）を約２０の実建設現場で導入に向けた検証を行う。

①連続で行う床掘、重量物の持上げ作業②道路や河川などにおける PC ブロックや玉石等の敷設、作業、③水路工等における U 字溝および同蓋の敷設、④河川などにおけるブロック敷設やじゃかご、ふとんかご工における石詰め作業、⑤中腰維持作業が続く鉄筋組や芝張り付け、除草作業、⑥資材や施工用具の抱え上げや移動が伴うコンクリート打設や吹付作業、⑦目線高さなどへの持上げがあるボーリング作業などの建設作業。

また、災害時の国土交通省保有の排水ポンプ車の排水ポンプおよび排水ホースの設営作業。

図-15　適用作業の候補イメージ

### 4.2　実現場における長期検証

新たに PAS を公募し、実際の工事現場における効果の検証を行う。さらに昨年度の短時間作業での評価で得られなかった装着習熟による PAS 効果、10 日間の連続作業や長時間での苦渋作業における負担軽減効果の検証を行う。

## ５．建設施工における PAS の可能性

建設現場における作業は機械化が一定進展しつつも、作業環境や工種の特殊性から多様な面で人力作業に負う場面が引き続き残る。これらにおいて建設作業者が装着して助力を得られる PAS は、建設現場における生産性向上に貢献するものと期待される。

建設作業において、作業時の力の入れ具合や作業時の適切な作業姿勢を習熟していない新規入職者においては、作業時の助力が得られることにより負荷が減り、一定の生産性が得られるとともに、経験不十分故の身体故障の発生を予防することも期待される。

また、作業に応じて力の入れ具合や作業姿勢を最適に近い方法で行えるようなベテラン作業者においても、加齢に伴う瞬発力や持続力の低下を PAS で補うことで、安定した作業の持続に繋がり生産性の向上が期待できる。

現状は、建設作業のうち高所作業などで必須の安全帯や腰装具ベルトとの共用が構造上未だ十分でない点から、これらを必須とする高所作業等には適用が難しい。さらに、着脱や調整に一定の習熟や都度に時間や手間が必要な点で小まめな移動や、作業内容が頻繁に変わるような場合には適用や効果発揮が難しい面もある。このような課題には、開発者に対し建設現場における各種のニーズや要求項目を明確にすることで、新たな開発、改善や改良が進むことを期待する。

# 14.　ＩＣＴ施工に関する人材育成の取組について

国土交通省公共事業企画調整課　　古川　伸一

## １．はじめに

我が国の人口構造に起因する労働力不足は全産業に共通する課題であるが，建設産業においては，他産業と比較して就業者の高齢化が進んでいる。

国土交通省では，2016 年度から調査・測量から設計，施工，検査等のあらゆる建設生産プロセスにおいて ICT 等を活用する i-Construction に取り組んでおり，2025 年度までに建設現場の生産性を 2 割向上させることを目標としている。

## ２．ICT 施工の現状と課題

i-Construction の取り組みは「ICT の全面的な活用」「全体最適の導入」「施工時期の標準化」の３つのトップランナー施策から構成されている。

ICT 施工については，表-1 に示すとおり，直轄工事で対象になり得る工事のうち約 8 割で実施されており，図-1 のとおり延べ作業時間が約 3 割縮減するなどの効果が現れている。一方，地方自治体における ICT 施工の実施率は約 2 割にとどまっている。また，中小建設業における ICT 施工の経験企業の割合も図-2 に示すとおり，受注企業全体の約半分にとどまっており，中小建設業への普及拡大が課題となっている。

表-1　ICT 施工の実施状況

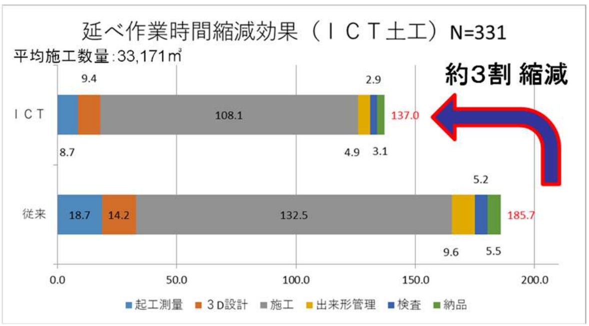
<ICT施工の実施状況>　　単位：件

| 工種 | 2016年度［平成28年度］ | | 2017年度［平成29年度］ | | 2018年度［平成30年度］ | | 2019年度［令和元年度］ | | 2020年度［令和2年度］ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 公告件数 | うちICT実施 | 公告件数 | うちICT実施 | 公告件数 | うちICT実施 | 公告件数 | うちICT実施 | 公告件数 | うちICT実施 |
| 土　工 | 1，625 | 584 | 1，952 | 815 | 1，675 | 960 | 2，246 | 1，799 | 2，420 | 1，994 |
| 舗装工 | — | — | 201 | 79 | 203 | 80 | 340 | 233 | 543 | 342 |
| 浚渫工（港湾） | — | — | 28 | 24 | 62 | 57 | 63 | 57 | 64 | 63 |
| 浚渫工（河川） | — | — | — | — | 8 | 8 | 39 | 34 | 28 | 28 |
| 地盤改良工 | — | — | — | — | — | — | 22 | 9 | 151 | 123 |
| 合計 | 1，625 | 584 | 2，175 | 912 | 1，947 | 1，104 | 2，397 | 1，890 | 2，942 | 2，396 |
| 実施率 | 36% | | 42% | | 57% | | 79% | | 81% | |

※「実施件数」は、契約済工事におけるICTの取組予定（協議中）を含む件数を集計。
※複数工種を含む工事が存在するため、合計欄には重複を除いた工事件数を記載。
※営繕工事を除く。

<都道府県・政令市の実施状況>　　単位：件

| 工種 | 2016年度［平成28年度］ | 2017年度［平成29年度］ | | 2018年度［平成30年度］ | | 2019年度［令和元年度］ | | 2020年度［令和2年度］ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 公告件数 | 公告件数 | うちICT実施 | 公告件数 | うちICT実施 | 公告件数 | うちICT実施 | 公告件数 | うちICT実施 |
| 土　工 | 84 | 870 | 291 | 2，428 | 523 | 3，970 | 1，136 | 7，811 | 1，624 |
| 実施率 | | 33% | | 22% | | 29% | | 21% | |




※ 活用効果は施工者へのアンケート調査結果の平均値として算出。
※ 従来の労務は施工者の想定値
※ 各作業が平行で行われる場合があるため、工事期間の削減率とは異なる。

図-1　ICT 施工における縮減効果（土工）

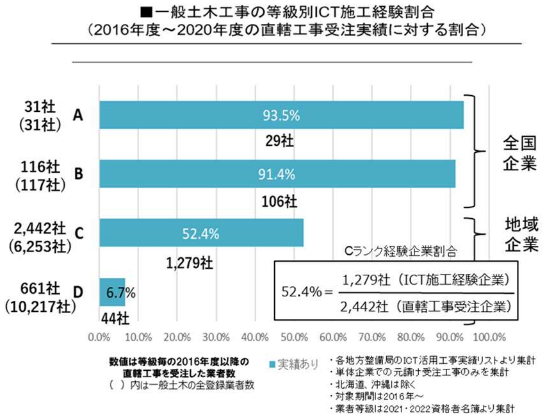



図-2　一般土木工事の等級別 ICT 施工経験割合

「i-Construction」 を推進していくためには，全国の建設現場に ICT 施工が浸透する必要があり，地方自治体工事を担う中小建設業者への普及が不可欠である。しかし，中小建設業者には ICT 施工の効果的な利用方法が判らず，ICT 施工に踏み出せない者や，踏み出しても ICT の利用に手間取る者もいることから，課題解決のためには発注者である地方公共団体や中小建設業の技術者に対し ICT 施工に関する支援を行う必要があることから，本取組を実施し，令和 2 年度は 9 自治体に対し支援を実施した。

## ３．ICT 施工に関する知見習得支援

ICT 施工に関する支援を実施するに当たり，各地方公共団体の取り組み状況に合わせた支援内容となるよう 9 つの自治体の状況を整理した。その

中で取り組み状況により２つのグループに分けた。その結果を表-2 に示す。

表-2　各地方自治体における取組状況

| グループ | 状況 | 自治体 |
|---|---|---|
| A | ＩＣＴ担当者による積極的なＩＣＴ運用の仕組みがあり、現場の情報収集を意欲的に実施している自治体 | a |
| | | b |
| | | c |
| | | d |
| B | ＩＣＴ担当者による積極的なＩＣＴ運用の意思があり、これからＩＣＴの積極的な推進を試みている自治体 | e |
| | | f |
| | | g |
| | | h |
| | | i |

地方公共団体の職員等（発注者および施工者）を対象とした ICT 施工の知見習得に向けて，ICT の活用目的と手段の関係性を理解できる内容を支援内容とした。

また，知見習得のための研修テキストには，多様な現場条件に対応できるようにするため，現場事例を題材として，既存技術の併用や ICT 導入が様々なケースで効果的であることを盛り込んだ。

### 3.1　Ａグループにおける知見習得支援

Ａグループである a～d に地方公共団体に対し，各地方公共団体における ICT 推進の取り組みの発表及び ICT 推進の課題と対応に関する意見交換を実施した。

Ａグループによる ICT 推進の取り組みにおいては，全地方自治体にとっての参考になることから，Ｂグループの自治体の希望者に傍聴できるように手配した。

### 3.2　Ａグループの研修内容の立案

意見交換の結果，Ａグループついては，ICT 担当者の人事異動により今までの知見が失われてしまう懸念がある。現在の知見を次の代へと繋ぐためにも，新任 ICT 担当者の教育が必須である。

また，他県への情報提供による知見の公開が，各地方自治体における ICT の推進に必要ということで認識が一致した。

### 3.3　Ｂグループにおける知見習得支援

Ｂグループにおいては，習得レベルに差があることから個別にヒアリングを行い，各県における現状の ICT 活用実績の把握，支援の必要性の確認を行った。

### 3.4　Ｂグループの研修内容の立案

Ｂグループついては，ICT 活用工事に向けた推進意欲はあるが，各自治体における ICT の認知度が少ないなど，受発注者双方に対し情報の公開が必須である。

また，Ａグループの ICT 担当者による積極的な ICT 運用の仕組みがあり，現場の情報収集を意欲的に実施している自治体の実施方針，現場での運用事例は，Ｂグループの自治体の運用方針の参考になることから，本業務で支援を行う全ての自治体を含めた，意見交換会を地方自治体における ICT 活用工事推進に向けた意見交換会を実施することとした。

### 3.5　地方自治体同士の情報交換会の実施

既に ICT 活用推進に向けて先進的に取り組まれている地方自治体において，地方自治体における課題とその対応策，今後の進め方についての意見を収集し，ICT 推進を進めていく上での考え方や注意点などを整理することを目的とした意見交換会を開催した。

### 3.6. Ａグループ，Ｂグループそれぞれの課題

Ａグループ，Ｂグループそれぞれにヒアリング調査をし，ロードマップ作成における課題を整理した結果を表-3 に示す。

Ａグループに関しては ICT 担当者が異動になった場合に知見がなくなってしまい，新任 ICT 担当者の再教育が必須である。

Ｂグループに関しては２～３年の期間にて，現場の情報収集を意欲的に実施している自治体と成長するために，各種 ICT 技術に関する認知度を上げるための研修を実施する必要がある。また，各地方自治体は国土交通省の実施方針を参考に，自らの自治体に合わせた ICT 実施方針の作成を行い，自らの自治体に合わせた運用を実施する必要がある。

表-3　各地方自治体における課題

| グループ | 課題 | 自治体 |
|---|---|---|
| A | ＩＣＴ担当者が異動になった場合、知見がなくなってしまう | a |
| | | b |
| | | c |
| | | d |
| B | ＜ＩＣＴ担当者＞<br>・ＩＣＴ担当者が異動になった場合、知見がなくなってしまう<br>＜受発注者双方＞<br>・ＩＣＴ技術の認知度が低い<br>・自治体が作成している実施方針の認知度が低い | e |
| | | f |
| | | g |
| | | h |
| | | i |

## ４．ICT 人材育成に関するカリキュラム（案）作成

ICT 人材育成に関するカリキュラムについて，以下の内容に留意し作成した。

①受注者・発注者が互いにフルメニューの実施を前提とはせず，生産性向上に着目した結果として部分的な活用を実施した事例等について，その検討経緯や根拠，積算対応を「好事例」として講習会資料に盛り込むこととした。

②モデル工事の実施地域で新たに ICT 導入を検討している技術者に向けて，講習会を企画・提案する。

③ICT を有効活用するためのアイデアや参考となる利用方法，企業経営者（現場代理人）が ICT 導入の判断を行うための採算性（工程短縮や原価低減）を判断するための試算方法や根拠データについて，過年度までの実施事例も含めて周知する。

④身近な作業でも３次元設計データが有効であることを体験（自分で実施できる技術である）する「体験型」の講義を企画・提案する。
⑤新たな ICT を用いる場合の対応として，ICT の新たな活用方法や提案事項に対する対応窓口や対応・判断事例，新たな技術開発や導入を促進する施策（Q＆A等）を周知する。

### 4.1　継続的な学習計画の立案

各地方公共団体において更なる ICT 活用の促進を目的とし，継続的な学習計画を立案するため，施工者・発注者において ICT 活用の促進課題を検討した。施工者に関しては２つの課題，発注者に関しては４つの課題を表-4 のとおり抽出し，課題に対する対応策をそれぞれ２つについて検討した。

その結果，受発注者共に ICT 活用に関する目的を再度共有し，受発注者間における ICT の活用に関する意識改革が最優先事項であると考える。

表-4　受発注者における ICT 促進の課題

| | | 課題 | 懸念事項 |
|---|---|---|---|
| 施工者 | ① | ＩＣＴ導入の目的化 | 発注者からの投資が無くなると同時に衰退 |
| | ② | ＩＣＴ活用ノウハウ・技術者育成の外部依存 | |
| 発注者 | ① | ＩＣＴ活用工事に必要となる経費の説明 | 積算の２重化 |
| | ② | ＩＣＴ活用工事に必要となる経費の負担、確保の措置 | ＩＣＴ導入による工事範囲の縮小 |
| | ③ | 現場条件への適合性判断の習得 | 施工者との協議が難航 |
| | ④ | 発注者のＩＣＴに対する意識改革 | ＩＣＴ導入の阻害 |

### 4.2　施工者の課題に対する解決策

施工者の課題に対応するためには，さまざまな解決策があげられる。ここでは，解決策の例を２つ下記に記載した。

①ICT 部分活用の推進

ICT の全面的な活用ではなく，部分的な活用を推進し，３次元設計データの理解度および活用方法の認知を広げることにより，ICT の核となる３次元設計データの運用に慣れることが重要である。

②３次元設計データの作成に注視した発注方法

施工者自ら３次元設計データの作成に慣れるため，内製化を指定した発注方式や，３次元設計データの作成を必ず行うという条件にて工事の発注を行い，作成した３次元設計データを利用の可否は施工者による判断をさせ，実現場による３次元設計データの作成に慣れさせるなど，３次元設計データの作成・内製化にできるようになることが重要である。

### 4.3　発注者の課題に対する解決策

上記発注者の課題に対応するためには，さまざまな解決策があげられる。ここでは解決策の例を２つ下記に記載した。

①ICT 推進員の配置

各土木事務所を代表し，発注者側の ICT 推進員を配置することにより，各現場事務所にて発生する ICT 活用工事の情報収集を行う。また，収集した情報は推進員会議等により他の現場事務所，県庁との情報共有を行う。

また，推進員会議等により，中部地方整備局等にて公開されているＱ＆Ａによる情報の周知等を行う事により，岐阜県における発注者側の認知度を高める。

②ICT 支援協議会の運営

ICT 支援協議会を開催することにより，建設業協会等と意見交換を行い，現場で発生している ICT 活用工事における情報収集，共有を行う事により，受発注者間にて意思疎通を行うことができる。

### 4.4　ICT 活用促進に向けたロードマップ（案）の作成

ICT 活用の促進課題より，課題を解決するための対応策を検討する必要がある。そのため，具体的に実施する研修内容について整理し，ICT 活用促進に向けたロードマップ（案）を図-3 のとおり作成した。

工事における受発注者間それぞれの立場に着目し，受発注者向けに共通する研修内容，施工者向けに行うべき研修内容，発注者向けに行うべき研修内容に分けて整理を行った。

その結果，各研修内容には各地方自治体の受発注者双方における ICT の認知度を把握し，各々の自治体に合わせた教育カリキュラムの検討が重要である。

図-3　ICT 活用促進に向けたロードマップ

### 4.5 ICT 活用促進に向けたロードマップ

各地方自治体は自らの自治体における受発注者

の ICT の認知度を認識し，ICT 活用の促進を行う必要がある。そのための ICT の認知度を踏まえた育成を行うためのロードマップを図-3 のとおり作成した。ICT の認知度においては受発注者共に共通する事項として整理が可能であることから，ICT の認知度について５段階に分類した。

表-4　ICT 活用促進ロードマップ

| 区分 | ＩＣＴの認知度 | 育成カリキュラム |
|---|---|---|
| 第１段階 | ＩＣＴを全く知らない | ＩＣＴ導入（ＳＴＥＰ１） |
| 第２段階 | ＩＣＴは難しい・高い | |
| 第３段階 | ＩＣＴをやってみたい | ＩＣＴ導入（ＳＴＥＰ２） |
| 第４段階 | ＩＣＴは使える | ＩＣＴ導入（ＳＴＥＰ３） |
| 第５段階 | 自発的に利用する | － |

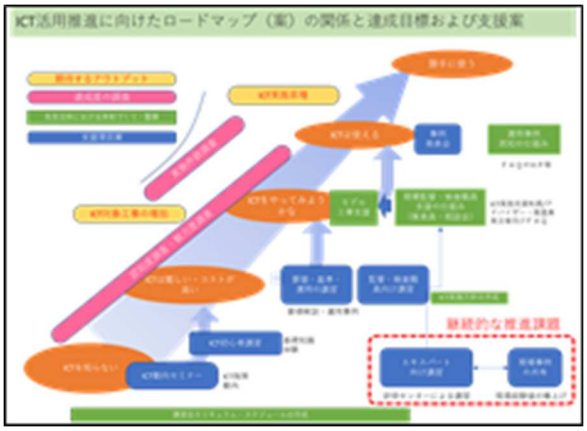



図-4　ICT 活用促進ロードマップイメージ

### 4.6 研修の実施

Ａグループ，Ｂグループ双方の地方自治体における ICT 活用普及を行うためには，各地方自治体の ICT 担当者を継続的な教育および情報収集が必要である。そのため，ICT 担当者の知見を蓄積するため，ICT の初心者向け研修および自治体同士の意見交換会による情報共有を行った。

## ５．最後に

ICT 施工を今後さらに普及させるため，本取組は続けていきたい。また，人材育成とは別に，小規模現場への ICT 施工の普及を目的とした「ICT 普及促進ＷＧ」も令和 3 年 8 月 27 日に設置し令和 4 年度から運用が開始できるよう検証を行っているところである。このような取り組みを進め ICT 施工の普及を進めていきたい。

# 15. 新技術情報提供システム（NETIS）のオンライン統合化等の改良

国土交通省 総合政策局 公共事業企画調整課　　渡邊　俊彦
○ 明野　光運

## 1．はじめに

国土交通省では、有用な新技術の積極的な活用を促進することで、公共工事の品質の確保や施工の効率化を図るとともに、技術の更なる改善を促進するための仕組みとして、平成 13 年度から「公共工事等における新技術活用システム」を運用している（図－1）。新技術情報提供システム（NETIS）は、この活用システム全体の中で、「新技術に係る情報の共有及び提供」を目的として整備・運用しており、令和 3 年 8 月時点で約 2,940 の技術が登録されている。申請情報や評価情報について自由に閲覧可能であり、公共工事関係者をはじめとした多くの方々に幅広く活用されている。

現在、新技術情報の共有においては、NETIS を利用することにより、オンラインで簡単かつ即座に実施することが可能である。しかしながら、新たな技術の登録申請手続きや、活用効果調査表の作成はオンラインで完結する仕組みとなっておらず、関係者間でのメールや電話による頻繁なやりとり等に、時間と労力を要している（図－2）。

これらの課題に対応するため、今般 NETIS の改良を実施した。既にオンラインで運用している NETIS の枠組みを活用し、登録申請や活用効果調査表の作成をシステム化するものであり、R3 年度、全国の各地方整備局等にて試行中である。

本報文では、今回実施した改良概要と期待される効果について報告する。

## 2．新技術の登録・活用・評価

新技術活用システムの基本的なサイクルは、前出の図－1 に示すとおりである。

まずは技術開発者が新技術の「登録申請」を行う。登録された技術情報は NETIS によって幅広く共有され、公共工事等において活用される。

活用の際には、事後評価の基礎となる「活用効果調査」が行われることとなっており、調査件数が一定数に達した場合に、産・学・官の有識者等で構成される新技術活用評価会議で事後評価が実施され、

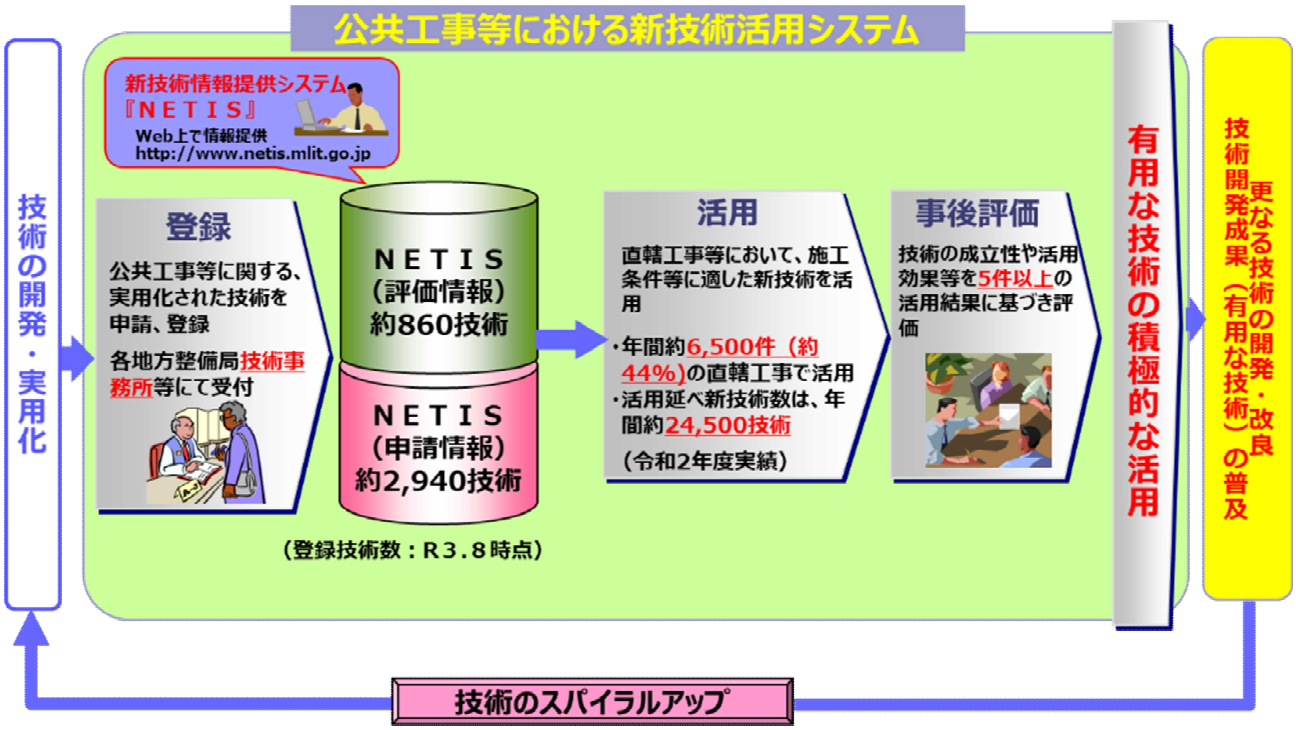



図-1　公共工事等における新技術活用システム

評価情報が NETIS に掲載される。

その後は、登録申請時の技術情報に加え、事後評価の結果も参考に、更なる技術の活用や改良・開発が進められることとなる。

今回の NETIS 改良では、この活用サイクルの中の、「登録申請」と「活用効果調査」に係る事務を対象として、NETIS の枠組みを活用したシステム化を実施した。

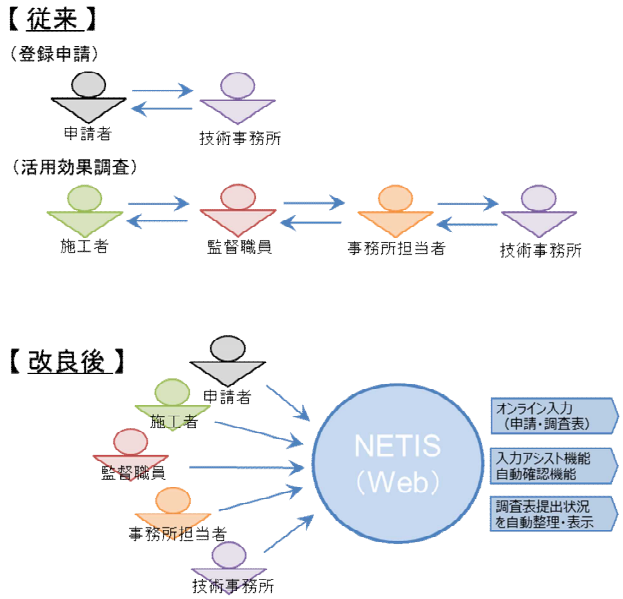



図-2　改良前後の事務手続き

## 3．登録申請のオンラインシステム化

### 3.1　登録申請の現状

技術開発者が行う登録申請の受付は、各地域の技術事務所等に置く相談窓口（以下、申請窓口）にて行っている。

登録申請は、申請窓口に対し登録の可否について相談するところから始まる。その後、申請書類の作成方法についての説明を受け、申請書を作成・提出する。

申請窓口は、提出された申請書類の技術の成立性や記載事項を確認し、修正必要事項を申請者に伝え、申請者は資料を修正後、再提出する。内容に不備が無くなったことを確認出来るまでこれを繰り返し、NETIS 登録に至る。

現在 NETIS に登録されている技術数は、前述の通り約 2,940 技術にのぼる。年間約 400 技術が新規登録されているが、登録に至るまでの平均日数は約 300 日であり、多くの日数を要している。

また、上記の一連の作業は対面・メール・電話を主として実施されており、次の課題を抱えていた。

### 3.2　課題

(1)　申請者から見た課題

・申請の際に記入する内容で何を記載すれば良いか分からない項目がある。

・申請の際に記入する項目に重複する記載項目があり、記載に負担がある。

・申請内容に対し修正を指摘された内容が理解できない。

(2)　申請窓口から見た課題

・申請書類はデータとしてメールで受領しており、また修正依頼データもメールにて送付する必要がある。

・申請書類の記載漏れや誤字脱字、文章校正等、確認項目が多岐に亘る。

・申請技術が新技術に適合するか、同一技術の再申請でないかの判断のため実施する調査（関係資料確認）にかかる負担が大きい。

・申請項目で重複している箇所の整合確認に時間を要する。

・申請が集中する窓口があり、申請確認に時間を要する。

(3)　新技術活用促進から見た課題

・登録に至るまでに多くの日数を要している。開発から活用までに時間を要することで、新技術としての価値（鮮度）が損なわれることが危惧される。

・申請者及び申請窓口の両者が、NETIS 登録に至るまでに多くの時間と労力を要している。

### 3.3　オンラインシステム化内容

現状の問題点を解消し、申請者・申請窓口双方の生産性向上と、申請受付から NETIS 登録までの時間短縮を図るため、以下のオンラインシステム化を実施した。

(1) オンライン申請機能

申請書類を電子申請出来るようにするとともに、申請者・申請窓口双方が修正事項を WEB 画面上で直接伝達できる機能を実装した。

NETIS 上にデジタルデータとして申請情報（添付資料を含む）を保存するため、メール等による資料の受け取り・保管が不要となる他、今後の様々なデータ活用が視野に入ってくる。

(2) 入力アシスト機能

申請画面上に、記入時の注意事項やルールを表示し、精度の高い申請内容となるように申請者をアシストする機能を実装した。記載漏れ、誤字脱字、“てにをは”等の不備を自動で指摘し修正候補を表示する機能、また申請者の質問に AI が回答するチャットボット機能を搭載しており、申請者・申請窓口双方の確認、修正に要する時間削減に貢献する。

(3) 自動確認機能

申請情報内容に遺漏が無いか、登録申請者と技術開発者が同一であるか、といった申請受理要件を満足するかを自動で確認し、その結果を申請者

へ通知する機能を実装した。

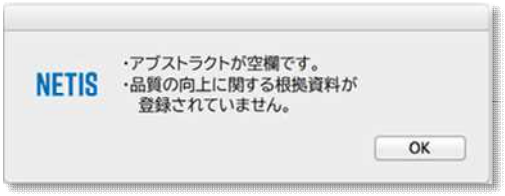



図-3　自動確認通知イメージ

(4) 入力様式の改良

申請者の重複記入作業、申請窓口の整合・転記確認作業の無駄を省くため、申請情報入力様式の改良（重複箇所の統合）を図るとともに、一部重複等で統合出来ない記入内容については、自動転記機能を実装した。

### 3.4　期待される効果

申請から登録までに必要となる作業項目を、従来とオンラインシステム化後で比較したものが図-4 である。二重枠で示した内容がオンラインシステム化に伴い削減される作業項目であり、破線枠は一部簡略化される作業項目である。

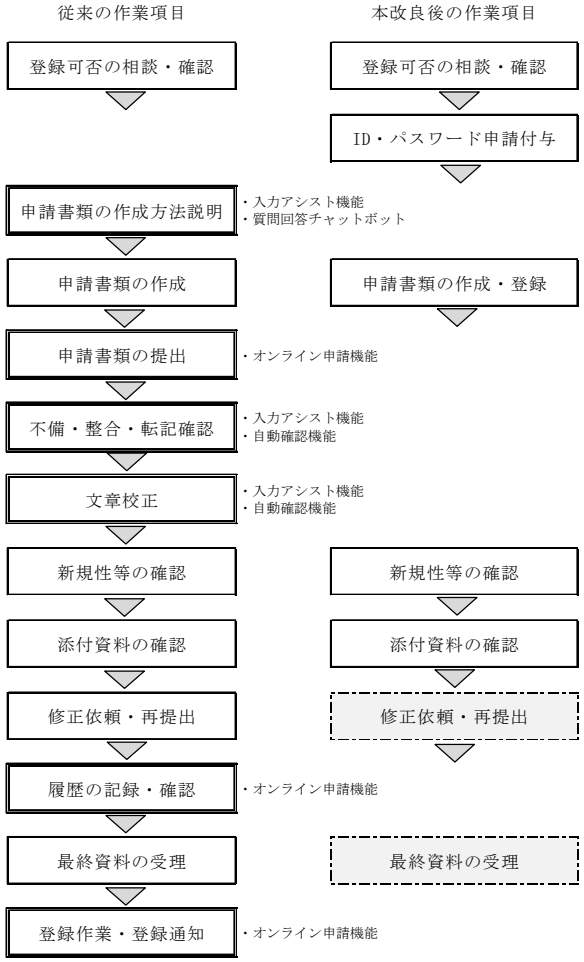



図-4　従来の作業フローとオンラインシステム化後の作業フロー比較

各機能の実装により、申請者・申請窓口両者の作業を削減することで、双方における生産性の向上が期待されるとともに、登録の迅速化が技術の開発から活用までの期間短縮に寄与し、一層の新技術活用をもたらすことが期待される。

また、登録申請に関する技術情報を全てデジタルデータとして保管出来るようになったことで、AI をはじめとした今後のシステム高度化に活用することが可能となり、更なる効率化に繋げていく。

## 4．活用効果調査のオンラインシステム化

### 4.1　活用効果調査の現状

直轄工事等において NETIS に登録されている新技術が活用された際には、発注事務所と施工者（当該工事の受注者）により、工程、品質・出来形、安全性、施工性、環境等を調査内容とする活用効果調査表の作成が行われる。

まず最初に施工者は新技術活用計画書を作成し、監督職員に提出する。

監督職員は施工者から提出された計画書の記入内容を確認し、発注事務所に報告する。

施工者は新技術を活用し次第、活用効果調査表の施工者分を記入し、監督職員に提出する。

監督職員は施工者から提出された調査表に発注者分を追加記入し、発注事務所に提出する。

発注事務所は、監督職員より提出された計画書に基づき、調査表の提出状況について集計表を作成し管理する。

これら受発注者間の全ての手続きをメールや ASP で行っており、関係者間の事務手続きが多くデータ共有が難しい。また、各々が受け渡すデータは、その都度 NETIS から取り出し・取り込みしなければ確認や記載が出来ない仕組みとなっており、時間と労力を要している。

### 4.2　課題

(1) 施工者から見た課題

・従来技術との比較評価基準や所見等、不慣れな者にとっては記載すべき内容に迷う場合がある。

(2) 監督職員から見た課題

・従来技術との比較評価基準や所見等、不慣れな者にとっては記載すべき内容に迷う場合がある。
・施工者からの提出ファイルに未記入や誤記入が見受けられ、修正・再提出に手間と時間を要している。

(3) 発注事務所から見た課題

・調査表の提出時期が集中した場合、調査表の確認や集計表の整理が困難となる。

(4) 技術事務所から見た課題

・調査表修正の依頼や再提出には何人もの関係者を経由する必要があり、状況の把握に難がある。

(5) 関係者共通の課題

・関係者間で受け渡すファイルは、NETIS 上に取り込まなければ内容確認が出来ない。また、作成したファイルも都度 NETIS から取り出し、保存・提出する必要がある。
・調査表記載内容の確認・修正が不十分な場合、評価段階になってから再度修正依頼するケースがある。

### 4.3　オンラインシステム化内容

現状の問題点を解消し、施工者・発注事務所双方の生産性向上を図るため、以下のオンラインシステム化を実施した。

(1) オンライン入力・登録機能

施工者・監督職員が WEB 画面上で直接調査表を入力・登録出来る機能を実装した。

これにより、受け渡しの都度必要だった NETIS へのデータ取り込み等を不要にするとともに、次担当者への入力依頼が自動で通知される機能も実装することで、調査表作成に要する時間と労力の削減を図った。

(2) 入力アシスト機能

調査表入力時に、作成者をアシストする機能を実装した。

記入必須箇所への未記載や必要書類の未添付に注意喚起する機能や、評価点とコメント内容に整合がとれない場合に注意喚起する機能、また調査者の質問に AI が回答するチャットボット機能を搭載した。施工者・発注者双方の調査表作成に要する時間削減に貢献するとともに、発注・技術事務所による確認・修正依頼作業を削減する。

(3) 提出状況管理機能

計画書・調査表の提出（登録）状況が自動的に表形式に整理されるとともに、関係各所でその情報をリアルタイムに共有できる機能を実装した。

多くの関係者を経由して作成するため把握が困難であった状況管理が容易となり、これにより調査表の確認や修正依頼等が迅速かつ確実に実施されることとなり、各関係者の労力削減と調査表の精度向上に寄与する。

| 工事／業務の別 | 計画書の提出 | 調査表の提出（発注者） | 調査表の提出（施工者） | 調査表の種別 |
|---|---|---|---|---|
| ▼/▲ | | ▼/▲ | ▼/▲ | ▼/▲ |
| 工事 | 提出 | 未提出 | 未提出 | 未評価 |
| 工事 | 提出 | 提出 | 提出 | 未評価 |
| 工事 | 提出 | 未提出 | 提出 | 未評価 |
| 工事 | 提出 | 提出 | 提出 | 未評価 |

**図-5　提出状況管理画面**

### 4.4　期待される効果

調査から登録までに必要となる作業項目を、従来とオンラインシステム化後で比較したものが図-6 である。二重枠で示した内容がオンラインシステム化に伴い削減される作業項目であり、破線枠は一部簡略化される作業項目である。

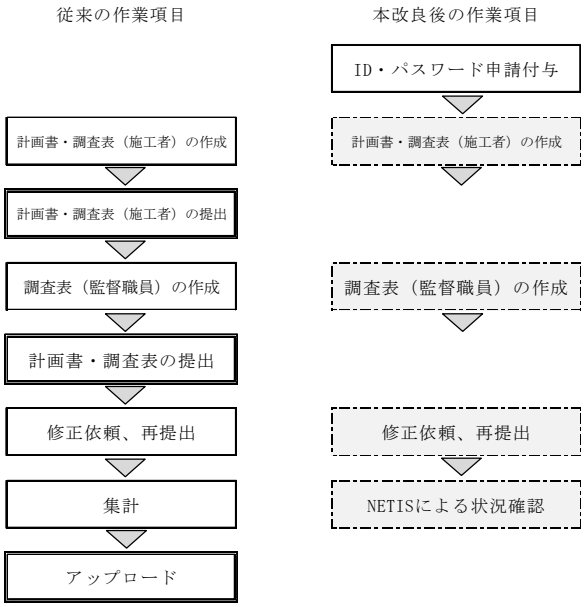



**図-6　従来の作業フローとオンラインシステム化後の作業フロー比較**

各機能の実装により、施工者をはじめとする全関係者の作業簡略化に伴い、生産性の向上が期待されるとともに、作成・提出状況の早期把握や調査表の精度向上が、事後評価の迅速化や適切な評価の実施に寄与することが期待される。

また、活用効果調査に関する情報を全てデジタルデータとして保管出来るようになったことで、事後評価を対象とした今後のシステム高度化に活用することが可能となり、更なる効率化に繋げていく。

## 5．おわりに

本改良では、登録申請と活用効果調査を対象に、オンラインシステム化による迅速化・生産性向上に取り組んできたが、まだ人の手に依る部分が多く残されている。今後は、デジタル化された各データも活用しながら更なる効率化を目指すとともに、事後評価においても、より適切な評価の推進と迅速化に向けて取り組んでいく。

最後に「公共工事等における新技術活用システム」の趣旨に賛同し、登録・活用に取り組んで頂いている新技術の開発者・施工者・設計業者各位に感謝申し上げます。より使いやすく、より見やすい NETIS を目指し、今後も様々な取組・検討を継続して実施していく予定であり、関係各位におかれては、引き続きのご支援・ご協力をお願い申し上げる。

# 16. 橋梁下部工事における 3D 点群データを用いた出来形管理

## 検査監督業務の効率化

国土交通省　関東地方整備局　○ 木村　匡
篠崎　真弘
株木建設株式会社　茨城本店　池谷　孝之

### １．はじめに

国土交通省では，ICT の全面的な活用の推進により，建設現場での情報化施工技術の導入が推し進められ，効率的な施工管理が行われている。その中でも，点群データで得られた 3D 情報をもとに出来形管理を行い，出来形寸法・写真管理の簡素化，生産性の向上，現地確認検査の効率化につながっている。土工事や舗装工事においては，地上型レーザースキャナーを用いた出来形管理要領（土工編）（舗装工事編）（案）に従って管理を行っているが，構造物については出来形管理要領（案）が作成されていない。今回，実際の現場をモデルに，地上型レーザースキャナー（以下，TLS という。）による ICT 出来形管理が，橋梁下部工事でも可能か検証を行った。

### ２．工事概要

当事業は，茨城県潮来市を起点に茨城県鉾田市に至る延長 30.9km の道路を建設中の東関東自動車道水戸線（東関道）の工事である。本工事は，茨城県行方市中根地先及び小幡地先において，東関道本線を超えるための跨道橋（逆 T 式橋台 4 基）を施工するものである。

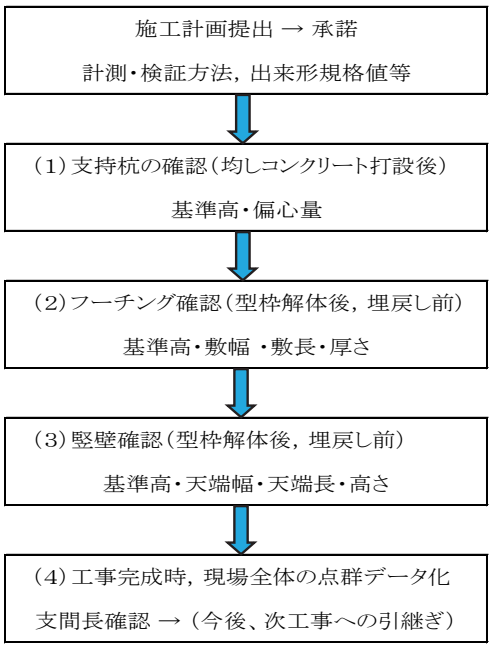
### ３．TLS による出来形管理（橋台）

TLS による計測方法は，構造物の出来形に使用することを目的として正確な位置情報を得るため，基準点座標を使用し精度の良い ±2mm の TLS を使用している。この計測データは，専用ソフトを使用して点群化を行う。点群化されたデータは，極座標 XYZ の位置情報を持ち，パソコン上で表示できるようになる。

この正確な位置情報を持った実寸法の点群データを利用して，従来の出来形管理との精度を比較する。

TLS による構造物の出来形計測手順を，作業フロー図により行う。

作業フロー図




上記確認項目は，監督職員が確認できるよう計測データの整備を行い，検査時（中間検査・既済検査・完成検査）も，検査職員が確認できるものとする。

### 3.1　支持杭の出来形確認

従来支持杭の出来形管理は，杭 1 本 1 本に設計座標の位置出しを行い，それに対して実際に施工完了した杭の杭芯位置出しから設計と実測の差を測定していた（写真-1）。

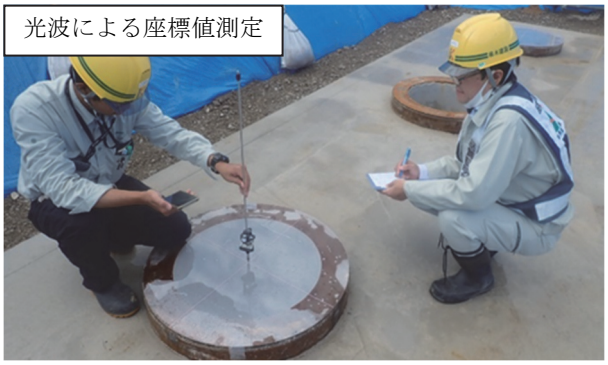



写真-1　従来の支持杭出来形計測

TLS での支持杭の測定は均しコンクリート完了後，杭天端に杭と同径の透明アクリル板を置きスキャナー認識用白黒ターゲットを杭天端中心に設置し，TLS にて杭中心の点群測定を行う（写真-2）。その点群データの座標値と設計 3D データを重ね合わせて，その点群座標値と設計 3D データとの差で，杭偏心量，基準高を測定する（図-1）。

杭頭鉄筋がある場合でも杭頭カットオフ施工後，同様の測定方法で点群測定を行ったが，杭中心の測定は可能であった。

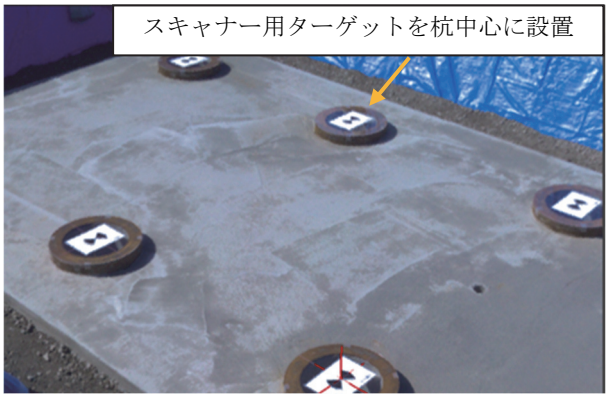



写真-2　TLS による支持杭出来形計測

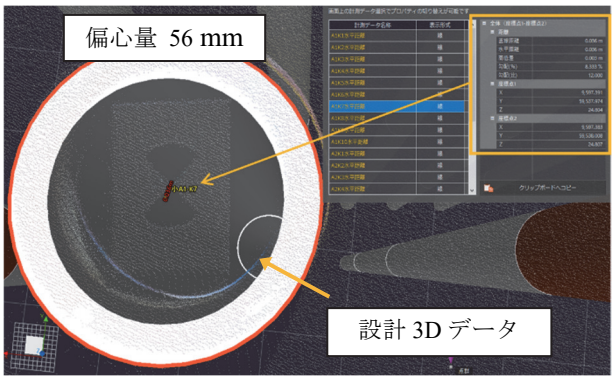



図-1　支持杭出来形計測結果

従来の測定方法は，杭中心の白黒ターゲットを光波測距器にて直接座標測定を行い比較した。

その結果は，従来の測定結果と比較して最大値 6 mm，平均値 1mm の差異であった（表-1）。また設計データを重ね合わせることにより偏心量が可視化でき，大幅に偏心している杭の有無はほぼ判断が可能である。

従来では，杭偏心量の証明は，杭 1 本毎に計測し，写真を撮り証明していたため，従来は 6 時間ほどかかっていたものが，TLS では 2 時間程度で計測でき，人員も半数以下にする事ができた。また可視化による設計データとの比較・判別が可能になる他，実際の位置情報を電子化した属性情報として保存できる。

表-1　従来の光波測定値と TLS の偏心量比較

| 杭番号 | 設計値 | | 実測値 | | 光波測定結果 | | | スキャナー測定結果 | 差 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | X座標 | Y座標 | X座標 | Y座標 | X(mm) | Y(mm) | 偏芯量d(mm) | 偏芯量d(mm) | |
| No.1 | 9589.175 | 59538.725 | 9589.211 | 59538.726 | 36 | 1 | 36 | 30 | -6 |
| No.2 | 9589.485 | 59542.111 | 9589.484 | 59542.139 | -1 | 28 | 28 | 29 | +1 |
| No.3 | 9591.914 | 59538.475 | 9591.891 | 59538.475 | -23 | 1 | 23 | 22 | -1 |
| No.4 | 9592.224 | 59541.860 | 9592.204 | 59541.923 | -20 | 63 | 66 | 66 | 0 |
| No.5 | 9594.652 | 59538.224 | 9594.629 | 59538.230 | -23 | 6 | 24 | 27 | +3 |
| No.6 | 9594.962 | 59541.610 | 9594.946 | 59541.602 | -16 | -7 | 18 | 18 | 0 |
| No.7 | 9597.391 | 59537.974 | 9597.385 | 59538.015 | -6 | 41 | 42 | 36 | -6 |
| No.8 | 9597.701 | 59541.359 | 9597.707 | 59541.416 | 6 | 57 | 58 | 56 | -2 |
| No.9 | 9600.130 | 59537.723 | 9600.181 | 59537.772 | 51 | 49 | 71 | 65 | -6 |
| No.10 | 9600.439 | 59541.108 | 9600.434 | 59541.106 | -5 | -2 | 5 | 9 | +4 |

## 3.2　躯体コンクリートの出来形確認（フーチング）

同様に，コンクリートの出来形管理も種別毎の打設完了後，埋戻し前 TLS による計測を行い，点群データをもとに計測を行った（図-2）。点群データによる測定値は，寸法管理の敷長，敷幅，厚さ，基準高において，実際の巻尺及びレベルでの測定した結果とほぼ同一の結果を得ることができた（表-2）。また点群データを基に隅角点の座標データと，光波測距での測定結果と同等の値を確認する事ができた。

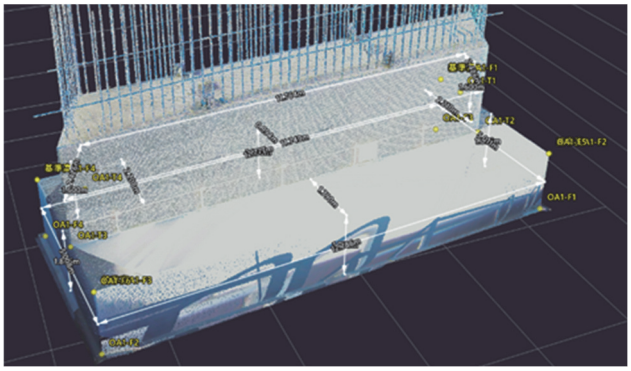


図-2　TLS によるフーチング出来形計測データ

表-2　TLS によるフーチング出来形計測データ

| 測定項目 | 敷長 l2(直角方向) | | | 敷幅 w2(橋軸方向) | | | 厚さ t | | | 基準高 H | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 測点又は区別 | 実測値 | 実測値 | 差 | 実測値 | 実測値 | 差 | 実測値 | 実測値 | 差 | 実測値 | 実測値 | 差 |
| 測定方法 | 巻尺 | TLS | | 巻尺 | TLS | | 巻尺 | TLS | | レベル | TLS | |
| A1-起点側 | 12778 | 12777 | -1 | — | — | — | 1801 | 1800 | -1 | 26.503 | 26.503 | ±0 |
| A1-終点側 | 12789 | 12786 | -3 | — | — | — | 1797 | 1796 | -1 | 26.503 | 26.502 | -1 |
| A1-L側 | — | — | — | 5010 | 5011 | +1 | 1806 | 1806 | ±0 | 26.503 | 26.504 | +1 |
| A1-R側 | — | — | — | 5010 | 5008 | -2 | 1806 | 1806 | ±0 | 26.503 | 26.502 | -1 |

| 隅角点座標 | 設計値 | | 光波測定値 | | スキャナー測定値 | | 光波とスキャナー値との差 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 測点又は区別 | X座標 | Y座標 | X座標 | Y座標 | X座標 | Y座標 | X座標(m) | Y座標(m) |
| A1-終点-L | 9601.397 | 59541.824 | 9601.399 | 59541.826 | 9601.401 | 59541.827 | +2 | +1 |
| A1-終点-R | 9588.673 | 59542.988 | 9588.674 | 59542.984 | 9588.678 | 59542.986 | +4 | +2 |
| A1-起点-L | 9600.941 | 59536.845 | 9600.940 | 59536.846 | 9600.938 | 59536.850 | -2 | +4 |
| A1-起点-R | 9588.218 | 59538.009 | 9588.218 | 59538.008 | 9588.220 | 59538.01 | +2 | +2 |

### 3.3　躯体コンクリートの出来形確認（竪壁部）

躯体竪壁部コンクリートの出来形確認では，事前に設計 3D データを作成し，TLS で測定した点群データを重ね合わせることで，専用ソフトを使ってパソコンデータ上で可視化の判別ができるようにする（図-3）。寸法確認は同様に，従来の計測方法と TLS で測定した点群データと比較した。

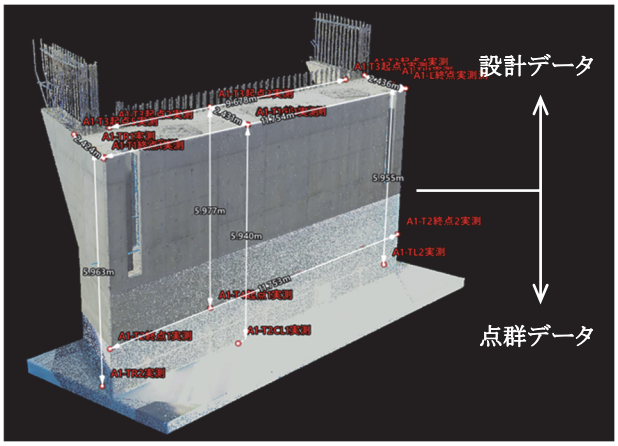



図-3　TLS による竪壁出来形計測データ

表-3　TLS による竪壁出来形計測データ

| 測定項目 | 天端長 l1（直角方向） | | | 天端幅 w1（橋軸方向） | | | 高さ h1 | | | 基準高 H | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 測点又は区別 | 実測値 | 実測値 | 差 | 実測値 | 実測値 | 差 | 実測値 | 実測値 | 差 | 実測値 | 実測値 | 差 |
| 測定方法 | 巻尺 | TLS | | 巻尺 | TLS | | 巻尺 | TLS | | レベル | TLS | |
| A1-起点側 | 9682 | 9678 | -4 | — | — | — | 5982 | 5977 | -5 | — | — | — |
| A1-終点側 | 11752 | 11754 | +2 | — | — | — | 5950 | 5940 | -10 | — | — | — |
| A1-L側 | — | — | — | 2430 | 2436 | +6 | 5954 | 5955 | +1 | 32.451 | 32.454 | +3 |
| A1-R側 | — | — | — | 2431 | 2424 | -7 | 5959 | 5963 | +4 | 32.450 | 32.450 | ±0 |
| A1-CL | — | — | — | 2433 | 2431 | -2 | — | — | — | 32.450 | 32.448 | -2 |

| 隅角点座標 | 設計値 | | 光波測定値 | | スキャナー測定値 | | 光波とスキャナー値との差 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 測点又は区別 | X座標 | Y座標 | X座標 | Y座標 | X座標 | Y座標 | X座標(mm) | Y座標(mm) |
| A1-終点-L | 9600.212 | 59540.125 | 9600.209 | 59540.123 | 9600.207 | 59540.125 | -2 | +2 |
| A1-終点-R | 9588.510 | 59541.196 | 9588.502 | 59541.193 | 9588.496 | 59541.195 | -6 | +2 |

### 3.4　工事完成時，現場全体の点群データ化

完成した構造物全体を TLS で測定し，各構造物を点群化する事によって，足場が無い状態でも支間長を確認することができる（図-4）（表-4）。

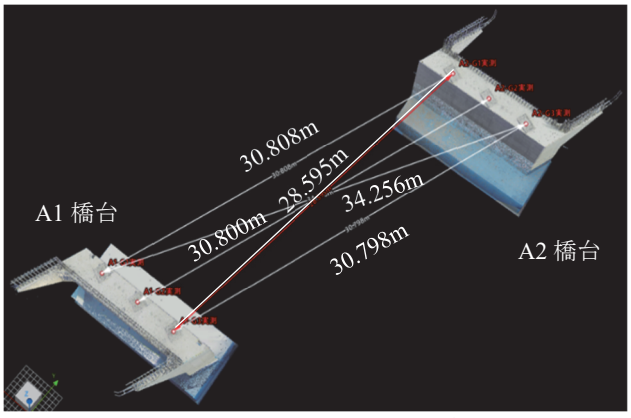



図-4　TLS による支間長確認データ

表-4　TLS による支間長出来形計測結果

| 測定項目 | 支間長 | | | |
|---|---|---|---|---|
| 測点又は区別 | 設計値 | 実測値 | 実測値 | 光波との差 |
| 測定方法 | | 光波 | TLS | |
| A1-G1～A2-G1 | 30.800 | 30.807 | 30.808 | +1 |
| A1-G2～A2-G2 | 30.800 | 30.792 | 30.800 | +8 |
| A1-G3～A2-G3 | 30.800 | 30.795 | 30.798 | +3 |
| A1-G1～A2-G3 | 34.257 | 34.254 | 34.256 | +2 |
| A1-G3～A2-G1 | 28.589 | 28.593 | 28.595 | +2 |

また現場全体をデータ化することにより，次工事に引き継ぐ事が可能となるため，現地測量等の調査をパソコン上で行うことができ，事業全体の生産性向上に繋がることになる（図-5）。

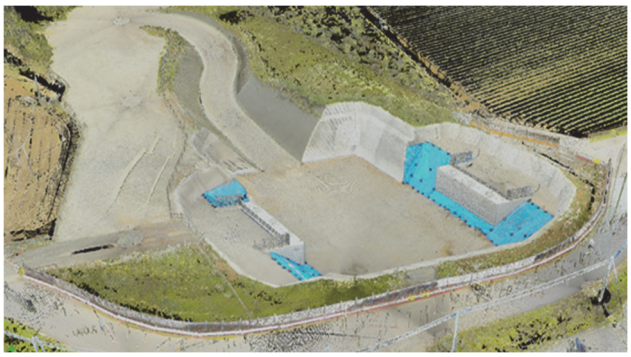


図-5　TLS による完成時現場全体点群データ

## 4．検証結果（橋台 1 基）

### 4.1　出来形管理の精度比較

従来管理と TLS の比較結果は，最大値-10mm，平均値+3mm となり，多少のバラツキはあるものの，従来管理とほぼ同等の値を確認する事ができ，測量誤差程度であった（表-5）。

表-5　測定比較結果一覧表（小幡地区 A1 橋台）

| 測定種別 | | 測定数 | 差(TLS - 従来) | |
|---|---|---|---|---|
| | | | 最大値(mm) | 平均値(mm) |
| 支持杭 | 偏心量 | 8本 | -6 | -1 |
| | 基準高 | 8本 | +3 | -1 |
| フーチング | 敷長・敷幅・厚さ | 8箇所 | -3 | -1 |
| | 基準高 | 4箇所 | +1 | +1 |
| | 座標位置(隅角点) | 4箇所 | +4 | +2 |
| 竪壁 | 天端長・天端幅・高さ | 9箇所 | -10 | -2 |
| | 基準高 | 3箇所 | +3 | +1 |
| | 座標位置(隅角点) | 2箇所 | -6 | -1 |
| 支間長 | 長さ | 5径間 | +8 | +3 |
| | 座標位置(沓座・中心線) | 4箇所 | -5 | -1 |

### 4.2　労働時間の比較

従来管理と TLS の比較結果は，段階毎において人員・時間が，約倍以上の削減に繋がった。またパソコン上にて確認できるため，発注者の現地確認を簡素化することにより，今後オンライン検査が有効となる（表-6）。

表-6　現地作業時間比較一覧表

| 種　別 | | | 測定数 | 従来方式 | | TLS | | 差(TLS―従来) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 人数 | 時間 | 人数 | 時間 | 人数 | 時間 |
| 支持杭 | 出来形測定 | 基準高・偏心量 | 8本 | 2 | 4 | 1 | 2 | -1 | -2 |
| | 出来形写真 | 基準高・偏心量 | 4本 | 3 | 1 | 0 | 0 | -3 | -1 |
| | 出来形確認検査 | 現地確認検査 | 8本 | 2 | 1 | 0 | 0 | -2 | -1 |
| フーチング | 出来形測定 | 敷長・敷幅・厚さ・基準高 | 12箇所 | 2 | 4 | 1 | 2 | -1 | -2 |
| | 出来形写真 | 敷長・敷幅・厚さ・基準高 | 6箇所 | 3 | 1 | 0 | 0 | -3 | -1 |
| | 出来形確認検査 | 現地確認検査 | 12箇所 | 2 | 1 | 0 | 0 | -2 | -1 |
| 竪壁 | 出来形測定 | 天端長・天端幅・高さ・基準高 | 12箇所 | 2 | 4 | 1 | 2 | -1 | -2 |
| | 出来形写真 | 天端長・天端幅・高さ・基準高 | 5箇所 | 3 | 1 | 0 | 0 | -3 | -1 |
| | 出来形確認検査 | 現地確認検査 | 12箇所 | 2 | 1 | 0 | 0 | -2 | -1 |
| 支間長 | 出来形測定 | 長さ | 5径間 | 2 | 2 | 1 | 2 | -1 | 0 |
| | 出来形写真 | 長さ | 3径間 | 3 | 1 | 0 | 0 | -3 | -1 |
| | 出来形確認検査 | 現地確認検査 | 5径間 | 2 | 1 | 0 | 0 | -2 | -1 |
| 合計 | | | ― | 28 | 22 | 4 | 8 | -24 | -14 |

## ５．出来形管理の監督・検査

出来形検査は，計測結果の確認を専用ソフトによりパソコン上にて確認し，躯体竪壁部や支間長等の可視部分はもちろんのこと，杭偏心やフーチングなどの不可視部分も点群データを基に確認することができる（写真-3)。

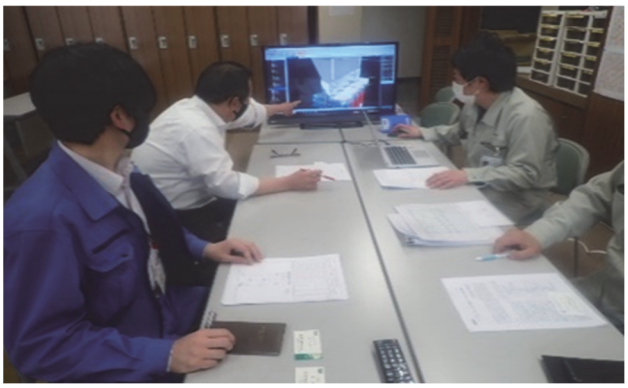


写真-3　出来形確認状況

完成検査時では，足場を設置している状態でしか計測できない出来形計測箇所も点群データを基に，パソコン上にて確認することができ，効率的な出来形確認検査が行えた（写真-4)。

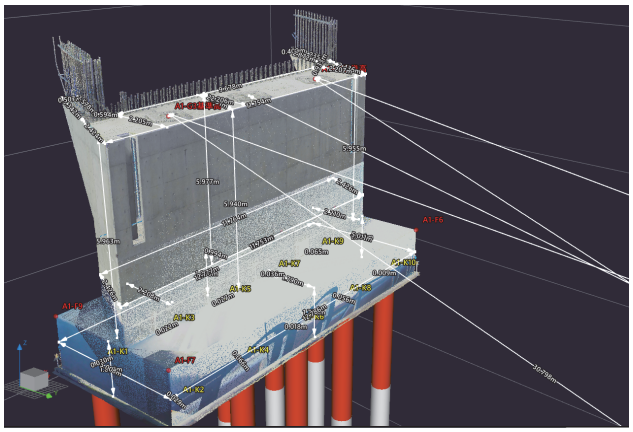


写真-4　完成検査時ビューアによる出来形確認画像

## ６．今後の課題・問題点

今回，段階毎に TLS による出来形管理を橋台 4 基により行ったが，TLS および 3 次元専用ソフトが常時必要になる。

現場で計測した点群データは容量も大きく，ハイスペックパソコン，互換性のある専用ソフトも必要になるため，使用する機器の整備などが，受発注者共に課題となる。

## ７．おわりに

TLS の構造物による現場への活用は，現場管理全体に波及し，その使い方が監督，検査までに及ぶことが確認できた。今後は，協議，出来形・写真管理などの簡素化や効率化に必ず繋がるものと考えている。

国土交通省では 2021 年度から ICT 構造物（橋脚・橋台）の試行を行っている。しかしながら現在の試行方法では，段階的な出来形管理においては従来手法にて実施しているため，パソコン上にて不可視部分の確認が行えるわけではない。今回の検証方法では，構造物を管理する際に必要な不可視部分の情報をパソコン上で容易に確認することが可能であり将来に渡り確実な構造物管理が出来るものであると考えられる。また，建設業界が直面している，担い手確保の問題や，安全な施工，検査に役立つ物と考えている。今回の取り組みが，様々な現場での TLS による出来形管理を行うきっかけになればと思う。

### 参考文献


1）国土交通省：地上型レーザースキャナーを用いた出来形管理要領（土工編）（案），平成 28 年 3 月

2）国土交通省：CIM 導入ガイドライン（案）第 1 編，CIM 導入推進委員会，平成 29 年 3 月

3）株式会社トプコン：3D Laser Scanner GLS-2000, 製品カタログ

# 17. 測量と施工の双方に貢献する汎用性の高い ICT ショベルシステムの開発

(株)トプコンポジショニングアジア○小林　雅佳

## １．はじめに

現在，i-Construction の普及が進んでいるが，規模の大きい現場での普及に留まっており，発注件数の多い中小規模の現場での ICT 技術の活用が課題となっている。規模の小さい現場では，3D 設計データの作成や ICT 施工に関する技術習得及び活用に人手を割くことができないことが一つの理由として挙げられる。そのような課題を解決できるシステムとして，測量から ICT 施工まで少人数で容易に行える ICT ショベルマシンガイダンス(MG)システムとなる製品名 3D-MG LPS ショベル「X-M3x LN」，通称“杭ナビショベル”（以下本システム）を開発した。本システムでは，自動追尾型測量機とタブレットにより，3D 設計データを活用した測量及び施工が可能となる。本システムはミニショベルにも装着することが可能であるため，中小規模現場での ICT 技術普及に寄与することが期待され，測量と施工のどちらにも貢献する汎用性の高い本システムを紹介する。

## ２．本システム開発の背景

従来の ICT 建機のコンセプトは大規模工事を効果的に施工することに主眼がおかれていた。大規模工事では，上空視界がひらけた現場の為，GNSS を用いた施工システムを用いることに問題はなく，また施工に用いる 3D 設計データも準備されている。しかしながら，中小規模の現場に大型現場に最適化された ICT 建機のシステムを当てはめようとするとフィットしないことが起こりうる。そこで，中小規模の現場での ICT 施工に求められる要件を考えた。中小規模の土木現場の特徴として，次が挙げられる。

①施工土量が少ない。
②施工工期が短い。
③工事金額が小さい。
④都市部の施工の場合，上空視界が悪く安定した GNSS の情報が取得しづらい。
⑤施工者のスキルが大規模現場に比べて高くない。
⑥平易な施工が多い。
⑦3D 設計データが無い場合もある。

以上をふまえ，中小規模の現場で ICT 施工を行う為の ICT 建機システムの開発を行った。従来のショベル型マシンガイダンスシステムと比較して本システムの最大の特徴は，重機の位置を計測する測位の手段に GNSS ではなく，トータルステーション（以下 TS）型の追尾測量機を用いたことである。また，その測量機は施工以外の測量にも用いることができるため，本システムを用いると施工工期の中で ICT 建機を使わない工程においても測量機を遊ばせることなく有効に使うことができる利点がある。

## ３．開発の主眼と構成品

本システムを開発するにおいて，その構成品に中小規模の現場を意識した開発を行った。以下にその構成品のコンセプトを説明する。

### 3.1　測位用追尾測量機

従来のプリズム追尾型の ICT 建機は一般 TS を用いていたが，使用者の取り扱いの容易さを目的として自動整準機能のついた安価型測量機，（以下 LN-150）を採用した（図-１）。LN-150 は取り扱いが非常に容易なものの，追尾距離が最大 130m と通常の TS に比べて制限がある。しかしながら中小規模の土木現場を想定した場合，この最大距離でも問題は無いと判断した。また，LN-150 は通常の測量作業にも使用することは可能であり，ICT 建機を用いない場合は測設や検測などの作業を行うことも可能である。

図-1　LN-150

### 3.2　ディスプレイ用タブレット

従来の ICT 建機のシステムでは土木現場で求められる環境や耐久性から専用のディスプレイが用いられていたが，本システムでは汎用の耐久型タブレット端末をディスプレイとして採用した（図-

2)。このメリットとして，システム価格を下げるだけでなく，端末が故障した場合でも入手しやすいことが挙げられる。一方耐環境性には課題が生じたが，中小規模の工事での利用を想定した場合，大きな影響はないと判断した。

図-2　ディスプレイ用タブレット

### 3.3　ソフトウェア

本システムに用いるソフトウェアは，通常の 3D 設計を使った 3D 施工ができることに加え，高さの管理だけの 2D 施工も可能である（図-３）。又，あらかじめ設計データを入力しなくても現場で設計が作成できる機能を有している。これにより 3D 設計データを作るスキルが無い場合でも ICT 施工ができるため，現場施工者が 3D 設計データを事前に作らなければいけない負担を軽減している。

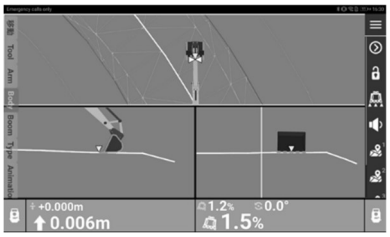



図-3　ソフトウェア画面

### 3.4　測位用プリズム

測位用プリズムは，専用ブラケットを用いることで簡単に建機に取り付けが可能である。GNSS 型の ICT 建機の場合 2 個のアンテナを保持するポールなどが必要になるが，本システムの場合は 1 本の固定ポールでよく，小型の建機にも後付けで取り付けが可能となる。(図-４）又，プリズム追尾型のシステムの為，GNSS システムで必要なローカライズ作業が不要であり，上空視界が悪い都市部，橋脚の下，山岳部等でも利用が可能である。

図-4　追尾用測量機とプリズム

以上の開発要素より，本システムは中小規模の現場で ICT 建機を使用するためのハードルを下げることを実現している。

## ４．本システムの説明

### 4.1　システム構成

本システムは，自動追尾機能に特化した望遠鏡の無い TS である LN-150 を核とし，測量システムと 3D マシンガイダンス(MG)システム兼用のソフトウェアがインストールされたタブレットを用いて，現場の生産性の向上を図るシステムである。測量業務では，ワンマンで効率的に測量業務が実施でき，施工業務では，測量業務で活用した LN-150 をそのまま活用し，タブレットを建機にセットすることで ICT 建機化が可能になる。システム構成は，LN-150，タブレット，360° プリズム，角度情報検出用の 4 個の IMU チルトセンサ，コントローラの機器構成からなる（図-５）。

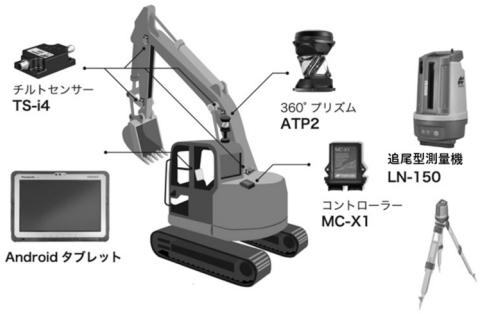



図-5　システム構成

### 4.2　ソフトウェア機能説明

タブレットに表示される画面には設計値との相対位置関係を数値及びグラフィックによって表示することにより視覚的にもわかりやすいインターフェースとなっている。設計面との高低差表示だけでなく，グレードインジケーターで視覚的にわかりやすく設計面にオペレータを誘導できる。(図-６）更に，バケットの横断勾配も表示され，確認しながら作業を進めることができる。また，誘導音によって誘導する機能も備えており，画面を見ずに音でバケットをコントロールすることができる。これにより，オペレータは，バケットの動きに集中し，周囲の状況も把握しながら施工することが可能となる。

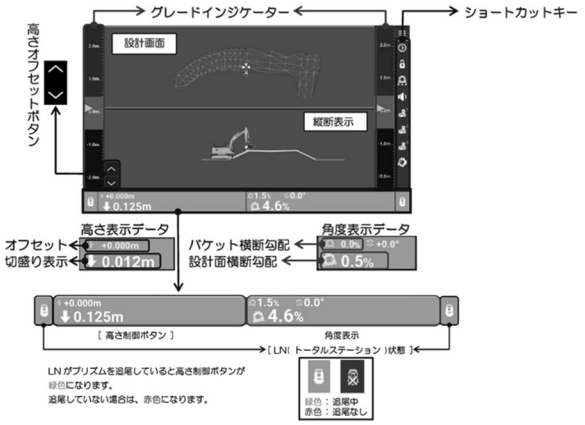



図-6　ソフトウェア画面

## 4.3　簡易設計作成機能

本システムでは，ショベルに乗ったままバケットを使って設計を作成できる機能や，側溝などの高さを測量機で数点計測することにより，その場で設計データを作成することを可能としている。特に小規模土工においては設計データを持たず現地合わせで施工する例も多く，そのような現場においても ICT 建機の導入を本システムでは活用できる。

### 4.3.1　水平平面設計データの作成

高さの基準としたい位置にバケット刃先をタッチして計測，タッチした点の高さを基準に平面設計データ作成機能で勾配無しの無限平面設計データを作成可能。任意のスパンのグリッド線設置や高さのオフセット値も画面から簡単に入力できる。（図-７）

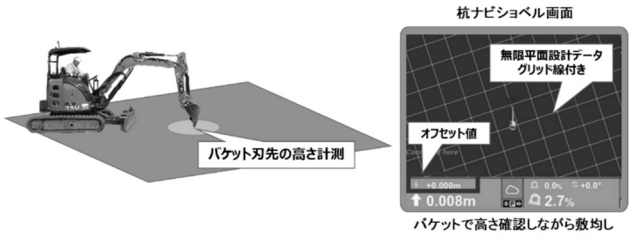



図-7　無限水平面作成方法

### 4.3.2　傾斜平面設計データの作成

水平面だけではなく水勾配等の傾斜面作成のため，傾斜の基準とする２点の位置をバケット刃先で計測，傾斜平面設計データ作成機能で２点の座標から得られる傾斜に応じた無限傾斜平面設計データを作成できる。（図-８）

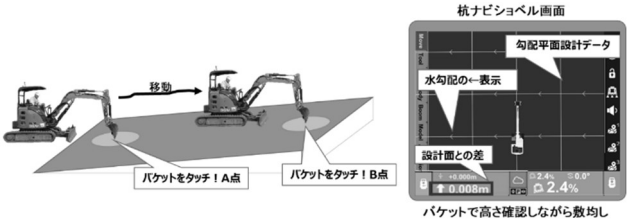



図-8　傾斜平面作成方法

### 4.3.3　簡易 TIN データの作成

現地施工エリアの外周を LN-150 でワンマン計測，TIN データ作成機能で計測点を元にした面データを簡単に作成できる。（図-９）

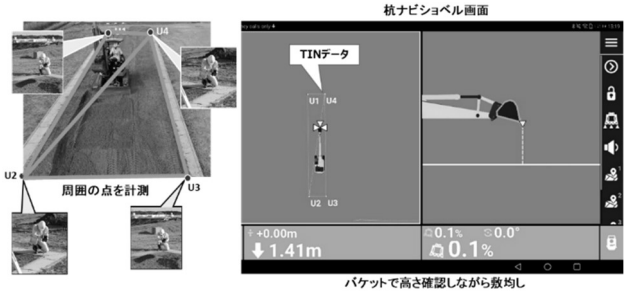



図-9　簡易 TIN データ作成方法

## ５．システムの刃先精度検証

本システムで得られる刃先座標の精度の検証を行った。検証方法としては，刃先の座標を別の TS で直接測定して得られる座標値(N,E,H)と，ディスプレイ上に表示されるショベルシステムの刃先座標値(N,E,H)とを比較する方法である。機体を水平に設置しバケット刃先を機体に近い場所に置いた場合，アーム，ブームを伸ばしバケット刃先を遠くに置いた場合の２通りを東西南北のそれぞれの方角で実施した。（図-１０）また，同様な方法で車体を 8 度傾斜させた状態での精度検証も合わせて実施した。（写真-１）

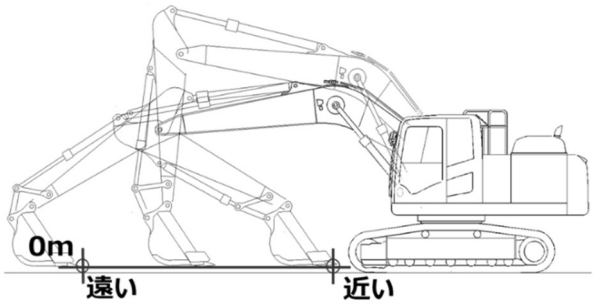



図-10　精度検証計測ポイント

**写真-1**　車体傾斜時の計測状況

表-１に刃先座標の表示値とTSで測定した座標値との差を示す。最大-41mmの誤差があったものの，標準偏差は，13㎜（N），17mm（E），4㎜（H）に収まっており，特にH（標高）方向の誤差の小ささはTSで追尾するシステムならではのものであり，GNSS システムと比較すると特筆すべき精度の良さと言える。

**表-1**　車体傾斜時の計測状況

| | | | TSとの差（m） | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **重機向き** | **ﾊﾞｹｯﾄ位置** | **重機姿勢** | **N** | **E** | **H** |
| 西 | 近い | 水平 | -0.011 | -0.022 | -0.004 |
| | 遠い | | -0.007 | -0.027 | 0.002 |
| 東 | 近い | | -0.009 | -0.001 | -0.001 |
| | 遠い | | -0.016 | 0.006 | 0.002 |
| 南 | 近い | | -0.026 | -0.021 | -0.001 |
| | 遠い | | -0.034 | -0.041 | 0.001 |
| 北 | 近い | | -0.001 | -0.022 | -0.011 |
| | 遠い | | 0.008 | -0.006 | -0.002 |
| 西 | 近い | 8度勾配 | -0.006 | -0.027 | -0.006 |
| 東 | 近い | | -0.002 | 0.018 | -0.004 |
| 南 | 近い | | -0.023 | -0.006 | 0.006 |
| 北 | 近い | | 0.010 | -0.024 | -0.002 |
| | | **標準偏差** | **0.013** | **0.017** | **0.004** |

## ６．小規模現場での活用検証

実際に小規模現場をシミュレーションした検証を行った。検証は，通常施工に慣れたオペレータに長さ１０ｍ，深さ４０ｃｍの側溝掘削を想定した施工をおこなってもらい，通常施工と，3D設計を用いて施工する 3D 施工及び高さだけを管理する2D施工の3つのパターンにおいて，それぞれ作業にかかった時間を比較検証した。検証の様子を写真-２に示す。

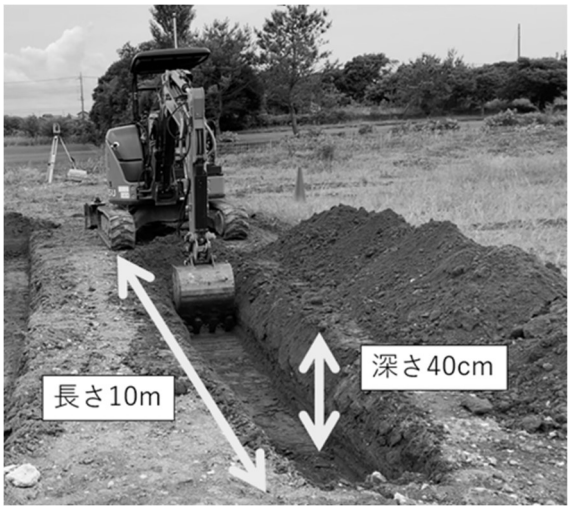



**写真-2**　小規模現場を想定した活用検証の様子

検証結果として，それぞれにかかった時間を表-２に示す。この結果からは3D施工では通常施工に比べて約 4%時間が多くかかった。この理由をオペレータに聞くと，3D設計を使った施工ではディスプレイに表示される情報量が多いため，その情報を一度頭の中で整理するための時間が入ったためとのコメントだった。これは 3D 施工に慣れていないことが主な要因であり，使いこなしていけば時間は短くなると予想される。一方，高さの情報しかない 2D 施工では通常施工に比べて時間は短くなった。

**表-2**　施工にかかった時間

| 手法 | **時間** |
|---|---|
| 通常施工 | **25分16秒** |
| ３D施工 | **26分14秒** |
| ２D施工 | **23分42秒** |

## ７．まとめ

中小規模の現場でのICT施工に適したICTショベルシステムの開発を行った。本システムは，汎用タブレットを採用し，測量装置に現場での位置出しや検測に普段使いされている LN-150 を活用し，小型ショベルにも装着可能なマシンガイダンスシステムを実現した。又，本システムはICT施工に必要な精度を有していることと，施工の生産性も向上することを確認した。小規模土工に対応でき，初期投資を抑えることが出来る本システムを土木市場に提供することで，i-Construction 推進だけではなく，下水工事，農業土木，建築工事に至るまでの多様な工事の更なるステップアップの一助になれることを期待したい。

# 18. 振動ローラとタイヤローラによる締固め後の平坦性の点群による評価

国土交通省国土技術政策総合研究所　○古明地　隆浩
国土交通省国土技術政策総合研究所　大槻　崇
国立研究開発法人土木研究所　橋本　毅

## 1．背景と目的

### 1.1　ICT 活用工事の実現に向けた近年の取り組み

国土交通省では, 平成 28 年度より, i-Construction のトップランナー施策の 1 つとして「ICT の全面的な活用」を打ち出し, ICT 土工を皮切りに ICT 舗装工等へと年々その適用工種を広げている。

この取り組みは，建設現場の生産性向上に向けて，建設生産プロセスの各段階において 3 次元データや ICT 等を活用する施策であり，国内に広く ICT を普及させることで災害等の非常時における迅速な復旧復興作業での活用も期待されている。

図-1 は ICT 活用工事件数 [1]を示している。ICT 活用工事は直轄，都道府県政令市のいずれにおいても実施件数に大きな伸びが見られ，全体として ICT 活用工事が普及拡大している様子が伺える。

＜ ICT施工の実施状況 ＞

| 工種 | 2016年度［平成28年度］ | | 2017年度［平成29年度］ | | 2018年度［平成30年度］ | | 2019年度［令和元年度］ | | 2020年度［令和2年度］ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 公告件数 | うちICT実施 | 公告件数 | うちICT実施 | 公告件数 | うちICT実施 | 公告件数 | うちICT実施 | 公告件数 | うちICT実施 |
| 土工 | 1,625 | 584 | 1,952 | 815 | 1,675 | 960 | 2,246 | 1,799 | 2,420 | 1,994 |
| 舗装工 | - | - | 201 | 79 | 203 | 80 | 340 | 233 | 543 | 342 |
| 浚渫工(港湾) | - | - | 28 | 24 | 62 | 57 | 63 | 57 | 64 | 63 |
| 浚渫工(河川) | - | - | - | - | 8 | 8 | 39 | 34 | 28 | 28 |
| 地盤改良工 | - | - | - | - | - | - | 22 | 9 | 151 | 123 |
| 合計 | 1,625 | 584 | 2,175 | 912 | 1,947 | 1,104 | 2,397 | 1,890 | 2,942 | 2,396 |
| 実施率 | 36% | | 42% | | 57% | | 79% | | 81% | |

＜ 都道府県・政令市の実施状況 ＞

| 工種 | 2016年度［平成28年度］ | 2017年度［平成29年度］ | | 2018年度［平成30年度］ | | 2019年度［令和元年度］ | | 2020年度［令和2年度］ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 公告件数 | 公告件数 | うちICT実施 | 公告件数 | うちICT実施 | 公告件数 | うちICT実施 | 公告件数 | うちICT実施 |
| 土工 | 84 | 870 | 291 | 2,428 | 523 | 3,970 | 1,136 | 7,811 | 1,624 |
| 実施率 | | 33% | | 22% | | 29% | | 21% | |

**図-1　ICT 活用工事実施状況**

### 1.2　3 次元点群データの普及

近年の技術革新により，レーザースキャナや UAV(Unmanned Aerial Vehicle)で撮影した画像データから 3 次元点群データを容易に取得できるようになってきた。日本国内においては i-Construction が普及したこともあり，建設現場の現状把握や設計，検査において 3 次元点群データの活用が進んでいる。その他にも，土砂災害等の状況把握においても利用が急速に進んでいる。また，2023 年までに BIM/CIM(Building/ Construction Information Modeling, Management)の原則適用という方針が示されており，今後更に 3 次元点群データの活用が期待される。

ICT 活用工事における 3 次元点群データの活用事例の 1 つとして, ICT 舗装工では「表層の厚さ」の出来形管理のために取得する 3 次元点群データに着目し, 平成３１年度からこのデータを「表層の平坦性」という品質評価への活用が認められ, 従前のプロフィルメータによる現地計測作業の省力化が実現可能となり, 現在の出来形管理要領(案) [2]に記載されている。なお, 著者が所属する社会資本施工高度化研究室では，点群から平坦性を算出するプログラムを開発している。

### 1.3　締固め施工における振動ローラの活用に関する既往研究及び議論

盛土の品質に関しては，近年の大規模災害（豪雨・地震）により，道路盛土等の崩壊が発生しており，盛土施工時の締固めの重要性が再認識されている。既往の研究では, 締固め機械と盛土材料との締固めの関係が調査されている。その中で, 振動ローラは礫質土の締固めに適していると示されている。[3]舗装工における路盤への適用が想起されるが, 国土交通省土木工事積算基準 令和 3 年度版 [4]に基づくと, 下層路盤(車道・路肩部)の締固め作業に使用する代表施工機械としてはロードローラ，タイヤ―ローラが挙げられている。その背景には, 振動ローラは進行方向にうねりが発生するという懸念が存在するとされている。

振動ローラの活用に関する動向としては，路盤工の品質管理において，振動ローラの振動鉄輪に加速度計を設置して振動波形を解析する加速度応答法を用いた面的管理による品質向上と作業効率化に向けた取り組み [5]が推進している。

### 1.4　研究目的

本稿では，普及の広まる 3 次元点群データの活

用法の一つとして，締固め機械の種類による路盤材の転圧後の平坦性の比較を 3 次元点群データを使用することで面的に評価する手法の有効性を検証した。具体的には上記の通り，舗装工におけるアスファルトの表層の出来形を評価する平坦性という指標値の路盤材への適用を試みた。

## ２．検証方法

### 2.1　計測条件

検証実験は，土木研究所構内の実験ピット（図-2）にて，基礎地盤を造成後に路盤材(C-40)を敷均し後，締固め機械を用いて締固めを実施した。検証施工に用いた締固め機械は，振動ローラとタイヤローラである。実験ピット内を 2 種類の締固め機械を並走させた。締固め回数(0,2,4,6 回)に伴う密度・地盤反力係数変化を計測するとともに，地上型レーザースキャナを使用して地形データを計測して，その点群データから平坦性等の変化を検証した。なお，検証における初期状態(締固め回数 0 回)は，人力敷均し後に，0.1 ㎥級の油圧ショベルのクローラにて締め固めた状態とした。

図-2　実験ピットと締固め機械

密度と含水比の計測は，　RI 計器を使用して 0,2,4,6 回の締固め完了時に 10 ヶ所で計測した。

地盤反力係数の計測は，小型 FWD（Falling Weight Deflectometer）を使用して，3 ヶ所で計測した。重錘を試験地盤に自由落下させた時の生じた荷重と変位を測定して，地盤反力係数相当値を算出した。

平坦性については，レーザースキャナで取得した点群データから当室で開発のプログラムを用いて算出し，2.2 で示す方法で評価する。3 次元点群データは，実験ピット内の 3 ヶ所からレーザースキャナを用いて計測し，レジストレーションによって合成した後に各種処理に利用した。

### 2.2　計測結果の評価方法について

計測した 3 次元点群データからは，下記の項目について検証できるようにデータ処理を行う。

①　ヒートマップの作成
②　縦断方向のプロファイル取得
③　平坦性の算出

これらの項目の考察する上で，既存ベンダーが供給するソフトウェアだけでは様々な条件で得られる結果を同時に確認することは困難である。色々な条件の数値データを試行錯誤して比較する手間を減らすために，簡易的な解析処理と表示機能を搭載した図-3 に示す評価用ツールを開発した。3 次元点群データの読み込み後，画面左側にヒートマップ，画面右側にプロファイルの選択機能とグラフ化機能が搭載されており，平坦性を表す数値の出力が可能となっている。平坦性を算出するアルゴリズムは，現在の 3 次元計測技術を用いた出来形管理要領（案）[2]における平坦性の算出アルゴリズムを踏襲している。後述する試験結果は，この評価用ツールから得られた結果を使用する。ただし，3 次元的に地形形状等を確認するために点群ビューワも併用した。

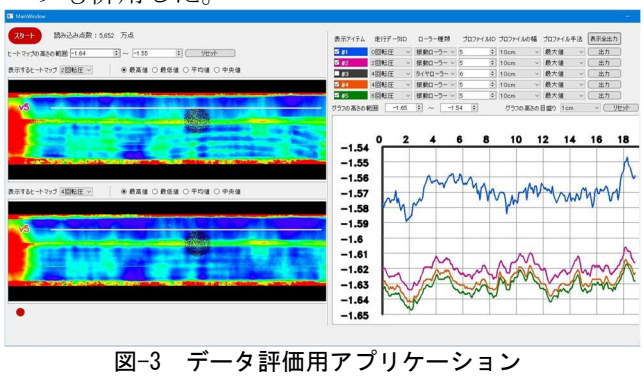



図-3　データ評価用アプリケーション

## ３．試験結果と考察

### 3.1　ヒートマップによる比較

図-4～7 は，0,2,4,6 回の締固め完了後の 3 次元点群データから作成したヒートマップである。各画像の上段が振動ローラで転圧した領域，下段がタイヤローラで転圧した領域を示している。図-4～7 におけるヒートマップの色の範囲を定義している高さ情報の上限値と下限値は固定値とした。

図-4 と図-5 から 2 回締固めた後の試験地盤を比較すると，全体的に振動ローラで締固めた領域の方が高さ方向で大きな沈下量を確認することができる。

また，タイヤローラは前輪が 3 輪，後輪が 4 輪で構成されているが，図-5,6,7 を見ると轍のような車輪の跡が残り，高さ方向にばらつきが発生しているという傾向が見受けられる。

その他にも，図-5 のタイヤローラで締固めた領域を見ると，高さ情報が高い領域と低い領域が存在した。この領域において高低差を 3 次元点群ビューワ上で確認すると，41 ㎜であった。それに対して，振動ローラで締固めた領域における高低差が大きい部分は 15 ㎜であった。このタイヤローラによる進行方向における高さの大きなばらつきは，締固め回数を重ねるごとに小さくなるが，6 回締固めた後も若干その差が残っており，締固め機械による傾向の違いと見受けられた。

今回の土質に対しては，振動ローラを用いた手法は沈下量が大きく，うねりが小さいという傾向を確認することができた。

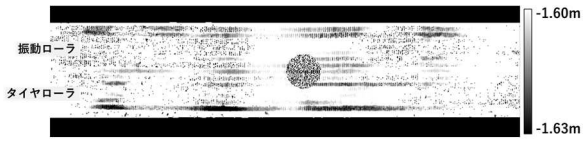



図-4　締固め前(0 回)のヒートマップ

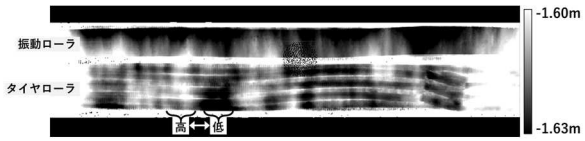



図-5　2 回締固めた後のヒートマップ

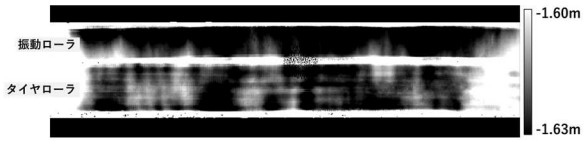



図-6　4 回締固めた後のヒートマップ

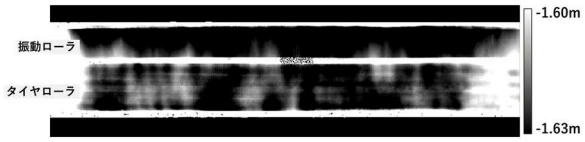



図-7　6 回締固めた後のヒートマップ

## 3.2　縦断方向のプロファイルによる比較

締固め機械の進行方向の縦断プロファイルを計測する計測線は，図-8 の左側のように 10 ㎝間隔で選択可能とした。また，プロファイルデータはプロファイル計測線を中心に 2 ㎝×10㎝ のグリッドに含まれる点群データから代表点(高さ情報の最低値・最高値・平均値・中央値)を抽出するものとした。

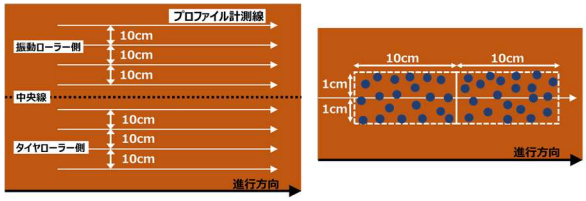



図-8　縦断方向のプロファイル選択機能

各締固め機械により 0,2,4,6 回締固めた後のプロファイルを図-9 に示す。この結果から得られる平均値と標準偏差を表-1 にまとめた。2,4,6 回締固めた後の標準偏差に注目すると，振動ローラの標準偏差の方が小さいという結果となり，締固め後の進行方向に対する高さ情報のばらつきが小さいことが確認できる。つまり，進行方向に対して滑らかな仕上がりが期待できると言うことができる。

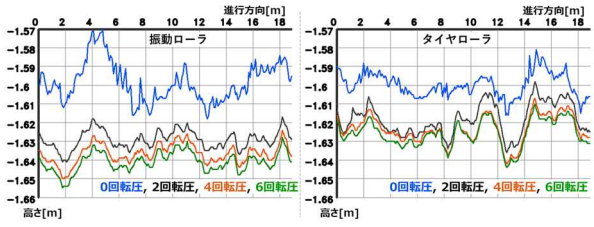



図-9　各締固め機械によるプロファイル

表-1　締固め回数と高さ情報の関係

単位[m]

| | 振動ローラー | | | | タイヤローラー | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0回転圧 | 2回転圧 | 4回転圧 | 6回転圧 | 0回転圧 | 2回転圧 | 4回転圧 | 6回転圧 |
| 平均値 | -1.598 | -1.629 | -1.637 | -1.641 | -1.600 | -1.618 | -1.624 | -1.626 |
| 標準偏差 | 0.0105 | 0.0049 | 0.0052 | 0.0052 | 0.0064 | 0.0085 | 0.0074 | 0.0072 |

次に各締固め機械による路盤材の沈下量を比較するために，0 回と 2 回, 2 回と 4 回, 4 回と 6 回の締固め後のプロファイルの高さ情報の差分値から得られる情報を表-2 にまとめた。

表-2　締固め回数間の高さ情報の差分

単位[m]

| 厚み | 振動ローラー | | | タイヤローラー | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0-2回 | 2-4回 | 4-6回 | 0-2回 | 2-4回 | 4-6回 |
| 平均値 | 0.0307 | 0.0075 | 0.0044 | 0.0184 | 0.0053 | 0.0023 |
| 標準偏差 | 0.0086 | 0.0012 | 0.0006 | 0.0061 | 0.0028 | 0.0013 |

表-2 を見ると，振動ローラの方が差分値の平均値が大きいことから，各転圧時に大きな沈下量が見込めることが分かる。次に，標準偏差については，表-1 における 0 回転圧(締固め前の初期状態)の標準偏差が振動ローラの領域が大きかったことが影響するため，0-2 回の標準偏差が比較的大きいが，その後の標準偏差は振動ローラの方が小さいことが分かる。3. 1 と同様に振動ローラがより締固めの収束が早いことが分かった。

## 3.3　平坦性の考察

一般的に平坦性の評価は，道路の縦断方向に発生する凹凸の度合を評価するために舗装の表層で実施されている。ICT 舗装工においては，計測ライン上にて延長 1.5m 毎に直径 200mm の円形範囲内に含まれる点群データを抽出し，点群データの平均標高値をもとに数式(1)から平坦性を算出する。

$$\sigma = \sqrt{\{\sum x^2 - (\sum x)^2/n\}/(n-1)} \qquad (1)$$

σ：平坦性
x：変位量(k番目の標高値に対するk-1番目と
　　k+1番目の標高値の平均値との差分)
n：変位量データ数

本稿では，路盤への適用を検討すべく，舗装と同様な手法を踏襲して点群データから平坦性を算出する。ちなみに，平坦性の数値は，0 に近い程より平坦な仕上がりであることを意味する。

プロファイル計測線によって結果にばらつきが出てしまうことを防ぐために，各締固め機械の締固め領域の中央付近の複数のプロファイル計測線について平坦性を算出し平均値を求めた結果を表-3 及び図-10 に示す。

表-3　平坦性の平均値の比較

単位[mm]

| プロファイル名 | 0回転圧 | 2回転圧 | 4回転圧 | 6回転圧 |
|---|---|---|---|---|
| 振動ローラ | 6.47 | 4.25 | 4.49 | 4.42 |
| タイヤローラ | 9.09 | 7.89 | 7.52 | 7.55 |

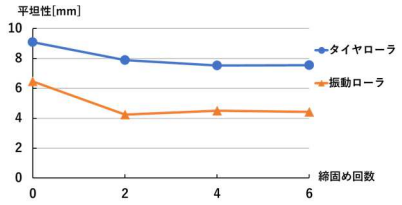



図-10　各締固め機械による平坦性

6 回の締固めた後と転圧前の状態の平坦性を比較すると両者に平坦性の向上が見られる。その比率は, タイヤローラが約 83%, 振動ローラは約 68%と平坦性が減少(向上)している。この比較結果から, 今回使用した路盤材に対しては，振動ローラが良い平坦性，つまり縦断方向に凹凸が発生しにくい締固め手法であることが分かった。

### 3.4　乾燥密度・地盤反力係数との関係

RI 計器による乾燥密度及び小型 FWD による地盤反力係数相当値の計測結果を図-11，12 及び表-4,5 に示す。

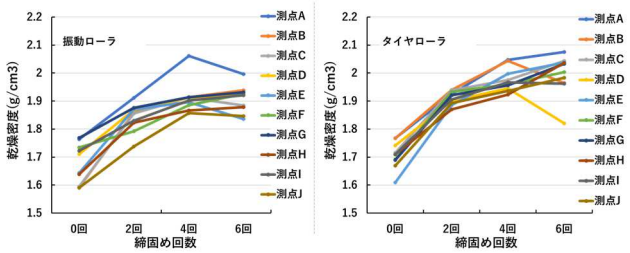



図-11　締固め回数と乾燥密度の関係

表-4　締固め回数と乾燥密度の平均値

単位[g/cm³]

| プロファイル名 | 0回転圧 | 2回転圧 | 4回転圧 | 6回転圧 |
|---|---|---|---|---|
| 振動ローラ | 1.71 | 1.91 | 1.98 | 2.00 |
| タイヤローラ | 1.68 | 1.84 | 1.91 | 1.91 |

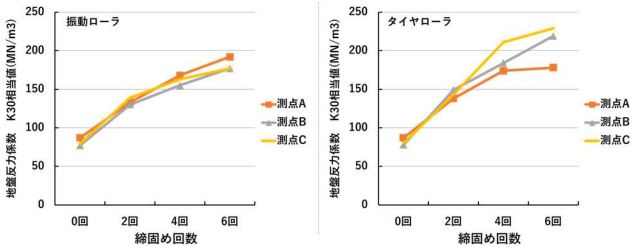



図-12　締固め回数と地盤反力係数の関係

表-5　締固め回数と地盤反力係数の平均値

単位[MN/m³]

| プロファイル名 | 0回転圧 | 2回転圧 | 4回転圧 | 6回転圧 |
|---|---|---|---|---|
| 振動ローラ | 81.00 | 134.00 | 162.00 | 182.00 |
| タイヤローラ | 81.67 | 143.33 | 189.67 | 208.67 |

どちらの締固め機械も締固め回数の増加に伴い，乾燥密度及び地盤反力係数相当値が増加する傾向を確認することができた。このことは，点群データから考察した路盤材の沈下量増加，平坦性向上の傾向と相関が得られることから，点群データから締固めの傾向を把握する手法の有効性は示せた。

一方で，地盤反力係数相当値に着目するとタイヤローラがより高い数値を示す傾向が見られた。点群データの解析から得られた，沈下量や平坦性との関係性については，今後も検証を継続する必要がある。

## 4．結論

本稿では, 3 次元点群データを用いた締固め機械の締固め特性を評価することで，以下のことを明らかにした。

(1) 面的に3次元点群データを取得することで，締固め後であっても当時の状況を確認することができるため，品質管理手法等の向上に期待できる技術であることを再認識することができた。

(2) レーザースキャナで計測した3次元点群データからヒートマップやプロファイル等の視覚化により，締固め特性の傾向を掴むことが可能であることが確認できた。

(3) プロファイルデータを検証することで，振動ローラを使用した締固めによる効果は，タイヤローラと比較して，大きな沈下量とうねりが小さい出来形が期待できることが確認できた。うねりついては，ICT舗装工で用いられている道路の縦断方向に発生する凹凸の度合を評価する指標である平坦性からも同様の結果を確認することができた。

(4) 地盤反力係数との関係については，十分な検証結果を得ることはできず，今後の課題として，点群データの解析から得られる結果との違いの考察や確認検証試験の実施が必要である。その上で，異なる土質やロードローラ等の使用など条件を多様化させた評価試験に取り組み，ICT活用を含めた施工手法・品質管理手法を改善する提案を図りたい。

### 参考文献

1) 国土交通省：第13回ICT導入協議会資料【資料-1】ICT施工の普及拡大に向けた取組, 2021.7
2) 国土交通省：3次元計測技術を用いた出来形管理要領(案)，2021.3
3) 山田充，西本聡，佐藤厚子：締固め施工における転圧機械の選定方法の検討,地盤工学会北海道支部技術報告集第53号，2013.1
4) 建設物価調査会：国土交通省土木工事積算基準令和3年度版，2021. 6
5) 国土交通省：第12回ICT導入協議会資料【資料-2】ICT施工の基準類の策定・改訂の取組, 2021. 2

# 19. 転圧ローラのコーン指数と締固め性能について

酒井重工業株式会社　　○ 内山　恵一
同上　　眞壁　淳

## １．はじめに

細粒分が多く最適含水比より湿潤側で施工する場合，敷き均しおよび締固め施工に使うブルドーザおよび転圧ローラの走破性（トラフィカビリティ）に注意するとともに，転圧ローラで締固め後、密度といった盛土の締固め性能についても注意を払う必要がある。走破性の判定基準には，コーン指数が使われている。文献 [1]には各種ブルドーザ，ダンプおよびタイヤローラなどが記載されているが，土質条件や機械仕様は不明である。一方，河川土工や道路土工は通常，締固め度による品質管理が行われているが，細粒分の多い砂質土または粘性土については，空気間隙率または飽和度が規定されている。

最近の振動ローラは，上記文献発行当時の機械に比べて締固め性能と走行性能が大幅に改良されているので，改めて試験を計画した。本試験では，文献資料（湿地ブルドーザおよびタイヤローラ）との比較ベンチマークとして湿地ブルドーザ（14t）およびタイヤローラ（12t）を使用した。試験場は当社締固め研究センターの専用ピットで，供試土には上記文献で推奨される細粒分の多い土を使い，最適含水比より湿潤側に 3 条件の含水比を設定した。各含水比に加水調整後，コーン指数を求め，連続 8 回走破完了した機種の締固め密度と沈下量を測定した。本結果に基づいて，ブルドーザのコーン指数と締固め度および沈下量に対して，各種ローラの結果を比較検討したので，ここに報告する。

## ２．供試機械とその仕様

供試機械は土工用振動ローラ 3 機種，タイヤローラ 1 機種，コンバインド振動ローラ 1 機種，および湿地ブルドーザである。表-1 に供試機械の仕様を示す。土工用振動ローラ SV900DV-1（以降 SV-20t と称す）および SV514D（以降 SV-12t）は，前輪が鉄製平滑振動輪，後輪がトレッドパターン付き空気タイヤを装備する機種で，SV204T（以降 SV-5t）は，前輪がパッドフット付き鉄製振動輪，後輪がトレッドパターン付き空気タイヤを装備する機種である。コンバインド振動ローラ TW504（以降 TW-4t）は，前輪に鉄製平滑振動輪，後輪に平滑な空気タイヤを装備する。タイヤローラ TZ704（以降 TZ-12t）は，前後輪に平滑な空気タイヤを有する。後輪のみ駆動するタイヤローラ（TZ-12t）を除く他機種は，両輪駆動式である。湿地ブルドーザ D51PX-24（以降 D51-14t）は，両輪に三角型断面の幅広い履帯を装備する。

表-1　供試機械の仕様

| 機種名 | 運転質量 kg | 締固め幅/履帯幅 mm | 起振力(試験時) kN |
|---|---|---|---|
| 土工用振動ローラ（両輪駆動） | | | |
| SV900DV-1(SAKAI) | 19,980 | 2,130 | 343 |
| SV514D(SAKAI) | 12,000 | 2,130 | 255 |
| SV204T(SAKAI) | 4,770 | 1,370 | 72 |
| コンバインド振動ローラ（両輪駆動） | | | |
| TW504(SAKAI) | 3,500 | 1,300 | 34.3 |
| タイヤローラ（後輪のみ駆動） | | | |
| TZ704(SAKAI) | 12,330 | 2,275 | － |
| ブルドーザ | | | |
| D51PX-24(KOMATSU) | 13,820 | 710×2 | － |

## ３．実験方法

### 3.1　実験概要

複数の供試機種を対象に3段階のコーン指数の地盤を正確に設定するため，弊社締固め研究センターの試験ピットで実施した。コーン指数は，供試機械が所要区間を8回（往復4回）連続で走行した場合，予備転圧後の測定値を採用した。

### 3.2　試験ピット

試験ピットは，長さ20m，幅3m，深さ0.95mのコンクリート製で，予めピットの底部に厚さ44cmの土地盤を締固めて造成した。1回の試験終了後，敷き均し用ブレード付スタビライザ（写真-1，以降スタビ）で加水攪拌しながら含水比を調整し，厚さ約50cmに敷き均した。

写真-1　敷き均し用ブレード付スタビライザ

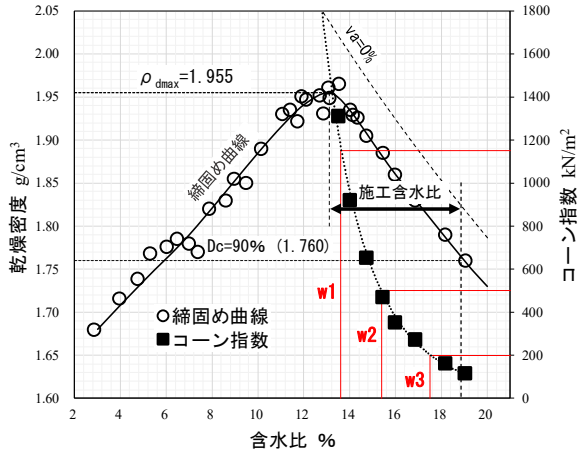



図-2　供試土のコーン指数と含水比の関係

### 3.3　供試土

供試土は，文献 [1]の「堤体材料として望ましい土（p.66）：細粒分15%以上（不透水性確保），50%以下（乾燥時のクラック抑制）の土質材料で，分類名では{GF}・{SF}・{M}・{C}に相当する材料」を参考に選定した。

供試土の土質分類は，細粒分まじり砂｛SF｝であり，粒度成分は礫分4.8%，砂分52.6%，細粒分42.6%である。JIS A 1210のA-a法の突き固めによる最大乾燥密度は1.955g/cm$^3$，最適含水比は13.1%である。本供試土の場合，河川土工における品質管理規定は，締固め度（Dc）90%以上となる。

### 3.4　供試土のコーン指数と含水比の関係

供試土のコーン指数と含水比の関係を捉えるために，「JIS A 1228：締固めた土のコーン指数試験方法」に則って供試土の突き固め試験を行った。図-2に，締固め曲線および目標コーン指数と含水比の関係を示す。河川土工における含水比の決定は，「トラフィカビリティを確保しうる範囲」と記載されているが，本試験目的でもあるため，締固め度（Dc）90％以上を確保できること，かつ最適含水比から湿潤側にあることに配慮した。更に，文献 [1]の建設機械の走向に必要なコーン指数（p.160）：タイヤローラ800～1,000kN/m$^2$以上，普通ブルドーザ（15t級程度）500kn/m$^2$以上，超湿地ブルドーザ200kn/m$^2$以上を想定し，3種類の目標含水比を「w1=13.5%」,「w2=15.5%」および「w3=17.5%」に設定した。

### 3.5　予備転圧と測定項目

供試土の敷き均し後，静的ローラ（質量900kg，輪径550mm，締固め幅2800mm）により予備転圧を行った。これは，施工現場でのブルドーザによる敷均し時の締固め効果を想定している。

予備転圧の終了後，各供試機械で試験を実施した。コーン指数，締固め密度および沈下量は，予備転圧後「P0」と転圧ローラの偶数回（往復）転圧後「P2，P4，P6，P8」に測定した。コーン指数は地盤工学会基準（JGS 1431）のポータブルコーン貫入試験器を用い，締固め密度は砂置換法（JIS A 1214）で測定した。

### 3.6　予備転圧後のコーン指数

図-3に，予備転圧後におけるコーン指数と貫入深さの関係を示す。含水比と深さに応じて変化するため，代表値は各貫入深さの値を平均して求めた。すなわち，w1で359kN/m$^2$，w2で319kN/m$^2$，w3で243kN/m$^2$である。

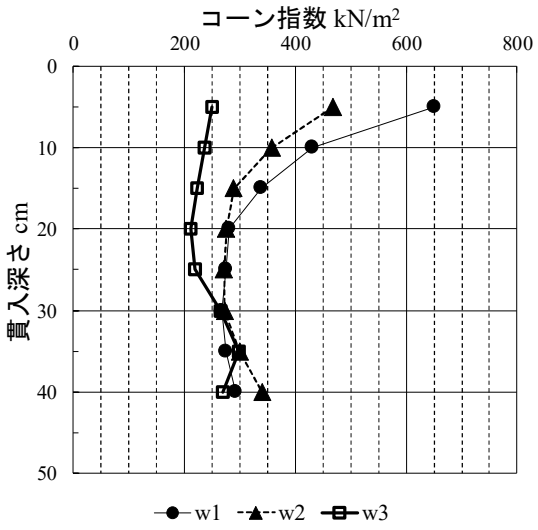



図-3　コーン指数と貫入深さの関係

## 4．実験結果

### 4.1　コーン指数と走破性

表-2に，3種類の含水比に調整された地盤上における転圧ローラとブルドーザの走破性判定結果を示す。表中の「○」は走破可能，「△」は走破可能であるが，走行速度が1km/h以下と遅く実施工に適さない，「×」は走破不能を意味する。

土工用振動ローラ3機種（SV-5t, SV-12t, SV-20t）には，土工現場における軟弱および不陸な地盤でのけん引力を確保するため前後輪に駆動装置が装備されている。3機種は，SV-20tのw3（コーン指数

表-2　走破性判定結果

| 機種 | W1<br>コーン指数<br>359 kN/m² | W2<br>コーン指数<br>319 kN/m² | W3<br>コーン指数<br>243 kN/m² |
|---|---|---|---|
| TW-4t | ○ | ○ | ○ |
| SV-5t | ○ | ○ | ○ |
| SV-12t | ○ | ○ | ○ |
| SV-20t | ○ | ○ | × |
| TZ-12t | ○ | △ | × |
| D51-14t | ○ | ○ | ○ |

写真-2　SV-12t（条件；w3）【走破性判定：○】

写真-3　SV-20t（条件；w3）【走破性判定：×】

写真-4　TZ-12t（条件；w2）【走破性判定：△】

243kN/m²）を除き，全条件で走破可能であった。SV-12tとSV-20t（写真-2と3参照）の走行開始直後（P1）の沈下量を比べると，SV-12tは約5cm（P2では5.1cm）に対し，SV-20tは約15cm（P2測定値は14.5cm）と約3倍も大きい。SV-20tが走破不能になった原因は，約2倍の前輪荷重により沈下量と走行抵抗が増大したためと考えられる。駆動方式が同じ場合，走破性は輪荷重および沈下量に依存すると言える。

次に，駆動方式の違いが走破性に与える影響について検討する。含水比w2（コーン指数319kN/m²）において，SV-12tとTZ-12t（写真-4参照）を比較すると，同等の運転質量であるSV-12tが「○」で，TZ-12tが「△」であった。P2での沈下量はSV-12tが約11cmに対し，TZ-12tが約12cmとほぼ同等で，走行抵抗も同等と考えられるが，SV-12tの方が優れる結果となった。これは，SV-20tが両輪駆動に対してTZ-12tは後輪駆動のためと考えられる。

## 4.2　締固め性能

(1) 締固め度

締固め度と含水比の関係を，図-4に示す。締固め度は転圧8回（P8）後の測定値で，w3で走破不能であったSV-20tとTZ-12tは除外した。転圧ローラの締固め度は，w1で98.6～101.2%，w2で95.1～98.7%，w3で90.6～93.2%と全条件において締固め度90%を満足した。特にw1では，SV-12tとSV-5tが約100%と非常に高い。SV-5tについては，パッドフット（タンピング）の効果と考える。TW-4tは，w2およびw3とも最大である。これは空気タイヤのニーディング効果と考えられるが，密度測定の範囲外（深さ10cm以下）の密度は低いと推察する。その要因は，次節(2)沈下量で述べる。一方，ブルドーザD51-14tの締固め度は，w1で89.0%，w2で95.1%，w3で89.4%となり，w2を除き90%を満足していない。また転圧ローラの締固め度より低く，特にw1ではSV-12tやSV-5tと比べて約10%も低い。

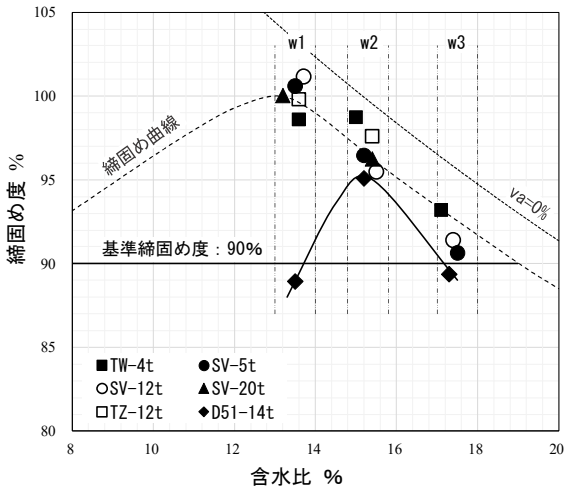
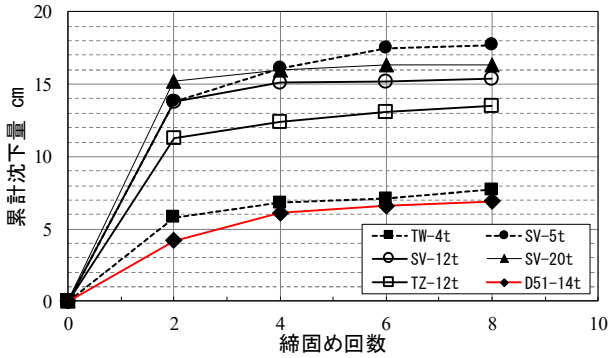



図-4　各締固め機械の締固め度（P8後）

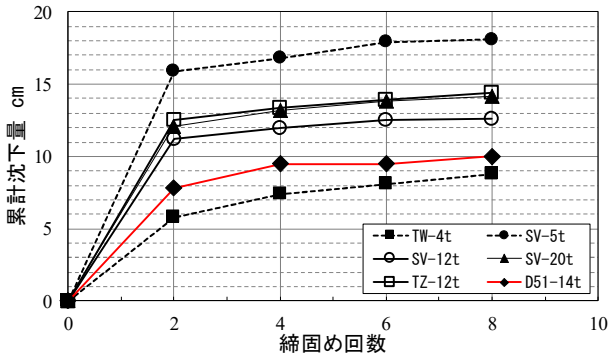
(2) 沈下量

図-5は，沈下量と締固め回数の関係で，w1を(a)，w2を(b)，w3を(c)に各々示す。w1の沈下量はSV-5tが最大（18cm）で，SV-12tとSV-20tはTZ-12tとほぼ同等（約15cm），さらにTW-4tとブルドーザは共に約8cm以下で，SV-5tの約半分である。前項でTW-4tの締固め度が下層では低いと述べた理由は，本結果に示す通り沈下量が少ないからである。また，TW-4tの輪荷重と起振力は他機種に比べ低いので，締固め能力も低い。w2の沈下量は，SV-5tが最大で，

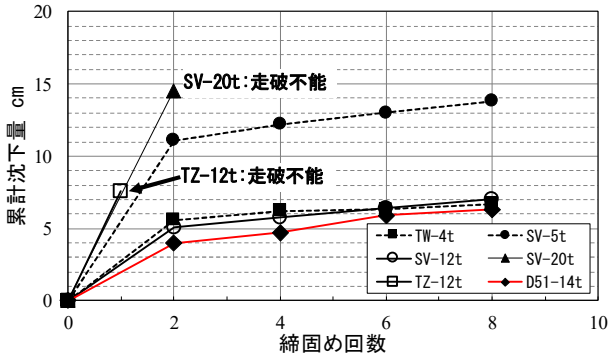
SV-20tとTZ-12tが同等，SV-12tが続き，TW-4tとブルドーザはほぼ同等（約10cm）である。w3においてもSV-5tが最大で，その他の機種は約5cmと同等である。TW-4tとブルドーザの沈下量は含水比3条件において5～10cmの範囲に留まることから，締固め能力は低いといえる。SV-5tは，総じて沈下量が大きい傾向にあるが、これはパッドフットの締固め痕底部の沈下量を測定しているためであり，走行抵抗の増大は少なかったと考えられる。




(a)　含水比条件：w1




(b)　含水比条件：w2




(b)　含水比条件：w3

図-5　各含水比条件での沈下量と締固め回数の関係

## 5．考察

走破性では，SV-5t，SV-12t，TW-4tおよびブルドーザが3条件を満足した。転圧ローラの走破性は，平滑振動輪の場合，駆動方式（両輪駆動，後輪のみ駆動）と輪荷重（沈下量と走行抵抗）に影響されることが明らかになった。

締固め度では，転圧ローラがw1で98.6～101.2%，w2で95.1～98.7%，w3で90.6～93.2%と基準締固め度90%を満足し，特にw1ではSV-12tとSV-5tが約100%と非常に高い。ブルドーザはw1とw3で基準値を満足せず，w1では土工用振動ローラより約10%も低い。

沈下量では，w1（13.5%）において土工用振動ローラが約18cmで最大，次いでTZ-12t，TW-4tとブルドーザはほぼ同等（約8cm）で土工用振動ローラの約半分である。SV-5tは全含水比で最大であるが，パッドフットによるところが大きい。TW-4tとブルドーザは最低（5～10cm）に留まるため締固め能力は低いといえる。

本結果より，走破性と締固め性能（締固め度と沈下量）の両面から評価してSV-5tおよびSV-12tが優れているといえる。

本試験で得られたコーン指数と文献[1)]に記された値との差について比較する。図-7の上段に本結果，下段に文献値を示す。本試験で得られたタイヤローラのコーン指数は文献値に対して約半分と低く，下限値は不明であるが湿地ブルドーザについても文献値に対して低いことがわかる。文献値が得られた際の条件は不明であるが，土質や施工条件および機械仕様によっては，文献値を超える走破性を得られる場合があることがわかった。今後，さらに試験データを収集・蓄積しながら検討を進める予定である。

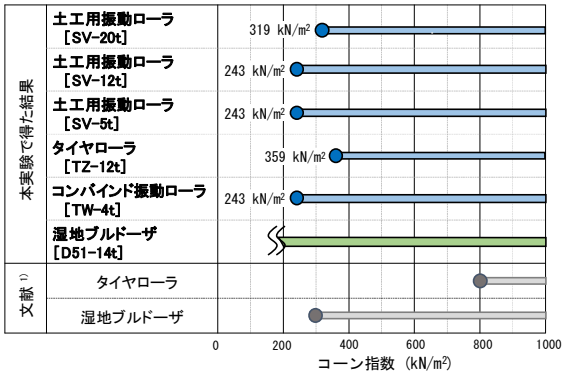



図-7　各建設機械の走破可能なコーン指数範囲

## 6．おわりに

最近の転圧ローラおよびブルドーザの走破性（コーン指数）と締固め性能（締固め度と沈下量）の関係を試験評価した結果，12t以下の土工用振動ローラ（SV-5tおよびSV-12t）が両性能面において優れることが明らかになった。今後，盛土施工の生産性と品質向上に資すれば幸甚である。

### 参考文献

1) (財)国土技術センター，「河川土工マニュアル」，2009

# 20. 拡張現実(AR)を用いた船舶航行ナビゲーションシステムの開発

東亜建設工業株式会社　　○ 宮本　憲都

## １．はじめに

近年，建設業就業者の高齢化と入職者の減少による，次世代への技術承継が課題となっている。港湾工事における作業船においても熟練技術者が減少しており，土運船などの運航に関して，工事を円滑かつ安全に施工するため，自船舶の運航状況や他船舶の動静を正しく把握することが重要である。当社は，位置情報発信端末，AIS（自動船舶識別装置），船舶レーダー等を利用した独自の船舶運航監視システムを開発し運用を続けてきたが，更なる航行の安全性を向上させるため，拡張現実（AR：Augmented Reality）を用いた船舶航行ナビゲーションシステム（以下 AR ナビという。）の開発を行った。

## ２．AR ナビについて

### 2.1　システム概要

AR ナビは，カメラで撮影した映像上に，航行経路や危険区域を AR として表示し，視覚情報と音声情報により，分かり易くナビゲーションするシステムである。これにより航路の誤認，浅瀬など進入禁止区域への接近や進入を操船者が早期に認識できるため，船舶の運航において安全性の向上が期待できる。

AR ナビの最大の特長は，航路を示すものや標識の無い海上において，仮想的に前方カメラで取得した映像上に航路エリア，警戒ライン，船上から目視確認が難しい浅瀬などの危険箇所を分かりやすく表示することで，操船者の安全確認をサポートできることである。陸上の現場でも使用可能で，工事用車両などに本システムを搭載することにより，日々変化する現場の通行ルートを視覚情報として分かり易く表示することができる。災害発生時など，新たな危険箇所が発生した場合，AR ナビへ危険区域の設定を随時追加することによって，船舶や車両の安全を確保しつつ，迅速な対応を行なうことができる。図-1 にシステムイメージを示す。

### 2.2　システム構成

AR ナビは，前方の映像を取得するカメラ，自船の位置及び方位を計測する GNSS 方位計，情報表示及びデータ管理を行なう管理パソコンから構成されている。また，オプションとして AIS 受信機や監視レーダーを搭載することで，AIS 搭載船舶の情報や小型船舶の位置が表示可能となる。更に，腕時計型アラート受信機，LED 表示板，回転灯，警報器など，警報装置を併用することにより，様々な形で警報を発信することができる。図-2 に AR ナビの船舶用機器構成図を示す。

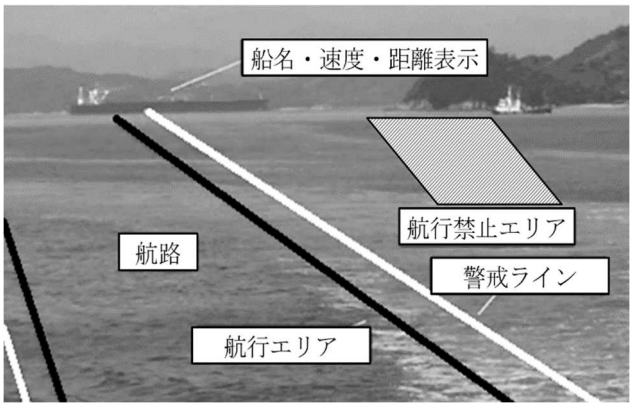



図-1　システムイメージ

図-2　船舶用機器構成図

### 2.3　適用範囲

本システムは，操船者に対するナビゲーション支援として開発したものであり，工事用車両にも適用可能である。特に一般船舶の往来が多い海域，航行距離が長くなる海域，浅瀬など警戒するべき箇所が多く存在する海域，また，工事の進捗に伴って日々の航路，危険箇所が変化する現場などに効果的である。なお，GNSS 測位が使用できない橋脚下，トンネル内や，カメラの視界が確保できない夜間，濃霧などは適用できない。表-1 に AR ナビの運用条件と表示精度を示す。

表-1　ARナビの運用条件と表示精度

| | |
|---|---|
| 制限速度 | 船舶：10knot 以下<br>車両：20km/h 以下 |
| 遅延速度（理論値） | GNSS 更新間隔 10Hz(0.1 秒) |
| 表示誤差（理論値） | GNSS 方位計精度±0.75°より算出<br>100m 地点：±1.3m<br>500m 地点： 6.5m |

## ３．基礎実験

基礎実験として，陸上での車両搭載試験と海上での船舶搭載試験を行った。

### 3.1　陸上試験

カメラと GNSS 方位計のデータを取り込んでシステム画面上で航路などを表示するライン（以下 AR ライン）が正確に描画できるか検証するために，車のルーフキャリアに機材を設置し，実験を行なった。図-3 に機材の設置状況を示す。なお GNSS 方位計の測位精度や車両の動揺（傾斜）が AR ラインの描画に与える影響を検証するため，「①精度±1m の D-GNSS 方位計とカメラを使ったパターン」と，「②精度±2cm の RTK-GNSS とカメラを使用し精度 0.1° の 2 軸傾斜計を補正情報として追加したパターン」の 2 つのパターンで実験を行なった。

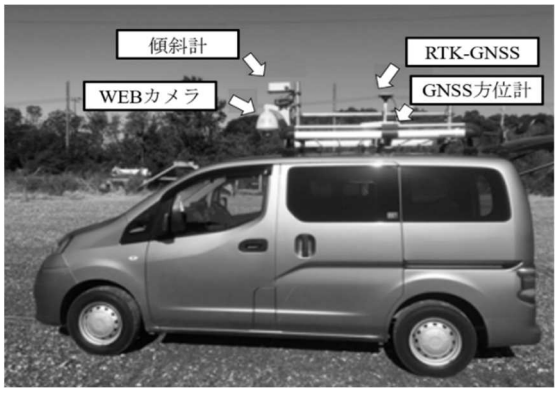



図-3　機材設置状況

ARラインの描画の確認として，時速20kmで走行しながらARラインと設定した航路が一致するか目視で確認した。D-GNSS方位計とカメラで走行したパターンでは，設定した航路に対して最大1mのズレが確認されたが，航行に支障を来す大きなズレは発生せずに良好な描画が可能であった。また，RTK-GNSS受信機とカメラを使用し2軸傾斜計のデータで補正したパターンでは，表示した航路と設定した航路はほぼ一致した。図-4にD-GNSS方位計とカメラ使用時のARラインの描画状況を，図-5にRTK-GNSS受信機とカメラを使用し2軸傾斜計で補正した際のARラインの描画状況を示す。

設置時間，機材の耐久性，ソフトウェアの操作性についても検証を行なったが，設置時間については，D-GNSS方位計とカメラを使用する場合で約1時間，RTK-GNSS，カメラと2軸傾斜計を使用する場合で3時間～4時間必要であった。また，2日間実験を行ったが，走行中の振動による機材の破損やズレは発生せず，機材の耐久性に問題はないことが確認できた。更に，ソフトウェアの操作性では，ARラインを事前に設定することによって，操船者は特別な操作を必要とせず，画面に従って運用することができた。

図-4　ARライン描画状況(D-GNSS方位計使用)

図-5　AR ライン描画状況(RTK-GNSS 方位計使用)

### 3.2　海上試験

試験対象工事の交通船は，工事期間中，基地港から施工区域まで往復16kmを航行しており，航行中に付近を航行する他船舶の動静監視が重要であった。また，現場周辺は浅瀬となっており，付近を航行する際，座礁しないように十分注意する必要があった。そこで，航路及びAIS搭載船舶，危険区域の情報をARとして表示し，操船者に視覚情報と音声情報で注意喚起することで安全性が向上するかを検証した。交通船の船速は約10knotとして，施工区域までの航路を10往復航行し検証を行なった。その結果，航路や危険区域，浅瀬の位置，進行方向

をシステム画面上へリアルタイムに表示可能であることを確認した。AIS搭載船舶の表示に関しては，AIS情報の更新間隔が不規則であり，画面上の船舶位置とAR表示名が多少ずれる場合があったが，運用上問題ない程度であった。更に，危険区域に侵入した際には画面上のメッセージ表示と音声で操船者に注意喚起が可能である事も確認した。図-6に現場の施工区域と航路についての上空写真，図-7に使用した交通船への機材の設置状況，図-8に本試験中のシステム画面，図-9に浅瀬区域を航行中のシステム画面を示す。

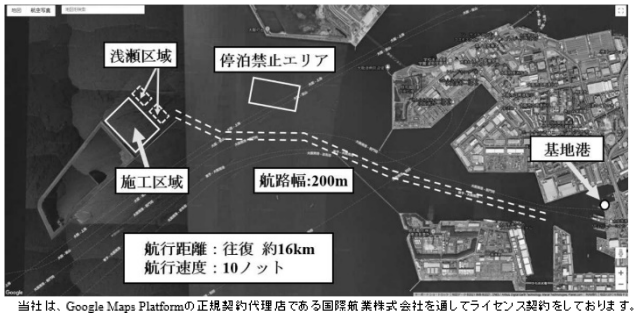



図-6　施工場所および航行経路
（画像提供元:Google Map）

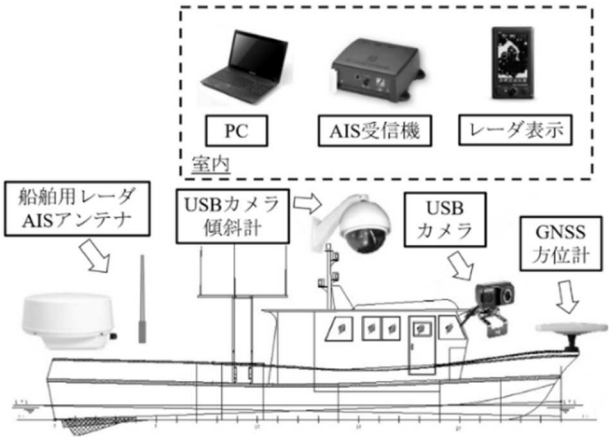



図-7　交通船への機材設置状況

図-8　システム画面（海上試験時）

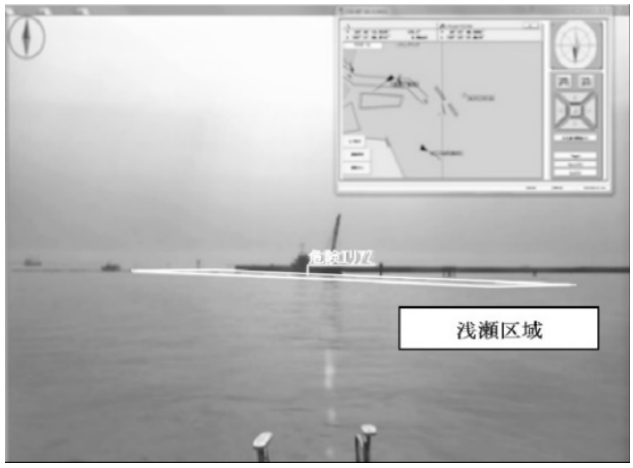



図-9　システム画面（浅瀬区域）

## ４．工事への適用

AR ナビを土運船の土砂運搬工事に導入し，効果を確認した。一般的な土運船の土砂運搬は，操船者が灯浮標を目視で確認し，航路の位置をおおよそ把握して航行する。この工事において土運船は，大型船舶が航行する航路（-14m）の端部を片道 4km にわたって針路を保持し，一定の速度で航行する必要があった。運搬経路には，航路を明示する灯浮標がないため，航路を正確に把握し航行することが難しい状況であった。そこで，AR ナビで航路や危険エリアを AR で表示させ，航行ナビゲーションを行い，航路を外れた際は警報により操船者へ注意喚起を行うようにした。また，土運船のリアルタイムの航行位置は事務所の PC に共有され，現場職員がいつでも土運船の航行状況を把握することが可能である事を確認した。図-10 に土運船運搬時のシステム画面を示す。

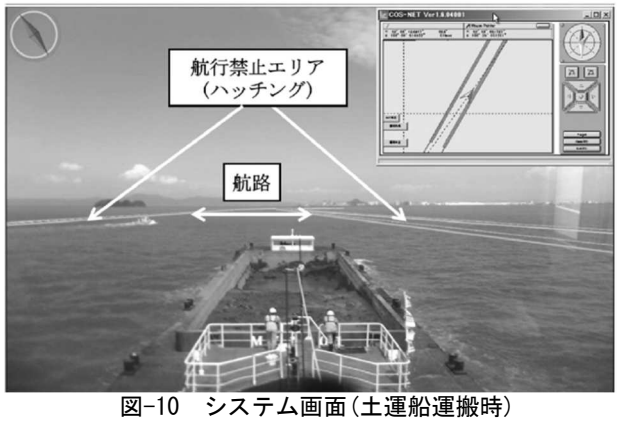



図-10　システム画面（土運船運搬時）

## ５．今後の展望

ARナビは上述の通り，カメラ映像内に映る船舶の認識は，大型船はAIS情報，小型船は船舶レーダーで実施している。しかし，AISは500t未満の船舶には搭載義務がないため，全ての船舶を検知する

ことはできない。更に，情報の更新間隔が不規則であり，最新情報を入手できないことや，船舶レーダーは検出した陰影から船種の区別がつかないため，監視業務の効率化と安全性向上を図るためにも更なる機能向上が必要である。そこで，人工知能(AI)の画像認識技術を利用した船舶検知機能（以下AI船舶検知機能という。）を追加することで，船舶検知精度向上を試行中である。このAI画像認識技術は，画像解析に特化したCNNモデル(Convolutional Neural Network)を使用しており，カメラで撮影された一般船舶の船種（大型船・小型船）を高精度に識別することができる。これに，当社の港湾工事で撮影した映像を教師データとして追加学習し，一般船舶のほか，作業船や潜水士船，警戒船等の工事用船舶の識別も可能としている。ARナビにAI船舶検知機能を追加するには，従来のUSBカメラをより高画質な4Kカメラに換え，管理パソコン内にAIモデルを組み込むことで簡単に構築が可能である。なお，画像解析による検知船舶の距離推定や接近警報機能などを今後追加する予定である。図-11にAIモデルの概要図，図-12に小型船の検知状況，図-13に大型船の検知状況を示す。

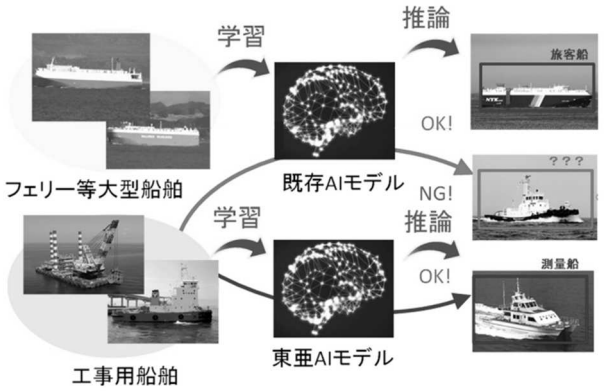



図-11　AIモデル概要図

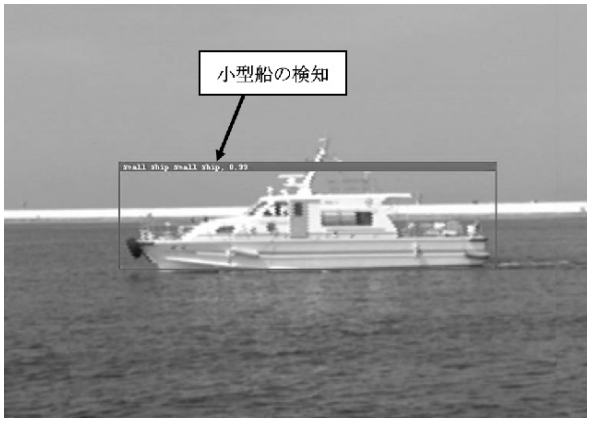



図-12　小型船の検知状況

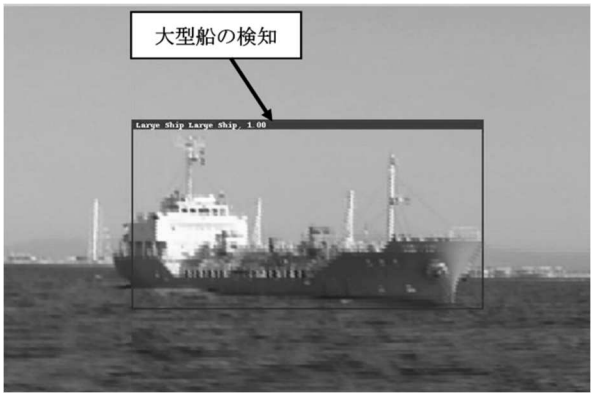



図-13　大型船の検知状況

## ６．終わりに

ARナビは既に10件以上の導入実績があり，土運船の運航管理の他にも，作業船の回航管理やケーソンの曳航などへ導入されており，様々な海域やシチュエーションにおいての安全管理へ寄与している。今後もシステムの改良や機能追加により，更なる性能の向上を目指す所存である。

## 参考文献

1) 水木啓陽・田中孝行・藤山映：航行（運航）支援システム「ARナビ」の開発，会誌「電力土木」，402号，pp.114～116, 2019年発行

# 21. バランスアームを用いたコンクリート二次製品の敷設機械

鹿島道路（株）　伊藤　圭祐
○ 中渡瀬　圭吾
岩田　真幸

## １．はじめに

建設現場において歩車道ブロックやU字溝などのコンクリート二次製品の敷設・間配りはクレーン機能付き油圧ショベルを用いた設置作業で行うことが多い。しかし，油圧ショベルは機械の構造上，設置作業に求められる精細な垂直上下の作業は難しく，オペレータの技量が求められる。また，このような作業時にはヒューマンエラーによる挟まれ等の接触事故が多発していた。歩車道ブロック敷設時の機械作業については設置場所への間配り作業が主であり，実際の設置は人力で行っている。そのため重量物取扱いによる作業員の身体的負担が大きい。建設業界では高齢化や，人手不足が深刻化しており，作業全体の省力・省人化，身体的負担の軽減，安全性の向上が求められている。

そこで，不整地運搬車の走行部をベース車両として荷役工場などで使用されているマテリアルハンドの一種であるバランスアームを搭載し，誰でも簡単で安全にコンクリート二次製品を運搬・設置することが可能な敷設専用機械（当社名称：パワーアシストセッタ）を開発した。本稿は当該敷設機械（写真-1）を報告するものである。

写真-1　パワーアシストセッタ

## ２．従来のコンクリート二次製品の敷設方法

前述の通り，従来の敷設作業においてはクレーン機能付き油圧ショベルを用いて作業（写真-2）する場合が多い。この場合，オペレータとコンクリート二次製品を敷設する作業員が必要であり，重機と人の近接混在作業となり安全上問題である。また重量物であるコンクリート二次製品の運搬・間配り方法についても作業員の身体的負担を考慮する必要があった。

写真-2　油圧ショベルを用いた設置作業

## ３．パワーアシストセッタ概要

### 3.1　ベース車両の選定

車両の選定については，コンクリート二次製品をパレット搬入状態のままで車両荷台に積載でき，且つ運搬能力を有したもので検討を進めた。また現場での使用を想定し，舗装面や十分に整地されていないような場所でも運用できるようゴムクローラで，8t セルフローダーでも回送できるように小型の不整地運搬車の走行部を採用することとした。

### 3.2　バランスアーム特徴

図-1 にマテリアルハンドの一種であるバランスアームの構成を示す。平行リンク機構と電動モー

タによるパワーアシストにより，アーム先端部の動きが本体部内の水平及び垂直ガイドレール内のローラに支えられているため，水平（前後），垂直（昇降）の動作を作業員の腕の力だけで無理なく操作することが可能である。

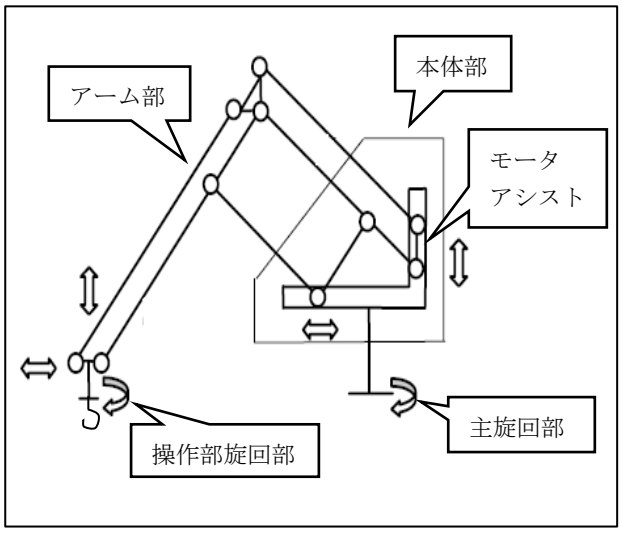



**図-1 バランスアーム構成**

### 3.3 操作部特徴

コンクリート二次製品の荷降ろし，据え付けは設置する作業員が操作レバー（写真-3）を操作し，垂直水平動作を行いながら作業する。操作レバーのグリップ部ブレーキボタン（写真-3　黒い部分）を押し続けることで任意の位置に水平（前後）動作させることができ，左右に回転させることでアームが垂直動作（昇降）し，回転量によって昇降速度の調整が可能なので，設置操作する際の微調整を容易に行うことが出来る。また主旋回部は自由回転することができるので，片手で全ての作業を行うことができるように設計されている。垂直動作は電動アシストモータの制御方式にサーボ制御を採用しており，負荷の変動があっても自動的にバランスを保ち，0kg から 120kg(最大負荷)まで同じ感覚で安定した無段階操作が可能である。操作レバーから手を離すと旋回を含めアームの動きすべてにブレーキが掛かる構造となっており，掴んだコンクリート二次製品をその状態で保持することができるので，作業員の感覚通りに操作することができ，安全に作業を行うことができる。

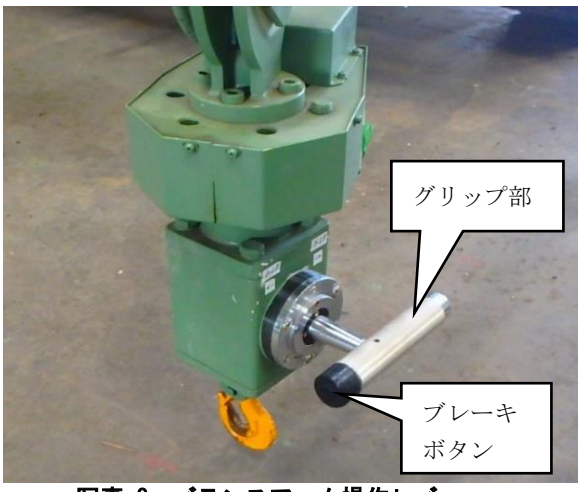



**写真-3　バランスアーム操作レバー**

### 3.4 独自開発した自動水平維持装置

バランスアームの，主旋回部は作業員の意のままに旋回できるようになっているので，現場の傾きに対して荷の重さによっては意図しない方へ回転してしまう事がある。そこで，自動水平維持装置を搭載した支持台（写真-4）を独自に開発した。荷重によりバランスアームが勝手に動かないよう，常に水平を維持する機能を備えている。支持台は 3 本のシリンダにより支えられており，これらシリンダの伸縮によって水平を保つよう制御されている。その際，制御するべきシリンダ伸縮量は，バランスアーム支持台に固定されているスロープセンサが支持台の傾きを検知し，制御ユニット（写真-5）がその傾き量から各シリンダの最適な伸縮量を計算することによって決定される。実際の各シリンダの伸縮量は各シリンダに装備されているストロークセンサによって常に計測されている。この自動水平維持装置の一連の制御により不陸による傾きがある場所でもバランスアーム支持部を常に水平に保つことができ，安定した作業を行える構造となっている。

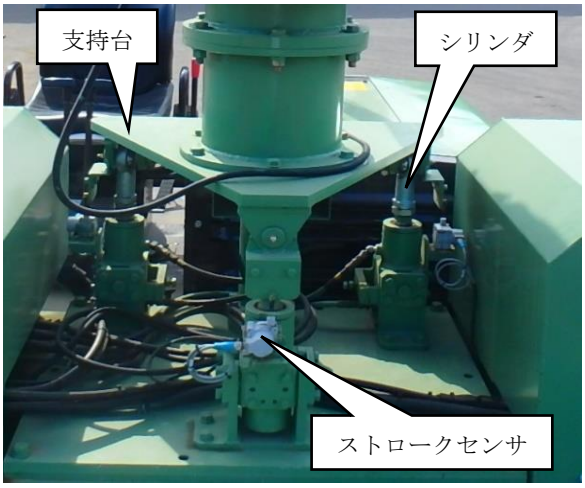



**写真-4　バランスアーム支持台**

**写真-5　自動水平維持装置制御ユニット**

### 3.5　操作電源

バランスアームの動作電源として AC200V が必要なため，車体に単相発電機を積載し，使用していない油圧回路を動力として利用している。発電機の主な仕様を表-1 に示す。

**表-1　発電機の主な仕様**

| | |
|---|---|
| 駆動源 | 油圧モータ |
| 出力 | 5KVA |
| 形式 | 回転界磁型交流発電機 |
| 極数 | 4 極 |
| 周波数 | 50Hz |
| 定格回転数 | 1,500/min |
| 電圧 | AC200V |
| 重量 | 90kg |

### 3.6　仕様

パワーアシストセッタとバランスアームの主な仕様を表-2，表-3 にそれぞれ示す。また車体正面から見た作業可能範囲を表したものを図-2 に示す。

**表-2　パワーアシストセッタ主な仕様**

| | | |
|---|---|---|
| 機械寸法 | 全高 | 2,780mm |
| | 全長 | 3,860mm |
| | 全幅 | 2,000mm |
| | 重量 | 3,310kg |
| 走行速度 | 変速 | HST(2 段切り替) |
| | 高速 | 0~11km/h |
| | 低速 | 0~6km/h |
| 最小回転半径 | | 約 2.3m |
| 登坂能力 | | 25 度 |
| 動力伝達装置 | 主変速形式 | HST(2 連モータ) |
| | 操向装置型式 | 2 ポンプ 2 モータ |
| | ブレーキ型式 | 油圧式 |
| | クローラ | 320×58×90 |

**表-3　バランスアーム主な仕様**

| | |
|---|---|
| 動力伝達 | ラック＆ピニオン |
| 駆動方式 | 電動モータ |
| 持上荷重 | 120kg |
| 旋回半径 | 2.8m |
| 上下移動速度 | 0~18m/min |
| 電源電圧 | AC200V |

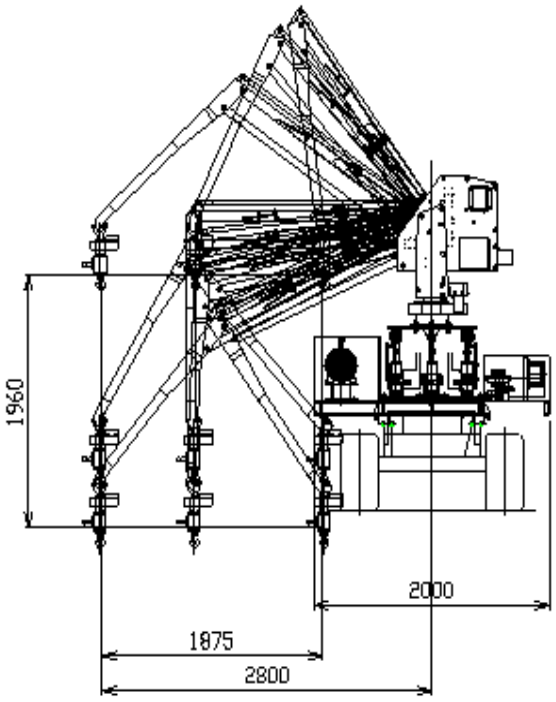



**図-2　ハンドリング範囲図**

### 3.7　運用方法

不整地運搬車の走行部をベースとして使用しているため，現場での移動走行は不整地運搬車の有資格者が行っている。設置作業においては、マテリアルハンドを使用した 100kg 以下のコンクリート二次製品の取り扱いのみであるため小型クレーンには該当せず、移動式クレーンの資格を有していない者でも操作することが可能である。また，作業者が一人で操作作業出来る為、作業の省人化に大きく寄与している。

現場運用においては，機械構造で転倒の安全率は 5 倍以上確保されているが，軟弱地盤や急勾配の場所では安全のため使用を禁止している。

## 4.　現場事例紹介

2021 年 3 月から同年 6 月までに 3 現場でコンクリート二次製品の間配り・据え付けを試験的に行った。表 4 に工事概要とコンクリート二次製品の種類と寸法を示す。

**表-4　コンクリート二次製品の設置を行った工事概要**

| 場所 | | 千葉県 | 石川県 | 埼玉県 |
|---|---|---|---|---|
| 工事概要 | | 道路改良工事 | ショッピングモール新築工事 | 野球グラウンド移転工事 |
| 二次製品種類 | | 両面歩車道ブロックA | 片面歩車道ブロックA | U字溝 |
| 寸法 | 高さ | 200mm | 200mm | 200mm |
| | 長さ | 600mm | 1000mm | 600mm |
| | 重量 | 49kg | 73kg | 55kg |

写真-6，写真-7，写真-8 はそれぞれの現場においてコンクリート二次製品の設置・間配りを行った状況である。操縦未経験者に操作を行ってもらい，スムーズに設置できることを確認でき，取扱の容易性を実証することができた。重量物の取り扱いも身体的負担の軽減・省力化となり，設置微調整を行う作業が追われるほどの効果が得られた。また現場内の不陸のある場所（写真-9）においても自動水平維持装置によってバランスアームを水平に保つことができ，クレーン機能付き油圧ショベルと比べ安定して安全に作業できることを確認した。

**写真-6　両面歩車道Aブロック設置状況**

**写真-7　片面歩車道ブロックA設置状況**

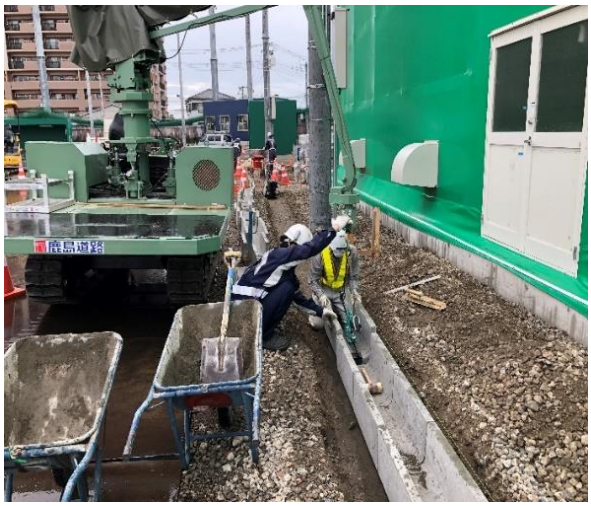


**写真-8　U字溝設置状況写真**

**写真-9　不陸のある場所においての使用状況**

## ５．おわりに

本稿では，コンクリート二次製品の運搬・設置専用機械パワーアシストセッタの開発を報告した。これまでこれらの重量物施設はクレーン機能付き油圧ショベルを用いた作業で設置個所付近まで間配りを行い，実際の設置は人力作業にて行っていたが，当該敷設機械の開発により身体的負担の軽減，省力・省人化，安全性の向上に絶大な効果が発揮出来る。今後は，情報化施工技術を取り入れて設置位置・高さのガイダンス機能を導入するなど，現場の意見を考慮した改良を進めていく所存である。

## 参考文献

1)元田技研株式会社：
http://www.motoda-giken.co.jp/wp-content/uploads/2018/05/YmantokucyouR1.pdf
2)1台で運搬と敷設作業が可能に新作業車・パワーアシストセッタ誕生，　鹿島道路社内報　KIT PLUS，　Vol2 p.10 ，　2021

# 22. 油圧アタッチメントの交換容易化による解体現場の安全性・環境性・生産性の向上

株式会社小松製作所　　○ 山本　宏

## １．はじめに

解体現場（図-1）の安全・環境課題解決と生産性の向上を目的として、コマツは新たに油圧オートカプラ(図-2)を市場導入し、油圧ショベルの先端アタッチメント交換作業の容易化に取り組んでいる。本論文では、現場で作業者がアタッチメントに触れず、作動油をまき散らさずにアタッチメント交換ができる新技術、油圧オートカプラの特長を説明し効果の検証結果を報告する。

図-1　解体現場

図-2　油圧ショベルへ装着した油圧オートカプラ

### 1.1　社会的背景

1971 年に建設業法にて建設業が登録制から許可制に変わったが、解体工事は「とび・土工 工事業」に含まれることとなり、独立した業種として扱われることが無くなった。そのため解体工事現場特有の安全・環境・労働条件の改善への取り組みが十分ではなく現在も課題となったままである。

2016 年 6 月の改正法（建設業法等の一部を改正する法律）の施行により、建設業許可に係る業務区分として「解体工事業」が「とび・土工 工事業」から独立した。また経過処置期間が終了した 2021 年 6 月以降、事業者が「解体工事業」の許可を取得し、専門の資格や実務経験を持つ技術者を配置することが求められることとなった。

### 1.2 解体工事業の課題

国土交通省の推計によると、解体工事件数は今後も増加傾向で推移する見通しで、鉄骨造、鉄筋コンクリート造の民間建築物解体工事は2028年頃にピークを迎えると予測されている。一方、解体業を含む建設技能者の数は、1997 年の 464 万人をピークに減少が続いている。2018 年には 331 万人で、ピーク時の 7 割に減少した。この間に建設技能者の高齢化も進み、今後 10 年以内にさらに離職が加速すると考えられる。(図-3) こうした背景により、業界内では解体工事業における安全な施工体制の確立に対する要求が非常に高まっている。担い手不足を軽減し今後の工事量に対応するために、就業先としての解体業の魅力を高め技能者数を確保することと生産性向上は業界の喫緊の課題である。

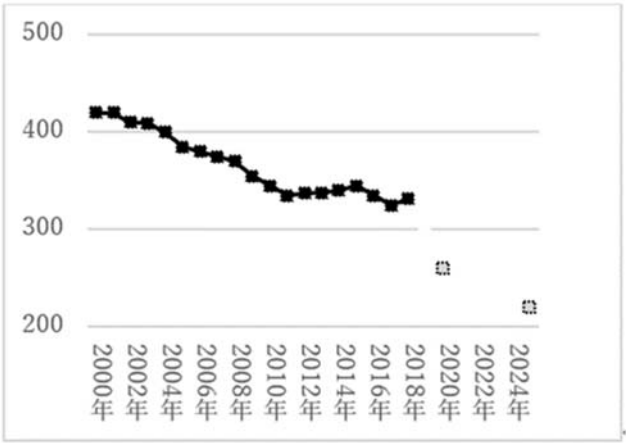



図-3　建設技能者登録数の推移

また、今回の建設業許可区分の見直しは、解体現場における環境負荷低減に対する社会的な関心の高まりを背景としている。これに対応して解体工事では徐々に周辺環境に配慮し騒音、振動を低減し、瓦礫の飛散や落下物等を防ぐ工法を採用してきた。同時に廃棄物の適切な管理も進められている。しかしながら工事の特性上、作動油散布などの環境負荷を抜本的に低減するのが困難な現場があるのも事実である。

## ２．油圧アタッチメントの交換作業の実情と課題

### 2.1 解体現場における作業概要

解体現場では、解体する躯体や工程により、大割圧砕具、小割圧砕具、鉄骨カッター、ブレーカ、フォーク、など様々な油圧アタッチメントを油圧ショベルに装着して工事を行っている。（図-4）これらは各々使用目的が異なり躯体や工程に応じた選定が必要で、各アタッチメントの使用時には他アタッチメントからの交換作業が発生する。解体躯体の大きさや施工現場の広さ、油圧ショベルの配車台数により異なるが、油圧アタッチメントの交換作業は１現場で工期を通じては数十回、１日に数回交換することもある。

図-4　各種油圧アタッチメントの一部

### 2.2 交換作業工程

油圧アタッチメント直付け（カプラを使用せずに油圧ショベルに直接取り付ける）の場合、交換は油圧ショベルのバケット取付ピンの着脱を大ハンマーによる打撃で行っている。次に油圧ホースの着脱も、工具を使用し手作業で行っている。オペレータ１名と作業員２名の共同作業で行う交換作業時間は約 60 分を要す。取付ピン等重量物の取扱や大ハンマー使用時についてアタッチメント交換作業の安全性向上が課題である。また油圧ホースの着脱前に圧抜きが必要で、油圧ホース内に残った高温・高圧の作動油を現場に撒き散らすことが環境配慮の課題でもある。(図-5)

**図-5　カプラを使用しない場合の油圧アタッチメント交換作業**

## ３．油圧アタッチメント交換技術の変遷

### 3.1　直付け（カプラ無し）

油圧アタッチメント交換を取付ピンの着脱により行う技術。オペレータ１名と作業員２名の共同作業。交換作業時間約 60 分(2.2 参照)

### 3.2　機械式カプラ

油圧アタッチメント交換では取付ピンの着脱不要。カプラのキャッチブラケットをアタッチメント側取付ピンの位置に手動で合わせロックする技術。取付ピンの着脱は不要となるが、作業員が工具を使いカプラの近くで操作をしなければならない。油圧ホースの着脱も作業員が手動で行う。オペレータ１名と作業員２名の共同作業。交換作業時間約 30 分

### 3.3　油圧式カプラ

油圧アタッチメント交換では取付ピンの着脱不要。カプラのキャッチブラケットをアタッチメント側取付ピンの位置に油圧で合わせる技術。カプラの操作はオペレータキャビンより行う。但し保持は作業員がカプラ側の保持機構の操作を行わなければならない。油圧ホースの着脱も作業員が手動で行う。オペレータ１名と作業員２名の共同作業。交換作業時間約 10 分

### 3.4　油圧オートカプラ

油圧アタッチメント交換では取付ピンの着脱不

要。カプラのキャッチブラケットをアタッチメント側取付ピンの位置に油圧で合わせる技術で、自動保持機能も含んでいる。且つ油圧ホースの着脱もカプラに内蔵された油圧接続機構により、オペレータキャビンから操作出来る新技術。一切アタッチメントに近づくことなく交換作業が出来る。オペレータ１名作業。交換作業時間約 1 分。作業員の削減・交換作業時間の大幅な短縮と生産性の向上が見込める。(図-6)

## ４．油圧オートカプラの特長

油圧オートカプラは、安全性、環境性を改善するとともに、省人化と作業時間の大幅短縮を実現し飛躍的に生産性を向上させる新たなソリューションである。

4.1 オペレータ１名での交換

油圧オートカプラによる油圧アタッチメントの交換は、オペレータキャビン内のオペレータ１人でカプラ操作スイッチ・作業機レバーで操作出来、油圧アタッチメントに近づくことなく交換作業を行うことが出来る。(図-7)

図-7　油圧オートカプラによる交換作業

4.1.1　油圧アタッチメントの取付ピンに油圧オートカプラのキャッチブラケットを合わせる。

4.1.2　カプラ操作スイッチのロックを解除し、操作レバーのカプラ操作ボタンを押して　油圧オートカプラ本体のロックピンを引き込む。スイッチは誤操作を防ぐために、ダブルアクションスイッチを採用。(図-8)

図-8　カプラ操作スイッチ

4.1.3　油圧アタッチメントにカプラを合わせて、カプラ操作ボタンを離して油圧オートカプラ本体のロックピンを張り出し装着。

4.1.4　オペレータキャビンよりオペレータによるロック確認ピン(図-9)が引っ込んでいる事を確認しカプラ操作スイッチのロック解除を元の位置にもどす。

| | 3.1直付け（カプラ無） | 3.2　機械式カプラ | 3.3　油圧式カプラ | 3.4　油圧オートカプラ |
|---|---|---|---|---|
| 取付ピンの着脱の為打撃作業 | 必要 | 不必要 | 不必要 | 不必要 |
| アタッチメント周辺での作業 | 必要 | 必要 | 必要（ロック作業のみ） | 不必要 |
| 油圧ホース着脱 | 必要 | 必要 | 必要 | 不必要 |
| 安全性 | 低 | 中 | 高 | 最高 |
| 必要作業員 | OP１名<br>作業員２名<br>計３名 | OP１名<br>作業員２名<br>計３名 | OP１名<br>作業員２名<br>計３名 | OP１名<br>計１名 |
| 作業時間 | 約60分 | 約30分 | 約10分 | 約１分 |
| 生産性 | 低 | 中 | 高 | 最高 |

図-6　交換技術の変遷と油圧オートカプラによる安全性・生産性の期待効果

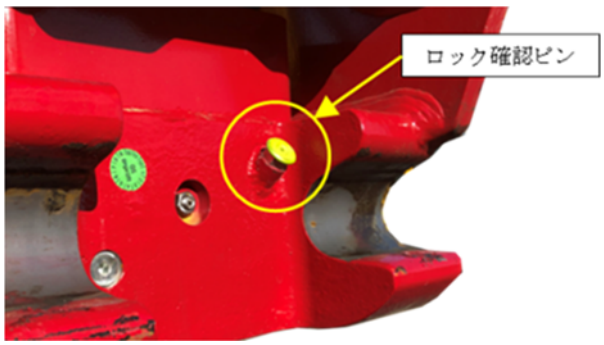



図-9　ロック確認ピン

4.2　構造・機能

4.2.1　油圧バルブ

油圧オートカプラに内蔵されている油圧バルブ(図-10)は、圧力損失を抑えた構造となっており、装着する油圧アタッチメントの本来の性能を損なわない。加えて作動油の油温上昇を抑えることもできる為、油圧ショベルの効率・性能も維持している。(図-11)

図-10　油圧バルブ

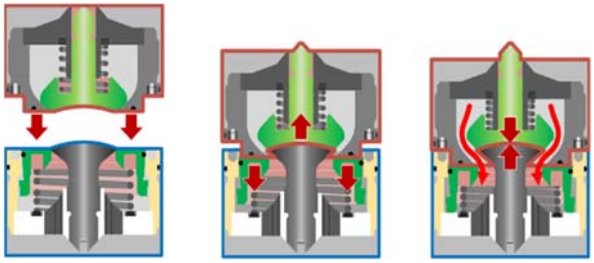


図-11　圧力損失の少ない油圧バルブ

4.2.2　安全装置

油圧オートカプラ自身に安全装置機構をそなえている。

1）常時油圧をかけ続ける事によりロック状態を維持している。

2）油圧が切れても内蔵チェック弁により油圧回路内の油圧が保持されロック状態を維持している。

3）オペレータキャビン内よりロック状態が目視可能のロック確認ピンを装備している。

尚、一部の機種にはさらに内臓チェック弁が破損しても機械式ロック機構によりロック状態が保持出来る。

ロック後、保持状態維持のための手動によるピン装着などは不要である。これらの安全措置は国際標準化機構 ISO13031 に準拠し、交換作業の向上だけでなく装着後の安全性にも十分配慮したカプラである。(図-12)

【ISO13031】クイックカプラ（抜粋）

・ロックし続けること。
・油圧が切れてもアタッチメントを保持し続ける装置があること。
・ロック後の手動保持装置ではないこと。
・ロックされていることをオペレータキャビンから確認できること

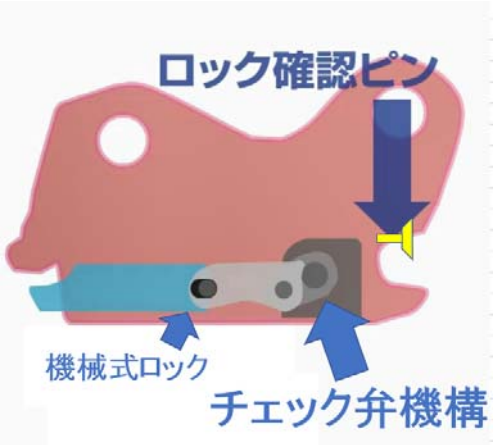



図-12　機械式ロック機構付き
油圧オートカプラ安全装置の例

4.3　NETIS 登録

国土交通省の新技術情報提供システム NETIS にも現場の安全性及び生産性を飛躍的に向上する新技術として 21 年 6 月に登録が出来た。(図-13)

図-13　NETIS 登録

## 5．本技術による効果

5.1　安全性

油圧オートカプラでは、油圧アタッチメントの交換をオペレータ 1 人で行える。油圧ショベルや

油圧アタッチメントに作業員が近づく事もなければ、作業員が重量物を運搬することもない為安全に作業が出来る。さらに野外での大ハンマーを使用する作業を必要としない為、作業員の熱中症対策としても効果が期待できる。

5.2　環境性

油圧ホースの着脱も油圧オートカプラ内の油圧バルブで行われる。油圧ホース着脱作業不要の為、油圧ホース内の作動油の現場への油漏れや撒き散らしのリスクを回避し環境汚染の抑制も期待できる。

5.3　生産性

解体現場では約 60 分掛かっている直付けの油圧アタッチメント交換作業を極力省くため、各アタッチメント毎に油圧ショベルを配置している。現場によっては、オペレータの人数以上の油圧ショベルを配置する事もある。油圧オートカプラを使用する事で交換の容易化と交換時間の約 1 分への短縮により、油圧ショベル台数の適正化と現場コストの改善が期待できる。また極狭地で配置する機械の台数が制約される現場では、より効果が期待できる。

## 6．効果の検証と評価

6.1　検証条件と効果仮説

効果を検証する事を目的として、施工計画時は工期 4 か月、中型油圧ショベル PC210LC-11 を 4 台使用する予定であった 3 階建ての鉄筋コンクリートビル解体現場を選定。油圧オートカプラ装着機導入により 1 台減の 3 台で施工が出来る事を仮説とした。4 台中 1 台に油圧オートカプラを装着し、なお解体用アタッチメントとして、大割圧砕具、小割圧砕具、スケルトンバケット、スタンダードバケットの 4 種類を準備。（図-14）

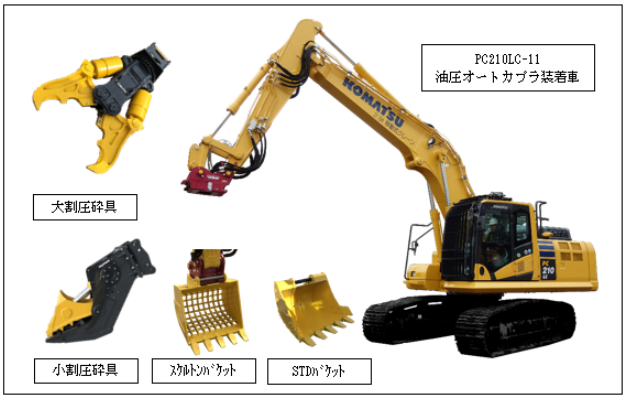



図-14　油圧オートカプラを装着した油圧ショベル

6.2　検証結果

安全性・環境性・生産性の検証結果を報告する。また当社試算であるが経済性についても検証結果を報告する。

6.2.1　安全性

施工期間中、アタッチメント交換作業を 1 日平均 4～5 回行うも、作業員に交換作業時の事故ケガも無く施工を終える事が出来た。

6.2.2　環境性

アタッチメント交換時に作動油の漏れや現場への撒き散らしも無く、中型油圧ショベル PC210LC-11 本体への作動油の追加もなかった。

6.2.3　生産性

| 日 | 9:00 | 10:00 | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 | ATT 交換 | ATT 種類 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 小割 | | ﾊﾞｹｯﾄ 小割 | | | 小割 | | ﾊﾞｹｯﾄ 小割 | ﾊﾞｹｯﾄ | 5 | 2 |
| 6 | ﾊﾞｹｯﾄ 小割 | ﾊﾞｹｯﾄ | 小割 | ﾊﾞｹｯﾄ 小割 | | 小割 ﾊﾞｹｯﾄ | 人割 ﾊﾞｹｯﾄ | 小割 | ﾊﾞｹｯﾄ | 10 | 3 |
| 7 | ﾊﾞｹｯﾄ | | ﾊﾞｹｯﾄ | | | | ﾊﾞｹｯﾄ | 小割 | | 1 | 2 |
| 8 | | ﾊﾞｹｯﾄ | | | | ﾊﾞｹｯﾄ | ｽｹﾙﾄﾝ | ｽｹﾙﾄﾝ | ﾊﾞｹｯﾄ | 3 | 2 |
| 9 | ﾊﾞｹｯﾄ | | ﾊﾞｹｯﾄ | | | | | | | 0 | 1 |
| 11 | 小割 | | ﾊﾞｹｯﾄ 小割 | ﾊﾞｹｯﾄ | | ﾊﾞｹｯﾄ 小割 | | ﾊﾞｹｯﾄ | | 6 | 2 |
| 12 | ﾊﾞｹｯﾄ | 小割 | ﾊﾞｹｯﾄ | | | 小割 ﾊﾞｹｯﾄ | | ﾊﾞｹｯﾄ | | 4 | 2 |
| 13 | ﾊﾞｹｯﾄ | 小割 | ﾊﾞｹｯﾄ 小割 | | | 小割 | ﾊﾞｹｯﾄ | 小割 | ﾊﾞｹｯﾄ | 6 | 2 |
| 14 | ﾊﾞｹｯﾄ | ｽｹﾙﾄﾝ | ｽｹﾙﾄﾝ | 小割 | | 小割 ﾊﾞｹｯﾄ | ｽｹﾙﾄﾝ | ｽｹﾙﾄﾝ | 小割 | 5 | 3 |
| 15 | 小割 | 大割 | 小割 | ﾊﾞｹｯﾄ | | 小割 | | ﾊﾞｹｯﾄ | | 5 | 3 |
| 16 | ﾊﾞｹｯﾄ 小割 | | ｽｹﾙﾄﾝ | | | 小割 | ｽｹﾙﾄﾝ | ｽｹﾙﾄﾝ | | 4 | 3 |
| 18 | ﾊﾞｹｯﾄ 小割 | ﾊﾞｹｯﾄ | ﾊﾞｹｯﾄ | | ｽｹﾙﾄﾝ | 小割 | | ｽｹﾙﾄﾝ | | 6 | 3 |
| 19 | ｽｹﾙﾄﾝ | | ｽｹﾙﾄﾝ | | ｽｹﾙﾄﾝ | 小割 | | ｽｹﾙﾄﾝ | ﾊﾞｹｯﾄ | 3 | 3 |
| 20 | ｽｹﾙﾄﾝ | | ｽｹﾙﾄﾝ | | 大割 | ｽｹﾙﾄﾝ | 大割 | ｽｹﾙﾄﾝ | | 5 | 2 |
| 21 | ｽｹﾙﾄﾝ 大割 | | 小割 | ｽｹﾙﾄﾝ | | 小割 | 大割 | 小割 | ｽｹﾙﾄﾝ | 7 | 3 |
| 22 | 小割 | | 大割 | 小割 | | 小割 | 大割 | ｽｹﾙﾄﾝ 小割 | | 6 | 3 |
| 25 | 小割 | | ﾊﾞｹｯﾄ | 小割 | | | | | | 1 | 2 |
| 26 | 小割 大割 | ﾊﾞｹｯﾄ | | 大割 | | | | | | 4 | 3 |
| 平均 | | | | | | | | | | 4.5 | 2.4 |

図-15　一日のアタッチメント交換作業

現場でのアタッチメント交換作業が約１分で行われる為、1 日平均４～5 回の交換を行う事が出来、スムーズな解体施工が出来た。コンクリート解体とコンクリートガラの搬出の両作業を、アタッチメントをスピーディに切り替えながら作業が行うことが出来、結果搬出用トラックの待ち時間も短縮できた。（図-15）

6.2.4　経済性

油圧オートカプラと必要な油圧アタッチメントを新規に導入したとしても 6.2.3 記述の生産性大幅改善による効果で経済性が 48%向上することが出来た。（図-16）

**活用効果の根拠**

| 基準とする数量 | 2.00 | 単位 | 回/日 |
|---|---|---|---|
| | 新技術 | 従来技術 | 向上の程度 |
| 経済性 | 13,624.24円 | 26,283.84円 | 48.16 % |
| 工程 | 0日 | 0.22日 | 100 % |

図-16 NETIS 登録番号 KT-210010-A より抜粋

6.3　評価

検証した現場では、作業員の事故も無く安全性は立証出来た。見込み工期４ヶ月施工を検証の３台で完了し、生産性の向上が立証出来た。検証に協力いただいた施工会社からは、「安全にスピーディにアタッチメント交換が出来、現場での作業効率が大幅に改善された。導入台数を削減でき生産性を大幅に向上できる技術である」と評価をいただいた。加えて経済性についても「投資以上の回収が見込める技術である」と評価いただいた。

また、現場作業者からは、「アタッチメント交換作業に力仕事が無くなり、高温作動油や汚れたグリースに触れることも無く、作業環境が良くなった」と評価いただいた。

## 7．まとめ

油圧オートカプラは、油圧アタッチメントを使用する解体現場で、油圧アタッチメント交換時の安全性向上、環境配慮、生産性向上を可能にする技術である。油圧アタッチメントの交換容易化により、必要な人員と時間を大幅に削減して、お客様の現場改善を支援し、環境・社会・ガバナンスなどＥＳＧに関連する諸課題解決に貢献できることを実証した。

さらに解体現場のみならず一般土木も含めた様々な現場に油圧オートカプラの活用を広げ、機械化・ICT 化・マシンコントロール・無人化等、更なるお客様現場の進化に貢献していく所存である。

## 参考文献


１）コマツ季刊誌「大地　Vol.130」
2020 年 5 月発行

２）新技術情報提供システム NETIS
登録番号　「KT-210010-A」
登録技術名「油圧ショベル用
油圧式クイックカプラ」

# 23. モータグレーダのブレーキアシストシステム

## 高速走行可能な建機のブレーキ補助システム開発

鹿島道路株式会社　機械部　　鈴木　泰
○野田　哲也
伊藤　圭祐

### １．はじめに

モータグレーダ(以下, グレーダ)は, 前後の車輪間にブレードを持ち，機械の前進動作によって路盤等を整地する建設機械である(写真-1)。グレーダによる路盤整地作業は，敷き均した面を作業員が検測しながら行うのが一般的であり，常にグレーダ周辺に作業員が存在している。そのためグレーダ運転員は整正作業を行いながら，作業員や転圧ローラとの接触に注意を払う必要がある。

写真-1　グレーダ全景

グレーダの路盤整正作業は前後進を繰り返しながら行い(図-1)，後進する際は距離にもよるが 20～30km/h の速度で走行するのが一般的である。これは単位時間当たりの生産性を確保するためには後進速度を高く設定しなければならないからである。

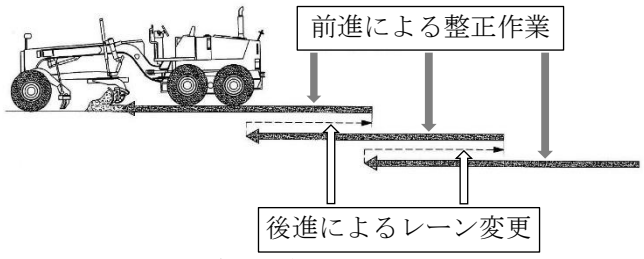



図-1　グレーダの前後進繰返し作業

ハンドルを握る運転員は整正作業時には前方を向いて運転するので，前方向の視認性は阻害されない。しかし後退する時は, 後ろを振り返って後方の安全を確認しつつハンドル操作を行わなければならない。その際, 運転員は後退操作を振り返っての後方視認という無理な姿勢になるため，危険を察知し回避行動をとるのに操作の遅れや，判断ミスを招きかねない。さらに, グレーダはキャビン後方に大きなエンジンフードを備えた構造ゆえ，後方視界が極端に悪いレイアウトになっている。

これらのグレーダの特性を考慮し，グレーダとグレーダの周囲にいる作業員や共同で作業している転圧ローラなどとの接触事故を防ぐための補助装置として，運転員への作業負荷も考慮した自動ブレーキ(ブレーキアシスト)システムの開発を行った。本報は, 国内で初めてグレーダに実用化した自動ブレーキシステムの開発に関して報告するものである。

### ２．背景

後進時の安全対策として車両に後方監視センサが装備されたグレーダは以前から現場導入されていた。これは, 後方監視センサが作業員や転圧ローラ等を障害物として検知した場合に警報などを発して, 注意を喚起する装置である。しかしレンタル会社保有機やユーザが工夫を凝らして装着するレベルでの導入にとどまっているのが現状である。リアビューカメラを備えた機種もありカメラ映像をモニタにより確認することが出来るが，モニタを注視しながら後進すると周囲の安全確認が疎かになるため, 決定的な安全対策とはいえない。このように，運転員の制動操作に代わりグレーダの動きを自動的に止めて確実な安全を確保する装置は現場導入するには至っていないのが現状であった。

#### 2.1　グレーダ後方の死角

運転員からモータグレーダ後方を目視確認した状況を図-2 に示す。後方の安全を確認しつつ後進するが, 死角となる部分が広く, 後進時に検測を行う作業員がいたとしても目視で確認することが困難なため特に注意が必要である。

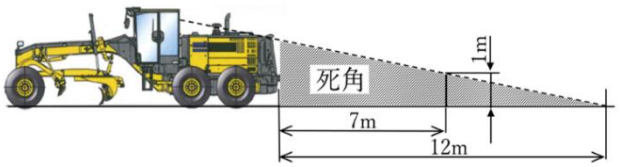


図-2　3.7mクラスのグレーダの後方死角範囲

また，グレーダ後方の死角について，運転員と作業員で認識にズレが生じる傾向にある。作業員は運転員から見えているだろうと思い込み，運転員は作業員がグレーダの死角に入り込むわけがないと思い込む。このような認識のズレが生じないよう安全教育を行うが，時間経過とともに作業員がグレーダに不用意に接近した作業になってしまう。そのために監視員を配置するなどして，安全な作業環境を確保しなければならない。

## 2.2　グレーダの制動距離

3.7mクラスの社有グレーダを用いて急ブレーキ操作(フットブレーキを一気に目一杯踏み込む)により車体が完全に停止するまでの制動距離の測定を行った。現場の作業条件を再現するために，路盤面上で行った。後進速度と急ブレーキ操作による制動距離の関係を図-3 に示す。

後進時の最大速度36km/h(4速，1900rpm)の場合，運転員が危険を察知して急ブレーキ操作をしても停止するまでに 10m以上必要だということが分かった。またこの急ブレーキによる減速加速度が大きいため，グレーダ運転員にも大きな負荷が掛かり，それにより負傷する可能性がある。従って，運転員の安全確保のためにも一様に急制動を掛けるのではなく，状況に応じて段階的なブレーキ操作を行うよう検討した。

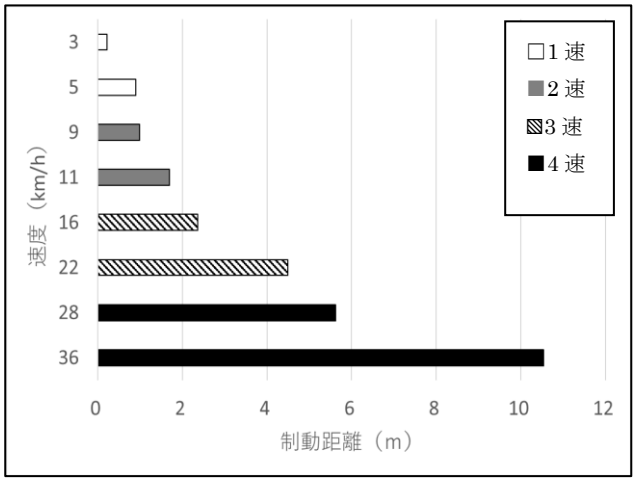


図-3　急ブレーキ操作による各速度における制動距離

## ３．ブレーキアシストシステム開発の方針

監視対象物を検知するセンサの設置場所により，前後進どちらでも自動ブレーキの作動設定は可能だが，死角の多い後進走行時のみ自動的にブレーキを作動させ，運転員のブレーキ操作を支援するシステムとした。グレーダのような高速走行で作業する建機を急停止させることは，前述のように運転員に与える負荷が大きい。そのため検知エリアを複数設けることが可能な長距離用センサを採用し，センサの識別エリアごとの出力信号により段階的にブレーキを効かせ，確実かつ柔軟なブレーキ動作を確保し，運転員が被るブレーキ時の衝撃を緩和することとした。また，車検適用にも問題が無いシステムとするため，グレーダのブレーキ装置を改造することなく，既存のブレーキ装置にアクチュエータを取付けてブレーキを作動させる仕組みとした。開発対象となるシステムが備える機能は自動ブレーキであるが，運転員の補助としての位置付けを明確にするためにブレーキアシストシステムという名称を採用した。

## ４．ブレーキアシストシステムの構成

後進時の後方物体検知用センサとして赤外線センサとミリ波レーダ(写真-2)を採用した。

写真-2　赤外線センサとミリ波レーダ

社有の転圧ローラは既に，ステレオカメラセンサを採用したブレーキアシストシステムを搭載しているが，グレーダはローラと比較して現場内でも高速走行をする建機であることから，対象物を長距離で検知可能な赤外線センサを採用することとした。この赤外線センサは作業員が着用している安全ベストのリフレクタとそれ以外の物体の反射率の違いを検知する機能を備えており，安全ベストのリフレクタを人と見なすよう設定している。また複数の識別エリアを構成可能で，識別エリアごとに出力信号を設定することが出来る。対象物を検知した際の出力信号を用いて，段階別にブレーキを作動させるとともに，警告メッセージを周囲の作業員へ発することで危機行動をとらせる。同時に，車内に設置した積層灯とスピーカにより運転員に停止行動を促す。

この赤外線センサとは別系統でミリ波レーダセンサを装備した。これは，グレーダ後方の直近にある全ての対象物を検知することが可能で，万一赤外線センサに不具合が生じた場合でも全ての物体を対象としてブレーキ操作を行うよう設定されている。ミリ波レーダセンサは，赤外線センサのバックアップ装置として機能する役割を与えている。このように二重の検知機構を備えることにより安全性を高めている。

作動したブレーキの解除は，運転員がシフトレバーを中立に戻すことによりなされるため，物体検知信号が解除されても車体は中立状態にあり停止状態を維持する機構となっている。これらセンサの識別エリア及びエリアごとの出力信号を設定する制御盤をグレーダキャビン内に配置し，各センサの検知状況を運転員が確認できるようにした(写真-3)。

写真-3　ブレーキアシストシステム制御盤

## ５．センサを用いた制動距離測定試験と課題

ブレーキアシストシステムを搭載した 3.7ｍクラスのグレーダを用いて制動距離測定試験を実施した。制動の制御方法としては，赤外線センサの出力を検知範囲内で遠距離，中距離，近距離の 3 つの識別エリアに分け，エリアごとに異なる出力信号に応じて段階的にブレーキ操作を行い，減速させる方法とした。

### 5.1　制動距離試験結果

グレーダ後進時の速度段ごとに 1 速の 3km/h から 4 速の 36km/h の最高速度まで測定を行った結果を図-4 に示す。低速後進時はどの速度でも 25ｍ先にある対象物に対して 7ｍ程度手前で停止することが可能だったのに対し，高速走行では低速走行と比較してやや長めの制動距離となったが，対象物に接触する手前で停止できることが確認できた。

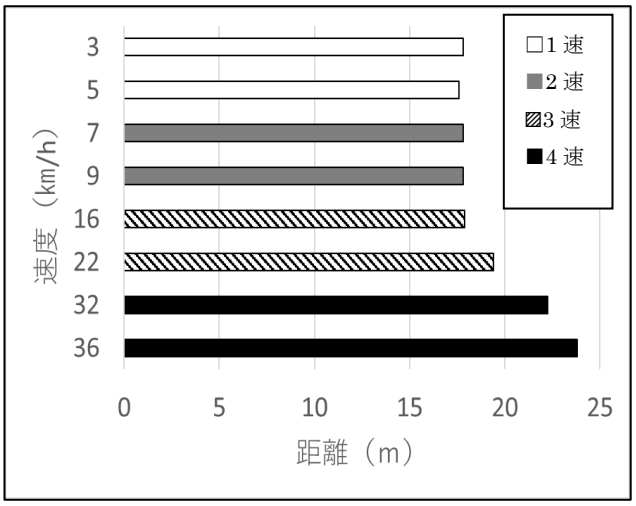



図-4　センサを用いた制動距離

### 5.2　ブレーキアシストシステムの課題

ブレーキアシストシステムを搭載したグレーダによる自動ブレーキの性能を確認することができたが，遠距離エリアからフットブレーキ操作を行うと，離れた対象物を検知した場合，ブレーキを掛けるタイミングが早過ぎ，後方の安全を確保できている状況でも常に自動ブレーキが作動してしまい作業効率が低下する懸念が生じた。このことから速度変化に応じてどの速度域でも，対象物まで一定の距離を置いて停止できるようエンジンブレーキで減速を行い，次の段階としてフットブレーキ操作で停止行動をとる必要がある，という課題が残る結果となった。

## ６．課題への対策と制御方法の確立

### 6.1　課題への対策

停止距離測定試験の課題から，赤外線センサで設定可能な 3 つの識別エリアの範囲設定の見直しを行った。

もっとも遠い「遠距離エリア」ではミッションの後進速度段を 3 速あるいは 4 速としていた場合は 2 速へ機械的にシフトダウンし減速させる(写真-4)と同時に警報装置を作動させ運転員と周囲の作業員へ音と光で警告する設定とした。次の「中距離エリア」では遠距離エリアで作動させた状態を保ちながら，エンジン回転数をアイドリングに下げ，エンジンブレーキを効かせることによりさらに減速させる。もっとも接近した「近距離エリア」では遠距離，中距離エリアで作動した装置を自己保持した状態でフットブレーキを作動させる(写真-5)。このようにエリアごと段階的なブレーキ操作の設定を見直すことにより，安全且つ柔軟なブレーキ操作を確実に行い，どの速度域でも対象物まで安全な距離を保って，停止できるよう改良を施した。

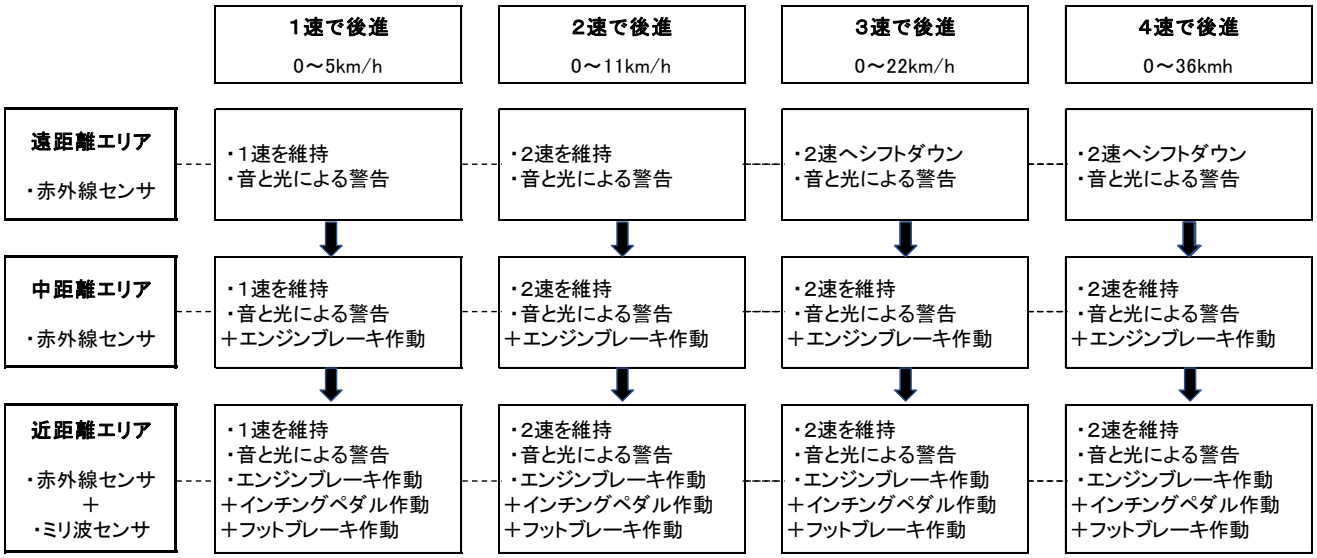



図-5　検知エリアごとのブレーキ自動制御フロー

写真-4　速度段シフトダウン装置

写真-5　フットブレーキ作動装置

## 6.2　改良後の制動距離測定結果

改良を行ったブレーキアシストシステムで再度，制動距離測定試験を行った。この結果から全ての速度段，速度域にかかわらず段階的なブレーキ操作を設定することで，図-6 の通り 25m先にある対象物に対して一定の距離を保って確実に停止することが確認された。制動初期に車速を減速させることで運転員や周囲の作業員へ危機回避行動を促すこともでき，その段階で対象となる物体が除かれれば，後進を再開することもできる。作業効率を低下させないことも重要であり，運転員にストレスなく作業を継続させることも考慮した。

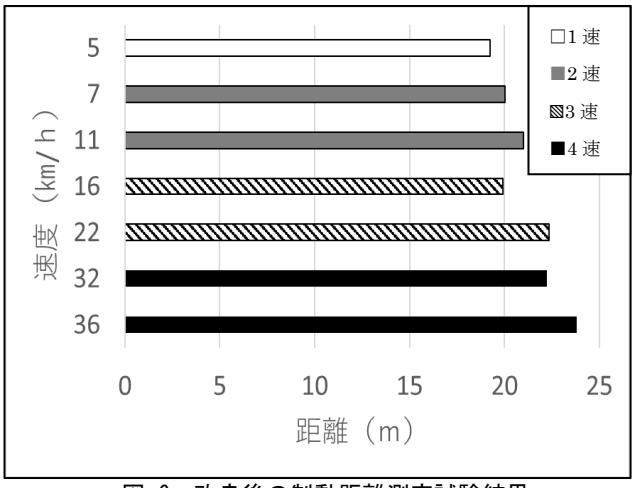



図-6　改良後の制動距離測定試験結果

## 7．おわりに

今回開発したブレーキアシストシステムは，グレーダを安全かつ柔軟なブレーキ動作で確実に停止させることができる装置としての機能を有していることを確認することができた。まずは社有グレーダに装備し，引続きシステムの改良を進め，安全性・機能性の向上を図っていく所存である。

建機の安全性向上を目的としたシステムとして，今後その応用の場を広げ，転圧ローラ，グレーダに続き，ブルドーザへの展開も検討したい。その結果として，建機と人・モノとの接触による災害を減らすことに貢献できれば幸いである。

# 24. トンネル覆工コンクリートの補修工事に適用する曲面天井用研掃システム

株式会社 奥村組　　○ 石井　敏之
株式会社 奥村組　　西山　宏一
株式会社 奥村組　　田中　寛大

## 1．はじめに

高度経済成長期から約 50 年が経過し，当時建設されたインフラ施設の多くに経年劣化の進行や耐震強度の不足が指摘され，補修・補強工事が行われている。そのうち，都市高速道路のトンネル等を対象とした補修・補強工事は，**写真-1** に示すように，片側車線供用下で，通行車両への粉塵等の飛散抑止を行いながら限られた時間内での人力作業となっている。人力作業では，コンクリート天井面の表層脆弱部や劣化した塗膜の除去および目荒しを行う研掃作業は，高所作業車上で，ディスクサンダー等による粉塵が飛散する環境下での天井を見上げた姿勢で行われている。そのため，天井面の研掃作業は，①作業員の技量差からの研掃面のばらつきによる品質低下，②発生した粉塵による作業環境の悪化，③高所で無理な姿勢による安全性と作業効率の低下，が問題となっている。

このような状況から，筆者らは，研掃作業を自動化運転し，同時に発生した粉塵の飛散抑止ができるウォータージェットを用いた湿式の天井，壁・柱，床用の研掃装置[1)]と，研削ビットを用いた乾式の天井用の研掃装置[2)]を開発した。**写真-2** に示すように，開発した研掃装置を，道路トンネルや上下水道施設および地下鉄施設の工事に適用してきた。しかし，これらの装置の適用範囲は平面のコンクリート表面に限られ，曲面を有する表面の研掃作業には適用できなかった。

そこで，トンネル覆工コンクリート等の曲面を有する表面の研掃作業を自動化運転した「曲面天井用研掃システム」を開発した。本報では，曲面天井用研掃システムの概要と実大模擬トンネルを用いた性能確認実験の結果について報告する。

写真-1　人力によるトンネル天井面の研掃作業

写真-2　自動化運転によるトンネル天井面の研掃作業
（研削ビットを用いた乾式の天井用研掃装置）

## 2．曲面天井用研掃システムの概要

曲面天井用研掃システム（以下，研掃システム）の概観を**図-1**，仕様を**表-1** に示す。

本研掃システムは，地上からの入力操作で曲面を有するコンクリート表面の研掃作業を自動化運転し，同時に発生した粉塵等の飛散を抑止するものである。対象とする構造物は，道路トンネル等の曲面を有する覆工コンクリートである。なお，本研掃システムは，ボックスカルバートのような平面を有する天井面にも適用できる。運搬・移動には，作業帯のスムーズな設置・撤去が行えるように 3 台の車両を使用し，現地でホースやケーブル類の接続・切離のみで作業の開始・終了が行えるようにした。また，研掃方法には，曲面の研掃を対象とすることから，小型で研掃面に非接触で研掃作業が行えるバキュームブラスト工法を採用した。

本研掃システムは，次の 4 つの装置から構成される。

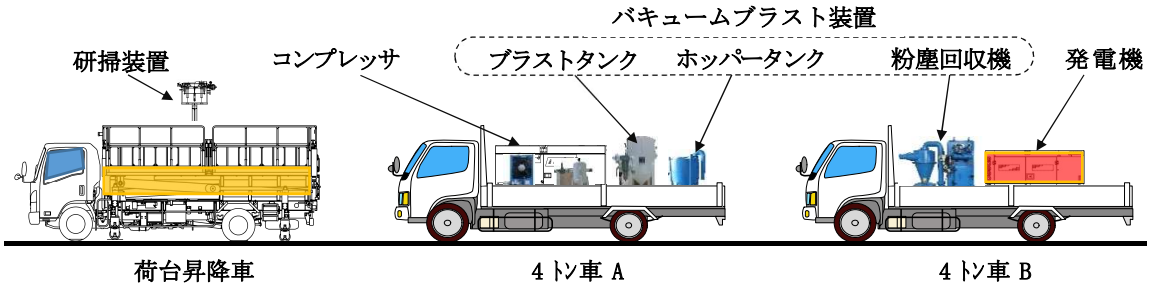



図-1　曲面天井用研掃システムの概観

ⅰ．噴射機を曲面の研掃面に一定圧で押付けながら一定速度で移動させる「研掃装置」
ⅱ．噴射機からブラスト材を噴射して研掃し，同時に発生した粉塵やブラスト材を吸引する「バキュームブラスト装置」
ⅲ．研掃装置を運搬し，現地で昇降機として利用できる「荷台昇降車」
ⅳ．発電機やコンプレッサ等の「付帯装置」

## 2.1　研掃装置

研掃装置の外観を**写真-3**，研掃ヘッドの外観を**写真-4**，5 に示す。

研掃装置は，3 層のフレーム上に，研掃ヘッドを上部に配した研掃機が配置された構造となっている。この 3 層のフレームは，下段に研掃装置を荷台昇降車に固定する固定フレーム，研掃面積を広くするため，中段にトンネル軸方向（以下，走行方向）と研掃機を平行にする回転フレームと，上段にトンネル軸直角方向（以下，横行方向）の研掃機の移動量を大きくするスライドフレームからなる。研掃機は，スライドフレーム上を一定速度で走行方向と横行方向に移動可能で，上部に配した研掃ヘッドをエアーシリンダとボールネジで上下方向に昇降させることができる。研掃ヘッドには，**写真-5** に示すように，回転機構が設けられ，4 隅にキャスターを取付けた荷重計（以下，キャスター付き荷重計）と，傾斜計およびロータリアクチュエータが取り付けられている。更に，曲面に一定荷重で押し付けて研掃を行う噴射機が 2 台設置されている。

研掃装置は，地上のタッチパネルから研掃条件を入力することによって，噴射機を研掃面に一定荷重で押し付けながら一定速度で移動させることで，研掃作業の自動化運転を行う。

a．研掃ヘッドを曲面に接触させる方法

**写真-3** に示すスライドフレーム上の 3 隅に設置された水平・鉛直距離計（トンネル表面までの距離を測定）より研掃角度を算出し，傾斜計とロータリアクチュエータで研掃ヘッドを研掃角度に設定する。その状態で研掃ヘッドを研掃面の約 10cm 直下の位置に移動させ，エアーシリンダとボールネジの押し上げによって研掃面に接触させる。研掃ヘッドの 4 隅のキャスター付き荷重計によって接触判定を行い，接触確認後ロータリアクチュエータのブレーキを解放する。これによって，研掃ヘッドは曲面の研掃面に接触した状態で，走行方向と周方向に自由に移動できるようになる。なお，これらの操作は，全てタッチパネルで行える。

b．研掃面のばらつきを小さくする方法

研掃ヘッドを曲面の研掃面に接触させた後，研掃ヘッドに設けた小型エアーシリンダで噴射機を研掃面に対して垂直に一定荷重で押し付け，リニ

表－１　曲面天井用研掃システムの仕様

| 装置名 | 項　目 | 仕　様 |
|---|---|---|
| 研掃装置 | 寸　法 | L 3.0×W 1.75×H 1.954 m |
| | 重　量 | 10.7 kN |
| | 回転角度 | 0～±5 deg |
| | 走行範囲 | 2.16 m |
| | 横行範囲 | 1.9 m |
| | 上昇範囲 | 0.8 m |
| | 走行速度 | 0～10.0 m/min |
| | 施工高さ | 4.0～7.5 m |
| | 研 掃 幅 | 90～100 mm（噴射機 2 台） |
| バキュームブラスト装置 | ブラストタンク | 容量:330 L（研削材貯留） |
| | ホッパータンク | 容量:300 L（研削材回収） |
| | 回 収 機 | サイクロン，バグフィルタ |
| | ノ ズ ル | 長方形ノズル　穴径 9.5 mm |
| | 研 削 材 | フェロニッケルスラグ材 |
| 荷台昇降車 | 昇降範囲 | 1.6～5.0m　積載荷重 12 kN |
| 付帯装置 | コンプレッサ | 100 馬力 |
| | 発 電 機 | 50/60 kVA |

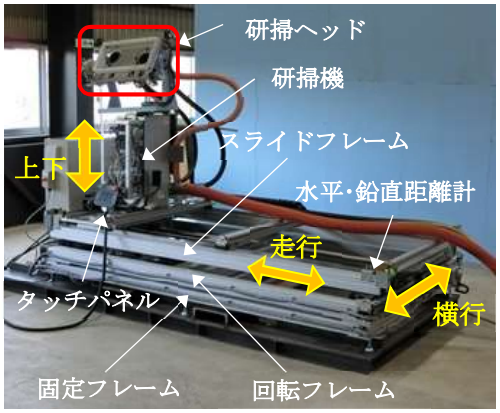



写真-3　研掃装置の外観

アーブッシュによって研掃面の不陸に追随できるようにした。更に，一定荷重で押し付けた状態の噴射機を一定速度で移動させている。これらにより，研掃面と噴射機の距離が一定となり，研掃作業が常時同じ条件で行われるため，研掃面のばらつきを小さくすることができる。なお，研掃作業中は，噴射機の押付け荷重と押付け変位を測定し，研掃条件が保たれているかの制御を行っている。

### 2.2　バキュームブラスト装置

バキュームブラスト装置の構成を**図-2** に示す。同装置は，ブラスト材による研掃を行うブラスト装置（噴射機，ブラストタンク，エアータンク，アフタークーラ）と，発生した粉塵等を吸引し分別する回収装置（ホッパータンク，回収機）からなる。

バキュームブラスト装置は，ブラストタンクへ送られてきた高圧圧縮空気と同タンク内の研削材を混合させたブラスト材を，噴射機内のノズルから噴射することによってコンクリート表面を研掃し，同時に発生した粉塵や研掃後の研削材等をバキューム吸引する。なお，発生した粉塵等の飛散防止は，このバキューム吸引と，**写真-4** に示す研掃ヘッドの周囲のブラシ枠 1 と噴射機の先端に取り付けたブラシ枠 2 によって行われている。

### 2.3　荷台昇降車

荷台昇降車の外観を**写真-6** に示す。荷台昇降車は，12kN までの重量物を積載して一般道路の運行が行え，現地では作業床の拡幅・昇降ができ，更に移動用ローラを装備したローラジャッキにより，作業床を上げたまま車両移動が行える。

本研掃システムでは，研掃装置を積載して運搬し，現地で研掃装置の昇降機および作業床を上昇させた状態での車両移動による研掃装置の位置変更の手段として使用している。

## 3．曲面天井用研掃システムの研掃作業制御手順

本研掃システムでは，任意の曲面での研掃作業の自動化運転を行うため，研掃作業の手順を設定し制御を行っている。トンネルと研掃システムの全体座標系は，**図-3** に示すように，トンネルのスプリングライン（以下，SL）上の円形部の中心を原点とし，走行方向を X 軸（車両進行方向を正），横行方向を Y 軸（壁面方向を正），上下方向を Z 軸（天井方向を正）とした。研掃作業の順序は，研掃ヘッドを研掃開始走行ラインの走行方向に，次に周方向に研掃幅だけ移動後，再度走行方向への移動の繰り返しとなる。以下に，研掃作業の制御手順を示す。

① **図-3** に示す SL からの離れ距離を入力
② 研掃装置のスライドフレームの 3 隅に設置された水平・鉛直距離計で，コンクリート表面までの距離を計測

写真-4　研掃ヘッドの外観（研掃面側）

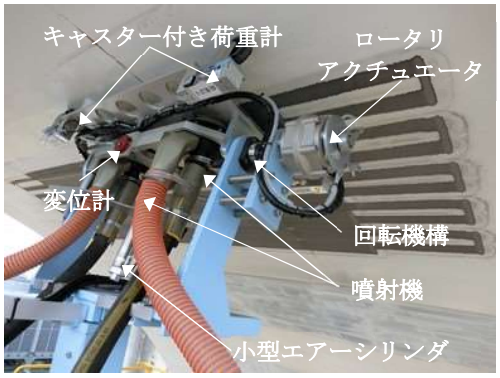


写真-5　研掃ヘッドの外観（研掃背面側）

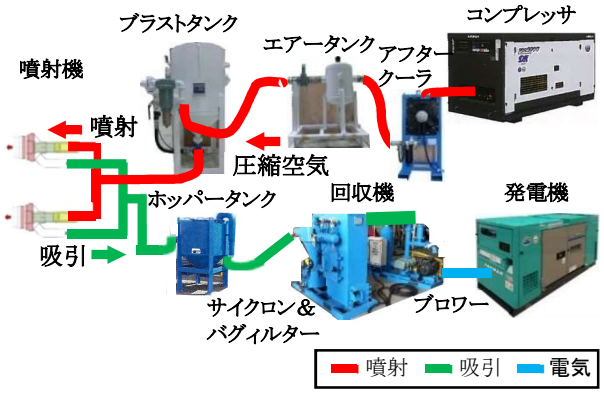


図-2　バキュームブラスト装置の構成

写真-6　荷台昇降車の外観（研掃装置積載）

③ 研掃装置と走行方向とのずれ角の算出と補正
④ トンネル形状（半径，SL 高）の算出
⑤ 研掃装置の寸法やトンネル半径等から，現在

の研掃装置の位置を全体座標系で算出

⑥ 研掃開始ラインとトンネル半径から研掃開始角度の算出

⑦ 研掃開始走行ラインの天井高さと荷台昇降車の作業床（研掃装置）の上昇量の算出と操作

⑧ 研掃角度，研掃装置の横行範囲，上昇範囲および研掃幅から，研掃機の走行毎に研掃角度，横行移動量（横行量+スライドフレーム移動量）・上昇量の算出と自動化運転の継続判定

この研掃作業の制御手順によって，各ステップの自動化運転の継続・終了判定を行っている。また，荷台昇降車が次ステップの研掃作業域に移動しても研掃開始走行ラインが記憶されているため，次ステップにおいても，前ステップの研掃開始走行ラインとずれることなく揃った状態で研掃できる。

## 4．実大模擬トンネル用いた性能確認実験

性能確認実験は，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が所有する実大模擬トンネル（断面積 66m$^2$，高さ 7.1m，最大幅 11.2m，延長 80m ）において，1 車線を規制し，作業帯に車載した研掃システムを設置後，走行方向に壁部から天井部までの曲面の研掃作業を行った。確認項目は，自動化運転の状況，施工能力，研掃面の状況および粉塵等の吸引状況とした。

### 4.1　実験手順

実験状況を**写真-7**，8，実験手順を**図-4** に示す。

手順は，**写真-7** に示すように，作業帯に車両を荷台昇降車から順に進入させ，所定の位置に荷台昇降車を設置し，車両間の制御・電源ケーブルやブラスト・吸引ホースを接続した。次に，発電機，コンプレッサおよび研掃装置を起動させた。タッチパネルから，**図-4** の着色したプロセスに示す研掃条件の入力を行い，研掃作業の自動化運転を実施した。また，研掃準備から研掃終了まで，荷重計，変位計，距離計，圧力計，傾斜計等の計測データおよび算出された研掃ヘッドの位置座標等を，自動計測（サンプリング間隔 10Hz）により保存した。

研掃条件は，予備実験より定めていた，ブラスト噴射圧 0.3MPa，研掃ヘッド押上げ圧 0.5MPa，噴射機の押付け荷重 200N/2 台，研掃ヘッドの走行速度 6m/min とした。研掃作業は，**図-5** に示す走行方向に，壁部（1 ライン），肩部（2 ライン），天井部（3 ライン）の 3 つのラインに分けて実施した。

研掃作業の人員は 3 名で，車両 3 台の運転手が，研掃作業時にタッチパネルの操作とホース類の補助や引き回しを行った。

### 4.2　性能確認実験の結果

a．自動化運転の状況

(1) 自動化運転

天井部の研掃作業の自動化運転による研掃ヘッドの走行位置と横行位置の時刻歴を**図-6**，研掃ヘッドの上下位置と研掃角度の時刻歴を**図-7** に示す。

研掃ヘッドは，走行方向に 0.0～2.16m を 10 往復の計 20 回，横行方向に 0.90～-0.43m へと 1.33m 移動し，上下方向に 0.52m 上昇した。横行と上下方向の移動は走行が反転する時に行われ，反転ごとに，横行移動は 65～72mm，上昇は 21～32mm ずつであった。研掃ヘッドは，走行時には横行位置と上下位置および研掃角度に変化がなく，走行方向

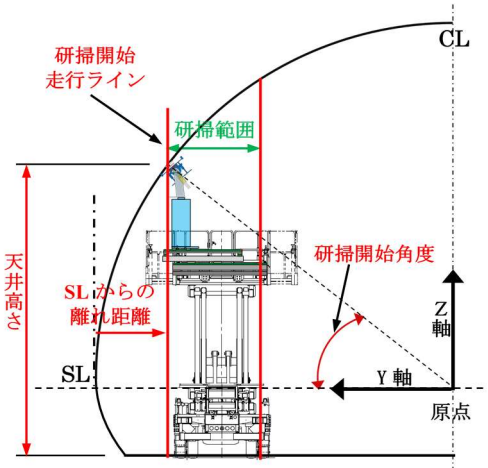



図-3　トンネルと荷台昇降車の全体座標系

写真-7　性能確認実験全景

写真-8　自動化運転による研掃作業状況

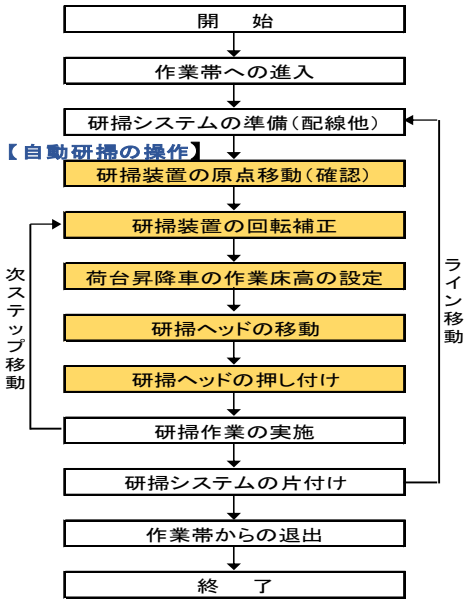



図-4　性能確認実験の手順

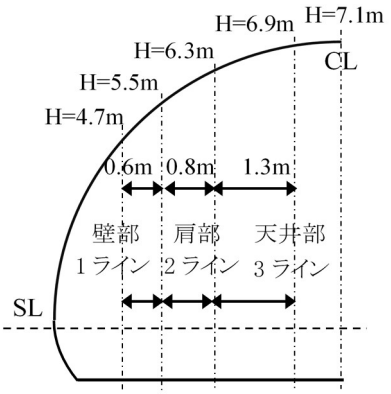



図-5　研掃作業時のライン設定

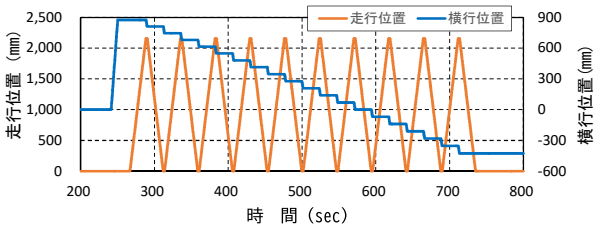



図-6　研掃ヘッドの走行位置と横行位置

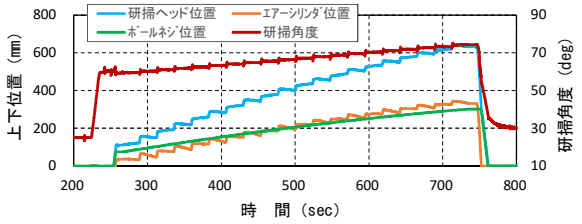



図-7　研掃ヘッドの上下位置と研掃角度

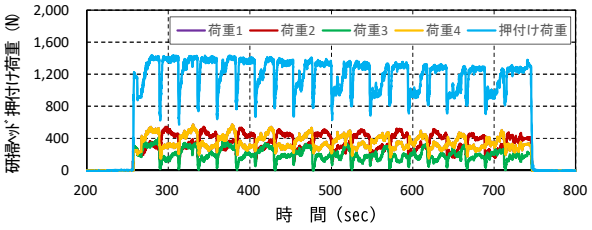



図-8　研掃ヘッドの押付け荷重

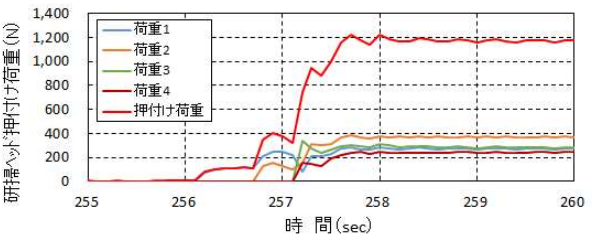



図-9　接触時の研掃ヘッドの押付け荷重

と平行に移動し，反転時には曲面に沿って天井部方向へ移動することを確認した。なお，上下位置は，エアーシリンダ（500mm）とボールネジ（300mm）の和である。横行時の上昇はエアーシリンダのみで行っているが，走行移動中に横行時の上昇量を5：3の割合でエアーシリンダとボールネジに再配分し直す制御を行っている。

研掃ヘッドの4隅のキャスター付き荷重計の出力値を荷重1～荷重4，その総和を研掃ヘッドの押付け荷重とする。自動化運転時の研掃ヘッドの押付け荷重の変動を確認するため，天井部での研掃ヘッドの押付け荷重の時刻歴を**図-8**に示す。走行時の研掃ヘッドの押付け荷重は約1300Nで，荷重1～荷重4の平均が200～400Nであった。研掃ヘッドに作用する荷重は変動が少なく安定しており，研掃ヘッドは曲面に安定した状態で押し付けながら移動していることが確認できた。

(2) 研掃ヘッドの接触判定

研掃ヘッドの研掃面への接触判定は，荷重1～荷重4を用いて，①ロータリアクチュエータによる研掃ヘッドのブレーキの開放，②研掃ヘッドの確実な曲面への接触，の2種類により行っている。

研掃ヘッドの曲面への接触状況を確認するため，**図-8**において研掃ヘッドが接触する時間255～260sec間の時刻歴を**図-9**に示す。初めに，荷重1が研掃面に接触し，0.6秒後に荷重2，その0.4秒後に荷重3と4が同時に接触している。最初にブレーキ解放条件の5N以上の荷重になったのは荷重1で，接触の0.1秒後に77Nと増加し，ロータリアクチュエータのブレーキが解放され，研掃ヘッドが回転できる状態になったことを示している。次に，荷重2と荷重3の対角の荷重が1.2秒後にともに200Nを超え，同時に押付け荷重が600N以上（接触条件）となっている。このことから，研掃ヘッドが確実に接触したと判断できる。

(3) 噴射機と研掃面の距離（研掃面のばらつき）

天井部の噴射機の研掃面への押付け荷重と押付け変位の時刻歴を**図-10**に示す。

押付け荷重は 200N としていたが，370N 程度と大きく押し付ける結果を示した。これは，噴射機を押し付ける小型エアーシリンダの設定圧が 0.3MPa と高く設定したことによる。一方，押付け変位は，設定の押付け荷重で 60～70mm 程度となるが，今回の実験では押付け荷重が大きかったため，押付け変位が 80mm 程度と大きくなりブラシを少し押し潰す状態になった。しかし，押付け荷重と押付け変位ともに研掃時にはほぼ一定となっており，ノズルから研掃面までの距離が一定に保たれていることが分かる。これらより，自動化運転によって安定した研掃作業が行われていることが分かる。

ｂ．施工能力

研掃システムの施工能力を確認するため，時間当たりの研掃面積を求めた。研掃システムが作業帯に入り配管･配線等を行う時間を準備時間，タッチパネルによる研掃作業の自動化運転と次ステップへの車両移動を合わせた時間を研掃時間，研掃作業が終了し配管・配線の切り離しを行い作業帯から退出するまでの時間を撤去時間とした。なお，施工能力実験では，各ラインの施工長を 16m（1 ステップの施工長 2m，研掃装置移動を 8 ステップ）として，研掃を行った。研掃作業後の次ステップへの移動は，荷台昇降車の作業床の高さを変えずに，荷台昇降車を運転しながらローラジャッキを使って前方に約 2m 移動させた。

各ラインの施工時間を**表-2** に示す。研掃システムの 1 時間当たりの研掃面積は 10.9～14.3m²/時間で，平均 12.1m²/時間であった。また，施工能力は天井部が壁部に比して高い結果になった。これは，研掃ヘッドの走行回数が，壁部で 13 回，肩部で 16 回，天井部で 20 回となっており，天井部に近づくほど走行回数が多くなったためと考えられる。壁部で走行回数が少ないのは，研掃ヘッドの横行移動量が最大の 1.9m になる前に，鉛直移動量の限界値 0.8m に達するためである。

ｃ．処理面の状況

研掃面は，**写真-9** 示すように一様に研掃されているが，研掃走行間の一部には未研掃の部分が見られた。これは，研掃ヘッドに取り付けている 2 台の噴射機の間隔を少し広く設定したことが原因と考えられる。

ｄ．粉塵等の吸引状況

粉塵の漏れを確認するため，実験では，研掃ヘッドに取り付けてあったブラシ枠 2 を取り外し，噴射機のブラシ枠 1 からの漏れを目視で確認した。

今回実施した研掃条件のブラスト噴射圧 0.3MPa，走行速度 4～8m/min では漏れを視認できず，確実に粉塵等が吸引されることを確認した。

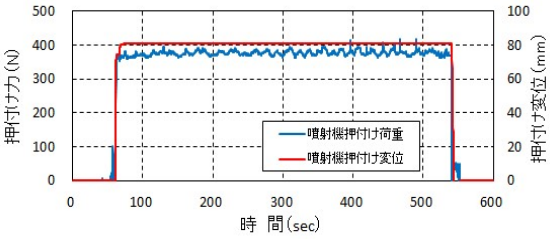



図-10　噴射機の押付け荷重と押付け変位

表-2　施工時間と施工能力

| 項目 | | 1 ライン | 2 ライン | 3 ライン |
|---|---|---|---|---|
| 施工時間（時間） | 準備 | 0.25 | 0.28 | 0.23 |
| | 研掃 | 1.27 | 1.27 | 1.55 |
| | 撤去 | 0.20 | 0.25 | 0.25 |
| | 合計 | 1.72 | 1.80 | 2.03 |
| 研掃面積（m²） | | 18.7 | 22.5 | 29.2 |
| 単位時間当たり（m²/時間） | | 10.9 | 12.5 | 14.3 |
| 1 人時間当たり（m²/人･時間） | | 3.6 | 4.2 | 4.8 |

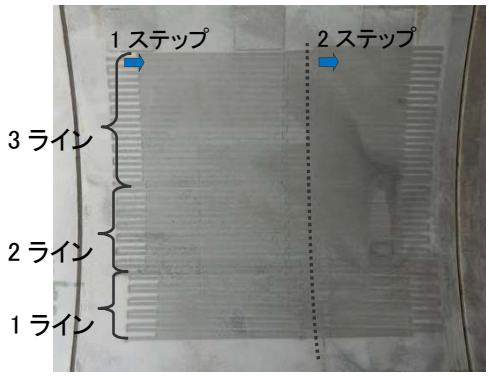



写真-9　自動化運転後の研掃面

## 5．あとがき

性能確認実験より，以下のことを確認し，本研掃システムを現場に適用できる見通しが得られた。

ⅰ．実大模擬トンネルにおける曲面コンクリート表面の研掃作業を自動化運転で行える

ⅱ．発生した粉塵の飛散を防止できる

ⅲ．処理面のばらつきを非常に少なくできる

ⅳ．研掃作業人数は一般の作業員 3 名で行える

今後は，現場への適用を図り，安全性の向上や操作性の向上等，システムの完成度を高めたい。

## 参考文献

1）石井敏之：ウォータージェットを用いたコンクリート表面処理機の開発と現場適用，平成 26 年度新技術・新工法に関する講習会，pp.35～38，2015.2

2）丸山八大・津村匡洋・石井敏之：天井用車載型乾式研掃装置の自動化運転による地下鉄補修工事への適用ついて，令和元年度建設施工と建設機械シンポジウム，pp.167～172，2019.12

# 25. 打音検査を用いたアスファルト内部欠陥検出への AI 手法導入に関する実験報告

立命館大学　○佐々木　優一
立命館大学　横山　隆明
大林道路株式会社　光谷　修平

## 1. はじめに

道路維持管理の課題の一つにアスファルト舗装のポットホール対策がある。雨水の浸透等により進行する舗装内部の損傷は，路面上から発見することが困難であり，ある日突然，表層の一部が崩壊してポットホールとなり，騒音振動や水はねの原因となるほか，通行車両の走行安全性を著しく低下させる[1), 2)]。このため，舗装内部の損傷をなるべく早期に，できればポットホール化する前に非破壊で検知する方法が求められている。この損傷検知方法として，簡便かつ低コストで実施可能な非破壊試験法である打音検査が用いられている。しかし，打音検査はハンマーの使用方法や打撃音の判断に熟練を要するという短所を有しており，また近年では人口減少に伴う建設技術者の不足も問題となっている。そのため，検査員の経験や感覚に依存せず，経験の浅い者でも実施可能な打音診断システムの構築が必要であると考える。

本研究では，打音検査結果の判定を AI で分析することにより，損傷有無の判断をサポートする打音診断システムを構築し，表層下に模擬的に損傷部を配置した実験舗装に対して打音試験を行い，その妥当性を検証した。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体・打音収録器具

実験では，コンクリート床版上の舗装を念頭に大林道路株式会社技術研究所にて供試体を作成した。供試体の寸法・構成は，コンクリート平板（300mm×300mm×50mm）に損傷を模擬した円形の窪み（d：φ0，50，100，150mm×h：5mm）を設け，その上部に阪神高速道路仕様の基層用アスコン 35mm で構成した。実際の舗装にはこの上に厚さ約 40mm の表層があるが，本研究試験では省くものとした。使用したコンクリート及びアスコンの配合表を表-1，表-2 に示す。

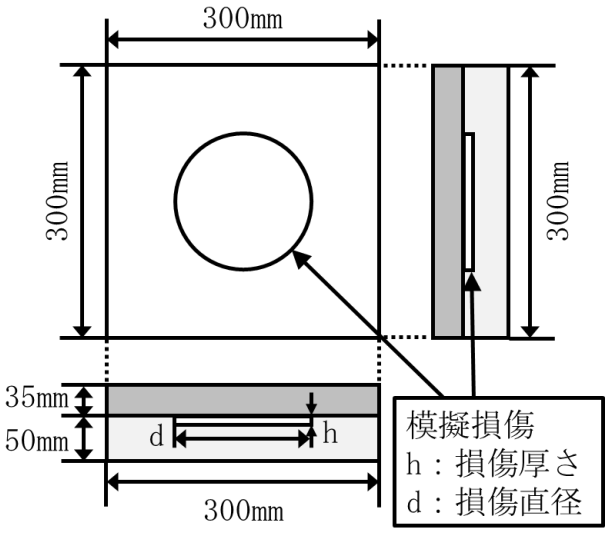



図-1　供試体概要図

表-1　コンクリートの配合

| W/C (%) | s/a (%) | 単位量(kg/m³) | | | | | | 混和剤量(g/m³) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | C | W | S1 | S2 | G1 | G2 | AS | AE |
| 55.0 | 45.0 | 304 | 167 | 242 | 575 | 507 | 504 | 3435 | 5.3 |

表-2　アスコンの配合

単位 %

| 6号砕石 | 7号砕石 | SCR | 砕石 | 細砂 | 石粉 | As |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 34.9 | 18.9 | 8.5 | 14.2 | 13.2 | 4.7 | 5.6 |

打音データは，重量 133.5g，頭口径 18mm のハンマーで打撃し，周波数範囲 : 20Hz～20kHz，正面感度 : -34dB±30%（1kHz），負荷インピーダンス : ≧1000Ω，S/N 比 : 78dB の単一指向性コンデンサーマイクロフォンにより収録した。

## 2.2　損傷検出システム構築手法

損傷検出システムを構築するために， 打音検査結果の Deep Leaning（DL）を行った。DL は，人工知能の要素技術の一つで，人間が自然に行うタスクをコンピュータに学習させる機械学習の手法の一つである。人間の神経細胞の仕組みを模したシステムであるニューラルネットワーク（NN）の隠れ層（図-2 参照）を多層にして用いることで，データに含まれる特徴を段階的により深く学習することが可能となる。多層構造の NN に大量の音声データを入力することで，コンピュータのモデルはデータに含まれる特徴を各層で自動的に学習する。これにより DL のモデルは極めて高い精度を誇り，近年の進歩により人間の認識精度を超えるまでとなっている [3]。

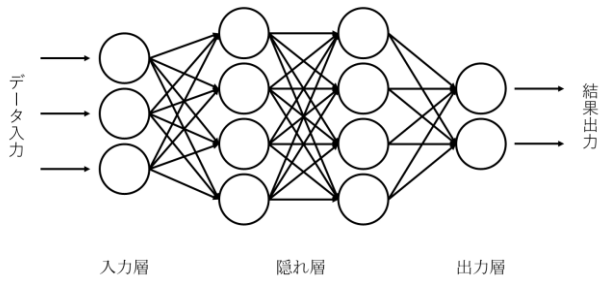



図-2　DL の概念図

本実験で実施する DL の流れを図-3 に示す。それぞれについて，以下に順に説明する。

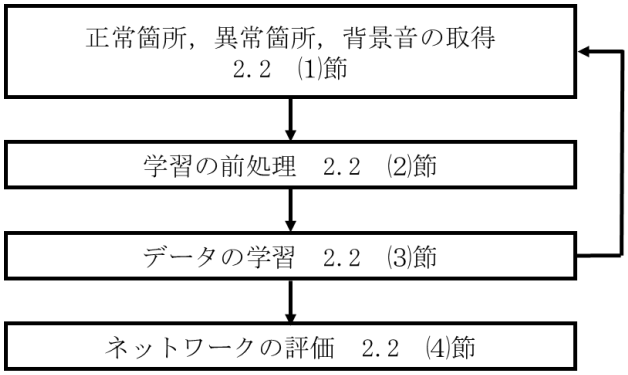



図-3　本研究で実施する DL の流れ

（1）正常箇所，異常箇所，背景音の取得

サンプリング周波数 fs は 8820Hz で行い，判定に使用する信号長を 0.25s，検出する最少のピークの高さを 0.05（max は 1）とした。正常箇所を図-1 の d=0mm の供試体，異常箇所を d=50，100，150mm の供試体とし，背景音は打撃を行わない状態とした。

（2）学習の前処理

取得した各々のデータ数に隔たりがある場合，正常に学習されないことがあるため，各々のデータが均一になるようにランダムに抽出した。次に，学習用（70%），検証用（10%），テスト用（20%）にデータセットを分割し，各々のデータセットからスペクトログラムを取得した。さらに，ネットワークの定義，学習のオプションの設定を行った。

（3）データの学習

学習の進行状況は，横軸 : 学習の反復，縦軸 : 精度（%）で表される。学習が正確に進行する場合，図-3 に示すように学習反復が進行するにつれて精度が 100%に近づく。一方で精度が上昇しない場合や減少する場合には，学習データだけに最適化されてしまい汎用性がない状態に陥る過学習となり，実験方法やネットワークの見直しが必要となる。

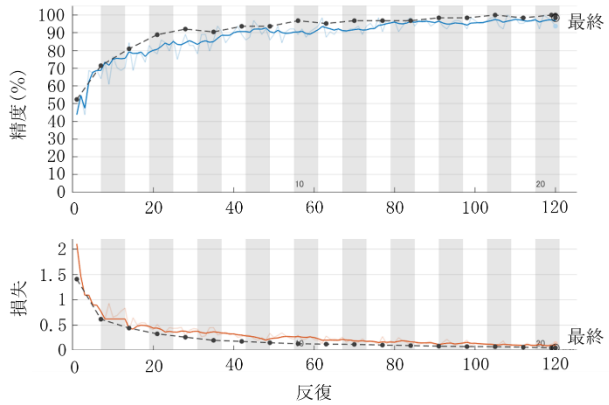



図-4　データの学習状況

（4）ネットワークの評価

3 値分類以上の機械学習モデル性能を測る指標として使用される多クラス混同行列を可視化し，評価を行った。混同行列は，図-5 に示すように列と行の要約を使用し，モデルがどの程度の精度で分類し，どこで問題が発生した可能性があるか判別する。解析の都合上，図-5 では正常箇所を normal，異常箇所を abnormal，背景音を background としている。最左端は取得音声データを表し，横方向にそれぞれのデータごとに判別した数を示している。これらを基に正解率および図-6 で定義する再現率，適合率，F 値の 4 指標による比較を行った。正解率は全データのうち正解したデータ数の割合，再現率は判別したいデータ数のうち実際に判別できた割合，適合率は判別対象のデータを判別した数のうち，それが正解している割合を示し，F 値は適合率と再現率の調和平均であり，一般的な性能評価の指針となる。

| | abnormal と判断した数 | background と判断した数 | normal と判断した数 |
|---|---|---|---|
| abnormal | a | b | c |
| background | d | e | f |
| normal | g | h | i |

図-5　多クラス分類の混同行列

| | 再現率(%) | 適合率(%) | F値(%) |
|---|---|---|---|
| abnormal | a/(a+b+c) | a/(a+d+g) | 再現率と適合率の調和平均 |
| background | e/(d+e+f) | e/(b+e+h) | 〃 |
| normal | i/(g+h+i) | i/(c+f+i) | 〃 |

図-6　各指標の定義 [3)]

本実験では，上記の手順に沿って以下 2 点の手法用いて評価を行った。

(a) 損傷大きさおよびデータ数の増加による学習精度の比較

損傷直径 d=50，100，150mm について，各異常音をそれぞれ学習・評価することで，模擬損傷大きさの違いによる学習精度を比較した。また，データ数の増加による精度向上を検討するため，正常箇所，異常箇所，背景音それぞれ 200 個および 2000 個のデータを取得した。

(b) 学習対象の増加に伴う精度比較

実際の道路では，ポットホール発生段階の様々な状態を検知する必要があるため，一度に複数の対象を学習させることで，精度がどの程度変動するか評価を行った。ここでは，初めにデータ数を正常音 1000 個，背景音 1000 個，異常音 d=50 を 1000 個取得し，以降 d=100，150mm それぞれ 1000 個ずつ順に追加し，その際の F 値をそれぞれ比較した。

なお，ハンマーは図-1 に示す供試体の中心部付近を 1 秒に 1 回の間隔で打撃し，マイクロフォンの位置は打撃位置より 50mm 離れた位置に配置した。打音データ取得の様子を写真-1 に示す。

写真-1　打音データ取得の様子

## 3.　実験結果および考察

(a) 損傷大きさおよびデータ数の増加による学習精度の比較

表-3 に 200 個のデータ数を取得した結果の平均値を示す。損傷直径が大きくなるにつれて，再現率，適合率はともに上昇している。F 値は，d=50mm の結果は良好であり，d=150mm では d=50mm と比較して 2.4%高く，更に精度が上がっている。これは，損傷内に含まれる空気の量が打音の周波数特性に何らかの影響を及ぼしているためだと考えられる。図-7 は，取得データから算出した振幅スペクトルを示す。d=50，100mm のピーク値は，2.5～3.0kHz であるのに対し，d=150mm のピーク値は約 4.0kHz であり，最大振幅値が大きく，高周波であることがわかる [5)]。なお，0.5kHz 以下の低周波数領域は計測時に近くにあった室外機の影響と考え，打音とは無関係であるとした。このことから，損傷直径が大きい程音声の判別が容易であり，学習精度が上がると考えられる。次に，表-4 に 2000 個のデータ数を取得した結果の平均値を示す。データ数 200 個の結果と比較して，全体的に精度が上がっており，損傷直径が大きくなるにつれて，再現率，適合率はともに上昇している。d=50mm は，学習の出来が良好だったためか，飛躍的に精度が上がっており，d=150mm よりも高い精度を示した。反対に，d=100mm は微々たる増加となった。原因としては，マイクの位置がずれたことで生じた音を誤認したためではないかと考える。これらより，データ数は多い程，精度は上昇することが確認できた。ただし，打撃の仕方や雑音等により精度が変動することが確認できたため，変動範囲を明らかにすることが今後の課題として挙げられる。また，データ数の増加に比例して学習時間も長くなるため，適切なデータ数の取得を行う必要があると考える。

表-3　損傷直径ごとの各指標における比較
(データ数 200 個時)

| 指標＼d(mm) | 50 | 100 | 150 |
|---|---|---|---|
| 正解率(%) | 93.3 | 95.0 | 95.8 |
| 再現率(%) | 93.3 | 95.1 | 95.8 |
| 適合率(%) | 93.5 | 95.1 | 96.1 |
| F値(%) | 93.3 | 95.0 | 95.7 |

表-4　損傷直径ごとの各指標における比較
(データ数 2000 個時)

| 指標＼d(mm) | 50 | 100 | 150 |
|---|---|---|---|
| 正解率(%) | 99.1 | 95.3 | 98.3 |
| 再現率(%) | 99.1 | 95.4 | 98.3 |
| 適合率(%) | 99.1 | 95.3 | 98.4 |
| F値(%) | 99.1 | 95.3 | 98.3 |

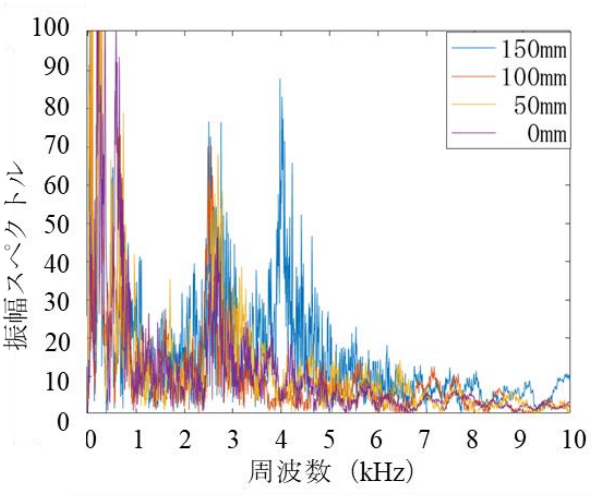



図-7　各損傷直径の振幅スペクトル

（b）学習対象の増加に伴う精度比較

表-5 に，各異常音を順に追加した結果の平均値を示す。d=50mm 時点での精度は良好であり，d=100mm のデータを追加して得られた結果は，全体的に減少しており，特に適合率が 4.3%減少している。さらに d=150mm を追加した際には，精度は上がっているが，d=50mm だけの結果と比べるとやはり減少している。この結果から，学習対象を複数にすることで精度は減少することが確認できた。ただし，d=50，100mm のような小さな損傷を追加することで精度は下がるが，d=150mm を追加した際に精度が上がったことから，損傷が大きいものや破壊が進行しているものは判別が比較的容易なため，精度が引き上げられているのではないかと考える。そのため，今後損傷直径の種類を広げ，対象をさらに増やすことで，精度の変動が損傷大きさによるものであるかを確認するとともに，損傷の大きさに区分を設けることで学習の正確性を上げることが課題として挙げられる。

表-5　学習対象の追加に伴う各指標の比較

| 指標＼d(mm) | 50 | 50, 100 | 50, 100, 150 |
|---|---|---|---|
| 正解率(%) | 95.8 | 92.8 | 95.3 |
| 再現率(%) | 95.8 | 93.8 | 95.7 |
| 適合率(%) | 95.9 | 91.6 | 93.1 |
| F値(%) | 95.8 | 92.4 | 94.3 |

以上より，いくつか課題点が挙がったが，舗装内部損傷の判定に AI 手法の一つである Deep Leaning を用いた打音検査は有効であり，損傷の大きさを複数にした場合の検知も可能であることがわかった。この手法は実際の舗装にも適用できる可能性があると考える。

## 4.　まとめ

本研究は，打音検査の舗装内部損傷判定に AI を適用する際の有効性を検討したものであり，以下の知見が得られた。

1）個別データを取得した際，模擬損傷直径が大きい程，F 値は高くなり，損傷の判定精度が上がることが確認できた。

2）取得データ数を増やすことで，損傷判定の精度は高くなることがわかった。データ数の増加に比例して学習時間も長くなるため，精度が上昇しなくなる範囲を明らかにする必要がある。

3）測定対象を複数にした際，対象を増やすほど F 値は減少するが，約 92～95%と高く，実際の道路におけるポットホール発生段階の様々な状態を認識することが可能ではないかと考える。

今後の予定を以下に述べる。本研究では試行回数を増加することで各指標による精度向上および精度の変動範囲を把握することで正確性向上を図る。また，今回は模擬損傷を 3 種類用意したが，幅広い範囲の大きさを増やすことで，より実際の舗装に近づけた実験を行う。そして，本研究ではハンマーを用いて打音データを取得したが，実道下におけるハンマーの点検は，広範囲を点検するには多大な労力や時間を要することが問題として挙げられるため，回転式打音検査器具を導入する予定である。同検査器を移動・回転させた際に発生する連続打音の変化によるポットホールの評価を行うことで，その有効性の検証および点検効率の解決を試みる。

## 参考文献

1) 橋爪謙治，橋本和明，明石行雄，全邦釘：排水性舗装の基層以深の劣化を要因としたポットホール発生予測手法の一提案，土木学会論文集 E1（舗装工学），vol.70，No.3（舗装工学論文集第 19 巻），I_17-I_24，2014

2)橋爪謙治，橋本和明，全邦釘，中畑和之，石田哲也：排水性舗装におけるポットホール発生リスクに関する定量分析，土木学会論文集 E1（舗装工学），vol.72，No.3（舗装工学論文集第 21 巻），I_115-I_123，2016

3)江本久雄，馬場那仰，浅野寛元，長瀬大和：AI 手法による打音検査の浮き判定の検討，AI・データサイエンス論文集 1（J1），514-521, 2020

4)全邦釘，嶋本ゆり，大窪和明，三輪友寛，大賀水田生：ディープラーニングおよび Random Forest によるコンクリートのひび割れ自動検出手法，土木学会論文集 F3 （土木情報学），Vol.73，No.2，pp.297-307，2017

5)淺野雅則，鎌田敏郎，六郷恵哲，遠藤友紀雄：論文 コンクリート打撃音の周波数特性とその欠陥評価への適用，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1545-1550，2002

# 26. 地中探査結果を搭載したＩＣＴ建設機械の活用による地下埋設物の保護

(一社)日本建設機械施工協会　施工技術総合研究所　○ 八木橋　宏和
コベルコ建機　株式会社　関口　伸吾
ジオ・サーチ　株式会社　神代　晃治

## １．はじめに

国土交通省が推進する i-Construction の取り組みの内, ICT の全面的な活用（ICT 活用工事）では 3 次元設計データを施工現場へ利用し, 正確な施工数量の把握や, ICT 建設機械に搭載される電子丁張としての活用など, 従来施工より効率の良い施工が行われている。しかし, ICT による効率化の事例は少なく, 市街地での維持管理による掘削作業では, 既存地中埋設管の位置を把握し, 破損させることなく保護することが急務である。

市街地における従来施工の維持管理では, 地中探査の実施後, 配管経路図等を 2 次元の図面として図化を行い, 埋設管設置位置を把握する。施工現場では丁張設置, 試掘を行いながら, 人力と併用して慎重に作業をする必要がある。

そこで筆者らは, 上記作業に ICT を活用し, 地中埋設管の探査結果と ICT バックホウを連携させ, 施工現場の生産性向上および既存埋設管の保護を目的とした実験をおこなった。

## ２．目的

本稿は，市街地での維持管理による掘削作業において, 施工現場の生産性向上および既存埋設管の保護の向上を目的としたマシンガイダンスシステムについて，検証し，評価したものである。

## ３．実証実験

地中埋設管の探査結果とICTバックホウを連携させ，施工現場の生産性向上を調査するために表-1に示す現場条件にて検証を行った。

表-1　現場検証条件

| | |
|---|---|
| 時期 | 2021年3月15～18日 |
| 期間 | 4日間 |
| 場所 | 施工技術総合研究所　構内 |
| 実験範囲対象 | W2m×L4m×(H1.4) |
| 管径 | 50A～200A |
| 材質 | VU，SGP-W |

市街地の維持管理を想定するため，50A～200A の管および障害物を想定したアルミ板を埋設した。

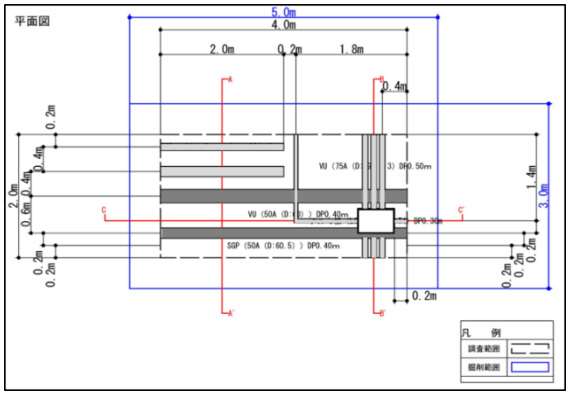



図-1　埋設管配置平面図

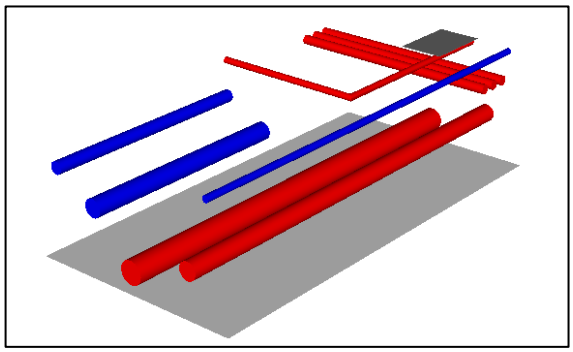


図-2　埋設管配置状況　探査結果3D表示

埋設管の設置には，レーキによる敷き均し，タンパによる締固めを実施し，土の密度が一定になるように留意しながら，実験準備を行った。

写真-1　検証に利用した埋設管

**写真-2　埋設管設置完了状況**

検証を行った手順について表-2に示す。

**表-2　検証手順**

| 手順 | 実施内容 |
|---|---|
| 1 | 地中探査の実施後，地中埋設管データを解析し3Dモデル化する |
| 2 | 3Dモデル化された埋設管の上部より，15cmオフセットした3次元設計データを，埋設管の保護データとして作成 |
| 3 | 埋設管の保護データをLandXml化し，ICTバックホウに搭載する |
| 4 | ICTバックホウにて床掘り作業を行い，作業時間を計測する |
| 5 | 再度埋戻しを行い，通常床掘り作業時間を計測する |
| 6 | 上記4と5の作業時間を比較する |

## 3.1　地下探査の実施

埋設管位置の把握を行うため，地下探査を行った。地下部の非破壊探査技術として，電磁波地中レーダ法と電磁誘導法がある。電磁誘導法では磁性体が磁界に影響を与える現象を利用するため，金属系の埋設物しか検知できない。

しかし，実際の掘削作業には材質を問わず埋設物を検知する必要があるため，媒質内の電磁波伝播と反射を利用する電磁波地中レーダ法を使用した。使用した多配列地中レーダシステムの仕様を表-3に示す。地中探査の実施状況においては写真-3に示す。

**表-3　多配列地中レーダシステムの仕様**

| | |
|---|---|
| 探査能力 | 探査深度：1.5m程度 |
| 探査精度 | 水平位置：±10cm<br>深度位置：±10cm　（GL-1m以浅）<br>±10%程度（GL-1m以深） |
| 施工能力 | 500m$^2$～1,000m$^2$程度／日 |
| 適用条件 | 気象条件：雨天不可 |

**写真-3　地中探査の実施状況**

多配列地中レーダシステムから取得された地中レーダ平面処理データを解析することにより，地中埋設物の位置を把握した(図-3)。また，横断データおよび縦断データを処理・解析を行う事により3Dモデル化を行った。

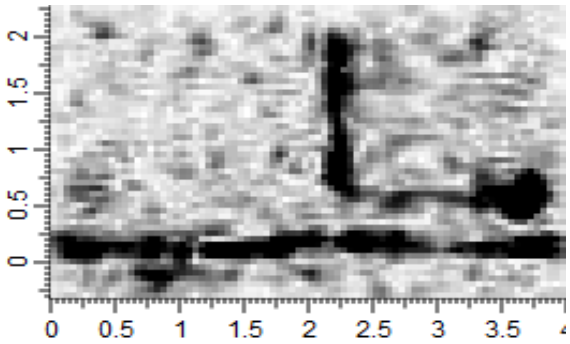



**図-3　地中レーダ平面処理データ**

## 3.2　地中計測データのレジストレーション作業

地下探査結果の3Dモデルは，現場の座標系ではなくローカル座標となる。そのため，絶対座標の現場基準点を計測し，相対座標となっている地下探査結果の3Dモデルの基準点をTS測量およびGNSS測量にて統合し現場座標に変換した。(図-4)

また，埋設管保護データを作成するために，標高値が必要となるため，地上型レーザースキャナーを用いて点群の計測を行った。また，デジタル処理中に周囲の状況を把握しやすくするため，取得した点群を用いて埋設管位置の可視化を行った。

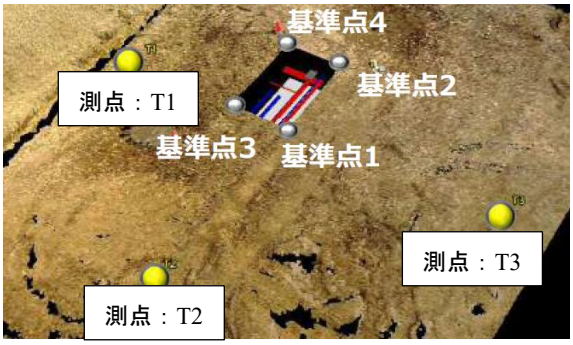



**図-4 地上の基準点配置状況**

### 3.3　埋設管保護データの作成

地中の埋設管保護データに関しては，通常のICT土工にて利用されるデータ形式と変わらない。

そのため，深さ方向での3次元設計データではなく高さ方向(標高値)を利用して不整三角網(TIN)データを作成する必要がある。前述の地中計測データのレジストレーション作業にて取得した3Dモデルは現場座標に変換するとともに探査誤差を考慮するため，3Dモデルの15cm上部へとオフセットした高さの3次元座標を算出し，それらを結線した不整三角網データを作成した。

利用したソフトウェアは一般的に広く利用されているシステムを用いて作成した。作成した埋設管保護データは図-5，配置状況は図-6に示す。

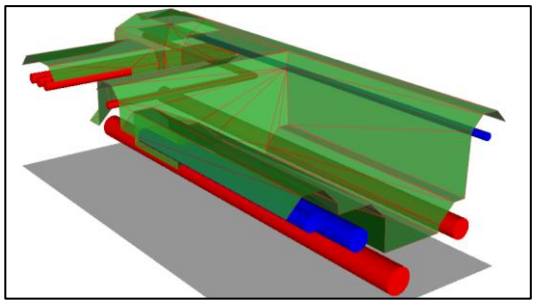


**図-5 埋設管保護データの作成**

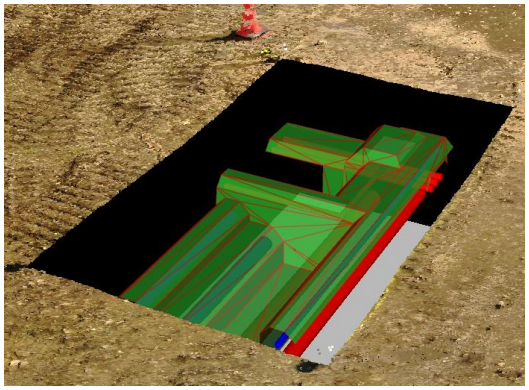


**図-6 埋設管保護データの配置状況**

### 3.4　ICT活用による掘削作業計測

本検証における4m×2m(深さ約1.2m)のICT活用による準備作業および掘削作業を実施した。検証作業においては写真-4，作業時間においては表-4に示す。ICT活用による床掘は，マシンガイダンス機能を搭載したバックホウ0.25m³を用いた。ガイダンス画面に表示される埋設管保護データと，バケット位置をリアルタイムに確認し作業を実施した。本検証においては，マシンガイダンスシステムを利用したため，作業を実施するオペレータの技量によって掘削時間は異なる。本検証におけるバックホウのオペレータは，日ごろからバックホウの操作に長けている人材にて実証実験を行った。

**写真-4　ICT建機による掘削作業**

**表-4　ICT活用による準備作業と必要時間**

| 区分 | 実施内容 | 時間 |
|---|---|---|
| 探査 | 地中探査 | 10分 |
| | 3Dモデル化(解析・図化) | 40分 |
| 準備 | 埋設管保護データ作成 | 60分 |
| | 3D設計データ作成 | |
| 施工 | ICTバックホウを床掘 | 45分 |
| 合計 | | 155分 |

### 3.5　従来施工での掘削作業計測

本検証における4m×2m(深さ約1.2m)の従来施工による準備作業および掘削作業を実施し，マシンガイダンス機能を利用しないバックホウ0.25m³を用いた。検証作業においては写真-5，作業時間においては表-5に示す。

埋設管を保護する目的から，従来施工による床掘作業においては以下の作業を頻繁に行いながら行った。

・平面位置をコンベックス等にて計測
・深さをレベルにて計測
・埋設管の有無を手元作業員に確認及び指示
・確認のための手掘り試掘

**写真-5　従来建機による掘削作業**

表-5　従来施工による準備作業と必要時間

| 区分 | 実施内容 | 時間 |
|---|---|---|
| 探査 | 地中探査 | 10分 |
| | 地中探査結果報告書 | 120分 |
| | 配管経路図 | |
| 準備 | 丁張計算 | 20分 |
| | 丁張設置 | |
| 施工 | 試掘・埋設管確認 | 130分 |
| | 人力を併用した床掘 | |
| 合計 | | 280分 |

### 3.7　埋設管の保護状況

埋設管の保護状況について，ICT活用と従来施工での違いを表-6に示す。

ICT施工では埋設管への破損はなく，試掘して管までの距離を計測するとデータ通りに15㎝上までの掘削結果であった。(写真-6)

従来施工では，バケット刃先が埋設管へ接触することがあり，損傷が2箇所，破損が1箇所であった。(写真-7)

表-6　従来施工とICT施工による埋設管接触箇所

| 施工区分 | 埋設管の状況 | 個所数 |
|---|---|---|
| ICT施工 | 損傷 | 0 箇所 |
| | 破損 | 0 箇所 |
| 従来施工 | 損傷 | 2 箇所 |
| | 破損 | 1 箇所 |

写真-6　ICT施工実施時の掘削結果

写真-7　従来施工時のバケット接触による破損個所

## 4．まとめ

従来施工時間とICT施工時間を比較すると，45%程度の縮減効果が得られた。その要因として丁張設置に関する手間の縮減，地中の状態が把握できる事によるオペレータの生産性の向上，埋設物破損のリスクが低減できるため，埋設管破損後の修復作業等が不要になるなどの効果が見られた。

また，本検証現場では4m×2m(深さ約1.2m)の狭隘環境であるため，丁張計算，丁張設置の作業が20分と少ない。実施工ではより多くの丁張設置および測量計算作業も時間がかかると想定されるため，更なる時間の縮減効果が期待できる。

安全面では，コンベックスによる平面位置の測定やバケット爪先を施工箇所近くにて目視しながら作業を進める必要があるが，ICTの活用により人員が施工箇所付近に立ち入る必要が無くなるため，安全面による効果も期待できる。

しかし，3次元設計データが不可欠なことや，ICT建設機械の導入が必須であるため，費用面では施工者の負担が大きくなってしまうという課題や，細かな埋設管の保護や，狭隘環境での施工では，バックホウのバケットサイズに合わせて埋設管保護データを作成する必要がある等の課題がある。

小型建設機械に取り付け可能なICTシステムが市場に出回り，中小規模の施工現場に導入されやすくなることを期待したい。

## 5．おわりに

本稿では，市街地での維持管理による掘削作業における施工現場の生産性向上および既存埋設管の保護の向上を目的とし，3次元設計データを用いたマシンガイダンスの活用についての研究を行った。ICT建設機械を利用するためには，地中探査結果より3次元設計データを作成することが必要不可欠であるが，人工数の削減および作業時間の短縮効果が大きいと同時に，地下埋設管の保護に効果的である事が分かった。埋設管の保護においては，埋設管破損時の復旧作業の短縮，オペレータによる作業の容易さなど，様々な波及効果が得られると考えられる。今後もICTを利用した活用方法や小規模土工におけるICTの現場適用性および効果に関する研究に取り組んで参りたい。

# 27. 河川機械設備におけるパラダイムシフト型更新の取組について

国土交通省 総合政策局 公共事業企画調整課　　○東山　遼
門屋　博行
宮下　学

## 1. はじめに

昨今の地球温暖化に伴う風水害の激甚化，頻発化による浸水被害の増加から，内水排水ポンプをはじめとした河川機械設備の重要性が増している。「社会資本整備審議会河川分科会気候変動を踏まえた水災害対策検討小委員会」において答申された「気候変動をを踏まえた水災害対策のあり方について」では，「2℃上昇に至る前に耐用期間を迎えるポンプ等の施設については，その施設の耐用期間経過時点の気候変動の影響を考慮して設計をすることが望ましい。」とされている。また，自治体からの排水ポンプ増強などの要請が高まっているところである。一方で，気候変動に伴う水害の激甚化・頻発化，老朽化に伴う故障リスクの増大，従事技術者の減少・高齢化等の課題に対応する必要がある。（表-1）

表-1 河川機械設備の課題

① 気候変動への対応

近年，毎年のように日本各地で，これまで経験したことのないような豪雨により，深刻な水害が発生しており，計画規模を上回る洪水の発生地点数は，国管理河川，都道府県管理河川ともに近年増加傾向である。浸水被害の増加から，自治体からの排水ポンプ増強など要請が高まっている。（図-1）

② 老朽化に伴う故障リスクの増大

河川排水ポンプ施設は，昭和期に整備されたものが大半で，設置後４０年を経過しているものが約３割であり，１０年度には約５割になる。（図-2）機械設備は高い信頼性を前提に設計されているため，冗長性（予備機等）を持っていない。今後，老朽化に伴う故障リスクが高まるが，機械設備は施設毎に設計された一品生産品であることが多く，故障時の部品供給に時間を要することもある。

③ 従事技術者の減少・高齢化

適切な機能を長期的に確保するためには，河川機械設備に従事する技術者の確保が重要な要素の一つになる。ところが，河川ポンプ事業に従事する技術者は，現在40～50歳代が大半を占め，30歳代以下が少ない人員構成になっている。（図-3）このままでは，10～20年後に，技術者が大きく減少し人手不足が想定される。そのため，技術者の確保，人材育成の仕組み作り，企業を発展させるための仕組み作り，メンテナンスの効率化，ゲートをはじめとした河川機械設備の遠隔操作，自動化を検討することが必要である。

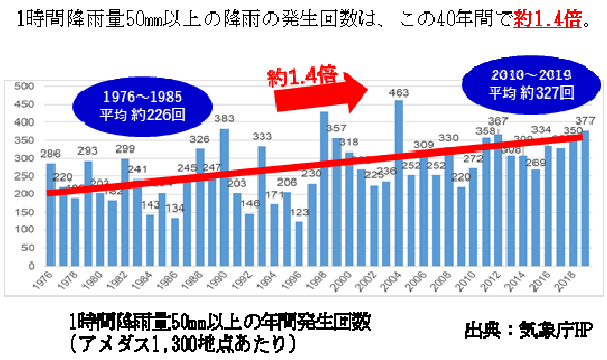



図-1.1　気候変動に伴う降雨量の増加

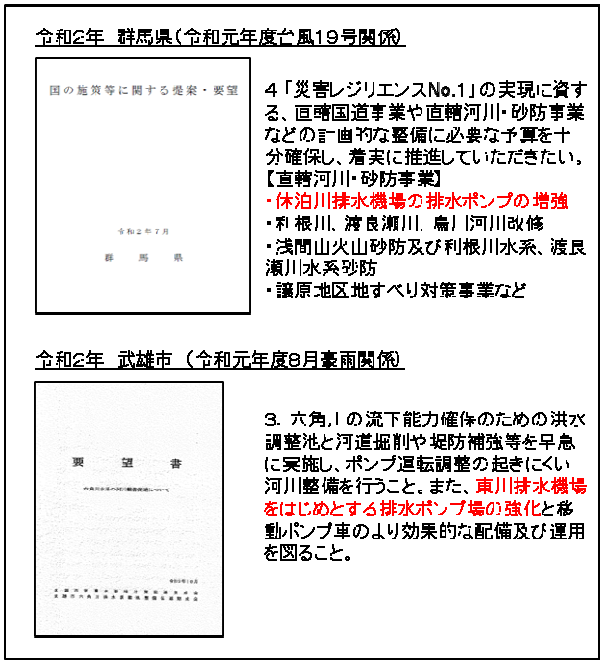



図-1.2　自治体からの排水ポンプ増強の要望例

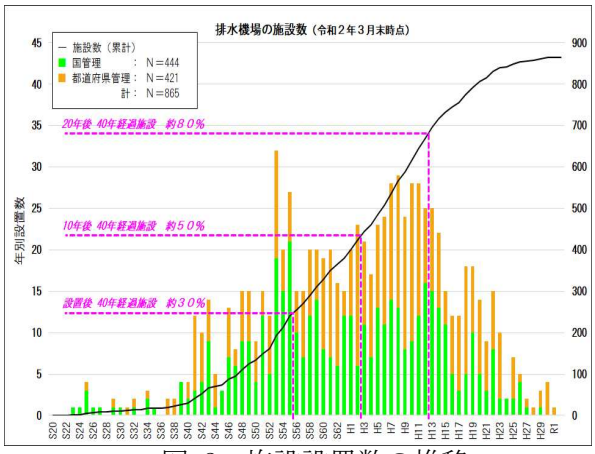



図-2　施設設置数の推移

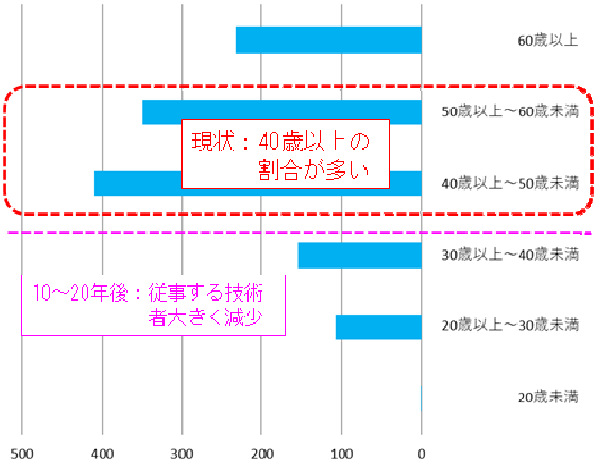



図-3　河川ポンプ事業従事技術者の年齢構成

| | | |
|---|---|---|
| | 池内幸司 | 東京大学大学院工学系研究科 教授 |
| | 有働恵子 | 東北大学災害科学国際研究所 准教授 |
| | 喜田明裕 | 一般社団法人河川ポンプ施設技術協会会長 |
| | 戸田祐嗣 | 名古屋大学大学院工学科研究科 教授 |
| | 野口貴公美 | 一橋大学大学院法学研究科 教授 |
| | 平山朋子 | 京都大学大学院工学研究科 教授 |
| ◎ | 松井純 | 横浜国立大学大学院工学研究院 教授 |

（五十音順、敬称略）

◎：委員長

表-2 河川機械設備小委員会 委員名簿

## 2. 河川機械設備小委員会

この様な課題の解決を目指すため，河川機械設備のあり方について従来の考え方からパラダイムシフトを図った上で，更新・整備を加速化することが求められており令和３年２月 18 日に社会資本整備審議会に対し「河川機械設備のあり方」について諮問しこれを受けて同審議会において「河川機械設備小委員会」（委員長：松井純　横浜国立大学大学院工学研究院 教授）が設立された。

（表-2）令和３年７月末までに４回開催（第１回令和３年３月 22 日，第２回令和３年５月 21 日，第３回令和３年６月 29 日，第４回令和３年７月 30 日）され，中間とりまとめを行った。（図-4）

図-4　開催状況

## ３．中間とりまとめ

４回の審議を経て，令和３年８月に中間報告がとりまとめられた。今回の中間とりまとめでは，河川機械設備においてシステム全体として，より高い信頼性を確保するため，新たに「総合信頼性」（表-3）の概念の導入を提示するとともに，排水ポンプのマスプロダクツ化の実証試験の開始を端緒に，リダンダンシーを確保する「冗長化保全」といった新たな保全手法の提示を行った。さらに，気候変動のシナリオへの対応について，新設・更新の機会に取り組むことを提示した。

これら新たな概念の導入等により，河川機械設備のあり方のパラダイムシフトを図るべきであり，今後，最終的なとりまとめに向け，議論の深化を図ることとした。なお，マスプロダクツ型排水ポンプの導入は，導入コストの低減，維持管理性・信頼性の向上などの効果が期待できることから，既存のポンプの更新だけではなく，今後，水害の激甚化・頻発化に対するポンプ新設の手段としても期待できるとしている。

「冗長化保全」とは、マスプロダクツ化されたサブシステムのストックによる迅速な復旧体制確保（「交換保全」）や、排水システムにＮ＋１を組み込むことによる故障時の排水機能確保（「Ｎ＋１保全」）により、リダンダンシーを確保する新たな保全手法である。（図-5）

現在は、マスプロダクツ化された自動車用ディーゼルエンジンを動力源として考えているが，カーボンニュートラルの対応についても検討していく。今後，さらなる議論の深化を図り，最終的には令和４年度夏頃にとりまとめを行う予定である。

なお，マスプロダクツ型排水ポンプの導入は、導入コストの低減、維持管理性・信頼性の向上など

の効果が期待できることから，既存のポンプの更新だけではなく，今後，水害の激甚化・頻発化に対するポンプ新設の手段としても期待できる。

表-3　総合信頼性

| | | 評価手法 | 評価結果 | 対応方策 |
|---|---|---|---|---|
| 総合信頼性<br>dependability | 信頼性<br>reliability | 故障により稼働しない期待値及び排水規模別の確率分布 | 総排水規模に対しては故障確率ｐにより決定、小口の方が機能損失の可能性が低い | 小口化による機能損失回避<br>Ｎ＋１による増強 |
| | 保全性<br>maintainability | 定性的に評価 | マスプロダクツ化した方が保全性には優れるが、台数（保全対象）が増加することも留意 | 台数の増加も含め総合的に判断 |
| | 保全支援性能<br>maintenance support performance | 定性的に評価 | マスプロダクツ化した方が支援体制は充実する | できるだけマスプロダクツ化を図る |

４．マスプロダクツ型排水ポンプ開発の取り組み

マスプロダクツ型排水ポンプの開発のため，主要な構成機器のポンプ，主原動機（車両エンジン）及び主配管（ポリエチレン管等）の技術動向を把握し，技術開発を行うための実証試験の仕様について検討する「マスプロダクツ型排水ポンプ技術研究会（以下，「研究会」という）」に参画する企業の公募を行い，延べ 23 社（ポンプ 13 社，エンジン 8 社，配管 2 社）が参画した。研究会は計 3 回開催した。研究会では，参画した各メーカーの製品仕様，適用範囲，組み合わせの留意点等の共有や実証試験機の仕様，試験方法等の共有を行った。この中で，実証試験での課題（表-4）が挙げられ，試験装置設計の中で検討することとした。

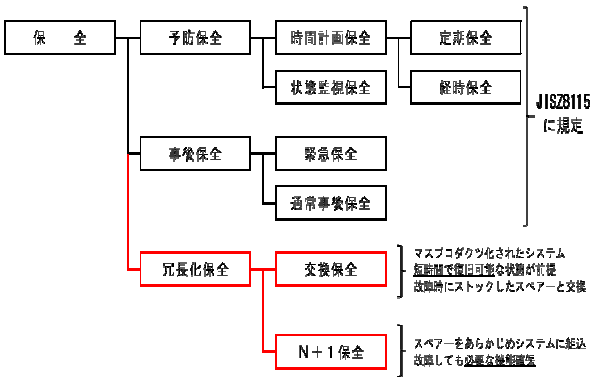



図-5.1　冗長化保全

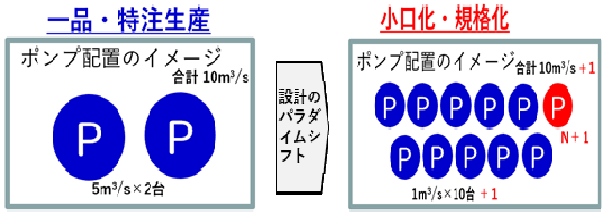



図-5.2 排水ポンプのパラダイム型更新イメージ

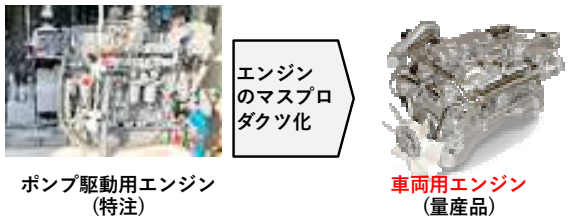



図-5.3　排水ポンプの検討イメージ

表-4　実証試験での課題

①車両用エンジン制御の ECU との接続方法を各社ごとに確認が必要

②車両用エンジン，減速機，ポンプの慣性モーメントや軸のねじり特性を踏まえた設計検討が必要

③車両用エンジンの冷却方式が各社ごとに異なることや走行風を期待できない定置状態での使用となるため個別に設計検討が必要

また，実証試験での主要な機器（ポンプ，車両エンジン）を技術公募するにあたり，実証試験機の仕様決定の妥当性の確認を行うとともに，公募された機器の評価項目及び評価基準について審議する有識者・官・オブザーバーで構成された「マスプロダクツ型排水ポンプワーキンググループ（以下，「ワーキンググループ」という）」を計 3 回開催した。ワーキンググループでは，実証試験機の仕様決定，技術公募の評価基準等の決定，公

募技術審査等の決定について技術的助言をいただいた。これら研究会，ワーキンググループで検討した結果，ポンプ形式については，実証試験を目的とするため試験装置に組み込みやすい形式とすること，また主原動機については，研究会参加者の提案仕様からマスプロダクツ型を基本としエンジン仕様を決定した。なお，主配管へのポリエチレン管等の新素材適用は，コストメリットがないことから今回の実証試験での採用は見送ることとなった。この仕様を基に，令和３年１月「マスプロダクツ型排水ポンプ技術の開発・導入・活用に関するプロジェクト公募実施」において，ポンプとエンジンが技術公募され，技術的優位性（技術開発における課題への着目点とその対応案），経済性（実装化するにあたっての経済性），維持管理性（維持管理の簡素化，効率）を審査し，令和３年３月 10 日にポンプメーカー2 社，自動車エンジンメーカー3 社が選定された。（図-6）

本実証試験にあたり，今回協力企業と協定を締結し，本協定締結にあたり調印式を令和３年４月１９日に開催した。（図-7）

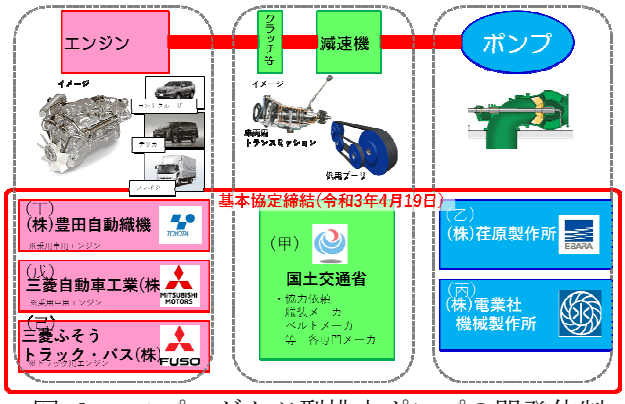



図-6 マスプロダクツ型排水ポンプの開発体制

図-7　調印式

５．PRSIM（マスプロダクツ型排水ポンプの開発の横展開）

河川機械設備のパラダイムシフトの実現に向けて，マスプロダクツ型排水ポンプの開発の横展開を行うために官民研究開発投資拡大プログラム（PRSIM）を活用し検討を行っている。 官民研究開発投資拡大プログラム（PRISM）は，平成 28 年 12 月に総合科学技術・イノベーション会議と経済財政諮問会議が合同で取りまとめた「科学技術イノベーション官民投資拡大イニシアティブ」に基づき，600 兆円経済の実現に向けた最大のエンジンである科学技術イノベーションの創出に向け，官民の研究開発投資の拡大等を目指して，平成 30 年度に創設された制度です。マスプロダクツ型排水ポンプの成果をもとに他施設（例えば，水門，樋門，樋管等）への横展開を図る。（図-8）

令和３年度においては，他施設におけるニーズ主導型異業種連携による更新手法を検討，フィージビリティスタディを実施し，導入可能性を判断する。来年度以降に技術研究会において実証試験の内容を検討し，実証試験参加者の公募を行い，実証試験を実施する予定である。

６．おわりに

本取り組みにおきましては，委員の皆様，現場試行参加者等の皆様にご協力を頂き，感謝申し上げるとともに，マスプロダクツ型の河川機械設備の社会実装に向けて，引き続きご指導の程，よろしくお願いいたします。

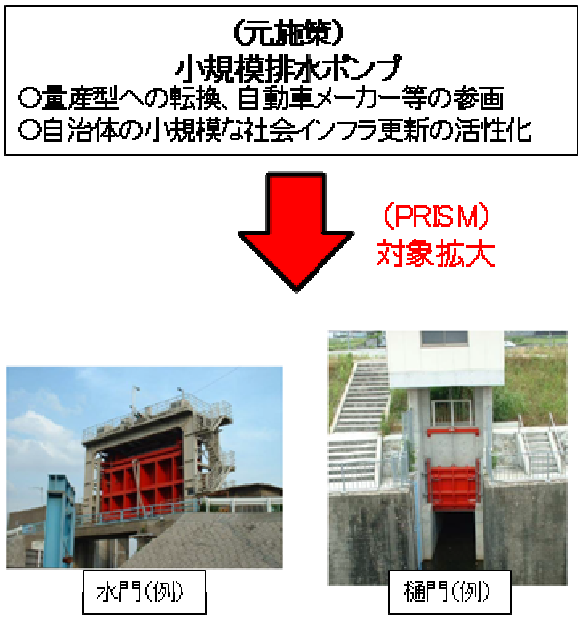



図-8　横展開のイメージ

# 28. 誘導電動機電流徴候解析による
# 救急排水機場ポンプの状態監視手法について

(国研)土木研究所寒地土木研究所　○ 小林　勇一
(国研)土木研究所寒地土木研究所　　永長　哲也

## 1．はじめに

国や自治体などが管理する河川には，大雨や融雪などの出水による内水被害を軽減するため，河川ポンプ施設や水門などの河川管理施設が設置されている。近年の大雨や集中豪雨の頻発により[1)]，これらの施設の重要性は非常に高まっているが，高度経済成長期以降の 1970 年から 1990 年頃にかけて集中的に設置されたことから，老朽化の急激な進行が課題となっている[2)]。浸水被害を軽減し地域の安全を守るためには，これらの設備が非常時に確実に機能するよう，故障を未然に防ぐための対策が必要である。

救急排水機場は，河川ポンプ施設の一つであり，可搬式のコラム形着脱式縦軸斜流水中モータポンプ[3)]（以下，「コラム形水中ポンプ」という。）により，支川の水を本川へ排水することで，支川（堤内）の水位上昇を軽減する施設である（**写真-1**）。

コラム形水中ポンプは，非常時に確実に稼働させるため，異常や故障の兆候を的確に把握し，適切な整備や更新を行う必要がある。しかし，定置式のパイプ（以下，「コラムパイプ」という。）の内部に設置するため，直接目視や触診ができず，稼働中の異音や変調などの確認が困難である（**図-1**）。そのため，コラム形水中ポンプの稼働状態を的確に把握できる状態監視技術が求められている。

電動機や減速機などの回転機械に使用されている状態監視技術としては，振動診断，潤滑油診断，AE 診断，サーモグラフィーなどがある[4)]。しかし，これらの技術を適用するためには，ポンプ本体へのセンサーの設置や，クレーン車等によるコラムパイプからの引き上げなどが必要となり，容易ではない。

一方，誘導電動機電流徴候解析（Motor Current Signature Analysis；以下，「MCSA」という。）は，使用する電流センサーがクランプ式であり，コラム形水中ポンプの動力配線への取り付けが非常に容易である（**図-2**）。また，ポンプを引き上げる必要もないため，適用しやすい技術である。

そこで，コラム形水中ポンプの稼働状態を的確に判断できる技術の提案を目的として，MCSA による計測試験を実施し，適用性を検証した。

写真-1　救急排水機場外観（北海道滝川市）

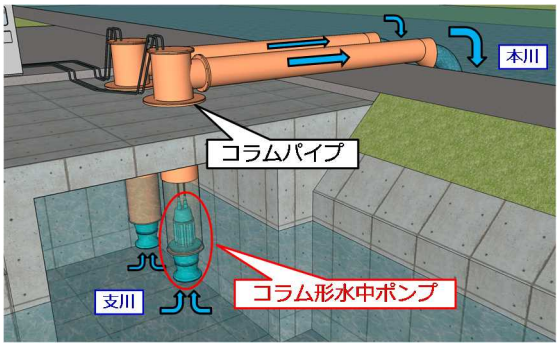



図-1　コラム形水中ポンプ設置概要図

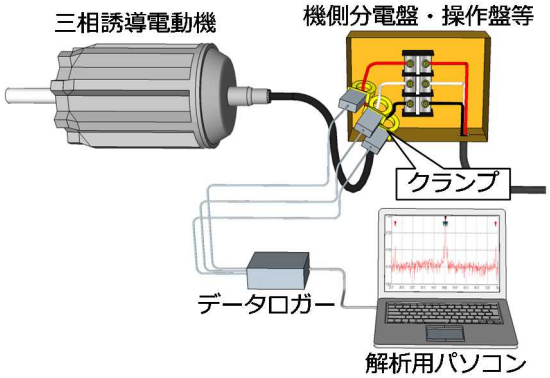



図-2　MCSA による計測方法

## ２．MCSA による状態監視手法

MCSA とは，三相誘導電動機に発生する逆起電力を解析することで，機械の異常を検出する技術である [5]。逆起電力の解析は，電流波形を周波数分析することにより行う。

三相誘導電動機の模式図を**図-3** に示す。固定子に三相交流電流が流れると，位相差により回転磁界が発生し，回転子バーに電流が誘起され，回転子が回転する。そのため，回転子軸の回転速度は回転磁界よりやや遅くなる。この差をすべり周波数という。

また，回転子バーが回転磁界を通過すると，発電機と同じ原理（フレミングの右手の法則）で固定子に電流が誘起される。これを逆起電力という。

仮に，回転子バーの 1 本が損傷した場合，その回転子バーには電流が誘起されにくくなり，固定子への電流誘起に影響を及ぼす。この影響を受ける周波数は，回転子バーが磁極を通過する周波数であり，すべり周波数と電動機極数の積となる。この場合の電流波形を周波数分析すると，**図-4** に示すとおり，電源周波数の両端に側帯波 $L_{pole}$ が現れる [5)6)]。

また，回転子軸に異常な負荷が生じた場合，電源周波数の両端に側帯波 $L_{shaft}$ が現れる [7)]。$L_{shaft}$ は，回転子軸につながる被駆動装置の異常に起因した異常負荷にも影響を受けるため，軸受やインペラなどの異常を検知できる可能性がある。

以上より，側帯波 $L_{pole}$ 及び $L_{shaft}$ の大きさを監視することで，状態監視を行うことができる。

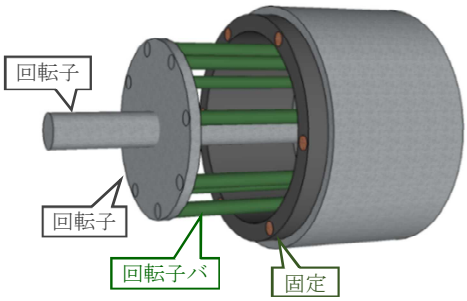



図-3　三相誘導電動機（かご形）模式図

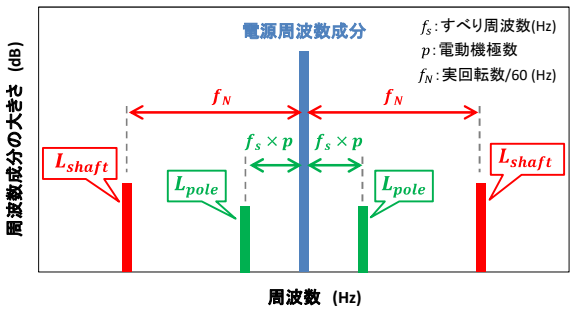



図-4　電流波形の周波数分析結果　模式図

## ３．計測試験

計測試験は，モーターキット，救急排水機場，ポンプメーカー工場での計測試験，及び小型水中ポンプによる異常模擬試験を実施した。

### 3.1　モーターキットによる計測試験

実験用のモーターキットを製作し，計測試験を実施した（**写真-2**）。

試験条件は，フライホイールにボルトを取り付けない状態，ボルトを 1 本及び 2 本取り付けた状態の 3 条件とした（**図-5**）。

ボルトを取り付けない状態で計測した電流波形を周波数分析し，側帯波を解析したものを**図-6** に示す。側帯波 $L_{pole}$ 及び $L_{shaft}$ はそれぞれ緑及び赤色で着色している。ボルトを取り付けない状態においても，側帯波は検出されることがわかった。

各条件の側帯波の大きさを**図-7** に示す。$L_{pole}$ に大きな変動は見られないが，$L_{shaft}$ はボルトを取り付けることで上昇した。これは，ボルトによりフライホイールが偏芯し，振れ回りが生じ回転子軸へ異常な負荷が発生するためと考えられる。

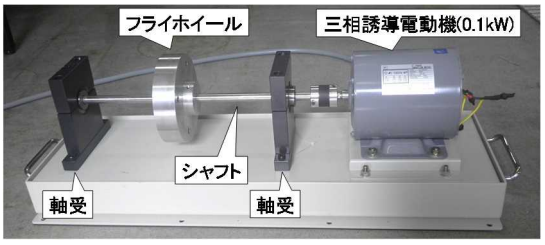



写真-2　実験用モーターキット

図-5　フライホイールへのボルト取り付け状況

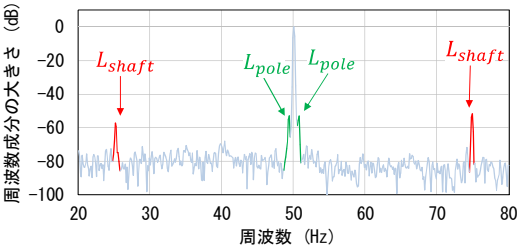



図-6　側帯波の解析結果（ボルト無し）

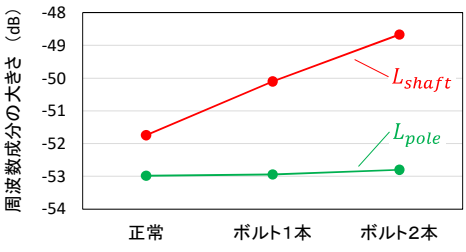



図-7　側帯波の大きさ

### 3.2　救急排水機場における現地計測試験

国土交通省北海道開発局が管理する救急排水機場において，定期点検時に行われる試運転にあわせ，現地計測試験を実施した。

試験の概要を**表-1** に示す。試験は 5 機場で計 6 台のコラム形水中ポンプについて実施した。コラム形水中ポンプの仕様は全て「救急排水ポンプ設備技術指針」[3]に規定されている「高揚程型」であり，製作メーカーに違いはあるが，口径，吐出量，全揚程等の仕様は同一である。試運転は 1 台ごとの単独運転で行われ，ポンプ吸水槽の水位が低かった救急排水機場 B，C 及び D では，吐出弁開度を 5～15%に絞り実施された。

表-1　現地計測試験の概要

| 救急排水ポンプ設備 | | | | 試験条件 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 機場名称 | 電源 | ｺﾗﾑ形水中ﾎﾟﾝﾌﾟ 仕様 | 設置数 | 計測台数 | ﾎﾟﾝﾌﾟ呼称 | 吐出弁開度 |
| A | ﾃﾞｨｰｾﾞﾙ式発動発電機 3 相交流 400V 50Hz | 高揚程型 口径：700mm 吐出量：1m³/s 全揚程：9m 定格回転数：980rpm | 5 台 | 1 台 | A1 | 50% |
| B | | | 7 台 | 1 台 | B1 | 10% |
| C | | | 1 台 | 1 台 | C1 | 5% |
| D | | | 3 台 | 1 台 | D1 | 15% |
| E | | | 5 台 | 2 台 | E1 | 100% |
| | | | | | E2 | 100% |

計測に使用した機器は，株式会社高田工業所製の電流情報量診断システム T-MCMA である。計測設定は，サンプリング周波数を 16,384Hz，サンプリングデータ数を 131,072，1 回あたりの計測時間は 8 秒，計測間隔を 1 分とし，計測回数は試運転の状況にあわせ 5～10 回とした。

計測した電流波形を周波数分析し，側帯波を解析した結果を**図-8** に示す。側帯波 $L_{pole}$ 及び $L_{shaft}$ はそれぞれ緑及び赤色で着色している。なお，グラフはアベレージングによりノイズを除去したものである。

まず，$L_{pole}$ は，視認に注意を要したが，すべての計測結果で側帯波が認められた。

次に，$L_{shaft}$ は，A1，E1 及び E2 では卓越した側帯波が現れたが，その一方で，B1，C1 及び D1 では卓越した側帯波は認められなかった。これらの救急排水機場では，吐出弁開度を絞って試運転を実施したことから，吐出弁による吐出量の調整が周波数分析結果に影響を及ぼす可能性があることがわかった。

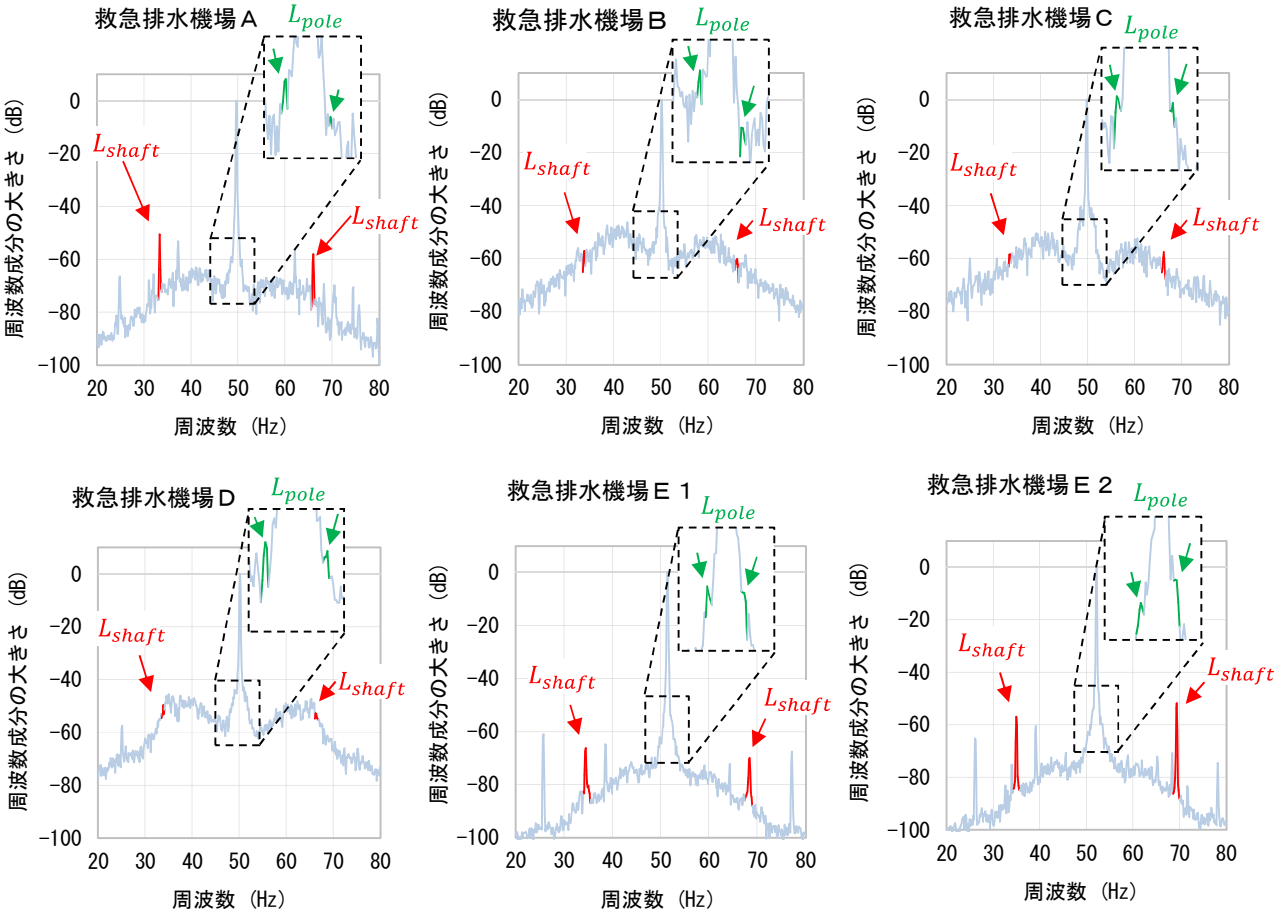



図-8　側帯波解析結果（救急排水機場）

### 3.3　ポンプメーカー工場における現地計測試験

ポンプメーカー工場で行われた性能試験にあわせ，計測試験を実施した。

試験条件を**表-2** に示す。電源は商用電源，コラム形水中ポンプの規格は高揚程型である。計測条件は，計画吐出量 1m3/s（60 m3/min）を基準とし，吐出量割合 30%，60%，100%及び 120%の 4 条件とした。吐出量及び全揚程は，性能試験による測定結果である。

表-2　試験条件（ポンプメーカー工場）

| 電源 | コラム形水中ポンプ規格 | 吐出量割合 | 吐出量 ($m^3$/min) | 全揚程 (m) | 吐出弁開度 ※参考 |
|---|---|---|---|---|---|
| 商用電源 3 相交流 400V 50Hz | 高揚程型 | 30% | 18.73 | 14.641 | 16% |
| | | 60% | 37.71 | 12.772 | 27% |
| | | 100% | 60.24 | 9.139 | 45% |
| | | 120% | 72.99 | 4.335 | 56% |

周波数分析結果より側帯波を解析した結果を**図-9** に示す。アベレージングによりノイズを除去したものである。

まず，$L_{pole}$ は，すべての条件で卓越した周波数成分が現れており，吐出量を調整した影響は確認できなかった。また，前項の救急排水機場に比べ明瞭に現れており，これは，発動発電機に比べて商用電源の電源周波数が安定していたことが，要因の一つとして考えられる。

次に，$L_{shaft}$ は，吐出量割合 30%ではほぼ現れないが，吐出量割合 60%では小さく現れ，吐出量割合 100%及び 120%では，大きく卓越した側帯波が現れた。吐出弁により吐出量を絞るほど，管内の水圧が上昇することから，この水圧がインペラに作用し，正常な回転を妨げ，実回転数が細かく変動した可能性がある。

このことから，吐出弁を開放した状態では，側帯波の検出が可能となり，MCSA による状態監視を適用できる可能性が高いことがわかった。

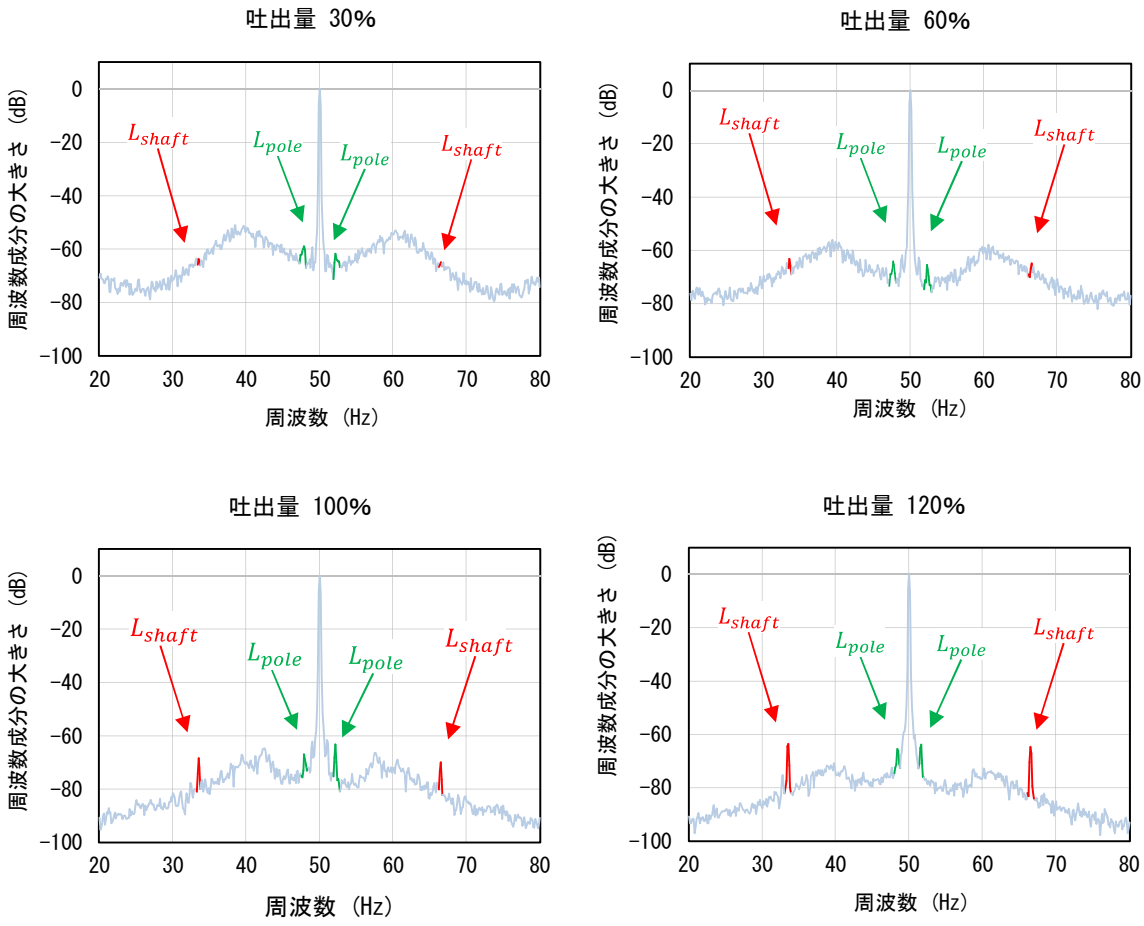



図-9　側帯波解析結果（ポンプメーカー工場）

### 3.4. 小型水中ポンプによる異常模擬試験

ポンプの異常が解析結果に及ぼす影響を確認するため，小型水中ポンプによる異常模擬試験を実施した。

(1) 試験の概要

試験状況を**写真-3** に示す。試験は実験用水槽で実施し，使用したポンプはステンレス製水中渦巻きポンプ（出力 0.4kW）である。配管は延長 7.0m とし，吐出量を確認するため流量計を取り付けた。

計測条件を**表-3** に示す。今回の試験では，インペラの損傷による吐出量の低下を想定し，損傷を加えたインペラによる計測試験を実施した。損傷の種類は切損と圧潰の 2 種類とし，損傷の程度はそれぞれ 3 段階とした（**図-10**）。また，流量計により吐出量を計測し，損傷の種類ごとに，損傷の程度に伴う吐出量の変化を確認した。

ポンプはインペラ交換後に 60 分間運転し，最終 10 分間（50～60 分）の電流波形を解析した。

(2) 解析結果

各条件の側帯波の大きさを**図-11** に示す。左はインペラを切損した場合，右は圧壊した場合のもので，10 分間の最大値である。

解析の結果，インペラを切損した場合には $L_{shaft}$ が上昇したが，圧潰した場合は $L_{pole}$，$L_{shaft}$ 共にほぼ変化は見られなかった。

次に，電流の RMS 値（以下，「電流値」という。）及びポンプの実回転数について確認した。ここで，実回転数は，ポンプ主軸がケーシングで覆われており実測が困難であるため，$L_{pole}$ が検出された周波数からの逆算により求めた。

電流値は，インペラを切損した場合は上昇し，圧潰した場合はやや低下した。また，実回転数は，インペラを切損した場合は低下し，圧潰した場合はやや上昇した。

(3) 解析結果の考察

インペラを切損した場合，電流値が上昇したことから，ポンプ電動機の負荷は上昇したとみられるが，吐出量は低下しており，ポンプ効率は低下したと考えられる。電動機の負荷の上昇は，インペラ切断面へかかる水圧や，アンバランスによる振れ回りなどが要因と考えられ，この振れ回りにより $L_{shaft}$ が上昇したと考えられる。また，吐出量の低下は，羽根車の欠損のほか，ポンプ回転数の低下も要因になっていると考えられる。

一方，圧潰の場合，電流値が低下したことから，ポンプ電動機の負荷が低下したとみられる。これは，インペラの吐出口が潰れ正常に吐出できなくなったことで，吐出量が低下し，ポンプ効率が低下したためと考えられる。また，実回転数は微増していることから，インペラはほぼ正常に回転しており，アンバランス等による異常負荷はほぼ発生していないと考えられる。

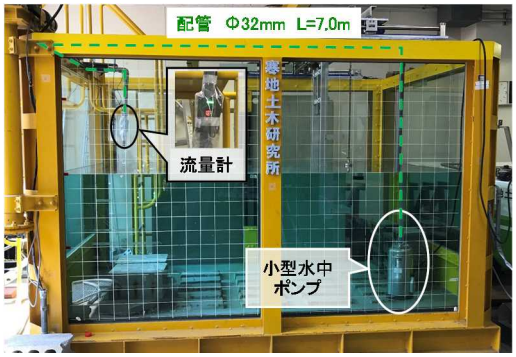



写真-3　異常模擬試験状況

表-3　試験条件（異常模擬試験）

| 電源 | 小型水中ポンプ規格 | 損傷の種類 | 損傷の程度 | 吐出量 (L/min) |
|---|---|---|---|---|
| 商用電源 3 相交流 200V 50Hz | ステンレス製水中渦巻きポンプ 0.4kW 200V 3.2A 2P 口径 32mm | 正常 | — | 183 |
| | | 切損 | 1/6 | 157 |
| | | | 2/6 | 138 |
| | | | 3/6 | 125 |
| | | 圧潰 | 1/5 | 168 |
| | | | 2/5 | 160 |
| | | | 3/5 | 145 |

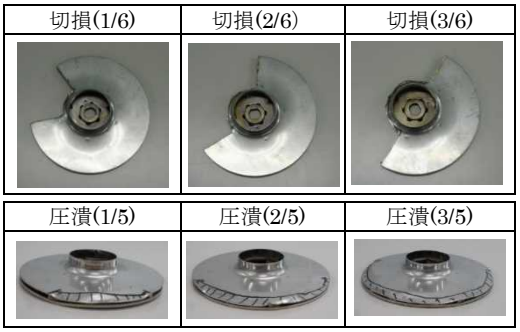



図-10　インペラの損傷状況

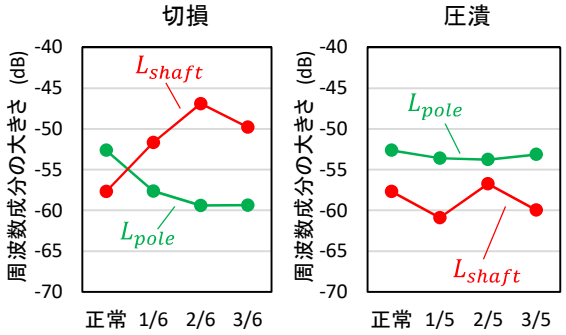



図-11　側帯波の大きさ（左：切損，右：圧潰）

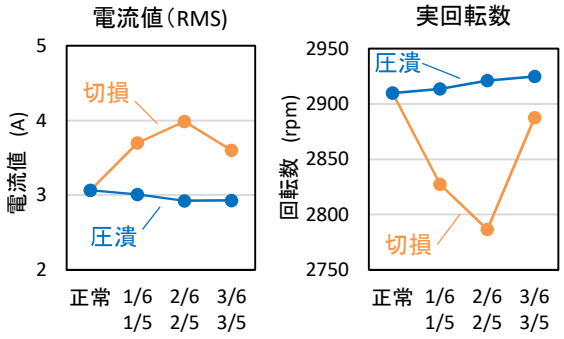



図-12　電流値(RMS)及び実回転数

(4) 決定木による解析

状態監視を行うにあたり，側帯波 $L_{pole}$，$L_{shaft}$ の大きさ，電流値及びポンプの実回転数から，インペラの状態を判別する手法を検討するため，「決定木（Decision Tree）」による解析を試行した。

「決定木」とは機械学習の手法の一つであり，解析結果を図表化することで，学習結果の分析を行うことが可能である。

機械学習の方法は教師あり学習とし，教師データは，異常模擬試験で取得した 70 データ（正常 10 データ，圧潰 30 データ及び切損 30 データ）とした。

決定木による教師データの解析結果を**図-13** に示す。出力結果から，今回の試験データは，電流値，実回転数及び $L_{shaft}$ により順次分類することで，インペラの状態ごとに分類できることがわかった。

## 4．まとめ

コラム形水中ポンプの稼働状態を的確に把握できる技術を提案するため，MCSA による計測試験を実施した。得られた知見を以下に示す。

1）救急排水機場及びポンプメーカー工場での計測試験の結果，吐出弁を開放した状態で電流波形を計測することで，側帯波の検出が可能となり，MCSA による状態監視を適用できる可能性が高いことがわかった。

2）小型水中ポンプによる異常模擬試験の結果，インペラに損傷を加えた場合，側帯波 $L_{pole}$，$L_{shaft}$ の大きさのほか，電流値及びポンプの実回転数に影響が現れることがわかった。また，「決定木」による解析を試行し，インペラの状態を判別できることがわかった。

今後は，コラム形水中ポンプの実機による異常模擬試験を実施し，ポンプ異常時のデータについて検証するほか，機械学習による解析手法について，他手法との比較などの精査を行い，より精度の高い診断手法について検討する予定である。

謝辞：MCSA に関してご協力いただいた株式会社高田工業所　劉信芳氏，山本英明氏，救急排水機場における現地計測試験にご協力いただいた国土交通省北海道開発局，工場における計測試験にご協力いただいた株式会社電業社機械製作所，及び小型水中ポンプ試験にご協力いただいた株式会社荏原製作所に感謝する。

## 参考文献

1) 気象庁：気象変動レポート2019，p39，2020.
2) 国土交通省ホームページインフラメンテナンス情報：https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01.html
3) 一般社団法人河川ポンプ施設技術協会：救急排水ポンプ設備技術指針・解説，pp.7-8，1994.
4) 振動技術研究会：ISO基準に基づく機械設備の状態監視と診断（振動　カテゴリーⅢ），p6，p287（2010）
5) 豊田利夫：電流徴候解析MCSAによる電動機駆動回転機の診断技術，高田技報，Vol.20，pp.3-5, 2010
6) 豊田利夫：電機設備診断の進め方，日本プラントメンテナンス協会，pp.130-145, 1993.12
7) 劉信芳：誘導電動機の電流信号による回転機械系の監視診断，第15回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集，pp.72-75, 2016.12

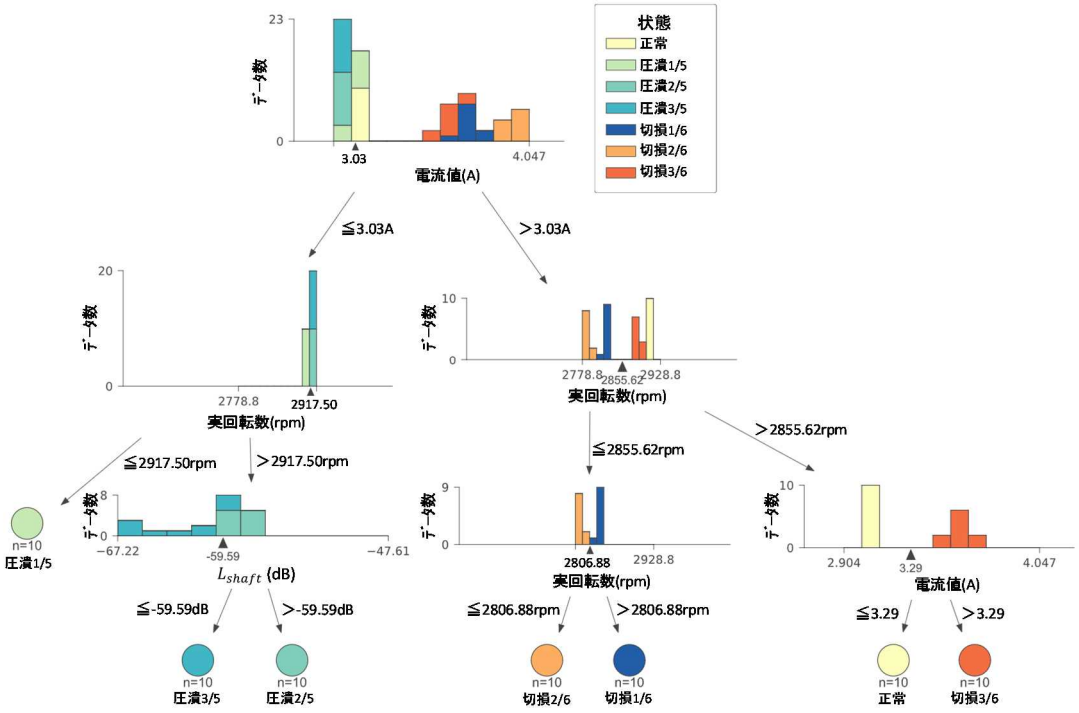



図-13　決定木による教師データの解析結果

# 29. 排水機場の状態監視モニタリングシステム構築と異常データ検知AI手法に関する研究(第2報)

国土交通省　黒田　浩章
(国研)土木研究所　上野　仁士
株式会社ニュージェック　○長谷　東子

## １．はじめに

本論文では，排水機場の状態監視モニタリングシステムの蓄積データを活用した異常データ検知AI手法に関する研究[1)]について，続報としての観点で，その進捗について述べる。

ここで，モニタリングシステムとはテストベットとなる表-1に示す排水機場機械設備の状態監視のために原動機他に加速度計等のセンサを装着し，AIに入力することで常時監視できるようにしたものである。

表-1　対象ポンプ設備概要

| 機場名 | T機場 | S機場 | R機場 | Y機場 |
|---|---|---|---|---|
| 対象号機 | 2,3号機 | 1,2号機 | 1,2号機 | 1,2号機 |
| 口径 | 1,500mm | 2,000mm | 1,500mm | 1,350mm |
| 全揚程 | 3.3m | 5.3m | 5.4m | 6.3m |
| 排水量 | 5m$^3$/s台 | 10m$^3$/s台 | 5m$^3$/s台 | 5m$^3$/s台 |
| 原動機形式 | ディーゼル | ディーゼル | ディーゼル | ｶﾞｽﾀｰﾋﾞﾝ |
| 定格出力 | 320PS/台 | 1,100PS/台 | 518PS/台 | 302PS/台 |
| ポンプ形式 | 横軸斜流 | 立軸斜流 | 立軸斜流 | 立軸軸流 |
| ポンプ新設 | S60,61年度 | S55,63年度 | H22年度 | H16年度 |

## ２．教師データについて

### 2.1　目的

国土交通省各地方整備局等が管理する排水機場のように通常は稼働していない，「非」常用設備を対象とした異常データ検知AI手法について，AI処理する前のデータ長の設定などのパラメータ設定に関する知見が確立されておらず，これらの設定値によっては異常検知AI性能評価に大きく影響するものと考えられた。

また，国土交通省の排水機場は適切な維持管理がなされているため，排水等運転時も適切な教師(異常兆候)データが得られないのが課題である。従って，異常データ検知AI手法に関するパラメータ設定値について，必要な知見を得ることを目的とした。

### 2.2　パラメータ検討

パラメータ検討に当たり，モニタリングシステム設置機場ではないが，意図的に異常を発生させることが可能であった排水機場のディーゼル機関を対象に振動加速度等を計測した。計測値に対して，以下の通りパラメータの検証を行い，異常データ検知AI支援ツールの最適な設定を検討した。

①　前処理FFT(基本データ長)

疑似異常値または，異常によって検出される対象周波数帯を設定する必要があった。前処理FFTでは，対象周波数帯の逆数(秒)を設定する。

データ量を考えると，より小さな領域を対象とする方が良いため，疑似異常の周波数に応じた検討を行う必要があるが，本研究では1秒を基本長さ(秒)として設定した。

②重複

基本データにおいて正常データと疑似異常データを組み合わせた教師データでの時間領域での重なりを重複としている。本検討では，正常データと疑似異常入力データを結合させた結果を出力する。連続データを対象とした場合は，重複領域を0.5や0.9と設定しても，前後の因果律が守られるため，結果への影響はない。本研究のように，評価の際にデータの切り出しを行う際には，結合の際に因果律が守られず，ノイズが混入するため，重複を考慮しない(重複領域0)ものとして検討を行う必要がある。重複領域を増やすメリットとしては，少ない観測時間でデータ量を増やすことができるという点であるが，本研究のように膨大な観測データを対象とする際は，重複領域を0としても問題はないと考えた。

③Pooling

特徴的な情報の抽出をPoolingとしているが，Poolingによって情報(特徴)を際立たせている一方で，有用な情報をカットしている可能性がある。そのため，1Hz若しくは10Hzでの検討を行った。

### 2.3　パラメータ検討の結果・考察

K排水機場の振動データをもとにパラメータに関する検討を行い，異常データ検知AI支援ツールの性能評価に対する影響を把握した。既往検討で判定精度の高かったLOF,MT,OCSVMに加えて，

文献調査で高い判定精度が期待されるKDE[3]の4方式で検証し，パラメータ検討の一覧表を表-2に，パラメータ検討の判定精度一覧表を表-3に，考察を以下に示す。

① 加速度1(異常気筒側端部)のX, Y方向のF値は，一部を除き1.0に近い数値を示した。

② 加速度1のZ方向，ならびに加速度2(正常気筒側端部)の判定精度(F値)は低い数値となった。加速度2は正常気筒側であるため，異常振動を正確に捉えられなかった可能性が考えられる。

③ 前処理FFTにおける重複に関して，Case01とCase02, Case04とCase05で比較を行った。重複を0としたCase02, Case05において，全体的にF値が上昇した。重複を0とすることにより，異常値(外れ値)となるスコアを正常値領域の最大値または最小値として設定することができたためであると考えられる。

④ 抽出する学習データ(学習データ量)に関して，Case02とCase03, Case05とCase06で比較を行った。一般的に機械学習をするうえで，学習データ量は多い方がF値は向上するが，本検討においても全体的にF値は向上し，KDE法に関しては顕著であった。ただ，5分データに関して，10分と比較して大きく精度が下がっているわけではないため，データ量が膨大となった際には，変化パラメータとして考慮してもいいと示唆される。

⑤ Poolingに関して，Case01とCase04, Case 02とCase05, Case03とCase06で比較を行った。Poolingを行ったCase01, Case02, Case03のケースにおいて，F値が向上した。Poolingが1Hzのケースでは，比較対象の微小な変化に敏感に反応したためであると考えられる。ただし，Poolingを増加させる際は，比較対象の変化に鈍感になるため，注意が必要である。

**表-2　パラメータ検討の一覧表(K 排水機場)**

| | 前処理FFT | | 対象周波数帯 | | 学習データ | | pooling | データ群 | 次元数 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 秒 | 重複 | Hz | Hz | 秒 | 分 | Hz | 個 | 1データ |
| Case01 | 1 | 0.5 | 0 | 600 | 30 | 5 | 10 | 299 | 60 |
| Case02 | 1 | 0 | 0 | 600 | 60 | 5 | 10 | 300 | 60 |
| Case03 | 1 | 0 | 0 | 600 | 60 | 10 | 10 | 600 | 60 |
| Case04 | 1 | 0.5 | 0 | 600 | 30 | 5 | 1 | 299 | 600 |
| Case05 | 1 | 0 | 0 | 600 | 60 | 5 | 1 | 300 | 600 |
| Case06 | 1 | 0 | 0 | 600 | 60 | 10 | 1 | 600 | 600 |

**表-3　パラメータ検討の判定精度一覧表(K 排水機場)Case03(F 値)**

| F値 | | エンジン据付部 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 応答種別の組合せ | 手法 | 加速度1（異常気筒側端部） | | | 加速度2（正常気筒側端部） | | |
| | | X方向 | Y方向 | Z方向 | X方向 | Y方向 | Z方向 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 02 バルブクリアランス異常(軽微) | KDE | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 03 バルブクリアランス異常(重度) | KDE | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.000 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 04 燃料噴射ポンプ異常 | KDE | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 05 燃料噴射ノズル異常(軽微) | KDE | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 06 燃料噴射ノズル異常(重度) | KDE | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 07 過給機異常(重度) | KDE | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 08 過給機異常(軽度) | KDE | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 09 負荷正常運転 | KDE | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 10 無負荷正常運転(終了) | KDE | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 02 バルブクリアランス異常(軽微) | LOF | 1.000 | 1.000 | 0.156 | 0.217 | 1.000 | 0.606 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 03 バルブクリアランス異常(重度) | LOF | 1.000 | 1.000 | 0.626 | 0.113 | 1.000 | 0.000 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 04 燃料噴射ポンプ異常 | LOF | 1.000 | 1.000 | 0.480 | 0.402 | 1.000 | 0.326 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 05 燃料噴射ノズル異常(軽微) | LOF | 1.000 | 1.000 | 0.098 | 0.083 | 0.990 | 0.793 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 06 燃料噴射ノズル異常(重度) | LOF | 1.000 | 1.000 | 0.068 | 0.125 | 0.977 | 0.836 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 07 過給機異常(重度) | LOF | 1.000 | 1.000 | 0.119 | 0.988 | 0.256 | 0.280 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 08 過給機異常(軽度) | LOF | 1.000 | 1.000 | 0.328 | 0.746 | 0.345 | 0.933 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 09 負荷正常運転 | LOF | 1.000 | 1.000 | 0.275 | 0.520 | 0.370 | 0.933 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 10 無負荷正常運転(終了) | LOF | 1.000 | 1.000 | 0.203 | 0.003 | 0.240 | 0.999 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 02 バルブクリアランス異常(軽微) | MT | 1.000 | 1.000 | 0.593 | 0.650 | 1.000 | 0.333 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 03 バルブクリアランス異常(重度) | MT | 1.000 | 1.000 | 0.923 | 0.531 | 1.000 | 0.010 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 04 燃料噴射ポンプ異常 | MT | 1.000 | 1.000 | 0.774 | 0.807 | 1.000 | 0.402 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 05 燃料噴射ノズル異常(軽微) | MT | 1.000 | 1.000 | 0.452 | 0.551 | 0.997 | 0.303 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 06 燃料噴射ノズル異常(重度) | MT | 1.000 | 1.000 | 0.440 | 0.565 | 0.992 | 0.358 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 07 過給機異常(重度) | MT | 1.000 | 1.000 | 0.370 | 1.000 | 0.492 | 0.128 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 08 過給機異常(軽度) | MT | 1.000 | 1.000 | 0.703 | 0.917 | 0.583 | 0.460 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 09 負荷正常運転 | MT | 1.000 | 1.000 | 0.687 | 0.785 | 0.664 | 0.402 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 10 無負荷正常運転(終了) | MT | 1.000 | 1.000 | 0.670 | 0.145 | 0.408 | 0.950 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 02 バルブクリアランス異常(軽微) | OCSVM | 1.000 | 1.000 | 0.979 | 0.846 | 1.000 | 1.000 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 03 バルブクリアランス異常(重度) | OCSVM | 1.000 | 1.000 | 0.997 | 0.741 | 1.000 | 0.000 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 04 燃料噴射ポンプ異常 | OCSVM | 1.000 | 1.000 | 0.977 | 0.861 | 1.000 | 0.994 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 05 燃料噴射ノズル異常(軽微) | OCSVM | 1.000 | 1.000 | 0.863 | 0.834 | 1.000 | 1.000 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 06 燃料噴射ノズル異常(重度) | OCSVM | 1.000 | 1.000 | 0.861 | 0.832 | 0.998 | 1.000 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 07 過給機異常(重度) | OCSVM | 1.000 | 1.000 | 0.999 | 1.000 | 0.983 | 0.997 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 08 過給機異常(軽度) | OCSVM | 1.000 | 1.000 | 0.988 | 0.992 | 0.966 | 1.000 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 09 負荷正常運転 | OCSVM | 1.000 | 1.000 | 0.982 | 0.986 | 0.946 | 1.000 |
| 01 無負荷正常運転(開始) - 10 無負荷正常運転(終了) | OCSVM | 1.000 | 1.000 | 0.975 | 0.396 | 0.898 | 1.000 |

### 2.4　パラメータの設定値

パラメータに関する考察とパラメータ検討の結果より, K排水機場のCASE3のパラメータ値を基本とした以下の設定が妥当であると考えられた。

・前処理FFT　：1秒, 重複なし
・対象周波数帯　：加速度0～600Hz
・学習データ　：60秒間1セットとした, 10分間連続データ(計測開始1分除く)
・Pooling　：10Hz

## ３．AI 異常検知支援ツールの構築と検証

### 3.1　対象データ及び性能評価条件

T 排水機場, S 排水機場, R 排水機場, Y 排水機場の 4 機場について, 本研究で設定した前述の「教師データについて」の結果にもとづき, 異常検知 AI 支援ツールを適用することで性能評価を行った。ここでは, R 排水機場(1 号機)教師データ及び評価データの対象期間を以下に示し, 異常検知 AI 支援ツールの性能評価(パラメータ一覧表)を表-４に示す。

①教師データ：2020 年 6 月 13 日 14 時 53 分 01 秒 (排水運転)
②評価データ：2020 年 6 月 13 日 21 時 08 分 06 秒 (排水運転)

### 3.2　疑似異常データ

「河川ポンプ設備状態監視ガイドライン(案)」[2)]では, 管理基準値として「注意値」「予防保全値」を設定し, 計測データの変化傾向とトレンドグラフに示した管理基準値の比較を行うこととしている。また, 管理基準値は, 正常値の2.5倍を注意値, 6.3倍を予防保全値とし, 相対値管理基準値設定のための正常値は, 計測データの蓄積状況により「設置時の計測データ又は稼働初期段階における計測データの平均値」又は, 「正常と思われる一定期間の計測データの平均値」の値を採用するが, 正常値及び正常範囲の設定は, 計測対象機器についての知見を有する専門技術者が実施することとなっている。

以上より, 疑似異常データは, 各機場の評価対象データに対して基本統計量を求め, 標準偏差σの2倍(2σ)を平均振幅値aとして設定し, 「河川ポンプ設備状態監視ガイドライン(案) 」にもとづいて平均振幅値aの2.5倍(5.0σ)を異常データとして入力した。

表-4　異常検知 AI 支援ツールの性能評価（パラメーター覧）

| CSV電圧値時系列データ | ⊿f(Hz) | N(個) | L(sec) | 疑似異常値 | | | 前処理FFT | | 対象周波数帯 | | 学習データ | | Pooling | データ群 | 次元数 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Hz | 1号機m/s2 | 統計量(平均/標準偏差) | 秒 | 重複 | Hz | Hz | 秒 | set | Hz | 個 | 1データ |
| ポンプ本体加速度振動（X，Y，Z） | 1,280 | 76,800 | 60 | 72 | 33(X)<br>35(Y)<br>8.5(Z) | 6.6(X)<br>7.1(Y)<br>1.7(Z) | 1 | 0 | 0 | 600 | 60 | 10 | 10 | 600 | 60 |
| 原動機本体加速度振動（X，Y，Z） | 2,560 | 153,600 | 60 | 300 | 185(X)<br>225(Y)<br>110(Z) | 37(X)<br>45(Y)<br>22(Z) | 1 | 0 | 0 | 600 | 60 | 10 | 10 | 600 | 60 |
| 原動機（燃焼）各気筒温度 | 1 | 60 | 60 | － | － | 56(1)<br>51(2)<br>58(3)<br>58(4)<br>56(5)<br>52(6) | － | － | － | － | 60 | 5 | 1 | 300 | 6 |

### 3.3　性能評価

R排水機場(1号機)の計測値について, 試行検証した異常検知AI支援ツールの結果(外れ値)に対し, ROC値, F値, 正答率(異常率＋正常率), 異常率, 正常率による性能評価を行った。性能評価の結果を表-５に示す。

### 3.4　性能評価のまとめ

R 排水機場を含めた 4 機場について, 本研究で設定した「教師データについて」の結果にもとづき, 異常検知 AI 支援ツールを適用することで性能評価を行った結果, 次のことが明らかとなった。

① 過年度から適用している異常検知 AI 支援ツールのアルゴリズム(OCSVM, LOF, MT)と, 新規開発したアルゴリズム(KDE)の異常検知性能は, いずれの排水機場においても高い異常検知判定精度を示し, 期待された結果となった。
② LOF を除いて, OCSVM, MT, KDE の各アルゴリズムの判定精度は概ね同等で高いことが分かった。
③ 上記の結果より, 排水機場における異常検知 AI 支援ツールの標準型のアルゴリズムとしては, MT 法が適していると考えらえる。また, MT 法は, 正常データが多変量正規分布に従うと仮定し, 多変量正規分布の平均と共分散行列をもとめ, 外れ値は異常データから求めた多変量分布に対する尤度として定義されるといった理論的な背景も明らかである。

表-5　性能評価（各アルゴリズム）

| 検討番号 | | AI手法 | ROC値 | F値 | 正答率 | 異常率 | 正常率 | AI手法 | ROC値 | F値 | 正答率 | 異常率 | 正常率 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RB1_1 | 蓮花川_1号機_ポンプ本体加速度振動X | KDE | 1.000 | 1.000 | 100 | 100 | 100 | MT | 1.000 | 1.000 | 100 | 100 | 100 |
| RB1_1 | 蓮花川_1号機_ポンプ本体加速度振動Y | KDE | 1.000 | 1.000 | 100 | 100 | 100 | MT | 1.000 | 1.000 | 100 | 100 | 100 |
| RB1_1 | 蓮花川_1号機_ポンプ本体加速度振動Z | KDE | 1.000 | 1.000 | 100 | 100 | 100 | MT | 1.000 | 1.000 | 100 | 100 | 100 |
| RB1_2 | 蓮花川_1号機_原動機本体加速度振動X | KDE | 1.000 | 1.000 | 100 | 100 | 100 | MT | 1.000 | 1.000 | 100 | 100 | 100 |
| RB1_2 | 蓮花川_1号機_原動機本体加速度振動Y | KDE | 1.000 | 1.000 | 100 | 100 | 100 | MT | 1.000 | 1.000 | 100 | 100 | 100 |
| RB1_2 | 蓮花川_1号機_原動機本体加速度振動Z | KDE | 1.000 | 1.000 | 100 | 100 | 100 | MT | 1.000 | 1.000 | 100 | 100 | 100 |
| RB1_3 | 蓮花川_1号機_各気筒温度_5% | KDE | 0.999 | 0.834 | 86 | 72 | 100 | MT | 0.997 | 0.000 | 50 | 0 | 100 |
| RB1_1 | 蓮花川_1号機_ポンプ本体加速度振動X | LOF | 1.000 | 1.000 | 100 | 100 | 100 | OCSVM | 1.000 | 1.000 | 100 | 100 | 100 |
| RB1_1 | 蓮花川_1号機_ポンプ本体加速度振動Y | LOF | 1.000 | 0.999 | 100 | 100 | 100 | OCSVM | 1.000 | 1.000 | 100 | 100 | 100 |
| RB1_1 | 蓮花川_1号機_ポンプ本体加速度振動Z | LOF | 1.000 | 0.999 | 100 | 100 | 100 | OCSVM | 1.000 | 1.000 | 100 | 100 | 100 |
| RB1_2 | 蓮花川_1号機_原動機本体加速度振動X | LOF | 1.000 | 1.000 | 100 | 100 | 100 | OCSVM | 1.000 | 1.000 | 100 | 100 | 100 |
| RB1_2 | 蓮花川_1号機_原動機本体加速度振動Y | LOF | 1.000 | 0.999 | 100 | 100 | 100 | OCSVM | 1.000 | 1.000 | 100 | 100 | 100 |
| RB1_2 | 蓮花川_1号機_原動機本体加速度振動Z | LOF | 1.000 | 1.000 | 100 | 100 | 100 | OCSVM | 1.000 | 1.000 | 100 | 100 | 100 |
| RB1_3 | 蓮花川_1号機_各気筒温度_5% | LOF | 0.795 | 0.333 | 60 | 20 | 100 | OCSVM | 0.651 | 0.422 | 64 | 27 | 100 |

## 4. あとがき

本研究では，計測されたデータを分析し，生信号の取り扱いについて，各パラメータを整理し，試行検証を行った。また，異常検知 AI 支援ツールを構築し，各排水機場の計測データで検証した結果，異常検知性能について判定精度が想定されたとおりとなった。

引き続き，更なる判定精度向上に向けて，分解整備前後の異常検知診断と設備劣化状況との比較を行う等，教師データの拡充を実施する予定である。

他方，実装化に向けて排水機場の状態監視モニタリングシステムの簡素化・効率化を並行して試行検証し，ガイドラインへの反映を目指した整理を行う。

将来，全国の排水機場に実装することで，連続データでのリアルタイム自動診断が可能となり，突然の運転停止を回避でき，内水氾濫から住民の生命・財産を確実に守ることが期待される。

また，自己学習で故障管理値を設定できるようになり，技術者の負担軽減・技術者不足への貢献・故障の予兆検知精度の向上に資することが可能となる。故障の早期発見による重大故障の回避・設備修理費の低減・修理期間長期化の回避ができ，メンテナンスコストの低減につながる。

## 謝辞

本研究は，内閣府の官民研究開発投資拡大プログラム(PRISM) の予算支援を受け，機械設備の早期予兆検知，措置に取り組んだので，ここに感謝申し上げる。

## 参考文献

1) 須山友貴・上野仁士・黒田浩章：排水機場の状態監視モニタリングシステム構築と異常データ検知AI手法に関する研究，一般財団法人　日本建設機械施工協会，令和2年度「建設施工と建設機械シンポジウム」論文集・梗概集，pp.139～142, 2020
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：河川ポンプ設備状態監視ガイドライン(案), 2018
3) 長谷東子・穴田英樹・八木悟・黒田浩章・上野仁士：河川ポンプ設備の排水機場における異常検知「AI」の開発と試行検証, (一社)建設コンサルタンツ協会 近畿支部 ,第54回(令和3年度)研究発表会
4) 中島淳一・梶田洋規・藤野健一：河川ポンプの多様な診断技術，土木技術資料59-8，pp.22～25, 2017
5) 吉田潔・上野仁士・中島淳一・新田恭士：モニタリングシステムとAI技術による河川ポンプ設備の異常の検出，土木技術資料62-4，pp.34～37, 2020
6) 新田恭士・上野仁士・吉田潔・中島淳一：排水機場ポンプ設備のAI異常検知の取り組み, ぽんぷNo.62, pp.10～13, 2020

# 30. 河川インフラ（水門設備）の維持管理シミュレーション装置の開発

## ～　シミュレーション装置，AR，VR 活用による水門設備等の操作・点検体験　～

国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所
寺田　一秋

### １．はじめに

社会資本ストックは集中的に高度経済成長期に整備され，老朽化が今後急速に進行することが懸念されている。河川インフラである水門設備等においても建設後50年以上経過する施設の割合が今後 20 年間で急速に高くなる見込みであり，老朽化するインフラを計画的に維持管理・更新する必要がある。

国土交通省は「国土交通省インフラ長寿命化（行動計画）」（現行：2014 年度～2020 年度）について，新技術の活用や「事後保全」から「予防保全」への転換，インフラの集約・再編の取組等を盛り込んだ内容として改定し，持続可能なメンテナンスの実現に向けた取組を推し進めている。

また，2020 年 12 月 11 日に閣議決定された「防災・減災，国土強靭化のための 5 か年加速化対策」に従い，対策が促進されている。

### ２．河川用ゲート設備の維持管理の状況について

近畿地方整備局管内の多くの河川インフラである河川用ゲート設備は，1970～1980 年代に設置されているため，設置後 40 年経過している設備が多数あり，設備の更新や大規模な修繕を要する施設数の増加が見込まれる。これらの設備を維持管理するには経験・知識を要するが，経験豊かな団塊世代の退職による若手技術者への技術力継承不足の懸念とともに，人手不足，業務の多様化により，若手技術者が現場に赴く機会が少なくなっており，維持管理の技術力の低下が懸念されている。

### ３．河川インフラ（水門設備）の維持管理シミュレーション装置の開発

#### 3.1　目的

河川用ゲート設備の維持管理についての課題を解決するため，現地に行けず，設備の操作・点検経験が少ない若手技術者の設備の維持管理についての技術力を向上させ，設備を正確に操作，適切に設備の健全性を把握することを目的とした維持管理シミュレーション装置を開発する。

#### 3.2　維持管理シミュレーション装置開発のねらい

通常の河川用ゲート設備の維持管理は，操作については操作員（自治体職員又は地域の協力者等）に委託，点検については点検委託業者に委託し，設備の健全性を技術系職員が把握していることから，維持管理シミュレーション装置を使用する対象者として若手の技術系職員及び操作員とし，構造理解，操作方法，点検方法，不具合対応等，それぞれに必要な技術力の基本的部分に関して習得することをねらいとする。

一方，近畿地方整備局管内の河川用ゲート設備についてゲート形式別に分類すれば，水門・樋門の占める割合（図-1）は約 85%であり，その中でラック式開閉装置とワイヤロープウインチ式開閉装置の割合（図-2）は，約 83%を占めている。

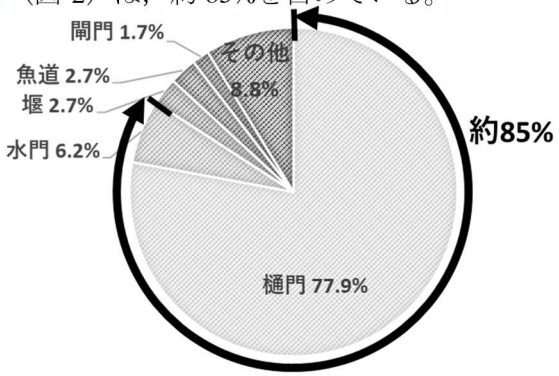



図-1 管内の河川用ゲート設備の形式区分

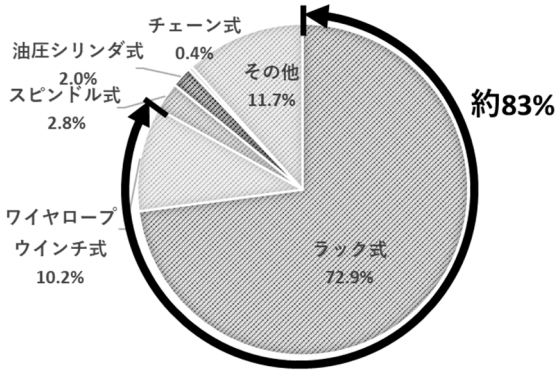



図-2 管内の水門・樋門の開閉装置型式の形式区分

これらのことから維持管理シミュレーション装置の対象設備としては，約 83%を占めるワイヤロープウインチ式開閉装置の水門設備とラック式開閉装置の樋門設備とした。

## ４．維持管理シミュレーション装置の検討

ワイヤロープウインチ式開閉装置の水門設備については，開閉装置，扉体や戸当り等の構造が大きく，様々な構造があるため，実物の設備が大掛かりになることからシミュレーションソフトを主とした構築とした。また，ラック式開閉装置の樋門設備については比較的設備が小規模なこと，概ね同様の構造をしていることから実物大の模擬機を設置した。また，操作経験の少ない若手の技術系職員及び操作員が非常時に正確に操作する必要があるため，増水時の仮想体験が可能な AR と VR によるシミュレーション装置とした。

### ４.１　ワイヤロープウインチ式開閉装置の水門設備シミュレーション装置

ワイヤロープウインチ式開閉装置の水門設備シミュレーションの仕様として，扉体（プレートガーダ式ローラーゲート），戸当り，開閉装置はシミュレーションソフト内構築とし，操作盤（PLC 制御方式）は操作盤の操作及び故障復帰対応を実体験してもらうため実物大製作とした。また，開閉装置の形式については多数を占める形式を網羅するため，1M1D，1M2D，2M2D の 3 形式を切換可能とした（図-3）。

システム構成を図-4 に示す。操作盤を操作する

図-4 システム構成

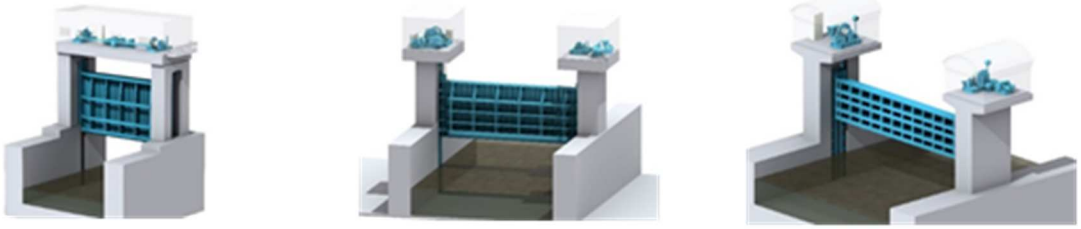



図-3 ワイヤロープウインチ式開閉装置の 3 形式

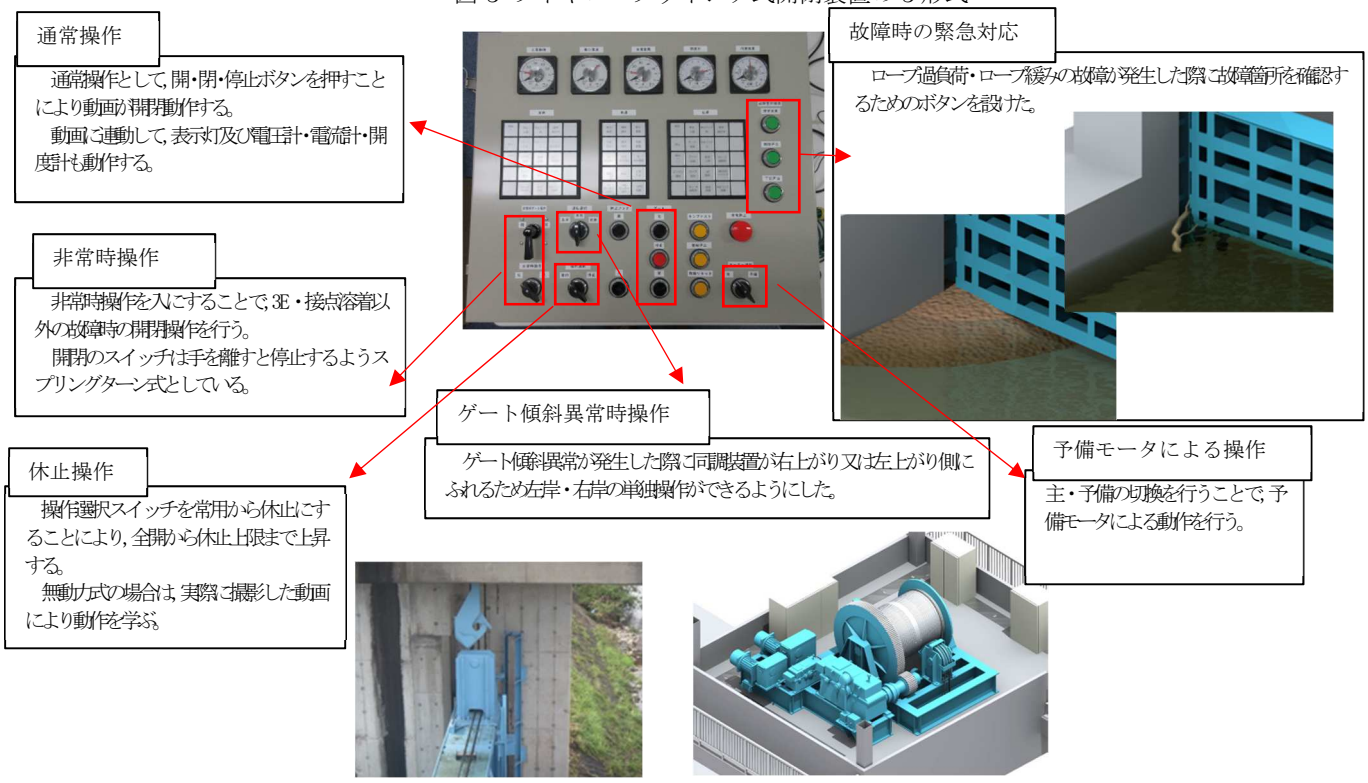



図-5 維持管理シミュレーション装置の機能についての概要

ことによってパソコン上のゲート設備が作動し，その映像をプロジェクターやモニターに映すことによって確認する。

不具合発生時は，操作盤上の故障ランプが点灯，警報が鳴り，パソコン上のゲートが作動停止する。

維持管理シミュレーション装置の機能について概要を図-5 に示す。この維持管理シミュレーション装置には，開・閉・停止ボタンを押すことにより扉体の動画を開閉動作させる通常操作，非常時操作を「入」にすることで，3E・接点溶着以外の故障時の開閉操作を行う非常時操作ができる。特に通常時では体験することができない故障時の緊急対応について，下部の土砂堆積，扉体側面の流木のかみこみ等により，ロープ過負荷・ロープ緩みの故障が発生した際に故障箇所を確認するためのボタンを設け，故障状態のイメージを確認しつつ復旧作業を行える工夫をした。さらに，ゲート傾斜異常が発生した際に同調装置が右上がり又は左上がり側にふれるため，左岸・右岸の単独操作ができるようにした。また，主モータが故障した場合，「主」・「予備」の切換を行うことで，予備モータによる動作を行うこととした。

### ４．２　ラック式開閉装置の樋門設備シミュレーション装置

ラック式開閉装置の樋門設備シミュレーション装置として，扉体，戸当り，開閉装置の部分に関する点検等の体験ができる実物大模擬のラック式開閉装置（図-6）を利用する[1]。このラック式開閉装置は，塗装の劣化状況判定，主ローラ回転の確認，水密ゴムの損傷状況の点検評価，開閉装置自重降下操作，自重降下ブレーキの点検等が行える。

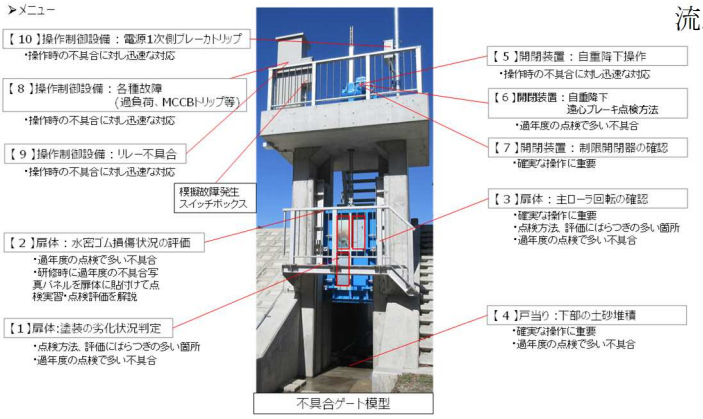



図-6　ラック式開閉装置

また，増水時の実操作の経験が少ない若手の技術系職員や操作員は，非常時に正確な操作を行うのが困難であるため，ラック式開閉装置に，水位が上昇した状況等を体験することができる AR を用いたシミュレーション機器（図-7）を活用することにした。

このシミュレーション装置機器は，iPad に搭載されている LiDAR（ライダー）スキャナでレーザを照射し，奥行きのある距離を計測し，増水状況を３D で表現するものである。レーザ照射距離は 5m 程度である。

タブレットは持ち運びができるため，ラック式開閉装置の樋門設備において増水状況を簡易に表現でき，ラック式樋門設備の講習において有効である。また，AR で増水状況を表現することで，ラック式の函渠を見えなくすることができる。例えば，過負荷の原因究明について研修する場合，函渠は増水して水中が見えない状況において，水中では流木や土砂が堆積しており全閉にすることができない，といった講習に対して有効である。

図-7　AR を用いたシミュレーション機器

タブレットを実物大模擬のラック式開閉装置に向けた際のタブレット上の映像を図-8～図-10 に示す。特徴として，水位を変更できるため，徐々に水位が上昇していく様子を表現できる。また，水の流れ方向を変更できるため，逆流も表現できる。

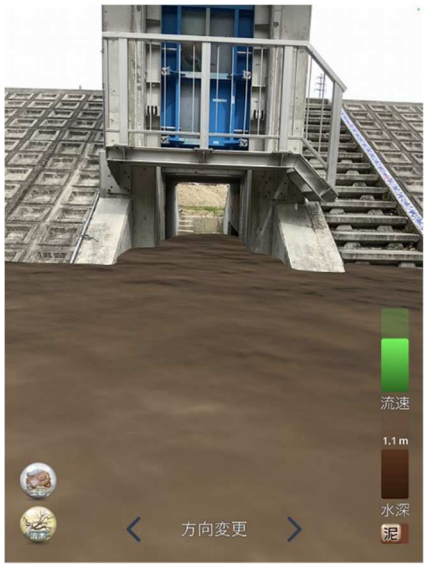



図-8 水の流れを表現した映像

図-9 流木や土砂の堆積映像

図-10 増水状況の映像

### 4．3　VR を用いた樋門操作体験

通常時では体験できない増水時の体験をすることを目的とし，VR ゴーグルを装着することにより仮想現実の世界に没入することができるVRを用いて，増水時のラック式の映像を体験できるようにした（図-11）。ノートパソコン，VR を体験するための位置情報を設定するベースステーションを設置し，ラック式樋門の増水時の状況を体験することができる。特徴として，VR は当事務所の実物大樋門を設置している場所に行かなくても樋門操作体験が可能である。また，水位上昇，樋門の開閉，フラッシングの映像を見ることができ（図-12），通常時では体験できない内容を体験でき，緊急時に冷静に対応することが可能である。

## 5．まとめ

昨今，急激な降雨となることが多くあるとともに，設備の老朽化による健全性の低下が危ぶまれている。そのため，確実な水門・樋門操作，維持管理の重要性はさらに増していく。今後，これら設備を適切に維持管理していくためには若手技術者の維持管理技術の習得は重要である。当事務所では若者の技術力向上を目的として，実際に見て，触ることができ，危機などに対する疑似体験できるワイヤロープウインチ式の維持管理シミュレーション装置を開発した。ワイヤロープウインチ式開閉装置及びARを用いたラック式開閉装置のシミュレーション装置は，出前講座として講習を開催することが可能である。また，ARを用いたラック式開閉装置のシミュレーションは，増水時の体験が可能である。

図-11　VR を用いた樋門操作体験

図-12　VR ゴーグル上に映し出される映像

今後は研修会や講習会で活用していくことにより，若手技術者の技術力の向上を図るとともに，研修会や講習会での意見をもとにシミュレーション装置の更なる改善を行い，研修や講習を重ね，ARやVR等の技術を活用したDX推進を行い，維持管理の技術習得の一助としたい。

## 参考文献

1) 中安孝太：訓練用ゲート設備を用いた樋門の維持管理技術の習得,令和元年度近畿地方整備局研究発表会論文集,2019年

# 31. ランブルストリップスを用いたラウンドアバウトエプロン構造の被験者評価試験について

(国研)土木研究所 寒地土木研究所　○吉田　智
(国研)土木研究所 寒地土木研究所　舟橋　誠
(国研)土木研究所 寒地土木研究所　新保　貴広

## 1．はじめに

平成26年の道路交通法改正により通行方法が定められた環状交差点のラウンドアバウトは，環道交通流が信号機や一時停止などにより中断されない交差点制御方式である（**図-1**）。なお，一般的な無信号交差点と比較すると，車両どうしの交錯点が少なく，安全性に優れた交差点であることから欧米では広く普及している。そのため，日本においても，徐々に普及し，今後，更なる導入が期待されている。しかし，国土の約 6 割以上が積雪寒冷地域に指定されている日本でラウンドアバウトを導入する際，道路管理者は除雪に関する課題やその対応策について検討が必要である。

寒地土木研究所では，ラウンドアバウトについて研究しており，過年度の研究では，除雪車の除雪装置接触による損傷を抑制できる，すりつけ形状のエプロン端部で，段差高さ及び傾斜角度を変えた場合の通行車両の乗り上げ抑制効果について，被験者走行による車両挙動計測及び主観評価試験を実施してきた[1)]。

本評価試験では，環道とエプロンの境界部に段差を生じさせない方法として，正面衝突事故を防ぐ効果があり，北海道で広く普及しているランブルストリップス（以下,「ランブル」という，**図-2**）をエプロン上に施工し，乗り上げ抑制効果を確認するため，被験者による評価試験を実施したので報告する。

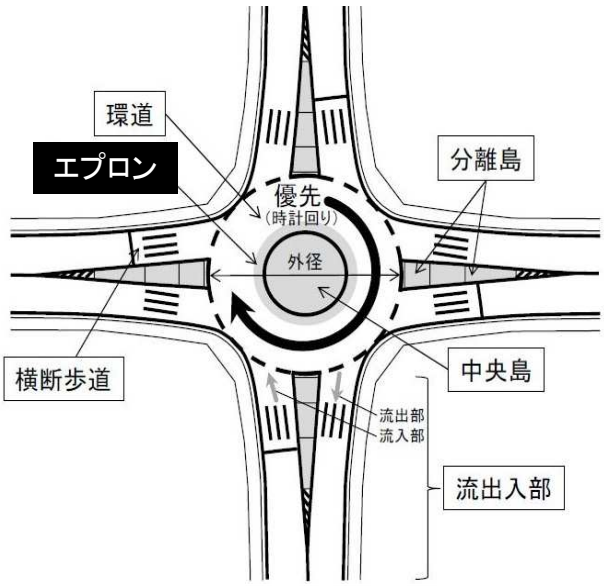



**図-1　ラウンドアバウト標準図**[2)]

**図-2　ランブルストリップス（寒地土木研究所 HP より）**

## 2．ラウンドアバウトのエプロン構造について

ラウンドアバウトの幾何構造は，環道，エプロン，中央島，分離島，流入部，流出部等で構成され（**図-1**），エプロンは環道のみの幅員では通行が困難な牽引車両等が，環道と合わせた幅員として走行して良いエリアである。

エプロンにはラウンドアバウト内を通過する車両の走行速度を抑制させる目的もあり，利用者がエプロンと環道の違いを認識できなければ，小型自動車等がエプロン上を走行し，ラウンドアバウトを直線的に通行してしまう状況が生じる。これを制限し，通行車両の走行位置を安定させ走行速度の抑制効果を発揮するには，環道とエプロンの境界に段差を設けることが有効とされている[3)]。

しかし，積雪地域においてエプロン境界の段差は，除雪作業時に除雪車の除雪装置が接触し，エプロン境界を損傷させることが想定される[4)]。そこで段差を設けない方法として，交通事故対策の一つであるランブル（**図-2**）をエプロン上に施工し，試験を実施した。

## ３．ランブルについて

ランブルは，北海道で広く普及している正面衝突事故を防ぐ工法で，舗装路面をカマボコ状の凹型に連続的に削ることで，この上を車両が走行したときに，車両に対し不快な振動や音を発生させ，ドライバーに車線の逸脱を警告するものである。

平成14～16年に北海道の国道のセンターライン上に設置した60箇所（総延長108㎞）の各施工箇所における整備前2年間と整備後2年間の正面衝突事故発生件数は，約50%減少している[5]。

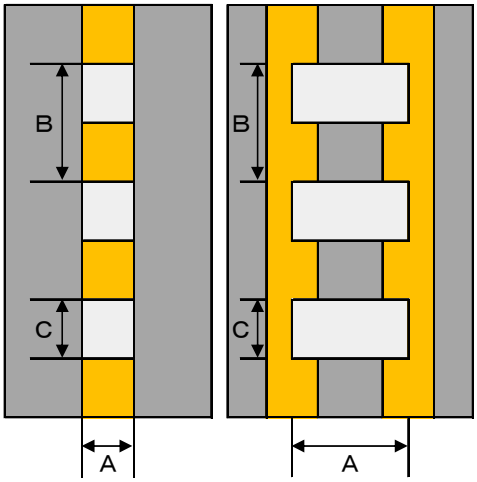
試験に使用するランブルの規格としては，特に施工実績が多いセンターライン上に設置する追越禁止黄色1条線区間用と，追越禁止黄色2条線区間用の2つを使用した（図-3）。

## ４．被験者評価試験について

### 4.1　試験概要

試験は，寒地土木研究所苫小牧寒地試験道路（以下，「試験道路」という）に設けられたラウンドアバウトに，追越禁止黄色1条線区間用を5列，追越禁止黄色2条線区間用を3列，エプロンの円周方向に施工した。なお，追越禁止黄色2条線区間用は，ラウンドアバウトの横に模擬エプロンを作製し，そこに施工している。また，段差形状との比較のため，高さ5cmで端部が鉛直形状のエプロンも設置した（図-4）。

過去のランブルの試験を参考[6]に，これらのエプロンの上を試験車両で走行させ，車両がエプロンを走行する際の被験者の主観についてアンケート方式による調査を実施した。この被験者による評価試験のほか，「車内騒音」及び「車内振動」についても測定を実施した。




| 項目 | 規格値（mm） | |
|---|---|---|
| | 追越禁止黄色 1条線区間用 | 追越禁止黄色 2条線区間用 |
| 切削横幅　A | 150 | 350 |
| 切削ピッチ　B | 300 | 300 |
| 切削縦溝　C | 170 | 150 |
| 深さ　t | 15 | 12 |

図-3　ランブルストリップス規格

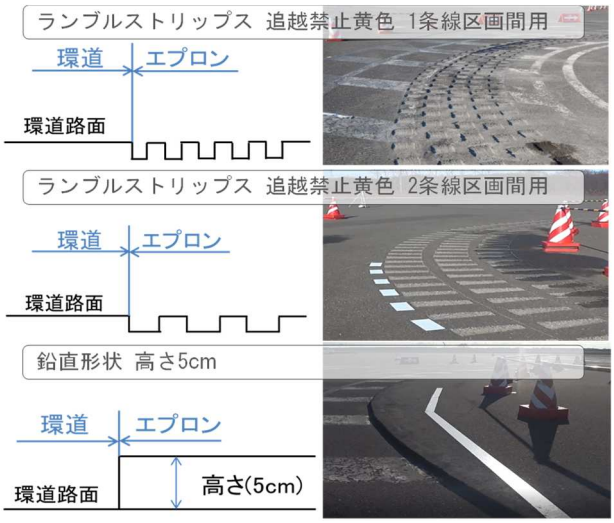



図-4　エプロン形状

なお，試験車両はトヨタカローラフィールダー（全長4.4m，全幅1.7m，車両質量1,210kg）を使用した。

### 4.2　試験方法

#### 4.2.1　被験者評価試験

20～60歳代の男女各5人，計10人を被験者とし，被験者が運転手もしくは同乗者として乗車した試験車両を図-5のように流入部からラウンドアバウトへ進入する。進入した車両は，ランブルを施工したエプロンに右側のタイヤを乗り上げながら走行し（往路），流出後，Uターンして，往路と同様，鉛直形状のエプロンに右側のタイヤを乗り上げ走行する（復路）。なお，同乗者はエプロン乗り上げの影響を受けやすい右側後部座席に乗車した。

走行回数は2回とし，1回目は走行速度を20km/h

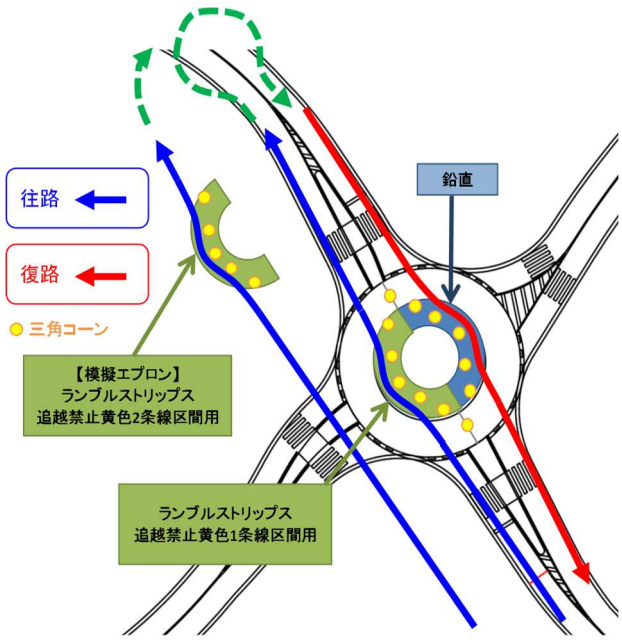



図-5　走行方法

に指示，2 回目は速度を指示せず自由速度とした。また，エプロンに右側のタイヤだけが乗り上げるように誘導するため，エプロン幅が 1m となるよう三角コーンを設置した（**図-6**）。なお，試験前に被験者には，走行方法を事前説明し，練習走行を行った後に試験を実施した。

ランブルと鉛直形状のエプロンへの乗り上げが，運転者及び同乗者に与える影響について確認するため，1 回の試験走行が終了する度，それぞれの主観についてアンケート調査を実施した。なお，アンケート内容は，運転者は 4 項目、同乗者は 2 項目とし，11 段階で評価した（**表-1**）。

4.2.2　「車内騒音」及び「車内振動」の測定

過年度までの試験では，エプロン端部に段差を設け，車両が乗り上げる時の衝撃度（上下加速度の振れ幅）を測定して評価していたが [1]，本試験は，エプロン端部に段差が生じないランブルのため，乗り上げ時の衝撃度による比較は難しいと判断した。そこでランブルのガイドライン [5]を参考に「車内騒音」と「車内振動」を測定し比較した。

なお，データの測定方法は，前輪がエプロン上を走行し始めたときから，後輪がエプロン上を降りるまでの値を測定した。また，集計方法については，「車内騒音」は最大値，「車内振動」は上位 10 個のデータの平均値を採用している。

測定は，被験者による評価試験とは別に実施しており，試験車両が，ランブルと鉛直形状のエプロンを走行するときの値を測定したほか，環道部の通常路面についても，比較のため測定している。なお，これらの測定時の走行速度は，全て 20km/h で統一した。その他の測定条件について**図-7** と**表-2** に示す。

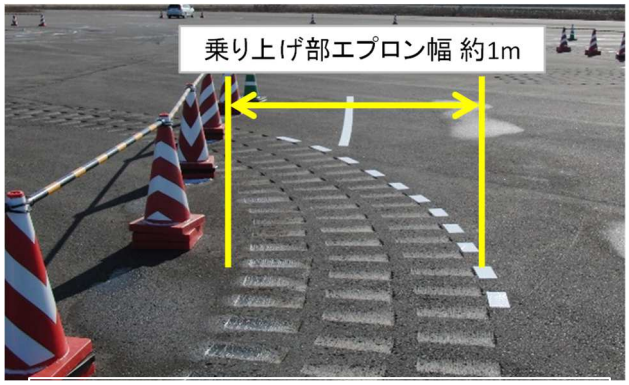



図-6　エプロン乗り上げ部

表-1　アンケート項目と回答内容

| | No. | 項 目 | 段差通過時の評価 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 運転者 | 1 | 走りやすさ | 走りにくかった(0) | ⇔ | 走りやすかった(10) |
| | 2 | 衝撃の大きさ | 大きく感じた(0) | ⇔ | それほど感じなかった(10) |
| | 3 | 安全性 | 危険を感じた(0) | ⇔ | 特に危険を感じなかった(10) |
| | 4 | 許容性 | 通行したくない(0) | ⇔ | 通行しても良い(10) |
| 同乗者 | 1 | 衝撃の大きさ | 大きく感じた(0) | ⇔ | それほど感じなかった(10) |
| | 2 | 許容性 | 通行してほしくない(0) | ⇔ | 通行しても良い(10) |

## ５．試験結果について

### 5.1　被験者評価試験結果

本試験における被験者による評価と，過年度に佐藤ら [2]が形状の異なるエプロンで実施した評価試験結果を，比較できるよう整理したものを**図-8** と**図-9** に示す。なお，項目別の評価点数は，被験者による主観の平均値であり，評価点数が高いほど走行に支障がなく，乗り上げ抑制効果が低いことになる。

本試験と過年度に実施した評価結果を比較すると，ランブル（追越禁止黄色 1 条線区間用、追越禁止黄色 2 条線区間用）は「傾斜角 20°高さ 7cm」と同程度の評価であり，「傾斜角 20°高さ 5cm」より評価は低かった。なお，ランブルは「傾斜角 20°」より走りやすさ，安全性，許容性の評価点数が低い結果となっている。

「傾斜角 30°」，「鉛直高さ 5cm」と比較すると，ランブルの評価点数は高い結果となっている。そのため，これらに比べるとランブルの乗り上げ抑

図-7　車内騒音（左）・車内振動（右）の測定状況

表-2　車内騒音・車内振動の測定条件

| | 車内騒音 | 車内振動 |
|---|---|---|
| 測定機器 | 精密騒音計(NL-62)<br>リオン社製 | 振動レベル計(VM-55)<br>リオン社製 |
| 測定方法 | 助手席のヘッドレストに<br>集音マイクを固定 | 運転席下後方に<br>ピックアップを設置 |
| 測定間隔 | 0.1秒 | 0.1秒 |
| 集計方法 | 最大値 | 上位10個の平均値 |
| 測定車 | 日産セレナ4WD　1990cc | |
| | 平成30年車　タイヤサイズ　195/65R15　スタッドレスタイヤ | |
| 測定場所 | 苫小牧寒地試験道路 | |

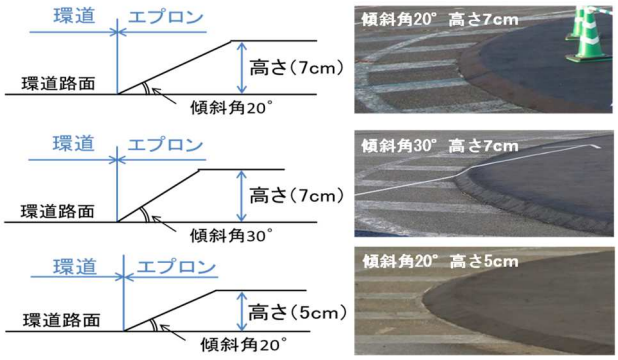



図-8　エプロン形状（参考）

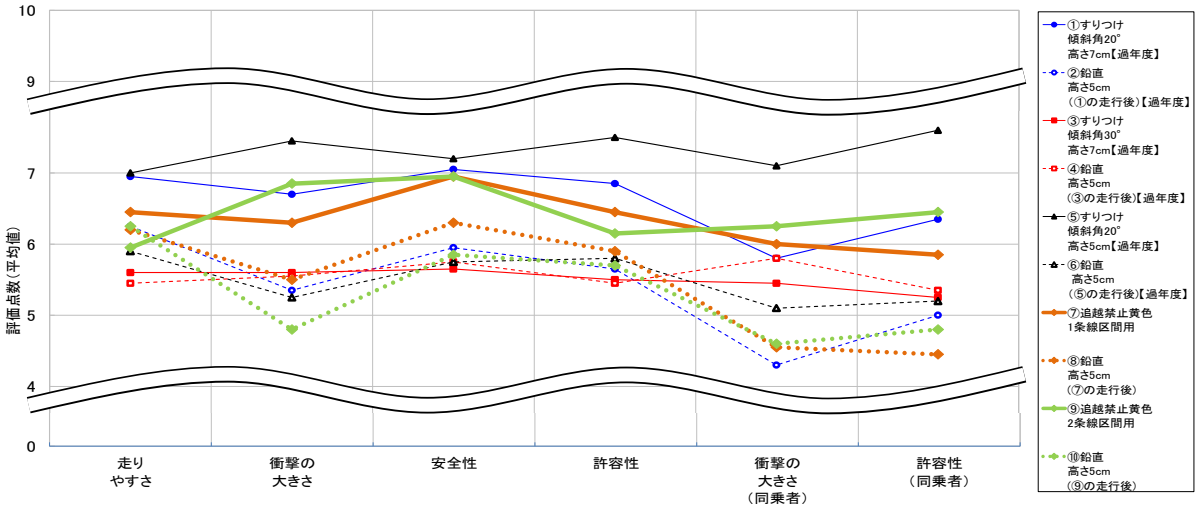



図-9　被験者による評価結果

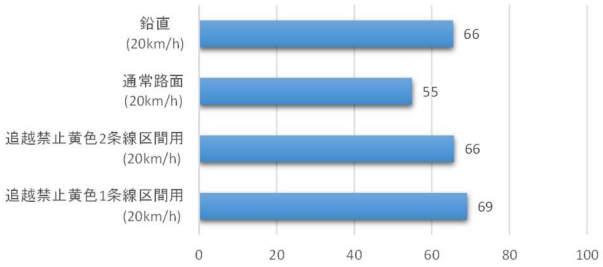



図-10　車内騒音(dB)

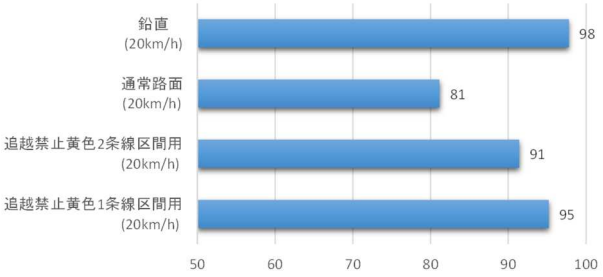



図-11　車内振動(dB)

制効果は低くなる。しかし,「傾斜角 20°高さ 7cm」と同程度の評価であることから，ランブルの乗り上げ抑制効果も期待できる。

### 5.2　「車内騒音」及び「車内振動」の測定結果

エプロン乗り上げ走行時の「車内騒音」及び「車内振動」の測定結果を図-10 及び図-11 に示す。

ランブル（追越禁止黄色 1 条線区間用、追越禁止黄色 2 条線区間用）の「車内騒音」 と「車内振動」ともに，鉛直形状のエプロン形状と同程度の測定値となっており，通常路面走行時の値よりも大きい結果となった。

このことから，ランブルをエプロンに設置した場合, エプロン走行時にドライバーに対しての注意喚起や警告効果は期待できる。

## 6．まとめ

環道とエプロンの境界部に段差が生じない方法として，ランブルを試験道路のラウンドアバウトのエプロンに施工し，乗り上げ抑制効果について被験者による評価試験を実施した。その結果，以下のことがわかった。

被験者による主観評価試験では，エプロン端部形状が「傾斜角 30°高さ 7cm」や「鉛直高さ 5cm」より，ランブルの乗り上げ抑制効果は低い結果であった。なお,「傾斜角 20°」の走りやすさ，安全性，許容性より評価点数が低く，「傾斜角 20°高さ 7cm」と同程度の評価であり,「傾斜角 20°高さ 5cm」より評価点数が低かったことから，ランブルの乗り上げ抑制効果は期待できる。

また，エプロン乗り上げ時の「車内騒音」及び「車内振動」は，環道走行時より大きく，エプロン端部形状が「鉛直高さ 5cm」の走行時と同程度の値であるため，ドライバーへの注意喚起や警告効果は期待できる。

## 参考文献


1) 佐藤信吾・山口洋士・村上和也：ラウンドアバウトのエプロン高さ及び端部形状の違いによる乗り上げ抑制効果の検証，国土交通省北海道開発局第62回（平成30年度）北海道開発技術研究発表会，2019年2月
2) 望ましいラウンドアバウトの構造について，2014.8.8，国土交通省道路局通知
3) ラウンドアバウトマニュアル，平成28年4月28日，一般社団法人交通工学研究会
4) 佐藤信吾・高本敏志・牧野正敏：除雪作業と乗り上げ抑制効果を考慮したラウンドアバウトのエプロン端部形状に関する検討, 寒地土木研究所月報, No.774, pp.40～46，2017
5) ランブルストリップス整備ガイドライン（案），平成20年2月，独立行政法人土木研究所寒地土木研究所
6) 小林寛・今田勝昭・上野朋弥・高宮進：ラウンドアバウトのエプロン構造の違いによる車両走行特性に関する実験検討，土木学会土木計画学研究・講演集Vol.51，2015年6月

# 32. ロータリ除雪車における投雪作業自動化の検討について【i-Snow】

## —除雪現場の省力化による生産性・安全性の向上に関する取組—

国土交通省　北海道開発局　事業振興部　機械課　○白瀬　和暁
佐藤　信吾
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　小野寺　敬太

### 1．はじめに

積雪寒冷地に住む人々の生活にとって冬期の円滑な道路交通確保は必要不可欠であり、冬期の道路維持管理（除雪）については非常に高いニーズがある。

一方、除雪作業の現場においては、除雪機械オペレータの担い手が減少し、かつ高齢化が進んでいる。（図-1）

また、北海道は都市間距離が非常に長い、広域分散型の社会を形成しているため、特に冬期間の異常気象に伴う交通障害は住民生活、地域産業・経済活動への影響が非常に大きい。（図-2）

今後も継続的に冬期道路交通を確保するため、持続可能な道路除雪の取り組みを構築し、除雪作業の効率化を進める必要性が高まっている。

図-1　除雪オペレータの年齢構成推移

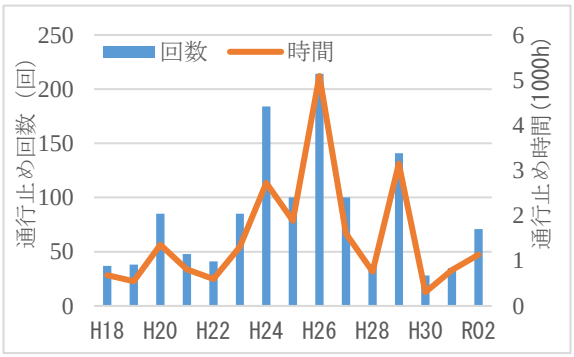



図-2　冬期通行止め回数、時間の変化

### 2．「i-Snow」の発足

持続可能な道路除雪の実現に向けた取り組みを構築するにあたり、平成 29 年 3 月に除雪現場の課題、研究開発の動向、除雪技術等に関する情報の共有を図るほか、除雪現場の改善への取組について、産学官民が連携して取り組むプラットフォーム「i-Snow」を発足させた。（図-3）

i-Snow では、近年の除雪現場における課題に対応するための活動を展開し、生産性・安全性の向上に資する除雪現場の省力化を進めている。

### 3．除雪装置自動化の取組

#### 3.1　除雪作業省力化のイメージ

i-Snow における除雪作業省力化の当面の目標は、現在、2 人乗車体制で行っているロータリ除雪車での作業を、除雪車の運転以外の操作の自動

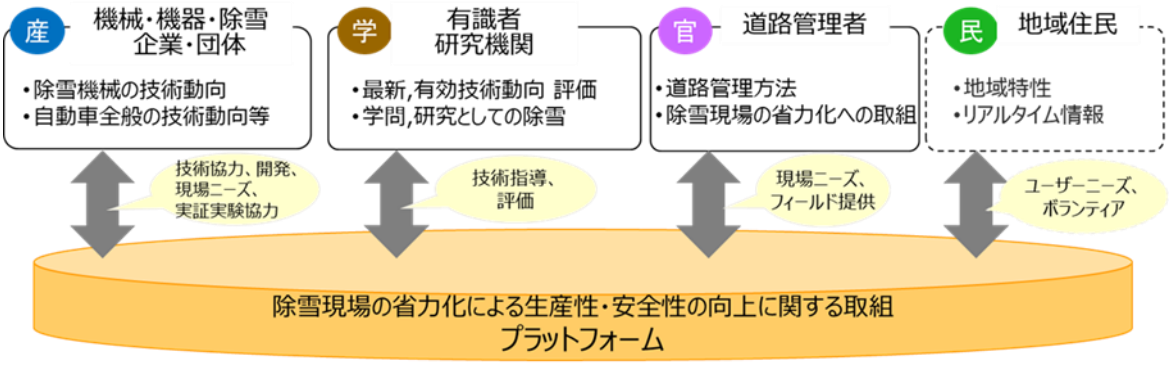



図-3　プラットフォームのイメージ

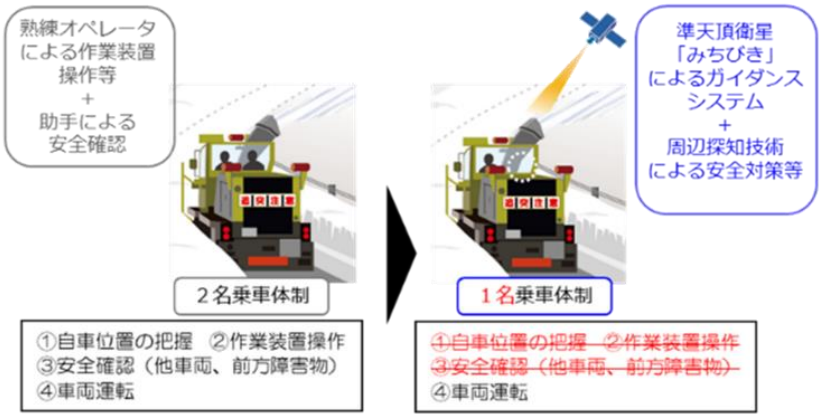



図-4　除雪作業省力化のイメージ

化､省力化により､熟練の技術や経験がなくても、1 人乗車体制（ワンマン化）で作業できるようにすることのほか、暴風雪時など視界不良時においても安全で効率的な除雪作業を可能にすることである。(図-4)

効率化・省力化のイメージは、除雪作業に必要な①自車位置の把握、②作業装置の操作、③安全確認（障害物等)、④車両運転（操舵・加減速）を最新技術を活用することによる①②③の自動化である。

### 3.2　i-Snow 仕様ロータリ除雪車の概要

導入した、i-Snow 仕様ロータリ除雪車は【2.6m 級（MS シュート)】をベースとし、外観は、北海道開発局の除雪機械で採用している塗装色の「フレッシュグリーン」と「ミッドナイトブルー」のツートン色で、i-Snow のロゴを強調したスタイリッシュなロータリ除雪車とした。(図-5)

図-5　i-Snow 仕様ロータリ除雪車の外観

本ロータリ除雪車には視界不良時やセンターラインが見えない啓開除雪などでもオペレータが道路線形を把握できる様に､準天頂衛星｢みちびき」と「高精度 3D マップデータ」を活用した運転支援ガイダンスと投雪装置を自動で制御する機能を合わせたシステムを搭載した。

また､オペレータの負担をより軽減させるため、運転席の操作レバーの集約化（11 本→3 本）や除雪速度制御装置（除雪負荷に応じた除雪速度自動コントロール）など、操作の省力化を図ることができる装置を搭載している。(図-6)

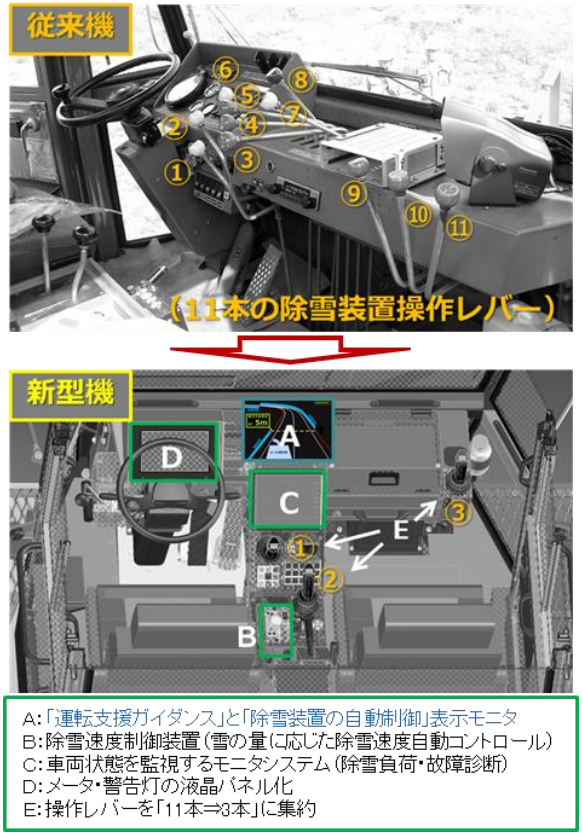



図-6　　i-Snow仕様ロータリ除雪車従来機からの変更点

### 3.3 一般国道知床峠における実証実験（平成 30～令和元年度）

(1)実験フィールドの選定

実験フィールドについて、令和元年度までは北海道で唯一、冬期間通行止めとなる区間で、一般通行車両に影響を与えずに実証実験ができる一般国道 334 号知床峠を選定した。(図-7)

知床峠では、場所によっては積雪深が 5m を超えることから、春先の啓開除雪では複数台のバッ

クホウとロータリ除雪車による除雪が行われ、後方のセンターラインを確認しながら前進して除雪作業を行うなど、熟練オペレータの感覚と経験が必要となっている。

図-7　知床峠実証実験箇所

(2)実証実験

自動化にあたり、知床峠頂上を含む約 24km の間を対象に MMS（モービルマッピングシステム）測量し、このうち啓開除雪の際に人力で見出しポールを設置している 5km の区間について高精度 3D マップを作成した。（図-8）

ロータリ除雪車の運転支援用に点群データから、道路形状を表す中央線、外側線、導水縁石（内側）を抽出することで 3D 道路データを作成した。（図-9）

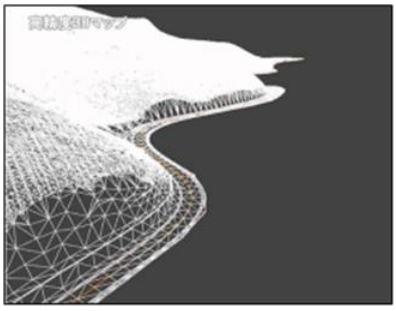


図-8　高精度 3D マップ例

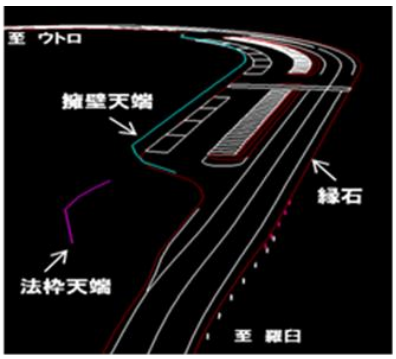



図-9　3D 道路データ例

その道路データ内にブロワ投雪方向変更点を設定することで、準天頂衛星みちびき等からの衛星信号から自車位置を判断し、ブロワ装置の自動化を図った。

実証実験では「運転支援ガイダンスシステム」と「ブロワ投雪の自動化」、「みちびきの受信状況調査」等を行った。

主要な実験結果として、運転支援ガイダンスシステムについては、視界を遮蔽してガイダンス機能のみでの走行試験を実施したが、システム上にリアルタイムの舵角が表示されず、必要以上にステアリング操作を行い、蛇行する結果となったため、さらなる改良が必要であることが確認された。

ブロワ投雪の自動化においては、予め設定された投雪方向の変化点において、ブロワ装置の旋回を自動制御し投雪方向を変更できることを確認した。（図-10）

みちびき受信状況調査について、平成 30 年 11 月から本格運用を開始した「みちびき」だが、一部不安定な状況があり、受信機のアップデートが複数回あったため、今後も継続調査を実施する。

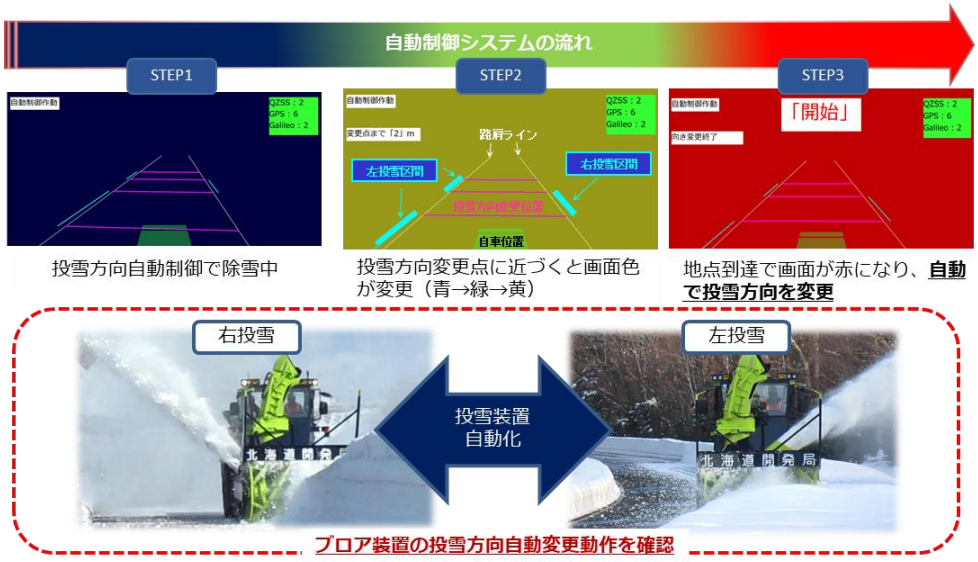



図-10　ブロワ装置の投雪方向自動制御

### 3.3　一般道での実証実験（令和 2 年度）

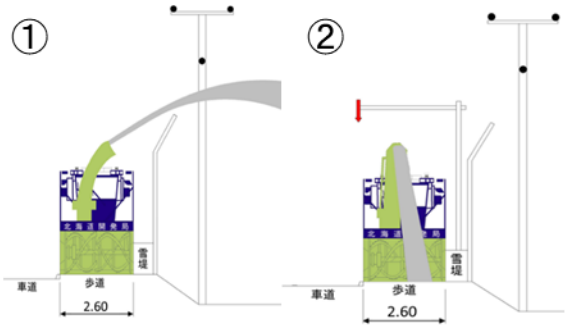
知床峠での実証実験の結果をもとに、準天頂衛星（みちびき）の受信状況が良好かつ一般交通の影響を受ける一般国道 38 号狩勝峠において、令和 2 年度から実証実験を開始した。

この実証実験では投雪距離、方向を変更するシュート装置についての検証を行った。（図-11）

図-11　シュート装置及びシュートキャップの開閉

(1) シュート自動制御安定性試験

雪堤の高さが日々変化する中、一般車両や障害物を避けながら高度な自動制御が可能か検証を行った。（図-12）




①防雪柵の天端と電線の間のスペースを狙って投雪
②標識等を避けるために、支柱の前で一旦停止、シュートを前方に向け、前送り除雪を行い、標識通過後に側方投雪に戻す

図-12　シュート自動制御動作概要図

結果として、予め 3D マップに登録した操作どおりに、シュート方向、キャップ角度の自動制御（習い制御）が可能なことが確認された。

しかし、自動制御と手動操作の切替におけるガイダンス装置からの指示が画面表示のみのため、オペレータが常時画面を注視出来ずシステムと連携した動作を取ることが出来ないことや、雪質や風の影響等で、投雪距離や方向が変わり、微調整のため手動操作を行った際、自動制御が解除されるため、改善が必要なことが判明した。

(2)3D-LiDAR による雪堤高さ検知シュート制御実験

3D-LiDAR により雪提高さを計測し、その雪提高さの変化に合わせて、造成の目標線上に投雪するに『シュート投雪角度（キャップ）』の制御機能を実際の雪堤にて検証し、雪堤の起伏に合わせ、雪提造成目標線の目印に沿った投雪がされ良好な結果を得られた。（図-13）

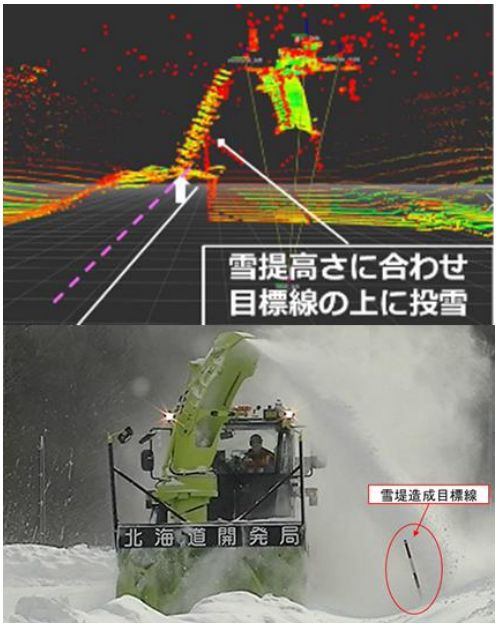



図-13　雪堤高さ検知シュート制御試験

しかし、車両の姿勢データから、キャップの制御動作が、1 秒間に複数回行われていることが確認され、これは、機械寿命が短くなる程の頻度であるため、対応について検討を行う必要がある。

### 4．今後の展開（令和 3 年度予定）

実証実験の重要課題の一つ、準天頂衛星「みちびき」の精度について、除雪区間には樹木、ビル、高架、トンネル等が影響し、様々な不感地帯が存在することから、加速度センサー等を用いた車両慣性航法システム(INS)、路車間通信、磁気マーカーなど、現場条件、施工性、コスト、メンテナンス性を考慮した不感地帯対策方法を検討し、自動制御装置安定性の向上を図る。

また、シュート自動制御時に雪質や風等の現場条件に合わせ、手動操作で微調整を行うことが出来るよう機能を追加する。

今後も、維持及び除雪作業の効率化・高度化に向け、様々な最新技術動向を調査し、各種自動化のセンサー類が苦手としている使用条件の厳しい積雪寒冷地での実証を行ったうえで、必要な仕様を見極め、積極的に活用を図るなど令和 4 年度の実働配備を目標に更なる技術向上を目指す。

# 33. 遠隔臨場ドローンシステムの開発

## リアルタイム映像で遠隔臨場を高度化・効率化

(株)フジタ　松岡　祐仁
○林　秀晃
(株)センシンロボティクス　吉井　太郎

### １．はじめに

建設 DX が掲げる生産性や安全性向上およびウィルス感染症対策を契機とした非接触・リモート型業務への転換を目指すため，2020 年度から施行を開始した遠隔臨場の推進に資する映像コミュニケーション技術の確立が急務となっている。

遠隔臨場とは，ウェアラブルカメラやタブレットなどを利用して，建設現場において段階確認・材料確認・立会の作業を行うものである。発注者が現場で実施していた監督業務がリモート化されることで移動時間の削減，非接触による新型コロナウィルス感染症拡大防止といった建設現場における生産性向上などの効果が期待できる。

図-1　ウェアラブルカメラなど使用の遠隔臨場

現在の遠隔臨場は図-1 の通りウェアラブルカメラやネットワークカメラを使用しての運用が主流となっている。しかし，以下のような課題も抱えている。

- 必要機材を担当職員が準備し，発注者の指示でカメラの向きや撮影場所を移動する必要がある
- 撮影者やカメラの配置により撮影範囲が制限されてしまう。

1 つ目の課題に対しては，発注者自らがカメラの向きをリモート操作できるなど，対話性に優れたインタフェースが必要という点で双方向での通信性能の向上が求められると同時に安定した通信環境を必要とする。

2 つ目の課題に対しては，機動性の高いドローンを活用することで撮影範囲を飛躍的に拡大できる可能性がある。その反面，カメラの性能および操作性の向上が求められる。

近年，モバイル技術の進歩やバッテリーの小型化によって，ドローンの活用が急速に進んでいる。とくに測量分野やインフラ設備点検，災害調査の用途では，ドローンの高機能化とともに，益々需要の拡大が見込まれている。

これらを踏まえ，本報では，現在のウェアラブルカメラなどを活用した遠隔臨場の更なる効率向上と高度化を目指し開発した「遠隔臨場ドローンシステム」（(株)センシンロボティクスと共同開発）の概要と，本システムを実現場の遠隔臨場で試行した際の課題解決について報告する。

### ２．システムについて

#### 2.1　使用機器

検証では，14 倍ズームカメラ（1200 万画素）を搭載したドローン（SENSYN Mark-2）（図-2）を用いた。表-1，表-2 に仕様表を示す。

表-1　ドローン（ SENSYN Mark-2）の仕様表

| | |
|---|---|
| サイズ | 対角0.888m |
| 重量 | 7.5kg |
| 入力電源 | 25分 |
| 動作保証温度 | -10℃ ~ +40℃ |
| 防水・粉塵性能 | IP54相当 |
| 耐風性能 | 10.0m/s |
| 充電時間 | 空の状態から約1時間で満充電 |

表-2　ドローン（SENSYN Mark-2）搭載カメラ

| | |
|---|---|
| カメラ | 14倍ズームカメラ |
| センサー | CMOS 1/2.3′′ |
| サイズ | 4000 (H) x 3000 (V)<br>1,200万画素 |
| レンズ | HFOV= 92 or 50<br>EFL : 2.3mm |

図-2　ドローン機体

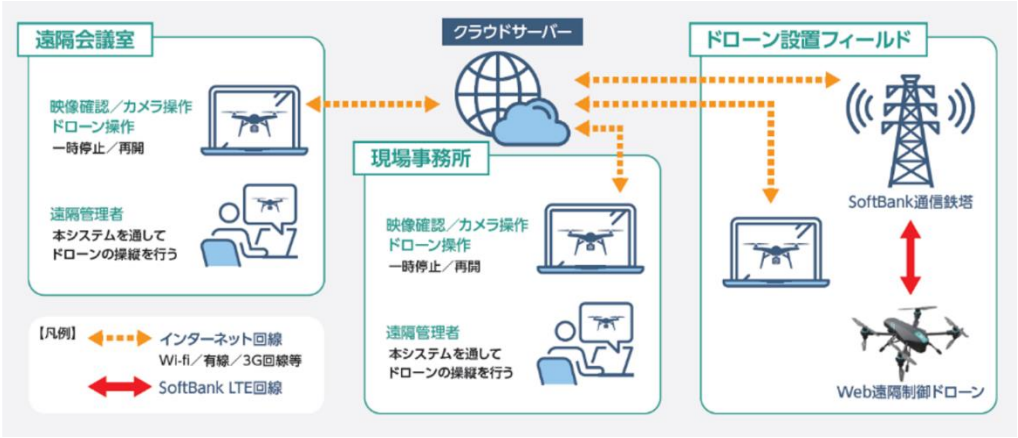



図-3　システム全体図

本機は，25 分間飛行可能な機体となっており，ドローンの機動力と併せて，高倍率ズームカメラにより，広範囲の俯瞰とピンポイントな詳細確認を両立できることを期待し選定した。

## 2.2　システム構成

本システム（図-3）は，遠隔監視システムである SENSYN CORE Monitor(以下，SC モニタ)を基に建設現場の遠隔臨場向けに改良したシステムであり，ドローンが現場を撮影したデータや飛行時のテレメトリ情報は，4G-LTE 回線を通して，クラウドにアップロード，蓄積し，一括管理される。これらの情報は，遠隔会議室や現場事務所といった様々な場所からシステムに接続して映像の確認が可能となっている。

図-4　SC モニタ

SC モニタの操作画面は，図-4 のようにドローンの撮影映像と右下にあるコントローラなどで構成されている。コントローラでは，左部の方向スティックでドローンの旋回とカメラ角度の調整ができ，写真撮影やその他にもズームやジンバルピッチの調整が可能である。また，外部関係者には URL 共有機能を用いることで簡単に情報共有できる。本システムで取得した映像は，リアルタイムで確認することはもちろん，過去に撮影した画像・映像をクラウドより読み込み，比較・参照することも可能である。

なお，音声通信は，近年 Web 会議システムとして普及している Microsoft teams を併用した。

## 3.　本システムの現場試行

### 3.1　現場試行の概要

工事名　：令和元-4 年度横断道羽ノ浦トンネル工事
場所　　：徳島県小松島市
工期　　：2020/2/26～2022/7/29
発注者　：国土交通省四国地方整備局
試行期間：2021/3/9～2021/8/4

### 3.2　通信システムの改善

テスト飛行の際，クラウドに保存された映像データには問題が生じていなかったものの，通信遅延によりライブ映像にブロックノイズが生じる場面が多発した。

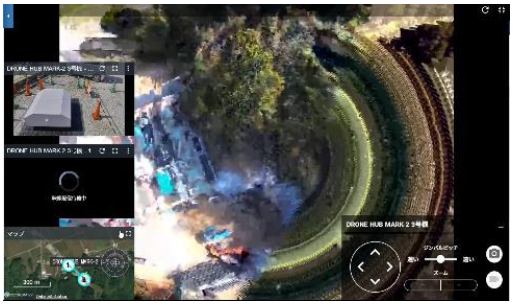


図-5　改善前

図-6　改善後

図-5 は，ドローンの旋回を行った際のライブ映像を切り出したものであるが，映像伝送の遅延が原因と考えられるアーチ状の残像ノイズが現れ，旋回終了後に正常の映像に戻った。調査・検証を行った結果，この現象は高精細な映像品質と通信遅延がトレードオフの関係であることに起因していることが判明した。そこで最適化を図り，改善を行った。図-6 に改善後の撮影映像を示す。

図-6 は以下の設定を変更したものである。

・解像度：1280×960（HD）⇒960×720

・フレームレート：20 コマ/s ⇒10 コマ/s

また，映像のエンコード処理には，映像伝送上，限られた帯域を使う LTE 回線で当初「H.264H」を使用していた。しかし，調査の結果エンコーディングの負荷が想定よりも高く、画質にも影響していたため、負荷の低い「H.264B」を選択した。これらの設定を変更したことでライブ映像の遅延や配信の途絶といった現象が解消され，映像のスムーズな更新が行えるようになった。

### 3.3　遠隔臨場ドローンシステムの現場試行

図-7　試行概要

本システムの試行概念を図-7 に示す。試行の目的は，従来のウェアラブルカメラやタブレットを用いた遠隔臨場を補助する形で広範囲に渡って発注者が見たい映像をすぐに確認できることである。

現場試行では，ドローンによる機動性のある映像提供検証と同時に，盛土箇所にリボンロッドを設置し，ピンポールで指した 1cm ピッチのリボンロッドの目盛りが現場詰所の PC モニタで視認できるかを検証した。条件は高度 20m・30m にて，各々カメラの倍率が 1 倍，7 倍，14 倍の計 6 通りで実施した。

### 3.4　遠隔臨場の試行結果

3.3 で述べた検証条件のもと，法面の法長検尺の遠隔臨場を実施した。その結果を表-3 に示す。

表-3　飛行結果

| 倍率[倍] / 高度[m] | 1 | 7 | 14 |
|---|---|---|---|
| 20 | × | × | ○ |
| 30 | × | × | ○ |

高度 20m・30m のケースにおいて，倍率 14 倍のみ視認できる結果となった。高度 30m，倍率 14 倍の確認画映像を図-8 に，リボンロッド部の拡大映像を図-9 に示す。

図-8　リボンロッド視認（モニタ映像）

図-9　リボンロッド（1cm ピッチの視認）

本検証を通して，従来の遠隔臨場にドローンによる映像を提供することが有意であることを確認できた。図-9 の通り，カメラ倍率 14 倍で 1cm の視認ができたため，ドローンは遠隔臨場に必要な仕様に耐えうると考えられる。

ここで，法面検尺の検査で，従来の現場臨場とドローンを活用した遠隔臨場の比較を行う。

図-10　従来の法長検尺状況

図-11　本システムでの法長検尺

従来は，図-10 のように，検査の際，発注者が現地に赴いていたが，現在運用されている遠隔臨場では，パソコンやタブレットといったデバイスでの検査や，現場臨場・対面協議の削減が可能となった。

更に，本システムにより，図-11 に示すような検査状況の空撮映像を追加提供することのメリットと特徴をあげる。

① 地上からでは，撮影者の移動やカメラの段取り替えが必要な場合でも，ドローンにより検査対象全域の概況から，cm 単位のピンポイントな詳細確認までを短時間でカバーすることが可能である。
② リアルタイムかつ複数映像の表示とクラウドに保存された過去の遠隔臨場記録の再現・比較閲覧が可能である。
③ 複数拠点から Web ブラウザでアクセスすることでドローンの遠隔操作が可能である。
④ リアルタイム映像を確認しながら，機体の向きやカメラのズーム（最大 14 倍）を自由に操作可能である。

## 4. 本システムを用いた Web 現場見学会

遠隔臨場ドローンを試行した作業所と発注者の間で，建設 DX 技術を活用した「Web 現場見学会」を開催した（図-12）。本見学会は，現場に赴くことなく施工現場の臨場体験を目的として試行したもので，本システム以外の技術として 360°カメラ遠隔臨場システムと VR ゴーグルなどを活用し，Web 会議方式で実施した。成果として，工事概要の説明に全体を俯瞰でき，高精細画質を提供できるドローンの生映像とトンネルの坑内作業を臨場体験できる 360°カメラを利用したライブ VR 体験が高評価であった。

コロナ禍における現場見学など研修の 1 つの手法として有効な手段となることが期待される。

図-12　Web と VR ゴーグルを用いた見学

## 5. おわりに

本システムは，スムーズな操作と映像配信を実現し，検査時に使用するリボンロッドの 1cm ピッチの目盛りをモニタで視認できるほど高画質なものとなっている。これにより，現在工数がかかり過ぎている発注者の現場臨場業務を大幅に削減でき，遠隔臨場の更なる効率化，高度化を図ることが可能である。

そして，普及機である phantom でも試行した結果，実装されていないズーム機能以外は，全く問題なく利用でき，現場活用に有効な組み合わせであることが判明した。

また，本システムのリアルタイム映像配信とその映像を遠隔で操作できる特徴を活かし，昨今頻発する土石流などの災害発生時に，早期に災害現場の被災状況を把握することや，遠隔拠点からの経験豊かな担当者による現場内遠隔監視としての活用も期待できる。

今後は，より安定した映像品質が確保できるよう，場所・時間に応じた最適なキャリア通信網が選択できるシステムの検討が必要であると考える。また，ドローンの制御・通信に普及段階に入った 5G を活用し，さらなる映像の高画質化を推進すべく技術開発を継続する所存である。

## 参考文献

1) 国土交通省：建設現場の遠隔臨場に関する監督・検査試行要領（案），pp.1～6，令和3年3月
2) 国土交通省：資料 3 インフラ分野のDXに向けた取組紹介，pp.2～20，令和2年7月29日

# 34. 距離計カメラを搭載した小断面積込機械の開発

## トンネル機械の遠隔操作に向けた取り組み

株式会社熊谷組　　○ 坂西　孝仁
株式会社熊谷組　　宮川　克己
株式会社熊谷組　　手塚　仁

### １．はじめに

近年 FIT（固定価格買取制度）により水力発電所導水路トンネル改修や新規構築の需要は高まっている。水力発電所導水路トンネルは幅員や高さが３ｍ以下の小断面が多数を占め，タイヤ工法機械では施工が難しく，レール工法機械が使用される。しかしここ数十年間，レール工法機械は勾配の制約や付帯設備の煩雑等で採用されず，新規機械製作が見送られている。現在トンネル機械の進展は目覚ましく自動化や省力化等の新技術が導入されており，タイヤ工法機械と比較して見劣りしているのが現状である。

そこで当社では，新技術を取り入れた削孔，積込，吹付の各工程に対応した小断面レール工法機械を同時開発している。遠隔操作を基本に２段階に分けてシステム開発を進めている。掘削機と吹付機は自動化を推進し，積込機は距離計カメラを搭載した遠近距離可視化システム開発を進めている。

通常のディスプレイを使用した遠隔操作では奥行き感補填のために多くのカメラを必要とするが，当機では距離計カメラを使用して距離を色で表示することにより，少ないカメラ台数で直感的な距離把握を可能にした。本稿は遠隔操作に向けた各小断面開発機械概略，積込機に付属する距離計カメラを使用した遠近距離ガイダンスシステムについて述べる。

### ２．小断面新規機械開発について

#### 2.1　基本的開発方針

当社では以下の　小断面レール工法機械の新規同時開発を進めている。開発した機械は現在施工中の現場に投入して,技術的な実験検証を行い,改良を進めていく予定である。基本的な開発方針は以下のとおりとした。

削孔機,吹付機には自動作業機能を搭載し,遠隔操作を行う際に，この自動システムで操作を補完する方式にした。ただし積込機の自動運転システム導入は現状では技術対応が難しいので,遠隔操作が可能な仕様で開発を進めた。

開発方針は第１段階として最初の導入現場では,操作作業員が切羽で従来の使用位置より後方の安全な位置から機械を遠隔操作して，問題がないことを確認する。次に問題点の改良を進めた上,操作室で遠隔操作の環境を整えて，第２段階への移行を考えている。(図-1)

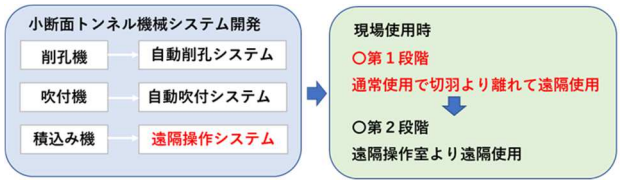



図-1　小断面トンネル機械の開発方針

#### 2.2　各開発機械の概要

前述した開発方針に基づいて，以下の機械群の開発を進めた。

(1)　削孔機械

１ブーム式レールジャンボで,2.5ｍの長孔発破に対応かつ削孔効率を向上するため,ドリフターは Epiroc 社製 COP1838HD を搭載し高速施工に対応する。また長孔発破実現に対応するため,削孔精度の確保が必要になることから自動削孔機構も搭載している。(図-2)

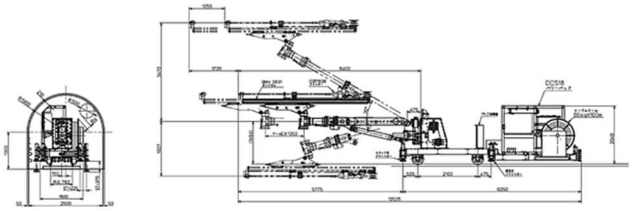


図-2　削孔機械の概要

また削孔機の後部に遠隔爆薬装填装置が連結されている。「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン」に基づき，当社では爆薬装填は遠隔装填を基本としている。

写真-1　遠隔爆薬装填装置

既に運用され実績のある通常断面向け装填装置の技術ノウハウを踏襲しつつ，全く新たな仕様で開発中である。(写真-1)

### (2)　吹付機械

写真-2　吹付機

吹付機械はコンプレッサー37kW×3 台を搭載した 2 両編成の一体型吹付機で，吹付区間が 2.5m となることを想定して,吹付が可能な構造になっている。また吹付ポンプは乾式，湿式どちらにも対応可能となっており，現在は乾式仕様のアリバ 285 を搭載している。載せ替えてコンクリートポンプの搭載が可能で,最新の液体急結剤の対応も考慮している。(写真-2)また吹付自動化に対応した既開発の教示式の自動吹付機システム機能やリアルタイムモニター(写真-3)も搭載している。

写真-3　リアルタイムモニター

### (4)　積込機＋トレンローダー

積込機は掘削バケットとチェーンコンベアによる移送方式である。掘削効率向上を目指しコンベア処理能力は 150 ㎥/H で，この断面に適合する同クラス機械のシャフローダーKL-7 と比較して倍以上の能力がある。操作は遠隔操作を前提としたリモコン方式とし,視認はカメラモニターと新規開発の距離計カメラを搭載した遠近距離可視化システムを使用して操作をする。(写真-4)積込機の仕様は以下のとおりである。

| | |
|---|---|
| 全長 | 7407mm |
| 全幅 | 2000mm |
| 全高 | 2202mm |
| ﾎﾟﾆｰﾄﾗｯｸ走行時 | 1822mm |
| 全重量 | 9.8t |
| ブームリーチ | 4016mm |
| 最大掘削高さ | 2993mm |
| コンベア能力 | 150m3/H |
| コンベア幅 | 700mm |
| 電動機 | 37kW 4P 400V |
| 操作器 | ﾜｲﾔﾚｽﾘﾓｺﾝ(429MHz) |
| ﾚｰﾙｹﾞｰｼﾞ | 914，762mm |
| その他 | ブレーカ用配管付 |

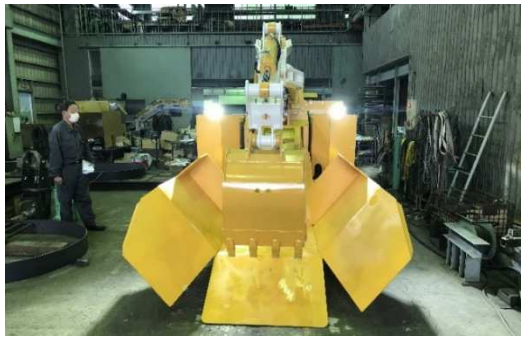


写真-4　積込機

また積込機からずり鋼車へ土砂を中継積み込みこむ機械，トレンローダーも開発した。土砂搬送するベルトコンベアは専用のずり鋼車に搭載される形となっている。搬送能力は積込機に合わせて 150 ㎥/H 以上で,曲線半径 200m に対応できるように本体フレームが 5m 毎のヒンジ構造で，折れ角 2 度まで屈曲可能としている。(写真-5)

写真-5　トレンローダー

## 3．遠近距離可視化システムの開発

積込機の遠隔操作を実現すべく，今回のシステムは以下の問題点の解決を主眼して開発を進めた。

### 3.1　トンネル施工における遠隔操作の問題点

この遠隔操作システムをトンネル作業機械に導入した場合,以下の問題の発生が考えられる。

### (1)　モニター映像の奥行き感の欠如

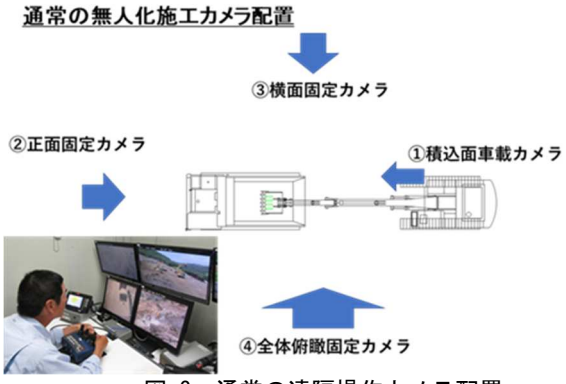



図-3　通常の遠隔操作カメラ配置

カメラ映像における最大の問題点は奥行き感である。2 次元映像カメラを使用した通常の遠隔操作では奥行き感の把握は難しく,車両本体車載カメラに加えて，周囲の固定カメラを後方と横方向に配置して，奥行き感を把握して作業する方法がとられる。(図-3)

トンネルの遠隔操作となれば,発破作業や空間の狭さの制約により複数方向からのカメラ設置自体が難しく,車載カメラが主体となり奥行き感の担保が難しい。小断面トンネルになれば更に制約を受ける。今回の開発の主眼になった問題である。

**(2) ジャイロ,GNSS 等の使用できない環境**

無人化施工における GNSS や 9 軸ジャイロセンサー等を使用したガイダンスシステムは,映像データを補完する技術として大変有効であるが,トンネル内ではこうしたデバイスが使用できない環境である。通常トンネル内でこれを補完する手段として,機体センサーと,TS(レーザー測量機)を組み合わせ絶対位置を特定する方法等が採用されている

### 3.2　積込機の遠隔操作システム

今回積込機の開発では機体後方からの操作であるが,最終的に操作室での操作を考慮してリモコンによる操作システムの導入となった。(図-4)

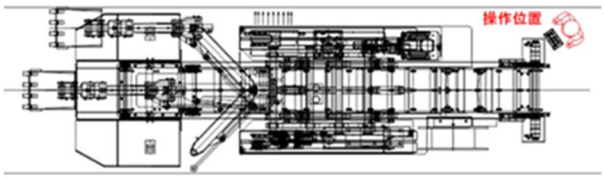



図-4　積込機の操作位置

また能力増強により車体が大型になり,開発方針第 1 段階での切羽から少し離れた機械後方部で操作する場合において,前方の積込状況が確認し辛く,映像視認による遠隔操作になる。従ってどのように切羽目視に対応するか問題となった。基本的には機械前方に車載カメラを取り付け,操作位置付近に映像モニターを設置する。

しかし,機器配置から考えるとカメラを多数取り付けることは前述したとおり難しく,スペースも十分ではない。また通常の GNSS や 9 軸ジャイロセンサーの使用したガイダンスシステム導入は難しい。機械後方で操作する場合と今後の操作室における操作も考慮すると,このような状況でどのようにして映像により奥行き感を担保する方法があるか,検討する必要があった。

### 3.3 距離カメラを使用した距離可視化の実験

遠隔操作を前提に奥行きの担保する方法を数案検討し,予備実験を実施して有効性を確認した。

**(1) 距離計カメラシステムの選定**

①高精細映像使用（４K）による距離認識
②俯瞰カメラ使用の上空視点による距離認識
③距離計カメラを使用の色による距離認識

以上のとおり数案を文献等[1]により検討した結果,①高精細映像の使用でも奥行き感の担保は十分ではない。③俯瞰カメラ映像は移動の際に周囲の状況の把握は容易であるが,操作作業者目線でないので操作性向上にはつながらない。この中で③距離計カメラを使用した色による距離認識は遠隔操作用として実用化されていないが,操作作業者が直感的に状況判断できるので有効ではないかという結論になった。

**(2) システム構成と予備実験**

距離計カメラを使用した色認識システムの有効性を確認するために,開発機と同等能力の機械に距離計カメラと色認識が可能なシステムを搭載し,現場で視認実験を実施した。

①実験場所　国道 103 号線青ぶな山トンネル避難坑工事
②実験内容　積込み作業における距離計カメラを使用した距離の色認識映像による操作作業者の視認感覚実験
③使用機材　ITDLab 製ステレオカメラ ISC-100XC （100 万画素　有効画角：83°）
ノートＰＣ　CF-SZ5 (Windows10)
レーザー距離計 BOSCH 製(GLM500)
照度計 TRUSCO 製(TLX-204)
④搭載機械　積込機 KL-15（コトブキ技研）
⑤機器取付　（図-5）のとおり操作席前方にカメラ表示システムを設置
⑥色の設定　色を 40cm 間隔で設定
⑦実験確認方法　複数操作者からのヒアリング

図-5　距離計カメラによる視認実験状況

本距離計ステレオカメラの映像は白黒出力である。一眼は映像表示用,もう一眼は計測用のカメラとなっており,映像出力は距離を色で表す視差映像,白黒生映像を合成した合成映像を採用した。

**(3) 実験方法**

以下の条件で実験を実施した。

①積込みバケットと積込み部付近が視認できるようにカメラを設置。
②最初,操作作業者は目視で通常の積込み作業。
③次に操作作業者は,ノートＰＣのモニターに表示されている合成画面を見ながら 1 分程度作業

を続け,この動作を 3 回繰り返す。

**(4) 操作作業者のモニター結果**

操作作業者からの意見は以下のとおりであった。

② 色の認識による位置確認は大変容易で使いやすい。

②あまり色が多くない方が良い。

③積込みブレード部の境界で段差があるので,ここで色が変わると作業がしやすい。

**(5) 映像分析結果**

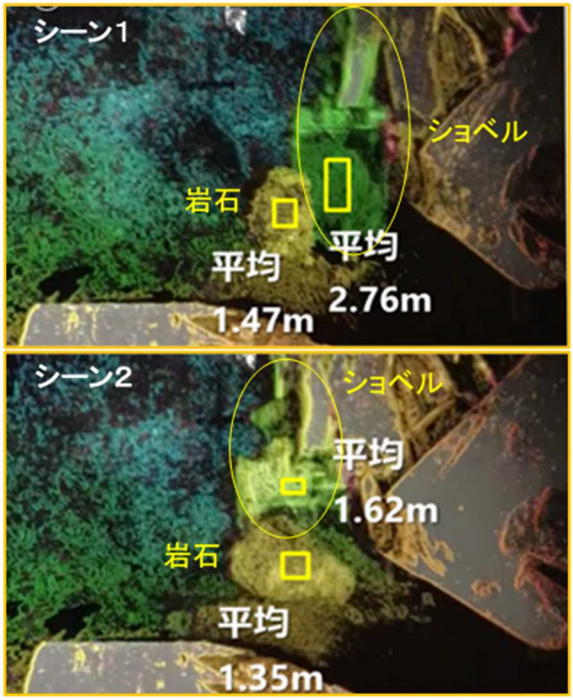



図-6　画像分析画面（上：シーン１　下：シーン２）

シーン 1,シーン 2 共に両方ショベルと岩石が接しているように見えるが,ステレオカメラで測距をするとシーン 1 は 1m 以上離れ,シーン 2 では 10～40cm 程度の近距離にあることが判った。また合成画像の色を見比べると,シーン 2 のバケットは岩石と近い黄色に着色され,より岩石に近い位置関係にあることが分かる。（図-6）

**(6) 実験のまとめ**

実験結果より距離計カメラを使用した色による距離表示は,直感的かつ容易に視覚アシストが可能であると認識できた。ただ表示色に関しては掘削範囲の限界距離,積込みブレード境界等のポイントになる距離で色分けし,色を少なくする方が認識しやすかった。この実験結果を基にシステム開発を進めた。

## ４．遠近距離可視化システムの開発

今回の積込機用のシステム開発では左右積込ブレード境界部の認識及び機体中心にブームが配置されているため,左右 2 か所に距離計カメラを設置したが,画面を左右均等に表示すると画面認識に迷いが出ることがわかり,今回は左側カメラ映像を中心に全体表示をし,右側カメラ映像は右側境界部を中心に映像補完をする合成画面とした。(図-7)

図-7　システム表示画面と距離計カメラ

またカメラ位置,角度入力によって積込みブレードの位置を平行に色表示できるように,微調整が可能なカスタム設定ができるようにした。今回は積込みブレード面エリア,積込み可能エリア,それ以外のエリアと３色に色分けし,どこまで積込みが可能か認識でき,少ないカメラ視点で奥行き感の担保が可能になることが確認できた。これにより操作作業者は直感的に奥行感が把握でき,操作性が改善されると考えられる。

## ５．今後について

今回完成した遠近距離可視化システムは小断面トンネル積込機に試験的に搭載するが,現場使用で視認性の検証を加えて,実際の遠隔操作を目指してブラッシュアップを図りたいと考えている。また実映像との違いの違和感をいかに低減するかが今後の課題である。

## 参考文献

(1) 建設機械の遠隔操作技術向上に関する共同研究報告書　平成２８年１２月　（国立研究開発法人土木研究所　国立研究開発法人情報通信研究機構）

# 35. 「全自動ドローン」で測量と安全巡視を無人化

## ～目視外補助者なし飛行（レベル 3）による測量と安全巡視を実現～

株式会社フジタ　　○ 上原　広行
株式会社フジタ　　松岡　祐仁
(株)センシンロボティクス　　長尾　建

### 1．はじめに

建設業の固有の課題として，就労者数の減少，低い労働生産性，長時間労働への対応などを抱えている。とくに建設現場で働く現場監督は，工程管理・原価管理・品質管理・安全管理などを含む施工管理の業務が多岐にわたり非常に多忙である。また，現場の進捗確認や安全管理のため，日常業務として現場職員が現地に赴き場内を巡視する必要がある。

そうした中，近年の建設現場では，ドローン（無人航空機，UAV，Unmanned Aerial Vehicle）の活用が急速に進んでいる。その用途は，工事の進捗管理や構造物の点検をはじめ，空撮写真を利用した現場の 3D モデルの作成，出来高管理などの活用事例が増えている。ただし，ドローンを飛行する場合，操縦者と監視人が最低 2 名必要（図-1）で，とくに測量に多くの時間がかかる土木現場ではドローン運転業務の省力化が課題となっている。

そこで，現場オペレータの介在なしに，現場内の安全巡視と測量業務を行う建設現場向け「全自動ドローンシステム」を㈱センシンロボティクスと共同で開発し，建設現場において国内初となる目視外補助者なしレベル 3 飛行（図-2，無人地帯で補助者なしで飛行できるレベル，現場内はドローン飛行を認知している者のみで，無人地帯として認定される）を実現した。

図-1　ドローンの飛行における人員について

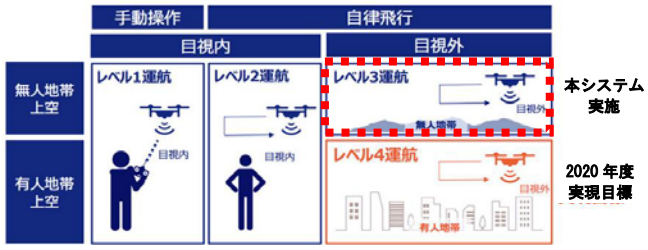



図-2　ドローンの飛行形態
※国土交通省「無人航空機の飛行形態」より抜粋

本技術の開発は，建設現場における省力化・省人化を目標とし，2 年前に開発に着手し，複数現場での実証試験による改良を繰り返し現場に対応できるよう機能性の向上に取り組んできた。

本論文では，「北陸新幹線，敦賀車両基地路盤他工事」（福井県敦賀市）と「令和元－4 年度横断道羽ノ浦トンネル工事」（徳島県小松島市）における現場試行の検証結果について述べる。そして，全自動ドローンを運用し，日々安全巡視 2 回，写真測量 1 回の作業を 1 カ月間実施した結果，出来高管理（測量から土量算出）に必要な時間を従来の 1/4 に短縮するとともに，従来は必要だったドローンの操作，補助に携わる人員 2 名の省力化を達成した成果について報告する（図-3）。

図-3　全自動ドローンによる測量・安全巡視

## ２．システムの概要

本システムは，自動離着陸，自動充電，開閉式ハッチなどを備えたドローン基地（「SENSYN Drone Hub」：㈱センシンロボティクス提供）と，当社の建設現場での安全巡視ノウハウや，簡易ドローン測量が可能な「デイリードローン®（2018 年 2 月発表の簡易ドローン測量技術）」，標定点と呼ばれる測量用の目印を設置せず，高精度な出来形計測が可能な「斜め往復撮影ドローン（2020 年 12 月発表のドローン測量手法）」の技術を組み合わせたシステムである。指定時刻に基地からドローンが自動的に離陸し，事前に指定したルートを通り，測量と安全巡視を実施後，自動で着陸し，充電を実行する機能を現場運用レベルまで向上させた。

### 2.1　ドローン基地

ドローン基地には，風速・気温・相対湿度・雨量・気圧を測る気象計が搭載され，飛行中に風速など設定条件の閾値が超えた場合，自動で基地へリターンする機能が搭載している。

また，自動離発着警報機搭載により，ドローンが離発着する際には回転灯とブザーで周囲に周知することができ，外部監視カメラによりドローンの離発着状況や飛行状況を常に監視することができる。このような補助システムの対応により，過酷な建設現場の環境に耐えうる堅牢性の高いシステムとなった。

着陸精度向上の工夫として，ドローン基地に，機体の着陸誘導のため赤外線センサーを搭載し，機体がドローン基地の上空に来た際に機体の赤外線赤外線を認識，この情報を元に機体制御しドローン基地から位置がずれないよう飛行制御を行う仕組みである。

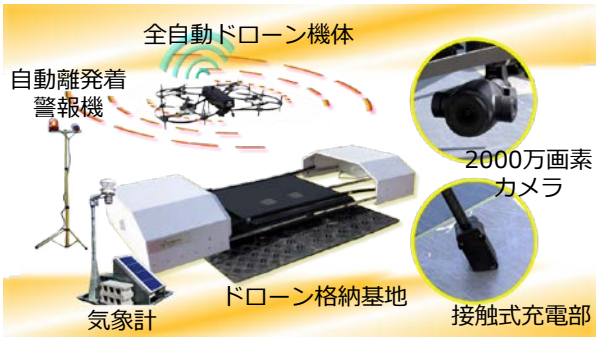
機体の充電については，機体の脚部とドローン基地の金属面が接触することで充電を開始する。充電時間は 1 時間で満充電（40 分で 80%）である。

また，本システムには FlightAware(航空便リアルタイム追跡)機能が搭載され，周囲の航空機飛行状況をネット上で確認でき，より安全な飛行が可能である。

ドローン基地の仕様を表-1，システム構成図を図-4 に示す。

表-1　ドローン基地 仕様

| | |
|---|---|
| サイズ | 1.89m(縦)*1.77m(横)*0.8m(高さ) |
| 重量 | 149kg |
| 入力 | 100V~240V AC / 16A |
| 動作保証温度 | -10℃ ~ +40℃ |
| 防水・防塵性能 | IP54 相当 |
| 耐久性能 | 100,000 回以上の開閉テスト済み |




気象計 計測項目
・風速　・気温　・相対湿度
・雨量　・気圧

図-4　全自動ドローンシステム構成図

### 2.2　ドローン機体

ドローン機体は，SENSYN Mark-2 を使用した。仕様は表-2 に示す。搭載カメラの仕様を表-3，表-4 に示す。

ドローン機体には，カメラを 2 台搭載できるものであり，1st ジンバルには，RGB カメラと赤外線カメラ，2nd ジンバルは用途に応じて，ズームカメラと写真測量用カメラに切り替えることができる（図-5）。

表-2　ドローン機体(SENSYN Mark-2)仕様

| | |
|---|---|
| サイズ | 対角 88.8cm |
| 重量 | 7.5kg（1st ジンバルのみ） |
| 入力電源 | 25 分（ホバリング時） |
| 動作保証温度 | -10℃ ~ +40℃ |
| 防水・防塵性能 | IP54 相当 |
| 耐風性能 | 10.0m/s |
| 充電時間 | （空の状態から）約 40 分で 80%<br>約 1 時間で満充電 |

表-3　搭載カメラ仕様（1st ジンバル）

| カメラ | 1st ジンバル | |
|---|---|---|
| | RGB Camera (Fixed lens) | Thermal Camera |
| センサー | 1/2.5" CMOS 8.5MP | FLIR Boson |
| サイズ | 1920 (H) x 1080 (V) | 320 (H) x 256 (V) |
| | 200万画素 | 8.5万画素 |
| レンズ | DFOV=57.4 , HFOV=47.3 | HFOV= 92 or 50 |
| | EFL : 7.2mm | EFL : 2.3mm |
| ビデオ解像度 | 1920×1112 30fps | 640×512 9fps |

表-4　搭載カメラ仕様（2nd ジンバル）

| カメラ | 2nd ジンバル | |
|---|---|---|
| | 20MP Camera | Zoom Camera |
| センサー | APS-C (23.2 x 15.4mm), "Exmor" CMOSセンサー | CMOS 1/2.3" |
| サイズ | 5456 (H) x 3632 (V) | 4000 (H) x 3000 (V) |
| | 2,000万画素 | 1,200万画素 |
| レンズ | DFOV=57.4 , HFOV=47.3 | HFOV= 92 or 50 |
| | EFL : 7.2mm | EFL : 2.3mm |
| ビデオ解像度 | — | — |
| | | 光学Zoom [x] 1x~3.5x<br>デジタルZoom [x] 1/2.5" |

図-5　ドローン機体

## ３．本システムの現場試行

### 3.1　現場試行の概要

建設現場において，全自動ドローンの検証を前章の適応現場 1 と 2 の現場で行った。

① 試行現場 1（図-6）

工事名称　：北陸新幹線，敦賀車両基地路盤他
工事場所　：福井県敦賀市地内
発　注　者：独立行政法人鉄道建設・
　　運輸施設整備支援機構大阪支社
検証期間　：2019 年 3 月，12 月 造成工にて試行

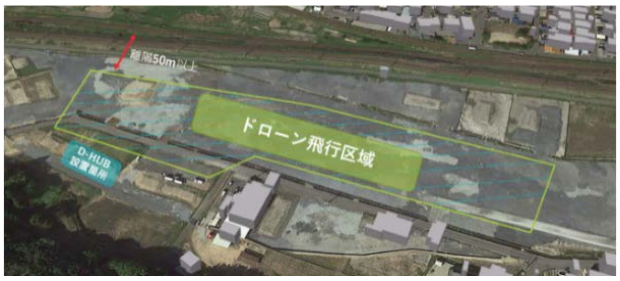



図-6　試行現場全景（車両基地造成）

② 試行現場 2（図-7）

工事名称　：令和元－４年度横断道
　　羽ノ浦トンネル工事
工事場所　：徳島県小松島市櫛渕町久ヶ谷
発　注　者：国土交通省四国地方整備局
検証期間　：2021 年 3 月～4 月 盛土工にて試行

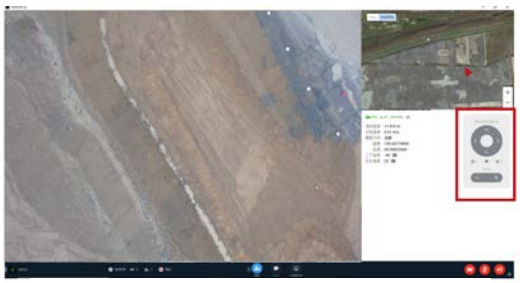
図-7　試行現場全景（トンネル工事盛土）

### 3.2　検証結果

#### 3.2.1　全自動飛行について

ドローン基地は，接触式の自動充電を実施するため，開閉式ハッチを備えた全天候仕様となっている。しかし，当初の試行現場 1 において，建設現場内の限られた設置条件（強風の影響を受けやすい裸地など）により，まれに自動着陸をミスするケース（手動に切替えて着陸）が発生し，成功率は 90%程度となった。突発的な強風と，着陸時の誘導センサーに起因するシステム上の問題であったが，すぐに基地近傍におけるドローン高精度誘導の手法と赤外線センサーに改良を加え，1 年後の試行現場 2 においては，1 ヶ月の連続運行（119 回飛行）において成功率を 100%まで向上させ，頑強性と実用レベルの高さを証明した。

また，試行現場 1 では，超長距離におけるシステム運行管理の信頼性を検証するため，東京本社と現場福井県の約 350km 間での映像通信試験を実施し，遠隔拠点からでも本システムの運用に問題がないことを確認した（図-8）。



ドローンカメラのリアルタイム映像

本社（東京）と現場（福井）の映像伝送の様子

図-8　全自動ドローンの運用状況（超長距離）

#### 3.2.2　目視外飛行の検証

目視外飛行の必要条件は，操縦者がいないため，運行監視者にドローンの位置情報や電波状態，バッテリ残状態などを常時映し出すモニタと，さらにＧＰＳ機能に不具合が発生した場合に自動帰還システムが装備されていること，この安全が 100%担保されないと運行は承認されない。

そこで，本システムは，これらの安全機能の不具合に対し，すぐにマニュアル操作に切り替えるバックアップ体制を装備していたが，今回の目視外検証において，飛行中のトラブルは一切発生せず，目視外飛行の安全は確保された。

また，近隣に対する安全を考慮して，現場内エリアでレベル 3 飛行を実施中であることを工事看板や説明会をとおして周知徹底することで注意喚起を行った。

### 3.2.3　安全巡視機能の検証

現場事務所や遠隔拠点から現場内の様子をリアルタイムに把握可能である（図 9）。また，AI（人工知能）で対象物を自動抽出する機能（図 10）も備え，撮影日の異なる同じ場所の画像を比較して現場の変化を把握できるメニューも搭載し，安全巡視業務の高度化を実現した。

図-9　全自動ドローンの運用状況

図-10　自動安全巡視 AI 変状比較

### 3.2.4　写真測量について

写真測量については，簡易ドローン測量が可能な「デイリードローン®」，標定点と呼ばれる測量用の目印を設置せず，高精度な出来形計測が可能な「斜め往復撮影ドローン」の技術を全自動ドローンシステムに組み合わせて，高精度な写真測量技術を可能にした。

全自動ドローンの写真測量の作業時間（準備～測量～解析）については，上記 2 つの技術を組み合わせたものであり，簡易ドローン測量と標定点不要なドローン測量手法により，測量面積 2ha のエリアにおいて，9 時間から 2 時間（従来比 1/4）と時短となった（表-6）。

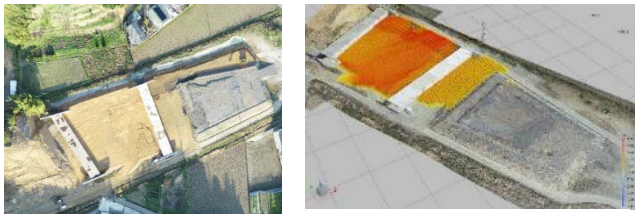
全自動ドローンによる出来高測量の精度については，試行現場 2 において路体盛土工の土量算出の推移で評価した結果，ダンプ積載量からの地山換算で比較したところ，土量算出の較差は概ね 1%程度におさまった。図-11 の（a）に盛土施工箇所全景写真，（b）に Sfm 処理にて 3D 点群データを点群処理ソフト（福井コンピューター：TREND-POINT）で重ね合わせた結果の一例を示す。

表-6　写真測量の作業時間比較

■事前準備～測量～解析時間比較（測量面積2haで検証）本システム測量

| | | 手順 | 適用機器 | 従来 | デイリードローン＊1 | 斜め往復撮影ドローン |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 事前準備 | ① | 標定点計測 | 標定点／GNSS搭載標定点 | 4時間 | 1時間 | 設定点なし |
| 測量 | ② | UAV飛行 | ドローン／RTK-GNSS搭載ドローン | (0.5時間) | (0.5時間) | RTK-GNSS搭載ドローン＊2 (0.5時間) |
| 解析 | ③ | 標識紐付け | SfM／MVS解析ソフト | 5時間 | 2時間 | 2時間 |
| | ④ | 点群処理 | | | | |
| | ⑤ | 点群編集 | 点群編集ソフト | | | |
| | ⑥ | 3D処理 | 3次元CAD | | | |
| | | | 時間合計 | 9時間 | 3時間 (従来比1/3) | 2時間 (従来比1/4) |

＊1.　2018年2月に当社が発表した簡易ドローン測量技術
＊2.　RTK-GNSS測位：高精度GNSS測位技術



a.　盛土箇所全景　　b.　土量算出画面（一例）3D 点群データ

図-11　盛土工 土量算出状況

## 4．おわりに

本システムは，建設現場では初の目視外飛行・補助者なし飛行レベル 3 を可能にしたことにより，省人化に加え，作業効率も比較的向上した。以下に 5 点の特徴を示す。

○ドローン飛行の操縦者と補助者（2 名）が不要で 100%の省人化
○現場の出来高測量と安全巡視業務の時短で効率が 50%アップ
○独自ドローン技術を導入した自動写真測量で出来高測量業務の時間を従来の 1/4 に短縮
○日々の出来高を土量推移で把握でき工事原価を適正管理
○空撮により日々の施工進捗が可視化されるため，施工計画の変更などにも即時対応可能

今後は，大規模造成現場などでの導入を進め，トンネル坑内など衛星利用測位システム（GNSS）の利用が難しい条件での導入も検討を進める所存である。

# 36. 四足歩行ロボットによる建設現場の生産性や安全性の向上に関する開発

鹿島建設株式会社　○ 三室　恵史
鹿島建設株式会社　大浜　大
鹿島建設株式会社　村瀬　諒介

## １．はじめに

近年建設業界では、生産年齢人口の減少や技能労働者の高齢化に伴う将来的な就業者不足に対応するため、新規入場者の確保や生産性の向上は喫緊の課題となっている。このような背景のもと、IT技術の導入や自動化など ＤＸ（デジタルトランスフォーメーション）への取組みを加速させ、現場や施設の巡回・点検、工事の進捗管理や安全管理などの業務に対してロボット技術の導入を進めている。2018 年から四足歩行ロボットの建築・土木現場への適用性に関する開発に着手し、2020 年からは(株)竹中工務店、(株) 竹中土木、弊社の３社による共同研究を開始して実用化に向けた検討を加速させている。

本稿では、四足歩行ロボット「Spot」について、建設現場への適用性の検証を行うために、以下３件の POC（Proof Of Concept : 概念実証）を行った。

・「Spot」の建設現場での適用
・トンネル坑内における自動計測
・施設の自動巡回・点検

上記 POC の実施によって得られた知見や課題を報告する。

## ２．「Spot」の建設現場での適用

四足歩行ロボット「Spot」を導入するにあたり、ロボット製作会社の Boston Dynamics 社（以下 : BD 社）に依頼し、2018 年 11 月にトンネル現場を検証場所として、土木現場における「Spot」適用の実現性について検証を行った（**写真-1**）。

**写真-1　現場適用性の検証**

### 2.1　検証内容

トンネル現場における検証内容を以下に示す。

① 自律歩行の特性を活かして、予めマッピング情報を基に設定したルートに沿って、自動巡回・点検を実施。
② 標準ペイロードである PTZ（パン・チルト・ズーム）カメラおよび 360° カメラを装備した「Spot」を遠隔操作により、切羽の写真撮影やトンネル設備等の点検を実施。

### 2.2　検証結果と課題

検証結果と課題を以下に示す。

① 自律歩行は、標準装備のステレオカメラを用いた Visual SLAM により行っている。予めマッピングを基に設定したルート通りに自律歩行できることを確認し、ルート設定時には無かった障害物も自動回避して、再びルートに戻ることも確認できた（**写真-2**）。

**写真-2　自律歩行によるトンネル坑内の巡視**

② 遠隔操作の「Spot」によって撮影したトンネル切羽の写真は、切羽より 30m程度離れた場所からでも切羽の状況を鮮明に捕えることを確認。光学 30 倍のズームカメラによる撮影では、切羽の漏水やクラック等の詳細状況を更に鮮明に捉えていることを確認した（**写真-3、写真-4**）。

**写真-3　切羽写真(30m離隔)　写真-4　切羽接写(30倍)**

課題としては、建設現場特有の悪路やぬかるみ、階段等における歩行性能の向上、また、雨天、粉塵等の悪環境下においても適用できる機体として、耐環境性能を向上させることが必要である。

### 2.3　課題への対応

歩行性能の向上や悪環境下における適用を可能にするため、歩行性能に関しては歩幅を任意に変えられる機能の追加、悪環境下における対応については、各部材の防水性、防塵性の性能向上を BD 社にて実施して、現場適用の実現性が有ると判断した。（写真-5、写真-6）。

写真-5　悪路走行

写真-6　悪環境下での適用

## 3．トンネル坑内における自動計測

通常、トンネル現場においては工事職員による変位計測を２回/日程度行っている。この計測作業は、昼夜の作業交代時間など切羽作業を止めているタイミングに行うことが多いため、工事職員への負担は大きく、残業時間増加の要因となっている。また、計測機器の頻繁な盛替え、重機の移動など生産性や安全性を阻害する要因ともなっている。そこで工事職員による計測作業を、「Spot」に計測機器を搭載して、トンネル坑内において自動計測を行う実現性について検証を行った。

### 3.1　自動計測の概要

自動計測の概要は、事務所等からの遠隔操作による指示により、計測機器を搭載した「Spot」を自律歩行させ、トンネル坑内の計測を自動に行うものである。自動計測を行う為には事前に歩行ルートと計測地点を、マッピング情報を基に設定し、さらに各計測地点において、計測点および後視点の位置と座標データを、計測器（トータルステーション、以下：TS）にティーチングする。

計測方法は、スタート地点から計測地点へ移動後、後方交会法により自己位置を認識し、その後計測を行う。計測はプリズムを視準する坑内変位計測と、ノンプリズムによる断面計測を行い、計測終了後に自動で次の計測地点へ移動する。この計測作業を繰り返し行い、最後に開始地点に戻る（図-1）。

今回の POC においては、開始地点での「Spot」の起動とバッテリーの充電・交換については、人手作業により行った。

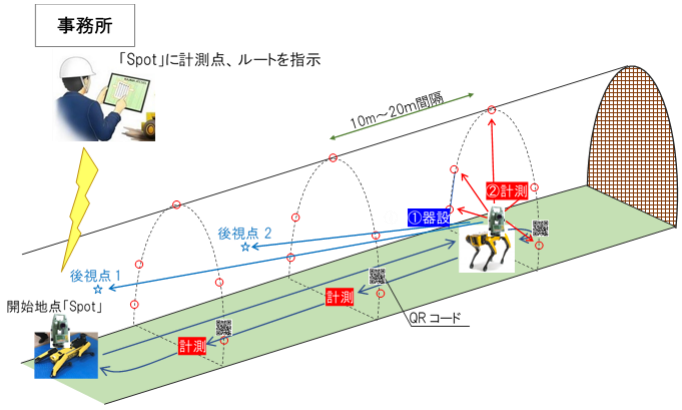


図-1　トンネル坑内自動計測システムの概要図

### 3.2　システムの構成

本システムは、自動計測と計測データの収集・管理を行う（株）演算工房の CyberNATM（以下：CN）システムと、計測機器の移動・据付を自律歩行により行う「Spot」の機能から構成されている。また、「Spot」への指示は CN システムから行う。

使用する計測機器を以下に示す（図-2）。

- 計測器（TS）
- 自動整準台
  ±4°まで計測器（TS）を自動で水平にする
- CN タブレット
  遠隔より CN システムへの指示と操作を行う。
- ZigBee 受信機
  CN タブレットとの通信に使用。
- モバイルバッテリー
  ZigBee 受信機へ給電を行う。

図-2　計測機器構成

「Spot」は起立時も常に安定した姿勢（水平）を保とうとするため、目視では確認できない程度ではあるが常に微動している。微動している状態では計測できないため、計測時は「Spot」を安定した姿勢で静止させる機能の追加を行い、計測を可能とした。

### 3.3　ＰＯＣの内容と結果

計測地点において行う後方交会は、ティーチング時に設定した TS の向きにあわせて「Spot」の向

きも精度良く停止できれば、エラーを発生させることは無い。ただし本システムでは、自律歩行により計測地点へ移動した「Spot」の向きは、繰返し精度が良くないため、ティーチング時に設定した TS の向きとのずれが生じ、後視点が TS のサーチ範囲から外れてエラーを発生させてしまう。そこで、計測地点に QR コードを設置し、その QR コードと「Spot」との相対距離をステレオカメラによって確認して、ティーチング時に設定した TS の向きにあわせて「Spot」の向きを補正できるようにソフトウェアを改良した（写真-7）。

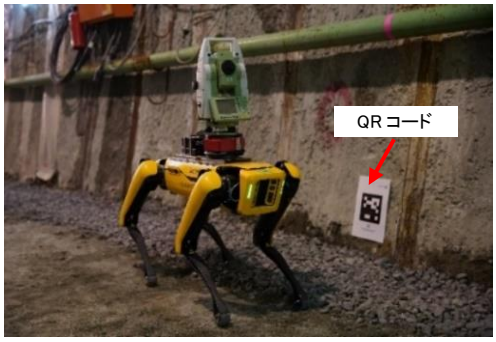



写真-7　計測地点で QR コードによる補正状況

POC は、初めにトンネル坑内に開始地点、計測点１、計測点２を定め、マッピングとティーチングで自動計測の設定を行いその後、後方交会の繰返し精度や所要時間の検証を行った（図-3）。

後方交会については、QR コードによる補正を行うことによってエラーは大幅に減少した。エラーが発生した場合でも、再度 QR コードによる補正を行う機能を追加したことによって、後方交会が必ず成立することを確認できた。

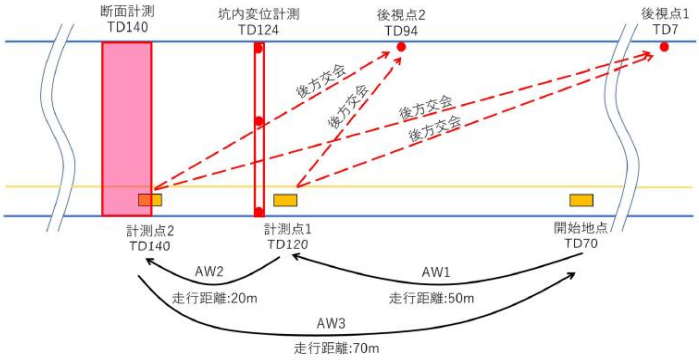



図-3　POC 実施状況図（平面図）

写真-8　後方交会状況

所要時間については、図-3 に示したルートでは２断面を計測するのに、人手（測量士）では 14 分かかったのに対し、「Spot」による自動計測では 8 分で完了した。人手により行った場合、計測器の移動と据付けの時間が「Spot」よりかかっているのが所要時間の差となっている。

### 3.4　今後の展開

今回の POC で、「Spot」によるトンネル坑内の自動計測が可能であることが確認できた。今後は自動計測に加え、切羽の観察、坑内巡回、設備の点検等も含めて実施できるように機能拡充を行い、トンネル現場での実適用を目指す。

## ４．施設の自動巡回・点検

「Spot」による施設の自動巡回・点検の実現性についての検証を、弊社の関連会社が維持管理を行っているメガソーラー施設で行った。

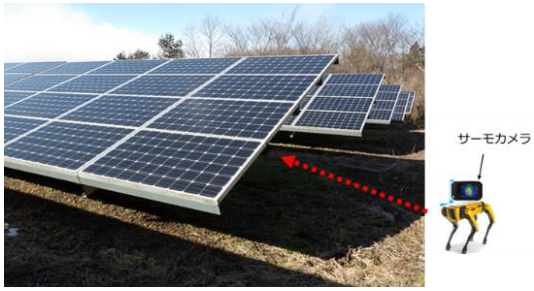



図-4　メガソーラー施設の巡回・点検

### 4.1　ＰＯＣの内容

メガソーラー施設の定期点検の一つに、ソーラーパネル裏面の点検がある。この点検は赤外線サーモカメラ（以下：サーモカメラ）を使用して、ソーラーパネル裏面のジャンクションボックスおよび接続部の不具合や損傷を、周囲の正常部との温度差より判別する。ただし、斜めに設置されているソーラーパネルの裏面の撮影は、かがんだ姿勢で長時間行うため苦渋作業となっている。そこで今回「Spot」にサーモカメラを搭載して、ソーラーパネル裏面を自律歩行で自動撮影することによる、巡回・点検の実現性について検証を行った。今回使用したサーモカメラは、FLIR 社製の C5（写真-9）である。特徴はサーモカメラによる映像に、カメラの映像を反映させて記録することができる。これにより、サーモカメラで撮影した映像に、ソーラーパネル番号や柱番号を記録できるため、サーモカメラで判別した異常部分の場所を後から特定することができる。

写真-9　サーモカメラ

併せてコントローラーによる遠隔操作で、キュービクル等の電気設備の点検の実現性についても検証を行った。

写真-10　ソーラーパネル裏面

写真-11　裏面状況

### 4.2　ＰＯＣの結果

自律歩行の「Spot」で、ソーラーパネル裏面が撮影できることを確認した。また撮影した映像から、ジャンクションボックスや接続部の異常の判別が可能なことも確認できた。

写真-12　ソーラーパネル裏の自動点検状況

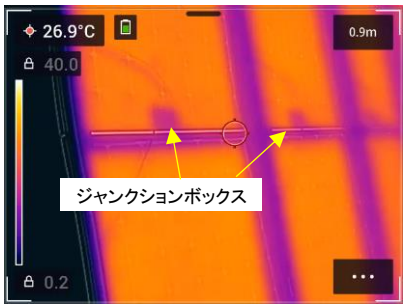



写真-13　赤外線サーモカメラの映像

ただし、ステレオカメラを用いた Visual SLAM での自律歩行だと、光や影の影響より自己位置を見失い自律歩行が不能となるケースがあった。そこで別途搭載した LiDAR を用いた LiDAR SLAM で自律歩行を試したところ、自己位置を見失うことなく自律歩行が可能であることを確認した。自律歩行を行う時は、使用場所の環境や状況に応じて用いる SLAM 技術を選定する必要があることが分かった。

またコントローラーによる遠隔操作で、キュービクル等の電気設備の点検は、「Spot」のカメラを通じて設備の外観を、目視による点検が可能であることを確認した。

### 4.3　今後の展開

今回の POC ではメガソーラー施設での自動巡回・点検の実現性について検証を行い、ソーラーパネル裏面の点検への適用が可能なことを確認した。今後は今回得られた知見を活かし、他の施設での自動巡回・点検の実適用に向けた検証を進める予定である。

## ５．おわりに

建設業の担い手不足への対策、生産性や安全性の向上を目的に、2018 年より四足歩行ロボット「Spot」の建設現場での適用を目指して実現性について検証を行い、ユースケースの探索を行ってきた。今回行った POC によって、トンネル坑内の自動計測とメガソーラー施設の自動巡回・点検が実現可能であることを確認できた。また、他のユースケースの探索も引き続き行い、適宜 POC を実施して、現場へ早期に適用できるように開発を進めていく。

しかし現状は、実際にロボットを現場で適用するには、いくつもの課題がある。以下に課題を示す。

- バッテリーの充電、交換をする人手がいる
- バッテリーの容量によって稼働時間が制限される（容量が大きくなれば、重量も重くなる）
- ロボットを遠隔操作するために、通信環境の整備が必要
- 建設現場や各種施設がロボットを適用する前提で計画されていないため、ロボットを適用させるのが難しい環境となっている
- 費用対効果（コスト面）
- 使用する人のロボットへの理解

バッテリーの充電に関しては、自動充電装置「Spot　DOCK」（写真-14）を導入することにより、人手を介さない完全自動での運用が可能となる。

写真-14　Spot DOCK

写真-15　Spot Arm

更に、ロボットによる作業も想定し、ものを掴んだりドアを開けたりすることが可能になる「Spot Arm」（写真-15）を導入して、作業の実現性の検証も進める予定である。

建設業でのロボットの普及には、まだまだ時間が掛かる。ただ建設業の担い不足への対策、生産性や安全性の向上を進めるためには、ロボットの適用が不可欠になると考える。そのために先ずは四足歩行ロボット「Spot」の様々なユースケースでの実現性についての検証と現場適用を進め、また（株）竹中工務店、（株）竹中土木と共同で建設業での普及活動を引続き継続していく所存である。

### 参考文献

1) Boston Dynamics：
https://www.bostondynamics.com　（閲覧日：2021.8）

# 37. 四足歩行ロボットによる現場管理業務の遠隔化・自動化に関する研究

(株)竹中工務店　技術研究所　○錦古里 洋介
戸田　武
(株)竹中土木　技術・生産本部　千葉　力

## 1．はじめに

### 1.1　背景

建築・土木業界は，投資額と建設就業者の推移（図-1）が示す通り，近年，投資額は顕著に増加するも，就業者数は微減している。高齢者が占める割合も微増しており，就労状況は依然厳しいといえる。一方で WLB 向上や残業時間低減が強く求められており，その解決策として，デジタル技術やロボット技術の導入が各所で盛んに進められている。

### 1.2　目的

現場管理には，「現地現物現時」という言葉がある。これはしかるべきタイミングで現地に赴き，現物を前にして管理することが肝要であることを言い表しているが，往復が頻繁になるなど移動時間が大きな負担になっている。そこで，現場管理に伴う移動時間の縮減を目的にロボットの導入を試みた。本論文では，前述の目的に適したロボットを選定し，

・ロボットの遠隔操縦と自律移動機能
・現場管理業務を遂行するためのテレプレゼンス機能

について，実現場での活用を想定したときの確認事項を抽出し，検証した結果を報告する。

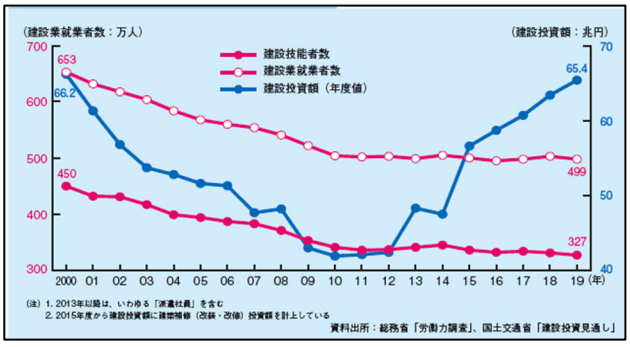



図-1　投資額と建設就業者の推移 [1)]

## 2．四足歩行ロボットによる現場管理業務の遠隔化と自動化

### 2.1　現場管理業務の選定

移動時間縮減に直結する現場管理業務を調査したところ、汎用性および導入効果の観点から以下を実現性・有用性が高い業務と想定した。

(1)現地確認や意思疎通を伴う管理業務

現地現物現時で行う業務には，主に現地を目視確認すること，現地にいる同僚や協力会社社員とコミュニケーションを取ることの頻度が高い。これを自席にいたまま遠隔で実施できれば，時間削減に直結すると考えた。

(2)進捗管理業務

現場の進捗管理は通常目視確認で行うが，自動で撮影した写真を活用して進捗管理を行う方法も考えられる。写真を後日活用できるという副次効果も期待できる。ただし本件についての検証実験結果は本報告の対象外とさせていただく。

### 2.2 現場管理業務に適したロボット

前述した現場管理業務をロボットで対応するためには，現場の階段・段差や状況変化などに対応できる，高度な走破性能を持つロボットが必要となる。我々は数あるロボットから，特に階段の走破性能を重視し四足歩行ロボットを導入した。

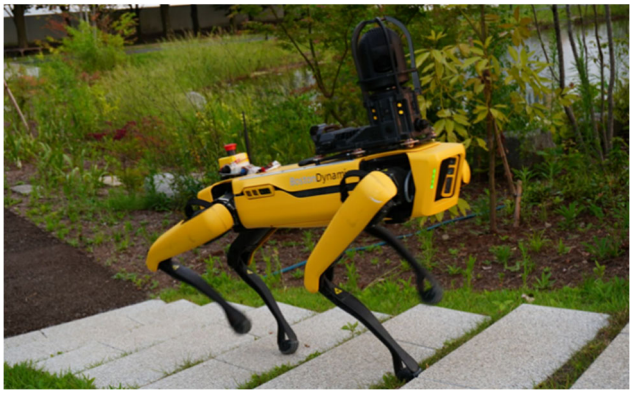


写真-1　四足歩行ロボット「Spot」外観

(1)四足歩行ロボットの仕様

四足歩行ロボットは,Boston Dynamics 社（アメリカ,以下 BD 社という）製の「Spot」を採用した。「Spot」は,高い走破性能と障害物回避能力を有しており，かつ背面にユーザーが任意の機能を付加できる設計になっているため,我々の構想にきわめ

て近いロボットといえた。外観を写真-1 に，主要諸元を表-1 に示す。

表-1　四足歩行ロボット「Spot」の主要諸元

| 項　目 | 仕　様 |
|---|---|
| 自重 | 32.5 kg　（バッテリー含む） |
| 寸法 | 全長　1,100 mm<br>全幅　500 mm<br>全高　840 mm　（立位時：背中レベルまで） |
| 平均作動時間 | 1.5 H　（ペイロードなし） |
| 積載荷重 | 約14 kg |
| 最高歩行速度 | 1.6 m/s |
| 最大乗越え可能段差 | 300 mm |
| 最大登坂角度 | ±30 deg |
| オプション（標準の一例） | 自律移動時　標準オプション ＋LiDARを使用<br>遠隔操縦時　標準オプション ＋INSPECTIONを使用 |
| ソフトウェア | バージョン　1.1.4 ～ 2.3.2　（実験当時） |

(2) 遠隔操縦機能と自律移動機能

「Spot」は２種類の方法で動かすことができる。ひとつは,操作者がコントローラを持ち，離れた場所から操縦する方法で，これを「遠隔操縦」機能と呼称する。インターネット回線を通信手段として用いることで,遥か遠く離れたところからの操縦も可能になる。他方は開始時に指示をするのみで,以後は「Spot」が自律的に歩行する方法で，これを「自律移動」機能と呼称する。これらは BD 社の開発範囲であり，将来の実運用のために，建築・土木現場においても十分に性能を発揮できるかを検証することが，今回の実験目的となる。

(3)テレプレゼンス機能

現場管理業務を遠隔化メニューとして,「テレプレゼンス」機能のロボットへの実装を考える。「テレプレゼンス」とは,遠隔地にいながらまるで現地にいるかのように感じられる技術の総称である。今回においては，没入感ではなく現地との情報交信を不足なくできることが重視される。今回報告する技術を，「テレプレゼンス」機能と呼称する。

## ３．確認事項の抽出と検証実験

前述した各機能の現場での検証実験にあたり，個々の確認事項を抽出する。

### 3.1　遠隔操縦機能の確認事項

ロボットを建築・土木現場で利活用するための環境や制約条件に特に規定はない。そのため，想定される懸念事項を実現場にて再現し，成否を確認する必要がある。確認事項の抽出結果を表-2 に示す。なお,確認項目の多くは,走破性能に関する事項であり，これは自律移動にも直結する。

### 3.2　自律移動機能の確認事項

「Spot」に搭載されている自律移動機能は，ティーチングプレイバック方式である。自律移動（プレイバック）の際，ロボットは事前のマッピングデータと現状を重ね合わせて自己位置を把握するが，認識範囲が広いほど，特徴的であるほど成功しやすい。土木現場の開けた外部空間，建築現場での無柱空間などでも自律移動が成功するかは，様々な現場を歩かせてみないとわからない。表-3 に自律移動機能の確認事項を示す。

表-2　遠隔操縦機能の確認事項

| 確認対象 | | 概要 | 確認事項 |
|---|---|---|---|
| 通常移動 | 本設階段（特別避難階段） | 踊り場のある折返しの鉄骨階段 | 安定的に移動が可能か |
| | 仮設の階段（ステップ） | 段差部に乗り移るための数段の階段 | |
| | 盛土で生成した法面 | バックホウのバケットで締め固めた程度の法面 | |
| 不安定不陸 | 床面上の不安定な状態 | コンクリート床面上に単管を固定せずに配置 | |
| | 不整地の通行路 | 土木現場での一般的な通路 | |
| 操作感 | 操縦性や視認性 | 遠隔操作をロボットを目視できない状態で行う | 操作者が安心して操作できるか，<br>周囲の視認性がよいか． |

表-3　自律移動機能の確認事項

| 確認対象 | | 概　要 | 確認事項 |
|---|---|---|---|
| 周辺環境 | 屋外環境 | 太陽光や日影などの影響 | プレイバックが可能か |
| | 空間 | スパン20m程度の建築現場 | |
| | | 半径50m超の広範な土木現場 | |
| 周囲の変化 | 事前ティーチング時点との相違 | 工事進捗に伴う壁の追加 | |
| | | 通路上の予期せぬ障害物 | |

### 3.3　テレプレゼンス機能と確認事項

「テレプレゼンス」は，人間の視覚・聴覚・発話機能を備えることが最低限必要である。また図面や指示を明確に相手に伝える方法があるとよいと考えた。表-4 に我々が必要と考える機能および実験での確認事項を示す。

表-4　テレプレゼンス機能と確認事項

| 機　能 | | 概　要 | 確認事項 |
|---|---|---|---|
| 会話<br>図示<br>説明 | 特定の相手との顔を見ながら会話 | 遠隔会議システム | 作業所環境の中で十分に対話が成立するか，<br>（遅延の有無、聞き取りやすさ） |
| | 図面や資料などを操作者側から明示 | プロジェクターにて壁や床などの平面に投影 | 作業所環境の中で相手が十分認識できるか，<br>（輝度や解像度） |
| | 特定の相手とのやりとりを開始するための呼びかけ | マイク・スピーカー | 作業所環境の中で、特定の相手が呼びかけられていることに気づくか<br>（出力の大きさ） |
| 周囲の確認<br>（視覚<br>聴覚） | 現地で確認したいところを詳細に見る | 高精細カメラ<br>（パン・チルト<br>・ズーム機能付き） | 施工管理するレベルで対象物を視認できるか |
| | 歩行時に周辺の状況を視認、また操作者に向けたて合図を認識 | 歩行補助・周辺視認用カメラ | 作業所環境の中での十分に視認できるか |
| | 周辺の作業音や、呼び止められている声を聴く | マイク | 作業所環境の中での発生音を認識できるか |

## ４　検証実験と結果

### 4.1　実験実施現場

3.1~3.3 に示す確認事項を現場実験にて評価した，実験実施現場の概要と実施時期を表-5 に示す。な

お、表-1 に示す自律移動用オプションは，実験 A・B では使用せず，本体の赤外線を使用したデプスカメラのみ，実験 C~E にて＋LiDAR を採用した。

表-5　実験実施現場一覧

| | 用途 | 規模 | 延床面積・延長 | 実施時期 |
|---|---|---|---|---|
| 実験A | 複合型商業施設<br>（福岡県） | 地下　－<br>地上　9階<br>塔屋　－ | 約20,000m² | 2020年2月 |
| 実験B | 道路<br>（神奈川県） | 切り盛り土<br>約 2,210千m² | 約2,000m<br>（延長） | 2020年8月<br>（1回目） |
| 実験C | 物流施設<br>（神奈川県） | 地下　－<br>地上　6階<br>塔屋　－ | 約300,000m² | 2020年10月 |
| 実験D | 事務所ビル<br>（大阪府） | 地下　1階<br>地上　21階<br>塔屋　2階 | 約30,000m² | 2020年11月 |
| 実験E | 道路<br>（神奈川県） | 切り盛り土<br>約 2,210千m² | 約2,000m<br>（延長） | 2021年3月<br>（2回目） |

## 4.2　遠隔操縦実験と結果

(1) 通常移動，不安定・不陸か所の通行

実際に各現場に設営されている設備を用い表-2 に示す項目を確認した。実験状況を写真-2 に示す。

写真-2　走破性能の実験状況

(2) 操作感

「Spot」を直接視認できない場所から操作を行うことで，実運用時の操作感を実験した。実施状況を写真-3 に示す。

(3) 遠隔操縦機能の実験結果

いずれの実験においても「Spot」の仕様範囲内に限っているが，特に実験 C 以降において，安定した良好な結果を得た。これは「Spot」の歩行に関するソフトウェアが大幅に更新されたことが主因だが，十分な性能は実用化に向けての大きな安心材料となった。また，各実験では多くの被験者にも操作していただいたが，操作が直感的であることもあり全員が問題なく操作できた。一方，コントローラの画面越しに見るロボット周辺の視認性には不安を覚えるものもいた。特にロボット自体が障害物回避行動したときが顕著であった。たとえ不慣れな操作者でも安心して使用できるような操作画面の改善を考えていく必要がある。

写真-3　遠隔操縦時の操作感実験

## 4.3 自律移動実験と結果

(1) 周辺環境

自律移動における周辺環境側の課題は，搭載機器の性能と自己位置認識処理のアルゴリズムに依存している。そこで相当規模の空間で，無事に自律移動を完遂できるかの実験を行った。表-6 に各現場での実験概要を示す。デプスカメラのみか LiDAR 使用かは、4.1 記載による。

表-6　自律移動の実験概要

| 実験 | 周辺状況<br>フロア数 | 走行距離 | 備　考 |
|---|---|---|---|
| 実験A | 幅3mの廊下中心<br>1フロアのみ | 約60 m | |
| 実験B | 屋外の資材置き場<br>半径50m以上の開けた空間 | 約150 m | |
| 実験C | 片側に壁のある屋外通路<br>スパン15m程度の既存施設<br>4フロア | 約700 m | フロア間移動は<br>スロープ |
| 実験D | スパン20mの新築建物内部<br>4フロア | 約500 m | フロア間移動は<br>階段およびスロープ |
| 実験E<br>（実験Bと同一） | 屋外の資材置き場<br>半径50m以上の開けた空間 | 約150 m | |

(2) 周囲の変化

ティーチング時とプレイバック時の周囲の差異が大きいとロボットは自己位置を見失ってしまう。そこで実験 D では区画壁工事の進捗が著しいか所を選定し，自律移動実験を行った。自律移動時の状況を写真-4 に示す。

(3) 自律移動機能の実験結果

デプスカメラのみを使用していた実験では、仕上げが進みロボットの近くに特徴点が多くみられる実験 A でこそ成功したが，実験 B では失敗に終わった。赤外線とデプスカメラでは日照の影響・視認距離不足から，広範な建築・土木現場での活用は困難であることが分かった。

一方実験 C 以後は屋内外問わず，広範な空間でも長距離の自律移動を無事に完遂できた。デプスカメラに比べ，レーザー光は長距離に適応し,日射の影響にも強いためと考えられる。実験 D で行った周囲の変化へも適応できたことから，相当量の

変化にも対応できることが分かった。LiDAR 使用の場合，遠方もマッピング対象となるため，重ね合せに成功しやすいと考えられる。

写真-4　自律移動時の環境変化

### 4.4　テレプレゼンス機能の実験結果

(1)会話・図示説明の機能

テレプレゼンス機能は独自に開発実装を進めることとした。検証用としてタブレット端末と通話機構および，プロジェクターのみを搭載して実験を行った。写真-5 に実施状況を示す。

(2)周囲の確認

現場管理業務において目標物を高精細に視認できることは重要である。これには表-1 に示す標準オプション＋INSPECTION に搭載された，PTZ（パン・チルト・ズーム）カメラを用いた。写真-6 に鉄骨のハイテンションボルト締込み後のマーキングのズレをチェックする業務を想定したときの,操作者から見えているモニターの画像を示す。

写真-5　テレプレゼンス機能の実験

(3)テレプレゼンス機能の実験結果

実験 C・D にて，使用感を広く体験してもらったところ両者ともに良好な意見が得られた。ただし，屋内用のマイク・スピーカでは現場の喧噪にかき消されてしまい，正確なコミュニケーションは難しい。これはヘッドセットと併用することで解決した。プロジェクターを用いた資料投影は屋内では十分認識でき，多くの期待が寄せられた。

PTZ カメラによる現場管理は，目視確認としては十分精細であった。一方，人間の様に体を動かして，見えないか所をのぞき込むといった動作はできないため，すべての目視が可能ではないことも改めて感じた。今後，今回の知見を導入した開発モデルを製作実装し，機能検証と短中期間程度の PoC を行う計画としている。

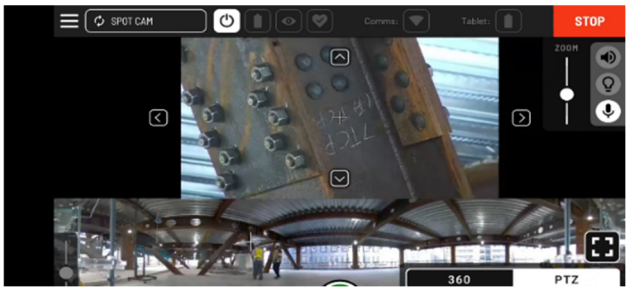



写真-6　操作者から見えているモニター画面

## 5．実験結果まとめと期待される効果

### 5.1　実験結果のまとめ

4 章に示す一連の実験によって、建築・土木現場を対象とした遠隔操縦，自律移動機能と現場管理業務の将来の実運用に向けて，良好な結果を得ることができた。一方，ロボットを日常的に使用するには，専門技術者が適時サポートする体制が必要であるとの結論を改めて得た。

### 5.2 期待される効果

一連の実験を通じ，四足歩行ロボットの導入による現場管理業務時間の削減量を期待される効果として試算したところ，現場管理業務の内 25%程度を削減できる見込みとなった。これは業務全体の 10%程度の削減に相当する。

## 6．おわりに

四足歩行ロボットを用いた現場管理業務の遠隔化・自動化について，遠隔操縦・自律移動・テレプレゼンス機能のそれぞれについての検証実験を行い，多くの知見と新たな課題を得ることができた。今後も背面に搭載させる業務機能の開発改善と実現場での実験を繰返し，実運用に耐えられるレベルを目指す。また，削減効果を最大化するために，ロボット運用体制構想を具体化していく。

また，2020 年からは同じ目的を持つ鹿島建設(株)と竹中グループ２社との３社共同研究 [2]を開始している。本報告に示す知見をより詳細に共有し，実用化の加速を図る。

最後に，現場実験にあたり現場のスペースと時間を貸していただいた関係各位，建築主の皆様に誌面を借りてお礼を申し上げます。

### 参考文献

1) 一社日本建設連合会：建設業ハンドブック2020，pp.18, 2020年

2) 竹中工務店ホームページ：https://www.takenaka.co.jp/news/2020/12/01/index.html, 2020年

# 38. 無人移動体画像伝送システムの性能調査及び汎用型 Wi-Fi との比較検証

大成建設株式会社　○遠藤　亮雄，青木　浩章
田村　道生，後藤　洸一
ハイテクインター株式会社　松井　仁志
新井　隆弘

## １．はじめに

近年，IoT（Internet of Things）の活用により，インターネットとあらゆるモノが繋がり，円滑な情報の授受が可能となっている。また，内閣府はサイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させたシステムにより経済発展と社会的課題の解決を両立する社会として「Society5.0」を提唱しており，その実現に向けて，スマートシティやスマートホスピタルといった取組みも実施されている。これは，フィジカル空間の情報をデジタルデータ化してサイバー空間に集積することで，必要な情報に常時アクセスすることが可能となり，さらに，集積した情報を解析し，フィジカル空間にフィードバックすることで，生産性向上につながる環境改善や諸問題の解決による利便性の向上や省力化の実現を目指すものである。

このように，データを活用した取組みが活発に行われている中，建設業でも「建設 DX（デジタルトランスフォーメーション）」として，データ活用による建設現場のスマート化が試行され始めている。そこで，建設現場における各種データの円滑な利活用を行うためには高品質な通信インフラが展開されている必要がある。しかしながら，実際の建設現場は短期間のうちに目的物の完成物にむけて時々刻々と姿や環境が変化するため，通信インフラを整備しにくいという背景がある．そのため，多くの建設現場では安価で申請等を必要としない Wi-Fi 規格の無線 LAN（以下，Wi-Fi と称す）を用いた通信インフラを構築するケースが多いが，Wi-Fi は誰でも特別な許可なく使用可能であるため，電波干渉が起きやすいというデメリットがある。また，Wi-Fi は 1997 年に標準規格化された IEEE802.11 から約 20 年経過した現在まで規格化のたびに図-1 のように高速化しており，実用的な通信可能距離や通信容量等は規格毎に把握し，建設現場の様々な通信条件に合わせて通信インフラを選択する準備が必要である。

そこで筆者らは，建設現場で採用実績のある汎用型 Wi-Fi 3 種類（11g，11n，11ac）と，ドローン/UAV やロボット等の無線伝送システムとして近年普及し始めている無人移動体画像伝送システム（5.7 GHz）（以下，「ロボット無線機器」と称す）の合計 4 機種について屋外にて無線通信比較実験を行い比較検証した。本稿では，これらの比較実験結果について報告する。

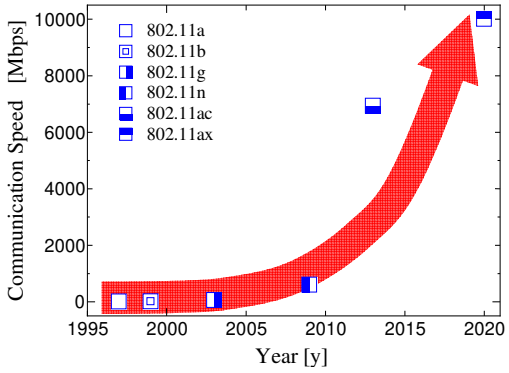



図-1　規格制定年と最大伝送速度

## ２．実験概要

### 2.1　比較対象機器

#### 2.2.1　ロボット無線機器の概要

今回使用したロボット無線機器の仕様を表-1 に示す。このロボット無線機器はドローン/UAV 等の操縦や画像伝送を想定したものであり，伝送する内容は画像に限定されない。また，海外製であるが工事設計認証を得たものであり，日本国内でも総務省への免許申請及び第三級陸上特殊無線技士以上の資格が有れば使用が可能である。なお，操縦者側も移動して使用することが前提であるため，免許申請時に設置場所を限定する必要が無い。

実際の運用に際しては，日本無人機運行管理コンソーシアム（JUTM）の会員であれば，Web 上で運用調整システムに使用する無線機の搬送周波数等の仕様・使用日時・使用場所を登録することで，

干渉調整を簡単に行うことができ，同じエリア内に他の利用者がいなければ機材準備と有資格者の配置で即時利用することも可能である。干渉の可能性がある場合にはシステムから通知され，当事者同士で調整を行う方式となっている。また，海外では軍事用としても利用実績があるため，屋外のロバストな環境においても性能が期待できる機器である。

**表-1　ロボット無線機器の仕様**

| | |
|---|---|
| 周波数幅 | 10 MHz , 20 MHz |
| 周波数(MHz) | 5655~5750 (10 MHz、10ch) |
| | 5660~5745 (20 MHz、5ch) |
| 変調方式 | OFDM |
| 最大送信出力 | 1 W |
| 最大通信速度 | 150 Mbps（MIMO×3）<br>50 Mbps（SISO） |
| 通信ｲﾝﾀｰﾌｪｲｽ | Ethernet/USB/Serial/SDI |
| 防水防塵特性 | IP68 |
| アンテナ | 無指向性（MIMO×3） |
| GPS | 搭載 |
| 動作温度 | -40 °C ～ +85 °C |
| 寸法<br>重量 | 3.8cm×6.7cm×20cm<br>886g（362g電池含） |
| 工事設計認証 | R209-J00294 |

### 2.1.2　汎用型 Wi-Fi 機器

無線通信の比較実験には汎用型 Wi-Fi である 3 機種を用いた。使用した汎用型 Wi-Fi の仕様を表-2 に示す。比較のため，ロボット無線機器も合わせて表記している。以下，ロボット無線機器も含めて A 機～D 機と記載する。A～C 機のいずれも屋外対応であり，Wi-Fi の規格は，それぞれ 11g, 11n, 11ac である。A および B 機は 2.4 GHz の周波数帯である。C 機は 2.4 GHz と 5 GHz の周波数帯を選択できる仕様となっているが，本実験では 5 GHz の周波数帯を用いた。

**表-2　汎用型 Wi-Fi 及びロボット無線機器の性能仕様**

| 記号 | A (11g) | B (11n) | C (11ac) | D(ロボット無線) |
|---|---|---|---|---|
| 周波数帯 | 2.4 GHz | 2.4 GHz | 2.4 GHz<br>5 GHz | 5.7 GHz |
| 最大<br>送信出力 | 10 mW以下 | 10 mW以下 | 10 mW以下 | 1000 mW |
| 最大<br>通信速度 | 54 Mbps | 600 Mbps | 6.9 Gbps | 150 Mbps |
| 発売日 | 2015年8月 | 2015年8月 | 2019年3月 | 2018年2月 |
| 備考 | Wi-Fi | Wi-Fi | Wi-Fi | 免許申請および第3級陸上特殊無線技士以上の資格が必要 |

### 2.2　実験内容

ロボット無線機器と汎用型 Wi-Fi 機器に対して，通信速度測定実験，ホッピング実験及びハンドオーバー実験を行った。実験場所は三重県桑名市にある実験場にて行い，いずれも気象条件は晴れの環境で実験を行った。

### 3.1　通信速度測定実験

各種の無線機に対して，使用可能な範囲とその時の通信容量を把握するために親機と子機の間の距離を変化させてスループットの測定を行った。

図-2 に測定実験の概略を，図-3 に計測位置を示す。基地局として設置した親機には PC1 を，移動局として乗用車に設置した子機には PC2 を接続し，構築したサーバとクライアント間の通信トラヒックを確認するツールである「iperf」を用いてスループットの測定を行った。そして PC1 をクライアント（送信側），PC2 をサーバ（受信側）としたダウンリンク（以下，DL と称す）及びその逆のアップリンク（以下，UL と称す）の 2 種類のスループットの測定を行った。親子の無線機は相互に見通しが利き，間に遮るものが無い環境とし，無線間の距離は 10，50，100，150，200，320，420 m の間隔で変化させ，それぞれの距離で同様に計測を行った。

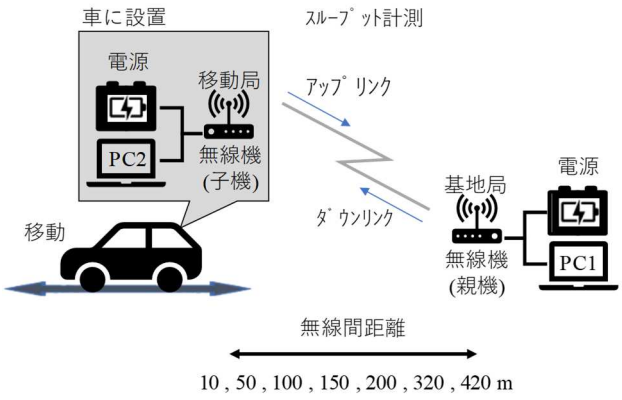



**図-2　通信速度測定実験概要**

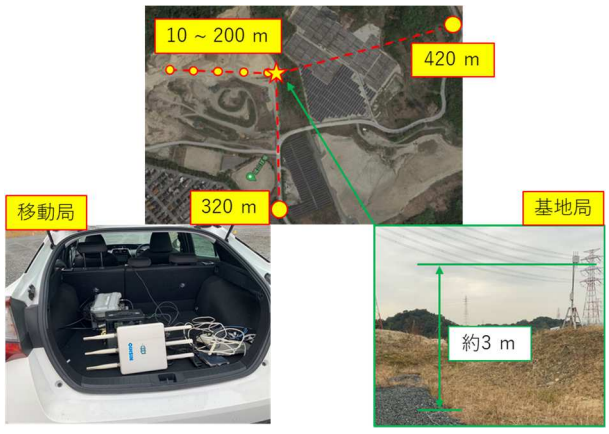



**図-3　計測位置**

### 2.2.2　ホッピング実験

1 台の無線機でカバーできる範囲以上のエリアに通信インフラを構築する場合は，中継局を設置することが多い。その場合，中継局は有線接続が望ましいが，それが困難な場合は無線マルチホップ機能を使用することで，通信用配線を行うことなく中継局の設置が可能である。一般的に無線マルチホップ機能を使用した場合，通信速度がどの程度低下するかを把握するために，無線マルチホップ機能を有した C 機および D 機に対して，ホッピングさせた場合の通信速度の変化の測定を行った。

図-4 にホッピング実験の概要及び図-5 に無線機の配置位置を示す。無線機は C 機および D 機それぞれに対して，親機・子機 1・子機 2 の計 3 台を使用し，親機と子機 1 間および子機 1 と子機 2 間の通信が可能であり，かつ親機と子機 2 間の通信が不可となるように配置を行い，親機と子機 1 間の経路①，子機 1 と子機 2 間の経路②及び子機 1 を経由した親機と子機 2 間の経路③に対して，通信速度および応答速度を「ipref」および「ping」を用いて測定を行った。なお，無線間の距離については，機器によって通信可能および不可となる距離が異なるために任意とし，ホッピングによる通信速度の変化はそれぞれの機器での比較とした。

### 2.2.3　ハンドオーバー実験

中継局を設置して通信インフラを構築した場合，基地局がカバーしている範囲①，中継局がカバーしている範囲②，範囲①と範囲②が重なり，基地局と中継局からの電波の両方が届く範囲③の 3 種類のエリアに分けることができる。移動局が範囲①から範囲②に移動する場合，通信経路の切替えが必要となり，その挙動を把握するため，C 機および D 機に対してハンドオーバー実験を行った。

図-6 にハンドオーバー実験の概要を示す。基地局として親機を設置し，その親機との通信が可能な位置に中継局として子機 2 を設置することで，無線マルチホップ機能によるネットワークエリアを構築した。移動局として子機 1 とネットワークカメラを車に設置し，基地局から直接通信が可能なエリアからホッピングによる中継が必要なエリアへの走行を行った。その時に，基地局に繋いだ PC1 から車載しているネットワークカメラにアクセスし，カメラ映像と「ping」の応答の確認を行った。また，中継局側からの走行も行い，中継局を経由した接続から直接基地局との接続への切替りの確認も行った。走行速度は 15 km/h および 30 km/h の 2 種類で行った。

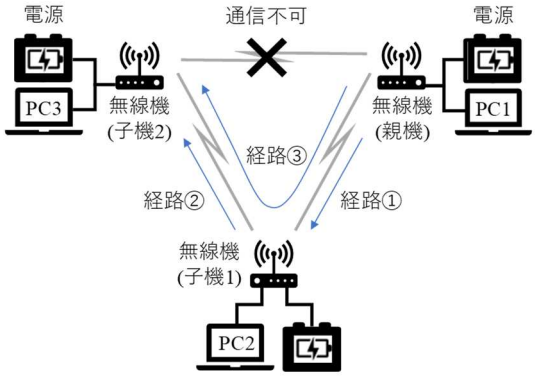



図-4　ホッピング実験概要

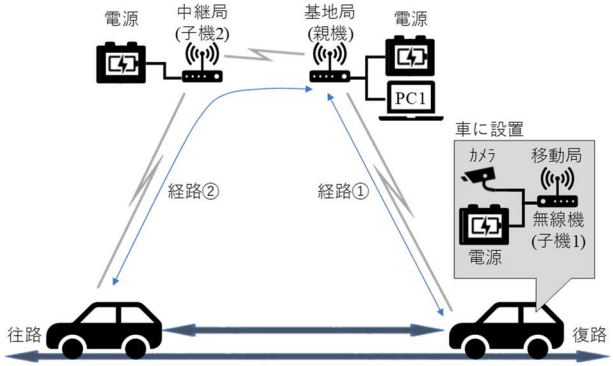



図-6　ハンドオーバー実験概要

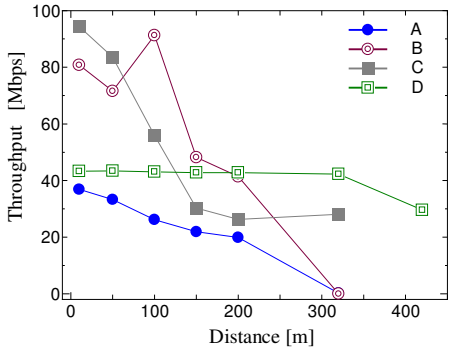
図-5　無線機配置位置

図-7　走行コースおよび無線機配置位置

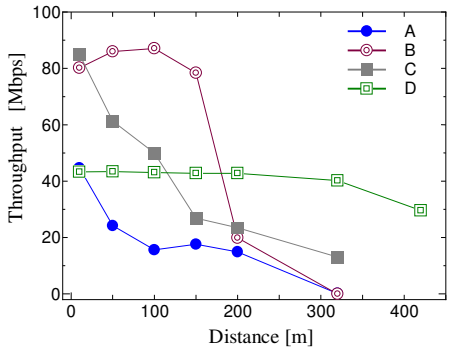
## ３．実験結果

### 3.1　通信速度測定結果

図-8 に通信速度測定結果を示す。無線間距離が 420 m 地点では A,B,C 機は繋がらなかったため，D 機の結果のみとなっている。UL・DL に限らず，すべての無線機のスループットは無線間距離が離れるほど低下していく傾向がみられ，汎用型 Wi-Fi である A～C 機においては，200 m 地点になると近距離に比べて半分以下に減少するという結果となった。これに対して他と比べて出力の高い D 機は，420 m 地点においても安定した通信トラヒックが確認できた。




(a)　アップリンク




(b)　ダウンリンク

**図-8　通信速度測定結果**

### 3.2　ホッピング実験結果

表-3 および表-4 に各通信経路における通信速度と応答速度の測定結果を示す。表-3 における D 機①と D 機②は，子機 1 と子機 2 間の距離を変化させた結果である。通信速度において，ホッピングを行っている通信経路である経路③は，個別の通信経路である経路①と経路②の最小の通信速度との相関がみられ，C 機は約 60 %，D 機は約 45 %という結果となった。応答速度に関しては，どの経路においても大差はなく，ホッピングの影響は考慮しなくても良いことが分かった。

### 3.3　ハンドオーバー実験結果

表-5 に通信経路切替え時に生じた通信途絶時間を示す。C 機は経路切替え時に 10 秒程度の通信途絶が確認されたが，D 機は通信の途絶が無いか，あっても数秒程度の途絶であった。また，カメラ映像を確認していても，C 機は切替え時に映像が途切れてしまっていたが，D 機はほぼシームレスに映像を確認することができた。

図-9 に通信切替地点を示す。C 機は通信が繋がっている無線機がカバーしている範囲外に出てから通信の切替えを行っていたが，D 機は基地局に優先して接続するように切替えを行っていた。

**表-3　ホッピング実験通信速度測定結果**

| | 経路① | 経路② | 経路③ |
|---|---|---|---|
| C機 | 94.2 Mbps | 82.8 Mbps | 50.0 Mbps |
| D機① | 41.1 Mbps | 40.6 Mbps | 18.5 Mbps |
| D機② | 40.5 Mbps | 23.9 Mbps | 10.9 Mbps |

**表-4　ホッピング実験応答速度測定結果**

| | 経路① | 経路② | 経路③ |
|---|---|---|---|
| C機 | 1 ms | 1 ms | 2 ms |
| D機 | 2 ms | 2 ms | 3 ms |

**表-5　通信経路切替え時の通信途絶時間**

| | C機 | | D機 | |
|---|---|---|---|---|
| 車速 | 往路 | 復路 | 往路 | 復路 |
| 15 km/h | 8 s | 10 s 以上 | 3 s | 0 s |
| 30 km/h | 10 s 以上 | 10 s 以上 | 0 s | 0 s |

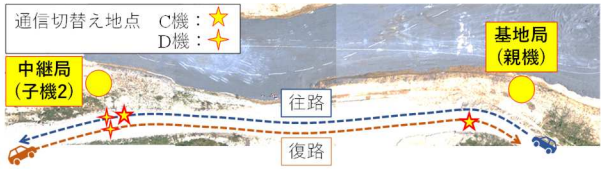



**図-9　通信経路切替地点**

## ４．まとめ

ロボット無線機器と汎用型 Wi-Fi の 4 種類の無線機に対して，各々の距離における通信速度の計測を行った結果，基地局からの距離が 150 m 程度の近いエリア内で使用する場合は許可や申請の必要がない Wi-Fi 規格の無線機であっても十分に使用可能であることが分かった。そして，それ以上広いエリアとなると，基地局の数を増やすか，ロボット無線機器のような高出力の無線機を使用する必要があるものと考えられる。また，ロボット無線機器と汎用型 Wi-Fi の 2 種類の無線機に対して，ホッピング時の通信速度測定及びハンドオーバー時の挙動確認を行った結果，無線マルチホップ機能を用いると通信速度が低下し，低下率も機種によって異なることが分かった。さらに，通信経路の切替えには通信途絶時間が発生し，その時間の長さや挙動も機種によって異なるため，使用する用途に合わせて機種の選択をする必要があるものと考えられる。今回の測定結果が適切なネットワーク環境を構築する参考になれば幸いである。

# 39. 無人化施工における生体情報を活用した分析評価システム構築による作業定量化

立命館大学　　○児玉 耕太，橋口 伸樹，小林 泰三、林 永周、曹　剣飛
株式会社熊谷組 黒石 真一，畑本 浩伸，飛鳥馬 翼，竹下 嘉人，宮崎 康弘，北原 成郎
東京工業大学　仙石　慎太郎
東京工業高等専門学校　松林　勝志

## 1 はじめに

大規模地震や風水害、火山災害といった自然災害が多い日本において、土石流などによる二次災害の危険が想定される建設土木工事では、安全な場所から建設機械を遠隔操作によって操作する工事施工が着目されている[1)]。遠隔操作は実際の機械操作と比較して、建設機械および作業環境の状態を把握しにくいため、慎重で丁寧な機械操作が必要であり、操作者にとっては心理的負荷が大きい傾向にある。この施工において、操作者はモニタ映像と建設機械の振動を通じて、建設機械の実際の状況（傾きや揺れ）を認識する。操作の精神的負荷を高めることなく確実で効率的な操作することが重要な課題となる。典型的な建設工事では、労働者の身体的な危険性を回避する優先度が高いため、心理的な負荷が注目された報告は少ない[2)]。よって、本研究では建設機械の操作技能者の精神負荷およびストレスに着目して、効率的で適切な操作を検証する。

あらゆる仕事における身体的および心理的負荷によるストレスは、満足感や幸福感を低下させて仕事の効率を低下させる可能性がある。ストレスの分析において、心臓の心拍間隔の変動を観測は、ストレッサーに反応する心臓血管系の自律神経調節の定量的な尺度となる[3)]。精神作業の負荷において、作業者は常に多くの注意を払う必要があり、もし精神作業の負荷リソースのバランスが崩れると、安全上の危険が生じる可能性がある。多くの職務上のタスクにおいて、心理的な負荷の評価は非常に重要となっている[4)]。そのため、精神作業負荷に対する心拍変動（HRV）およびMSEとの関係については、多くの文献で研究されている[4)5)]。

最近のウェアラブル技術の進歩は、対象者の生体情報や身体状況を簡単にモニタリングできる機会を提供する。ウェアラブルデバイスを使用して、心拍数（HR）の観測 を通じて自律神経系の活動を監視することは、データへのアクセスが容易で経済的である[6)]。日々の心拍数の変化に関する評価は、労働力の負荷[7)]、精神状態[8)]、身体状況[9)]に関する心臓の健康状態を理解するのに役立つ情報を提供する。従来の研究において5分間のHRV測定により、精度の良い解析が行えることが報告されている[10)]。

## 2 本研究の特徴

労働者の安全と健康を犠牲にすることなく期待される生産性を維持するためには，建設作業員の物理的な身体負荷を可視化し，許容限界内で管理することが重要である。一方で，バイオセンサシステム（例えば，心拍センサ）を装備したウェアラブル健康機器の近年の進歩により，現場労働者の様々な負荷を継続的に測定するのに十分な機能を有している。

開発したIoTシステムでは，ウェアラブルデバイス（下着型のセンサ搭載ウェア：以下，スマートウェア）を用いて，生体情報をモニタリングし，労働者の仕事を妨げることなく継続的に心拍変動から物理的な身体負荷を測定する。労働者の安全と健康を把握し，期待される生産性を管理が可能である。被験者の身体活動量，労働時間や休憩時間といった行動パターン，および心拍数の変動などの生体情報を記録し，被験者である作業者ごとに分析を行なうことによって，建設現場における作業にどのような影響を及ぼすのかを明らかにすることができる。

## 3 研究方法

実験の全体概要を図-1 に示す。

### 3.1 研究目的

この研究の主な目的は次のとおりである。

・操作におけるストレスと身体振動がHRに及ぼす影響を調査すること。

・心拍情報に現れる特徴から、搭乗操作と遠隔操作における労働状態を明らかにし、機械操作における作業効率の向上を図ること。

この分析の結果は、広く採用されているスマートウェアと心拍センサ、3軸加速度センサを使用して収集されるバイタルサインに従って、操作ストレスと運転時間の新しい計算モデルを導くことができる。

### 3.2 被験者

2020年7月29日、7月30日、2021年2月18日の日程で、建設会社の熊谷組（株式会社熊谷組、東京都千代田区）の筑波技術研究所においてデータを収集しました。建設会社より、遠隔操作の訓練を積んだ建設技能者9名を選出した。（年齢：35.6［SD 12.8］歳；身長：168.7［SD 4.1］cm；体重：71.1［SD 13.2］kg；BMI：24.9［SD 4.4］）実験の被験者の選択基準は、18歳から50歳までの健康な成人として、現在の神経疾患、心血管疾患の参加者は除外基準とした。1周400mの工事現場に似せた試験コースにおいて、参加者はウェアラブルデバイスを装着しながら、建設機械であるCRAWLER CARRIER（IC120-2, KATO WORKS Co., Ltd.）を走行させた。すべての参加者は遠隔操作に慣れており、実験手順に精通していた。

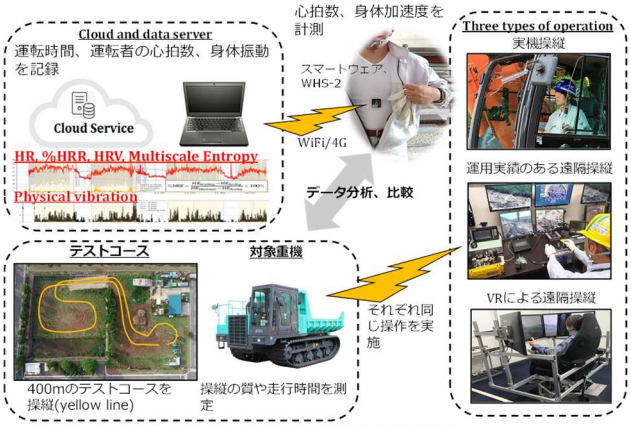



図-1　実験の全体概要

### 3.3 実験プロトコル

データ収集の前に、我々の研究グループは、被験者の潜在的なリスクと不快感、およびデータ収集によるプライバシーの問題を調査した。センシング衣服は非侵襲的な装置であり、機械操作に支障がないことが確認された。ヘルシンキ宣言、ヒトゲノム、世界人権宣言に従い、被験者の心拍数、身体活動、プライバシー条件などのデータ収集プロトコルが、立命館大学研究倫理審査番号：BKC-2019-038のプロトコルが承認された。さらに、データ収集前に全ての被験者に配布されたインフォームド・コンセントの中で参加者の権利の説明が含まれ、参加者のデータの秘匿性が確保された。プライバシーに関する懸念については、従業員の個人情報が開示されるリスクを最小限に抑えるために、実験とデータ分析においては従業員の名前は使用しなかった。代わりに、データの収集と分析のために、個人識別コードが各被験者（識別子）に割り当てられた。

### 3.4 データの収集方法と分析

測定時間は午前9時から午後4時までとし、いずれかの時間帯で操作者の心拍情報と身体振動のデータを収集した。参加者は全員男性で、年齢、身長、体重などの情報提供を求めた。心肺機能は、不健康な被験者を測定から除外することを目的としているため、参加者には心血管疾患の既往歴の有無や現在の健康状態（例えば 、心血管疾患の既往の有無、現在の健康状態など）についても質問した。9人の参加者から集められた42個のデータセットは、データ収集の準備時間および休憩時間は除いて、いずれも約5分間程度の計測時間となった。

この実験において、測定者は被験者の活動を直接監視せず、遠隔操作席のエリアから離れて待機し、操作エリアに設置された 2 台のカメラの助けによって作業の記録を撮影した。我々の研究は、日常の建設機械の操作業務において生じる精神負荷に注目するため、測定を開始する前に、この研究は個人の操作スキルを計測するのではなく、操作時の負荷を測定することを意図していることを被験者に説明し、日常の操作意識から逸脱しないように指示した。

#### 3.4.1 HRV

HRVは、自己調節能力や、心理的および生理学的ストレスなどの自律神経機能によって直接影響を受ける健康以外の側面にも関連している。HRVが低くなると、交感神経系と副交感神経系の間の不適切な調整を示し、将来の心血管疾患の十分に確立された予測因子となる。したがって、HRVの測定は、身体機能の評価に重要な情報を示し、身体的な疲労および衰弱のリスクを特定するのに役立つ可能性がある。

心拍数（HR）および心拍変動（HRV）のメトリックは、医療提供者への複数のアプリケーションで最近有望なことが示されている[11]。HRV分析の利用した報告は古くからあるが、改善された技術と多くの研究者と医師らの関心の高まりが、この新しい調査分野に注目が集まっている。交感神経バランスを測定するためのHRVデータの特定のメトリックスの有効性に関する懸念（たとえば、HRVの低周波[LF]パワーおよびLFと高周波[HF]パワーの比率）はあるが、多くの先行研究が、HRV分析が身体の交感神経と副交感神経の緊張のバランスを明らかできるという概念を支持している。HRVを使用することにより、心理的なストレスに対する自律神経反応が研究されている。HRVに関する注目すべき研究では、医療従事者のストレスの客観的測定値の価値を強調されており、Josephら[12]は、自己申告によるストレスに比例して上昇

した生理学的ストレスのレベルを示したと報告している。これらの結果は、医師、特に時間にタイトな状況で日常的に外科的な医療職務にあたっている医師らが、自身のストレス評価について説得力のある証拠を提供している。客観的で生態学的に有効なストレスの測定基準を広く使用することは、緊張した状況の心理的負荷を理解して軽減するため重要なヒントとなる可能性がある。

広く受け入れられているHRVメトリックが幾つかある[13]。HRV計測では、時間領域メジャーと周波数ドメインメジャーの2つのカテゴリーに分類される。HRVのメトリックには、 連続差の二乗平均平方根（RMSSD;時間領域）とLF/HF比（周波数領域）が含まれる。企業の従業員を対象とした先行研究において、RMSSD値が知覚された精神的ストレスと関連していることを発見されており、低い値は高いストレスを示していた。RMSSDメトリックは、欠落しているデータポイントの量に対する感度が低くなる。したがって、RMSSDは、データ品質が低い患者にとって、より堅牢なメトリックと見なすことができる。

HRVの測定値は、RRデータから導出され、時系列の期間（データポイントの数)、時間帯、体の向き、および実行されているアクティビティの影響を受けることに注意することが重要である。可能な場合、これらの要因は5分間のRRを使用し、各アクティビティに関する値を提供することが多いが、Troubat et al.[14]は、短期間の精神的ストレスにおいても、平均HRVの低下と関連していることを発見している。

### 3.4.2 MSE

マルチスケールエントロピー（MSE）は、時系列の複雑さをさまざまな時間スケールで評価するため、ここ20年程で広まった解析アルゴリズムである[15]。健康と幸福のための安定した状態を維持することに関与する生理学的システムは複雑であり、システムコンポーネント内およびシステムコンポーネント間の複数の相互作用が影響する。解析対象の時系列データの複雑さは、出力信号の変動性の時間的な構造に反映されている。エントロピーは、心拍数、脳波、身体の揺れなどに関するダイナミクスに適用して計算することにより、システムの複雑さの優れた指標として認識されている。エントロピーの低下は、虚弱、疲労、加齢、機能障害に関連していることが多く、対照的に高いエントロピーは、変化する環境への適応能力の高さと関連している。エントロピーは、自律神経系および体性神経系における神経生理学的な複雑性と適応性に対する信頼できるマーカーであるとの報告がある[16]。本研究では、タスクの疲労などによって適応能力が低下することをエントロピーの数値によって確認しいる。

MSEアルゴリズムは、考案時からさまざまな用途の解析に適用されて、多くの成功を納めてきた。しかし、MSEは時間スケールファクターが増加すると、粗視化系列のサンプルエントロピーの統計的な信頼性が低下するという懸念が指摘されている。近年、この対応として数々の改善されたアルゴリズムが示されており、750ポイント以下の比較的小規模な時系列データの分析においても精度良く適用できるようになってきている。本研究におけるMSEに解析ではRCMSEを利用して被験者の心拍データの分析を行なった。

### 3.4.3 Physical Vibration

振動は身体に対して、内力または外力のいずれかに晒されたときに発生する。騒音、熱、振動、放射などの物理的要因は、健康に有害な刺激が多くあり、身体機能を変化させる可能性のある環境ストレッサーとなる[17]。振動は強度および/または曝露時間に応じて、人間の健康に有害である可能性がある。ISO 2631-1規格（ISO2631-1、1997）[18]において、人間の振動への暴露の評価方法の使用方法に関するガイダンスを提供する。そのために、振動に対する人間の反応とその効果は振動の周波数、方向、および研究された効果（健康、快適さ、またはタスク）に依存することが知られているため、各評価軸の周波数加重と倍率が適用される。

外部システムから人体への振動の伝達は、快適性、性能、健康に大きな影響を及ぼす。建設機械の実操作およびVRを含めた遠隔操作席は動的システムであるため、それに関連する伝達は入力モーションの周波数と方向に依存する。振動の伝達率は、振動にさらされるシートの特性にも依存する。オンロードおよびオフロード車両は、道路および土壌におけるプロファイルの不均一性、機械内の可動要素によって引き起こされる振動にさらされる。この傾向は、技術車両および車椅子システムでも同様の傾向を示す。10~12Hz以下の周波数範囲内の振動は人体全体に影響を及ぼすが、12Hzを超える振動は局所的な影響しか及ぼさない。凹凸のある道路を車両のタイヤが転がるなどの低周波（4～6 Hz）の周期的な動きは身体を共振させる可能性がある。座ったままの状態において振動にさらされると、筋肉の疲労を引き起こし、軟組織を弱め、操作者の背中、全身への負担が増す。外部からの強制的な身体振動が続くと、気怠さ、違和感といった不快な症状、ひどい場合は嘔吐に至る場合がある。本研究において、機械操作者が操作席に座りながら、スマートウェアに装着した3軸加速度センサ出力から、以下の指標を計測する。

・2乗平均加重加速度（weighted acceleration rms、略称：Aw）

・４乗振動Dose法（Vibration Doses Value、略称：VDV）

・MSDV指標（Motion Sickness Dose Value、略称：MSDV）

### 3.4.4　作業負荷（予備心拍数、%HRR）

Hwangら[19]は、建設業者の間で30-40%HRRの継続に注意が必要であることを示唆し、Nortonら[20]は、座りがちな人の適切な健康管理に対して、40-60%HRRが30-60分持続は中程度の身体負荷であることを示唆した。40%HRRの高い許容労働負荷制限を超える身体的負荷に晒されることが多い建設労働者（例えば、とび職や鉄骨の運搬作業員）に比較して、建設機械の操作者は高い心理的負荷とストレスに晒されており、心理的要因による負荷は、HRにいくらかの影響を及ぼす。HRを長期間測定した場合の影響は無視できるが、短時間の影響は存在する可能性がある。

HRRは、筋肉活動に関連する労働負荷、または仕事における圧力強度の指標であり、式（1）が推定される。

HRR = (HRworking - HRresting) / (HRmaximum - HRresting) x 100 [%]　　(1)

HRworking ：作業時平均心拍数、HRresting ：安静時平均心拍数、HRmaximum ：年齢別最大心拍数

### 3.4.5　操作終了後の半構造化インタビュー

3種類の操作方法を体験後、別室に移動して20分程度の半構造化インタビューを行った。インタビュー実施前に、インフォームド・コンセントに則って、プライバシーの保護、回答拒否の自由、録音・録画の許可、撮られたデータは研究のみ使うことを確認した。インタビューでは、事前に用意したインタビューガイドラインに基づき、仕事に対する安全性に関する質問5項目、仕事に対する生産性に関する質問3項目、仕事に対する満足度に関する質問5項目、仕事に対する期待に関する質問3項目の質問を行い、対象者の主観について回答を得た。

## 4 実証実験の分析結果

### 4.1 データの正規性検定

集されたデータの正規性に関して判定を行なった。サンプルサイズが50以上である場合、正規性の判定はKolmogrov-Smirnov testのみが使用できる。しかし、本研究ではサンプルは十分に大きいとはいえず、Shapiro-Wilk testとKolmogrov-Smirnov test において、いずれにおいても正規性を確認できたもの正規分布のデータと考えた。どちらの検定においても、帰無仮説はデータが0.05のアルファ値で正規分布していることを前提としており、p値が0.05未満の場合、帰無仮説は棄却され、データは非正規分布に見なせる。HRVの時間領域および周波数領域、身体の労働負荷、操作環境の振動指標、心拍変化に関連した疲労やストレス指標（LF/HF、MSE)、機械の運転時間について正規性検定を実施した。それらのうち、LF、MSE、%HRR、VDVに関するデータは正規分布の条件を満たしていた。

### 4.2 記述統計学と群間比較

記述統計、平均および標準偏差を使用して、操作環境である、実機操作、モニタ映像のみによる遠隔操作、VRの操作環境の3グループにおいて、グループ毎に収集されたデータ間で有意差があるかどうかを確認した。正規分布のデータの分析については、一次配置分散分析においてBonferroniによる多重比較が採用された。また、非正規分布のデータの分析については、Kruskal-Wallis testでSteel-Dwassによる多重比較が実施された。

Kruskal-Wallis testでは、母集団に関する正規分布の要件はない。その帰無仮説（H0）は、有意水準0.05で「３つのグループ間に差はない」としている。p値が0.05未満の場合、H0は棄却され、平均値に統計的に有意な差があることを示す。Bonferroni testは、Kruskal-Wallis testと同じ仮説を持っているが、母集団の正規性と均一性の仮定に依存する。

HRV時間領域パラメータでは心拍数RRI、HRV周波数領域パラメータではLFs、LFs/HFs、心拍変動の複雑度MSE、労働負荷%HRR、身体振動のAw、VDV、MSDV、そして、建設機械の運転時間については、２つの操作環境間において統計的有意となった。さらに、HRV周波数領域パラメータのLFs/HFs、身体振動のAw、MSDV、そして、建設機械の運転時間には３つの操作環境間において統計的な有意差が見られた。

建設機械の搭乗操作は、ストレス指標であるLFs/HFsと、身体振動を示すAwとMSDVが最も大きく、運転時間が最も短縮できた。搭乗操作の運転時間は短くなるものの、操作者のストレスは高くなった。逆にモニタ映像による遠隔操作はLFs/HFsと、AwとMSDVが最も小さく、運転時間は最も長くなることが明らかになった。モニタ映像による機械走行は操作者にとってストレスは低いが、運転時間は長くなった。

### 4.3 心理的負荷、労働負荷と身体的振動の関係

表-1　心理負荷および労働負荷と身体振動の関係

| 独立変数 | 従属変数 | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | %HRR | | | LFs/HFs | | | MSE | | |
| | B | s.e. | P | B | s.e. | P | B | s.e. | p |
| 指標 | | | | | | | | | |
| Aw | -0.002 | 0.039 | 0.956 | 0.0238* | 0.0093 | 0.0143* | -0.031 | 0.0175 | 0.367 |
| VDV | 0.0006 | 0.0003 | 0.056 | 0.000 | 0.0001 | 0.821 | -0.0001 | 0.0001 | 0.239 |
| MSDV | 0.515 | 0.294 | 0.087 | 0.0983 | 0.0693 | 0.164 | -0.156 | 0.130 | 0.0748 |

３つの操作環境で採取したデータを組み合わせて、心理負荷および労働負荷に対する影響を分析した。重回帰分析を使用して、心理負荷および労

働負荷と身体振動の有意な関係を評価した。結果が表-1に示す。重回帰分析では、独立変数（身体振動の指標）に多重共線性がないことをチェックした。その結果、３つの身体振動の指標、すなわちAw、VDV、MSDVは全てVIFが10以下でした。その後、操作時の負荷 と身体振動の分析において、以下の関係において有意な関係があることが示唆された。

表-2において、労働負荷%HRRに対し、4乗振動ドーズ法によるVDVの大きな振動は、正の影響が見られた。この回帰式の調整済みR2乗は0.193でした。表-3において、ストレス指標HRV LFs/HFsに対し、2乗平均加重加速度Awの時間平均値は正の影響が見られた。この回帰式の調整済みR2乗は0.287でした。表-4において、心拍の複雑度から推測される適応性の指標MSEに対し、2乗平均加重加速度Awの時間平均値は負の影響が見られた。この回帰式の調整済みR2乗は0.189でした。

表-2　作業時の振動が労働負荷に及ぼす影響

| Model 1-1: | 従属変数　%HRR | | | |
|---|---|---|---|---|
| 独立変数 | Estimated | s.e. | *t*-value | *p*-value |
| VDV | 0.0008 | 0.0003 | 3.29 | 0.0021** |
| (Intercept) | 5.469 | 1.07 | 5.11 | < 0.001*** |
| Multiple R² | 0.213 | | | |
| Adjusted R² | 0.193 | | | |
| F static value | 10.8 | | | 0.0021** |

表-3　作業時の振動がLFs/HFsに及ぼす影響

| Model 1-2: | 従属変数　LFs / HFs | | | |
|---|---|---|---|---|
| 独立変数 | Estimated | s.e. | *t*-value | *p*-value |
| Aw | 0.0329 | 0.0079 | 4.18 | < 0.001*** |
| (Intercept) | 1.817 | 0.405 | 4.49 | < 0.001*** |
| Multiple R² | 0.305 | | | |
| Adjusted R² | 0.287 | | | |
| F static value | 17.5 | | | < 0.001*** |

表-4　作業時の振動がMSEに及ぼす影響

| Model 1-3: | 従属変数　MSE | | | |
|---|---|---|---|---|
| 独立変数 | Estimated | s.e. | *t*-value | *p*-value |
| Aw | -0.0485 | 0.00149 | -3.24 | 0.024** |
| (Intercept) | 10.55 | 0.768 | 13.7 | < 0.001*** |
| Multiple R² | 0.208 | | | |
| Adjusted R² | 0.189 | | | |
| F static value | 10.5 | | | 0.0024** |

これらの結果より、%HRRはVDVと有意な関係が認められた。但し、その他の振動指標であるAwおよびMSDVは、%HRRとの間で有意な関係は見られなかった。また、LFs/HFsおよびMSEは、Awとの間において有意な関係が確認できた。操作環境における労働負荷を示す%HRR、心理負荷を示すLFs/HFsおよびMSEに対して、いくつかの振動指標による影響が示された。

### 4.4 運転時間に対する各指標の関係性

３つの操作環境で採取したデータを組み合わせ、重回帰分析を使用して、建設機械の運転時間に対する、いくつかのHRV指標と心拍変化の複雑度を示すMSE、心拍数RRI、身体振動のパラメータの関係を評価した。統計的に有意な関係が確認できた重回帰式は、以下の２つとなった。先ずは重回帰分析において、独立変数 に多重共線性がないことをチェックした。その結果、使用された従属変数間のパラメータ、すなわちLFs/HFs、RR間隔、MSDV、およびMSE、RRI、MSDVはVIFが1~2の間にあり、多重共線性の恐れはないことが確認された。その後の操作時の身体的および心理的な負荷と身体振動の分析において、以下の２つの有意な関係があることが示唆された。

１つ目は運転時間に対し、説明変数のストレス指標 LFs/HFs、心拍RR間隔、振動MSDVが影響し、その回帰式の調整済R2乗は0.449であった。次は、運転時間に対し、説明変数の心拍変化の複雑度MSE、心拍RR間隔、振動MSDVが影響し、回帰式の調整済R2乗は0.400であった。

操作環境ごとの建設機械の操作において、得られたデータの重回帰分析により、運転時間は、操作ストレスを示す LHs/HFs 、および 適応性を示すエントロピー値MSE、心拍RRI、振動指標MSDVの影響が示唆された。運転時間 HRVおよび運転時間MSEに関して得られたられた重回帰式は、以下の(5)と(6)式となる。いずれの回帰式においても、建設機械の走行が速まり運転時間が短くなると、操作作業員の操作ストレスが上昇し、タスクに対する適応性は低下し、心拍数RR間隔および振動指標MSDVも大きくなる関係が見られた。

運転時間 HRV = -24.5 * LFs/HFs - 0.350 * RRI - 10.7 * MSDV + 2115　　(5)

運転時間 MSE = 10.5 * MSE - 0.259 * RRI - 10.3 * MSDV + 1823　　(6)

### 4.5 操作ストレスの許容範囲

本研究で得られた建設機械の運転時間に関する重回帰式の(5)式を用いて、操作ストレスを抑えつつ、建設機械の走行時間の短縮を考える。(5)式は機械操作時の身体振動と心理負荷の関係を示すため、操作時の身体振動を低減することにより、操作ストレスが低減できることが期待できる。2乗振動の時間平均であるAwによるストレスを許容レベルに抑えることで、運転時間の短縮と操作者ストレスの低減が両立できる可能性がある。

ストレスレベルに対するLFs/HFsを定量的に決定する報告はありませんが、座位姿勢における被験者のストレスを調査した報告[21]に基づき、LFs/HFs = 2 を許容できるストレスレベルとすると、この時のAw LFs/HFs=2は、(3)式よりVR走行での 2乗振動加速度の平均Aw LFs/HFs=2 = 2 / 0.0329 - 1.82 ≒ 59.0 m/s2 程となる。建設機械の運転時間 = -24.5 * 2 - 0.35 * 742.0 - 10.7 * 131.7 + 2115 ≒ 397.1 [sec/around]が一周辺りの運転時間となり、走行速度 = 400 [m] / 397.1 [sec] ≒ 1.01 [m/sec.] ≒ 3.63

[km/h] が、心理的負荷の許容される機械の走行速度となることが推定された。

### 4.6 半構造化インタビューの結果

被験者1名は、最後の操作であるVRでの遠隔操縦の規定周回数である3週を、体調不良のため回ることができず、途中終了した。この原因として、半構造化インタビューの中でVR映像とVRに付随する振動に若干のズレがあったことが体調不良の原因となったと発言している。この被験者は、遠隔施工の経験がなく、また建設重機の操縦経験も浅いこともこの体調不良の一因であることが示唆される。加えて、比較的操縦経験の長い被験者からは、今回対象とした建設重機であるクローラー・キャリーダンプでは、VRのメリットが出づらいため、より手先の操作が重要となるバックホウへの適応が良いのではないか、という意見があった。

## 5. 考察

この研究では、建設業界における機械操作の心理的健康に対するストレスの影響と、適切なストレスと建設機械の運転時間の関係を調査した。3軸加速度計を装着したスマートウェアを用いて測定した心拍情報から算出したHRVとMSE、ISO7631に基づく身体振動の測定値を用いて、運転時間との関係を調査した。HRV LFs/HFs と心拍数の複雑度を示すMSE と身体振動 との間に有意な関係が観察され、我々の主な仮説は支持された。さらに、2乗振動加速度の時間平均であるAwによる操作ストレスを許容レベルに抑えて、操作者のストレスを考慮して、運転時間の短縮が図れることが示唆された。

## 6. まとめ

本研究における理論的な貢献は次の2つである。先ずは、建設機械の操作においてHRVに加えて、MSEによる心理的負荷の関連が示され、技能労働者の心理負荷は、心拍間隔、労働環境における振動、および建設機械の運転時間への影響が明らかになったことである。さらに、建設機械の運転時間に対する心拍に関する生体情報、労働環境の振動指標を用いた関係モデルが示すことができた。

実践的な貢献は次になる。機械操作の労働環境における振動の大きさと、走行操作の心理的な労働負荷を定量化したことである。さらに. 操作時の心理的な負荷と振動環境の影響が明らかになり、このことにより建設会社は労働環境の改善と労務管理に寄与できる可能性がある。

**謝辞:**本研究は国土交通省令和元年度建設技術研究開発助成制度政策課題解決型「無人化施工における生体情報を活用した生産性向上のための分析評価システム」の助成を受けたものである。本研究の遂行に関して協力・助言いただいた 立命館大学 建山和由先生、土木研究所　森川博邦先生、国土交通省総合政策局　新田恭士先生、工学院大学　羽田靖史先生に謹んで感謝する。

## 参考文献

1. Chikushi S, et al, Automated Image Presentation for Backhoe Embankment Construction in Unmanned Construction Site; Proceedings of the 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration Honolulu, Hawaii, USA, January 12-15, 2020; Hawaii, USA, IEEE
2. Brandt M, et al, Effects of a Participatory Ergonomics Intervention With Wearable Technical Measurements of Physical Workload in the Construction Industry: Cluster Randomized Controlled Trial. Journal of Medical Internet Research 2018; 20(12):e10272
3. Ernst G. Heart-rate variability-more than heart beats? Front Public Health 2017;5:240 [FREE Full text] [doi: 10.3389/fpubh.2017.00240] [Medline: 28955705]
4. Shaffer F, Ginsberg JP. An overview of heart rate variability metrics and norms. Front Public Health 2017;5:258 [FREE Full text] [doi: 10.3389/fpubh.2017.00258] [Medline: 29034226]
5. Tiwari A, et al, Multi-Scale Heart Beat Entropy Measures for Mental Workload Assessment of Ambulant Users. Entropy 2019, 21, 783
6. Salahuddin L, et al, Ultra short term analysis of heart rate variability for monitoring mental stress in mobile settings. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc 2007;2007:4656-4659.
[doi:10.1109/IEMBS.2007.4353378] [Medline:18003044]
7. Hashiguchi N, et al, Practical judgment of workload based on physical activity, work conditions, and worker's age in construction site. Sensors 2020, 20, 3786.
8. Castaldo R, et al, Ultra-short term HRV features as surrogates of short term HRV: a case study on mental stress detection in real life. BMC Med Inform Decis Mak 2019 Jan 17;19(1):12
9. Matsuura H, et al, Validity of simplified, calibration-less exercise intensity measurement using resting heart rate during sleep: A method-comparison study with respiratory gas analysis. BMC Sports Sci. Med. Rehabil. 2019, 11, 27.
10. Shaffer F, Ginsberg JP. An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. Frontiers in Public Health 2017, 5(258)
11. Amirian I, et al, Decreased heart rate variability in surgeons during night shifts. Can J Surg 2014 Oct;57(5):300-304. [doi: 10.1503/cjs.028813] [Medline: 25265102]
12. Joseph B, et al. Stress among surgical attending physicians and trainees: a quantitative assessment during trauma activation and emergency surgeries. J Trauma Acute Care Surg 2016 Oct;81(4):723-728.
13. Hashimoto T, et al. Physical activity of elderly patients with rheumatoid arthritis and healthy individuals: an actigraphy study. Biopsychosoc Med 2015;9:19　[doi: 10.1186/s13030-015-0046-0] [Medline: 26442128]
14. Troubat N, et al, The stress of chess players as a model to study the effects of psychological stimuli on physiological responses: an example of substrate oxidation and heart rate variability in man. Eur J Appl Physiol 2009;105(3):343-349. [doi: 10.1007/s00421-008-0908-2]
15. Costa M, et al, Multiscale Entropy Analysis of Complex Physiologic Time Series. Physical Review Letters 2002, 89, 6, 068102-1-068102-4.
16. Tiwari A, et al, Multiscale Entropy Analysis on Human Operating Behavior. Entropy 2016, 18, 0003.
17. Duarte MLM, et al, Correlation between weighted acceleration, vibration dose value and exposure time on whole body vibration comfort levels evaluation. Safety Science 208, 103, 218-224.
18. ISO2631-1, 1997. International Organization for Standardization ISO2631-1, Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration.
19. S. Hwang, S. Lee, Wristband-type wearable health devices to measure construction workers' physical demands, Autom. Constr. 2017, 83:330–340.
20. Norton, K.; Norton, L.; Sadgrove, D. Position statement on physical activity and exercise intensity terminology.　J. Sci. Med. Sport. 2010, 13, 496–502.
21. Skibniewski, FW, et al, Preliminary Results of the LF/HF Ratio as an Indicator for Estimating Difficulty Level of Flight Tasks. Aerospace Medicine and Human Performance 2015, 86(6):　518-523.

# 40. 外部認識機能を搭載した自動運転油圧ショベルの実証実験報告

安藤ハザマ　　○ 武石　学
コベルコ建機株式会社　　土井　隆行
コベルコ建機株式会社　　野田　大輔

## １．はじめに

建設現場で多様な作業に使用される油圧ショベルの自動運転技術について，筆者らはこれまでにティーチングプレイバック方式での油圧ショベルの自動運転システム（以下，自動運転システム）の技術開発に取り組み，現場適用性について報告した[1),2)]。

今回筆者らは，センサで周辺状況を把握する外部認識機能を追加し，土砂とダンプトラックの荷台位置に応じて動作位置を調整することで効率的な作業が可能となる自動運転システムを開発し，現場への適用性を実証実験により検証した。本稿では，開発した外部認識機能と実証実験結果について報告する[3)]。

## ２．技術開発の内容

運転手が苦渋に感じる単純な繰り返し作業に着目し，人に代わって作業を行う自動運転システムの技術を開発してきた。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。しかし，自動運転においては単純な掘削・積み込み作業であっても，掘削対象である土砂の位置や形状が正確に認識できていないとバケットが適切に土をすくい取ることはできない。同様に，積み込み対象であるダンプトラック荷台位置が把握できないとダンプトラックへの接触や荷台からの土こぼれが生じることとなる。

そこで，外部認識機能として油圧ショベルにLiDARとカメラを搭載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が可能になると考えた。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．システム概要

今回開発した自動運転システムの概要を以下に示す。

### 3.1　使用機械

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である（**写真-1**）。

**写真-1　自動運転に使用した油圧ショベル**

### 3.2　システム構成

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-1**）。

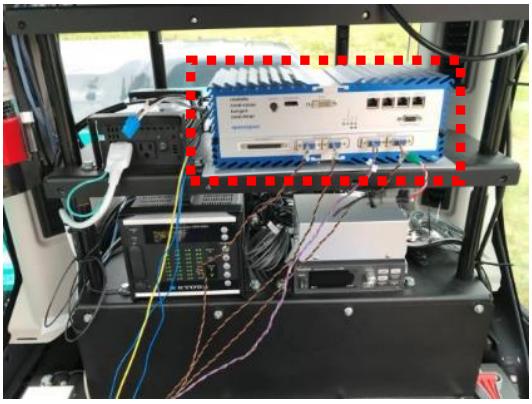


**写真-2　制御コントローラ**

写真-3　周囲認識コントローラ

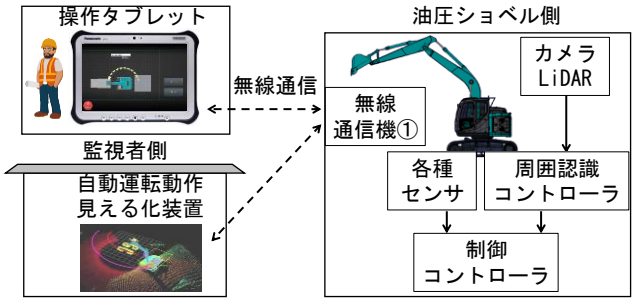



図-1　機器構成

### 3.3　制御概要

運転手の動作内容を記録（ティーチング）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制御方法はこれまでのシステムと同様である。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る。

外部認識機能から対象物の形状や位置を検知することで，運転手が行った動作を対象物に応じて調整することができる。このことで，より効率的な自動運転を可能したことが本システムの大きな特徴となっている。

### 3.4　外部認識機能

LiDAR とカメラを搭載し，AI を用いて掘削対象物と積み込み対象の位置と形状を認識，判断する外部認識機能である（**写真-4**）。

(1) 掘削対象物の認識機能

AI のひとつである教師なし学習のクラスタリングを用いて，LiDAR 点群情報から掘削対象である土砂山を判別し，土砂山の位置と高さを精度良く検知することができる。

(2) 積み込み対象部の認識機能

積み込み対象部であるダンプトラックの運転席背面にあらかじめ AR マーカを設置する(**写真-5**)。AR マーカをカメラで検知してダンプトラックを特定し，LiDAR 情報を使用することでダンプトラックの荷台の位置を精度良く検知することが可能である。

### 3.5　安全支援装置

自動運転動作する油圧ショベルが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し，自動運転の動作が見える化できるシステムを備えている。自動運転する範囲から逸脱した場合，監視者が非常停止スイッチを押すことで運転を停止させるための安全支援装置となっている（**写真-6**）。

写真-4　搭載した LiDAR とカメラ

写真-5　ダンプトラックへの AR マーカ設置

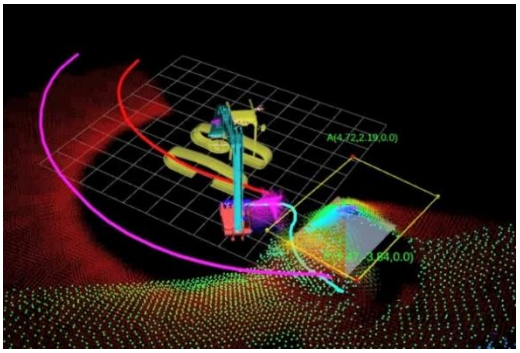


写真-6　自動運転動作の見える化

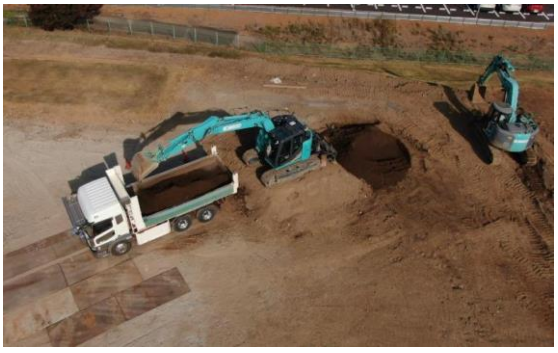


写真-7　自動運転の状況

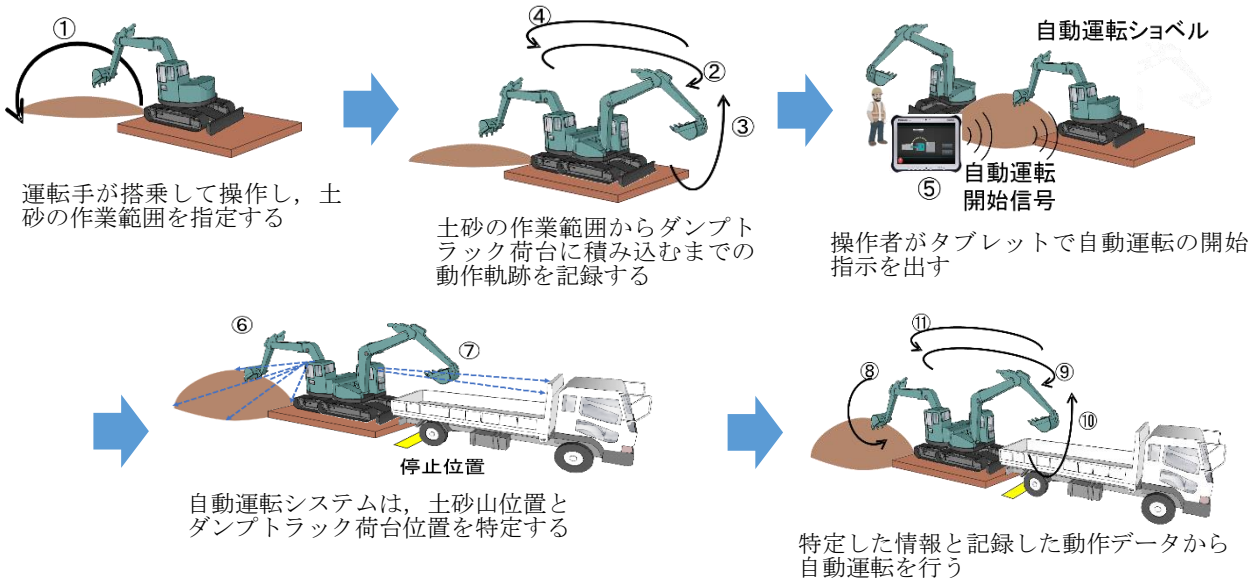



図-2　自動運転の動作手順

## 4．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，その内容をもとに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-7**）。

自動運転の動作手順は次の通りである（**図-2**）。

(1) 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。
(2) 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）
(3) 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）
(4) 自動運転システムの記録を停止する。
(5) 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）
(6) 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）
(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）
(8) 自動運転システムの外部認識機能は，バケットにすくい取った土砂量を計測でき，ダンプトラックへの土砂積み込み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。

## 5．実験結果

### 5.1　外部認識機能の実験結果

**図-3** 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 の点群情報に対して，判別した土砂山の位置形状は掘削位置の基準となる地点で±200mm 以内の差異であったことから，位置形状は自動運転に問題のない精度で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 以内の差異であったことから，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（**図-4**）。

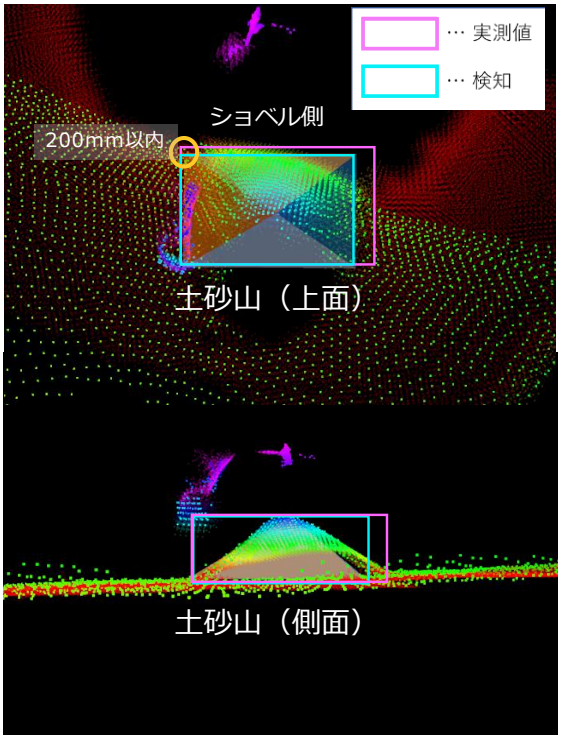



図-3　土砂形状・位置の認識結果

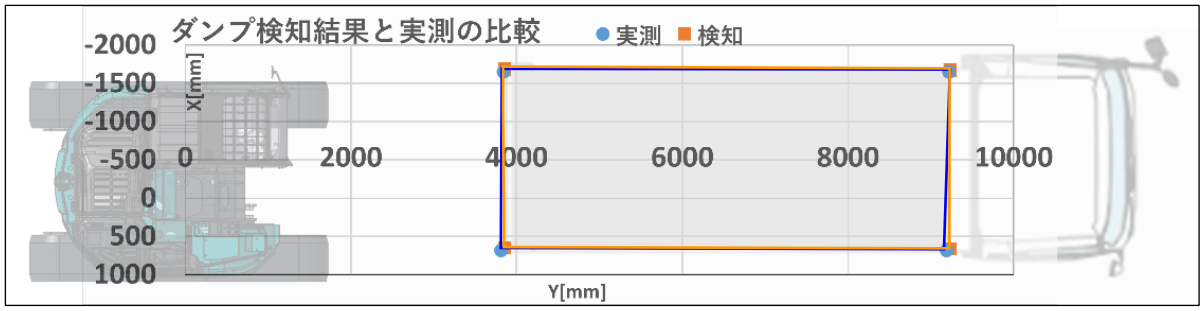



図-4　ダンプ荷台位置の検出結果

### 5.2　自動運転の実験結果

自動運転の掘削動作時と積み込み動作時のバケット刃先先端の軌跡を図-5 に示す。実験では運転手が別ショベルの運転席からタブレットを操作し，ダンプトラックへの土砂積み込みが可能であり，1 人で 2 台の油圧ショベルを操作できることを確認した。この時，土砂の荷こぼし，ダンプトラックへの接触もなく，十分に現場で適用できる積み込み動作であった。

(1) 掘削動作

繰り返し作業において，自動運転システムは認識した土砂山位置から自動的に掘削開始位置を決定できた。また，図-5 に示したように，土砂山範囲をバケットですくう毎に次の掘削位置を横ずらしする一連の動作で，想定通りに土砂山全体を連続的に掘削できた。

(2) 積み込み動作

自動運転システムは，認識したダンプ荷台位置から自動的に積み込み位置を決定し，ダンプ荷台範囲内で自動的に積み込み位置を前後にずらすことで，ダンプ荷台全体に土砂を積み込むことができた。バケットにすくい取った土砂量を計測し，ダンプ荷台の土砂量が設定値を超えると自動的に積み込みを終了した。その後の自動的にダンプ荷台の土砂を整形するための均し動作も適切であった。

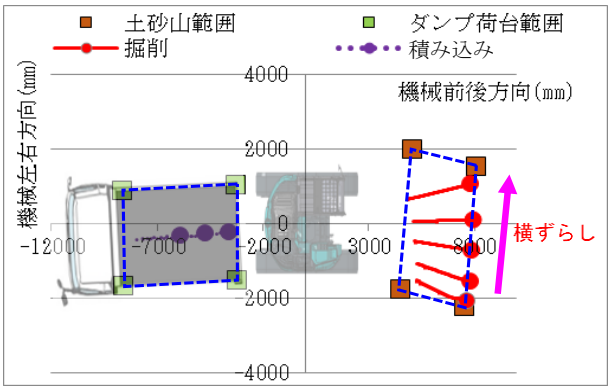



図-5　認識結果から自動的に決定した刃先軌跡

## ６．まとめ

開発した外部認識機能が対象物の形状や位置を適用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，外部認知機能を用いて動作内容を自動運転することで，運転手 1 名が通常の油圧ショベルを操作しながら自動運転ショベルの運転管理が可能であることを確認した。これにより，省人化，生産性の向上に繋がる自動運転システムであることが実証できたと考える。

今後の展開として，開発した外部認識機能を含む自動運転システムを実現場で検証することで，現場適用レベルにあることを実証する予定である。これからも油圧ショベルの自動運転に関する開発を行い，多様な作業に適用できる高度な自動運転システムを開発することで，さらなる生産性向上を実現したい。

## 参考文献

1) 武石学ほか：自動運転油圧ショベルの現場実証報告，土木学会第75回年次学術講演集，VI-1135，2020

2) 武石学ほか：自動運転油圧ショベルの現場実証，令和2年度「建設施工と建設機械シンポジウム」，No.41，2020

3) 武石学ほか：自動運転油圧ショベルの現場適用性向上に向けた実証実験報告，土木学会第76回年次学術講演集，VI-208，2021

# 41. 遠隔操作型油圧ショベルの自動化へ向けた制御手法の開発

(国研)土木研究所　○ 遠藤　大輔
(国研)土木研究所　　山内　元貴
(国研)土木研究所　　橋本　毅

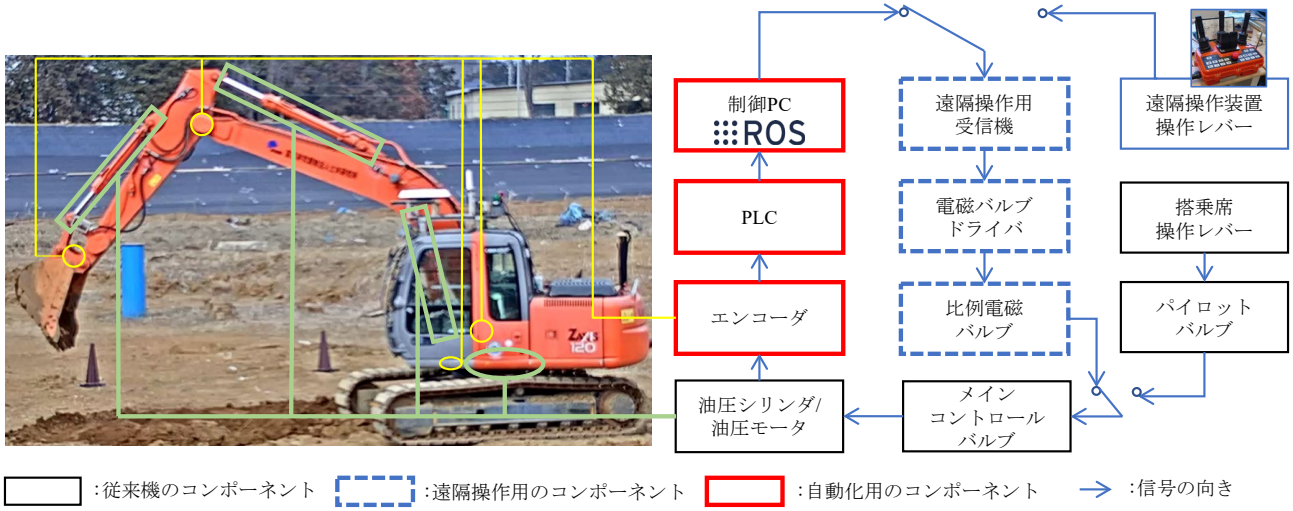



図-1 自動化した遠隔操作型油圧ショベルのハードウェア構成

## 1. はじめに

環太平洋造山帯に位置する我が国は，活発な地殻活動に起因して生じる巨大地震や火山活動により，甚大な被害を幾度も被ってきた。このような被災地域では，災害復旧工事を行う為の建機として，人的な二次災害を防止するため，遠隔操作型の建機が用いられることがある。これは人が登場して操作する通常の建機を改造し，遠隔地から無線通信を用いて操作を可能とするものである。特に1990年代の雲仙普賢岳噴火による被災地域の復旧工事を契機として，開発および普及された経緯があり，遠隔操作の効率化や操作性の向上を目的とした研究がこれまで行われてきた。[1)]

また他方，我が国が直面する社会問題として，少子高齢化に伴う労働人口の減少が挙げられる。中でも建設業就業者の人口推移は他業種と比較しても高齢化が顕著[2)]であり，業界としての労働生産性をいかに確保していくかが喫緊の課題となっている。解決策の一つとして，建機の自動化があげられる。これを実現するため，技術的観点からは従来機とは建機のシステムを抜本的に変更することも考えられる。しかし実現には膨大な開発投資が必要である一方で，市場規模については未知数であり，このような建機が登場して世間に普及するには多くの年月が必要とみられる。そこで，従来の遠隔操作に対応した建機をハードウェアのベースとして流用し，自動化するためのソフトウェアを開発していく，所謂レトロフィット型が当面の主流となると考えられる。実際，大手ゼネコンや建機メーカーから，建機の自動化に関する様々な提案がなされ，実証評価が行われている状況にあるが，これらは従来の建機をハードウェアのベースとしている。

本稿では，このような遠隔操作型の油圧ショベルの作業機を用いて，土砂の掘削動作を自動化する際に問題となり易い，ハードウェア上の特性であるむだ時間と，それに対するソフトウェア上の解決方法の一例を紹介する。また，実際に解決法を実装したソフトウェアを用いて，土木研究所が所有する遠隔操作型の油圧ショベルが土砂を自動掘削積する実験をおこなった結果について報告する。本発表により，建機を自動化する際の技術的知見や課題を広く共有することを研究目的とする。

## 2. テストベッドのシステム

本章では，本研究のテストベッドとして用いる，自動化のために改造を施した遠隔操作型油圧ショベルのハードウェアとソフトウェアの構成について記す。

### 2.1 テストベッドのハードウェア構成

図1にテストベッドの駆動系のハードウェア構成を示す。ベースとなる機体は日立建機製のZX120である。これは12トンクラスの油圧ショベ

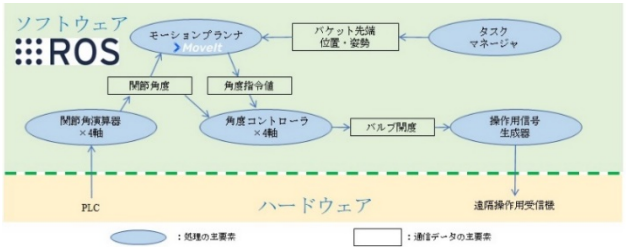



図-2 自動化ソフトウェアの構成概要

ルであり，搭乗者によって操作される通常の建機である。この機体は，従来通りの搭乗による操作と，遠隔操作装置からの信号を基にした操縦が共に可能なよう改造されている。まず，メインコントロールバルブは，操縦席の操作レバーと繋がるパイロットバルブと，それとは独立した比例電磁バルブによって油圧アクチュエータを駆動できるようになっており，スイッチによってどちらをソース信号にするかを選択できる。また，遠隔操作装置からの信号の受信機が搭載されており，この受信情報を，比例電磁バルブドライバへ伝え，このドライバが比例電磁バルブを開閉する。このような構成によって，通常の搭乗操作と遠隔操作が共に可能となっている。

加えて，上記の遠隔操作型油圧ショベルを自動化するため，制御用のPCを搭載している。また，各軸の角度情報を取得するため，ロータリーエンコーダを外付けし，PCとのインターフェースとしてPLC（Programmable Logic Controller）を搭載している。

## 2.2 テストベッドのソフトウェア構成

テストベッドを自動化するためのミドルウェアとして，近年ロボットの研究開発用OSS(Open Source Software)プラットフォームとして広く普及しているROS(Robot Operating System)[3]を利用することとした。また，活用可能なOSSライブラリについては積極的に取り入れる方針としている。

作業機の動作を自動化するソフトウェアの構成を図2に示す。まず，バケット先端の位置と姿勢の目標値やその軌跡を決定するタスクマネージャという上位プロセスが，作業機各軸の時変の角度指令値を決定するモーションプランナへ指令を与える。モーションプランナは，この位置と姿勢の指令と，その時の関節角度情報を基に，角度コントローラへ角度指令値を発行する。更に角度コントローラは，角度指令値とその時の関節角度情報を基に，PID制御により，目標とするバルブ開度を決定する。このバルブ開度を，操作用信号を生成するプロセスへ発行し，操作用信号が遠隔操作用の受信機へ伝えられる。なお，モーションプランナにはMoveIt[4]，角度コントローラにはpid[5]という汎用ライブラリをそれぞれ利用している。

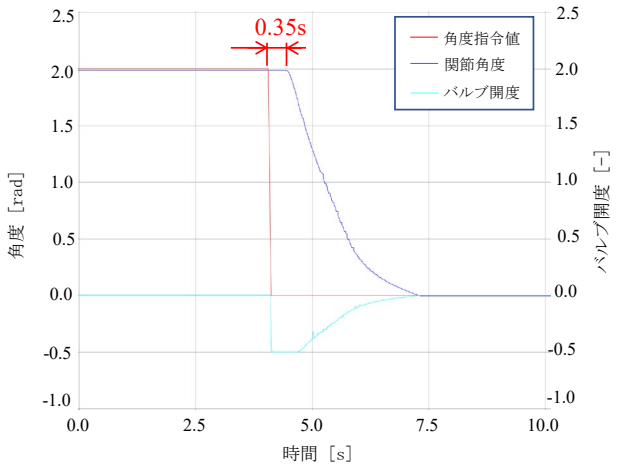



図-3 むだ時間の実機確認結果

## 3．サーボ系に内在するむだ時間

2.2節に記した通り，本研究ではテストベッドを自動化するため，各軸角度のPID制御をベースに，作業機の動作を実現する。この制御系の応答性が充分に良好であれば，モーションプランナが生成する角度指令値に対して精度を高く，かつ高速な動作が実現できる。このような手法は電動機を用いた産業用マニピュレータ等においては一般的と言える。一方で，油圧アクチュエータを用いたテストベッドへ本手法を適用するには，制御系の応答性を阻害するハードウェア由来の特性として，むだ時間が大きいことが挙げられる。本稿で扱うむだ時間とは『テストベッドのソフトウェアが，バルブ開度の指令値を出力してから，実際にアクチュエータが動作し，関節角度の変動として検出されるまでにかかる時間の間隔』とする。このむだ時間が大きくなるほど，制御系のゲイン余裕を低下させることが知られている。

図3に，テストベッドのバケットに対しPID制御を行い，指令値を2.0(rad)から0.0(rad)へ変化させるステップ入力を与えた際の，制御出力（=バルブ開度）と，バケット角度のプロファイルを示す。この結果から，テストベッドでは0.35(s)のむだ時間が内在することが確認された。なお，本テストベッドにおいては旋回軸，ブーム，アーム，バケットのいずれの軸においても，むだ時間は一律に0.35(s)であった。

## 4．むだ時間への対策

むだ時間系に対する代表的な対処方法として，スミス法や内部モデル制御（IMC）が挙げられる。スミス法は制御ループの内部に制御対象のモデルとむだ時間のモデルを有し，むだ時間後の出力を予測し，それに基づいた制御をする手法である。他方，IMCは実モデルと設計モデルとの一致しない部分を，フィードバック制御によって補うもの

である。[6]いずれの手法も，むだ時間後の状態を予測し，予測値を入力としたフィードバック制御系を組むことが，対策の本質であるが，モデルをいかに構築するかが問題となる。建機メーカーであれば，油圧系の詳細な設計情報を有しているため，精密なモデルに基づいてパラメータを高精度に同定することができる。一方で，建機メーカーではない，筆者を含む一般の建機ユーザーが自動化ソフトウェアを開発するようなユースケースにおいて，そのような精密なモデル構築ができるとは限らない。寧ろ可能な限り簡素なモデルを基に，ユーザー側が実施可能な方法で少ないパラメータを同定し，高い効果を得られる方が望ましい。

そこで本研究では，スミス法に基づき，制御対象である油圧シリンダと油圧モータのモデルについて，極力簡易なモデルを立て制御応答を改善する方法を模索し，効果を検証することとした。本章では油圧シリンダを用いるブーム，アーム，バケットと，油圧モータを用いる旋回軸のそれぞれについて記す。

### 4.1 油圧シリンダ（ブーム，アーム，バケット）

まず初めに，各軸の制御系の出力であるバルブ開度に対して，飽和後の速度(=終端速度)を予め実測しておき，バルブ開度に対して，各軸が実現する角速度を参照テーブルとして作成する。この参照テーブルを基に，次の 1)～3)に記す手順でむだ時間後の角度を予測する。

1) 現在の時刻$t_c$から，むだ時間$\delta$だけ遡った範囲の制御出力(=バルブ開度)の時間履歴$e(t)[t_c-\delta, t_c]$を保持する
2) $e(t)[t_c-\delta, t_c]$を基に，前述した参照テーブルを用いて，現在の時刻$t_c$から，むだ時間$\delta$だけ遡った範囲の速度推定値の時間履歴$\hat{v}(t)[t_c-\delta, t_c]$を求める
3) 現在の角度$\theta(t_c)$に対して，$\hat{v}(t)[t_c-\delta, t_c]$を時間積分した値を加えて，むだ時間後の角度の予測値$\hat{\theta}(t_c+\delta)$を導出する

$$\hat{\theta}(t_c+\delta) = \theta(t_c) + \int_{t_c-\delta}^{t_c} \hat{v}(t)dt \quad \cdots \quad (1)$$

上記の考え方を図解したものを図4に示す。また図5に，一般的な角度コントローラ(図5-(a))と本補償器を角度コントローラに実装した場合(図5-(b))との比較を示す。

図6はバケット軸に本むだ時間補償器を実装しない場合(図6-(a))と，した場合(図6-(b))との，システムの応答の比較である。なお，制御ゲインについては，補償器を実装した場合に適合させた値を，両条件共に用いている。むだ時間補償がない場合，バケット角度が発振してしまい，整定し難い様子が確認できる。このような場合，安定性

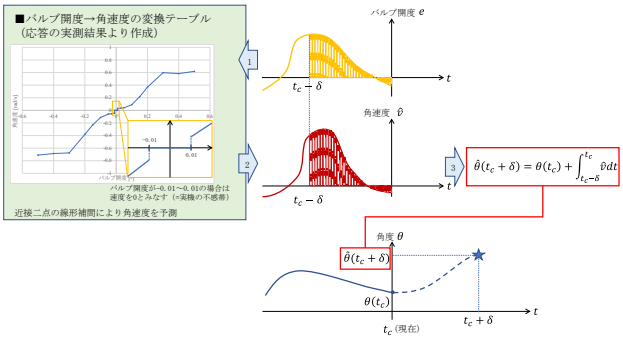
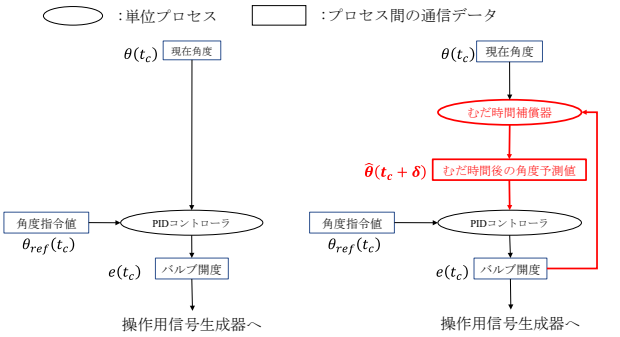
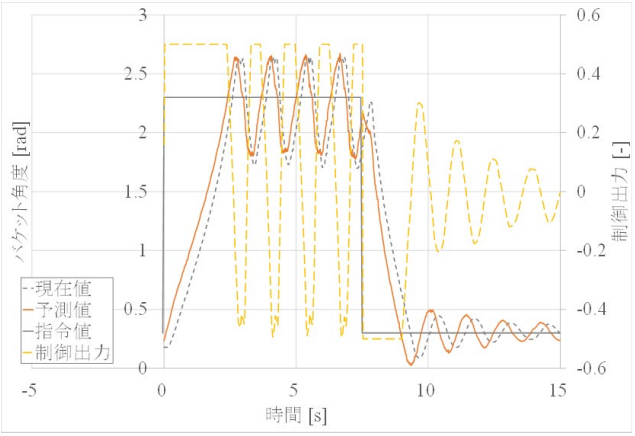



図-4 むだ時間補償器の考え方

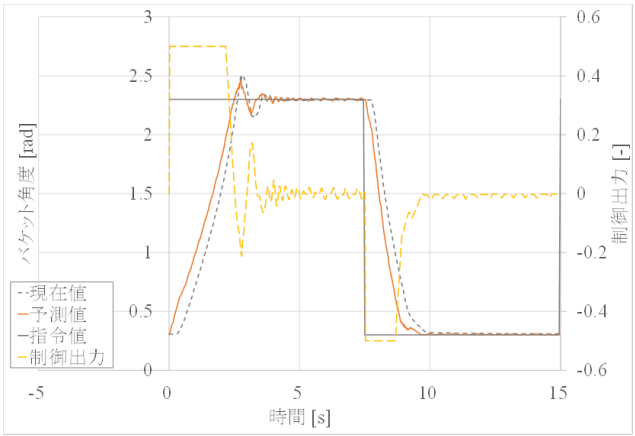



(a) 一般的な角度コントローラ　(b) むだ時間補償器を導入したコントローラ

図-5　サーボコントローラの構成比較




**(a)　むだ時間補償器なし**
**（PID入力：現在値）**




**(b) むだ時間補償器あり**
**（PID入力：予測値）**

図-6 むだ時間補償器の有無によるステップ応答比較

安定性を高めるために制御ゲインを低減する等の対策を要し，結果的に動作速度の低下を招く。他方，補償器がある場合は約4(s)で収束している。

なお補足であるが，図6の(a)と(b)いずれにおいても指令値の立上がり時よりも立下り時の方がオーバーシュート量は小さく，整定時間が短い傾向がある。これは油圧シリンダの圧縮時と伸長時との伝達関数の差によるものと考えられる。このような場合，圧縮と伸長それぞれにおいて制御のモデルや定数を区別して用いるなどの対応が考えられるが，本研究ではこれらの対応は実施せず，制御ゲインについても圧縮時と伸長時で同一の値を用いた。

### 4.2 油圧モータ（旋回軸）

油圧シリンダで動作する3軸については，前節の1)～3)に示した物理的な時定数を考慮しない単純な補償器により，制御系のゲインを大きくすることができた。一方で，旋回軸について同様の方法で予測値を算出すると，他の3軸よりも予測精度が低く，制御ゲインを高める効果が小さいことが確認された。そこで旋回軸については，モデルの細密化を検討することとした。

一般に，油圧回路の動特性は非線形であるものの，周波数特性の位相差が$-\pi/2$(rad)以上の領域では設計上，2次遅れ系として近似できることが知られている。[7]実際に，テストベッドの旋回軸にバルブ開度指令+0.3を入力した際の角速度のプロファイルを図7に示す。この結果より，旋回軸については，次の式(2)によって速度推定値$\hat{v}(t)[t_c-\delta, t_c]$を算出できると考えられる。

$$\hat{v}(t) = v(t_c) + (V_{sat} - v(t_c))\{1 - \exp(-\omega\delta)(1+\omega\delta)\} \quad (2)$$

ここで，$v(t_c)$は現在の速度，$V_{sat}$はバルブ開度に対する旋回軸の終端速度，$\omega$は固有角振動数をそれぞれ表す。$V_{sat}$および$\omega$はテストベッドの実測結果を基に，最小二乗法を用いてフィッティングすることにより同定した。なお，固有角振動数は旋回軸の負荷となる慣性モーメントにより変動するため，作業機の各軸の角度に依存する。本稿では，慣性モーメントが最小となる，作業機を折り畳んだ状態の実測値を元にすることとした。その理由は，旋回動作中は周囲との干渉を避ける為，作業機を折り畳んだ状態にすることが多いためである。また，バルブ開度に対する依存性を確認するため，バルブ開度の値を変更した複数の条件にてデータを収集し，各条件毎にパラメータを同定した。図7中の曲線は，旋回軸の角速度の実測データを基に，最小二乗法で求めたフィッティングカーブである。実測データがフィッティングカーブとよく一致していることが確認できる。

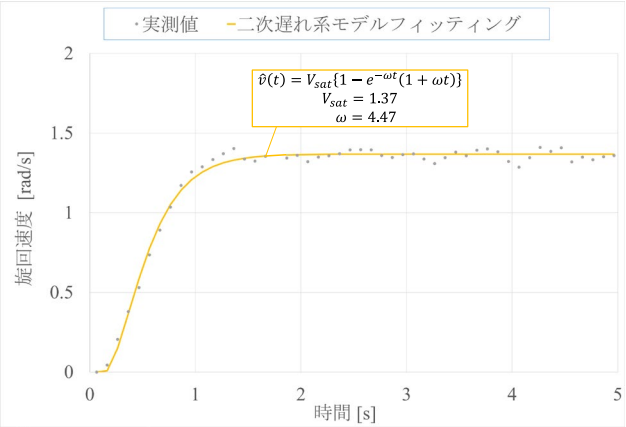



図-7　バルブ開度 0.0→0.3 とした際の旋回軸の速度応答

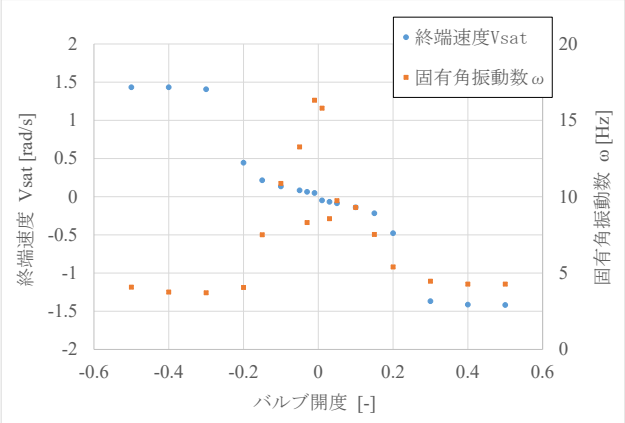
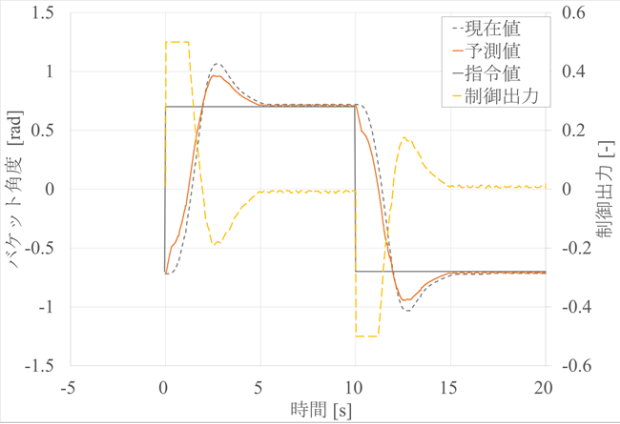


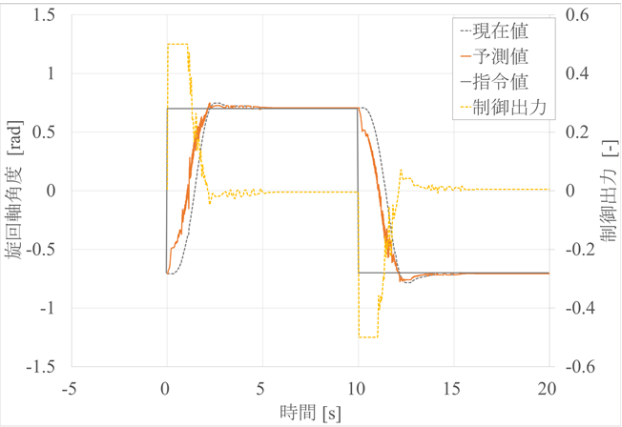

図-8 バルブ開度に対するパラメータ同定結果

また，図8は各バルブ開度に対して，同様に求めた終端速度と固有角振動数の同定結果である。この結果より，終端速度と同様に固有角振動数は，バルブ開度に対する依存性があることが確認できる。以降の実験では，バルブ開度に対する速度予測のために，バルブ開度の値に対して，図8の実測結果を元に近接2点の直線補間によって各パラメータを決定することとした。

図9は旋回軸に，4.1節の1)～3)の手法を実装した場合(図9-(a))と，本節に記した改良手法を実装した場合(図9-(b))との，システムの応答の比較である。なお，制御ゲインについては，改良手法を実装した場合に適合した値を，両条件共に用いている。角度の予測値に着目すると，(b)では実測値と予測値の時間方向の差分がむだ時間である0.35(s)に一致する割合が増えたことが確認できるが，信号の雑音が増大している。これは前述した$V_{sat}$や$\omega$といったパラメータの同定精度や粒度の向上によって，改善が見込める。特に，低速領域における角速度センサの分解能が不十分であり，離散化誤差の影響が作用していると考えられる。他方，角度の実測値に着目すると，(a)に対し，(b)はオーバーシュート量が1/4程度まで低減




(a) 速度モデル：修正前
（油圧シリンダ同様）




(b) 速度モデル：修正後
（二次遅れ系）

図-9 速度モデルの修正によるステップ応答の比較

されており，応答性の改善がみられる。

以上から，現状ではパラメータ同定に改良の余地はあるものの，制御系の応答性を向上する効果があることが確認できた。

## 5．土砂の掘削積込の実機試験

2章に記したテストベッドを用いて，4章に記した対策を導入しない場合と，した場合それぞれについて，テストベッドに土砂の自動掘削と放土を続けて行わせる試験を実施した。本章ではこの試験について記す。

### 5.1 試験方法

図1に示すテストベッドを用いて，目標地点の地面を掘削し，目標位置で放土する試験を行った。ここでは，試験のセットアップと，この動作を実現するソフトウェアとなる，図2中のタスクマネージャの処理について記す。

#### 5.1.1 試験のセットアップ

テストベッドの座標系と掘削目標位置および放土目標位置の関係，および各軸の角度の定義を図10に示す。テストベッドは略水平な地面上に配置される。場所は土木研究所の構内にある，関東ローム質の土砂で覆われる屋外の試験場である。

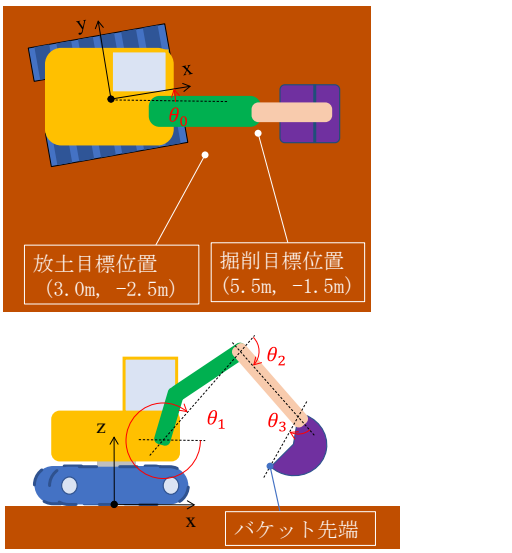



図-10 試験のセットアップと各座標系の定義

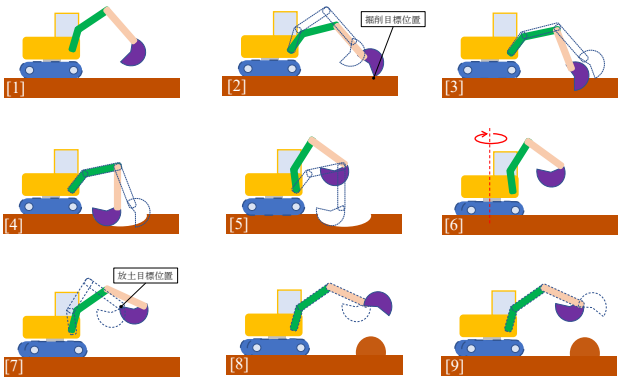



図-11 掘削と放土繰返し動作１サイクル

なお，図6に示した通り，むだ時間補償の有無によって，制御応答は異なる。各軸のPID制御ゲインについては，むだ時間補償の有無に応じて，制御系が収束するよう，それぞれ調整した個別の値を用いる。なお，対策前と対策後のそれぞれの条件において，各3回ずつ動作を繰り返し，サイクルタイムを比較する。

#### 5.1.2 タスクマネージャの処理

タスクマネージャは図11に示す[1]～[9]の手順でモーションプランナへ手先の位置又は関節角度の指令値を与える。それぞれ次に示す指令となっている。

[1] 初期姿勢をとる
[2] 掘削目標位置へバケットの先端を合わせる
[3] バケット先端の貫入角度$\pi/6$(rad)で0.5(m)の深さまで地面へバケットを貫入させる
[4] バケットとアームを[3]の状態からそれぞれ+0.96(rad)，+0.70(rad)の姿勢へ動かす
[5] ブーム，アーム，バケットの3軸を用いて[4]の姿勢からz方向へ姿勢を維持したまま鉛直方向へバケットを移動させる

図-12　対策前の動作の様子（5s 間隔連続写真）

図-13　対策後の動作の様子（5s 間隔連続写真）

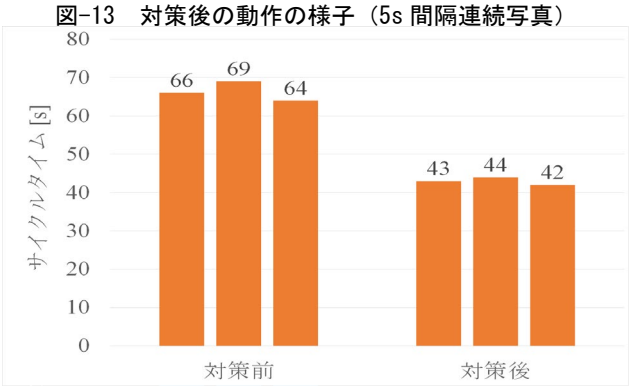



図-14 対策前後のサイクルタイム比較

[6] 旋回軸を用いて，ブーム，アーム，バケットの動作により，バケット先端の中心部を目標位置へ向けられる角度へ旋回する
[7] 姿勢を維持したまま，バケットの先端を放土目標位置へ合わせる
[8] バケットを−0.57(rad)まで開き，放土する
[9] バケットを$2\pi/3$(rad)まで閉じる

### 5.2　試験結果

図12および図13に，それぞれ対策前後の試験時の動作の様子を，5(s)間隔の連続写真にて示す。各写真の左下部には，動作開始からの経過時間を示す。本稿4章に記した対策をする前は1サイクル当たり64～69(s)の時間がかかった。一方で，対策を導入することで，1サイクル当たり42～44(s)となり，およそ2/3程度まで時間が短縮された(図14)。

### 5.3　考察

対策前後でサイクルタイムが減少したのは，モーションプランナが計画する目標角度に対する制御の応答性が改善していることが影響している。むだ時間補償器によって予測値をフィードバックとしたPIDコントローラを組むことによりハイゲイン化が可能となり，各軸の動作速度を落とさずに動くことができていると考えられる。また，副次的な作用として，モーションプランナは計画した軌道と実際の軌道の乖離が大きくなった場合に，計画そのものを都度修正するため，全体の挙動が振動的になり，目標位置までの収束までに，より多くの時間がかかることがある。4章に記した手法はこのような悪影響を回避する効果もある。

## 6．　まとめ

本稿では，遠隔操作型の油圧ショベルの動作を自動化するソフトウェアを開発する際に障害となる，ハードウェア上の特性である，サーボ系に内在するむだ時間について知見の共有を行った。これは，通常の電動機を用いたマニピュレータのハードウェアでは一般に非常に小さいが，油圧ショベルではサーボ系をハイゲイン化するための阻害要因として無視できない。このむだ時間への対処法として，スミス法に基づいた，状態を予測する補償器の構築方法について，現実的で簡便な対策を紹介した。また，これらの対策を実装したソフトウェアを用いて，油圧ショベルが土砂の掘削と放土を行う実験を行い，土砂の掘削放土動作のサイクルタイムを短縮できることを示した。

### 参考文献

1) 伊藤・坂野・藤野・安藤：無人化施工において遠隔操作の映像環境が作業効率へ与える影響について，土木学会論文集，vol.73・No.1，pp.15～24, 2017
2) 一般社団法人日本建設業連合会：建設業ハンドブック2020, 2020
3) ROS: https://www.ros.org/
4) MoveIt: https://moveit.ros.org/
5) pid: http://wiki.ros.org/pid/
6) 阿部・延山：<第1回>むだ時間システム入門1-伝達関数からのアプローチ-, 計測と制御，第44巻・第11号，pp.800～804, 2005
7) 小波・西海：油圧制御システム, 1999

# 42. 自律施工における協調領域の提案と自律施工技術基盤の開発

(国研)土木研究所　○ 山内　元貴
(国研)土木研究所　遠藤　大輔
(国研)土木研究所　橋本　毅
(国研)土木研究所　山口　崇

## １．はじめに

建設業において、高度な技能、豊富な経験を有する労働者の高齢化によるリタイアとともに若年労働者の離職による人材不足の深刻化が懸念されている。今後、さらなる人材不足が進み、建設業における生産性が大幅に低下することが危惧されている。国土交通省においては，2016 年度より，建設現場における生産性向上に向けて，測量・設計から施工・管理にいたる全ての事業プロセスにおいて，ICT の活用を前提とした「i-Construction」の導入を進めている.「i-Construction」 における ICT 土工では、ドローン等を用いた写真測量による 3 次元計測や、建設機械の位置情報と設計値を建機オペレータに表示するマシンガイダンス、部分的な油圧アクチュエータ制御が組み込まれたマシンコントロール等の先進的な技術が建設現場に導入され、2018 年の生産性向上指標は 8.9%[1]と向上してきている。

操縦サポート、情報伝達効率を駆使した「i-Construcion」から、さらなる生産性向上を目指すためには、建設工事の自動化、無人化が必要である。そのためには、ロボット、AI 等の先進的な技術を積極的に導入できる環境、システム、法令等の整備や協調領域の明確化が重要である[2]。

無人化施工や ICT 施工に対応するため、建設機械に IMU や GNSS 等のセンサ、油圧系の開閉用の電磁弁を搭載し、建設機械の電子制御が可能となってきている。例えば、マシンコントロールは、基本的な操作は建機オペレータが行いつつ、取り付けたセンサの情報からブルドーザのブレード高さ位置や油圧ショベルのバケットの高さ位置を推定し、リアルタイムでそれらの動作を制御している。しかしながら、従来のマシンコントロールなど、建設機械の制御に関わるシステムは、建設機械メーカや測量機器メーカにより独自に最適化されており、異なるメーカ間でのセンサの相互利用は基本的に不可能であり、システムの再利用性は乏しい。

一方で、建設機械メーカや大学等により、ハードウェアの依存を減らし、ソフトウェアの再利用性を向上させる取り組みがなされている。例えば、CATERPILLER 社による機体全体が電子制御化された「デジタルプラットフォーム」、Baidu 社らによる「autonomous excavator system」[3]、オウル大学ラウノ教授らによる「SmartBooms project」[4]などがある。

しかしながら、依然として異なる建設機械メーカ間の機種を統合して制御するシステムは存在しない。大規模な建設現場が単一のメーカのみで工事が実施されることは少なく、かつ開発したシステムの再利用性を考慮すると、自律施工を推し進めるためには、異なるメーカの異なる機種を横断的に制御できる枠組み、システム（建設機械との通信における協調領域の設定）が必要である。

そこで、本研究では、ハードウェアの抽象化を図り、機体間の連携性を向上させることを可能とする、建設機械の共通制御信号を提案する。

さらに、研究の重複（重複投資）回避や先進的な技術を有する大学やベンチャー企業等の新規参入を容易とすることを目的として、土木研究所が保有する建設機械、環境、シミュレータを含めた建設機械自律施工プラットフォーム（以下、自律施工技術基盤）を開発する。本稿では、油圧ショベルの共通化した制御信号案および開発した自律施工技術基盤を紹介する。

## ２．建設機械制御信号の共通化

建設工事におけるデータ交換標準に関する規格として ISO15143[5]が存在する。現時点では、Part1 から Part3 まで規定されており、Part1 では、本規格の適用範囲およびシステム構成、システム・アーキテクチャが定義されており、Part2 ではデータ交換手段としてデータ辞書とスキーマが提供されている。

このシステム・アーキテクチャを参考として、建設機械を自動化する上で必要となるシステム構成、機能ブロックおよび機能ブロックのインターフェースについて検討し、油圧ショベルにおける土砂の掘削積込動作における、制御信号案を提案する。

### 2.1　検討対象システムの論理構成

ISO15143 Part1 のシステム・アーキテクチャにおけるオペレーションシステム、建設機械について、車両の制御特性への依存性の観点から、機能ブロックを割り当て、検討対象システムを分析した。各

システムおよび機能ブロックの概要について、図 1 および表 1,2 に示す。

自動制御コントローラは、車両の質量や油圧系といった制御特性に強く依存する機能ブロックとした。一方で、施工コントローラは、作業計画から建設機械の動作計画に変換する車両の制御特性への依存性が小さい機能ブロックとした。

## 2.2 制御信号の整理と共通化

各機能ブロック間のインターフェースについて，インターフェース上で送受信する制御信号を検討し、共通化すべき制御信号を整理した(表 3)。本研究では、施工コントローラと自動制御コントローラ間の通信 C1, C2 について、油圧ショベルの制御信号リストを検討した。

車両動作指令の制御信号 C1 は、制御対象の装置である作業機部、旋回部、走行部となる。これらの装置を制御するための信号は、車両特性や構造に強依存しないものとした。一方で、車両情報の制御信号 C2 は、車体の作業状況を把握するために必要となる情報である。これらの情報は、車種依存/車体センサ—依存のデータを含まないものとした。C1,C2 の制御信号一覧を表-4,-5 に示す。

緊急停止機能は、搭乗者が存在しない自律施工において非常に重要である。よって、自動で作業をする建設機械を停止するためには、外部から無線等による緊急停止制御信号 E1 により、確実に停止させることが望ましい。また、通信途絶や故障時のふるまいを想定すると、ISO13850(機械類の安全性－非常停止－設計原則)などの機能安全規格に準拠した装置からの入力と、機能安全規格に準拠した建設機器の緊急停止機能で高信頼に実現されるべきである。

**表-1 システム構成**

| システム | 機能概要 |
|---|---|
| オペレーション システム | 施工計画に対応した各建設機械の作業計画に従って，各建設機械に対して，作業指示を行う．建設機械の作業状況及び施工結果の管理も行う． |
| 建設機械 | 動作指令に応じて稼働し、自動制御の際に必要となる車体センサを備えた建設機械. |

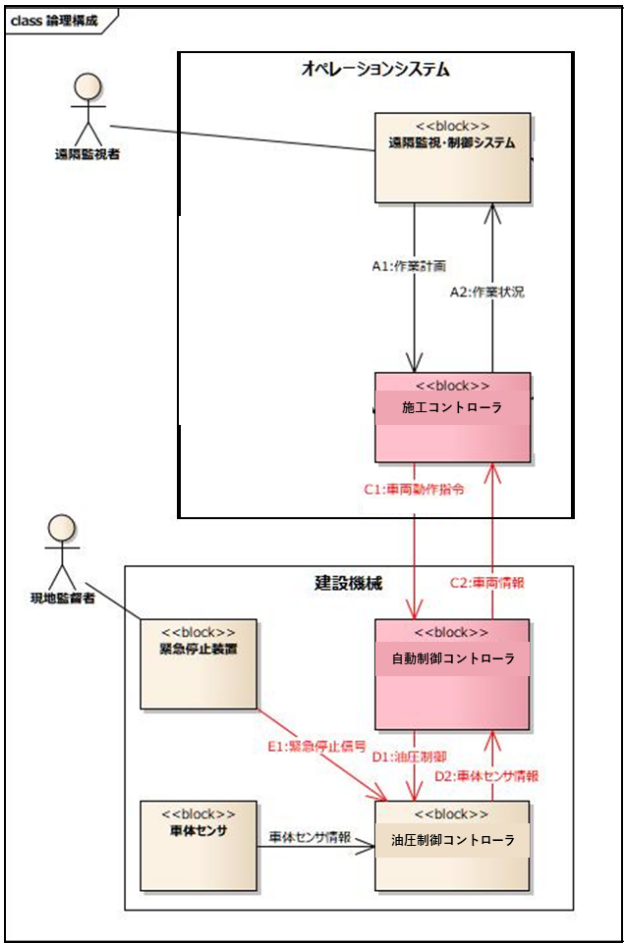



**図-1 機能ブロック間の制御信号**

**表-2 システムの機能割り当て**

| 機能ブロック | 機能概要 |
|---|---|
| ・オペレーションシステム | |
| 遠隔監視・制御システム | 複数の建設機械を統括管理する．各建設機械に対して作業指示を行い，作業状況，施工結果の管理を行う． |
| 施工コントローラ | 建設機械の施工内容に応じて，建設機械の動作計画を行い，自動制御コントローラを介して建設機械の自動運転制御を行う． |
| ・建設機械 | |
| 自動制御コントローラ | 施工コントローラに対して，車体の制御特性を隠蔽した自動運転制御インタフェースを提供し，建設機械の油圧制御を行う．車体センサの情報を用いた高速なフィードバック制御も行う． |
| 油圧制御コントローラ | 電動化した油圧弁等を、自動制御コントローラからの指令に基づき、油圧アクチュエータを駆動する。 |
| 車体センサ | 車体の位置や姿勢、油圧等を計測するセンサ. |
| 緊急停止装置 | 外部から建設機械を停止させる装置. |

表–3　機能ブロック間の制御信号

| No. | 送信元 | 送信先 | 制御信号の概要 |
|---|---|---|---|
| C1 | ② | ③ | [**車両動作指令**]車両の構造や制御特性を隠蔽して，一般化した車両制御の信号. |
| C2 | ③ | ② | [**車両情報**]車体センサの構成やセンサ固有の情報を隠蔽して，一般化した車体情報の信号. |
| D1 | ③ | ④ | [**油圧制御指令**]車両の構造や特性に応じた油圧制御が可能な信号. |
| D2 | ④ | ③ | [**車体センサ情報**]車体センサから取得した車体情報の信号. |
| E1 | ⑤ | ④ | [**緊急停止信号**]緊急停止装置の入力信号. |

【表中の番号の意味】
①：遠隔監視・制御システム
②：施工コントローラ
③：自動制御コントローラ
④：油圧制御コントローラ
⑤：緊急停止装置

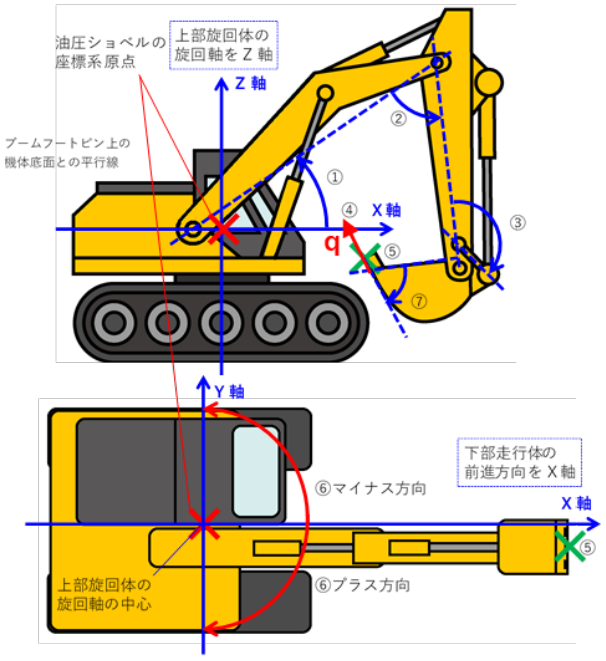



図-2 油圧ショベルの座標系、位置の定義

表-4 車両動作指令の制御信号一覧

| | 制御パラメータ | 制御パラメータの概要 |
|---|---|---|
| 作業機操作設定 | 目標位置 | 図-2 ⑤の位置(X, Y, Z) |
| | 目標姿勢 | 図-2 ④の姿勢(**q**:クォータニオン) |
| | 移動速度 | 目標位置、目標姿勢への移動速度 |
| 作業機操作指令 | 動作指示 | 作業機操作の開始/停止指令 |
| 上部旋回操作設定 | 目標角度 | 下部走行体に対する旋回体の目標角度 |
| | 回転速度 | 旋回体の回転速度 |
| 上部旋回操作指令 | 動作指示 | 上部旋回操作の開始/停止指令 |
| 走行設定 | 目標速度 | 油圧ショベル走行時の目標速度 |
| | 目標角速度 | 油圧ショベル走行時の目標角速度 |
| 走行指令 | 動作指示 | 走行の開始/停止指令 |

表–5 車両情報の制御信号一覧

| 制御信号 | 制御パラメータ | 制御パラメータの概要 |
|---|---|---|
| 作業機作業状態通知 | ブーム角度 | 図-2 の①の角度 |
| | アーム角度 | 図-2 の②の角度 |
| | バケット角度 | 図-2 の③の角度 |
| 作業機動作完了通知 | 作業機操作完了 | 作業機操作の完了通知 |
| | 作業機停止完了 | 作業機停止の完了通知 |
| 上部旋回作業状態通知 | 上部旋回体角度 | 図-2 の⑥の角度 |
| 上部旋回動作完了通知 | 上部旋回操作完了 | 上部旋回操作の完了通知 |
| | 上部旋回停止完了 | 上部旋回停止の完了通知 |
| 走行状態通知 | 車両速度 | 油圧ショベル走行速度 |
| | 車両角速度 | 油圧ショベル走行角速度 |
| 車両稼働状態通知 | 燃料残量 | 油圧ショベルの燃料残量 |
| | 油温 | 作動油の温度 |
| | エンジン回転数 | 油圧ショベルのエンジン回転数 |
| | 緊急停止状態 | 緊急停止中かどうかの状態 |

## ３．自律施工技術基盤の開発

提案する自律施工技術基盤の概要を図３に示す。共通化された制御信号に対応した建設機械、ミドルウェア、シミュレータ、実験フィールド（図中赤点線内）が本基盤の対象とする領域である。本基盤の上に、実際の施工で利用するアプリケーションを構築することを想定している。

ミドルウェアには、Robot Operating System(ROS)[6]を採用し、分散処理、ロボット用ライブラリの活用を容易としている。本基盤では、ROSを管理している団体や大学、研究機関等が公開しているパッケージに加えて、建設機械向けに必要となる独自のパッケージを開発した。

2022年8月現在では、本技術基盤を、土木研究所が保有する日立建機製ZX120(12t級油圧ショベル)

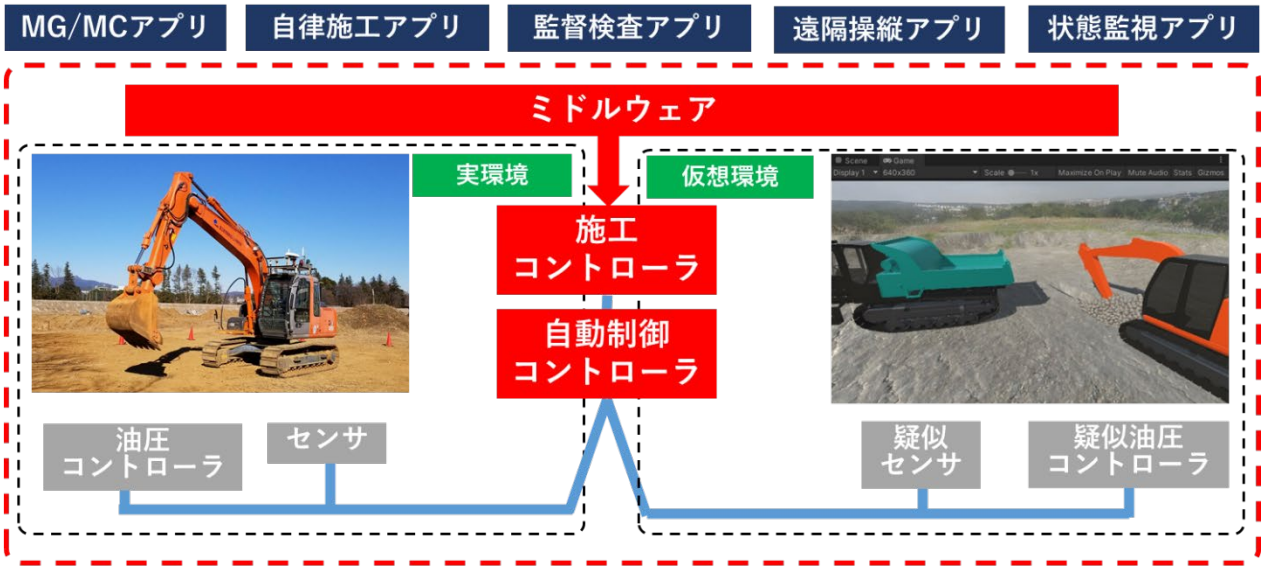



**図3 自律施工技術基盤の概要**

に構築した（図-3左）。ZX120に設置した日立建機製の遠隔装置の有線入力端子と組込コンピュータを接続し、組込コンピュータ上で操作指令から操作信号に変換し、遠隔装置へ入力するシステムを開発し、制御信号入力とした。また、自動運転時は、有線端子とコンピュータを接続し操作信号が入力されているため、遠隔操作用の非常停止回路が無効となる。そこで、別系統の特定小電力無線を利用した非常停止回路を機体に搭載し、想定外の動作時にエンジン回転を停止させるシステムを有している。機体姿勢の推定のため、ZX120のブーム、アーム、バケットの関節回転部にダナハー製アブソリュートエンコーダAC58を搭載し、車体本体にはNovatron製IMU G2を取り付けた。機体の位置および方位角推定のため、キャビン上部にHemisphere製RTK-GNSSコンパスV500を搭載した。

シミュレータ(図-3右)は、Unity上に構築し、物理エンジンにAGX Dynamicsを利用した。AGX Dynamicsによる最適化された部分的な粒子計算により、掘削、運搬時の土砂の挙動まで含めたリアルタイム土砂シミュレーションが可能である。

## 4．まとめ

自律施工における協調領域として、建設機械の制御インターフェースに注目し、ISO 15143をベースとして、施工コントローラと自動制御コントローラ間について、複数メーカ・複数機種の油圧ショベルを共通化したインターフェースで施工コントローラから制御可能とする制御信号リストを提案した。

今回の検討の対象外とした、自律制御コントローラと油圧コントローラ間のインターフェース定義については、建設機械の油圧制御の機構や制御特性を熟知している建設機械メーカ等の協力・賛同が必須である。既に先行しているJ1939-71 等の規格等を参考に共通化を今後検証する必要がある。

また、開発した自律施工技術基盤の構成について紹介した。今後は、プラットフォームや土工フィールドを活用し、技術の検証・評価や技術競技会などを行っていく予定である

## 参考文献


1) i-Construction推進コンソーシアム 第6回企画委員会資料- 4 , https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/pdf/04.6_kikaku_siryou4.pdf, (2021/9アクセス)
2) 一般社団法人日本建設業連合会 土木工事技術委員会 土木情報技術部会 情報利用技術専門部会：建設業のためのロボットに 関する調査, 建設マネジメント技術, pp47-51, 2020 年 11 月号
3) L. Zhang, et al. : An autonomous excavator system for material loading tasks, Science Robotics, Vol. 6, Issue 55, 2021
4) Heikkil¨a, R., et al. : Development of an Earthmoving Machinery Autonomous Excavator Development Platform, Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Vol. 36. IAARC Publications, 2019
5) ISO 15143-1:2010, Earth-moving machinery and mobile road construction machinery -- Worksite data exchange -- Part 1: System architecture
6) ROS: https://www.ros.org/

# 43. 自律走行式土工用振動ローラの開発

## 共同開発プロジェクトによる試験研究

酒井重工業株式会社　○ 櫛田　成基
酒井重工業株式会社　遠藤　涼平
酒井重工業株式会社　青山　雅規
JIG-SAW 株式会社　志賀　太生

### １．はじめに

近年の建設業界においては建設労働人口および熟練オペレータの激減という問題を抱えている。その対策として国土交通省は i-Construction を推進中で，特に建設機械の自動化関連技術は，建設現場での早期確立が望まれる技術の一つである。同省は「国土強靭化に関する施策のデジタル化」[1]の中で，無人化施工技術の安全性・生産性を向上させ，2025 年度までに建設機械の自律制御・走行技術の確立を目指している。これらに寄与すべく弊社は JIG-SAW㈱と自律走行式振動ローラの共同開発に着手し「Auto-Drive Synchronized Control System, “ASCS” for Compaction Equipment」と称する開発プロジェクトを立上げ，その共同体メンバーとして参画頂いたゼネコン各社と実証試験を行った。本報では自律走行車両のシステムおよび試験結果（設定走行経路との誤差）の概要について報告する。

### ２．自律走行式ローラ（研究機）の構成

#### 2.1　システム構成

研究機には一般的な土工用振動ローラである 10t 級の弊社 SV513D 型を選定し，自律走行に必要な改造を行った。写真-1 に示す，RTK-GNSS システム，自律走行用プログラム搭載の車両制御用 PC，車両コントローラ，緊急ブレーキ，操舵シリンダ用の測長センサなどを搭載した。

写真-1　自律走行式ローラと主な改造項目

#### 2.2　安全装置

3D センサを用いた緊急（自動）ブレーキシステムを初め，遠隔停止スイッチ，手動停止スイッチ等の複数のブレーキシステムを搭載した。さらにモニタカメラを CAB 上部の前後左右に 4 個搭載し遠隔操作画面上で車両周辺の安全性を常時確認した。

### ３．走行試験

試験場（幅 6m×長さ 25m）において，速度 4km/h，無振動，前後進 1 往復×3 レーン×横方向 1 往復の走行試験を実施した。RTK-GNSS データから算出した前輪中心の走行軌跡を図-2 に示す。直線部では，設定経路に対する前輪中心の走行軌跡の誤差は，平均 3.2cm，最大 16.4cm，また始点と帰着時の終点との誤差は 3.1cm であった。

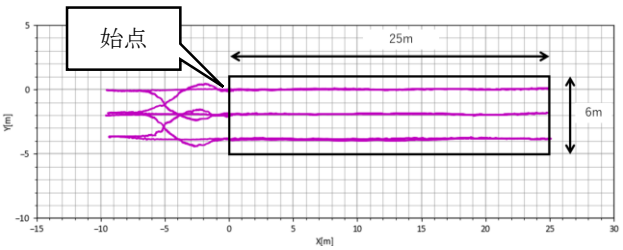



図-2　走行実験結果 1（無振動）

図-3 に走行軌跡の左右誤差とその発生率を示す。＋と―は進行方向の右側および左側の各誤差で，幅 2cm 毎（例：中央値 0 は±1cm）に示す。中央値 0 に対して正規分布し誤差±5cm 以内に全データの 73%，±10cm 以内に 97%が含まれる。

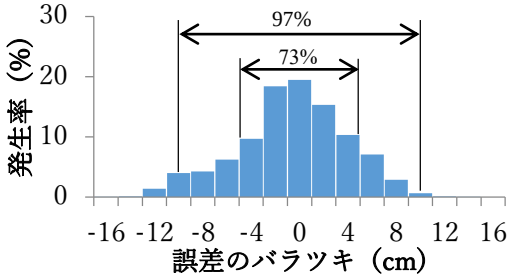



図-3　走行軌跡の左右誤差とその発生率の関係

ここで 10cm 以上の誤差の発生率が 3%と非常に低いのは，設定経路から外れた場合の自動復帰プログラムが有効に機能しているためと考えられ，その実用性を確認することができた。

## ４．共同開発プロジェクト

### 4.1　プロジェクト概要

共同プロジェクト発足前から弊社は JIG-SAW㈱と共同開発した自動操縦プログラムを用いて社内試験を行っていた。記述のように実用化の目途がついたので「Auto-Drive Synchronized Control System, “ASCS” for Compaction Equipment」と称する開発プロジェクトを立上げた。その共同体メンバーとして参画頂いたゼネコン各社と試験工事において試験研究を行った。以下に試験結果の概要を紹介する。

### 4.2　総務省 5G 実用化実証試験 [2)]

本試験の目的は第 5 世代移動通信システム「5G」（5G と称す）を活用し 3 種類（バックホー，キャリアダンプ, ブルドーザ）の建設機械（建機と称す）の遠隔操作と弊社の自律走行式振動ローラの同時連携に加え，工事に必要な施工管理データのリアルタイム伝送・解析による一般的な道路造成工事の施工への適用性を確認することであった。遠隔施工管理室と自律走行式振動ローラの間で，施工開始指示データと，振動ローラの位置情報，転圧結果，品質等がリアルタイムで伝送された（写真-3）。ローラは幅 8m×長さ 22m の工区において，速度 4km/h，振動（低振幅），前後進 3 往復×4 レーンを走行した。設定経路に対する前輪中心の走行軌跡の誤差は，平均 14.2 cm，最大 39.7cm であったが，終点での誤差は+1.2 cm に収束した。

写真-3 総務省 5G 実用化実証試験

### 4.3 自動建機の協調運転システム [3)]

複数の自動運転建設機械（自動建機と称す）の協調運転を制御するシステムによる 4 種類の建機（バックホウ，クローラダンプ，ブルドーザ）の協調運転性能を実証する現場において，同システムの協調制御用プラットフォームに自律走行式振動ローラの通信システムを連携して協調性を確認した（写真-4）。現場では各自動建機の位置情報と作業進捗を監視しながら，建機各々の自動運転の実行および停止を指示するなど協調運転の制御を行った。自律走行式振動ローラは幅 8m×長さ 20m の工区において，速度 4km/h，無振動，前後進 4 往復×4 レーンを走行した。設定経路に対する前輪中心の走行軌跡の誤差は，平均 16.9cm，最大で 44.2cm であったが，終点での誤差は+2.3cm に収束し，十分な精度を確保できることが実証された。

写真-4　自動建機の協調運転システム

## ５．おわりに

走行経路誤差は自律走行式振動ローラの重要な基本性能の一つであり，直線走行部での平均誤差は社内試験（無振動）で 3.2cm, 現場試験では 14.2cm（有振，4.2 項），16.9cm（無振，4.3 項）であったが，設定経路を維持するための自動復帰プログラムにより，走行終了時の終点での左右誤差は，全ての試験で約 3cm 以下に収束していることを確認した。共同体メンバーとして参画頂いたゼネコン各社との現場実証試験を通じて，各社システム用制御プラットフォームと容易に連携できることも確認した。共同体メンバー会社のご厚意とご協力に感謝する。今後も自律走行式ローラが建設業界の抱える問題解決に資すべく，共同体メンバーと協力して更なる改良を図る所存である。

### 参考文献

1) 国土交通省，国土強靭化に関する施策のデジタル化，2020年12月11日発表.
2) https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20200214_1.html（株式会社大林組HP,2020年2月14日参照）
3) https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2021/210209_5072.html（大成建設株式会社HP,2021年2月9日参照）

# 44. バッテリ駆動式ミニショベルの開発

株式会社小松製作所　　永嶋　芳明
○富澤　美帆
奈賀　宏司

## １．はじめに

「脱炭素社会」の実現が世界的な潮流である中，建設業界においても数々の環境に対応した取り組みが進められている。コマツも製品稼動時を含めた $CO_2$ 削減への取り組みを推進しており，その方策のひとつとして建機の電動化技術の開発を進めている。

コマツでは様々な建機を扱っているが，中でもミニショベルは街中や住宅地，屋内での稼働が多く車体直近での人手作業もあるため，車体からの排気ガスや騒音が問題となりやすい。また，車体が小さくエンジンと運転席が近いためオペレーターが排熱やエンジン振動の影響を受けてしまう。

既存のエンジン式ミニショベルをバッテリ駆動で電動化することによりそれらの問題が改善され，地球環境への配慮と快適な作業環境を実現することができる。

しかし，ただ電動化するだけでは商品として成り立たない。「高電圧の危険性」，「稼働時間への懸念」，「バッテリの劣化」など電動化の課題があり，商品とするにはこれらを克服しなければならない。

そこでコマツでは電動化の特徴を生かし，かつ，電動化の課題を克服し商品として成り立つ「バッテリ駆動式ミニショベル PC30E-5」を開発した。

本論文では，電動化の課題解決に主眼を置き PC30E-5 の車体構造や充電方法，そしてバッテリ駆動式ミニショベルの市場評価について報告する。

図-1　PC30E-5

## ２．車体構造

### 2.1　車体概要

PC30E-5 は，エンジン式ミニショベル PC30MR-5 をベースに燃料＋エンジンをバッテリ＋電動モータへ置き換えた車体であり，油圧コンポーネントはエンジン車と共通である。

車体システム図を図-2 に示す。駆動バッテリはイージーメンテナンスバッテリを採用した。イージーメンテナンスバッテリは鉛電池ではあるが，充電中に発生したガスを内部で水に還元するため電解液の減少がほとんど無く面倒な補水が不要である。イージーメンテナンスバッテリはコマツのフォークリフトですでに採用しており作業用車両での過酷な使われ方において電気的安全性，耐久性等の実績があるため，PC30E-5 ではあえて本バッテリを採用した。バッテリ 50 個を 2 並列で配列しており，バッテリ容量は 36kWh，バッテリ総電圧は 300V となっている。300V にしているのはハイブリッド建機にて培ったコマツ内製コンポーネ

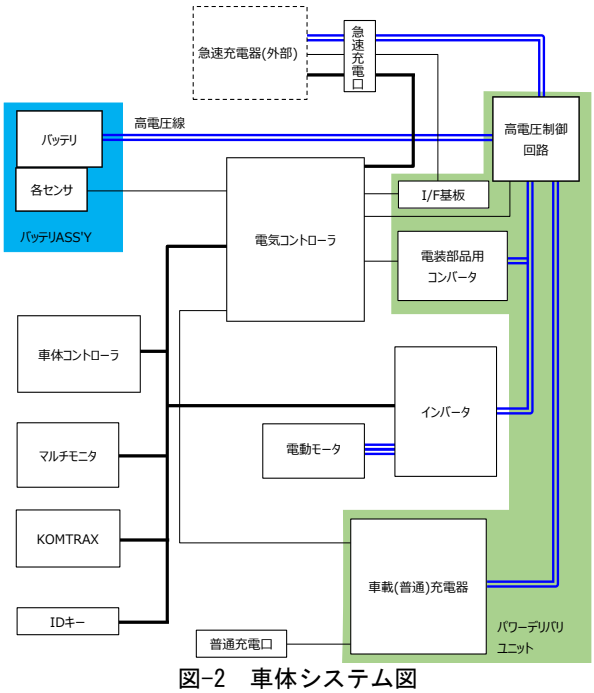



図-2　車体システム図

ント技術を活用するためである。

バッテリの電力は，高電圧回路の切り替えを行うパワーデリバリユニットを介しインバータで電力変換され電動モータを駆動するのに用いられる。電動モータの出力は，PC30MR-5 のエンジン出力と同じ 18.2kW である。エンジン式ミニショベルではエンジンコントローラと車体コントローラでエンジン制御とポンプ制御を行っているが，PC30E-5 ではエンジンコントローラの代わりに高電圧系を制御する電気コントローラと電動モータを制御するインバータコントローラを搭載し，エンジン式と同等性能の作業が可能となっている。

また，稼働パターンが様々であるミニショベルの現場に対応するため，充電方式は普通充電と急速充電の 2 タイプを用意している。各充電器から入力された電力はパワーデリバリユニットを介してバッテリを充電する。(詳細は後述)

## 2.2　高電圧に対する安全性

電動化の課題の一つに「高電圧の危険性」がある。高電圧のため様々な場面で感電の恐れがあるが，PC30E-5 では以下のしくみで高電圧に対する安全性を確保している。

(1) 車両点検や整備時に対する安全性

車両の点検や整備を行う際，オペレーターやサービス員が高電圧部品を不用意に触り感電する可能性が考えられる。PC30E-5 では，技能資格者以外が容易に高電圧部位に触れられない車体構造としている。

まず，普通充電器や電装部品用コンバータ，高電圧回路の切り替えを行う高電圧制御回路などケーブル以外の高電圧部品をパワーデリバリユニットの中に集約した。そのパワーバッテリユニットを含めバッテリ，インバータ，電動モータの高電圧コンポーネントはそれぞれ筐体で構成され保護等級を確保している。そして，これら高電圧コンポーネントとそれらをつなぐケーブルを車体後方に完全集約させ右前方の日常点検領域，左前方の油圧機器整備領域と隔離し，車両の点検や整備時に高電圧領域が露出しない構造としている。(図-3)

また，高電圧領域周辺を保護する外装は，高電圧回路を遮断するサービスプラグを取り外したのち後方から順番にしか取り外せない構造となっている。サービスプラグのカバーは特殊工具が必要なボルトを採用していて，特殊工具は技能資格者のみ所有するよう管理し高電圧領域へのアクセスを制限している。(図-4)

(2) バッテリASS’Yの安全性

高電圧コンポーネントの中でバッテリは常に電荷をもっている。50個のバッテリで構成されるバッテリASS’Yは，回路上非活線になっている状態でも組み立てや分解の際に些細なミスで感電する恐れがある。PC30E-5では，バッテリASS’Yを4段構成としており段間はコネクタ式のケーブルで接続している。組立時や分解時などバッテリ単体へのアクセスが必要な際は，段間ケーブルを取り外しより少ないバッテリ数のサブASS’Y単位で扱える構造としている。(図-5)

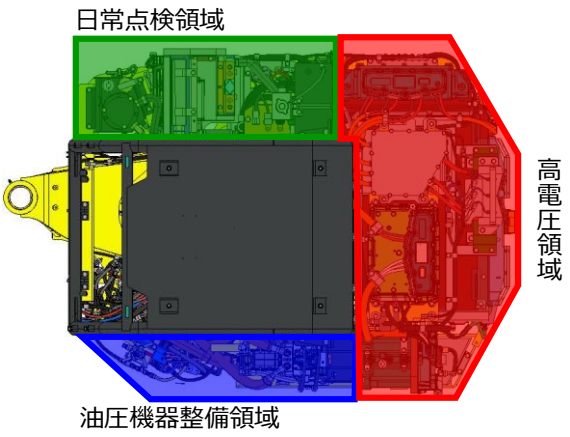



図-3　車体レイアウト図

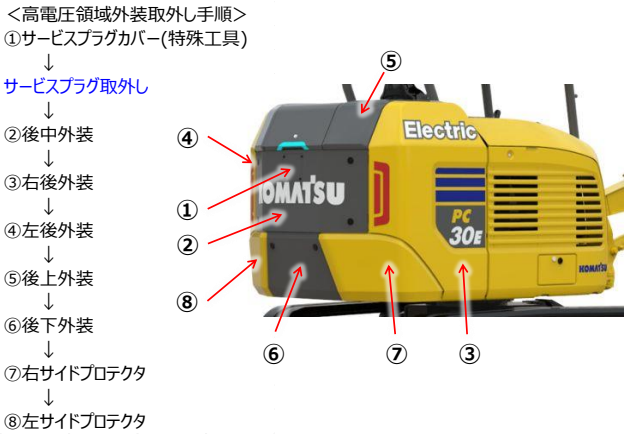



図-4　高電圧領域外装取外し手順

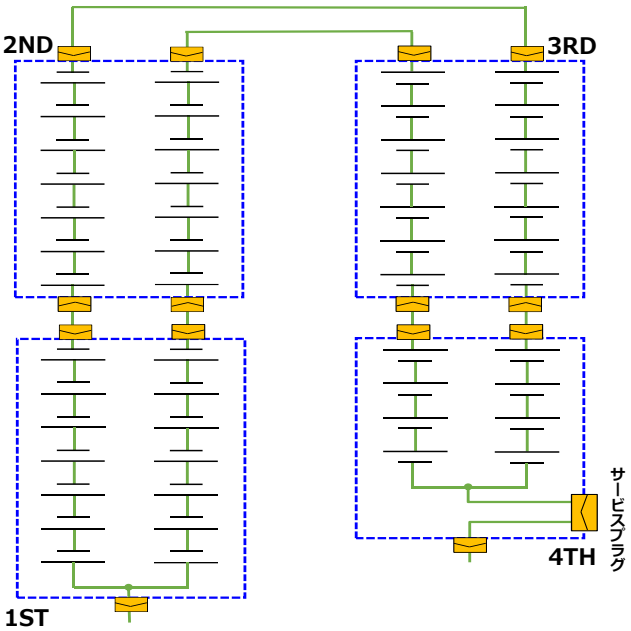



図-5　バッテリ ASS’Y 構成

(3) 異常事態に対する安全性

ミニショベルは狭い現場での使用が大半であり，旋回や後進時に衝突する恐れがある。また，作業によってはバランスを崩し転倒する恐れもある。それらの衝撃により高電圧部品が損傷したり，雨や洗車，結露などで水が高電圧部し侵入し，漏電が発生し感電する可能性がある。

PC30E-5 では，高電圧領域の周囲は外装取付を兼ねたパイププロテクタで囲まれており，高電圧コンポーネントを衝撃から保護する構造としている。

高電圧回路においては，仮に漏電しても感電しない構造，かつ，すぐに漏電を検出できる構造としている。イメージを図-6に示す。まず，高電圧回路は車体アースと絶縁されている。この状態で高電圧部品に触れても閉回路ができないため感電しない。また，高電圧回路の一部が漏電した場合でも車体に触れるだけでは感電しない。この状態で高電圧部に触れると閉回路ができ感電するが，前述した通りケーブル以外の高電圧部品はすべて筐体の中に入っていて機械的に囲われているため，容易に高電圧部には触れられない。筐体内に収めることができないケーブルはシールド構造とし，ケーブルが損傷しても保護される。

そして，高電圧回路には絶縁劣化センサを組み込み，漏電を検知したらすぐに警告を発報するようにしている。

## ３．稼働時間と充電方法

### 3.1　稼働時間

電動化の課題二つ目に「稼働時間への懸念」があげられる。エンジンの給油とは異なりバッテリの充電には時間がかかるためいつでも充電することはできない。また，ミニショベルは多くの業種で使用されており稼働時間も作業負荷も様々である。そこで 1 回の充電での稼働時間をどのくらいに設定するかが車両としてとても重要となってくる。

そこで我々はまず，弊社の建機に標準搭載しているKOMTRAXを用いてエンジン式PC30MR-3の稼働状況を調査し分析した。その結果，市場での平均稼働時間は 2.5h となり，これを一般的な使われ方で達成することを PC30E-5 の車体スペックとして設定した。

しかし，これだと約半数の現場しかカバーできないため，稼働時間の延長策として現場で短時間で充電できる急速充電を用意した。急速充電を利用すれば高負荷・長時間といった特殊な用途を除く約 70%の現場をカバーすることができる。

代表的な稼働形態とバッテリ容量のイメージを図-7 に示す。普通充電を基本とし，稼働時間が多い現場では急速充電を行い運用する。

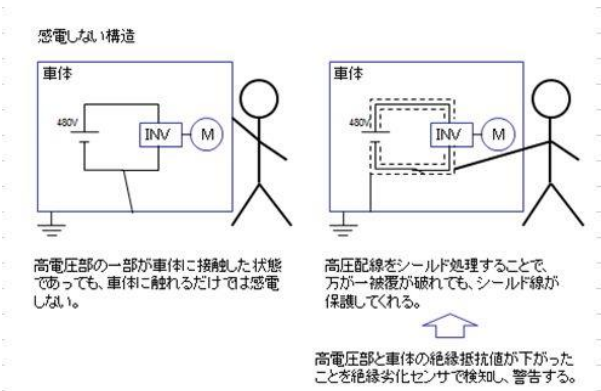



図-6　高電圧回路保護の考え方

### 3.2　充電方法

(1) 普通充電

普通充電は，夜間などの車両休車時を利用し長時間かけてバッテリを充電する方法である。バッテリ残量なし（容量 20%）から満充電（容量 100%）まで 12 時間を目安としている。

必要な電源は工事現場の仮設電源として設置可能な単相 200V であり，EV 用の充電コネクタで電源と車載されている普通充電器をつなぎ充電を行う。

(2) 急速充電

急速充電は，昼休みなどの休憩時間に短時間でバッテリ容量を 80%まで回復させる充電方法である。鉛電池の特性上，急速充電のような大電流では容量 80%までしか回復させることができない。バッテリ残量なし（容量 20%）からバッテリ容量 80%まで 1.2 時間を目安としている。

急速充電には CHAdeMO（注 1）方式を採用した。EV で普及している方式であり，安全性が確保されている。必要な電源は現場の仮設電源として設置可能な三相 200V であり，その電源に接続した外置

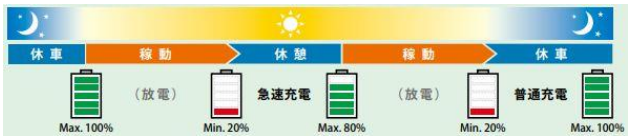



図-7　稼働パターンとバッテリ容量イメージ

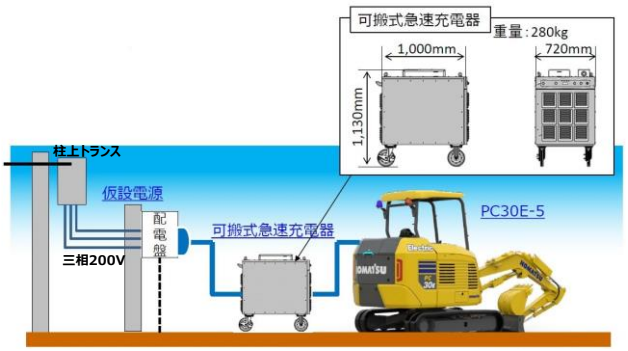



図-8　急速充電

き急速充電器と車両をつなぎ充電を行う。

EV 用の急速充電器はサービスエリアや商業施設駐車場などに固定して設置してあることが大半であるが，ミニショベルの稼働現場は日々移動するため固定式急速充電器では休憩時間での急速充電に対応できない。そこでコマツでは車両とともに移動可能な可搬式急速充電器を準備した。電源は三相 200V，かつ，20kW 以下のためキュービクルなどの高圧受電設備は必要なく，現場に仮設電源があれば設置可能となっている。(図-8)

## 4．バッテリ劣化への対応

電動化の課題三つ目に「バッテリの劣化」がある。鉛電池は充放電を繰り返すと経年劣化により容量が低下していき寿命を迎える。コマツでは定格容量の 80%になった時点を寿命と定義している。この経年劣化にはバッテリの使い方が大きく影響する。誤った使い方を続けるとバッテリは早期に劣化が進み寿命が短くなってしまう。

バッテリ劣化の原因で大きなものに「サルフェーション」と「活性物質や格子の劣化」がある。サルフェーションとは，充電不足（満充電状態でない）や過放電の繰り返しによりバッテリ内の極板に硫酸鉛が蓄積される現象である。充電時，硫酸鉛で覆われた部分は化学反応をおこせないためバッテリ容量の低下につながる。

サルフェーションの対策として，バッテリ容量 100%を超えても余分に充電を続けバッテリ内の液を攪拌させて硫酸鉛を極板から除去する押込充電を行う必要がある。しかし，押込充電＝過充電を頻繁に繰り返すと活物質や格子が劣化し，こちらもバッテリ容量の低下につながる。従って，バッテリ早期劣化への対処として車体の使われ方に合わせた適切な充電コントロールが必要となる。

また，鉛バッテリは充電時に発熱するが，バッテリ温度が高い状態で大電流による充放電を行うと活物質や格子の劣化が促進されバッテリ容量の低下につながる。イージーメンテナンスバッテリはバッテリ温度 10℃上昇で寿命が約 15%低下する。そして，モジュールを構成する個々のバッテリ温度に差があるとバッテリ内部抵抗＝充電電流や充電率に差が発生しバッテリ間での寿命の差につながる。従って，バッテリ温度の監視も重要となる。

バッテリの早期劣化を防ぐため，PC30E-5 では常にバッテリ状態を監視している。バッテリ回路に組み込まれているセンサ類から算出されるバッテリ残量，放電量，充電量，温度などのバッテリ状態や，充電回数，充電時間などの充電状況を取得・解析し，異常の検知や充電パターンのコントロールを行っている。

充電パターンの詳細を表-1 に示す。まず通常は普通充電 4 回に対して均等充電＝押込充電 1 回の充電パターンで運用する。当初はサルフェーション対策の押込充電を毎回実施していたが，このパターンにすることで過充電も抑制でき毎回の押込充電に対し 40%の寿命延長が可能となる。また，急速充電や充電の中断が続き満充電にならない状態が多く続くと充電不足で大量のサルフェーションが発生する。満充電しない充電が 12 回続いた場合は，押込充電時間を延長したリフレッシュ充電を 1 回強制的に行いサルフェーションを除去しバッテリ状態を改善させる。このように充電パターンをコントロールすることによりバッテリ早期劣化の防止を図っている。

また， PC30E-5 では KOMTRAX で発信させる情報(車両稼働状況や位置情報)にこれらのバッテリ情報や充電情報を追加した。日々のバッテリ状況を詳しく知ることができるとともに，販売店がそれらの情報を元にバッテリの使われ方を解析し，バッテリを長持ちさせる運用方法をユーザーに提供したりバッテリの寿命を予測したりすることができる。

表-1　充電パターン

| 用途 | 通常 | | レスキュー | 短時間 |
|---|---|---|---|---|
| 種類 | 普通充電 | 均等充電 | リフレッシュ充電 | 急速充電 |
| 目的 | 毎日の充電 | サルフェーション除去 | 大量のサルフェーション除去 | 短時間で容量回復 |
| 内容 | ↑ | 普通充電の5回に1回 | 満充電しない充電が12回続いたら1回 | CHAdeMO充電器で行う |
| 交流電源 | 単相200V | ← | ← | 三相200V |
| 充電時間比 | 1.0 | 1.2 | 1.4 | 0.2 |

## 5．バッテリ駆動式ミニショベルのメリットと評価

バッテリ駆動式の主なメリットは､「ゼロエミッション」,「車体排熱の低減」,「騒音の低減」である。これらメリットの詳細と市場での評価を報告する。

### 5.1　バッテリ駆動式のメリット

(1) ゼロエミッション

バッテリ駆動式にすることにより稼働時に車体から発生する排気ガスがゼロになる。さらに，PC30E-5 が車体稼働で消費する電力を発電所で発電する際の $CO_2$ 排出量は 8.8kg/h であり，エンジン式 PC30MR-5 稼働時の $CO_2$ 排出量 14.7kg/h に対し 40%の低減となる。これらは「脱炭素社会」における市場の環境ニーズの高まりにマッチしている。

また，稼働時の排気ガスゼロはミニショベルの現場の作業環境改善にもつながる。車体の周囲は

常にクリーンなため，地下工事や屋内工事で排気ガスがこもったり車体直近での人手作業員に排ガスがかかることもなく，現場作業者への負担が軽減される。

(2)車体排熱の低減

エンジン式での車体の一番の熱源はエンジンである。ミニショベルは日本ではキャノピ仕様が主流，かつ，車体が小さくレイアウト上エンジンの上に運転席があるのでオペレーターは熱の影響を受けやすい。バッテリ駆動式はそのエンジンがないため運転席や周囲への熱の影響が少なくなる。バッテリ駆動式とエンジン式についてサーモグラフによる発熱の比較を図-9 に示す。これは外気温10℃で作業開始 30 分後の状況である。バッテリ駆動式の方が熱の影響が少ないことは明確である。

オペレーターの作業環境改善はもちろん，屋内工事での室温上昇の抑制，樹木近辺での作業で問題となる排熱による樹木の立ち枯れがなくそのための保護を施さなくて良いなどのメリットもある。

(3)騒音の低減

バッテリ駆動式はエンジンによる騒音がないのでエンジン式よりも圧倒的に静かな作業環境となっている。

まず，オペレーター耳元の騒音についてエンジン式との比較を表-2 に示す。すべて Hi アイドルでの測定結果である。ポンプリリーフ時は油圧機器の音の寄与が大きいため騒音の差は 1.7dB と少ないが，作業時の騒音は 4dB，アイドリング時では 6.3dB もの差があることがわかった。アイドリング時の騒音の差は航空機の機内(エンジン式)とバスの車内(バッテリ駆動式)ほどの差になる。この結果より，オペレーターの作業環境を大幅に改善できていることがわかる。

次に，車体の周囲騒音や周辺作業員耳元の騒音についてエンジン式との比較を図-10 に示す。ここで周囲騒音は作業時，作業員耳元騒音は Hi アイドルでのアイドリング時の測定結果である。10m 離れた場所での周囲騒音では 5dB の差，作業員耳元騒音は最大で 13dB もの差があることがわかった。ミニショベルの現場では周辺作業員が多く，作業指示などオペレーターと口頭でコミュニケーションをとる機会が多くある。エンジン式では声が聞こえづらく指示が通らない場合があるので大声を出したり作業を中断し Lo アイドルに落とす必要があったが，バッテリ駆動式は作業中でも口頭でコミュニケーションが取れるので作業効率を改善でき作業者の安全も確保できる。また，ミニショベルの現場は都市部や住宅地での工事が多く近隣住民から騒音の苦情がくることも多い。バッテリ駆動式では周囲騒音も低減するので，静粛性が求められる住宅や学校，病院近くでの作業，夜間工事等に最適である。

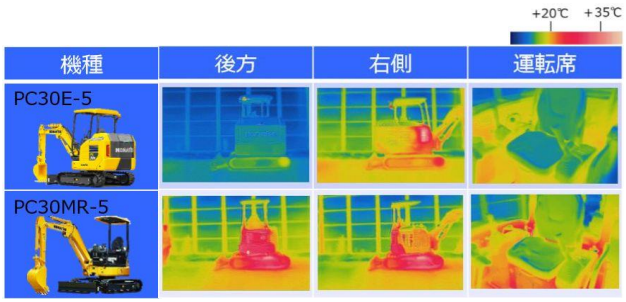



図-9　サーモグラフによる発熱の比較

## 5.2　市場での評価

PC30E-5 は発売前にユーザーテストを実施した。その評価を図-11 に示す。5 段階評価でエンジン式を 3 点としそれに対してバッテリ駆動式を採点していただいた。点数が高いほど良い評価である。総評として，バッテリ駆動式のメリットであるゼロエミッション，車体排熱の低減，騒音の低減は現場の安全や作業効率に寄与し，現場や業務の改善が可能となりユーザーの懸念事項を払拭する車両になるという評価であり，特に騒音低減と車体排熱低減について高評価であった。騒音低減については，オペレーターと周辺作業者のストレス払拭や周辺作業者の安全確保，工事現場近隣住民からの苦情対策の点を評価していただいた。車体排熱低減については，屋内工事での室内温度抑制や運転席環境改善の点を評価していただいた。当初想定していた通り，ミニショベルの現場においてバッテリ駆動式のニーズは大きく現場での問題解決に大いに貢献できることがわかった。

ただ，一方で課題もある。車体寸法・重量，稼働時間，電源確保である。

表-2　オペレーター耳元騒音比較

| 項目 | | コマツ ①PC30E-5 | コマツ ②PC30MR-5 | ①−② |
|---|---|---|---|---|
| ダイナミック騒音 | dB(A) | 72.7 | 76.7 | △ 4.0 |
| 無負荷 | dB(A) | 69.2 | 75.5 | △ 6.3 |
| ポンプリリーフ時 | dB(A) | 75.2 | 76.9 | △ 1.7 |

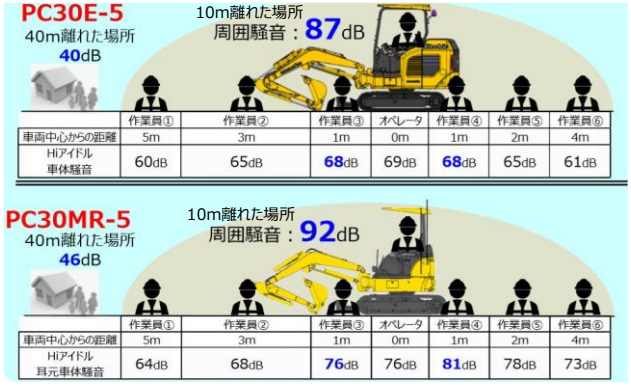



図-10　周囲騒音と作業員耳元騒音比較

車体寸法・重量については，後方超小旋回ではない点とエンジン式 PC30MR-5 に比べ重量が増加している点に難色を示すユーザーが多かった。これに対しては技術の進歩が著しい EV 用バッテリの採用などで車体寸法・重量の縮小化を図っていく。

次に稼働時間について，昼休みなどの休憩時間を利用しての急速充電は稼働時間延長に有効であり大半の現場では PC30E-5 のスペックで問題なく使用していただけた。しかし，バッテリ駆動式のメリットを大いに生かせる屋内解体作業やプラントでの産廃作業においては稼働時間が長い傾向があり，普段エンジン式での稼働時間が 10h を超える現場もあった。このような現場では数回の急速充電を行っても 1 台ではカバーできないため，ミニショベル複数台をまわして稼働させ対応した。バッテリ駆動式のメリットを生かせる現場で安心して使用してもらうためにはさらなる稼働時間の延長策が求められる。

最後に電源確保について，屋内やプラントでの稼働では急速充電器用の電源確保が比較的容易であるが，土木，管工事，造園など日々現場を移動する稼働においては申請や電気工事等が課題となり急速充電用仮設電源の設置が困難であった。稼働時間延長のための急速充電だが電源が取れないことには意味がない。このような電源を確保できない稼働現場においてどのように充電を実施するかが今後の課題である。

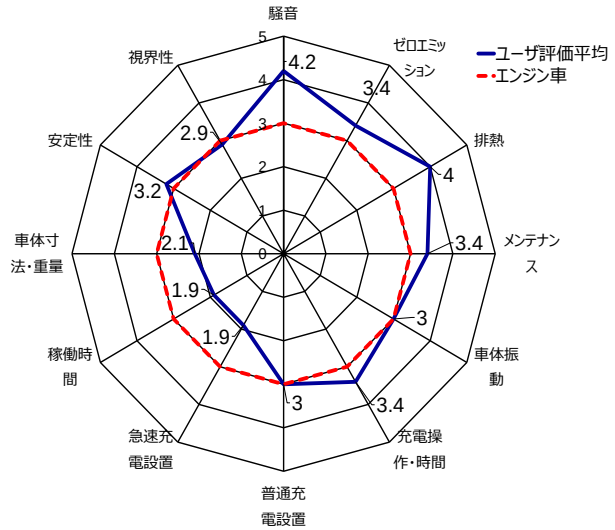



図-11　ユーザーテスト評価

## ６．おわりに

PC30E-5 の開発により，ミニショベルならではのバッテリ駆動式のメリットを明確にすることができた。また，PC30E-5 はレンタルでの限定導入であるが，バッテリ駆動式ミニショベルを普及させるための課題も明確になった。今後は，今回培った電動化技術をベースにこれら課題の解決を図りより多くの現場で使用できる普及型モデルを開発し，さらなる「脱炭素社会」実現への貢献に取り組んでいく所存である。

注 1：CHAdeMO は CHAdeMO 協議会の登録商標

## 参考文献

1) 永嶋芳明・野村真・広田崇：バッテリ駆動式ミニショベル　PC30E-5　製品紹介，コマツテクニカルレポート，Vol.66 No.173，pp.33～39，2021年3月31日発行

# Ⅱ　梗概集

# １．簡易遠隔操縦装置（ロボＱＳ）の高度化について

九州地方整備局　九州技術事務所
技術活用・人材育成課長　福川　雅章
技術活用・人材育成課　○岡島　朝治

## １．はじめに

九州技術事務所では、災害現場において汎用タイプのバックホウ運転席に電動式アクチュエーター等の装置を取付けることにより、バックホウの遠隔操縦が可能となる簡易遠隔操縦装置（以下「ロボＱＳ」という）を保有している。

ロボＱＳは、法面崩壊など二次災害の恐れがあり有人施工が困難な場所での応急復旧作業等での使用を想定しているが、対応しているのは汎用バックホウの走行操作とブーム、アーム、旋回を含めたバケット操作であり、ブレーカーやつかみ機等のアタッチメントの操作には対応していなかった。

●アタッチメントの種類

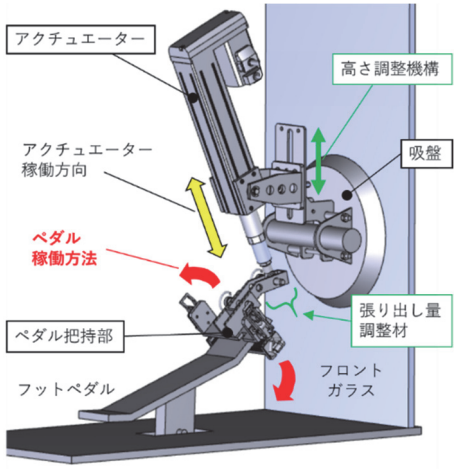
今回はロボＱＳの適用範囲拡大を図るため、あらたにアタッチメント操作機能の追加を行った。併せて、緊急性が必要とされる災害現場においてアタッチメントの操作も含めた遠隔操縦による作業効率を低下させないための補助装置の開発をおこなった。

## ２．アタッチメント駆動用装置の開発

アタッチメントの遠隔操作を可能とするには、走行用レバーの左右にあるアタッチメント用フットペダルを操作するための駆動用装置の開発が必要であった。

駆動用装置の構造はフットペダルのつま先側先端を把持する方式とし、そこにアクチュエーターを連結し、シリンダを伸縮させることによりフットペダルを前後に稼働させる機構とした。

●アタッチメント駆動用装置




装置の固定には特殊な工具類を使用したり、加工、穴開け、部品の取り外しなどの手間を要しないことを念頭に検討した結果、バックホウ操縦席のフロントガラスに吸盤を取り付け、アクチュエーターを連結させ

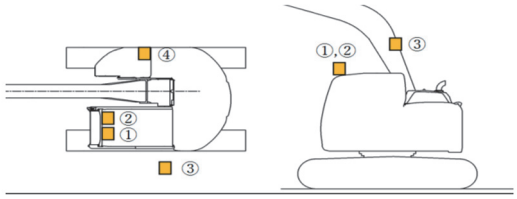
る方式とした。ペダルの厚さや運転席の形状にあわせて装置の連結部をある程度自由に調整できる構造とし、幅広い機種への取付を可能とした。

３．遠隔操縦の作業効率向上のための装置開発

予てより課題となっていた、搭乗操縦との違いによる遠隔操縦時の作業効率の低下をできるだけ抑制することを目的に、遠隔操縦者へ視覚・音声情報を補足するためのカメラ・音声装置や、実際の操縦席を模した操縦席型操作器を試作した。

カメラ装置は、走行、掘削、つかみ、破砕の作業別に検討を行い、以下に示す４視点のカメラによる映像取得が効果的であると考え、これらのカメラが設置可能な架台を製作した。オペレーターの好みにより作業視野をある程度自由に変更できるよう、カメラの位置を調整することが可能な構造とした。

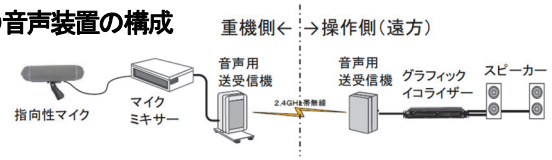
**●4視点カメラの設置位置とその映像**




| カメラNo | カメラ用途（視野） |
|---|---|
| ① | 作業範囲視野 |
| ② | 左右クローラー先端認識及び前方地表面視野 |
| ③ | 走行用鳥瞰視野 |
| ④ | 作業対象物の高さ方向認識 |

音声装置は状況把握の補助として、重機の作業音をリアルタイムに取得することができるよう、重機側に集音マイクを、遠隔操縦者側にスピーカーを設置した。また、その間にグラフィックイコライザーを介し、発生音源（周波数）別に音量調整することで不要な騒音（エンジン音等）を除去できるようにした。

**●音声装置の構成**




操縦席型操作器は、いわば実際の操縦席を模した遠隔操縦用リモコンといったものであり、実機搭乗時と同じ感覚で遠隔操作できる装置として試作した。

**●操縦席型操作器**

これらの試作機を用いて実際にバックホウの遠隔操縦を行い、オペレーターへヒアリングしたところ、いずれも有効であるとの意見が多かった。

４．おわりに

遠隔操縦の作業効率向上の検討に関し、カメラ搭載ドローンを用いた自由な視点を確保する方法も検討し、重機の真横からの視点が特に有効であることが判明した。

**●ドローンによる重機の真横からの視点**

しかし、実際の災害復旧現場へのドローンの導入は敷居が高いため、今後はドローン以外の方法で自由な視点を確保し、バックホウの遠隔操縦を補佐することができる装置について検討を予定している。

# ２．緊急車両等を通行させることのできる排水ホースの検討について

国土交通省中国地方整備局中国技術事務所　　田村　秀之
国土交通省中国地方整備局中国技術事務所　〇山川　　史

## １．はじめに

近年の集中豪雨による大規模な自然災害の増加に伴い排水ポンプ車による排水活動が増加している。

一般的な排水活動では、河川堤防などの天端道路を利用して排水ポンプ車と排水ホースを設置するため、作業中は緊急車両等の通行が遮断される。

そのため、緊急車両等が通行する際に市販のホースブリッジがない場合は、その都度、車両が通行可能な程度まで排水量を減らし、排水ホースの膨らみを抑えることで排水ホースの上を通行させている。

排水活動を止めることなく緊急車両等を通行させることができる対策として、導入が行われている市販のホースブリッジは、運搬や設置に係る労力が大きく、中長期間の設置には向いている一方、短期間で排水活動を終えて別の場所へ移動するケースもあるため、運搬や設置が容易にできる排水ホースの開発が必要であった。

## ２．試作排水ホースの仕様・検討

排水ポンプ車による排水は、水中ポンプの設置場所から排水箇所までの延長に応じて必要となる排水ホースを接続金具で接続し排水している。

試作排水ホースの基本形状は、この特徴を利用し、接続金具で排水ホースと試作ホースが接続可能な形状とすることとした。

また、車両の通行に支障がない構造とすること等を考慮し、排水時の試作排水ホース高さ 90㎜（車両の保安基準）、幅 1,900㎜ 以下（普通自動車車のホイールベース）、重量 30kg 以下（人力運搬）を満たすことを条件とし、長さ、幅、材料厚さ等、形状の異なる試作ホースを製作し現地試験を行った。

現地試験は、排水ポンプ車(30m3/min、水中ポンプ 7.5m3/min×４台)の水中ポンプ１台に接続した排水ホースと試作排水ホースを接続し、排水状態で試作排水ホースの上を軽自動車、乗用車、中型貨物車、大型貨物車を通過させ、排水状況や試作排水ホースの変状などの確認を行った。試験状況を写真１に示す。

写真１　現地試験状況

現地試験の結果、走行状態に影響なく排水できる試作排水ホースの高さ、幅、長さ、材料厚さの仕様が確認できた。

また、排水作業をしながら大型貨物車による連続走行試験を行った結果、500 回以上の走行が可能であることが確認できた。これは１日（8 時間）当り 62 台に相当する。試作排水ホースは安価なため消耗品的であり、また軽量なため実運用が可能であると考えている。

## ３．おわりに

排水活動を止めることなく緊急車両等を通行させることができる排水ホースの検討を行ったが、市販のホースブリッジに比べ軽量で且つ、設置は排水ホースと接続するだけの簡易作業のため、準備作業等の作業性も改善され、短期間の使用では、排水作業に対する耐久性も確認できた。

今後は、排水ポンプ車の携行品として配備を進めるとともに、必要に応じて改善に努めたい。

# ３．排水ポンプ車状態監視システム（ＤＳシステム）の紹介

## －作業員の安全を確保した排水作業の継続に向けて－

国土交通省中部地方整備局　中部技術事務所　防災・技術課長　　林　　学
国土交通省中部地方整備局　中部技術事務所　防災・技術課専門職　〇福万　敏行

１．はじめに

南海トラフ巨大地震の被害想定では、海抜０ｍ地帯を抱える濃尾平野は、津波により広範囲に浸水するため、多数の排水ポンプ車による長期に渡る排水作業が必要となる。東日本大震災の津波（写真－１）による浸水被害においても、最大 120 台の排水ポンプ車が排水作業を実施したが、余震による津波発生が危惧される状況下で、作業員の安全確保が課題となった。

その対策として、排水ポンプ車の稼働状況を遠隔監視することで、安全で効率的な排水作業の継続を可能とする「排水ポンプ車状態監視システム（以下「ＤＳシステム※」と言う。）」を開発した。

※Drainage　pump　truck（排水ポンプ車）Statemonitoring（状態監視）システム

写真－１　津波襲来状況１）

以下に、ＤＳシステムについて、開発の目的やシステムの概要、改良検討について紹介する。

２．システム開発の目的

東日本大震災における緊急排水作業(写真－２)は、24 時間体制で行われ、作業員は現場で排水状況の監視に当たっていたが、多くの余震によりしばしば作業が中断され、排水作業の継続や二次災害への懸念などの課題が指摘されていた。それらの課題を解決するために、排水ポンプ車の稼働状況を遠隔監視することで、ゴミ詰まりや給油等の必要な時だけ現場で作業を行い、二次災害に被災するリスクを少なく出来る。また、多数の車両を一括して監視することで、全体の排水状況を把握し、効率的な配置や運用が可能となる。

このような目的から、広範囲な湛水エリアで多数の排水ポンプ車を効率的に稼働させて、排水作業を継続すると共に作業員の安全性向上を図るためにＤＳシステムの開発を行った。

写真－２　夜間排水状況

３．システムの概要

ＤＳシステムは、排水ポンプ車の稼働状況をＷＥＢ上で情報端末機器から遠隔監視できるシステムで、その構成は車載の通報装置、ＷＥＢサーバ及び情報端末機器からなっている。通報装置は、排水ポンプ車の状態信号（車両及び排水ポンプ等の稼働状態や故障信号他）を取得・集約し、ＷＥＢサーバとの間でデータ通信を行う装置である。通信方法は、大規模災害を想定しているため、衛星回線を基本としているが、安価な携帯電話回線も選択可能である。ＷＥＢサーバは、受け取った排水ポンプ車の状態信号を蓄積・整理し、ＷＥＢ上に配信する機器である。情報端末機器はパソコン、スマートフォンなどのＷＥＢ上に配信された情報を閲覧する機器のことで、全国の排水ポンプ車全てを

一括で監視することが可能である。

ＤＳシステムで監視できる内容は、車両位置情報、排水ポンプ車稼働状態、故障等の不具合内容、運転及び故障の履歴などであり、地図表示画面、車両稼働監視画面、日報等の履歴画面から確認出来る。

(1) 排水ポンプ車の位置情報

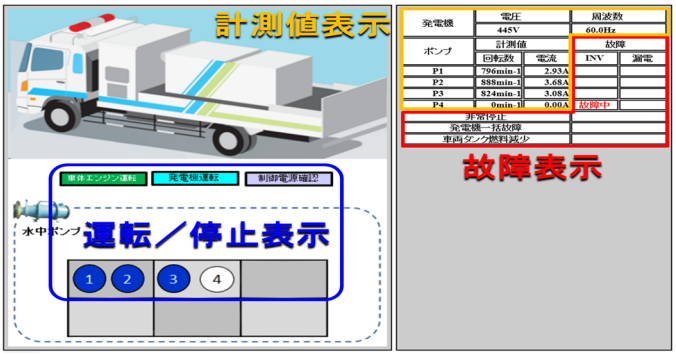
車両の位置は、国土交通省で運用している「車両位置情報共有化システム」を利用し、画面の地図上に車両アイコンで表示している。そのアイコンを「排水中・発電機ON・移動中など」の作業条件により色分けして表示することで、広範囲に配置した多数の排水ポンプ車の稼働状況を一目で把握することが可能である。地図表示画面の一部を図－１に示す。

図－１　地図表示画面（一部）

また、地図上の車両アイコン等をクリックすると、各排水ポンプ車個別の車両稼働監視画面へ移動する。

(2) リアルタイムな運転情報

車両稼働監視画面では、選択した車両のエンジン・発電機・各排水ポンプの運転・停止及びポンプ回転数、電流値等の計測値データをリアルタイムに表示している。車両稼働監視画面の一部を図－２に示す。




図－２　車両稼働監視画面（一部）

また、故障発生時には故障内容の表示とともに、登録したメールアドレスに通知される。そのほかに、排水中の燃料切れ対策として、残りの燃料が一定量を下回った時、排水可能時間がカウントダウン形式で表示され、故障と同様にメールでも通知される。

なお、表示された情報は、ＷＥＢサーバに蓄積され、運転時間・回数・排水量などの帳票、運転及び故障履歴を画面表示及びデータ出力できる。

(3) 異常診断機能と遠隔停止機能

遠隔監視では、ゴミ詰まりやホースのねじれ等の排水状況の変化は、故障が通知されるまで分からず、故障を把握してもすぐにポンプを停止することもできない。そのため、ポンプの破損に至るような重大な事態により排水作業を継続できない事が懸念される。それらの課題に対して、ＤＳシステムにはポンプが故障する前の異常を把握するための異常診断機能とその診断を受けてポンプの破損を防ぐため、遠隔で停止操作を行う遠隔停止機能を有している。

## ４．ＤＳシステムの改良検討

現在、大規模災害発生時に派遣するポンプ車ごとに災害属性を付与することで、対象地域の作業ごとに災害属性を利用したグルーピングができるようにＤＳシステムの改良検討を進めている。このことにより、複数の災害管理が可能になり、災害名称としての運転・稼働といった履歴の管理も可能となる。

また、ＤＳシステムのセキュリティー対策としてＵＲＬの暗号化作業を行った。

## ４．まとめ

現在、ＤＳシステムは国土交通省が所有する多数の排水ポンプ車に設置されており、過年度の浸水被害での実排水におけるシステムの機能検証を行い、所定の性能（位置情報、運転・停止等稼働状態、日報等）を遠隔から把握することができた。また、事務所から遠隔監視を行い、ＤＳシステムの有効性を確認した。

今後も作業員の安全性確保に向けてＤＳシステムの更なる利便性や機能の向上をめざしていく予定である。

## 参考文献

1)東日本大震災に関する写真は、東北地整 HP「震災伝承館」より引用

# 4．お手持ちの UAV で手軽に空中写真測量。SfM のクラウドサービス

## －「Solution Linkage Point Cloud」 を使った現況管理－

日立建機株式会社　　○　田中　一博

### はじめに

日立建機は、建設現場で利用者が自社保有している UAV（ドローン）で現場の空中写真を撮影すれば、クラウド上で点群データを作成できる「Solution Linkage Point Cloud」（以下、SL-PC）を開発した。

ICT 施工では、現場の点群データを使って施工土量を計算し、施工状況を管理することが増えている。一方で測量会社などにデータ作成を外注するとコストが高く、納品までの時間がかかるなどの課題がある。

このサービスは、専用の自動認識対空標識と UAV 付属の自動撮影ソフトを使って空中写真を撮影しアップロードすれば、点群データを生成してユーザーがダウンロードする。作成したファイルを市販の点群処理ソフトで開けば、現場の体積計測や距離計測が可能。約 5ha までの現場を点群化でき、利用料は月額制で 5 万 5000 円（税込み）としている。

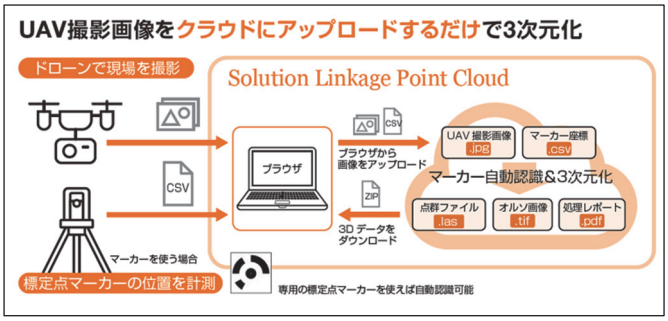



図 1　Solution Linkage Point Cloud の概要

### サービスの利点

一般的に UAV による写真測量を行う場合、写真から SfM(Structure from Motion)で点群を作成する専用の「点群生成ソフトウエア」と、高性能なパソコン (PC) が必要となる。そのため、導入する際に高価な初期投資が必要なほか、測量に関する基礎知識、点群生成ソフトウエアの操作知識が求められている。

一方で SL-PC は、クラウド上で点群生成ソフトウエア処理を行うため、利用者が SfM を自身で購入する必要がなく、高性能なパソコンも不要となる。また、専用の自動認識対空標識を利用すれば、SL-PC 内で標定点・検証点を自動判別して写真と紐づけるため、時間のかかる標定点調整作業を省略できる。

さらに、インターネットに接続された汎用パソコンで作業ができるため、現場作業所のパソコンで点群生成作業が可能になる。

現場の 3 次元点群データは、最適な施工計画の立案や、日々の施工進捗の記録・管理に活用できる。また土木工事だけでなく、採石現場、ストックヤード、産業廃棄物処分場の在庫管理や受け入れ容量の管理、災害現場の現状把握などにも利用用途が期待できる。

図 2　土工だけでなく採石場など他業種でも利用可能

### サービスの詳細

UAV を用いた空中写真測量の流れは、①定められたラップ率などを充足する UAV の飛行計画立案②対空標識の設置と座標計測③UAV の飛行と撮影④SfM による点群生成⑤点群ファイルの出力⑥点群データによる体積計測などで構成される。SL-PC は、このステップの

うち、④と⑤の部分のみを行う。

実際に利用者がサービスを使って写真測量する場合、①市販の UAV メーカーが提供している飛行計画アプリで、計測範囲の飛行プランを作成②自動認識対空標識を適切に配置して、中心座標をトータルステーション等の光波、GNSS ローバーを使って計測、表形式（CSV）で保存③UAV を自動航行させて写真を撮影④ブラウザを使って SL-PC に、撮影写真と標定点座標をアップロード⑤ブラウザを使って解析済みファイルをダウンロード⑥点群処理ソフトで解析という流れとなる。

なお、対空標識の座標計測は、日立建機がすでに提供している、スマートフォンによる土量計測サービス「Solution Linkage Survey Advanced 版」を併用することで、GNSS（Global Navigation Satellite System／全球測位衛星システム）情報から検証点や標定点の平面直角座標取得（公共座標）が可能となる。これにより、トータルステーション、GNSS ローバーなどの測量機器がなくても計測できる。

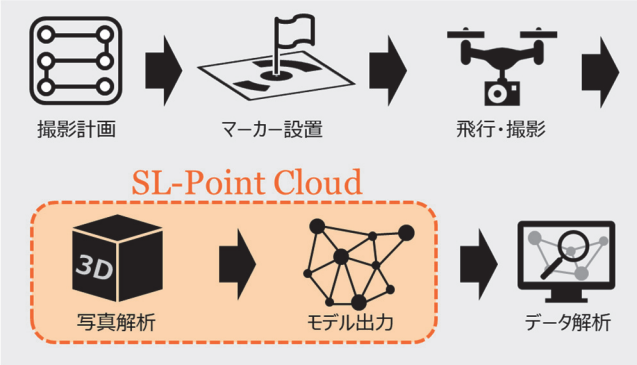



図 3　サービスの範囲

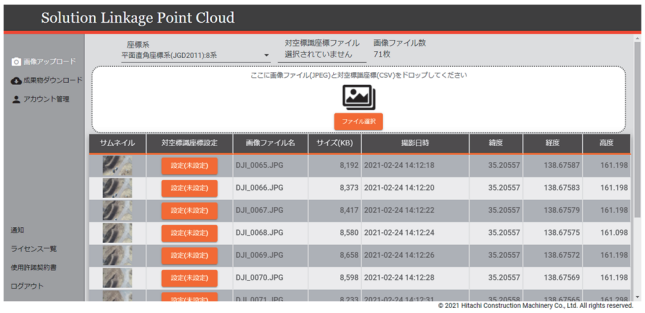



図 4　サービスの画面イメージ

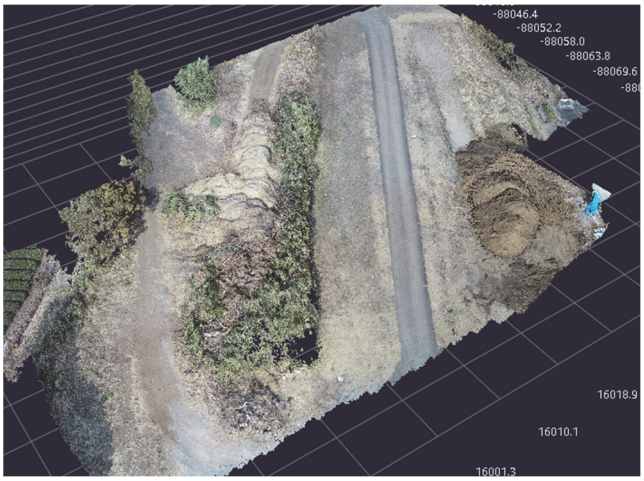



図 5　サービスで生成した点群（市販の点群処理ソフトで表示した）

## おわりに

最近では、現場や会社で UAV は保有しているが、実際に使うのは現場の空撮写真を撮影しているだけ、というケースが多い。一方で、20 万円クラスの UAV でも画素数が多く、地上画素寸法を指定して撮影・飛行ルートを設定できる機種が多く市販されている。

SL-PC は、標定点や検証点などの座標計測ができれば、高価な SfM ソフト・PC を購入せずとも、ブラウザを経由したクラウド契約のみで、現況点群を作成できるサービスとして開発した。

現時点で SL-PC が出力する点群は、SfM 解析時間を短くするために、ICT 土工の起工測量や出来形計測に利用できる密度で出力していない。想定している用途は、現場内の仮置き土やヤードなどの仮設計画を立てるなど、現場全体の現況を手軽に把握するためのツールとしての利用である。

これから 3 次元計測や ICT 施工に取り組むような利用者に、安価に取り組めて、点群や 3 次元データへの取り組みのハードルを下げるようなツールとして利用してもらえることを期待する。

〈参考文献〉国土交通省 HP：総合政策〉建設施工・建設機械〉ＩＣＴの全面的な活用
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei_constplan_tk_000031.html

# ５．建設現場の非接触・リモート化を実現する「遠隔協議」および「遠隔臨場」

## ～データ共有クラウドサービス「CIMPHONY Plus」による施工データ一元管理～

福井コンピュータ株式会社　マーケティング推進課　深山　あい子
池場　謙次
〇谷澤　亮也

■はじめに

本論文では、クラウドを使用した**「遠隔協議」**および**「遠隔臨場」**について紹介する。これらの技術により、現地調査や施工協議、出来形検査等における**移動時間および移動費用の削減**が可能になり、生産性の向上に繋がる。また、これらの技術は非接触で行われるため新型コロナウイルス等の**感染症対策**にも有効である。

これらの２つの技術はデータ共有クラウドサービス CIMPHONY Plus（シムフォニー プラス、NETIS 登録番号 KK-210003-A）を使用して行われる。施工に関わるデータをクラウド上で一元的に管理することで、関係者間でのデータ共有をスムーズにする。

■技術の概要①：遠隔協議

遠隔協議では、**VR（バーチャルリアリティ）空間に複数人が遠隔地から参加**し打ち合わせを行う。

図１－遠隔協議のイメージ

VR データは、点群データをもとに作成され、現地状況を正確に再現する。また、点群データ上に 3D モデルを配置することで、完成後や施工中の様子を可視化することができる。

VR 空間内では、施工協議を円滑に進めるための「距離や面積、座標の計測」、「写真撮影」、「施工機械のアニメーション」などを実施することができる。

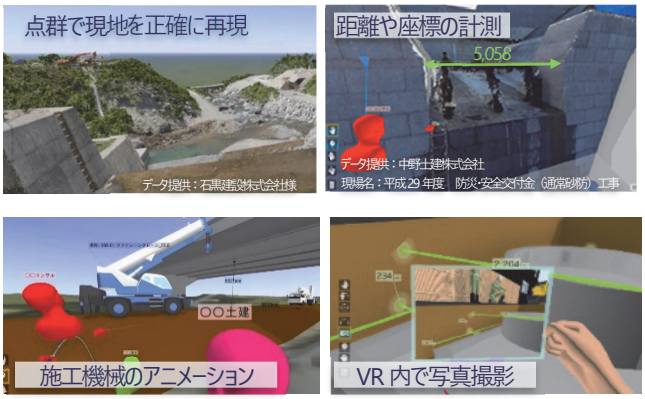



図２－VR 空間内の各種機能

遠隔協議の開催手順は次の通りである。まず主催者がローカル PC で VR データを作成する。次に VR データを CIMPHONY Plus にアップロードする。協議の参加者は遠隔地からこのクラウドにアクセスすることで VR 空間に参加することができる。

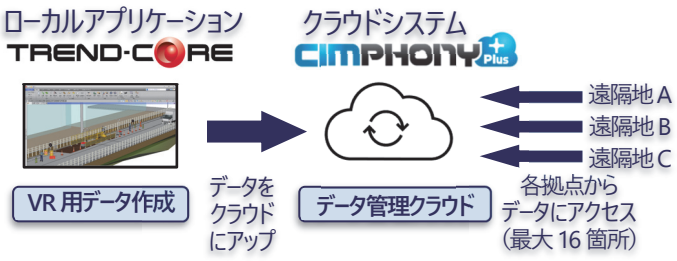



図３－遠隔協議のデータフロー

■技術の概要②：遠隔臨場

従来は、受発注者が施工現場に集合して検査を行う必要があったが、遠隔臨場により発注者は事務所にいながら**リモートで出来形検査を実施**できる。

国土交通省は、「インフラ分野の DX」に向けた方策の１つとしてこの遠隔臨場を積極的に推進しており、「建設現場の遠隔臨場に関する試行要領（案）R3.3」などの基準要領を策定している。

以下に遠隔臨場のワークフローを示す。なお、開催

者は事前に出来形ヒートマップをCIMPHONY Plusにアップロードする。

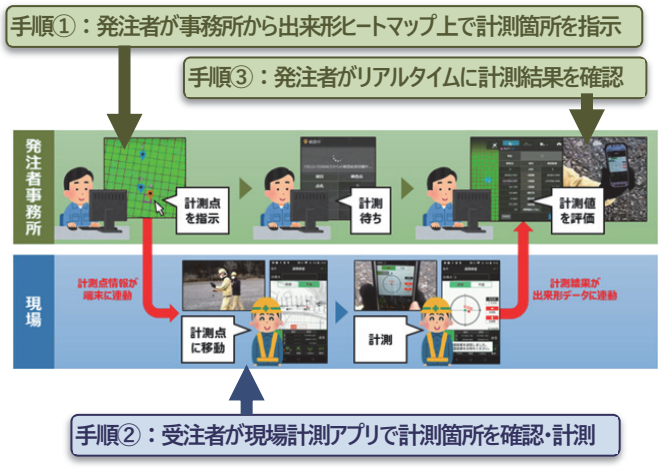



図４ － 遠隔検査の流れ

遠隔臨場中、事務所側のCIMPHONY Plus上で**作業員の位置がリアルタイムに表示**される。任意の映像配信システムを組み合わせることで現地の作業の様子を映像で確認することもできる。

図５ － 事務所（発注者側）の画面

また、施工現場では、Android端末上で動作するアプリケーションFIELD-TERRACE（フィールドテラス、NETIS登録番号KK-200057-A ）をTSやGNSSに接続し計測を行う。事務所がブラウザ上で計測指示を出すと、アプリが検査点への誘導を開始する。

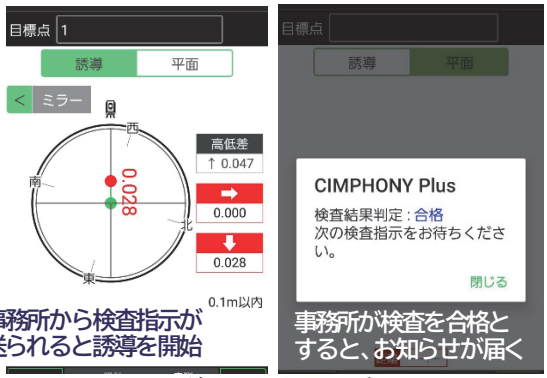



図６ － 施工現場のアプリ画面

■データ共有クラウドサービスCIMPHONY Plus

「遠隔協議」、「遠隔臨場」の２つの技術はともにCIMPHOHNY Plusを使用して行われる。CIMPHONY Plusは、**施工に関わる各種データを一元管理**するクラウドサービスである。（データ例：点群、3Dモデル、座標値、写真、動画、360°写真、360°動画、書類、図面、VRデータ、出来形ヒートマップ等）

CIMPHONY Plusの最大の特徴はデータを**“位置情報”**と**“時間軸”**で管理することである。つまり、データを4D管理する点である。

これにより関係者間でのデータの共有がスムーズになるだけではなく、データの作成日および取得位置が明確になる。建設現場でよく起きる「どこの写真？」、「いつの点群データ？」、「最新版の資料はどれ？」といった悩みを解決することができる。

図７ － CIMPHONY Plusの概要

■おわりに

遠隔協議・遠隔臨場は建設現場の非接触・リモート化を実現し、生産性の向上、感染症対策に繋がる。これらの技術は、クラウドサービスCIMPHONY Plusにより実現されている。

遠隔協議・遠隔臨場の実施には、VR機材等のハード面の設備や3Dモデル作成などのハードルが依然として残るが、これら２つの技術が建設業の効率化にとって有効であることは間違いない。

今後も現場での施行を重ね、改善・改良を行い、少しでも現場の皆様にとって、取り組みやすい技術にしていけるように努めていきたい。

〈参考文献〉建設現場の遠隔臨場に関する試行要領（案）、国土交通省 大臣官房技術調査課、令和３年３月、
https://www.mlit.go.jp/tec/content/001397221.pdf

# ６．地盤改良工法の自動打設システムの開発

GeoPilot®-AutoPile（ジオパイロット・オートパイル）

株式会社不動テトラ　〇伊藤　竹史
株式会社不動テトラ　廣畑　憲史
株式会社不動テトラ　今給黎　健一

## １．GeoPilot®-AutoPile の概要

「GeoPilot®-AutoPile」は新たに開発した地盤改良工法の自動打設システムである。従来、オペレータが管理計器を見ながら行っていた打設操作を、コントロールユニットが施工機を制御して自動で行う。スラリープラントと施工機本体は無線で交信でき、オペレータが操縦席に座りながらプラントの状況を把握できる。本技術は深層混合処理工法の CI-CMC 工法に適用したものであり、今後対応可能な工法を拡大していく。

図-1「GeoPilot®-AutoPile」構成図

## ２．システムの構成

自動打設システム「GeoPilot®-AutoPile」の構成を図-1 に示す。地盤改良機（CI-CMC 機）本体には、オペレーションモニター／コントロールユニット／通信アンテナが搭載される。オペレーションモニターのメイン画面は図-2 の通りであり、オペレータが本体やスラリープラントの状況を確認できるようになっている。コントロールユニットは本システムの頭脳に当たる部分であり、各種センサーから送られてくるデジタル信号を判断して、施工機とプラントの制御を行う。

スラリープラントにはリモートユニットが取り付けられ、コントロールユニットから無線で送られる指示に応じて、セメントスラリーの作液やスラリーポンプ流量の調整などを行う。

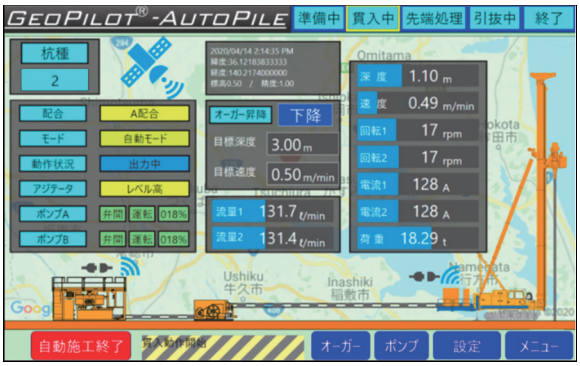



図-2　オペレーションモニター

## ３．GeoPilot®-AutoPile の特長

① 生産性向上、働き方改革への貢献

従来オペレータが行っていた操作が、コントロールユニットからの制御に置き換わることで、オペレータの作業負担を軽減でき、安定した施工能率を提供する。

② 働き手の確保

従来、施工ができるまでに 3 年程度かかっていたオペレータの習熟期間を約 3 分の 1 に短縮できる。これにより若手オペレータの活躍が期待できる。

図-3 操作の簡素化・習熟期間の短縮

③ 確実な品質の提供

土層毎のスラリー添加量の切り替えや撹拌軸の昇降速度の管理が自動となり、施工誤差やオペレータの熟練度による品質の差異が少なくなる。

④ 安全性の向上

本体に取り付けた各種センサーからのデジタル情報により、施工機の状態を監視し続ける。必要に応じてオペレータへ注意喚起を図ることと、コントロールユニットからの適切な制御を行うことで安全性が向上する。

# 7．油圧アタッチメントの交換容易化による解体現場の安全性・環境性・生産性の向上

株式会社小松製作所　○山本　宏

1.はじめに

解体現場の安全・環境課題解決と生産性の向上を目的として、コマツは新たに油圧オートカプラを市場導入し、油圧ショベルの先端アタッチメント交換作業の容易化に取り組んでいる。現場で作業者がアタッチメントに触れず、作動油をまき散らさずに交換ができる新技術、油圧オートカプラの特長を説明する。

2.油圧アタッチメントの交換作業の実情と課題

カプラを使用せずに油圧ショベルに直接取り付ける場合、交換は油圧ショベルのバケット取付ピンの着脱を大ハンマー打撃で行い、油圧ホースの着脱も工具を使用し手作業で行っている。オペレータ１名と作業員２名の共同作業で行う交換作業時間は約 60 分を要す。取付ピン等重量物の取扱や大ハンマー使用時の安全性向上、また油圧ホースの着脱前に圧抜きが必要で、油圧ホース内に残った高温・高圧の作動油を現場に撒き散らすことが環境配慮の課題でもある。

3.油圧オートカプラによる課題解決

1）生産性向上

①交換時間６０分　→　１分

②作業人数　３名　→　１名（オペレータのみ）

オペレータキャビン内でカプラ操作スイッチ作業機レバーで操作出来る。

2）安全性向上と環境性対応

①アタッチメントに触れずにピン交換可能

②ホース着脱作業不要　→　作動油散布無し。

3）油圧オートカプラの特長

①作動油流体効率

圧力損失と作動油温上昇を抑えた内臓油圧バルブにより、油圧アタッチメント及び油圧ショベルの効率・性能も維持している。

②安全装置は国際標準化機構 ISO13031 に準拠

・常時油圧によりロック維持

・油圧が切れても内蔵チェック弁でロック維持

・オペレータキャビン内よりロック目視可能

・ロック維持用の手動によるピン装着不要

油圧オートカプラによる
油圧アタッチメントの着脱作業

4.まとめ

油圧オートカプラは、様々な解体現場で油圧アタッチメント交換時の安全性向上、環境配慮、生産性向上を可能にする技術であり、大幅な交換容易化が図れる。これにより、現場改善を支援しＥＳＧ（環境・社会・ガバナンス）に関連する諸課題解決に貢献できる新たなソリューションである。

# ８．AI 人物検知・距離検知・クラウド録画に対応した 重機から作業員を守る安全システム「ドボレコ JK」

## カメラによる人・距離検知

西尾レントオール㈱　〇荻野　裕昭

・はじめに

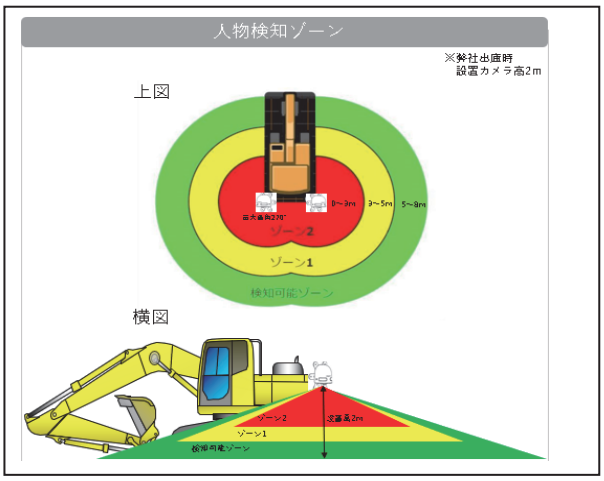
近年、様々な安全対策機器が登場しておりますが、より精度の高い安全対策を講じようとすれば、各機能ごとに別々の機器が必要となり、機器の設置場所や電源の確保、配線の取り回しなどの苦労も多く、費用的にも高価となる点が課題でした。

・装置

重機取付型セーフティカメラシステム「【ドボレコ JK】SX-DB200」（以下、本機器）は、監視カメラ、ドライブレコーダー、接触防止センサの３つの機能を１つにまとめた安全対策機器です。２台の後方設置カメラにより重機後方と側面を広範囲に死角をカバーし、AI 人物検知にて人との接近をオペレーターに警告し、映像はクラウドにより遠隔からのリアルタイムモニタリングや録画映像の確認が可能です。本機器は主要な３つの機能がオールインワンで搭載され、安価で管理しやすい機器となります。安全性向上、生産性向上へお役立ていただける新しい安全対策機器として、機能の詳細および特長について発表いたします。

図Ⓐドボレコカメラ部設置図

図Ⓑオペ室モニター画面




図Ⓒ検知エリアイメージ図

・機能・特徴

① 予め設定した危険範囲内での人物検知時にアラート通知機能です。

② カメラの設置高さが地表から 2m以上が確保できる様々な重機に取付可能です。

③ 検知エリアは２段階の設定が可能です。

④ 作業員にタグの携行が不要で人物のみ検知しアラート出すことが可能です。

⑤ アラートを検知すると機械の緊急停止をさせる事も可能です。

# ９．カーテンウォールをより安全により早く取付できる専用機の研究

## カーテンウォーカーEV

株式会社レンタルのニッケン　　研　次郎
〇湯島　一郎

カーテンウォール取付の現状

従来のカーテンウォールの取付作業は、図１の上部のようにクレーンで吊って取付フロアへ降ろすため３フロアの養生を撤去して取付作業を行っている。また、運搬作業でたて積みされたカーテンウォールをクレーン揚重時に平置きする作業が発生しており、生産向上に向けてカーテンウォールの平置きを無くす、施工フロアを1フロアないし2フロアにすることを目指した。

カーテンウォーカーEV 概要

カーテンウォーカーEV は本体（カーテンウォーカーE）と、本体に吊り下げられた吸盤治具（カーテンウォーカーV）からなる取付マシンである。吸盤治具によって外装材を専用パレットにたて積みされた状態から直接荷取り、そのまま取付作業を行うことができるため、材料を平置きする作業が不要となる。また、従来のようにクレーンを使用する必要がないため、作業時間の制約を少なく出来るとともに、施工フロアが減り取付作業時の外周養生ネットの撤去範囲を限定することができ、作業効率および安全性の向上をはかることが可能となった。

図１

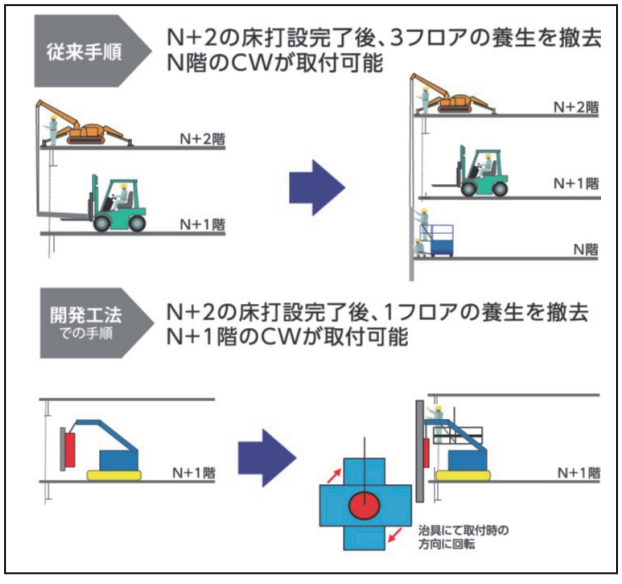
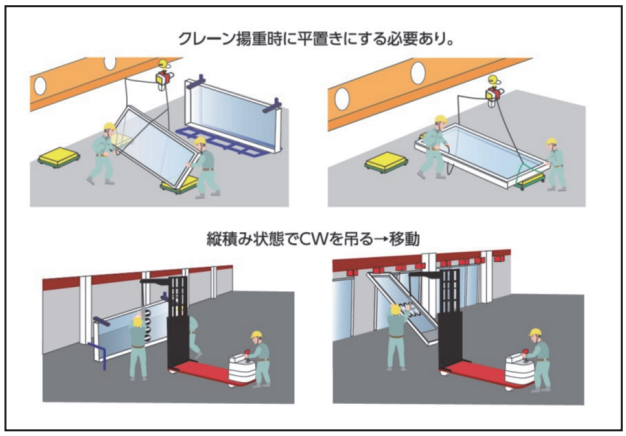



図２




今後「カーテンウォーカーEV」は様々なカーテンウォール取付作業において活用が期待されているため、機械台数の増産及び改良改善を引き続き行っていく。

CW搬入

吸引

回転

設置

# 10. 高高度隊列飛行 3 次元空間情報収集ドローン型ロボットを使用した施工現場の環境測定

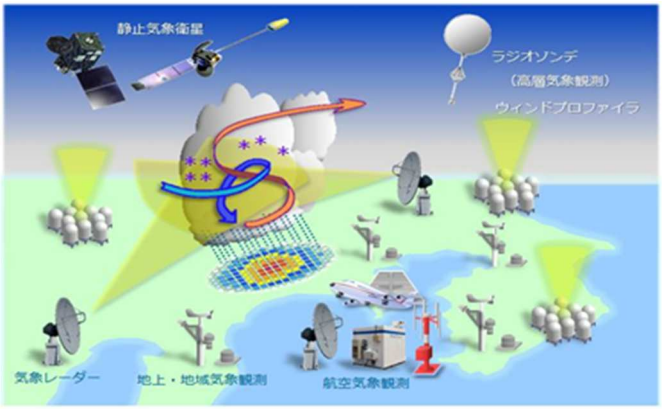
株式会社カナモト　〇勝部　義之
株式会社ｅロボティクス　皆川　好則
株式会社カナモト　植木　良

## １．はじめに

2012 年度の再生可能エネルギー特別措置法の施行以降、政府主導による再生可能エネルギーの導入が急激に拡大し、その時流に乗り設備設置工事も盛んにおこなわれております。また、脱炭素社会の構築が急務となり、工事件数拡大の後押しをしています。その中で、風力発電が世界でも急速に導入が進んでおり、風況の安定性や陸上の設置適地の減少から洋上風力発電が注目されています。しかし、風力発電事業の検討には、採算性や事業リスク等を事前評価する必要があり、風車の設計や設置計画の作成には、正確な風況調査（平均風速・風速頻度分布・風向出現率・乱流強度）が非常に重要で、中でも平均風速は風況の最重要項目であり、事業採算性の把握に大きな影響を及ぼすため、特に正確な把握が必要とされています。そこで、今回開発した高高度隊列飛行 3 次元空間情報収集ドローン型ロボットを使用した気象観測を御紹介します。

## ２．気象観測

洋上における従来の気象観測は、水深 30m 以浅の比較的浅い海域では、着床式風況観測棟を設置し観測が行われている。また、水深の深い海域においては、NEDO を中心に浮体式洋上風況観測システムの開発が進んでいる。また、風況観測は 24 時間連続で観測することが基本とされており、ある程度の期間を連続観測することにより、その地点においての気象・風況の傾向を確認することができる。ただし、着床式・浮体式にしても常時定点に設置することにより、そのコストから密度濃く設置することはかなわず、付近に変化にとんだ地形がある場合には、その予測が難しくなってくる。また、水平 2-2000km の空域をメソスケールと呼び、急速に発達する低気圧や台風、集中豪雨や局地的大雨、竜巻やダウンバーストを引きおこす積乱雲、といった激しい現象が含まれている空域がある。観測棟より上空のそのエリアの気象観測は、人工衛星やＧＰＳゾンデ・飛行機等で収集されているが、ＧＰＳゾンデは観測位置を制御できず、またほぼ使い捨てである。人工衛星は、衛星軌道上より広域を観測するために、最低分解能が低く（1 ㎢）、小範囲への絞込みが難しい。このように、気象・風況観測にはいくつもの方法があり（図―１）、各観測方法にて取得したデータを組み合わせることにより、目的の地点の状況を予測することは不可能ではない。しかし同時観測が難しいために、傾向を掴むためにはより多くのデータを集めなければならない。一定の範囲を同時に観測することにより、特定エリアの気象・風況の詳細な状況がつかめるようになる。




図―１　気象観測の種類

## ３．大型産業用ドローンによる気象観測

大型産業用ドローンに気象センサーなどを搭載して、その行動をプログラムし、目的の地点にて滞空し気象・風況観測をおこなう。またドローンには、風速 20m/s に耐え、高度 2000m まで飛行できる「ALTA-X」を使用する。(写真-1) この「ALTA-X」にウェザーステーションを搭載し、風向・風速・気温・湿度・気圧を計測記録する。センサーは 80 ㎝以上機体上空に離して設置。ドローン本体のプロペラの気流の影響の及ぼさない位置に設置する。また観測時に、気象・風況データとともに、ドローン自体の姿勢・位置データを取得し、風況観測データの精度向上の判断材料としている。場合によっては、姿勢のズレ（傾きやドリフト等）などへの補正に使用する。また、地上での常時モニタリングが出来、機体や観測データを地上にて確認することができる。現在その姿勢や本体の挙動からくる、実況との誤差及び補正の精度向上を進めている段階である。

写真-1「ALTA-X」ウェザーステーション搭載機

## ４．高高度隊列飛行による三次元空間情報収集

ドローンを使用した気象観測をさらに発展させて、複数台による同時飛行を一括して飛行管理する「カイトシステム」を開発した。これは飛行空域ならびにルート設定及び観測行動を事前に決め、隊列を組むドローン型ロボット（写真-2）（最大 27 機）が安全かつ確実に航行・管理し、安全に帰還できる飛行制御システム。ドローン型ロボットは、500m ～1000m の等間隔で隊列を組みながら飛行します。各機に前述の気象観測機器を搭載。さらに必要に応じて粉塵・電磁波・放射線・ガス等の測定機器も積載できます。到達した空間をサイコロ状に分割し（図-2)、それぞれの位置でリアルタイムデータを取得して地上へ送信する。現在、高度最大 2,000 m×水平距離 1,000 mの三次元計測に関する技術要素を確立しました（ 特許出願中 ）。

写真-2　隊列飛行状況

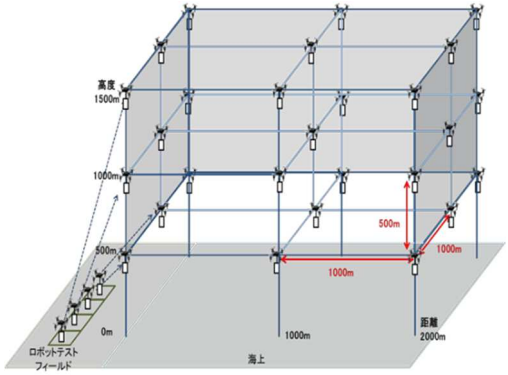



図-2　隊列飛行による観測概念図

## ３．終わりに

今回開発した気象観測システムは、洋上風力設備の気象観測から視点を広げて説明したが、特定の施工現場だけでなく、各種施工現場の事前の環境アセスメントや、施工中の周辺への影響調査にも応用できると考えている。現在、観測精度向上にむけ鋭意システム改修を進めている。最後に、今後の建設現場の安全や技術の向上と普及に期待し、ICT だけでなく他にもある最新の技術を用いた最良の機材の提供し、現場作業の安全を切に願うとともに、現場環境の向上や周辺環境への影響の軽減、また更なる安全の向上に貢献していきたいと考えております。

以　上

# 11. 建設機械搭載型レーザスキャナによる出来形管理システム

前田道路株式会社　○ 若佐　和美
法政大学　今井　龍一
三菱電機エンジニアリング株式会社　平　謙二

## 1. はじめに

ICT 舗装工では、事前測量や表層の面管理に地上型レーザスキャナや地上移動体搭載型レーザスキャナが用いられている。しかし、路床や路盤といった舗装各層の中間工程では、計測及び判定に時間が掛かることからレーザスキャナ（以下、LS）を用いた面管理は積極的に行われていない。

今回、著者らは共同研究体制を構築し、3 次元点群データを簡易に取得可能な建設機械搭載型 LS 出来形管理システム（以下、本技術）を開発した。本稿では、舗装各層の面管理の実用化に向けた取組みを詳述するとともに、リアルタイムな出来形管理による生産性向上や遠隔臨場への活用の可能性を報告する。

## 2. システム構成及び性能

本技術（図-1）は、建機搭載型 LS、制御・データ処理装置[CPU:Corei7、メモリ:8GB]（以下、PC）、自動追尾型トータルステーション（以下、TS）、Wi-Fi システム、クラウドシステムで構成される。建機搭載型 LS は 1 回の走行で 4m の幅員を計測でき、時速 2.5km 程度で走行すると管理要領 [1)]の路盤工までの要求精度（高さ方向で±10mm）を満足する 3 次元点群データを取得できる。

舗装工の中間工程では、施工完了後速やかに次工程へ移行したいため、面管理においても従来の出来形管理と同程度の所要時間で行えることが必要であった。そこで、出来形判定及び遠隔での結果共有を計測後 60 分以内に完了することを目標とした。

## 3. 計測プロセス

本技術の計測プロセスを以下に示す。試行現場では、各中間工程の仕上げ後に、データを計測した。

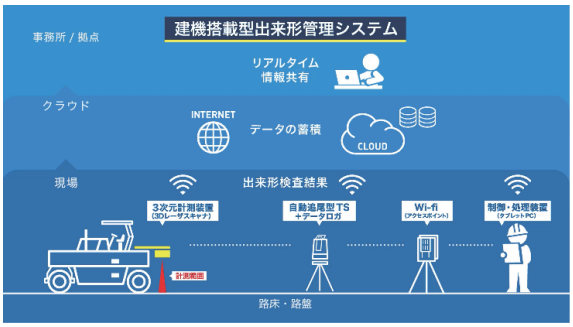



図-1　システム構成

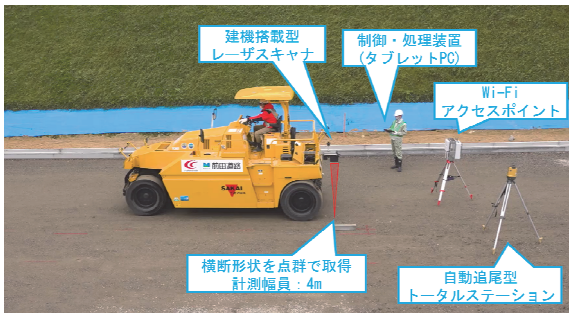



図-2　計測状況

①3 次元点群データの取得

タイヤローラに建機搭載型 LS を搭載し、TS で建機搭載型 LS を測位しながら走行させ、3 次元点群データを取得する。

②取得データを現場で点群処理

取得した 3 次元点群データを Wi-Fi システムによって PC に送信し、専用ソフトにより座標変換やノイズ処理、点群密度調整などの点群処理を行い、出来形評価用データを作成する。

③出来形評価用データによる出来形判定

出来形評価用データと 3 次元設計データとの較差（単位面積における高低差）を示したヒートマップ（出来形分布図）を作成・表示する。

④クラウド上で結果を共有

作成したヒートマップをクラウドにアップロードし、WEB ブラウザにより判定結果を遠隔地と共有する。

4. 計測結果及び所要時間

本技術によって得られた結果及び各プロセスの所要時間を以下に示す。

①3 次元点群データの取得

試行現場における計測状況を図-2、路床面の計測結果を図-3 に示す。有効なデータ取得範囲は L=71m、W=4m であり、計測時間は事前準備を除いて 5 分程度であった。取得した点群データ数は 0.01m² あたり平均 165 点であり、管理要領で規定されている 0.01m² あたり 1 点以上のデータが得られたことを確認した。

②取得データを現場で点群処理

試行現場で取得した点群データを 0.01m² あたり 1 点となるよう処理し、出来形評価用データを作成した。所要時間は 5 分程度であった。

③出来形評価用データによる出来形判定

試行現場で作成したヒートマップを図-4 に示す。作成までの所要時間は 30 分程度であった。

④クラウド上で結果を共有

出来形評価用データをクラウドにアップロードし、WEB ブラウザ上で可視化した結果を図-5 に示す。データのアップデートから可視化までの所要時間は 10 分程度であり、現場から離れた事務所でも出来形評価結果を閲覧できることを確認した。

以上のことから、計測後、WEB ブラウザで結果を確認できるまでの所要時間は 50 分であり、目標とする 60 分以内を達成した。また、試行結果から、本技術は遠隔臨場のできるリアルタイムな出来形管理システムとして有用であることを実証した。

5. 本技術の導入効果

現場試行で得られた導入効果の一例として、作業時間の短縮効果を検証した。路床工 4,320m² (L=540m、W=8m) を対象に面管理による出来形管理を行った場合、従来技術の各 LS と本技術との所要時間の比較を図-6 に示す。現地作業からデータ解析に要する時間が従来技術では約 1～2 日であるのに対し、本技術は約 5 時間であった。このことから、本技術を中間工程に適用すれば、当日中に次工程に移行可能なことが分かった。

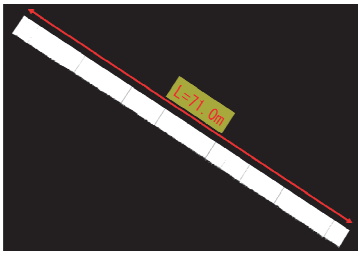



図-3　3 次元点群データ

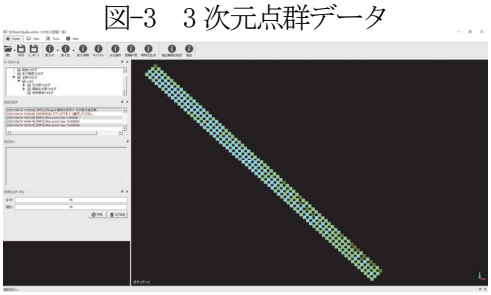


図-4　PC 版ヒートマップの表示例(1m メッシュ)

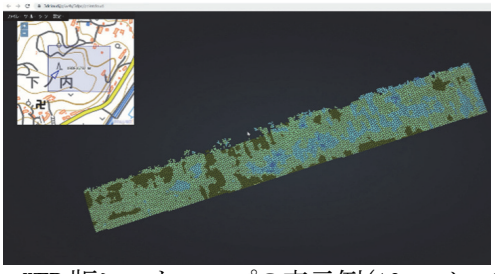


図-5　WEB 版ヒートマップの表示例(10cm メッシュ)

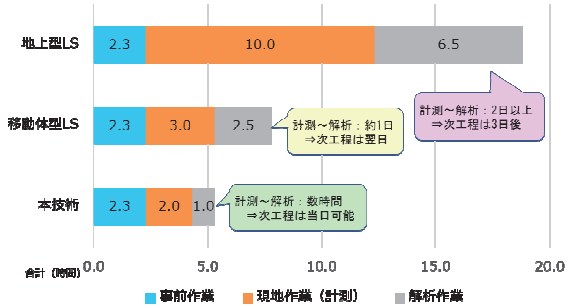



図-6　各 LS による面管理の所要時間の比較

6. おわりに

本技術の開発にあたり共同研究者である大阪経済大学中村健二教授、摂南大学塚田義典准教授に多大なご協力を頂いた。リアルタイムな出来形管理や遠隔臨場は重要な生産性向上技術であるため今後も更なる性能向上を図る。また、国土交通省の「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」の活用により実用化の検証を迅速に進めることができた。ここに記して謝意を表する。

【参考文献】

1)　国土交通省：3 次元計測技術を用いた出来形管理要領（案）、2021.3

令和３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３年12月 1 日　　発行

編　集
発行所　一般社団法人　日本建設機械施工協会
〒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