

平成29年度

建設施工と建設機械シンポジウム  
論文集・梗概集

平成29年11月8日～11月9日

東京都港区・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

平成29年度

# 建設施工と建設機械シンポジウム 論文集・梗概集

平成29年11月8日～11月9日

東京都港区・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

国立研究開発法人 土木研究所、公益社団法人 土木学会  
公益社団法人 地盤工学会、一般社団法人 日本機械土工協  
会、一般社団法人 日本機械学会、一般社団法人 日本建設  
機械工業会、一般社団法人 日本測量機器工業会、日刊工  
業新聞社、日刊建設工業新聞社、日刊建設通信新聞社、日  
刊建設産業新聞社（順不同）



## 論文審査規定概要

### 1. 審査方法

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

下記の審査基準に基づき、実行委員会にて採択を決定する。

### 2. 審査基準

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

### 3. 審査委員名簿（委員五十音順・敬称略）

委員名	機関名・会社名	所属
委員長 建山 和由	立命館大学 理工学部	教授
副委員長 高橋 弘	東北大学 大学院環境科学科	教授
委員 阿部 里視	コマツ 開発本部商品企画室	
委員 植木 睦央	鹿島建設(株) 機械部	
委員 梶田 洋規	(国研) 土木研究所	先端技術チーム
委員 北山 孝	西尾レントオール(株)	通信測機営業部
委員 木下 洋一	鹿島道路(株)	生産技術本部機械部
委員 小林 真人	コベルコ建機(株)	企画管理部
委員 神宮寺 保秀	国土交通省 関東地方整備局	企画部
委員 玉石 修介	(一社) 日本機械土工協会	
委員 行川 恒弘	前田道路(株) 東京支店	製品部
委員 新田 恭士	国土交通省 総合政策局	公共事業企画調整課
委員 藤島 一雄	日立建機(株) 研究・開発本部	技術・製品戦略部
委員 本田 肇	(株) トプコン営業本部	スマートインフラマーケティング部
委員 山本 茂太	キャタピラージャパン(同)	販売促進部
委員 渡部 純	(株) カナモト	レンタル事業部
委員 伊藤 文夫	(一社) 日本建設機械施工協会	施工技術総合研究所
委員 加藤 正幸	(一社) 日本建設機械施工協会	
委員 西脇 徹郎	(一社) 日本建設機械施工協会	



## 「建設施工と建設機械シンポジウム」論文集・梗概集

## 目次

○印 口述発表者

## I 論文集

1. 遠隔操縦装置（バックホウ用）の開発  
 ロボQS — 軽量・電動化・搭乗運転の実現 — ..... 1  
 株式会社フジタ ○平野 高嗣  
 株式会社IHI 川上 勝彦  
 山崎 峻一  
 塙 裕彰
2. 道路啓開時における路上車両移動技術について ..... 7  
 国土交通省 関東地方整備局 関東技術事務所 ○松岡 良介  
 島崎 浩志  
 長山 真一
3. 最新の無人化施工技術と i-Construction で挑んだ阿蘇大橋地区斜面对策工事 ..... 11  
 株式会社熊谷組 ○坂西 孝仁  
 北原 成郎  
 飛鳥馬 翼
4. 阿蘇大橋崩壊斜面对策工事における航空レーザ測量及び  
 UAV 計測による 3 次元地形測量データの活用事例  
 — 阿蘇大橋地区 砂防災害関連緊急事業（直轄） — ..... 17  
 国際航業株式会社 ○堀川 毅信  
 国土交通省 九州地方整備局 野村 真一  
 岡山大学大学院 西山 哲  
 株式会社熊谷組 中出 剛
5. 大型風車組立リフトアップ装置の開発 ..... 23  
 株式会社大林組 ○江副 誉典  
 三輪 敏明  
 中島 康弘
6. 現場製作のコンクリートブロックを用いた i-Construction  
 — 護岸・床固工を具体例とした生産性に関する評価 — ..... 27  
 技研興業株式会社 ○三浦 拓磨  
 大井 邦昭
7. MC モータグレーダ導入による効果について ..... 31  
 国立研究開発法人 土木研究所 ○橋本 毅  
 梶田 洋規  
 藤野 健一
8. 舗設時におけるダンプトラック後退誘導表示装置の開発 ..... 37  
 鹿島道路株式会社 ○新満 伊織
9. 複合型地盤改良技術に要求される建設機械の性能に関する研究 ..... 41  
 国立研究開発法人 土木研究所 ○田中 洋一  
 藤野 健一  
 梶田 洋規

10. RTK 測位技術を応用した UAV による写真測量のさらなるカイゼン	株式会社大林組	○田島 僚 杉浦 伸哉 田原 康平	4 5
	大林道路株式会社		
11. ICT 舗装工新基準の出来形測定におけるさらなる生産性向上への検討	大林道路株式会社	○田原 康平 杉浦 伸哉 田島 僚	4 9
	株式会社大林組		
12. 群馬県における ICT 試行工事に関する研究	群馬工業高等専門学校	○先村 律雄 六本木晶瑚	5 3
13. フレッシュコンクリートの型枠内流動に対する 2次元リアルタイムシミュレータの開発	三重大学大学院 琉球大学	○三島 直生 山田 義智 崎原 康平	5 7
14. 注入併用エアークーリング工法によるコンクリートの温度ひび割れ抑制対策	株式会社熊谷組	○神崎 恵三	6 1
15. 有楽町線小竹向原・千川間連絡線設置工事におけるシールドトンネル施工に関する報告 ー 複合円形断面の開発経緯と施工実績 ー	東京地下鉄株式会社 株式会社熊谷組	坂田 聡 ○山上 享	6 7
16. 路面切削機での情報化施工（マシンガイダンス）活用事例について	前田道路株式会社	○宇田川 健治 森下 泰浩 宮内 賢徳	7 1
17. 複合相対攪拌工法の施工環境への適応とその事例	エポコラム協会 小野田ケミコ株式会社 中央大学	○木寺 智則 西尾 経 齋藤 邦夫	7 5
18. トンネル工事の作業ライン生産性の可視化方法に関する研究	株式会社まざらん 株式会社キック 西松建設株式会社	○西垣 重臣 才原 勝敏 鬼頭 夏樹	8 1
19. 間伐施業の生産性・安全性指標の強化学習を活用した可視化方法	株式会社まざらん 株式会社キック 溝渕林業株式会社	○西垣 重臣 才原 勝敏 溝渕 真一	8 7
20. 土工事の働き手を支援する動的モニタリングに関する研究	株式会社まざらん 株式会社キック	○西垣 重臣 才原 勝敏	9 3

21. 次世代建設生産システムの現場適用と生産性向上への展望			
－ ロックフィルダムへの適用検討 －		……………	99
	鹿島建設株式会社	○太田 裕士 田中 秀昭	
22. 横型 2 連矩形掘進機による地下通路の施工実績			
－ 難条件下における矩形シールドの施工実績について －		……………	103
	鹿島建設株式会社	○宇留島 千明 品田 康二 村上 謙介	
23. i-Construction を加速する遠隔リアルタイム・ダッシュボードに関する研究			
	株式会社熊谷組 株式会社まざらん	○北原 成郎 西垣 重臣	…………… 109
24. カメラ位置を直接計測する UAV 写真測量システム			
－ TS トラッキング UAS の概要と評価結果 －		……………	115
	株式会社トプコン	○大谷 仁志 佐々木 剛	
	一般社団法人日本建設機械施工協会	椎葉 祐士	
25. ICT ブルドーザの効率的な制御検証のための ニューラルネットワークシミュレーション手法			
	株式会社小松製作所	○挟間 優佳 大林 薫 齋藤 芳明	…………… 119
26. 次世代型油圧ショベルの開発			
－ 情報化施工対応テクノロジーを標準搭載した SMART IRON －		……………	125
	キャタピラージャパン合同会社	○白澤 博志	
27. 次世代型ビーコンを利用した屋内作業員の可視化による現場管理システムの開発			
－ メッシュ型 Beacon による入退場および原位置把握 －		……………	129
	株式会社大本組	○橘 伸一 佐藤 浩郁	
	株式会社 W H E R E	藤島 伸吾	
28. 排出ガスの測定値から読み解く燃費・熱効率と燃費改善策			
	国立研究開発法人 土木研究所	○吉永 弘志	…………… 131
29. 油圧システムとハイブリッドシステムを統合制御した ハイブリッド油圧ショベルの開発			
	日立建機株式会社	○太田 泰典	…………… 137
30. センサネットワーク技術を活用した作業員見守りツールの開発			
－ 合材工場と道路建設現場における取り組み －		……………	141
	株式会社 N I P P O	○駒坂 翼 宮本 多佳 中田 真弥	
31. 基礎工事用建設機械の転倒防止のための地盤養生に関する実験的検討			
	(独)労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所	○堀 智仁 玉手 聡	…………… 145

32. インフラ点検のための音波照射加振による高速非接触音響探査法		
－ マルチトーンバースト波を用いた橋梁における検証 －		…………… 149
	桐蔭横浜大学大学院	○杉本 恒美
		杉本 和子
	佐藤工業(株)技術研究所	歌川 紀之
33. 短工期を実現した神戸長田トンネル天井板撤去の取組み		…………… 155
	鹿島建設株式会社	○村岸 聖介
	阪神高速道路株式会社	高田 英樹
34. IH装置を用いた加熱による鋼溶接部の疲労寿命向上に関する基礎的検討		…………… 161
	名古屋大学大学院	○中村 将章
		Aung May Phyo
		廣畑 幹人
	日本橋梁株式会社	小西 日出幸
35. 幅員が狭い橋梁の点検等に適した移動式検査路の開発		…………… 167
	(一社) NME 研究所	○牧角 龍憲
	エスイーリペア株式会社	村上 俊明
	西尾レントオール株式会社	藤田 全彦
36. 画像処理を用いたダム堤体の外観調査		
－ UAV マルチコプタ撮影画像によるひび割れ抽出例 －		…………… 171
	安藤ハザマ	○野間 康隆
		武石 学
		澤田 純之
37. 大水深対応型水中作業ロボットの活用事例と今後の展望		…………… 175
	東亜建設工業株式会社	○小川 和樹
		飯田 宏

## II 梗概集

### II-1 ポスターセッション要旨

- |  |   |                                   |           |
|--|---|-----------------------------------|-----------|
| 1. 自動追従台車「かもーん」の紹介   | 株式会社レンタルのニッケン<br>株式会社竹中工務店                  | ○飛山 太郎<br>永田 幸平                   | …………… 181 |
| 2. 地盤改良施工管理システム<br>－ 「Visios-3D」 (ビジオス・スリーディー) －                     | 株式会社不動テトラ                                   | ○深田 久<br>岡戸 雅則<br>秋間 健            | …………… 183 |
| 3. ICT 施工ソリューションの中核を担う新クラウドソリューション<br>－ Solution Linkage Cloud を開発 － | 日立建機株式会社                                    | ○篠倉 美紀                            | …………… 185 |
| 4. 自動追尾型トータルステーションを利用した機械施工の効率化の提案<br>－ 「E三S」 －                      | 株式会社 カナモト<br>株式会社 佐藤工務店                     | ○清水 亮<br>笹原 久之<br>大和田 弘光          | …………… 187 |
| 5. 油圧ショベルの衝突軽減システム<br>－ 事故のない油圧ショベルを目指して －                           | コベルコ建機(株) 開発本部ショベル開発部                       | ○越智 智彦                            | …………… 189 |
| 6. 建設重機災害防止のための重機の緊急停止装置<br>－ 「スリーエスバックホー」による安全性の実現 －                | 株式会社アクティオ                                   | ○安田 勇介<br>稲葉 誠一                   | …………… 191 |
| 7. AI を利用した打音検査の自動判定   | 佐藤工業株式会社<br>筑波大学 大学院                        | ○黒田 千歳<br>歌川 紀之<br>島田 拓夢<br>安永 守利 | …………… 193 |
| 8. ブリッジハンガー (小規模橋梁を対象とした移動式橋梁検査路)                                    | (一社) NME 研究所<br>エスイーリペア株式会社<br>西尾レントオール株式会社 | ○牧角 龍憲<br>村上 俊明<br>藤田 全彦          | …………… 195 |



# I 論文集



# 1. 遠隔操縦装置（バックホウ用）の開発

## ロボQS ～ 軽量・電動化・搭乗運転の実現 ～

株式会社フジタ ○平野 高嗣・川上 勝彦  
株式会社IHI 山崎 峻一・塙 裕彰

### 1. はじめに

土砂崩れ等の有事の際の災害復旧は一刻を争うが、一般の建設機械に搭乗しての作業は、二次災害の危険性から困難であり、遠隔操縦での作業が必須となる。建機メーカーからは遠隔操縦型重機（無人化施工専用機）が販売されているが、遠隔操縦型重機は台数も少なく大型であり、かつ重機本体ごと運搬する必要があり、緊急時の機動性や調達に課題がある。これらを解決すべく、一般のバックホウに装置を取り付けるだけで遠隔操縦が可能となる、遠隔操縦装置『ロボQ』を平成9年に国土交通省九州地方整備局九州技術事務所と共同開発した。しかし開発から20年が経ち、部品の製造中止や経年劣化等の問題が発生している。

そこで更なる機能向上（安全性・組立性・メンテナンス性・機器を装着した状態での有人搭乗運転）を目標に、概略設計・詳細設計、機能検証・製造と3年掛けて新型遠隔操縦装置『ロボQS』を開発・製造した。尚、設計・製造は㈱フジタと㈱IHIが共同で行った。

本論はロボQSの開発経緯について報告する。

### 2. ロボQS開発検討

#### 2.1 初代ロボQの課題

初代ロボQの開発から20年が経ち、次の問題・課題が顕著になってきた。

- (1) 搭載可能機種数の減少
  - ・重機のセキュリティ向上によりエンジン発停制御が困難に
  - ・空圧制御のため、エンジンコンプレッサーが必要だが、重機の旋回体上への設置余地が無くなってきた
- (2) 部品の経年劣化による故障
  - ・特注部品の在庫が希薄に。また、特注のため代替品が無い
- (3) 設置・撤去・維持管理が困難
  - ・重機の運転席を取外す必要があり、更には機器構成が複雑で、設置には取付知識のある人間が必要

これらを解決すべくニーズ・シーズ調査を実施した。写真-1に初代ロボQを示す。



写真-1 初代ロボQ

#### 2.2 新型ロボQSに求められる機能

初代ロボQの課題に対してのニーズ・シーズ調査の結果を以下に示す。

- (1) 遠隔操縦性の向上：実機に近い感覚、レバー配置で運転できること。重機の傾斜が分かること。
- (2) 搭乗運転と遠隔操縦の切り替えの簡素化：遠隔操縦装置を装着したまま搭乗運転が可能な構造とし、切り替えが容易に出来ること。
- (3) 運転及び故障状況の把握：装置の運転状況や故障状況が把握できること。
- (4) ライフサイクルコストの低減：定期点検等のメンテナンス費の縮減。
- (5) 環境性能の向上：エア駆動のロボQはコンプレッサーの作動音が大きいため低減する。
- (6) 組立の簡素化、部品点数の削減
- (7) 空輸可能・乗用車に収納可能な大きさにする

### 3. 基本仕様の検討

ロボ QS の基本仕様を検討するにあたり、適用規則及び標準は以下の通りとし準拠する。

- ・規則：電波法（施工規則）を遵守する。
- ・標準：ISO 規格（国際標準化機構規格）  
：JIS（日本工業規格）  
：IEC 規格（国際電気標準化会議規格）

規則・標準を踏まえ、かつ求められる機能を満足する設計条件を次のように決定した。

- (1) 分解組立式でパーツ重量に上限を設ける。  
(ユニット最大重量 15kg 以下)
- (2) 工具を使用しないで搭載が可能とする。  
(調整機能を含む)
- (3) 現地組立時にトルク管理や増し締めが必要なネジ・ボルト締結を避ける。
- (4) 動力は重機の DC24V から得る。容量は重機バッテリーの許容電流値以内とする。
- (5) バックホウの運転席を外さずに搭載が可能とする。
- (6) 調達が容易で信頼性の高い市販機器を採用する。制御盤は開閉と機器交換が容易な製品を採用する。
- (7) 装置の状態が分かるコンディションモニタを使用し、状況把握が出来るようにする。
- (8) 装置を搭載した状態での搭乗運転が問題ない空間を確保する。(配置検討・小型化)
- (9) 物理的な重機の破損を除き、遠隔で緊急停止の ON/OFF が出来る。

以上をもとに基本仕様を検討・決定した。表-1 に基本仕様を示す。

### 4. 概略設計

概略設計を行うにあたり、装置の構成を要素の異なる次の3つに分けて検討した。

#### 4.1 アクチュエーションユニット

バックホウの走行・作業レバーを動かすアクチュエータとそれを固定するフレームで構成される。

近年、重機の運転席はクッションシートが主流であり、運転席と作業レバーが連動して上下に動き、衝撃を吸収する構造となっている。アクチュエータユニットはバックホウのキャビンと一体で振動する走行ユニットと、クッションシートと一体で振動する作業ユニットで別体とし、走行ユニットは、運転席下部のクッションシート外の鉄部に強力なネオジム磁石を用いて固定する。作業ユニットを固定するためのフレームは運転席上に設置し、運転席の揺れと同調する。

走行レバーは前後倒立のため直動シリンダを、作業レバーは前後左右に倒立するため直動シリンダと旋回モータの組み合わせとした。写真-2・3 に走行・作業アクチュエーションユニットを示す。

表-1 基本仕様

項目	仕様
環境仕様	・防水防塵性能：IP65
形状、サイズ、重量	・ユニット分割型 ・クッションシートへの装着対応 ・サイズ W50cm×D50cm×H30cm ・重量1ユニット15kg以下
制御方法	・フィードバック方式 ・初期設定：原点取得 ・アクチュエータ動作エラー監視二重化（コントローラ、メインCPUによる） ・レバー制御速度：通常モード(100%) / 精密作業モード(60%) 2段切り替え
制御機器	・制御盤内配置（平面配置） ・制御機器：スロットタイプ PLC, 耐振仕様
非常停止方法	・停止方法：油圧ロック・アクチュエータ中立 ・停止条件（4方式のOR判断） ①機側の緊急停止（CPUを介さないハード） ②ラジコン緊急停止ボタン（ソフト） ③制御機器自己判断（ソフト） ④専用緊急停止無線（受信機→ハード） ・機器：リレー2重化
無線操縦装置 周波数等	・操縦用無線機：双方向通信によるモニタ機能付）400MHz 帯 ・緊急停止無線機：1.2GHz 帯
アクチュエータ	・電動：ボールネジタイプ +ステッピングモータ



写真-2 走行アクチュエーションユニット



写真-3 作業アクチュエーションユニット

走行・作業アクチュエーションユニットをバックホウに搭載するため、建機メーカー及び機種によるサイズやレバーの配置・可動範囲を把握する必要がある。そこで今回、複数の建機メーカーのバックホウの運転席について、A～dの実測を行った。尚、ロボQSを搭載するバックホウは、一般的な0.28m<sup>3</sup>級以上のバックホウを対象とした。計測結果を元に走行・作業レバー用ユニットを固定するフレーム寸法や、ユニットの取付位置を決定した。図-1に測定箇所、表-2に計測結果の一例を、図-2にロボQSの搭載イメージを示す。

表-2 運転席測定例

実測項目	単位	実測箇所	実測値			
シートベース部長さ	mm	A	530			
シートベース部取り付けボルト間距離	mm	B	270			
走行レバー	シートベース部から走行レバー間距離	mm	C	620		
	可動範囲	中立→前方	度	D	11.3	
		中立→後方	度	E	11	
	アクチュエータ把持部可動範囲	中立→前方	mm	F	45	
		中立→後方	mm	G	45	
	レバー根元太さ	mm	H	17.5		
	左右レバー間距離	mm	I	45		
	作業レバー	可動範囲	中立→前方	度	J	17.6
			中立→後方	度	K	18.5
中立→右方			度	L	17.7	
中立→左方			度	M	18.4	
レバー先端可動範囲			mm	N	90	
レバー先端可動範囲		中立→前方	mm	O	90	
		中立→後方	mm	P	90	
		中立→右方	mm	Q	90	
		中立→左方	mm	R	95	
		レバー高さ	mm	S	310	
レバー太さ	mm	T	14			
左右レバー間距離	mm	U	630			
シート背もたれから作業レバー間距離	mm	V	630			
レバー部長さ	mm	W	157			
レバー部幅	mm	X	110			
運転席シート	幅(最狭部)	mm	Y	430		
	長さ	mm	Z	440		
	背もたれ上部幅	mm	a	300		
	背もたれ高さ	mm	b	510		
	背もたれ厚さ	mm	c	135		
	背もたれ上部厚さ	mm	d	78		
	裏側スペース距離	mm	d	310		

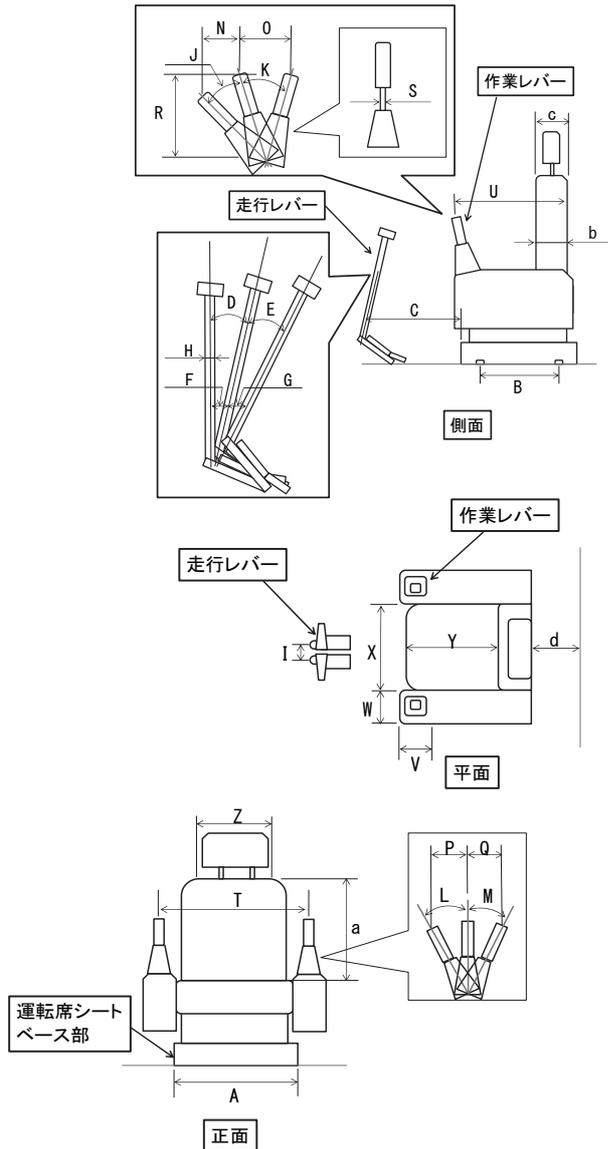


図-1 運転席計測箇所

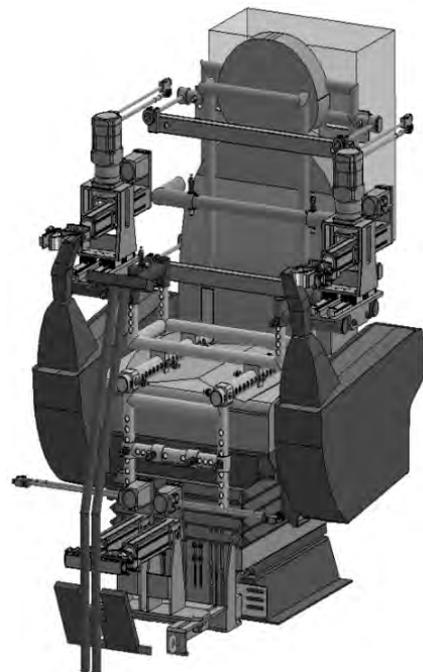


図-2 ロボQS搭載イメージ

#### 4.2 遠隔操縦ユニット

遠隔で操縦するための操縦用ラジコンと緊急停止用のラジコン、各々の受信機で構成される。使用する電波は、共に電波法による免許を要しない

特定小電力方式とした。操縦用ラジコンはチャンネル数の多い400MHz帯とし、空きチャンネルを自動で探索する機能を装備した。また装置の状態を確認できるフィードバックモニタを装備した。

緊急停止用ラジコンは1.2GHz帯とし、操縦用ラジコンと周波数帯を変えることで万が一混信が発生してもどちらかの電波が届くようにした。緊急停止用ラジコンはバックホウ操縦者以外が携帯し、安全性を高めることが望ましい。写真-4に操縦用ラジコン、写真-5に緊急停止用ラジコンを示す。



写真-4 操縦用ラジコン



写真-5 緊急停止用ラジコン

### 4.3 コントロールユニット

ラジコンからのデータを位置情報へセンシングするモータドライバや、装置全体の制御を行うプログラマブルコントローラ（以下 PLC）、制御リレー等で構成される。コントロールユニットは、クッションシート背もたれ部を挟みこんだフレームに背負う構造とし、シートで衝撃を吸収し大きな衝撃がかからないようにした。

コントロールユニットの電源元として重機のバッテリーを使用するが、バッテリーの新旧やエンジン回転数で電圧が変動する。そこで安定した24V電圧を供給するため直流安定化電源を装備した。尚、遠隔操縦にて作業を行う際は、別途に映像装置を搭載することが多く、これらの電源も重機のバッテリーからとるため、電源容量に限界がある。よって映像装置の搭載を考慮し、0.28m<sup>3</sup>級バックホウの最大許容電流の半分程度となるよう機器を選定した。

## 5. 詳細設計

概略設計を元に、安全性能・環境性能を含めた詳細設計を実施した。

### 5.1 アクチュエーションユニット

走行・作業ユニットとフレームを複数の建機メーカーやモデルに搭載するにあたって、バックホウごとにアクチュエータの固定場所と作業レバーとの距離が異なるため、搭載時に固定位置の調整が必要である。そのため、作業ユニットのフレームは、パイプフレーム構造の5分割とし、それぞれを差込式+使用箇所別に色分けしたロックピン固定方式とし、位置調整用のピン穴を多数開け微

調整可能な構造とした。

走行ユニットについては、磁力のON/OFFが可能な強力ネオジム磁石に、上下スライド式の位置調整機構を設け、最適箇所固定可能な方式とした。レバーの把持方法についても、ワンタッチでの取付・取外しが可能なキャッチクリップを採用した。これらによりボルトレス・工具レスでの組立と複数の建機メーカーへの装着に対応した。

アクチュエータは初代ロボQの課題であったエア式に換え、電動ボールネジの直動シリンダと回転モータを採用した。電動式アクチュエータはトルク制御が可能であり、重機レバーの可動端部まで押し付けても過負荷でトリップしない制御が可能である。

遠隔操縦を行うにあたり、走行・作業レバーの可動範囲をPLCに認識させるため、中立位置を制御原点とし、レバーの端部を確認する初期設定を最初に行う必要がある。トルク制御によりレバーがストローク端部に接触し、トルクが上昇した時点を端部と判断することでレバーの前後（左右）の可動範囲を設定する。

初期設定で検出した可動範囲に対し、実作業での衝撃発生時のストローク端部衝突によるアクチュエータ破損を防止するため、ストローク端部から5mmを除いた範囲を実作業の可動領域とするプログラムとした。これにより操縦用ラジコンのレバーとバックホウの作業レバーの倒立比を同調させ、スムーズな操縦を実現した。また、プログラム上でシリンダ速度や押し付けトルクを自由に設定出来るため、ラジコン操作に対するレバーの反応を任意に設定することが可能である。

搭乗運転を行うために、座面に配置したパイプフレームの上に簡易座席を設置した。遠隔操縦と搭乗運転の切り替えは、配線1本をワンタッチで切り替えるだけで完了する。写真-6に搭乗運転状況を示す。



写真-6 搭乗運転

## 5.2 遠隔操縦ユニット

操縦用ラジコンの走行・作業レバーについては、通常の作業で使用する『通常モード』と微小な操縦が可能な『精密作業モード』の切替スイッチを設け、精密作業モードではラジコンのレバーストロックに対し、実機レバーの可動範囲を狭め、微小な作業を可能とした。また、バックホウのキャビン天井にクラクションを設置し、遠方から警笛を鳴らせるようにした。

その他、緊急停止ボタンやエラー解除スイッチ、油圧ロック解除スイッチを設け、遠隔からこれらを制御可能な機構とした。ラジコンには LCD モニタを配置し、遠隔操縦装置のコンディションデータ（バックホウ電圧・ローリング、ピッチング・コントロールユニット内部温度等）をフィードバックし、バックホウの状態がラジコンで分かるようにした。

操縦用・緊急停止用ラジコンの受信機は、バックホウのキャビン天井に設置するが、回転時にアンテナがブームやアームの死角に入って電波が途絶え無いよう、受信はダイバーシティ方式とし、2本のアンテナをバックホウの左右離れた場所に設置し信号の安定化を図った。写真-7 にバックホウ天井機器搭載状況を示す。

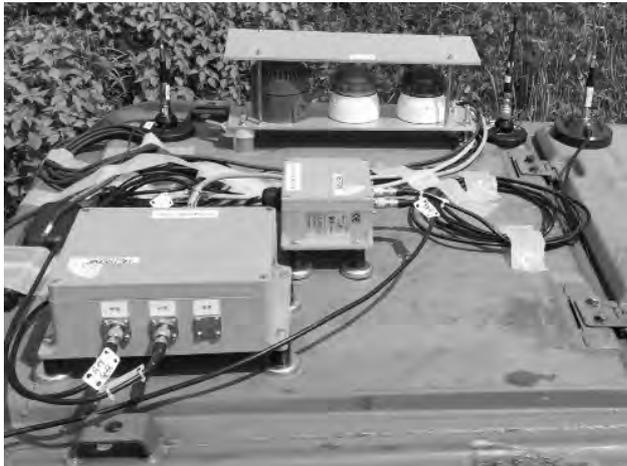


写真-7 バックホウ天井機器搭載状況

## 5.3 コントロールユニット

バックホウの操縦は4本のレバーを6軸方向（走行レバーは前後方向、作業レバーは前後左右方向）に複数同時に動かすことで行う。操縦用ラジコンからの操作信号の入力に対し、各軸への出力にタイムラグが生じると、特に走行操作は動き始めにズレが生じ、扱い辛い装置になってしまう。その為、アクチュエータを制御するモータドライバは、多軸同時制御が可能な物を選定した。PLCの通信方式は処理速度が速い方式を採用し、信号送受信の伝達速度は100msec以内を目標とした。

また、ノイズによる誤操作を防ぐために、幅広

アース線の使用や、アルミ板をユニット内全面に貼り付けることによる盤内へのノイズ侵入防護、アースの等電位化、電源線と信号線の離隔を確保する等の対策を実施した。写真-8 にコントロールユニット内部を示す。

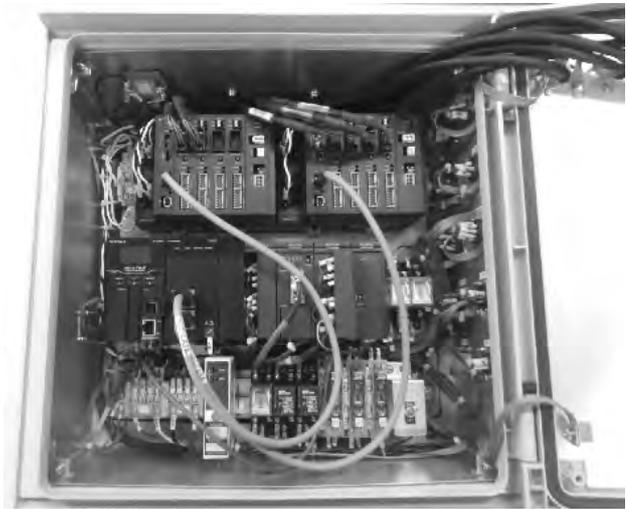


写真-8 コントロールユニット内部

## 5.4 安全設計

遠隔操縦装置は事故が発生した場合のリスクの高いバックホウをコントロールする装置であるため、『機械の包括的安全基準に関する指針』に則り、PL法の対象とならないように慎重に検討した。バックホウ自体の改造は、メーカー保障やPL法対策上、行わない事とした。

また、非常停止はJISの規程により、バックホウに対して停止カテゴリ0又は1で実施した。

停止カテゴリ0は『機械駆動部への電源供給を即時に直接遮断する停止機能』、停止カテゴリ1は『制御回路からの運転停止信号により機械駆動部の停止機能が働きその後電源供給が遮断される停止機能』である。遠隔操縦装置の停止機能は、バックホウの油圧を停止させる（油圧ロックと称する）＝機械駆動部への電源遮断とした。

緊急停止は制御機器の自己判断、操縦用ラジコン、緊急停止用ラジコンと更にもう一系統バックホウ両側面に押しボタン式のスイッチを配置し4系統とした。

安全性を考慮して油圧ロック回路に対して信号が出ていない状態が油圧ロックとなる回路構成とし、バックホウを動かす為には油圧ロック解除信号を出し続ける必要があるプログラムとした。

停止カテゴリ0は、PLCを解さずリレーのみで構成された回路とし、緊急停止用ラジコンや操縦用ラジコンの緊急停止ボタン、両側面の押しボタンスイッチからのB接点信号回路をリレー入力側に直接接続し、油圧ロック解除回路に割り込ませる方法である。これは回路切断状態が緊急停止とな

るため、万一断線が起きた時は緊急停止となり信頼性が高い。尚、リレーは接点固着の可能性が低いソリッドステートリレーを使用した。

停止カテゴリ 1 は、緊急停止信号を PLC に取り込み、その情報に PLC が異常と判断した場合を加えて、油圧ロック解除信号の出力停止機能を持たせた。また、PLC は自己が故障した場合には全出力が停止する設定とした。

バックハウのキャビン天井には緊急停止の作動、油圧ロックの作動状態を確認するための表示灯を設置し、目視で装置の状態を把握出来るようにした。

## 5.5 環境性能・消費電流・その他

環境性能の IP65 を満たす為、装置で使用する部品は全て既製品の IP65 をクリアした製品を選定した。ただしコントロールユニットはコネクタ接続用に穴あけ加工をしたため、公的機関にて IP65 試験を行い、防水防塵性能に問題が無いことを確認した。また、耐衝撃性能を確認するため、実際にバックハウに遠隔操縦装置を搭載し、段差を激しく乗り越えた時の衝撃を加速度計で計測することで確認した。最大 27G を記録したが、装置に異常は見られなかった。

ユニットで使用する電子部品は、LED ランプ等の極力省電力機器を選定した。操縦レバーを 6 方向全て同時に操縦した全負荷状態での最大電流値も、目標値以内を達成した。

その他、ロボ QS は運搬を考慮して装置全てを宅急便での配送が可能なボックス 6 個に分割収納出来るようにした。6 個のボックスはワンボックス車であれば積込可能である。写真-9 へ運搬状況を示す。



写真-9 ロボ QS 運搬状況

今回、装置を電動式とした事でエンジン式のエアコンプレッサが不要となり、空輸も可能となっ

た。(ガソリン・エンジンオイル・バッテリーが空輸不可品)尚、一番重いユニットはコントロールユニットの 13kg であった。また、工具レスでの組立、フレームロックピンの色分けによる使用箇所の視覚化、運転席の脱着を無くしたことで、組立時間は 2~3 人で約 30 分程度と初代ロボ Q の 3 人・3 時間を大幅に短縮すると共に、メンテナンス性の向上や点検の簡略化を達成した。写真-10 にロボ QS の搭載状況を示す。



写真-10 ロボ QS 搭載状況

## 6. おわりに

今回、新型ロボ QS を 3 年掛けて完成させた。初代ロボ Q からの改善要望をすべて網羅し、九州技術事務所からも「災害時の迅速な対応につながる」と期待していると非常に高い評価を頂いた。

ロボ QS は殆どの機種に搭載可能なこと以外に、ロングアーム仕様や泥濘池仕様等のバックハウにも搭載できるのが強みである。今後、更なるブラッシュアップとしてアタッチメント対応等に取組んで行く所存である。最後にロボ QS 開発にあたり、多くの助言をして頂いた国立研究開発法人土木研究所をはじめ関係者の方々に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 平成 13 年 6 月 1 日 (基発第 501 号) 厚生労働省労働基準局長  
『機械類の包括的な安全基準に関する指針』
- 2) 平成 21 年度中央労働災害防止協会  
『機械設備のリスクアセスメントマニュアル』
- 3) JIS B 9703 機械類の安全・非常停止

## 2. 道路啓開時における路上車両移動技術について

国土交通省 関東地方整備局 関東技術事務所 ○ 松岡 良介  
 国土交通省 関東地方整備局 関東技術事務所 島崎 浩志  
 国土交通省 関東地方整備局 関東技術事務所 長山 真一

### 1. はじめに

首都圏での大規模災害の発生時には、多くの人的・物的被害や国全体の経済被害は甚大なものとなると予想される。

発災時には、被災地内の多くの道路において、大渋滞や放置車両による通行障害が懸念されるため、人命救助や支援物資輸送のための緊急通行車両をいち早く通行させるために道路啓開を迅速かつ効率的に行うことが必要不可欠である。

迅速な道路啓開に向けた放置対策車両対策等の強化を図るための措置として、平成26年11月21日に施行された災害対策基本法の一部を改正する法律では、首都直下地震をはじめとする災害発生時に道路管理者が放置車両・立ち往生車両の移動・撤去を行うことが可能となった。

関東地方整備局では、首都圏での大規模災害発生時に全国各地からのアクセスが可能となるよう、放射道路を活用し、都心に向けた八方向（八方位）毎に優先啓開ルートを設定し、郊外から一斉に道路啓開を実施する首都直下地震道路啓開計画を策定した。

本報告では、過年度に引き続き平成28年度に行った迅速な道路啓開に用いる試作機的设计・製作・検証結果について紹介する。

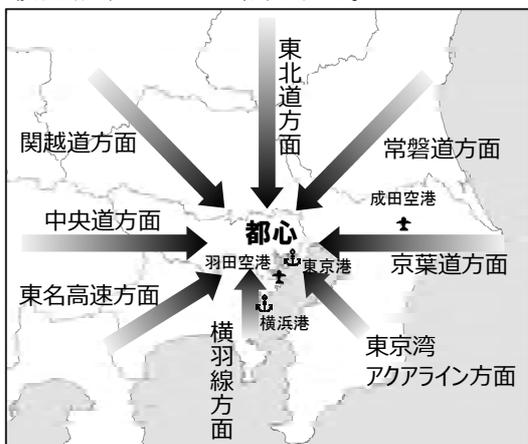


図-1 首都直下地震に備えた八方向からの道路啓開

### 2. 車両移動技術について

#### 2.1 車両移動機材の種類

既存の車両移動技術は、以下のようなものがある。

##### ①レッカー車

乗用車から大型車までを対象とした特殊車両で、けん引以外にもクレーン装置による吊り上げや油圧装置での持ち上げ、ウインチの巻き上げなど、車両を対象とした様々な機能がある。



写真-1 レッカー車（大型・中型・小型）

##### ②フォークリフト

通常は荷役作業を行う機械であるが、乗用車を横向きに持ち上げ、移動することが可能である。



写真-2 フォークリフトによる乗用車の持ち上げ作業

##### ③ホイールローダ

フォークアタッチメントを装着することで、フォークリフトと同様に乗用車を横から持ち上げて移動することができる。



写真-3 ホイールローダによる乗用車の持ち上げ作業

##### ④車両移動用ジャッキ

乗用車のタイヤ4輪をキャスター車輪で持ち上げ、数人の手押し作業で移動を行う装置である。小型軽量でレバー操作のみのため、複数準備しておくことで同時作業が可能となる。



写真-4 車両移動用ジャッキによる乗用車の移動作業  
⑤クレーン装置

ラフテレーンクレーンやクレーン付トラック、クレーン機能付油圧ショベルなどの機械で車両を吊り上げて移動することが可能である。

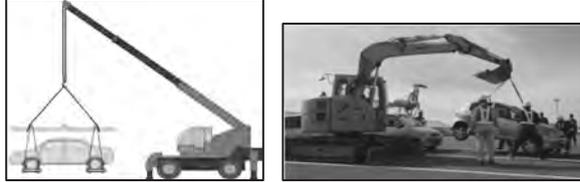


写真-5 クレーン装置による乗用車の吊り上げ作業  
⑥けん引装置・けん引台車

被けん引車の前輪などを持ち上げて固定することで、車両移動が可能となる。



写真-6 けん引装置による乗用車のけん引作業

## 2.2 車両移動用機器の開発対象

東京都内の直轄道路における常時観測データ（平成26年度）によると、通行量が最も多い車種は、小型貨物車で44%、次に乗用車41%、中型・大型貨物は14%、バスが1%という比率であった。貨物車やバスなどの大型車両に対応できるのは専用会社の大型レッカーのみである。乗用車は、比較的移動が容易であり、被災状況を鑑みて移動対象となる台数の多い小型貨物車と乗用車から小型トラック（2～3t積み）を試作機の開発対象とした。

## 3. 小型トラック用車両移動用機器の設計・試作

### 3.1 経緯

平成27年度に試作した小型トラック用車両移動機器は、全体重量が900kg以上、分割重量で100kgを超える部品が複数あるという規模で、組立・準備時間に約1時間を要するため、小型・軽量化、作業時間の短縮を目的とした第2試作機の設計・試作を行うこととした。



写真-7 平成27年度の試作機

### 3.2 設計の条件

開発対象の小型トラックは、運転席が広いワイドキャブや後席があるダブルキャブなど運転室に様々な規格があるうえ、荷台も寸法の大きいロング・ワイドボディや平ボディ、アルミバン、保冷車、ウイング車など様々である。

しかし、車両の移動機器の開発において支配的となるのは前後のタイヤ寸法（タイヤ形状、トレッド、ホイールベース等）と設計荷重である。そこで、運転室や荷台の規格に関わらず国内のトラックメーカー6社のベースシャシーの標準仕様から設計条件を決定した。

項目	許容範囲	備考
車両総重量	4.0～6.0t	標準～ワイド・超ロング・4WD
車体幅	1.69m～2.22m	標準～ワイド
トレッド(前輪・後輪)	1.23m～1.68m	〃
ホイールベース	2.4m～3.9m	標準～超ロング
最低地上高	135mm～205mm	2WD・4WD
タイヤ幅(前輪・後輪)	185mm～225mm	後輪のダブルタイヤは2倍
タイヤ直径(前輪・後輪)	640mm～805mm	

表-1 各メーカーの標準仕様調査結果

### 3.3 設計

複数の案を比較検討し、優位であったジャッキ付ドーリーを試作することとした。

	ジャッキドーリー案	エアージャッキ・簡易ドーリー案	車両移動用ジャッキ大型化案	平成27年度試作機
設計条件(共通)	2tトラック：総重量5t（前輪2t、後輪3t） （前輪タイヤ幅225mm、直径φ660～800mm、後輪ダブルタイヤ幅500～550mm、直径φ640～800mm）			
概要・特徴	乗用車用の車両移動用ジャッキの他、昇降器具などを参考に大型化したもので、タイヤ1箇所ずつ垂直に持ち上げてけん引する。対象車両の前・後どちらからでも作業可能なけん引装置を組み合わせる。ホイールローダーのバケットへの負担はけん引のみで少ない。	簡易ドーリーを、タイヤ4輪に配置する。けん引作業は、前・後両方から対応可能とする。エアージャッキは乗用車もしくはホイールローダーの排気を使用する。個々の器具類は100kg未満で人力作業に問題ない。構造は単純で、組立・準備時間は少ない。	乗用車用の車両移動用ジャッキを大型化する案で、ローラーを複数配置し、油圧ジャッキによる積み込みと持ち上げ操作を行う。けん引作業は、前・後両方から対応可能とする。ホイールローダーのバケットへの負担はけん引のみで少ない。	ホイールローダーのバケットを利用して、けん引装置を配置して、この原理で前輪を持ち上げてけん引する。後輪は簡易的なドーリーを取り付けて対応する。平成27年度の試作機は、形状変更や軽量化、補強箇所など改善箇所が複数あり、見直しが必要。
寸法重量	使用する器具類は2tクレーン付トラックの荷台分の規模で合計重量は950kg程度。部品の容積は1.200×900×2.200程度が予想され、ホイールローダーのバケットに山積みで積載できるが試作機製作後に確認が必要。	使用する器具類は比較的軽量なため、概ねバケット内に積載可能（要確認）合計重量は300kg程度。	許容荷重に対応した大型化により、タイヤ1箇所当たりの単体重量は100kgを超える見込み。全体では600kgを超える規模。寸法は詳細設計にて要確認であるが、ジャッキドーリー案に比べて小規模となる見込み。	使用する器具類は2tクレーン付トラックの荷台分の規模で合計重量は950kg程度。分割重量が100kgを超えている部品が複数あり、ユニック車での運搬・組立作業が必要。
課題・懸念事項	概略検討によるとタイヤ1箇所あたりの重量が約200kgであり、人力作業を考慮した分割構造となるが、組立後の移動にも注意が必要。車両の前後・左右のバランスを考慮した持ち上げ作業が必要（重い位置が先）。組立後の寸法・重量では、クレーン付トラックによる搬入が必要。	許容荷重4t級のエアージャッキを利用した動作確認が必要。複数台に連続使用する場合、エアージャッキの耐久性が懸念される。ホイールローダーのマフラーは10m以上離れること、形状が各社異なるため事前確認が必要。持ち上げ荷重に対して排ガス量が少ないとエアージャッキの膨張に時間を要する。	後輪のダブルタイヤを想定し、許容荷重と動作機構の詳細検討が必要。ローラーの回転は、持ち上げやすいと逆に外れやすいため、タイヤの固定方法が必要。各部の構造や仕様、部品や耐久性など、懸念事項が多く確認が必要。設計・製作期間が長く、完成までに最も時間を要する。	前輪けん引用装置の分割部品数が多く、部品重量も重いため、クレーン付トラックによる組立や作業準備に約1時間を要する。一体化による形状変更と作業効率の改善が必要。後輪の持ち上げに別途ジャッキが必要。けん引作業は車両の前方からのみで、中心線を含めた位置決めが必要。作業中はアスファルトの段差や勾配の影響を受けやすい。
総合評価	○	○	△	△

表-2 試作機案の比較

	ジャッキ付ドーリー案	評価	エアージャッキ・無鉛ドーリー案	評価	車両移動用ジャッキ大型化案	評価	平成27年度試作機	評価
重量	全体：約950kg 分割：約60kg	△	全体：約300kg 分割：約60kg	○	全体：600kg以上 分割：100kg未満	△	全体：950kg 分割：100kg超が複数	△
分割数	25点	△	10点	○	16点	△	12点	○
全体規模(運搬容積)	ホイールローダーのバケット内での21クレーン付トラックの積込分	○	ホイールローダーのバケット内	○	ジャッキドーリー案よりも小規模	○	21クレーン付トラックの積込分	△
輸送方法(積載車両)	ホイールローダー×クレーン付トラック	○	ホイールローダー	○	ホイールローダー	○	クレーン付トラック	△
作業人数(運転手除く)	3~4名	○	2~3名	○	3~4名	○	3~4名	○
作業に必要な機器	輸送にクレーン付トラックが必要な可能性あり	△	自動車orホイールローダーの積載	○	輸送用車両(クレーン付トラックより小型)	○	クレーン付トラック(クレーン)・大型ジャッキ	△
作業準備時間	30分~1時間程度	○	30分~1時間程度	○	30分~1時間程度	○	約1時間	△
作業性1(作業配置・手順)	前後どちらからでもけん引可能。前後・左右のバランスを考慮した持ち上げ作業が必要。	△	前後どちらからでもけん引可能。前後・左右のバランスを考慮した持ち上げ作業が必要。	○	前後どちらからでもけん引可能。前後・左右のバランスを考慮した持ち上げ作業が必要。	○	けん引は車前方向からのみ。中心線を合わせた位置決めが必要。	△
作業性2(けん引作業)	キヤスター径φ100mmで、けん引時に路面の性状や積載の影響を受ける。	△	キヤスター径φ150mmで、けん引時に路面の性状や積載の影響を受けやすい。(φ100mmよりは優位)	△	キヤスター径φ125mmで、けん引時に路面の性状や積載の影響を受けやすい。(φ100mmよりははやや優位)	△	チコの直進で前輪を持ち上げるための、調整や均配の影響を受ける。	△
作業性3(安全性・確実性)	1基あたり6分割と組立後の重量が0.0kgに注意が必要。タイヤの持ち上げと保持の構造は比較的安全。	○	部品数と重量は最も有利。エアージャッキの取り扱いには、事前に十分な確認と注意が必要。カタログ仕様4t級の持ち上げ能力は実機確認が必要。	△	分割数と組立後の重量にやや注意が必要。構造や機能など詳細な検討が必要。具体的な内容は詳細設計にて検証が必要。	△	100kg以上の分割重量と1時間の作業手間に注意が必要。	△
実現性		◎		△		△		△

表-3 試作機案の比較(詳細)

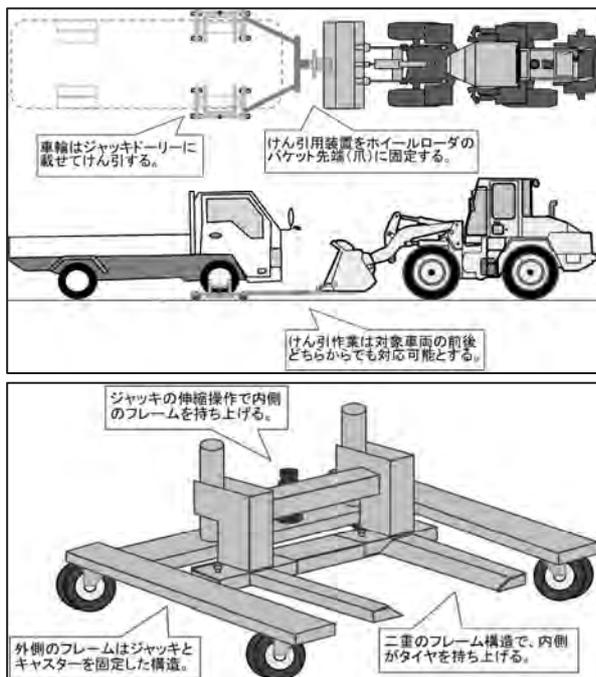


図-2 ジャッキドーリー案試作イメージ図

### 3.4 試作機

製作した試作機を写真-8から写真-10に示す。試作したジャッキドーリーの特徴は、①分割重量が最大約60kgであり、人力でトラックからの積み卸し、組立・分解が可能。②タイヤを直接持ち上げるため、サスペンションストロークの影響を受けず、また車体下部形状の影響を受けに

くい。という点である。

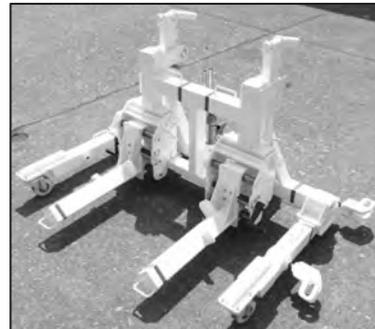
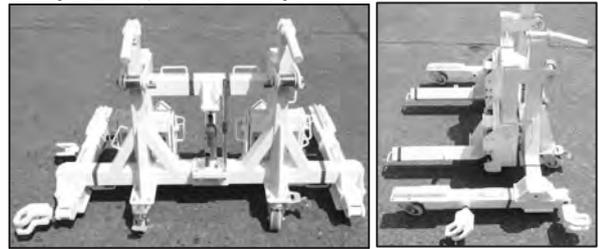


写真-8 ジャッキ付ドーリーの外観



写真-9 けん引装置の外観



写真-10 車両への取付状況

## 4. 現場適用性の検証

製作した試作機を用いて、現場適用性の検証を行った。

### 4.1 試作機の使用条件

試作機の仕様により以下のとおりである。

- ・1基あたりの許容荷重：2,500kg程度まで
- ・タイヤ寸法：外径φ642~840.5mm、幅500mm以内

### 4.2 現場への移動方法

ジャッキ付ドーリーを現場に移動する方法は、

本体の組立重量が1基あたり189kgであるため、組立状態としてクレーン付トラックで運搬するか、分割状態でトラックの荷台に積載する方法となる。実機検証の結果2t積みトラックの荷台に積載可能であることが分かった。それぞれの積載状態を図-3に示す。

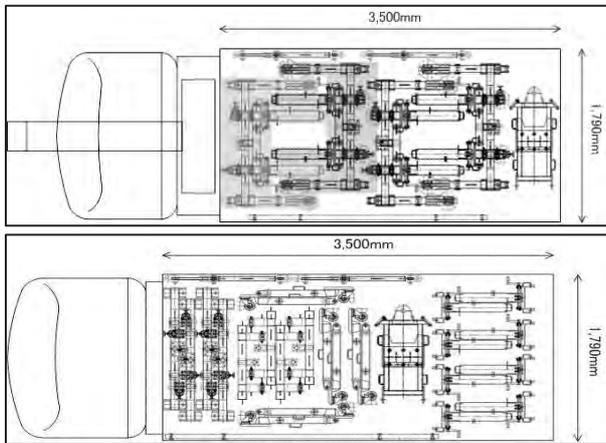


図-3 ジャッキ付ドーリー積載状態

#### 4.2 現場での作業条件

##### ①路面状態の制約条件

実機検証の結果、以下の条件で使用可能なことが確認できた。

- ・路面種別：アスファルト舗装及びコンクリート舗装
- ・段差や溝：10～20mm程度まで
- ・路面勾配：2.0%程度まで
- ・天候その他：雨天及び凍結は不可、夜間は照明が必要

##### ②作業人員編成

検証の結果、作業員は、4名必要であることが分かった。内訳は、特殊運転手（ホイールローダ）1名、普通作業員3名で、特殊運転手は、必要に応じて運転以外の作業も兼ねて対応することとなる。



写真-11 検証の様子

#### 4.3 作業に要する時間

作業にかかる時間は、表-4のとおりであった。

車両移動準備	必要時間(分)	備考
①分割部品の荷下ろし・準備	8	(全て3人作業)
②ジャッキ付ドーリーの組み立て	5	
③ホイールローダのバックネットへけん引装置の取り付け	15	
④ホイールローダとジャッキ付ドーリーの位置決め・連結	3	
⑤ジャッキ付ドーリーでの持ち上げ	2	
合計	33	

車両の移動	必要時間(分)	備考
・前後への移動(20m直進)	1	

※移動時間の目安として、実作業から逆算すると移動速度は30～40m/minとなる。

移動後の片付け	必要時間(分)	備考
①ジャッキを下ろしてタイヤ接地	1	
②連結解除・けん引装置の取り外し	7	
③ジャッキ付ドーリーの分割	5	
④積み込み・片付け	6	
合計	19	

表-4 建設機械を利用した車両移動機器の必要時間

#### 4.4 検証結果

検証の結果、試作した小型トラック用の試作機で、実際に小型トラックを持ち上げ、移動することが可能であることが分かった。

また、習熟度が上がっていれば、準備等にかかる時間は今回の検証結果よりも短縮することが可能と思われ、平成27年度試作機では、約1時間かかっていた準備時間が、今回目標としていた30分以内に収められると考えられる。

#### 5. まとめ

今回の検証の結果をもとに、不具合のあった部分について修正を加えた製作仕様書及び製作図面を作成し、業務の成果とした。

今年度の試作機は、試作の段階で業務終了としているが、今年度の業務では、過年度に製作し、各事務所に配備した車両移動用機器の運用手順のとりまとめも行っている。災害は、起きないにこしたことはないが、いざという時に備え、日頃から訓練・準備等を行っていくことが重要であると考えられる。

#### 謝辞

今回の車両移動機材の試作及び改造にあたり、道路啓開時における路上車両移動技術研究会、本省・各地方整備局の災害時の道路啓開技術（路上車両移動技術）の検討WG及び局内の関係各課の方々より、貴重なご意見を頂き誠にありがとうございました。この紙面を借りて御礼申し上げます。

### 3. 最新の無人化施工技術と i-Construction で挑んだ阿蘇大橋地区

#### 斜面防災対策工事

国土交通省九州地方整備局熊本復興事務所

野村 真一

(株)熊谷組土木事業本部ICT推進室 北原 成郎

(株)熊谷組土木事業本部機材部 ○坂西 孝仁

#### 1. はじめに

平成28年4月16日に発生した熊本地震(本震)により、熊本県南阿蘇村立野地区において大規模な斜面崩壊が発生した。この影響で国道57号やJR豊肥本線が約300mの区間に渡り遮断し、国道57号に接続する阿蘇大橋も落橋するなど周辺一帯は、壊滅的な被害を受けた。これを受けて斜面上部に残る多量の不安定土砂の崩壊による二次災害を防止するため、国土交通省九州地方整備局は直轄砂防災害関連緊急事業として、阿蘇大橋地区斜面防災対策工事が実施された。

本稿ではこの工事に導入された最新の無人化施工技術と建設ICTにより実現した「総合的なi-Construction」について報告する。

#### 2. 工事概要

##### 2.1 無人化施工導入経緯



図-1 阿蘇大橋地区被災状況

阿蘇大橋地区で発生した大規模崩壊の規模は、長さ約700m、幅約200mにもおよび、崩壊土砂量は約50万m<sup>3</sup>と推測される。この崩壊斜面の上部には至る所に開口亀裂や段差が発生し、滑落斜面は切立って急傾斜となっており、降雨や余震等により更なる崩壊の危険性があった。このような状況の中、本工事においては二次災害を防ぐことを最重要課題とし、滑落斜面およびその周辺地盤の挙動を監視・計測しながら最新の無人化施工技術を導入した(図-1)。また専門家、砂防・道路・鉄道関係者からなる「阿蘇大橋地区復旧技術検討会」を設置し、技術的対応について検討・助言を得な

がら施工の流れに基づき復旧工事を進めている(図-2)。

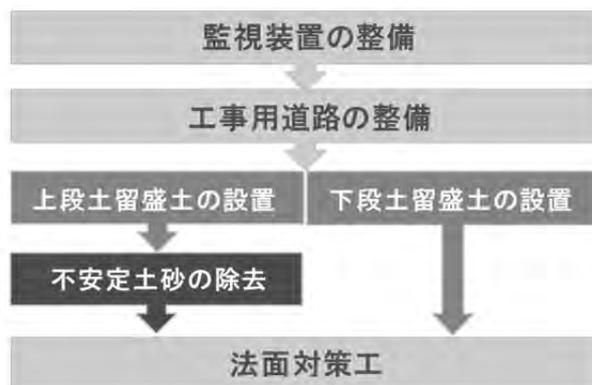


図-2 施工の流れ

##### 2.2 無人化施工の工事概要

斜面下部の交通インフラ復旧に向け、斜面下部での有人による施工環境を迅速に整える必要があることから、恒久的な法面对策の前に斜面上部からの落石を捕捉し、斜面下部で行われる復旧工事の安全を確保するために、土留盛土工を無人化施工で築造した。また斜面頭部の不安定土砂の除去(以下、ラウンディングという)は遠隔操作で上段土留盛土工完了後施工した(図-3)。



図-3 阿蘇大橋地区斜面防災対策工事全体概要図

##### ①土留盛土工

土留盛土工は崩壊地下部に落石や崩落土砂を捕捉

する上下2段各300mを施工した(図-4)。盛土位置は落石シミュレーションの結果に基づき、施工性を考慮し比較的緩勾配となる勾配変化点に配置することとした(図-5)。



図-4 土留盛土工の3次元モデル

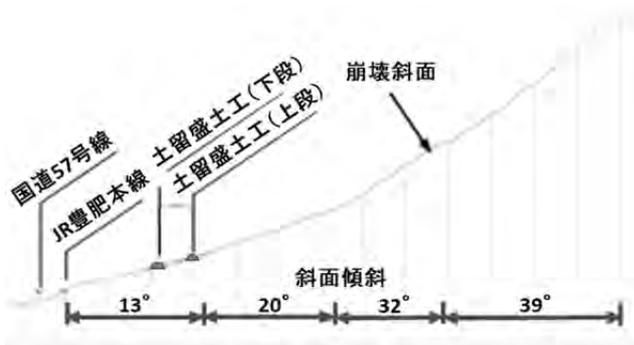


図-5 崩壊地斜面傾斜角度

盛土形状は無人化施工での施工性を考慮し、高さ3m、土留天端幅を5m<sup>1)</sup>。施工については下記のとおり実施した。

- a. 土留盛土工は、セメント系固化材と現地崩壊土を現位置攪拌して敷均・転圧する方式と、場外で購入土とセメント系固化材を混合攪拌した改良土を搬入し敷均・転圧する方式により施工
- b. 目標強度レベルIの0.5N/mm<sup>2</sup>
- c. 現場密度試験、圧縮強度試験よりバックホウ(0.8m<sup>3</sup>級)の4回転圧で締固め度90%以上を満足することを確認

## ②ラウンディング

崩壊地頭部の滑落崖周辺は極めて急勾配で黒ボク等がオーバーハングしている。亀裂も多くみられ、岩屑堆積物が不安定な状況であり、落石の危険性が高い。このため、崩壊地下部の土留盛土工と併せて、滑落崖周辺の不安定土砂を除去するラウンディングを実施した(図-6)(図-7)。

40°程度の急斜面部をラウンディングすることから、高所法面掘削機の横移動が可能なセーフテイクライマー工法を採用した(図-8)。今回は目視およびモニター映像を確認しながらの遠隔操作を

行い、約17,000m<sup>3</sup>を切土掘削1:1.2の勾配で除去した。各モニター映像は操作室まで配信され、総合的な施工監理を実施した。

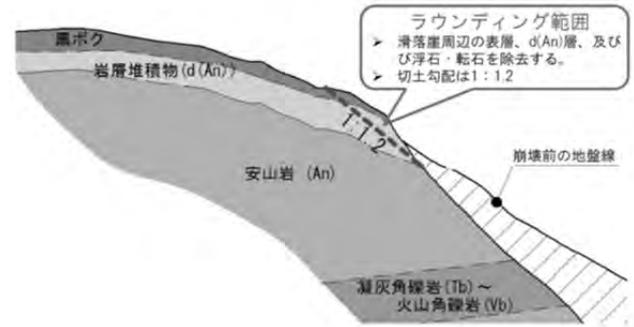


図-6 ラウンディング標準断面

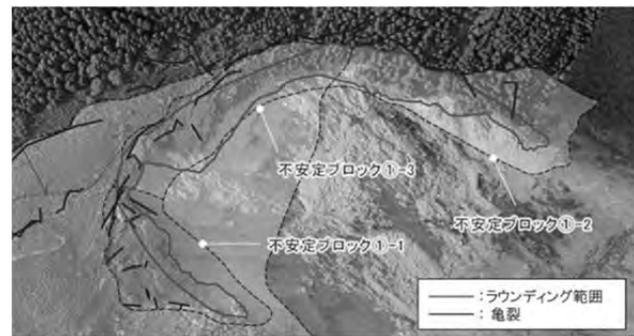


図-7 ラウンディング範囲

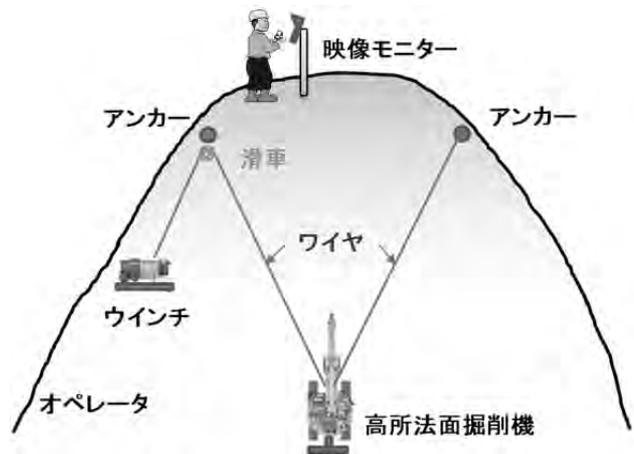


図-8 高所法面掘削機

## 3. 最新無人化施工システムの導入

阿蘇大橋地区斜面防災対策工事の無人化施工には、最新のネットワーク対応型システムを導入した。その概要と当該現場に導入されたシステムについて述べる。

### 3.1 ネットワーク対応型無人化施工システム

従来の無人化施工システムでは建設機械操作データ、作業用固定カメラ・車載カメラの映像データ、マシンガイダンス・マシンコントロールの情報データを各個別の無線機で対応していたことから無

線機の台数も多くなり調整に時間を要した。

また中継が難しく伝送も300m程度であるため、遠隔操作室の位置も限定されていた。

これらの問題を解消すべく開発したネットワーク対応型無人化施工システムは、以下のメリットがある（図-9）。

a. 無線資源の有効活用が可能

建設機械操作データ、作業用固定カメラ・車載カメラの映像データ、マシンガイダンス・マシンコントロール等の情報データは変換機器でIP（インターネットプロトコル）化して送信するため、1周波数に多くのデータが効率良く送信可能になり無線資源の有効利用となる。

b. 遠隔操作室の設置位置の自由度が向上

IP化により長距離無線LAN、光ファイバーケーブル等の使用が可能で、中継も容易になった。これより遠隔操作室位置の自由度が向上し、現場から数十km離れたより安全な位置に遠隔操作室の設置が可能になった。

c. 最新技術の導入が容易

IoT機器や自律運転等の最新技術の導入も容易になり、システムの発展性や拡張性が向上した。

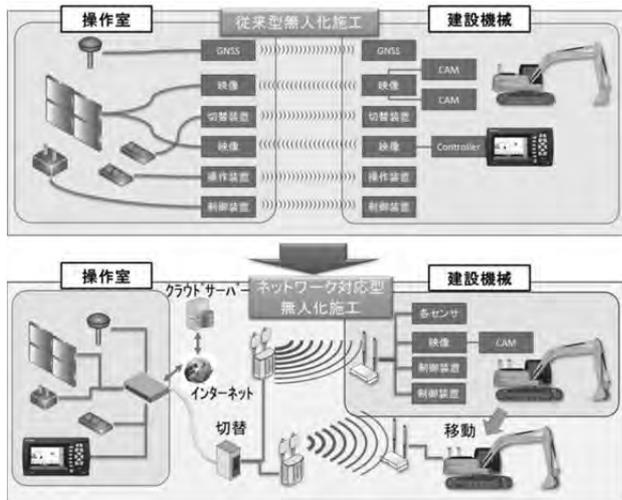


図-9 従来方式とネットワーク対応型の違い

本システムは東日本大震災を契機に、広域での災害対応（火山災害・原子力災害等）を想定し、国土交通省が平成23年3月に雲仙復興事務所で実施した「超長距離からの遠隔操作実証実験」の成果を基に確立された。この結果により80kmを超える遠隔操作室から、安定して建設機械の操作が可能であることが実証された。

この技術はその後、赤松谷川11号床固工工事等で実績を重ね、今回本工事にも導入された。

3.2 土留盛土工用無人化施工設備

本工事の無人化施工による土留盛土工は、ネットワーク対応型無人化施工システムを導入した。

大規模な緊急対策工事であり、かつ迅速に無人化施工設備を立ち上げ、多数の遠隔操作式建設機

械を用いて施工することが必要なため、無人化施工システムを、以下に示す2段階で立ち上げて施工を進めた。（表-1）

表-1 2段階立上げのシステム比較

	第1段階	第2段階
概要	高機能遠隔操作室の設置・運用	超遠隔操作室の設置・運用
内容	前橋地現場事務所付近に3日程度で立ち上げた高機能遠隔操作室の使用	前橋地より1km程度離れた安全な場所から14台の建設機械を遠隔操作した操作室の設置
設備	下流下部無線局、下流中部無線局設置 作業用固定カメラ6台	4箇所無線局設置 作業用固定カメラ13台 監視用固定カメラ3台
稼働建設機械	バックホウ2台、不整地運搬車2台 ブルドーザ1台、カメラ車1台	バックホウ6台、不整地運搬車4台 ブルドーザ1台、カメラ車3台
作業内容	工事用進入路造成	土留盛土築造
設置位置	前橋地現場下流（熊本側）現場事務所付近	前橋地現場下流（熊本側）1km付近病院付近
外観		

① 第1段階（高機能遠隔操作室の設置・運用）

本工事は地震直後の平成28年5月5日より施工体制を確保し、着手した。第1段階ではバックホウ2台、不整地運搬車2台、ブルドーザ1台と高機能遠隔操作室を導入し、短期間で遠隔操作を開始した。通常無人化システムの稼働には、機器の設置や設定、調整に10日程度を要するが、本システムは遠隔操作室の機器設置と設定が事前に完了しており、現地に運搬した段階で機器の調整のみで容易にシステムが稼働できる状態となっている。このシステム化された高機能遠隔操作室を導入することで、3日という短期間で無人化施工を開始することができ、土留盛土工施工箇所までの工事用進入路造成に速やかに着手できた。

② 第2段階（超遠隔操作室の設置・運用）

第2段階では、高機能遠隔操作室により無人化施工を実施している間に準備を進め、遠隔操作式建設機械と設備の増強を図った。遠隔操作室は二次災害を受けにくい現場から約1km離れた場所に設置した（超遠隔操作室）。高機能遠隔操作室と超遠隔操作室の切り替えは、各々の無線環境を両立させながら行うことにより作業の連続性を確保し昼の休憩時間中30分程度で完了した。第2段階は平成29年6月中旬より運用を開始し、14台の建設機械と21台の作業用固定カメラを操作できる設備とした。

また段階的な伝送システムを採用した。超遠隔操作室から700m間は光ファイバーケーブルを敷設し、その先のケーブル敷設が困難な区間は、150Mbpsの伝送量のある25GHz高速アクセスシステムを2系統設置して無線中継局まで伝送した。無線中継局から各無線局までは有線LANおよび25GHz高速アクセスシステムで伝送し、各無線局から建設機械までは、5GHzの無線LANを使用し

た。このような段階的な伝送容量をもつシステムを採用したことにより、安定的に超遠隔操作室から現場建設機械間1kmのデータ伝送が可能となった(図-10)。



図-10阿蘇大橋地区斜面防災対策工事無線システム概要図

### 3.3 ラウンディングにおける無人化施工設備



写真-1 ラウンディング遠隔操作状況

ラウンディングは頭部に設置したアンカーからワイヤで吊り下げた高所法面掘削機により実施した。施工は崩壊地頭部付近の遠隔操作による無人化施工であるため、高所法面掘削機に搭載した車載カメラと施工付近の作業用固定カメラ映像をオペレータがカメラモニターで確認し施工を進めた(写真-1)。

## 4. 新技術の導入

### 4.1 建設ICT(情報化施工)の導入

当現場では3次元ガイダンスシステム、マシンコントロール(ブルドーザ排土板制御)を搭載した建設機械を使用した。通常は建設機械にコントローラが搭載されているが、当現場ではコントローラを遠隔操作室に設置できるように、CAN(Controller Area Network)方式を採用するコントローラに、特殊なCAN-LAN変換器を開発・使用

した。これによりコントローラを遠隔操作室に設置でき、ガイダンス操作、データ設定や機器設定も遠隔操作室で可能になった。

これはネットワーク対応型無人化施工システムによる基盤技術のメリットの一つである(図-11)。



図-11 ICTを導入した無人化施工システム

#### ① マシンガイダンス(バックホウ)

マシンガイダンスを法面整形施工のガイダンスの他に、改良材攪拌作業範囲の指示や測量機として検査立会いに使用した。

##### a. 改良材攪拌作業

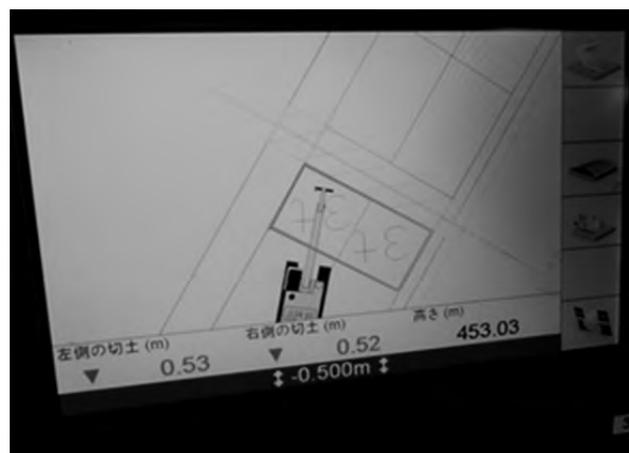


写真-2 マシンガイダンス改良材攪拌作業使用画面

マシンガイダンスを、改良材攪拌作業へ使用した。1ブロック毎の改良範囲を赤枠で表示し、オペレータは改良範囲に対応した改良材を投入した後に、図示された範囲と作業深さを確認しながら作業を実施した(写真-2)。

##### b. 法面整形作業

盛土の平面形状は数か所の折れ点を有する形状であり、作業用固定カメラや車載カメラによる映像とマシンガイダンス併用し施工した。無人化施工においては必要不可欠なシステムの一つである(写真-3)。



写真-3 マシンガイダンス法面整形作業使用画面

c. 出来形検査立会

マシンガイダンス搭載バックホウを測量機として、出来形検査立会に使用した(写真-4)。バケットの爪先で、盛土施工済位置を計測し、盛土が正確に築堤されているか、発注者立会いのもと検査を実施した。バックホウを測量機代わりに使用し、現場から1km程度離れた安全な遠隔操作室から立会いが可能になった。



写真-4 マシンガイダンス使用検査立会状況

d. 水平器の使用

作業現場周辺地盤は黒ボク土が多く堆積しており、降雨時には建設機械が沈み込んだり、滑ったりすることが多々発生したため、マシンガイダンスの水平器機能を使用し、建設機械の傾斜を確認しながら施工を進めた(写真-5)。カメラの配置によっては映像のみでは、微妙な角度は認識できない。そのため、機械の傾きはオペレータの経験のみに頼らざるを得なくなる。水平器機能の使用により定量的な角度を把握でき、オペレータにとっては重要な判断情報が得られ重大なトラブル回避につながった。



写真-5 マシンガイダンス泥濘部水平器使用状況

② マシンコントロール (ブルドーザ排土板制御)

ブルドーザによる基盤整形、盛土の敷均しにマシンコントロールを導入した。盛土高さの仕上げにおいて、オペレータの負担は大きく減り、各盛土層の高さを数cm程度の誤差に収める精度の高い盛立が可能になった。(写真-6)



写真-6 ブルドーザ排土板制御システム使用状況

4.2 i-Constructionの確立

今回の工事では有識者会議を開催し、同会議での見解をベースに、発注者と施工者の検討会議を主体とした事業マネジメントを実施した。また3次元データを一貫して使用した建設ICTの導入により、調査、設計、施工、管理検査も含めた総合的なi-Constructionを実現した(図-12)。



図-12 i-Constructionによる総合的な取組み

調査では航空レーザ測量により、崩壊地の詳細な地形情報取得を行った。

設計では調査結果より、その3次元データの地形図上に3次元モデルによる対策工の計画・設計を行った。

施工では前述したとおり、3次元設計モデルを活用した建設ICTを導入し、精密な無人化施工を実現した(図-13)。



図-13 施工におけるi-Constructionの取組み

管理、検査ではICT建設機械を使用した出来形検査やUAVした(図-14)。

差分解析は着工前、大雨後、または工種の変わり目等に実施した。崩壊地法面土砂の的確な堆積状況の把握が可能になり、柔軟な現場施工対応につながった。



図-14 管理、検査における i-Construction の取組み

## 5. まとめ

今回工事での無人化施工に係る成果は、以下のとおりである。

a. ネットワーク対応型無人化施工技術の確立とその高度化

ネットワーク対応型無人化施工システムを導入し、2段階立上げをしたことにより、工事用進入路造成等の初期対応時は高機能操作室により迅速に遠隔操作に着手できた。また多数の建設機械が必要となる盛土工事でも、光ファイバーケーブル

を使用し1km離れた安全な遠隔操作室から、無線システムのトラブルも無く建設機械を稼働することが可能となった。

b. i-Constructionを先導する技術基盤の形成

3次元モデルとICT建設機械・機器を活用し遠隔操作室で集中管理することにより調査・設計・施工・検査の全過程でi-Constructionを実現した。施工機械と連動した技術は無人化施工に限らず広くi-Constructionを推進する基盤を形成することができた。

## 6. 今後の展望

無人化施工は当初からネットワーク化された無線システムと遠隔操作室を使用することから、ICT機器を集中管理しやすい環境が整っている。今回の事例は、今後の無人化施工による緊急対策工事のみならず他工種でも、UAVを主体にした測量、測量結果の3次元モデル化、そのデータを使用したICT建設機械による施工というi-Construction確立に参考になる要素が多くある。当現場でも活用した施工中の差分解析は、現場状況の変化を定量的に把握でき、出来形管理、安全管理等に活用できる。更に解析速度が上がり、日々の現場管理に使用されると更なる省力化が期待でき、今後急速に開発が進む技術である。

第5世代移動通信システム時代に入ると遅延は1ms、伝送量は10Gbpsと現状の有線システムと変わらない品質で、無線伝送が可能になる。IoTが加速し、多くの建設機械を離れた場所から遠隔操作することが可能になる。またその情報網を使用して、機械データ、位置データ、作業量データ等が自動的に集中管理されことによりi-Constructionの取組みも加速される。我々はこれを機に省力化の推進と作業効率の向上を進め、作業員不足の改善等の諸問題に取り組むことが今後の課題となる。

## 7. おわりに

本稿作成にあたり、国土交通省九州地方整備局をはじめ、現場関係者の方々にご助言やご見解を教示していただいた。この場を借りてお礼を申し上げる。今後は無人化施工等の幅広い分野への適用を目指して精進し、新技術を取り入れながら、機器開発や技術提案のすそ野を広げていきたいと考えている。

## 8. 参考文献

1) 砂防学会 誌 Vol. 70No. 3(332) September 2017 P

# 4. 阿蘇大橋崩壊斜面对策工事における航空レーザ測量及び UAV 計測による 3 次元地形測量データの活用事例

## － 阿蘇大橋地区 砂防災害関連緊急事業（直轄） －

国際航業株式会社事業推進部      ○ 堀川 毅信  
 国土交通省九州地方整備局      野村 真一  
 株式会社熊谷組土木設計部      中出 剛  
 岡山大学大学院環境生命科学研究      西山 哲

### 1. はじめに

フィリピン海プレートなど 4 枚のプレートの際にある日本は幾度無く地震の外力を受けた結果、現在の地形を形成していることから、ある程度の揺れでは自然斜面が崩壊する現象は発生しないが、履歴の少ない一定以上のエネルギーをもつ地震が発生した場合、地すべりや斜面崩壊にともなう大規模な土砂移動が過去発生している。

平成 28 年 4 月熊本を襲った「熊本地震」は、最大震度 7 が二回観測され阿蘇周辺において多くの斜面崩壊を発生させた。特に南阿蘇立野地区において発生した大規模な斜面崩壊は、崩壊斜面延長最大 700m、崩壊幅約 200m、崩壊土砂量 50 万 m<sup>3</sup> と推定<sup>1)</sup>された土砂が、国道 57 号、JR 豊肥本線、阿蘇大橋を押し流した。さらに、崩壊斜面上部には、発災直後に撮影された航空レーザ測量等による 3 次元地形データや空中写真から多くの亀裂が確認され、向山等が地震変位<sup>2)</sup>の状況を詳細に報告している。

崩壊斜面は、阿蘇カルデラ壁西縁で黒川が白川に合流する 1km 上流の右岸東側斜面に位置し、安山岩溶岩（一部凝灰角礫岩）が分布する。崩壊斜面上部には地震後基岩となる溶岩と凝灰角礫岩が露出し、斜面下部は崖錐堆積物と想定され、崩壊斜面周辺表層は平均で 1～2m 程度黒ボク（N 値 5 未満の軟弱な地層）で覆われていたと推定され、余震や降雨による崩壊拡大の危険性が高いと判断されたことから早急な斜面安定化対策が望まれたが、斜面の安全性が確保されないことから、有人による現況調査や工事は実施できない状況であった。

このため、崩壊斜面拡大防止や斜面安定化を図る目的とした直轄砂防災害緊急砂防事業により、安全な場所からの遠隔操作による無人化施工機械を用いた応急対策工<sup>3)</sup>が検討・実施された。

無人化施工機械は、搭載された GNSS や傾斜センサーなどにより得られる位置や高さ情報と設計データの差分をモニターで確認しながら工事を実施

するマシンガイダンス技術により実施され、これら位置・高さ精度は、±50mm<sup>4)</sup>以下が目安となっている。また、航空レーザ計測及び UAV（無人航空：Unmanned aerial vehicle）計測においては、公共測量作業規定に基づき実施するうえで要求される精度が設定されており一般的には地図情報レベル 250～1000 で実施されている。

本報は、熊本地震で発生した大規模な崩壊斜面において、測量・設計・施工の作業を航空レーザ計測及び UAV 計測<sup>5)</sup>で取得した 3 次元データを用いて得られた知見や課題について整理し取りまとめ、今後推進される「i-construction」の実施に向けて参考となる 3 次元計測技術の基礎資料が提供できたと考える。

### 2. 航空レーザ計測及び UAV 計測データ特性

#### 2.1 航空レーザ計測の概要

航空レーザ計測に用いた仕様の基本的特性を表-1 に示す。航空レーザ測量は、航空機に搭載したレーザスキャナ、GNSS 測量機、IMU（慣性計測装置）により点群として位置と高さ (x,y,z) を取得し、高さの精度は概ね±15cm 程度であるが、樹木等の影響を受けることから今回の計測では、図-1 に示す波形記録方式を用いたことで植生の影響を受けずに地表面のデータを取得するようにした。

表-1 航空レーザの仕様上の基本性能

GNSS/IMU性能	
位置精度	水平0.02m, 高度0.05m (GNSS信号連続受信時)
姿勢精度	Roll&Pitch:0.005deg, Heading:0.008deg
レーザスキャナ・写真解像度（計画/最大）	
スキャンレート	70.0kHz / 200Hz
パルスレート	150,000Hz / 400,000Hz
写真解像度	10cm / 対地高度による

応急対策事業で実施したレーザ計測の範囲位置

図及び崩壊地周辺のオルソ図を図-2, 3 に示した。

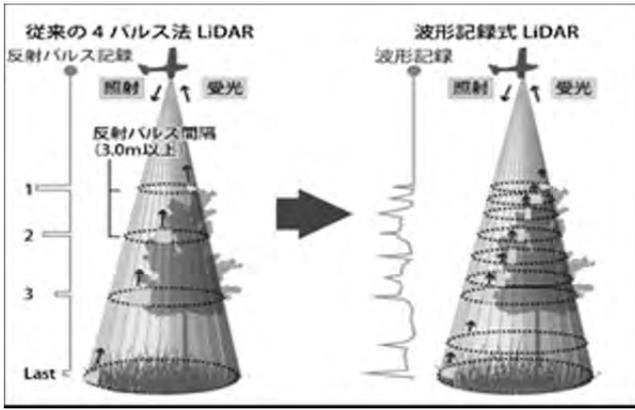


図-1 レーザデータ記録の概念図



図-2 レーザ計測範囲及び崩壊位置図

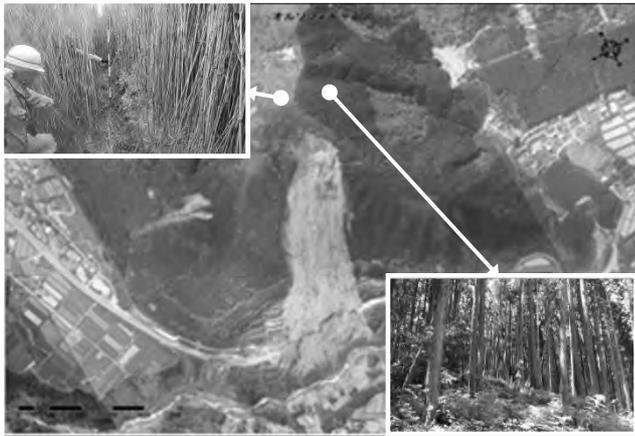


図-3 斜面崩壊箇所周辺オルソ及び植生状況

## 2.2 航空レーザ計測及び UAV 精度特性について

航空レーザ計測及び UAV 計測における精度は作成する数値地図の地図情報レベルで通常表現され、詳細設計に使用される地図情報として平面縮尺が 1:200~1:500 を標準として用いられている。また、公共測量作業規定等で要求される地図情報レベルの位置精度は、以下のように整理される。

実施された航空レーザ計測は、立入禁止区域内での設計及び施工に使用することから、地図情報レベル500で実施し、UAV計測においても同等かそ

れ以上の精度となるように UAV を用いた公共測量マニュアル(案)<sup>6)</sup>(以下 UAV マニュアル)に準じた GCP の設置を行ったが、崩壊斜面周辺の地形及び時間の制約があったことから崩壊斜面中腹部の GCP 間距離が 200m 以上となった。

表-2 精度に関する数値レベル

地図情報レベル	250	500
水平位置の標準偏差	12cm 以内	25cm 以内
標高点の標準偏差	25cm 以内	25cm 以内
等高線の標準偏差	50cm 以内	50cm 以内

## 2.3 3次元地形モデルを応用した画像地形

航空レーザ計測の DEM(Digital Elevation Model)により作成した崩壊斜面周辺のエルザマップ<sup>7)</sup>(ELSAMAP)を図-4 に示した。

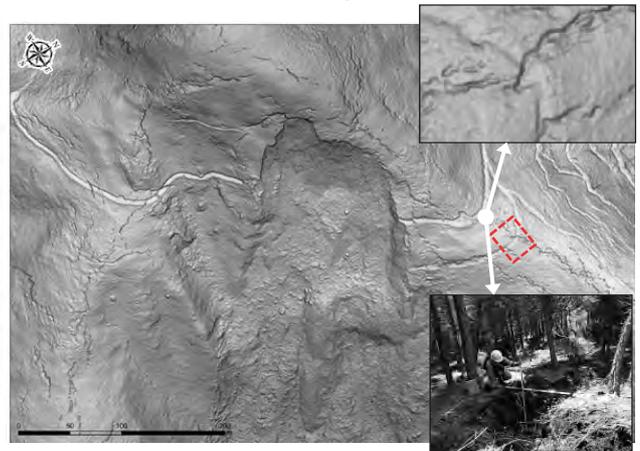


図-4 崩壊斜面周辺状況 (ELSAMAP で作成)

図-4 の ELSAMAP は斜面崩壊直後の地表面の状況が良く反映されており頂部や尾根に伸びる亀裂の発生状況、既存道路や水路施設、6月の豪雨で拡大したガリーや崩壊斜面の凸凹な表層状況が視覚的に確認できる。図-5 は UAV 計測から作成された時系列の ELSAMAP で頭部ラウンディング(斜面安定化施工)による崖状地形の整形、土留盛土工の施工進捗状況が把握できる。また UAV 斜め撮影(図-16 参照)からは垂直写真では見えない崖地形の 3D 画像による再現など活用を行った。

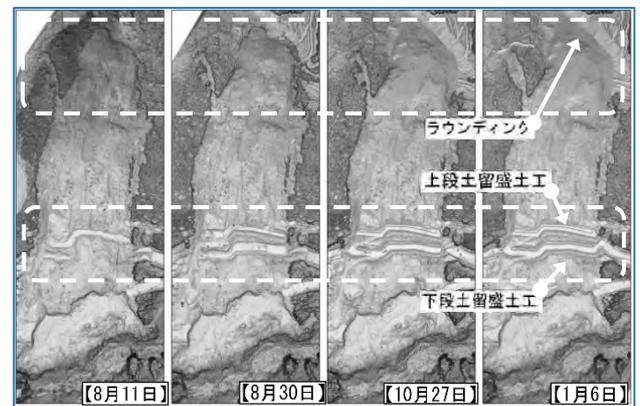


図-5 UAV計測から作成した4時期のELSAMAP

## 2.4 UAV 計測の概要

UAV 空中写真計測は、初回計測(2016年6月26日)～最終計測(2017年1月6日)計6回(図-6 参照)実施し、2017年6月2日に補足のUAV 計測を実施している。今回のUAV 計測では、一般的な垂直写真での撮影以外に、第2回計測以降、斜面頭部のオーバーハングや浮石の状況把握を目的とした、斜め写真撮影(カメラ設置角度を45度程度に設定)も実施した。これらの計測に用いた計測機器を写真1に、計測したセンサー諸元仕様を表-3に整理した。

表-3 UAV計測の仕様上の基本性能

ハードウェア性能	
UAV : エンルート社製 Zion QC730	最大飛行時間30~40分 最大積載量2.5kg
カメラ : ソニー社製α 6000	撮像素子 APS-C : 23.5cm × 15.6cm 撮影画質 6000 × 4000pixel
カメラ (飛行モニタリ ング・動画)	GoPro社製 Hero3 : 撮影画質4K (3840×2160pixel)
ソフトウェア	
画像解析Pix4D社製	Pix4D Mapper Pro
地形解析Esri社製	Arc GIS 10.3



図-6 UAV計測時期と斜面安定化施工対象施設

図-6は、UAV 計測時とGCP配置の概要、対策工事の実施状況やガリー拡大の因子を時系列で示した。

写真-1は、UAV 計測に使用した機器で、安全運航に必要な撮影時のモニター画面(画像・電圧確認)で、撮影時の機材モニタリング等に使用した。



写真-1 使用機器(現地 UAV 計測機材配置状況)

なお、GCP 第2次設置以降レーザ計測とUAV 計測データの接合性については、詳細設計に対応可能

な数値レベル500~1000程度を目安とした。

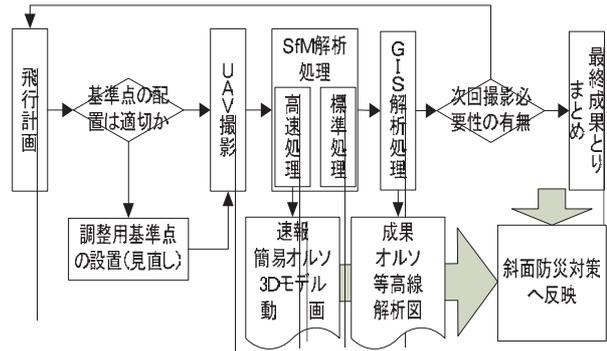


図-7 UAV計測および画像解析フロー

## 3. 3次元地形データ活用事例と計測精度

### 3.1 航空レーザ計測の活用と精度検証

図-1に示した調整用基準点において実施された平坦な道路上での点検は、標高値の平均値1.2cm、最大値1.0cm、最小値-3.0cm、標準偏差1.1cmと標高精度は前述した±15cmと比較して高い精度で取得されているが、図-2に示した崩壊斜面頂部に接続する工事用道路設計地点では、図-3で確認できるように樹高20m程度の杉林(下草が繁茂)か熊笹の密集している状況であったことから、波形記録式を用いることでパルス法よりの確に地盤面を捉える解析手法を採用した。



写真-2 頭部工事用道路中心線計画オルソ

航空レーザ計測(波形記録式)により作成された各種3次元地形モデル(グランドデータから作成された1mコンター図, DEM, TIN)による縦横断面図が設計・施工で使用可能か実測を行った約1km区間(85地点)で縦断標高との比較検証を行いその結果を表-4に整理し、標高較差の分布状況を図-8に示した。なお、1mコンターは30cmDEMをもとに作成されている。

表-4 3次元地形データの精度検証表

標高較差比較(m)	実測値- 1mコンター	実測値- 50cmDEM	実測値- 50cmTINDEM	実測値- Ground_TIN	実測値- 1mDEM
最大較差	0.620	0.697	0.288	0.204	0.279
最小較差	-0.640	-0.564	-0.569	-0.636	-1.071
平均値	0.002	-0.014	-0.015	-0.008	-0.343
標準偏差	0.174	0.197	0.138	0.108	0.258

図-8 から実測値と 3 次元地形データの標高較差は、60cm 程度の最大較差が発生しているが、全体的に ±10cm 程度に収まっている。検証地の斜面勾配が約 30° ~ 40° で図-3 や写真-2 に示した植生状況下であったにも関わらず航空レーザ計測の Ground TIN で作成された縦断標高は、実測に近い標高値が取得された。なお 1mDEM については、平均値や最大較差、標準偏差で差分が拡大し、施工図として使用する場合誤差が大きすぎる。

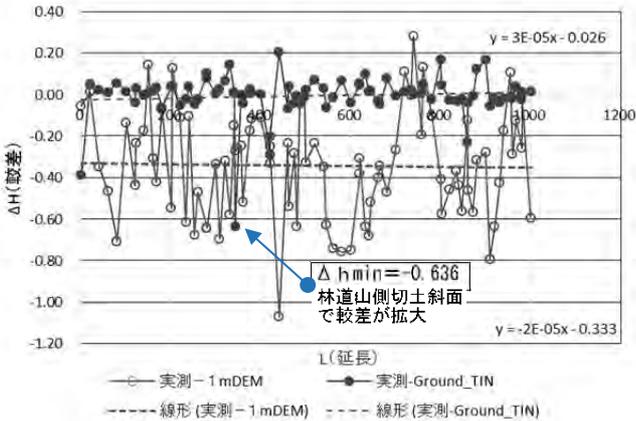


図-8 実測と3次元地形データ標高格差分布

### 3.2 UAV 写真測量の精度に関する検証事例

UAV 精度は、GCP (Ground Control Point) の配置および GPS 精度、機体特性による強風などの影響を受けやすい。当該箇所においては地形上の制約から斜面中腹に GCP が不足する対策として上段土留盛土工の完成後、UAV マニュアルに準じた内部検証点および内部標定点 (以下内部 GCP) を図-9 中央部に無人化施工機で運搬・設置し、外部の 2 級基準点から TS 測量により座標値を取得し、UAV 計測の精度向上と検証を実施した。

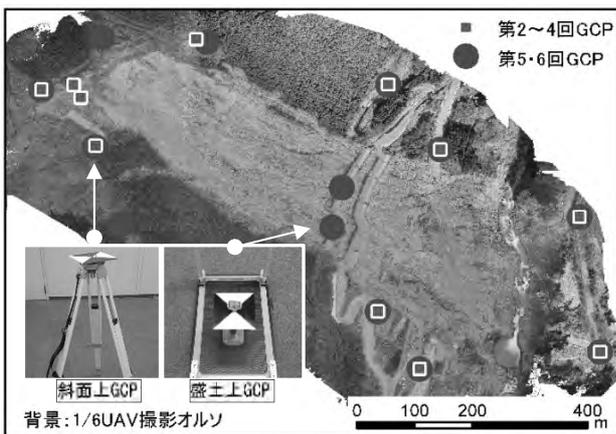


図-9 UAV計測期間とGCP2次~3次の配置図状況

UAV 計測における標高データの精度検証は、土留盛土工に設置した内部 GCP を SfM (Structure from Motion) 解析に使用・未使用の 2 ケースで実施し、その結果を図-10, 11 の点群標高分布図で示した。

内部 GCP を使用しない場合 (図-10) 標定点付近

での点群標高分布は、ターゲット・台座部・地表面で 30~11cm の範囲で実測標高と点群の平均標高との較差が生じた。また、ターゲット上部で実測標高と点群の標高較差が拡大したのは、ターゲットが板状で地表約 40cm の高さに設置した影響と想定されたことから、今期の UAV 計測では、台座上に直接ターゲットを設置する計画とした。

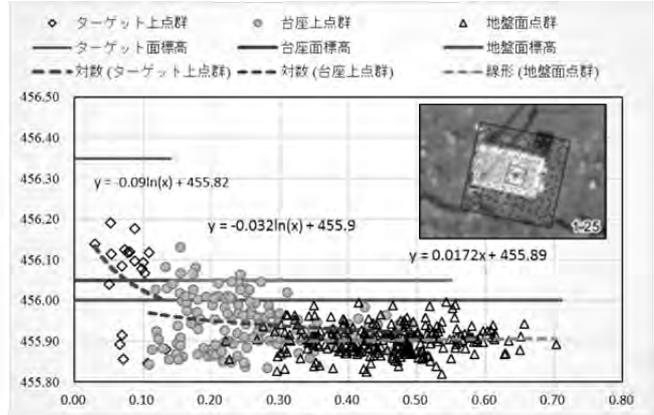


図-10 標定点付近の点群分布状況 (内部GCPなし)

内部 GCP を用いた点群分布は、前述のターゲット形状の影響はあるが、台座や地表面で平均較差が 2cm 以内となり十分な効果が得られた。

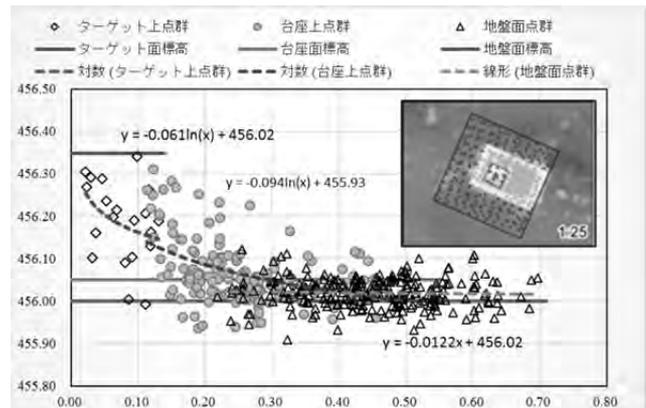


図-11 標定点付近の点群分布状況 (内部GCP有り)

表-5には、図-10, 11で示された点群データの平均値と実測値の較差をGCP使用・未使用2ケースの各部で算出した結果を示した。なお、2017年6月2日に実施した補足のUAV計測では、課題で有ったGCPターゲットの位置を下げて実施したことから全方向 (x, y, z) で実測値との較差5cm以内となる結果が得られた。

表-5 標定点付近点群データの標高較差 (大分側)

内部GCP_検証箇所	点群 標高較差				
	最大値	最小値	平均値	標準偏差	
GCP未使用	ターゲット	0.502	0.158	0.298	0.112
	ターゲット台座	0.215	-0.082	0.106	0.061
	土留盛土天端	0.181	0.004	0.097	0.034
GCP使用	ターゲット	0.356	0.007	0.161	0.096
	ターゲット台座	0.114	-0.261	-0.016	0.075
	土留盛土天端	0.091	-0.121	-0.019	0.035
較差 (UAV-VRS実測)		計測日	X	Y	Z
下段土留盛土工中央		2017/6/2	-0.003	0.028	-0.044

### 3.3 航空レーザ及び UAV 計測の活用と較差検証

立入不可能な斜面安定化施工(ラウンディング)の進捗状況把握は、計画時に策定した測線(図-12)に基づき工事前後の航空レーザおよび UAV 計測の3次元地形モデルから作成した断面図(図-13)により、施工進捗状況把握と掘削土量算出を実施した。断面作成に使用した4時期計測データは、施工前の5月14日撮影航空レーザ計測、8月30日撮影 UAV 第4回計測(熊笹伐採後)、10月27日撮影 UAV 第5回計測(施工途中データ)、1月6日撮影 UAV 第6回計測(施工完了後)を使用し、比較検証は工事中央部側線 R-08 で実施した。

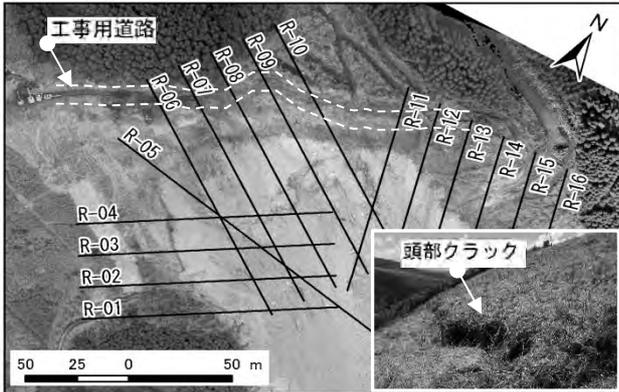


図-12 断面作成位置図

UAV 計測の2時期比較から、熊笹伐採後で工事用道路の影響を受けない横断標高(第4~5回 UAV 計測)データを用い L2 区間 30 地点で標高較差比較を表-6(頭部:③)に示した。比較の結果、2 断面の標高較差は平均値-2.2cm、標準偏差 6.9cm で地図情報レベル 500 以上と判断され、航空レーザと UAV 計測データの断面比較は、精度上問題ないことが確認できた。

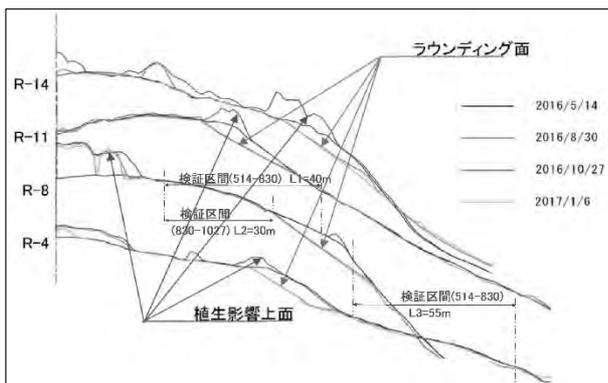


図-13 代表断面の4時期横断図

崩壊斜面頂部は、当初熊笹(図-3 参照)が密生した状態で、航空レーザ計測データが、熊笹密生区間の地表面を的確に捉えているか懸念された。熊笹伐採後の2時期 UAV 標高較差が小さかったことを踏まえ、航空レーザ計測と第4回 UAV 計測により作成した横断(1mDEM で作成)から、熊笹密集部の影響を検証する目的で設定した L2 区間、30 地点で標高

値の差分を検証した結果、標高較差の平均値 21.1cm、標準偏差 18.3cm となり、データ接合の目安として考えられる標準偏差 25cm 以下であった。

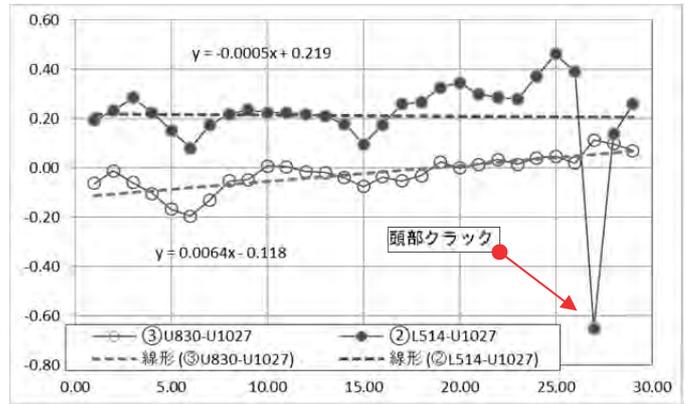


図-14 2時期横断標高格差分布状況

航空レーザと UAV 計測の標高格差は、表-6 頭部①②の2ケースで平均値が 20cm 程度で、図-14 の較差分布のバラツキが少ない。これら熊笹密集部では航空レーザの Ground データ標高値が約 20cm 高く取得された可能性があると思われる。

表-6 2時期横断標高較差一覧表

2時期横断標高較差		最大値	最小値	平均値	標準偏差
頭部	①: LP514-UAV830	0.415	-0.764	0.186	0.186
	②: LP514-UAV1027	0.461	-0.653	0.211	0.183
	③: UAV830-UAV1027	0.111	-0.196	-0.022	0.069
斜面	④: LP514-UAV830	0.560	-0.250	0.120	0.220

## 4. ガリー対策工に活用した地形データ特性

### 4.1 計測手法で特性の異なる3次元地形モデル

図-15 に示した熊本側斜面頭部のガリーは、8 月下旬の豪雨で拡大し落石発生の危険性が増加したことからガリー部の安定化施工を実施した。施工に必要な地形データは、航空レーザ及び UAV 計測の DEM から横断図(図-16) を作成した。

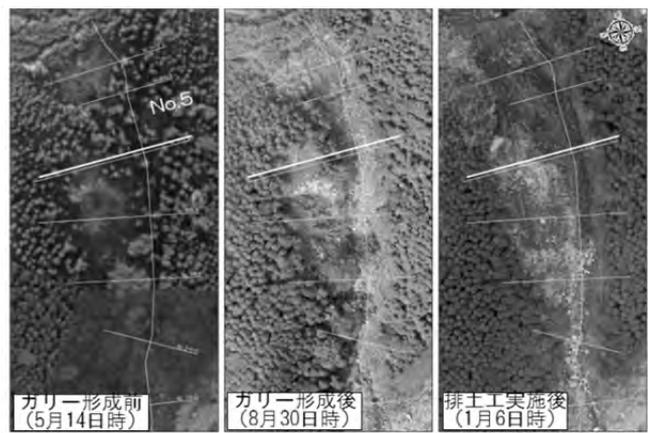


図-15 ガリー変遷状況(3時期オルソ図)

UAV 地形モデルは、裸地部以外は植生影響を受ける数値表層モデル(DSM: Digital Surface Model)であることから図-16 上段の横断に示したように裸地である崩壊部以外のデータを重ね合わせても差分解析は出来ない。

## 4.2 データ接合時の課題について

図-16 上段に3時期のDEMデータから作成したNO.5地点での重ね断面を示した。UAV計測データから作成された2時期断面は植生の影響が確認されるため、航空レーザ横断高さ以上となる矢印上面部は樹木部として削除した。

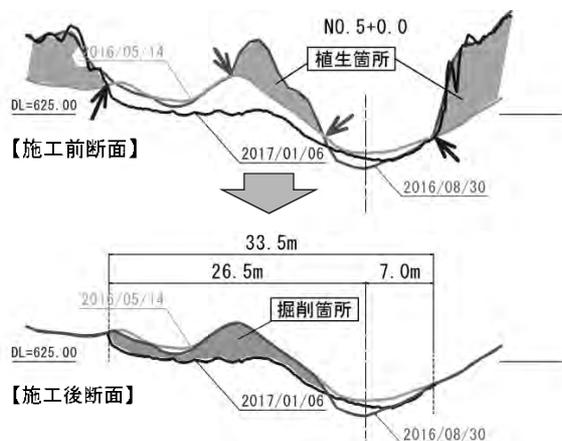


図-16 3時期ガリー代表横断面図

図-17はUAVで斜め撮影した写真を3Dモデル化したガリー対策施工前後2時期を、PCの画面上でガリー対策状況が解り易いアングルで切り取った画像に、図-16の下段NO.5断面を重ねて表示したもので、左図の中央及び端部において植生の影響を受けている状況が確認される。

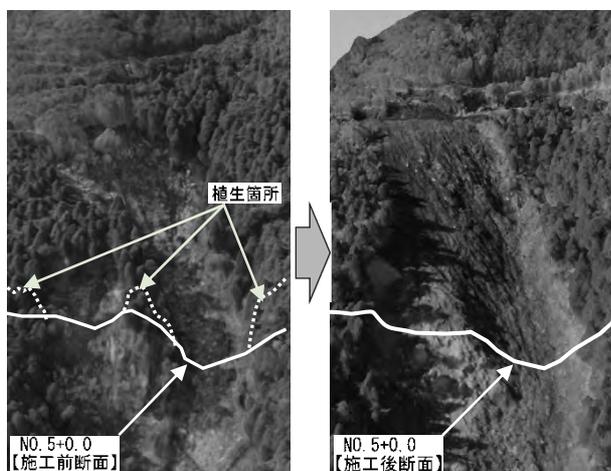


図-17 2時期 UAV 斜め撮影写真 3D モデル

これらの斜め写真3D画像は、市販の画像解析ソフトを用いて作成した。

## 5. まとめ

本論文では、大規模な崩壊斜面において航空レーザ計測及びUAV計測を6回(補足1回)実施し、ラウンディングおよびガリー等の対策施設検討に必要な地形データの精度検証を踏まえた活用など得られた知見を以下に整理した。

(1) 地図情報レベル500で撮影した航空レーザ計測は植生部(杉, 下草有り)の影響が小さく斜面安定化施工や工事用道路の設計施工の使用精度が十分

確保された。3次元地形モデルではDEM等メッシュサイズ50cm以下であれば、実測縦断1km区間の標高較差が平均値2cm以下、標準偏差は10cm~20cmオーダーで有ったことから、設計施工上で使用できる精度が確保されていた。同じ点群データを用いた1mDEMでは、標高較差の平均値が34.3cm、標準偏差25.8cmと設計に用いるには誤差が大きくなる。(2) UAV計測精度は、UAVマニュアルに準じてGCPを配置したケースにおいて、GCP設置高や形状に起因した標高精度への影響が確認された。GCP位置を地表面付近に設置したケースでは、全方向(x, y, z)で実測値との較差5cm以内で計測された。(3) 斜面頭部の密集した熊笹部において、地図情報レベル500の航空レーザ計測と熊笹伐採後のUAV計測3次元地形モデルによる標高較差は、約20cm程度あることが確認された。(4) UAV計測による3D地形モデルは、測量成果としての活用以外に、現地調査不可能な立入禁止区域の状況確認や位置情報の把握などが可能で、斜め撮影による3D地形モデルでは、オーバーハング部やガリー内部の地形把握も確認できた。

## 謝辞

阿蘇大橋地区復旧技術検討会(委員長北園芳人, 熊本大学名誉教授)ならびに阿蘇大橋地区斜面防災対策施工検討委員会(委員長笹原克夫, 高知大学大学院教授)の委員の皆様にはご指導・ご助言を頂きました。またエンルート(株), アミューズワンセルフ(株)にはUAV計測にてご協力を頂きました。この場を借りて厚く御礼を申し上げます。

## 参考文献

- 1) 国土交通省九州地方整備局熊本地震情報, 阿蘇大橋地区復旧技術検討会資料(概要版), 公開サイト  
[http://www.qsr.mlit.go.jp/n-topics/h28/160520/data/shiry\\_ou3](http://www.qsr.mlit.go.jp/n-topics/h28/160520/data/shiry_ou3)
- 2) 向山栄・佐藤匠・高見智之・西村智博: 日本応用地質学会、熊本・大分地震災害調査団 調査報告速報版 その2、2時期の航空レーザ測量地形データ解析による平成28年
- 3) 小野寺・堀川・島田他: 砂防学会、阿蘇大橋地区斜面防災対策工事の取り組み(その3), pp306~307, 2017
- 4) 国土交通省中部地方整備局(建設ICT導入普及研究会): ICTバックホウの情報化施工管理要領(案)  
<http://www.cbr.mlit.go.jp/kensetsu-ict/ict-proposal.html>
- 5) 政野敦・堀川毅信・島田英司他: 応用測量論文集、航空レーザ測量及びUAVを併用した斜面災害対応の活用事例 JAST Vol.28, pp149~158, 2017
- 6) 国土地理院(2016): UAVによる公共測量, 公開サイト, <http://psgsv2.gsi.go.jp/koukyou/public/uav/>
- 7) 国際航業ホームページ【速報】平成28年(2016年)熊本地震2016年4月 ELSAMAP 阿蘇大橋, 公開サイト  
[http://www.kkc.co.jp/service/bousai/csr/disaster/201604\\_kumamoto/](http://www.kkc.co.jp/service/bousai/csr/disaster/201604_kumamoto/)

## 5. 大型風車組立リフトアップ装置の開発

株式会社大林組 ○江副 誉典  
三輪 敏明  
中島 康弘

### 1. はじめに

近年注目されている再生可能エネルギーを利用した発電事業の一つとして、風力発電事業がある。風力発電については、発電効率を高めるために大型発電機の採用が進んできており、それに伴って風車自体も大型化している。大型化には上空の強い風を捉えられるという利点があるが、資材運搬や施工条件の制約などもあり、現在国内陸上用では高さが90m程度である発電容量3MWクラスの風車が最大となっている。

風車は複数に分割されたタワーと呼ばれる塔体、発電設備が搭載されているナセル、風を受ける3枚のブレードとブレードの軸にあたるハブにより構成されている。また、ハブとブレードが一体でローターと呼ばれている。

風車の建設には複数の施工方法があるが、ローターを地面で水平に組立て、建て起こしながらナセルへ接合していく地組工法や、ハブとブレードをそれぞれ直接ナセルへ取付けていくシングルブレード工法が一般的である。いずれの工法でも風車建設には、部材の組立てに超大型クレーンが必要となり、かつ広大な施工ヤードが必要になることが課題であった。

また、風車部材をリフトアップ方式で組立てる工法は存在していたが、ローター取付け工程において、地組みや建て起こしの為に従来工法と同じく超大型クレーンや広大な施工ヤードが必要であった。

これらの背景から、既存のリフトアップ方式で組立てる装置に新たにローターの建て起こし機能を備えた装置「ウインドリフト」の開発に至った。

今回実際に秋田県三種町の三種浜田風力発電所建設において本装置を使用し、施工したので、その成果を報告する。

### 2. リフトアップ方式による施工方法の概要

既存のリフトアップ方式による組立装置を使用しての施工方法を説明する。まず分割された風車タワーのうち、1本目のタワーをクレーンで据え付けた後、タワーの周囲に支柱、クライミング装置、前後に移動する門形フレームを取り付ける。写真-1に装置概要を示す。



写真-1 ウインドリフト装置概要

次に2本目のタワーをクレーンにて、門型フレームに吊り下げる。クライミング装置が上昇し、所定の位置で門形フレームが接合位置に移動しボトムタワーと接合する。3本目以降のタワー、ナセルも同様の組立を行う。

支柱を継ぎ足す際は、地上まで下げたクライミング装置の油圧ジャッキで、支柱群を一体で持ち上げて空間を造り、新たな支柱群を挿入する。この作業を繰り返し所定の高さまで本装置をせり上げる。

次工程でローターを地上で地組みし、クレーンを用いてナセル付近の高さまで揚重し、門形フレームに吊り変えてからナセルへ取付け、風車完成後に装置の解体を行っていた。

### 3. ウインドリフトの開発

今回開発したウインドリフトは、既存のリフトアップ方式で組立てる工法の課題を克服するために、以下の機構を追備したものである。ナセル取付けまでは既存のリフトアップ方式による施工方法と同様である。今回実施した一連の施工ステップを図-1に示す。



図-1 施工ステップ

今回はローター地組することなく、クライミング装置上で水平状態のまま組立てることとした。立木などの障害物をかわす地上10m程度で組立てることにより、地組用の施工ヤードの伐採や造成が不要となり最小限の施工ヤードで工事を行うことを可能とした。

ローター組立て後は、クライミング装置による上昇とともに、門形フレーム上に設置したリフターの動力によってローターを徐々に垂直に建て起こす。所定の高さに達した後、門形フレームの水平移動によりナセルへ接合する。これにより超大型クレーンを使用することなく建て起こしが可能となった。図-2にローター建て起こし装置を示す。

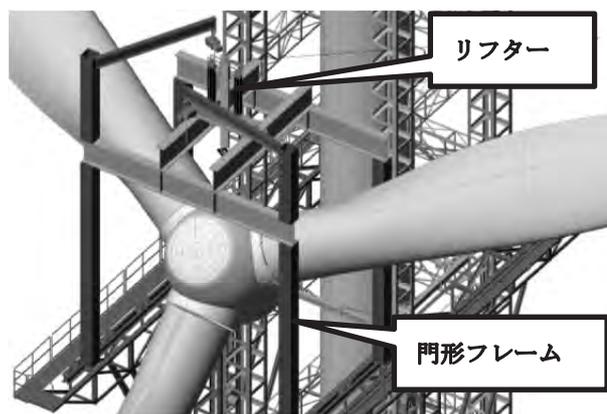


図-2 ローター建て起こし装置

実施工に先立ち、建て起こし時の軌道確認およびブレードと本装置の干渉確認を目的とした実証実験を行った。実証実験では門形フレームとローター簡易模型を同尺度で再現し、地組み後から垂直に建て起こす過程の確認を行った。写真-2に実証実験状況を示す。

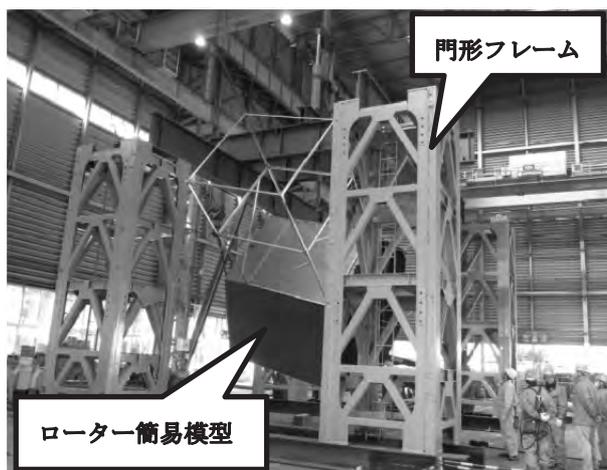


写真-2 実証実験状況

実証実験の結果、ブレードと本装置の干渉が無

いことや建て起し時の軌道が確認でき、実施工での注意箇所の把握につながった。

実施工では突発的な強風下も想定されるため、風による荷振れ時のブレードと本装置接触予防策として、ブレードの根元にスリングを使用して固縛処置を設置する対策を行ったため、荷振れ時の制御も安易であった。図-3 にローター荷振れ対策を示す。

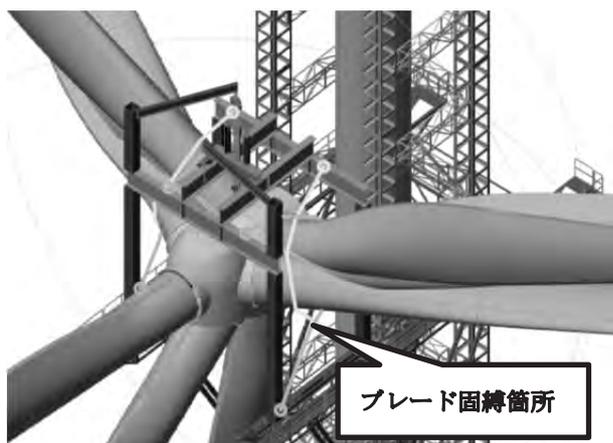


図-3 ローター荷振れ対策

#### 4. 施工成果

ウインドリフトを用いて建設を行った三種浜田風力発電所の工事概要および成果を以下にまとめる。工事概要を表-1 に示す。

表-1 工事概要

工事名称	三種浜田風力発電所 建設工事
風車建設基数	3基
1基当りの定格出力	1,990kW
ローター直径	92.5m
ローター中心高さ	78m

風車組立用の揚重機は、従来工法では 600 t 吊クレーン相当が必要なのに対し、ウインドリフト工法では 200 t 吊クレーンと大幅なサイズダウン

が可能となった。

施工スペースに関しては、超大型クレーンによる占有面積が減少したこと、ローターの地組みスペースが不要となることにより、従来工法では 3,600 m<sup>2</sup> 必要であった施工スペースがウインドリフト工法では 2,500 m<sup>2</sup> で施工できた。図-4 に風車建設施工ヤード比較図を示す。

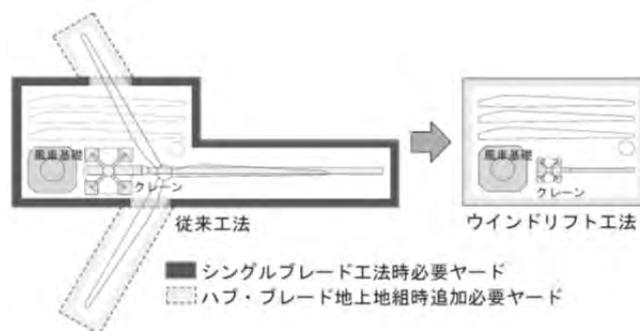


図-4 風車建設施工ヤード比較

風車部材のリフトアップ中は、従来工法と異なりクレーンを占有しないため、風車部材の現場受入れ用にクレーンを充てることができ、風車建設の進捗に関係なく部材輸送・受入を可能とした。

これにより、風車部材の港保管期間が従来工法で 75 日必要なところ、ウインドリフト工法では 36 日となり、50% 程度の低減を実現した。写真-3 に風車部材仮置状況を示す。



写真-3 風車部材仮置状況

また、従来工法では、超大型クレーンを使用し

て高所へ風車部材を吊り上げた状態のままでの取付け作業となる。そのため、風の影響により工程が大きく左右されていた。具体的にはタワー、ナセル取り付け時に瞬間風速 9m/秒以下で、ローター取付け時に 6m/秒以下を目安に作業を行っていた。実際にウインドリフト工法では、タワー、ナセル取付け時は最大で 13m/秒、ローター取付け時は最大で 8m/秒の突風が吹いたが、荷振れもなく安定して取り付けることができた。

ローター径が 92.5m に対して比較的強風下においても風の影響を受けにくく、安定した工程のもと施工可能であることが証明できた。図-5 および図-6 にウインドリフトによる作業時風速を示す。

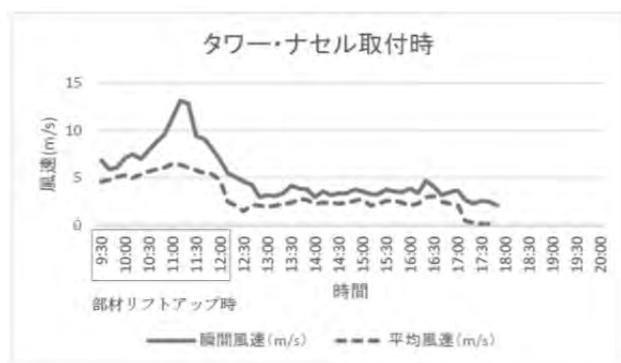


図-5 作業時風速（タワー、ナセル）



図-6 作業時風速（ローター）

立木の伐採や造成などの準備工事を減らすことができること、超大型クレーンが不要であること、風車組立工程と港保管期間を短縮できることから、最終的に従来工法と比べて 10%程度のコスト低減を実現した。表-2 に工法比較表を示す。

表-2 工法比較表

項目	ウインドリフト工法	従来工法
建設コスト	0.9	1
施工ヤード	0.7 (約2500㎡)	1 (約3600㎡)
工程 (1基)	12日 (実績値)	12.5日 (風況リスク含む)
風車部材 保管・輸送期間	36日 (実績値)	75日

## 5. おわりに

大型風車の組立てにおいて、超大型クレーンを必要とせず最小限の施工ヤードでの工事が可能なウインドリフトを開発したことにより、建設コストの削減を実現した。

建設コスト削減効果は、3MW クラス以上の風車など発電容量が大きくなると、より顕著となる。また、より良い風況下で発電可能なハイタワー風車では、超大型クレーンでも所定の高さに届かず建設できないケースが想定される。

今後は、3MW クラスから 4MW クラスおよびローター径 100m から 120m 相当の大型風車や、ハイタワーの風車への適用を目指し、ウインドリフトの改良を行っていく予定である。

## 6. 現場製作のコンクリートブロックを用いた i-Construction

### －護岸・床固工を具体例とした生産性に関する評価－

技研興業株式会社  
技研興業株式会社

大井 邦昭  
○ 三浦 拓磨

#### 1. はじめに

近年、我が国では少子高齢化等に伴う生産年齢人口の減少が懸念されている。今後、建設分野においても技能労働者の不足により生産性の低下が生じる可能性がある。このような背景をうけ、国土交通省は、2016年度より、建設現場の生産性向上に向けた新しい取り組みであるi-Constructionを進めている<sup>1)</sup>。

i-Constructionには、①ICT技術の全面的な活用、②規格の標準化、③施工時期の平準化、の具体的な取り組みが示されており、建機メーカーを中心に技術開発が行われている<sup>2)</sup>。一方、従来工法でも、同一の機能を有する異なる工法が存在する場合の生産性の定量的な評価はあまり行われていない。

本論文では、同一の機能を有する、異なる2種類の構造（工法）を対象として、工事費用のみならず作業員数や施工期間等を算出し、それぞれの構造（工法）の生産性を評価・比較するものである。具体的には、近年、ゲリラ豪雨等の短時間強雨による被害を多く受けている河川構造物のうち、

対策工として重要な位置づけにある「護岸工」と「床固工」を対象として生産性の評価を行う。

「護岸工」と「床固工」はいずれも従来は現場打ちコンクリートを用いた重力式（以下、現場打ち重量式）が多く採用されているが、工事現場で製作したコンクリートブロック（以下、ブロック）を用いる自立式残存型枠（以下、残存型枠式）やブロック積式があり、本論文ではこれらの構造を対象として生産性の比較を行う（写真-1、-2参照）。

#### 2. 検討概要

護岸工・床固工のいずれの検討も、現場打ち重量式とブロックを用いる構造の比較とする。ブロックを用いる構造は、護岸工の検討では残存型枠式、床固工の検討ではブロック積式を対象とする。

図-1、図-2に比較対象とした各構造の標準断面図を示す。比較する構造は機能を同一とするため、直高等の条件を概ね同等としている。その他の検討条件を表-1に一括して示す。ブロックの形状は各構造で用いられることがある一般的な製品で、護岸工で用いるものをAブロック、床固工で用いるものをBブロックとする（写真-3参照）。

生産性評価の具体的な照査項目は、①作業員数、②施工期間、③工費、④建設機械（4. 床固工のみ）とする。①の作業員数はブロックを現場近接で製作する場合を想定している。②の施工期間は②-1として「ブロック製作期間を含む場合」と、②-2として「ブロック製作期間を含まない場合」に分けて評価する。②-2はi-Constructionの具体的な取り組みのひとつである“施工時期の平準化”を意識したもので、対象構造物の工事期間よりも前もってブロックを製作しておく場合を想定している。③の工費は詳細に評価するため、③-1として構造物本体工のみの工事費と、③-2として土工・仮設工等を含む全体工事費に分けて評価する。

なお、①作業員数は国土交通省土木工事積算基

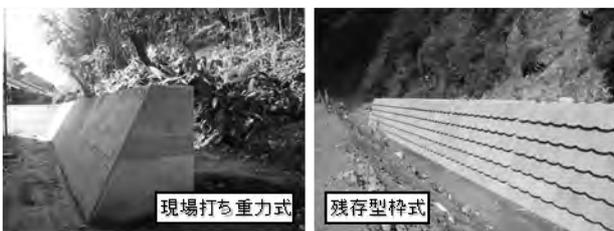


写真-1 護岸工



写真-2 床固工

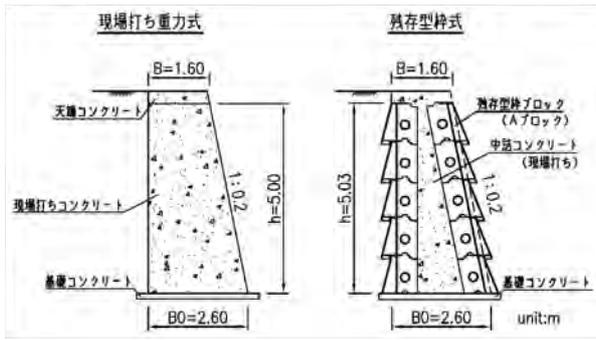


図-1 比較断面図（護岸工）

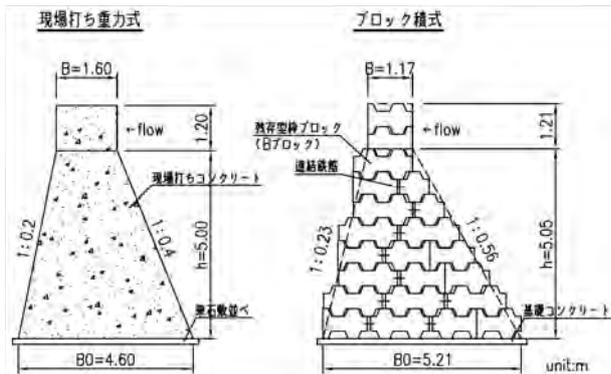


図-2 比較断面図（床固工）

表-1 検討条件

項目	護岸工		床固工	
	現場打ち重力式	残存型枠式	現場打ち重力式	ブロック積式
直高h (m)	5.00	5.03	5.00	5.05
天端幅B (m)	1.60	1.60	1.60	1.17
底面幅B <sub>0</sub> (m)	2.60	2.60	4.60	5.21
斜面勾配	1:0.2	1:0.2	1:0.2(下流側) 1:0.4(上流側)	1:0.23(下流側) 1:0.56(上流側)
施工延長L (m)	141.33	141.33	15.00	14.61
コンクリート体積V (m <sup>3</sup> )※1	1577.00	1165.00	328.00	12.33
基礎	基礎Co	基礎Co	栗石敷並べ	基礎Co
リフト高 (m) (打上げ回数)	1.50 (4)	1.00 (5)	1.00 (6)	-
型枠A (m <sup>2</sup> )※2	1743.00	181.00	351.40	-
使用ブロック (質量)	-	Aブロック (2t/個)	-	Bブロック (2t/個)
ブロック数 (個)	-	677	-	343
ブロック運搬距離 (km)	-	5.50	-	0.50
隔壁ブロック数 (個)	-	24	-	-

※1(護岸工) 現場打ち重力式(基礎Co・現場打ちCo) 残存型枠式(基礎Co・中詰Co)  
(床固工) 現場打ち重力式(現場打ちCo) ブロック積式(基礎Co)

※2(護岸工) 現場打ち重力式(基礎Co型枠・現場打ちCo型枠)  
残存型枠式(基礎Co型枠・天端Co型枠)  
(床固工) 現場打ち重力式(現場打ちCo)



写真-3 検討に使用したブロック

準<sup>3)</sup>に示される各工種の歩掛上の各作業員数を累計した。②施工期間は同書に示される各工種の標準作業量から算出・累計した。③工費の算出に必要な労務単価・資材単価<sup>4)</sup>は新潟県における平成28年6月単価を使用した。④建設機械は上記3)に示される各工種の歩掛上の各作業時の機械運転時間から算出・累計した。

なお、本論文における生産性の比較では、ブロックを用いた工法を主体として現場打ち重力式に対する生産性を評価する。

### 3. 護岸工における生産性評価

#### 3.1 ①作業員数

図-3は護岸工の現場打ち重力式と残存型枠式の護岸工本体工事の職種別作業員数を示す。各職種の合計工事作業員数は、残存型枠式が現場打ち重力式よりも約36%少ない625.6人となった。

各職種別では、土木一般世話役は、残存型枠式のブロック製作等で必要な作業員が増加する一方で、現場打ち重力式で必要な型枠設置・撤去等の作業員の減少の割合が高く、トータルで約16%減少する。普通作業員も同様の理由により、トータルで約19%減少する。特殊作業員は、現場打ち重力式におけるコンクリート打設時に必要な作業員よりも、残存型枠式のブロック製作等で必要な作業員の増加が上回り、トータルで約2倍増加する。型枠工は、残存型枠式については型枠設置・撤去、ケレンはく離剤塗布が不要であることから、トータルで約89%減少する。とび工については、Aブロックは積み重ねるだけで上下段のブロックが噛み合い、且つ、自立するものであるため、足場・支保工が不要であり、残存型枠式ではゼロとなる。特殊運転手は、現場打ち重力式におけるコンクリート打設時に必要な作業員よりも、残存型枠式のブロック据付に必要な作業員の増加が上回り、トータルで約8%増加する。普通運転手は、残存型枠式のみ必要となり、ブロック運搬で26.8人となる。

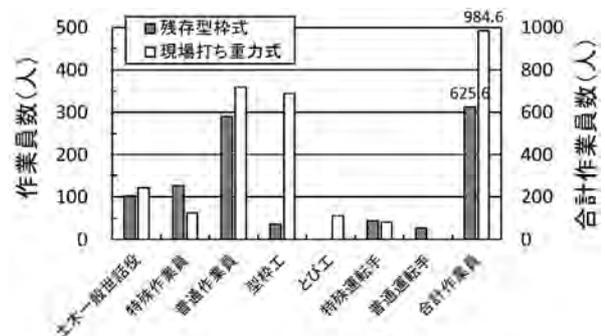


図-3 職種別作業員数（護岸工）

### 3.2 ②施工期間

表-2 は現場打ち重力式と残存型枠式の護岸工の施工日数を示す。表では②-1としてブロックの製作期間を含む場合と、②-2として含まない場合を区別して示す。また、それぞれの場合で護岸本体工事のみとした場合と、土工・仮設工等を含む全体工事とした場合を区別している。

表より、ブロックの製作期間を含む場合（②-1）、護岸工本体工事のみではほぼ同期間だが、全体工事では、残存型枠式では型枠や足場・支保工の設置・撤去等が必要ないため、約12%短くなる。ブロック製作期間を含まない場合（②-2）、本体工のみが約52%、全体工事では約29%短くなる。ブロック製作期間を含まない場合の評価では、ブロック製作期間の割合が大きい本体工のみの場合のほうが効果が大きい。

表-2 施工期間（護岸工）

		施工日数 (日)	比率 (%)*
②-1 ブロック製作期間を 含む場合	本体工のみ	現場打ち重力式	158.7
		残存型枠式	157.5
	全体	現場打ち重力式	559.9
		残存型枠式	494.7
②-2 ブロック製作期間を 含まない場合	本体工のみ	残存型枠式	76.5
	全体	残存型枠式	413.7

※現場打ち重力式の施工日数に対する百分率

### 3.3 ③工費

表-3 は現場打ち重力式と残存型枠式の護岸工の直接工事費を示す。表では、③-1として護岸本体工のみの場合と、③-2として土工・仮設工等を含む全体工事費を区別して示す。

護岸本体工のみの場合（③-1）、残存型枠式では、本体のブロックや隔壁ブロックの製作・運搬・据付が必要となり、やや割高となる。一方では、足場・支保工等の仮設工が不要のため、土工・仮設工を含む全体工事費（③-2）ではほぼ同等か、僅かに残存型枠式の方が安くなる。

なお、残存型枠式で仮設工が減る最も大きな要因は、水替工の排水ポンプ設置期間の低減であり、現場打ち重力式よりも約39%短い期間でよい。

表-3 直接工事費（護岸工）

		工事費 (千円)	比率 (%)*
③-1 本体工のみ	現場打ち重力式	48,230	-
	残存型枠式	50,126	104
③-2 全体	現場打ち重力式	77,268	-
	残存型枠式	76,309	99

※現場打ち重力式に対する百分率

## 4. 床固工における生産性評価

### 4.1 ①作業員数

図-4 は床固工の現場打ち重力式とブロック積式の床固工本体工事の職種別作業員数を示す。各職種の合計工事作業員数は、ブロック積式が現場打ち重力式よりも約13%少ない179.1人となった。

各職種別では、土木一般世話役は、断面当たりの使用ブロック数が多いため、現場打ち重力式で必要な型枠設置・撤去等の作業員の減少よりも、ブロックの製作等で必要な作業員の増加が上回り、トータルで約28%増加する。また、普通作業員については、Bブロックは積み重ねるだけで上下段のブロックが噛み合い一体性を保つが、床固工本体の補強として写真-4に示すようにブロック同士を連結することとしたため、トータルで約15%増加する。その他の職種での傾向は3. 護岸工とほぼ同様の傾向であり、特殊作業員では約2.5倍の増加、型枠工では約98%の減少、とび工はゼロ、特殊運転手は約91%の増加、普通運転手は10.6人となる。

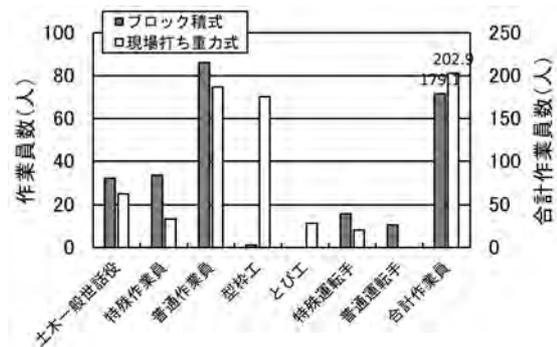


図-4 職種別作業員数（床固工）



写真-4 ブロック連結作業

### 4.2 ②施工期間

表-4 は現場打ち重力式とブロック積式の床固工の施工日数を示す。表では3. 護岸工と同様にブロックの製作期間の有無と対象範囲（本体のみ、または全体）を区別して示す。

（②-1）の床固工本体工のみの場合、足場・支保工等の仮設工、コンクリート打設及び養生期間が不要であるが、ブロック製作に伴う期間が約50日必要であるため、トータルで約2倍の施工期

表-4 施工期間（床固工）

		施工日数 (日)	比率 (%)*
②-1 ブロック製作期間を 含む場合	本体工のみ	現場打ち重力式	30.4
		ブロック積式	60.8
	全体	現場打ち重力式	135.1
		ブロック積式	133.2
②-2 ブロック製作期間を 含まない場合	本体工のみ	ブロック積式	24.7
	全体	ブロック積式	97.1

※現場打ち重力式の施工日数に対する百分率

間が必要となる。ただし、全体工事期間ではほぼ同等となる。また、ブロック製作を含まない場合（②-2）は、3. 護岸工と同様に有意に施工期間を短縮することができる。

#### 4.3 ③工費

表-5 は現場打ち重力式とブロック積式の床固工の直接工事費を示す。表では、③-1として床固本体工のみの場合と、③-2として土工・仮設工等を含む全体工事費を区別して示す。

3. 護岸工と同様に、本体のみの場合（③-1）は、ブロックの製作・運搬・据付が必要となることに加え、ブロック同士を連結することとしたため、やや割高となる。一方、土工・仮設工を含む全体工事費（③-2）では、ブロック積式では、足場・支保工等の仮設工を必要としないため、ほぼ同等か、僅かにブロック積式の方が安くなる。

表-5 直接工事費（床固工）

		工事費 (千円)	比率 (%)*
③-1 本体工のみ	現場打ち重力式	9,990	-
	ブロック積式	11,244	112
③-2 全体	現場打ち重力式	15,684	-
	ブロック積式	15,286	97

※現場打ち重力式に対する百分率

#### 4.4 ④建設機械

表-6 は現場打ち重力式とブロック積式の床固工の建設機械使用日数を示す（範囲は床固工本体に土工・仮設工等を加えた全体工事）。

表より、建設機械ごとの合計では、ブロック積式のほうが約5.4倍増加するが、4.1に示すように、作業員数は減少する。すなわち、ブロックを用いる工法では、建設機械が行う作業の割合が多くな

表-6 建設機械使用日数（床固工）

		使用日数 (日)	比率 (%)*
現場打ち重力式	コンクリートポンプ車	8.2	-
	コンクリートポンプ車	0.3	541
ブロック積式	ラフテレーンクレーン	31.5	
	トラック	12.6	

※現場打ち重力式に対する百分率

った結果、生産性が向上（＝作業員数が減少）するものと考えられる。

#### 5. まとめ

本論文では、護岸工と床固工を具体例として、同一の機能を有する異なる構造（工法）の生産性を作業員数・施工期間・工事費・建設機械に着目して定量的に評価した。

その結果、工事現場で製作したブロックを用いた工法は、現場打ちコンクリートを用いた重力式構造よりも作業員数・施工期間ともに有意に低減することがわかった。これは、ブロックを用いる場合、特に高度な技術を必要とする「型枠工」「とび工」の大幅な低減が図れ、また、これらの工種の低減により、資材の調達や搬入が簡素化され、施工期間も短くなることによる。

一方、工事費は護岸工・床固工ともに、本体工のみの工事費はブロックのほうがやや高くなるが、土工・仮設工等を含む全体工事費では両者はほぼ同等か、ブロックが僅かに安くなる。

また、付加的な評価として、i-Constructionの取り組みのひとつである“施工時期の平準化”に基づき、工事期間よりも前もってブロックを製作しておく場合を想定して評価を行うと、施工期間がさらに低減できることがわかった。

したがって、ブロックを用いた工法は、現場打ちコンクリートを用いた重力式工法と比較して、同一の機能・工費であるものの、作業員や施工期間が少ない“生産性の高い”工法であると評価できる。このような評価はICT技術を利用した建設機械等と同様、i-Constructionの目標である“生産性の向上”に寄与できる手法であると考えられる。

ただし、一般的に生産性は施工規模と密接に関連しており、特に施工規模が小さい場合はブロックを用いた工法は生産性（現場打ち重力式と比較した場合の作業員数・施工期間）向上の効果が小さい傾向にある。本研究で行った評価を普及できる技術とするためには、施工規模と生産性の関係性をさらに明らかにしていく必要がある。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省（2016）「建設施工・建設機械」、  
<<http://www.mlit.go.jp>>
- 2) 平伴齊・山口和哉・岸寛人：水中作業におけるコンクリートブロック据付支援システムの開発、平成27年度、「建設施工と建設機械シンポジウム」論文集・梗概集、pp.151-154、2016。
- 3) 一般財団法人建設物価調査会発行、国土交通省土木工事積算基準、平成22年度版・平成28年度版
- 4) 一般財団法人建設物価調査会発行、建設物価、平成28年6月号

## 7. MC モータグレーダ導入による効果について

(国研)土木研究所  
(国研)土木研究所  
(国研)土木研究所

○ 橋本 毅  
梶田 洋規  
藤野 健一

### 1. はじめに

国土交通省では平成28年4月より新たな施策である「i-Construction」を開始し、その中で ICT 技術の全面的な活用を進めることによる建設現場の生産性向上を図っている。建設現場で使用される ICT 技術の一つにマシンコントロール（以下 MC）があるが、これは TS や GNSS などを用いて施工機械の位置を把握し、その位置における設計値（あらかじめ入力された設計データ）と作業装置（ブレードなど）との差を算出し、作業装置が設計値に添うよう自動的にリアルタイムで制御を行う技術のことであり、オペレータの負担を軽減することによる施工の効率化や高精度化などが期待されている。しかしながら、その導入効果を試験ピットなどにおける実験などにて定量的に把握した例は少なく、施工条件等を調整した基礎実験による、効果の定量的な把握が、さらなる普及を促進する上で必要とされている。

筆者らは昨年（2015年）、MC 施工の優位性を定量的に明らかにすることを目的とし、6名のオペレータとモータグレーダを用い施工条件を同一にした2つの試験場にて従来施工と MC 施工の比較実験を行った。その結果、MC 施工を用いると作業時間の短縮、出来形バラツキの改善が図れ、その効果は非熟練オペレータの方が熟練オペレータより高いことなどがわかった。しかし昨年の結果では、平坦性に関しては MC 施工による明確な効果は見いだせなかった。また、MC 施工がオペレータへ及ぼす影響については定量的な検証は実施していなかった。そこで本年（2016年）は、昨年と同様な実験を行い、作業時間、出来形バラツキに対する MC 施工導入効果の再検証を行うとともに、平坦性に対する効果についても再度検討を行った。また、MC 施工がオペレータへ及ぼす影響を調査するために、心拍数計測装置および視線計測装置をオペレータに装着して実験を行った。

なお、本研究は土木研究所と民間企業5社（鹿島建設、鹿島道路、トプコンソキアポジショニングジャパン、西尾レントオール、NIPPO）による共同研究にて行った。

### 2. 実験概要

#### 2.1 実験概要

実験は昨年（2015年）と同様に行った。以下概要を述べる。

幅6m、全長70m（直線部45m、曲線部25m）の路床を2レーン用意し、その路床上に厚さ30cmになるよう路盤材料（M40）をモータグレーダにて敷き均す実験を行った。モータグレーダは MC システムを搭載した機体を使用し、No.1レーンは MC を使用せずに（従来施工）、No.2レーンは MC を使用して（MC 施工）施工を行った。実験状況を図-1に示す。また実験は一般的な施工と同様に、直線部10mピッチ、曲線部5mピッチで設定した測点における仕上がり高さが、設計高さ（基準高さ）±1cm以内になった時点で終了とした。

#### 2.2 データ計測

実験結果として以下のデータを測定した。①～④は昨年も計測したものである。

- ① 施工開始から終了までにかかった時間
- ② 仕上がり高さ計測回数
- ③ 施工終了後、中央・右・左の3測線上1mピッチの仕上がり高さ（出来形）。TSにて計測（図-2）
- ④ 施工終了後、ローラにて締固めを行い、Fig. 2に示した左2.5m測線上の平坦性。3mプロファイルメータを用いて測定
- ⑤ 施工中のオペレータ心拍数。心拍数計測装置



図-1 実験状況

にて計測（EPSON 社製：SF-850）

- ⑥ 施工中のオペレータ視線. 視線計測装置にて計測（NAC 社製：EMR-9, 図-3）

## 2.3 オペレータ

表-1 に示す様々な経験を持ったオペレータにて実験を行った。なお、Bさん、Cさん、Dさん、Eさんの4名は2015年、2016年両方に参加したオペレータである。Aさんは2015年と2016年では両方とも熟練者であるが別人であるため、2015年ではA'さんとした。同様にFさんも両方非熟練者であるが別人であるため、2015年ではF'さんとした。Aさん、A'さん、Bさんは熟練者（経験15年以上）、Dさん、Eさん、Fさん、F'さんは非熟練者（経験10年未満）といえることができる。

## 3. 実験結果

### 3.1 施工時間

2015年と2016年の実作業時間データ（延べ12名）の、熟練者の平均、非熟練者の平均、全体の平均を図-4に示す。なお、実作業時間とは後進や計測作業などを含まない、敷均し作業のみの時間のことである。

図-4によると、オペレータの熟練度によらずMC施工を導入することにより実作業時間が短縮され、その短縮率は熟練者では10.0%、非熟練者

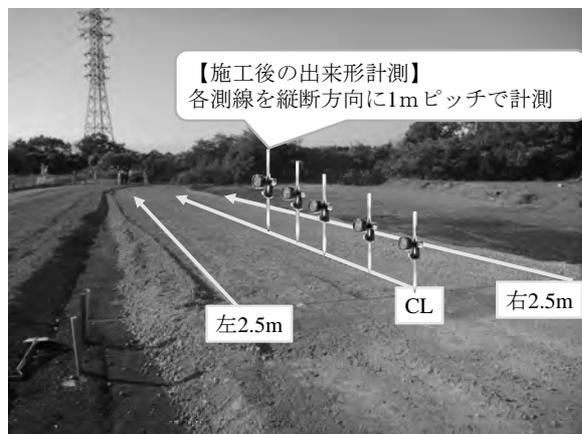


図-2 出来形計測状況



図-3 視線計測装置

では37.2%となっており、非熟練者の方がMC施工導入による作業時間短縮効果が高いことがわかる。さらに非熟練者にMC施工を導入した場合、ほぼ熟練者並みの実作業時間で施工できる可能性があることもわかる。

### 3.2 仕上がり高さ計測回数

2015年と2016年の仕上がり高さ計測回数（延べ12名）の、熟練者の平均、非熟練者の平均、全体の平均を図-5に示す。

図-5によると、オペレータの熟練度によらずMC施工を導入することにより仕上がり高さ計測回数が少なくなり、その短縮率は熟練者では

表-1 オペレータ

2015年			2016年		
	年齢	業務経験年数		年齢	業務経験年数
Aさん	52	33	Aさん	57	35
Bさん	36	16	Bさん	37	17
Cさん	33	10	Cさん	34	11
Dさん	30	8	Dさん	31	9
Eさん	23	5	Eさん	24	6
F'さん	22	1	Fさん	24	2

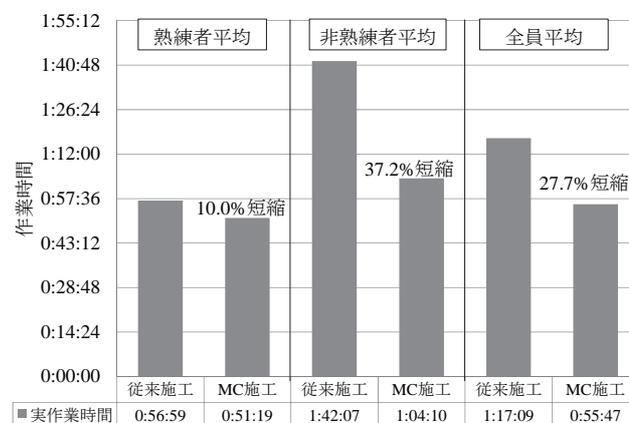


図-4 作業時間

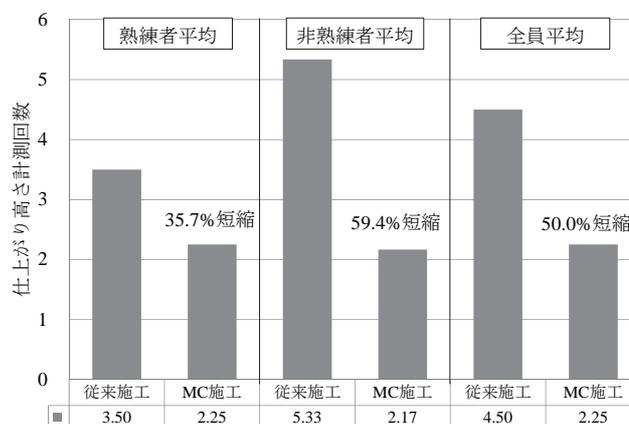


図-5 仕上がり高さ計測回数

35.7%，非熟練者では 59.4%となっており，非熟練者の方が MC 施工導入による仕上がり高さ計測回数短縮効果が高いことがわかる．さらに非熟練者に MC 施工を導入した場合，ほぼ熟練者並みの仕上がり高さ計測回数で施工できる可能性があることもわかる．

### 3.3 出来形バラツキ

2015 年と 2016 年の出来形データ（延べ 12 名）の度数分布図を図-6 に示す．なお，度数分布は設計値（目標高さ）からの乖離で表しており，標準偏差も示してある．

図-6 によると，MC 施工を導入することにより出来形バラツキが改善されることがわかる．そこで，熟練者，非熟練者，全体の標準偏差を図-7 に示す．

図-7 によると，オペレータの熟練度によらず MC 施工を導入することにより出来形バラツキが改善され，その改善率は熟練者では 20.6%，非熟練者では 50.9%となっており，非熟練者の方がその改善効果が高いことがわかる．さらに非熟練者に MC 施工を導入した場合，ほぼ熟練者並みの出来形バラツキで施工できる可能性があることもわかる．

また，実験は 2 章で述べたように，終了判定である「一般的な施工と同様に，直線部 10m ピッチ，曲線部 5m ピッチで設定した測点における仕上がり高さが，設計高さ（基準高さ） $\pm 1\text{cm}$  以内」を満足したことを確認して終了したが，図-6 によると， $\pm 1\text{cm}$  以内に収まっていない点も存在している．つまり，図-6 の測定は 1m ピッチで行っているため，直線部 10m ピッチ，曲線部 5m ピッチで設定した上記測定点以外は基準を満たしていない点が存在することを表している．これは実施工においても同様のことが起こっていると考えられ，今後計測手法の高度化により従来よりも多点での計測が可能となった場合，施工管理基準を見直す必要がある可能性を示している．i-Construction ではこの点も考慮に入れた規格・基準の策定が行われており，今後 i-Construction 適用範囲の拡大にむけて，さらなる検討も行っていきたい．

### 3.4 平坦性

2015 年の平坦性測定結果を図-8 に，2016 年の平坦性測定結果を図-9 に示す．平坦性は数値が低い方が滑らかであることを示している．

図-8，9 によると，熟練者（A さん，B さん，A' さん）の平坦性は，MC 施工導入すると全員従来施工より悪化するという同じ傾向を示していること，また C さんは両年とも MC 施工導入により平坦性が向上していること，他のオペレータ（非熟

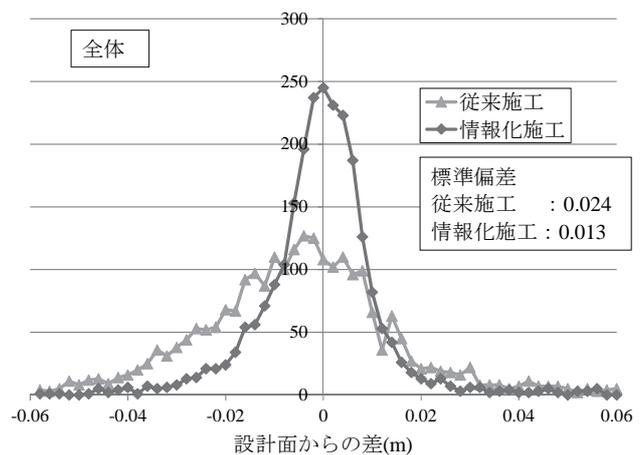


図-6 出来形分布（全体）

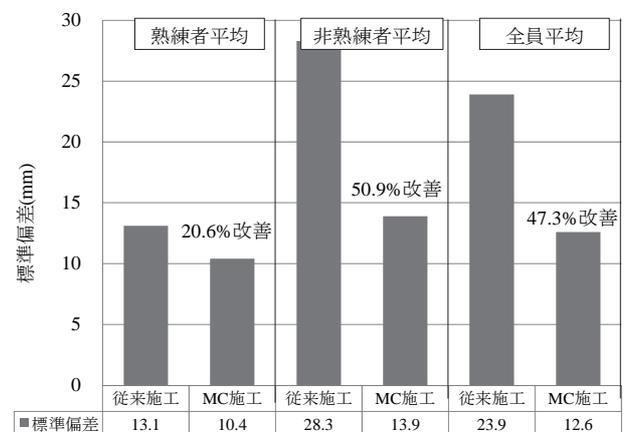


図-7 出来形標準偏差

練者）は MC 施工導入による平坦性への効果はオペレータによってまちまちであり，かつ同一オペレータでも実験年によって傾向が異なる（D さん）ことがわかる．

平坦性とは仕上げ面の滑らかさを表す指標であり，一般的に，施工中に設計値（目標高さ）へ近づくよう急激にブレードを操作すると，バラツキ（目標値からの乖離）は改善するが平坦性は悪化し，滑らかにブレードを操作すると，バラツキは改善しないが平坦性は向上する．以上のことを踏まえて考えると，熟練者（A さん，B さん，A' さん）はこの平坦性の特徴をよく理解しており，通常施工を行う際はブレードを走行速度などに合わせ適度に滑らかに操作することにより，バラツキと平坦性を高いレベルで両立するよう操作していたが，MC 施工を導入した場合，ブレードの上下操作は MC コントローラが行うため，今回の MC コントローラ設定では，バラツキは良好であったが熟練者の通常施工の高い平坦性は実現できなかったものと考えられる．図-10 に B さん（熟練者）の平坦性測定前（ローラ締固め後）左側線を，出来形計測と同様に TS を用いて 1m ピッチで測定

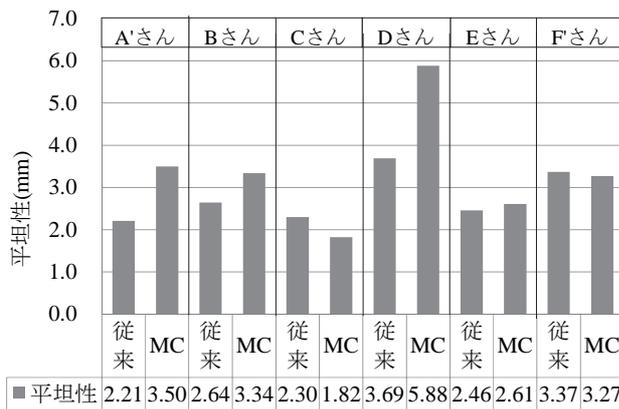


図-8 平坦性 (2015年)

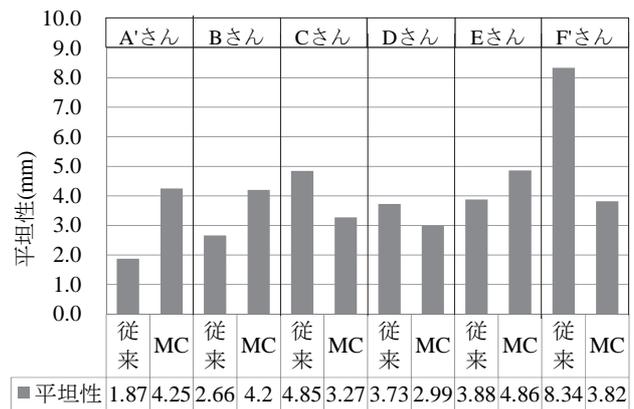


図-9 平坦性 (2016年)

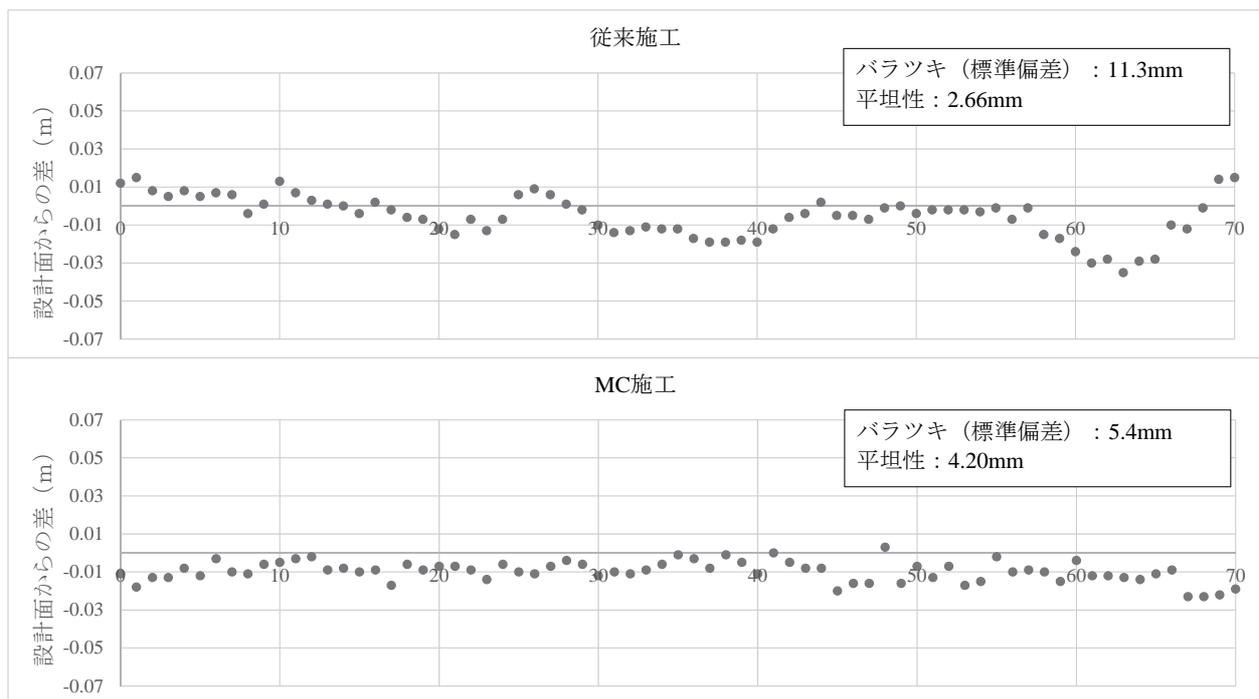


図-10 締固め後出来形 (Bさん, 2016年)

した結果を示す。図-10からも上記のこと、すなわち従来施工では熟練者であるBさんがブレードを滑らかに操作し、バラツキと平坦性を高いレベルで両立させようとしていること、MC施工ではバラツキを向上させるためにMCコントローラがブレードをやや急激に操作しているため、バラツキは少ないが平坦性が少し劣ることが確認できる。

なお、Cさんは、MC施工の社内トレーナー(社内オペレータにMC施工を教育する)として勤務しているためMCコントローラ設定の特徴をよく理解しており、MC施工を用いた方がバラツキと平坦性を高いレベルで両立できたものと考えられる。一方非熟練者は、走行速度などがオペレータおよび実験年などでまちまちなため、傾向がバラバラになってしまったものと考えられる。

### 3.5 心拍数

表-2 心拍数 (bpm)

	従来施工時	MC施工時
Aさん	106	101
Bさん	127	87
Cさん	110	90
Dさん	118	104
Eさん	98	84
Fさん	117	124

2016年の心拍数測定結果を表-2に示す。

表-2によると、Fさんを除くすべてのオペレータにて、MC施工を導入すると心拍数が低下していることがわかる。心拍数のみで断定することはできないが、MC施工を導入することで、熟練度に寄らず、オペレータ負担が低減される可能性があることがわかる。またFさんのみMC施工を導入しても心拍数はほぼ変化しなかったが、これは

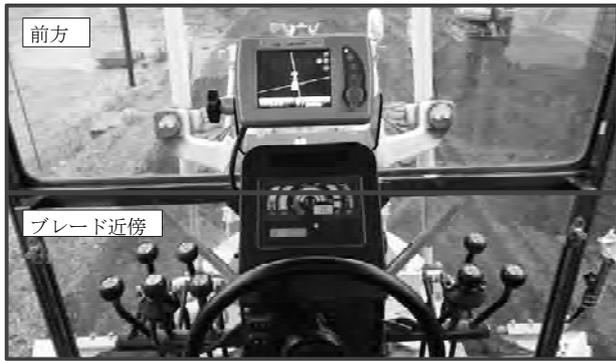


図-11 視線領域

入社1年目のFさんの実験を行う際に、上司がつきっきりで見学していたため、従来施工、MC施工ともに緊張が続き高い心拍数となってしまったためと考えられる。

### 3.6 オペレータ視線

オペレータの視界を、図-11に示すように、ブレード近傍、前方、その他(図-11の範囲外、レバー、モニターなど)の3つに分け、仕上げ施工中の視線が0.1秒以上停留している時間割合を整理した。なお、Bさん、Eさんは視線データが取得できなかった。整理結果を図-12に示す。

図-12によると、従来施工の場合、Aさん(熟練者)はブレード近傍を見ている時間割合が70%弱であるのに対し、他の3名は約90%程度あることがわかる。これは、熟練度が低い場合、材料を敷き均しているブレード近傍にばかり集中し、周辺状況の把握ができていないが、熟練者は前方にも注意を払い、走行経路の状況を予測することで、円滑で高品質な施工を行っていると考えられる。また、MC施工を導入するとすべてのオペレータでブレード近傍を注視している時間割合が減少しており、特にDさん、Fさんという非熟練者ほど大きく減少している。これはMC施工によりブレード操作にそれほど注意を払わなくてもよくなり、周辺に注意を払う余裕が生まれたためと考えられる。このことから、MC施工の導入は高品質で円滑な施工を可能とするだけでなく、周辺状況に注意を払うことでより安全な施工を可能とするとも言える。

### 4. 新たなMC技術の提案

前章にて、熟練オペレータは従来・MC施工ともに、非熟練オペレータに比べ多くの時間を前方確認に費やしていることがわかった。この理由を熟練オペレータにヒアリングしたところ、走行コースの確認とともに、前輪が地面の不陸(凹凸)を避けるように注意を払っているとの意見が得られた。モータグレーダはその構造上、前輪の上下

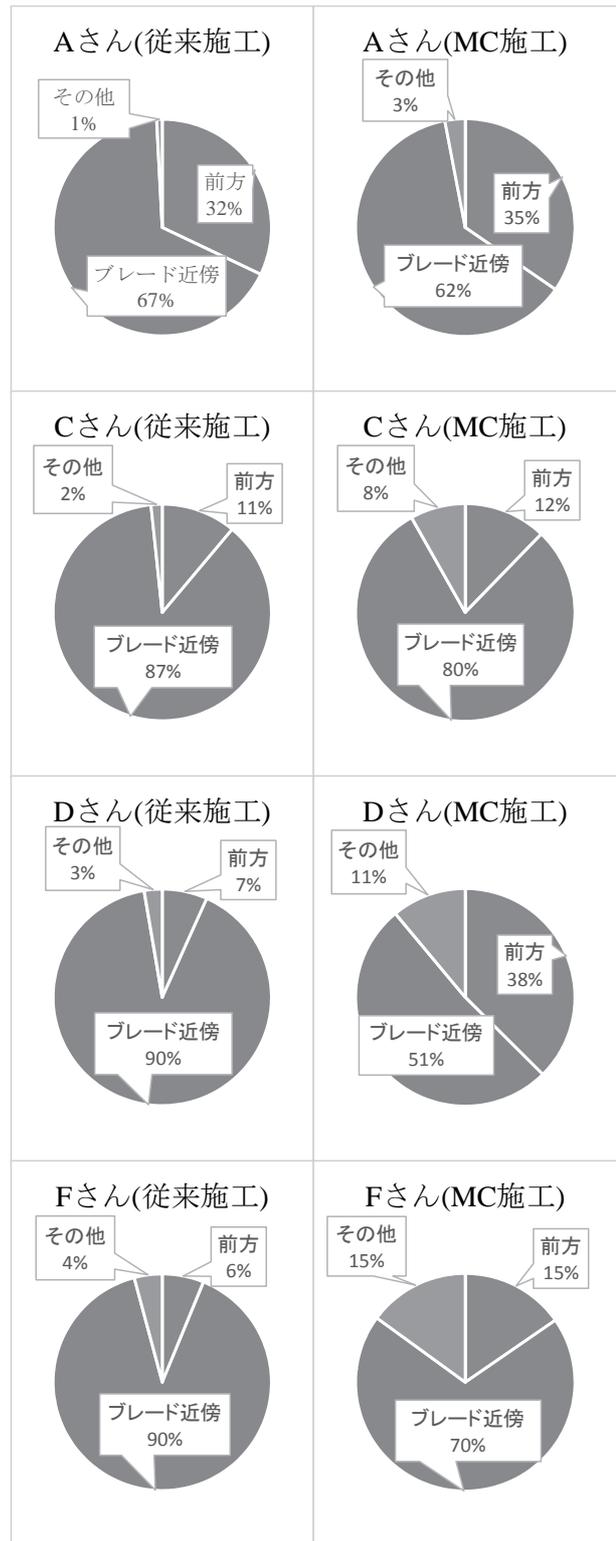


図-12 視線解析結果(停留時間割合)

動がブレードに直接伝わるため、前輪が不陸に乗り上げる(落ちる)と施工面を乱してしまうことになる(図-13)。この乱れは一度発生すると改善することが難しく、敷均しを繰り返すことで次々と伝播し、最終的にホイールベース1/2ピッチの波打ちを残してしまう現象が発生することがある。この現象を避けるため、熟練オペレータは、前方

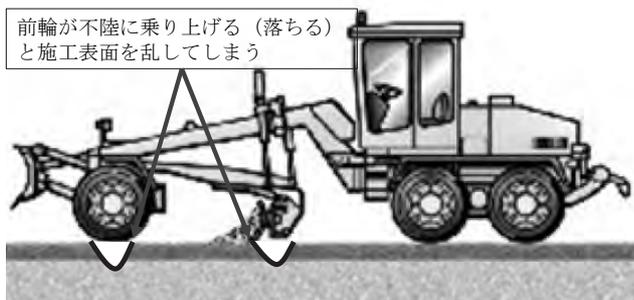


図-13 モータグレーダの特性

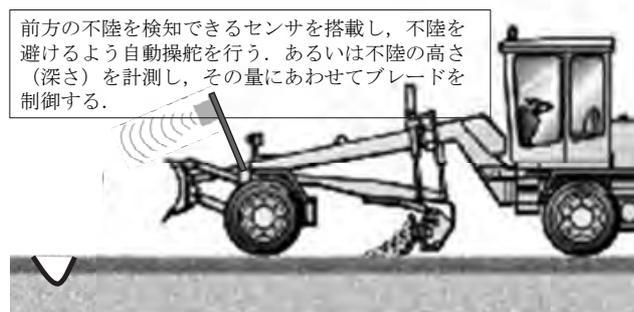


図-13 新たなMC技術の提案

に注意を払い前輪が不陸を避けるよう運転を行っていると考えられる。

以上から、モータグレーダにおける新たな MC 技術として以下のものが提案できる。

モータグレーダ前方にレーザスキャナ等前方の不陸を検知できるセンサを搭載し、不陸を避けるよう自動操舵を行う。あるいは不陸の高さ（深さ）を計測し、前輪が不陸に達すると同時にその量にあわせてブレードを制御し、仕上げ面の乱れを防ぐ。（図-14）

今後この新技術の可能性について検討を行っていききたい。

## 5. まとめ

モータグレーダ路盤敷均し工において、施工条件を同一にした 2 つの試験場にて従来施工と MC 施工を行った結果、MC 施工を導入することにより施工品質とオペレータ負担、安全性に以下の効果があることが判明した。

- (1) すべてのオペレータにて MC 施工を導入することにより作業時間の短縮が期待できる。その効果は熟練者では約 10.0%、非熟練者では約 37.2%と非熟練者の方が高く、非熟練者がほぼ熟練者並みに施工できる可能性がある。
- (2) すべてのオペレータにて MC 施工を導入することにより仕上がり高さ計測回数の削減が期待できる。その効果は熟練者では約 35.7%、非熟練者では約 59.4%と非熟練者の方が高く、非熟

練者がほぼ熟練者並みに施工できる可能性がある。

- (3) すべてのオペレータにて MC 施工を導入することにより出来形バラツキの改善が期待できる。その効果は熟練者では約 20.6%、非熟練者では約 50.9%と非熟練者の方が高く、非熟練者がほぼ熟練者並みに施工できる可能性がある。
- (4) MC 導入による平坦性への効果はオペレータ毎にまちまちであり、特に熟練者ではすべてのデータで MC 導入により平坦性は悪化した。熟練オペレータは通常施工では、ブレードを走行速度などに合わせ適度に滑らかに操作することにより、バラツキと平坦性を高いレベルで両立するよう操作しているが、今回の MC コントローラ設定ではバラツキは良好であったが通常施工の高い平坦性は実現できなかったものと考えられる。
- (5) 6 名中 5 名のオペレータで、MC 施工を導入することで施工中の心拍数が低下しており、オペレータ負担を低減できる可能性がある。
- (6) 視線データが取得できたすべてのオペレータにて、MC 施工導入によりブレード近傍注視時間割合が減少し、機体周辺を目視で確認する時間割合が増加しており、より安全な施工ができる可能性がある。

2015 年と 2016 年の研究成果より、モータグレーダを用いた MC 施工の効果を、施工効率・品質・オペレータへの影響、について詳細に把握することができた。その結果、MC 施工の導入により、非熟練者が熟練者並みの時間、品質、安全性などで施工することが可能となることが確認できた。わが国では今後熟練オペレータの大量退職が予想され、経験が浅いオペレータの生産性を向上させることが急務となっているが、MC 施工の普及は、この問題への有効な対策であると考えられる。本研究結果が MC 施工の普及に貢献できると期待している。

また本研究結果から、下記 2 点についても新しい課題を得ることができた。

- (1) 今後計測手法の高度化により従来よりも多点での計測が可能となった場合、従来の品質管理基準値を満たさない値が計測されることが予想される。そのため施工管理基準の再検討が必要と考えられる
- (2) 熟練オペレータからのヒアリングにより、モータグレーダ前方の不陸に対応した、新たな MC 技術を提案することができる。

今後上記 2 つの課題についても、検討を行っていききたい。

## 8. 舗設時におけるダンプトラック後退誘導表示装置の開発

鹿島道路(株)機械部 ○ 新満 伊織

### 1. はじめに

道路舗装の要求仕様として、測点の基準高や厚さの出来形を確保する事は当然の事ながら、自動車走行による乗り心地、ひいては安全につながる大きなポイントである平坦性の確保に重点を置く。舗装技術者はこのことに非常に神経を使い施工管理を行っているところである。

しかし、舗装材料を供給するダンプトラックと、滑らかな舗装施工を行っているアスファルトフィニッシャー（以下 AF）が急激な接触を起こすと、その衝撃で舗装面を乱し、それまでの苦労が一瞬にして無に帰すことが、しばしば起こる。

そこで、本技術はレーザ距離センサを使用し、ダンプトラックと AF 間の距離に応じて表示灯の点灯ライトの色を分ける事により、停止合図の視認性を向上させ、ダンプトラックの停止位置を確実に運転手に知らせる装置を新たに開発したのでこれを報告する。

### 2. 概要

アスファルト舗装における平坦性の確保は舗装工事において重要な課題であり、そのためにも下地の路盤整正作業から設計高さの確保に気遣い、如何に平滑に仕上げるかが重要である。特に仕上がり面である表層施工において AF のフローティングスクリードを安定させる為に一定の施工速度と一定の材料抱え量を確保し、且つ、みだりに止まらずに施工することが重要である。スクリードが下がろうとする力と材料の抵抗による押し上げようとする力が釣りあった時にスクリード下面はある角度  $\alpha$  を保とうとする。これを平衡特性といい、敷き均し厚さの制御はこの特性を利用している。図-1 にその機構を示す。

しかし、AF のオペレータからは舗装材料を供給するダンプトラックのタイヤが接触する付近は死角

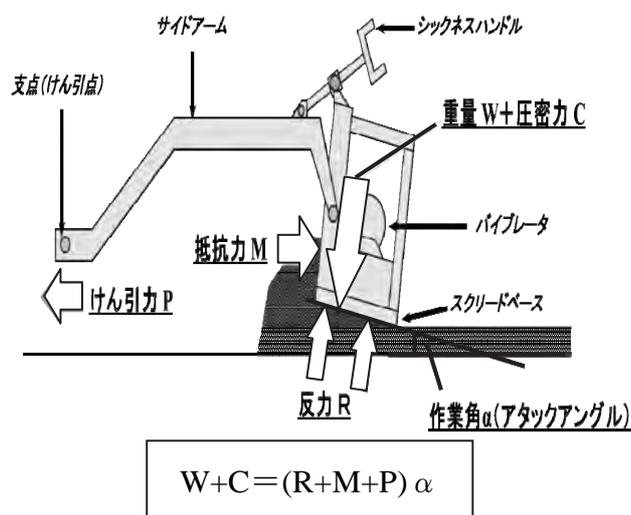


図-1 フローティングスクリードの機構

となり、ダンプトラックバック時にダンプトラックを停止させる位置を誤り、AF に強く接触させてしまう可能性がある。ダンプトラックが、舗装施工を行っている AF に衝突すると、定速施工が妨げられるばかりでなく、スクリードも後退し舗装面にスジや損傷を生じさせて平坦性を損なう恐れが懸念される。このような不具合を回避するために、バックしながら AF に近づくダンプトラックを、AF に接触する直前で確実に停止させ、AF の方から近づいて材料供給を行うことが望ましい。

### 3. 従来方法との違い

従来の問題点としては、ダンプトラック後退誘導時に AF のオペレータは写真-1 に示すように誘導を行いながら運転操作を行っている為、運転操作に集中出来ず施工に影響を与えてしまう恐れがある。夜間での施工（写真-2）となるとオペレータの誘導合図もダンプトラック運転手からは目視しづらくなってしまいうという可能性も考えられる。又、AF とダンプトラックのタイヤが接触するプッシュローラ付近は写真-3 に示すように運転席から目視出来ない為、停止の合図はオペレータの勘に頼ってしまっている。その為、慣れない内はダン

ブトラックとAFが接触してしまい、衝撃により平坦性に悪影響を及ぼす可能性がある。たとえ誘導員を配置してもダンプトラック運転手に確実な停止を示す表示は必要である。

これに対し、ダンプトラック後退誘導表示装置は、人による誘導合図ではなく、レーザ距離センサを使用する事で、ダンプトラックとの距離を確実に検知し、その距離に応じて合図用表示点灯ライトの色が変化させる事でダンプトラックの運転手自身が停止距離を認識する事が出来る。その為、AFに接触することなく安全に停止する事が出来、AFの定速施工を持続する事が出来る。又、オペレータは後退誘導時、ダンプトラックに注意を払い続ける必要がないため、運転操作に集中することができ、夜間での施工でも合図用表示点灯ライトが点灯している為、ダンプ運転手からも分かりやすく、作業の安定化が図れると考える。



写真-1 オペレータによるダンプ誘導



写真-2 夜間での施工状況



写真-3 死角となるプッシュローラ付近

#### 4. 機器構成

ダンプトラック後退誘導表示装置の構成を説明する。本装置は赤、黄、緑の三色が表示される合図用表示点灯ライト(写真-4)とコントローラ(写真-5)、レーザ距離センサ(写真-6)という機器構成になっている。レーザ距離センサからダンプトラックまでの距離に応じて、合図用表示点灯ライトの点灯色が変わる。コントローラと合図用表示点灯ライトは連動しており、ダンプ運転手のみならず、オペレータにも分かりやすい構造となっている。レーザ距離センサは、ダンプトラックまでの検知距離を最大5m以内の距離で任意に2段階で設定出来るものを採用し、図-2に示すようにレーザ距離センサと連動した合図用表示点灯ライトでバック可(緑)、停止準備(黄)、停止(赤)を表示している。そして、現場状況に応じてその場で容易に設定距離を変更することが出来る。また、DC24V電源を入力出来れば、機器はマグネット固定方式であるので、ほとんどの型式のAFに取付け可能となっている。又、取付け位置もダンプ運転手に見易い所へ設置出来るのも特徴である。

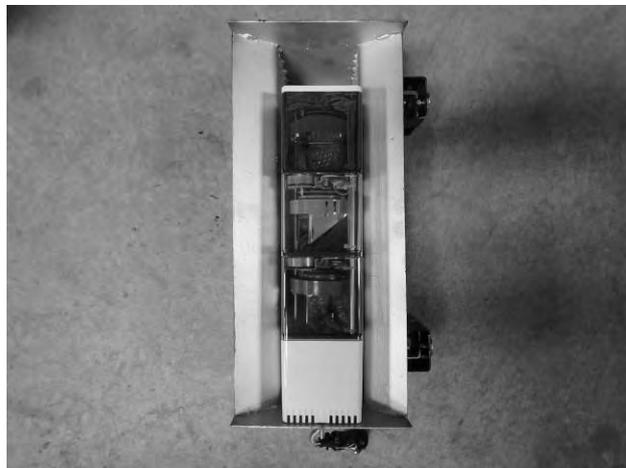


写真-4 合図用表示点灯ライト



写真-5 コントローラ

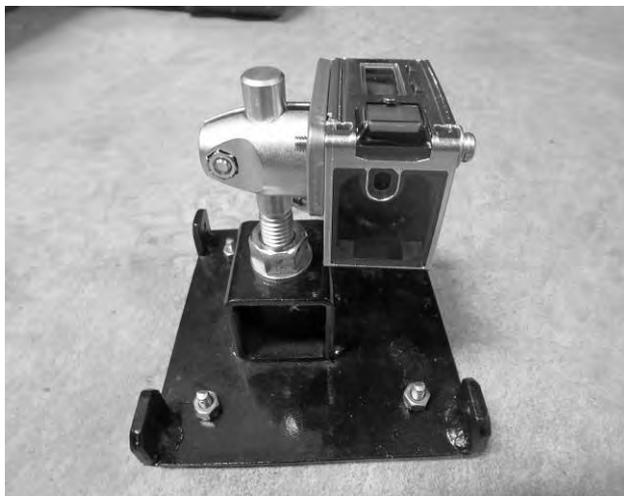


写真-6 レーザ距離センサ

ダンプ～アスファルトフィニッシャ距離	表示灯色

図-2 表示灯色変化のフロー

## 5. 確認試験

ダンプトラック後退誘導表示装置の完成に伴い、確認試験を弊社ヤードで行った。

試験内容としては、本機器を実際にAFに取り付け、レーザ距離センサにてダンプトラックのベッセルまでの距離を計測し、設定した距離に応じて回転灯の点灯色が変化する確認を行った。レーザ距離センサは検知距離を任意に2段階で設定出来る (L1とL2) 為、この信号をコントローラが受信した時点で、L1時には「黄→赤」、L2時には「緑→黄」に回転灯が変色する。初めにダンプトラックのタイヤをプッシュローラに近づけた状態で、L1の距離を設定し、L2はL1+300mmの距離で出力するように設定した。(L1: 1,500mm、L2: 1,800mm) 次にフィニッシャへ合材供給する要領で、10tダンプトラックをバックさせた。バックする際には回転灯を参考に運転操作するよう指示し、赤色の点灯によりダンプ停車後、ダンプアップ操作を行った。

### 5.1 試験結果による考察

結果としては従来のオペレータによる合図無しで、スムーズに誘導する事ができた。何度か実験を行いレーザ距離センサ、回転灯、コントローラは誤作動等無く、良好な再現性が確認できた。写真7、8に回転灯が点灯している様子を示す。当初は「L1: 1,500mm、L2: 1,800mm」と設定していたが、ダンプ運転手から黄から赤に変わるのが早いという意見を受け「L1: 1,500mm、L2: 2,000mm」に変更した。その後は丁度いいとの評価をもらった。また、その際のAFプッシュローラからダンプタイヤの距離を計測した。以下表-1に示す。今後はAFプッシュローラからタイヤ距離を計測し、その際のレーザセンサの数値をL1、L2と設定することで、今回の試験と同状況を再現できると考える。ただし、各ダンプの車両形状の違いや、運転手の感覚の違いもあることから、一度実現場にて試用することが必要かと考える。



写真-7 黄色ランプ点灯時 (L2:2,000mm)



写真-8 赤色ランプ点灯時 (L1:1,500mm)



写真-10 応用使用例

表-1 レーザ距離に対してAFプッシュローラからダンプ  
タイヤの距離

	レーザ出力距離	AFプッシュローラ~ダンプタイヤ距離
L1	1, 500mm	600mm
L2	2, 000mm	1, 050mm

## 6. 現場事例

これまで、関東地方の国交省工事や関西地方のNEXCO工事等に導入してきた。群馬県内の国交省工事での舗装で使用した(写真-9)。その際、停止準備(黄)の距離を長く設定する事で、ダンプ運転手が停止準備(黄)から停止(赤)するまでの余裕を持たせる事が出来た。その結果、確実にダンプトラックをプッシュローラより前で停止させ、AFの方から近づいて施工を行う事で定速施工が持続出来た。又、埼玉県内の現場では本機器の応用使用例(写真-10)として、材料縦取り機のベルコンとベースペーバの一定離れを維持する為に本機器を取り付け、両機械の接触を防ぎ円滑で安全な作業に寄与した例もある。



写真-9 施工状況

## 7. おわりに

本報では、レーザ距離センサを使用し、ダンプトラックとAF間の距離に応じて表示灯の点灯ライトの色を分ける事により、停止合図の視認性を向上させ、ダンプトラックの停止位置を確実に運転手に知らせる装置について紹介した。他にも本機の導入実績として、国交省工事、高速道路工事等の新設工事等に導入した。実際に現場で使用したことで、本機器の特徴と導入効果について確認することが出来た。

今後は現場の使い勝手や更なる安全効果の向上を考慮し、表示内容の多様化や音声機能、よりスムーズな施工を行える様な高度化・自動化への改良を進めていきたいと考えている。なお、本システムは、その新規性を問う為に特許出願中である。

## 9. 複合型地盤改良技術に要求される建設機械の性能に関する研究

国立研究開発法人土木研究所 ○ 田中 洋一  
 国立研究開発法人土木研究所 藤野 健一  
 国立研究開発法人土木研究所 梶田 洋規

### 1. はじめに

現在の軟弱地盤対策は、コスト縮減・工期短縮の面からセメントなどの固化材を用いた地盤改良技術の果たす役割が大きくなっている。固化材を用いた地盤改良技術の一つである深層混合処理工法は、改良体の強度を改善することによる高強度化が実現され、低改良率により施工時のコスト縮減が図られてきた。しかし、さらなる地盤改良にかかるコストの縮減や工期短縮を図るために低改良率が進むことで、盛土等の土工構造物による不同沈下量が大きくなり、土工構造物の安定性確保が難しくなる。そのため、軟弱地盤対策を必要とする現場では、深層混合処理工法とあわせて盛土等の土工構造物の下にサンドマット工法やジオテキスタイル工法を組合せることで、不同沈下量を抑制する事例が多くなっている。

本研究では、深層混合処理工法に不同沈下量を抑制するために、表層混合処理工法を組合せた複合型地盤改良技術を提案し、複合型地盤改良技術に対して求められる建設機械の要求性能を明確にする。そして、複合型地盤改良技術に必要となる施工機械および施工方法について明らかにする。

### 2. 地盤改良技術

地盤改良技術は、求められる効果の違いから、多くの工法が開発されてきた。近年は、全沈下量低減の効果とあわせてコスト縮減・工期短縮の面から固化材を用いた固結工法が多く採用されている。固結工法の中1つである深層混合処理工法は、

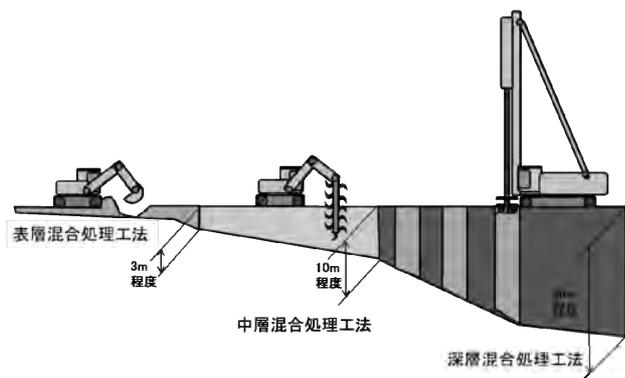


図-1 各混合処理工法の施工深度による違い

軟弱地盤対策において全沈下量低減とあわせて副次的な効果を期待し、採用されることが多い。複合型地盤改良技術では、深層混合処理工法に加えて、表層混合処理工法を組み合わせることで盛土構造物の不同沈下量の抑制を考えている。

ここでは、現在使われている深層混合処理工法・表層混合処理工法とそれら2つの工法の間における施工深度で実施される中層混合処理工法についての現状技術を調査した。3種類の混合処理工法の施工深度における違いを示した概念図を図-1に示す。

#### 2.1 深層混合処理工法

深層混合処理工法は、原位置地盤と固化材を攪拌もしくは固化材を噴射することにより、改良体を構築する技術である。攪拌方法は、攪拌翼を用いた機械式攪拌工法と固化材を噴射する噴射式攪拌工法とそれらを組み合わせた機械式・噴射式攪拌工法の3種類に分類される。噴射式攪拌工法は、スラリー方式の固化材が基本となるが、機械式攪拌方式では粉体方式の固化材も使用することができる。深層混合処理工法における施工方法の概念を図-2に示す。

改良体形状は、柱状となり、杭式改良もしくはブロック式改良により施工<sup>1)</sup>される。そのため、改良柱体をオーバラップさせるために機械攪拌翼や噴射管を2重もしくは3重にして施工することが多く、施工深度は、おおむね50mまでとなっている。

#### 2.2 表層混合処理工法

表層混合処理工法は、トラフィカビリティを改善することを目的に実施され、原位置地盤を攪拌

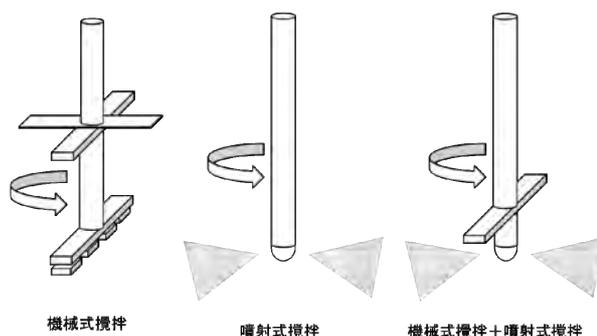


図-2 深層混合処理工法

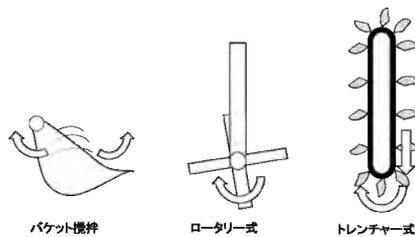


図-3 表層混合処理工法

する原位置混合処理方式，原位置地盤の材料を搬出し攪拌のあと原位置に戻す搬出混合処理に分類される。固化材は，深層混合処理工法と同様にスラリー方式と粉体方式がある。粉体方式は，スタビライザやバックホウのバケット攪拌により混合される。スラリー方式は，主にバックホウに取り付けられたロータリー式およびトレンチャー式によって攪拌される。表層混合処理工法における施工方法の概念を図-3に示す。

### 2.3 中層混合処理工法

中層混合処理工法は，施工深度をさらに深くするために表層混合処理工法のトレンチャー部分やロータリーを支持する部分を長くすることで対応している技術が見られる。また，深層混合処理工法で実施されていた噴射式攪拌技術を組合せた工法もあり，浅層混合処理工法と深層混合処理工法のハイブリッド工法となっている技術もある。

### 2.4 工法分類

現状の混合処理技術として使われている工法について，NETISや既存文献から120技術を抽出して調査した。分類方法は，以下の6つの観点について，調査・分類を実施した。

- 改良対象となる地盤条件（土質やN値など）
- 施工機械の分類（ベース機械・改良体作成装置・固化材プラントなど）
- 施工機械に関する技術優位性の比較評価
- 環境条件の整理
- 技術適用範囲の分類
- 施工管理用法および施工コストの評価

表-1 調査項目一覧

調査項目	調査結果の形式等	
混合処理工法区分	深層(3m以内)・中層(10m以内)・浅層(10m以上)・その他(組合せ等)	
工法分類区分	機械攪拌工法・噴射攪拌工法・その他(組合せ等)	
固化材種別	スラリー・粉体・その他(組合せ等)	
適用土質	砂質土	N値<20 20≦N値<50 N値≧50
	礫質土	
	粘性土	N値<4 4≦N値<10 N値≧10
	腐植土	
	ヘドロ	
特記事項	選目可能(○) 選択付否(△) 選目不可(×)	
その他(コメント等)		
改良径(m)	掘削	記述
改良深度(m)	掘削	記述
	特記事項	記述
ベース機械の種類	バリエータリ(ロータリー)・ボーリングマシン(据置型)・ロータリー・トレンチャー等	
攪拌機種別	攪拌翼(回転・二軸・三軸)・管式(単管・二重管・三重管)・トレンチャー等	
固化材プラント等 特記事項	記述	
他小作業空間	掘削	記述
	噴	記述
	高圧	記述
	特記事項	記述
工事費	掘削	記述
	高圧	記述
	特記事項	記述
施工管理用法・その他	記述	

調査項目の一覧と調査結果の一部を表-1，表-2に示す。ベースなる建設機械は，深層混合処理ではパイルドライバとボーリングマシン（据置型）にて多く施工されており，表層混合処理工法および中層混合処理工法では，バックホウが多く利用されていた。施工機械の最大施工深度は，パイルドライバが22m~55m，ボーリングマシンが20m~80mが対象となっていた。また，バックホウ（表層混合）は1.8~5m，バックホウ（中層混合）は4~13mが最大施工深度となっていた。調査した混合処理技術における適応土質は，砂質土・礫質土・粘性土・腐植土・ヘドロについても調査した。N値の小さい砂質土（N<20）・粘性土（N<4）すべての技術が施工可能であったが，腐植土・ヘドロについては，半分の60技術が対応可能であり，礫質土については20技術が対応可能であった。

表-2 混合処理技術の調査結果（一部）

No.	混合処理工法区分	工法分類区分	固化材種別	適用土質										
				砂質土			礫質土	粘性土			腐植土	ヘドロ	特記事項	その他(コメント等)
				N値<20	20≦N値<50	N値≧50		N値<4	4≦N値<10	N値≧10				
1	中層混合処理工法	機械攪拌工法	スラリー	○	△	×	×	○	○	△	○	○		
2	浅層・中層混合処理工法	機械攪拌工法	粉体	△	×	×	×	○	○	×	○	○		
3	中層混合処理工法	機械攪拌工法	スラリー	○	×	×	×	○	○	×	○	○	C≦70KN/m <sup>2</sup>	
4	深層混合処理工法	機械攪拌工法	スラリー	○	○	○	○	○	○	○	○	△		
5	深層混合処理工法	機械攪拌+高圧噴射工法	スラリー	○	×	×	×	○	○	×	○	○	C≦70KN/m <sup>2</sup>	
6	深層混合処理工法	高圧噴射攪拌工法	スラリー	○	×	×	×	○	○	×	○	○	C≦80KN/m <sup>2</sup>	
7	深層混合処理工法	機械攪拌+高圧噴射工法	スラリー	○	×	×	×	○	○	×	○	○	C≦70KN/m <sup>2</sup>	
8	浅層・中層混合処理工法	機械攪拌工法	スラリー・粉体	△	×	×	×	○	△	×	○	○		
9	深層混合処理工法	機械攪拌工法	スラリー	○	○	△	○	○	○	○	○	○		
10	深層混合処理工法	機械攪拌+中圧噴射工法	スラリー	○	△	×	△	○	○	○	○	○		

### 3. 改良体強化技術

改良体の強度を改善することは、地盤改良において低改良率を実現でき、コスト縮減・工期短縮に直接つながる要因となる。そのため改良体の強化技術について、調査した各種混合処理技術からヒアリングにより、改良体の強化に寄与する可能性のある材料、施工方法および施工機械、施工管理方法について調査した。表-3に改良体強化技術の調査結果の一覧を示す。なお、原位置地盤に対する固化材の増加による方法は、改良体強度を上げる方法の調査対象とはしていない。

#### 3.1 材料

材料における改良体の強化方法としては、減水剤と凝結遅延剤を使用する方法により可能であることをヒアリングにて確認した。減水剤は、セメントスラリーのコンクリート配合時に使用する。目的は、セメントの粒子の分散効果によるセメントスラリーの均質化と流動性の向上により、改良体を均質に施工することにある。また、減水剤の使用目的は、単位水量の減少であるが、単位水量を変更せずセメント量を増加させても、同一のスランプ、ワーカビリティを確保したコンクリート配合も可能となる。凝結遅延剤や遅延形の減水剤も、同様にセメントスラリーのコンクリート配合時に使用する。目的は、先行して構築した改良体の強度発現を遅らせ、後から構築する改良体を施工する際に攪拌翼等により先行して構築した改良体を切削し、改良体同士の一体化を図ることにある。そのため、改良体自体の強化ができるものではなく、改良体としての一体性を高めて全体として強度を発現させることが可能となる。

#### 3.2 施工方法および施工機械

施工方法および施工機械における改良体強化方法は、界面活性剤の利用やスラリーの高温化もしくは繊維混合により可能であることをヒアリングにて確認した。界面活性剤を利用した工法は、深層混合処理工法の機械攪拌工法による柱状の改良体の構築に使用される。使用方法は、セメントスラリーに界面活性剤を添加し、界面活性作用によりセメントスラリーの流動化を促進することで高品質な改良体を構築する。建築物のための改良地盤の設計および品質管理指針では、許容応力度設計法による設計基準強度の算定に使用する変動係数の値<sup>2)</sup>は、実績データに基づき0.2~0.45の範囲で適切な値を設定するようになっている。界面活性剤を使用することで、低い変動係数の値を設定することが可能となる。

スラリーの高温化による工法は、セメント系固化材の特徴としての養生温度が高いほど水和反応が活発になるところに着目している。施工方法は、ボイラで発生させた高温蒸気とセメントスラリーと合流させて、施工機械により原位置地盤と攪拌

混合して改良体の温度上昇を図る工法である。スラリーの高温化工法は、変位抑制のために原位置地盤における強度の早期回復が必要となる鉄道営業線近接工事や改良体の強度が発現しにくい寒冷地における施工実績がある。また、低温条件下での試験施工が行われており、冬期施工における改良の地盤表層部での強度増加についても、効果が確認されている。

スラリーへの繊維混入する方法は、特殊プラントで短繊維混合セメントスラリーを製造し、特殊混合機にて原位置地盤と混合攪拌して、層厚1~2m程度の短繊維混合処理土を造成する工法である。短繊維を混入した場合は、一軸圧縮強さが多少増加するとともに、ピーク強度後の残留強度が維持されていることから靱性の向上が見受けられ、曲げ強度の増加も確認されている。短繊維混合による地盤改良工法は、高圧の噴射攪拌工法であり、

表-3 改良体強化技術の調査結果

分類	材料・方法等	目的
材料	減水剤 凝結遅延剤 (遅延形減水剤)	品質の安定 改良体同士の一体化
施工方法および 施工機械	界面活性剤の利用 スラリーの高温化 スラリーへの繊維混入	品質の安定 一軸圧縮強さの増進 (初期および長期) 一軸圧縮強さ、靱性および曲 げ強度の増進、引張強度の増 進
施工管理方法	設計基準強度の設定 (変動率の把握)	品質の安定

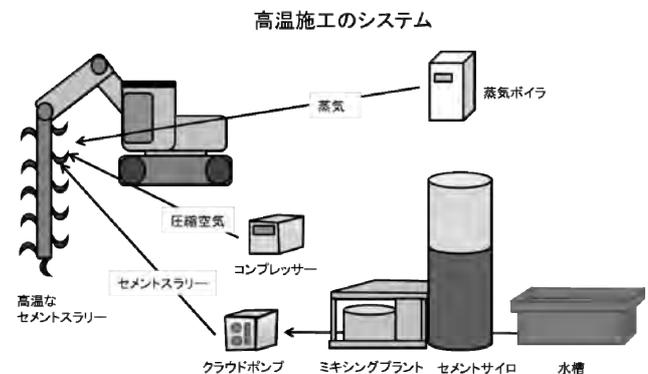


図-4 スラリー高温化の事例

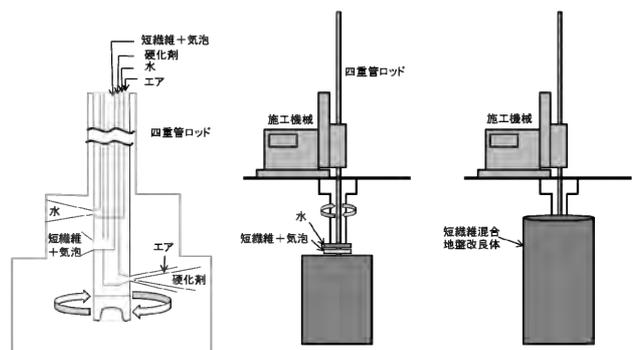


図-5 繊維混合の事例

気泡に混合した短繊維を土中に充填させ、セメントスラリーの超高压噴射により土を切削し地盤中に円柱状の改良体を構築する噴射工法となっている。

### 3.3 施工管理方法

設計基準強度の設定（変動率の把握）は、許容応力設計法による実績データに基づき、適切な変動係数を設定することを利用し、施工管理の値から常時の荷重に対する設計強度を設定することで、設計基準強度を上げる方法である。変動率の把握は、施工管理時に得られる強度試験結果等のデータから変動係数を把握し、品質のバラツキを抑制することで、改良体の設計強度を高く評価することが可能となる。

### 4. 複合型地盤改良に要求される性能項目

複合型地盤改良は、深層混合処理に表層混合処理を組合せた施工を実施するため、必要となる建設機械としては、深層混合処理工法にて使用されているパイルドライバと表層混合処理工法にて使用されているバックホウが有力になると考えられる。建設機械は、深層混合処理工法から表層混合処理工法までを1種類の施工機械でこなせることがコストや施工時の運用面から望ましいと考えられるが、縦方向の施工である深層混合処理工法と横方向に広く施工する表層混合処理工法を同じ建設機械にて施工するには、何らかの技術開発が必要であると考えられる。また、建設機械の技術開発により深層混合部分と表層混合部分が一体となった施工が可能になれば、改めて改良体の強度設計における評価方法についても見直す必要があると考えられる。

改良体強化技術に関する調査からは、強度強化（圧縮および曲げ）に有効な方法として、減水剤と凝結遅延剤を使用、界面活性剤の利用、セメントスラリーの高温化、改良体に繊維を混入する方法が確認できた。ただ地盤改良工法は、原位置地盤の影響を大きく受けるため、実験により施工性を確認するとともに、様々な条件下においても出来形品質や材料品質などの施工品質について、期待する効果を確認する必要がある。くわえて、繊維を混入する方法は、従来の材料強度とは異なるため、新たな設計手法・材料の評価手法を確立する必要がある。また、従来の改良体の構築に必要なコストと比べて高価になることから、適用場面や従来の地盤改良との相違点を明確にし、技術の展開を図る必要があると考えられる。

施工管理方法としては、施工時に得られるデータから設計強度の評価を変更できることがわかった。設計強度の評価を変更するためには、施工時のバラツキを抑制すること重要となる。複合型地盤改良技術における表層混合部分は、土工構造物

の荷重を受けるため曲げ荷重が作用するようになる。浅層混合部分は、できるだけ均質な状態に施工することが求められ、改良体の強化にも繋がる。改良体を均質な状態にするためには、現在の表層混合処理工法で使用実績のあるロータリー式やトレンチャー式の施工位置とあわせて攪拌翼の回転状態等を計測し、管理していくことが重要と考える。深層混合処理工法でも、表層混合処理工法と同様に施工位置をあわせて攪拌翼の回転状態や噴射の状況等を計測し、施工時のバラツキを管理することで強度試験等の設計強度と関連させた施工管理手法を提案していくことが不可欠と考える。

### 5. まとめ

複合型地盤改良技術に対して求められる建設機械の要求性能を明確にするため、現状の地盤改良技術から調査を実施した。複合型地盤改良は、現在実施されている深層混合処理工法に表層混合処理工法を組合せることで実現が可能となると思われる。また、改良体強化技術を取入れた建設機械について、実際の施工現場と同様の条件を設定した実験により、改良体に求められる強度や耐久性に加えて、コストや工期などの効果を検証していく必要がある。今後は、実験により効果を確認し、建設機械の施工管理方法を定めることで、複合型地盤改良の施工方法について提案していきたいと思う。

### 参考文献

- 1) 道路土工—軟弱地盤対策工指針（平成24年度版），pp.302～306, 2012
- 2) 建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針，pp.37～43, 2006



2) 標定点及び検証点の設置・計測の留意点  
 計測精度を確保するための標定点の設置の条件は、以下を標準とする。  
 標定点は、計測対象範囲を包括するように、UAVマニュアルにおける外側標定点として撮影区域外縁に100m以内の間隔となるように設置するとともに、UAVマニュアルにおける内側標定点として天端上に200m間隔程度を目安に設置する。  
 標定点及び検証点の計測については、4級基準点及び3級水準点と同等以上の精度が得られる計測方法をとる。

図-3 空中写真測量(無人航空機)を用いた  
 出来形管理要領(土木編)(案)抜粋

3. 標定点の検証について

通常は現場内に設置した標定点により、点群の座標付けを行う。今回の検証にあたっては Skycatch 社製の Evolution3 を使用することとした(写真-1)。同社の機体の特徴は、後処理キネマティックにより、標定点がなくとも精度よく撮影写真の位置を推定できる仕組みである。図-3は Skycatch 社製の UAV を用いた場合の仕組みを示している。まずは通常の写真測量と同様に決められた撮影範囲の写真を撮影する。同時に NTRIP 方式により GNSS 情報を記録する。次に写真をクラウドへアップロードする。そして、事前に記録した NTRIP 情報を元に後処理し、ネットワーク型 RTK 級の精度を持ったジオタグ付き写真を構築する。最後に、この写真を元に解析を行うことで、標定点の登録無しに解析を実施することが可能となっている。

通常実施する UAV による計測と、この機体での計測を実施し、精度が担保されるかを検証した。検証にあたっての構成は表-2 に示す通りとした。



写真-1 Skycatch 社製 Evolution3

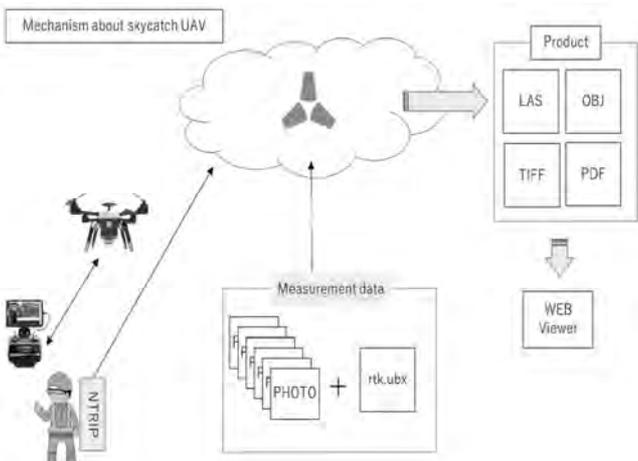


図-4 Skycatch 社 UAV 仕組み

表-2 計測条件

計測条件	計測条件①	計測条件②
UAV 本体	enRoute 社 Zion QC730	SkyCatch 社 Evolution3
飛行高度	70m	70m
オーバーラップ率	80%	80%
サイドラップ率	60%	60%
デジカメ性能	2,430 万画素	1,200 万画素
地上画素寸法	1.5 cm	2.0 cm
解析ソフト	Photoscan	Skycatch 社 ソフト

4. 解析結果

4.1 検証点の比較

現場内には検証点を 10 箇所設置した(図-5)。図に示す検証点で GNSS ロガーを用いて座標値を取得し、各点群データでの近傍点での標高値の差を確認した。結果を表-3 に示す。計測条件①ではすべての箇所において計測値との差が 50mm 以内となることが確認できた。一方で、計測条件②では 5 箇所では 50mm 以内であったが、これを大きく外れる箇所もあった。



図-5 解析結果

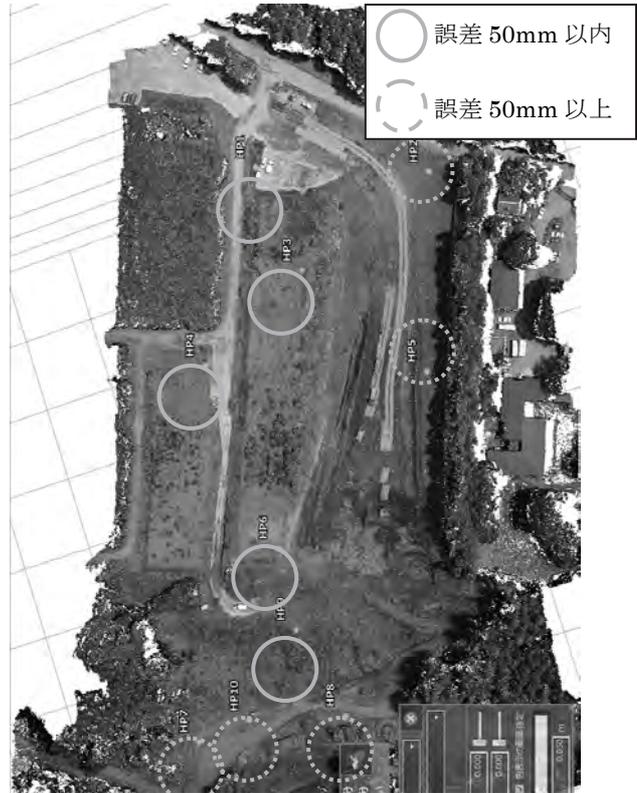


図-6 検証点位置

表-3 解析結果

検証点名	実標高 (m)	計測条件①		計測条件②	
		H1 (m)	ΔH1 (mm)	H1 (m)	ΔH1 (mm)
HP1	509.137	509.178	+41	509.112	-25
HP2	507.485	507.507	+22	507.394	-91
HP3	513.554	513.586	+32	513.521	-33
HP4	511.168	511.130	-38	511.183	+15
HP5	508.411	508.460	+49	508.326	-85
HP6	516.693	516.704	+11	516.666	-27
HP7	480.663	480.655	-8	480.843	+180
HP8	479.503	479.495	-8	479.559	+56
HP9	508.428	508.406	-22	508.433	+5
HP10	480.196	480.151	-45	480.360	+164

図-6に検証点が誤差 50mm となった箇所を示す。検証点での誤差が大きく出た箇所はいずれも樹木に近い箇所であることがわかった。解析ソフトが異なるため、直接的な原因は定かでないが、SfM 解析を行うと、しばしばこのような現象が生じることがある。樹木などは急激に標高値が高くなるため、マッチング処理を行うとどうしても付近の高さに追従し、実測値よりも標高が高くなる傾向がある。このような解析ソフトに依存してしまう箇所を除けば、比較的安定した解析結果が得られたことになる。

#### 4.2 点群による面的な比較

検証点での結果を確認したが、これが「点」としてだけの誤差なのか、周囲の「面」としても同じような誤差が生じるのかを確認するため、点群同士の差分を確認した。結果が図-7である。50cmメッシュで標高差を表示しており、差が 10cm 以内の箇所を白色で示している。先ほども述べたように、樹木が多い計測エリアの外周では面的に見た場合でも精度が 5cm を超えていることがわかった。一方で中央部での平坦な箇所では概ね精度が 5cm が確保されていることがわかった。



図-7 計測結果①および②差分 (50cm メッシュ)

#### 4.3 計測時間の短縮

今回の検証における計測時間の比較を行った。計測条件①では i-Construction 基準に則り実施すると、事前の計測から解析完了までで 260 分であった。一方、Skycatch 社製の UAV を用いた場合の時間は 140 分であった。飛行時間、解析に要する時間は同じであったが、標定点の設置及び計測が一切不要なため、時間だけを比較した場合、生産性は約 50% 向上した。

表-4 対象面積による飛行時間と計測時間について

計測条件	飛行高度	飛行時間	標定点 検証点	計測 時間	解析 時間	合計 時間
①	70m	20分	24箇所	120分	120分	260分
②	70m	20分	0箇所	0	120分	140分

#### 5. まとめと今後の課題

今回の検証によって標定点を用いない場合での UAV を用いた写真計測でもある程度の精度を担保することができることがわかった。また作業時間についても 50% 程度の生産性の向上が確認できた。今後はさらに精度を追求するために以下の事項を検証していくこととする。

##### ①地上画素寸法との関連性

今回は通常業務との比較ということで飛行高度を統一して検証したが、本来 SfM 解析は地上画素寸法によっても精度が異なる。今回実施したものは地上画素寸法では 0.5cm 程度の違いのため大きな違いはないと思われるが、今後は地上画素寸法をパラメータとし、どこまで精度が得られるかについても検証しなくてはならない。

##### ②地形追従によるばらつき

Skycatch 社製の UAV は国土地理院の GIS データをもとに地形に追従して飛行させることができる。今回の飛行では地形に追従して飛行させたため、現場での進捗状況により必ずしも GIS データと一致せず、ラップ率が正しくとれていない可能性もある。そのため、SfM 解析によるマッチング処理がうまくいかず、モデル作成ができないこともあった。今後は飛行高度を一定にし、その差を確認することが必要となる。

##### ③標定点の減少

標定点をなくすことで、現場での生産性は飛躍的に向上することがわかった。しかしながらすべての標定点をなくさなくとも、生産性は向上する。したがって、標定点が i-Construction に定められているものよりも少なく済み、かつ精度が担保できている状況が望ましい。今後は解析時に一部標定点を控除し、解析を行うことが可能か検証していく必要となる。

#### 6. おわりに

平成 28 年 3 月に「空中写真計測 (無人航空機) を用いた出来形管理要領 (土工編) (案)」を含む 15 の基準がでて 1 年半が過ぎた。平成 28 年度には 584 件もの ICT 活用工事が実施され、平成 29 年度は 704 件の ICT 活用工事が公告されている (平成 29 年 6 月 22 日現在)。平成 29 年 3 月には、1 年間の実践を踏まえて 7 つの技術基準類及び積算要領が「カイゼン」されている。国土交通省が進める i-Construction の目的は、建設産業全体の生産性向上である。まさに官民が一体となり、本気で取り組んでいる。建設業がさらに魅力ある産業となることを願い、本論文がその一端を担えればと思う。

# 11. ICT 舗装工新基準の出来形測定における

## さらなる生産性向上への検討

大林道路株式会社  
株式会社大林組  
株式会社大林組

○ 田原 康平  
杉浦 伸哉  
田島 僚

### 1. はじめに

平成 28 年 3 月末に国土交通省から i-Construction が発表され、土工事における ICT 活用工事の 15 の基準が公表された。それから 1 年が経過し、ICT 活用の拡大として『ICT 舗装工』(図-1)の導入が平成 29 年 3 月末に発表され、舗装工の生産性向上を図る上で必要な 10 の技術基準類(図-2)(以下、新基準)が新設・改訂された。

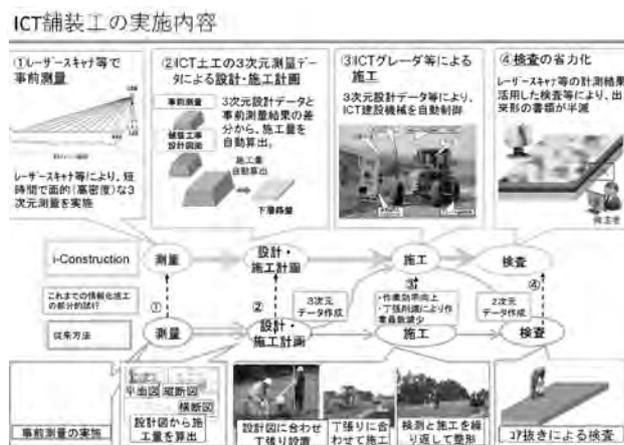


図-1 ICT 舗装工の実施内容

名称	設計・改訂	本文参照先・概要
ICTの多面的な活用の実施方針	改訂	https://www.mlit.go.jp/ics/icsmain/icsmain01.html ICT舗装工の定義やインセンティブの促進等
土木工事現場測量実施要領(案)	改訂	https://www.mlit.go.jp/ics/icsmain/icsmain02.html 3次元測量結果から、舗装工の平均厚を設計の「平均厚」算出方法を定めた
土木工事測量実施要領(案) (土木測量標準法及び特例法)	改訂	https://www.mlit.go.jp/ics/icsmain/icsmain03.html 標準法(標準)と特例法(特例)を併用し、測量精度に応じた特例法の指定と運用の管理項目「目標高さ」(目標高さ)の代替を可能とする。 -従来の計測値に対する補正係数を設計による計算精度(多点観測)による測定
地上型レーザースキャナを用いた土木測量実施要領(舗装工事編) (案)	新設	https://www.mlit.go.jp/ics/icsmain/icsmain04.html ICT舗装工の活用に必要な計測精度と同等以上の精度確保(多点観測)による測定
TSを用いた土木測量実施要領(舗装工事編) (案)	改訂	https://www.mlit.go.jp/ics/icsmain/icsmain05.html 新設法に対しては、従来の「レーザースキャナ」(舗装工事)・TS(舗装工事)の活用
写真測量実施要領(案)	改訂	https://www.mlit.go.jp/ics/icsmain/icsmain06.html 写真測量に特化した測量の実施
地方整備局土木工事測量技術基準(案)	改訂	https://www.mlit.go.jp/ics/icsmain/icsmain07.html 測量精度に特化した測量の実施
既設断面検査技術基準(案)及び特例法	改訂	https://www.mlit.go.jp/ics/icsmain/icsmain08.html 断面管理に伴う検査管理の確立の促進(地方整備局土木工事測量技術基準(案)に準じた運用)
地上型レーザースキャナを用いた出来形管理の監視・検査要領(舗装工事編) (案)	新設	https://www.mlit.go.jp/ics/icsmain/icsmain09.html 地上型レーザースキャナを用いた出来形管理の監視・検査要領(舗装工事編)に準じて測定
TSを用いた出来形管理の監視・検査要領(舗装工事編) (案)	改訂	https://www.mlit.go.jp/ics/icsmain/icsmain10.html TSを用いた出来形管理の監視・検査要領(舗装工事編)に準じて測定
積算工事(積算工)標準法(案)	新設	https://www.mlit.go.jp/ics/icsmain/icsmain11.html 地上型レーザースキャナ

図-2 ICT 舗装工についての 10 の技術基準類

この図-1 に示す実施内容の内、②3次元設計データによる設計・施工計画及び③ICTグレーダによる

る施工については、情報化施工として 10 年以上前から頻繁に行われており、多数の実績があり、その課題や問題点に関しては、順次改善が進み、問題なく使える技術となっている。

しかし、①起工測量、④出来形測定については、TSを用いた出来形管理は行われているが、地上型レーザースキャナ(以下、TLS)を使用し、3次元点群データを用いて面的に評価する手法は、これまでの舗装の施工では、ほとんど活用されていなかった。

そのため、新基準を用いて舗装工事の現場に ICT を導入して生産性向上につなげるには、「地上型レーザースキャナを用いた出来形管理要領(舗装工事編)(案)」にもとづく出来形管理の現場の生産性向上への寄与度や更なる生産性向上に向けたボトルネック等を把握する必要がある。

本論文では、TLSでの計測の実態と問題点の把握、及びカイゼン手法の検証を実現現場で行うことのための検討事項をまとめたので報告する。

### 2. 地上型レーザースキャナを用いた出来形管理要領(舗装工事編)(案)について

当社でもすでにこの新基準が公表される以前から、切削オーバーレイを施工する現場の起工測量に、TLSを活用した事例はあった。主に、交通量の非常に多い幹線道路で、交通規制をしないと測量ができない、交差点内で交通規制をするだけでも非常に多くの手間と労力がかかるなどの場合に、路肩や歩道から面的に3次元点群データを取得することで、安全に道路交通に影響を与えずに計測を行うことが目的として行っていた。計測結果は3次元の面データとしては扱わず、管理断面や変化点他必要な横断面を抽出し、縦横断計画及び切削数量の算出に使用することに利用してきた。その際の精度の確認としては、レベルで計測した既知点と TLS での計測値を数点比較し、結果に影響がないことを確認する程度しか行わず、計測密度に関しては、横断面図を作成するために支障のない

程度の密度での計測を設定し、測定していた。TLSで計測することにより、レベルやTS等で「点」で計測すること比べ、「面」で計測することで、任意の位置で横断面が作成でき、交差点や支道部等の巻き込みなど不定形部の現況が確認できるなどの利点があった。



図-3 TLSによる既設路面計測状況

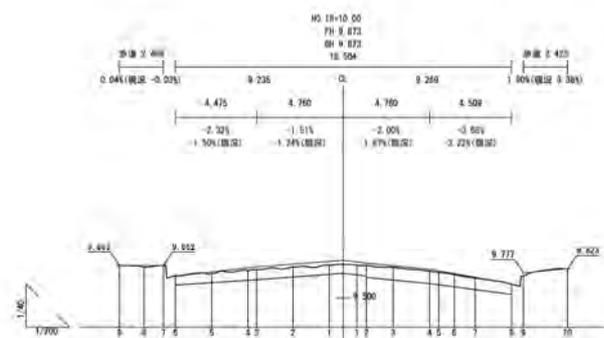


図-4 TLSにより計測した結果から作成した横断面

しかしながら、今回公表された新基準のうち、特に「地上型レーザースキャナを用いた出来形管理要領(舗装工事編)(案)」については、実現場での対応が難しいと思われる内容が記載されていた。

そもそもこの新基準は、ICT ツールを活用し、施工現場における生産性向上を目的として導入されるはずであるが、この基準の中に記載されている TLS 本体の仕様として、計測点群密度が 100c/m<sup>2</sup>あたり 1 点以上、計測精度(鉛直方向)が表層表面で±4mm 以内という「仕様規定」の手順が、実現場における作業性も考慮した状況においての生産性向上へのボトルネックになっていないか、また、さらなる生産性向上に向けてカイゼンする余地はないかを検討を行う必要があると感じた。

本論文では、特に表層工出来形測定時の TLS の計測密度の違いによる精度と作業性に着眼し、生産性向上へ向けての検証事項の検討を行った。

### 3. TLS での計測密度に関する生産性向上への検証事項の検討

下表は、表層工出来形測定の前方法と新基準の測定方法と計測時間の比較(表-1)をまとめたものである。表-1 のように前方法と比べ、新基準では、出来形計測により時間がかかってしまうのではないかという懸念がある。

表-1 表層工出来形測定の前方法と計測時間の比較

	従来方法	新基準
測定方法	厚さ 1000 m <sup>2</sup> に 1 個切取供試体にて測定、幅 80m ごとに TS またはテープにて測定。	TLS により以下の測定精度で計測。差分による厚さあるいは設計面からの標高較差を算出。 計測範囲内で±4mm 以内 平面方向測定精度：計測範囲内で±20mm 以内 評価基準：全面 1 点/m <sup>2</sup> (計測は 1 点/0.01 m <sup>2</sup> )
計測延長	L=1000m, W=10m A=10000 m <sup>2</sup>	L=1000m, W=10m A=10000 m <sup>2</sup>
計測人員	3 名	2 名
計測頻度	幅 1 箇所/80m 厚さ 1 箇所/1000 m <sup>2</sup>	1 回/40m
1 回あたりの計測時間	5 分 10 分	20 分
総測定回数	12.5 回 10 回	25 回
総計測時間	162.5 分	500 分

TLS は指定した範囲にレーザーを連続的に照射し、その反射波より対象物との相対位置(角度と距離)を面的に取得できる装置である。

TLS から発射されたレーザーと被計測対象の入射角が小さくなると計測精度が低下するため、計測距離が遠くなることによって計測精度が低下する可能性がある。

また、TLS の特徴として近距離の計測結果は密となり、遠距離では粗となる。このため、複数の TLS による計測結果を組み合わせでは、計測結果の重複や点群密度のバラツキにより、すべての計測点群データを利用することで、コンピュータの処理を著しく低下させてしまう可能性がある。

「地上型レーザースキャナを用いた出来形管理要領(舗装工事編)(案)」では、出来形計測データについては 0.01 m<sup>2</sup>あたりの 1 点以上という計測密度(点群密度)と表層工においては、±4mm という計

測精度が規定されている。この密度を得るための測定頻度が生産性向上に向けたボトルネックになっているのではないかと考えた。これを解消するため、計測密度の違いや TLS の設置高さの条件の違いによる計測精度と計測時間の比較を行い、最適な計測手段を把握する必要がある。

そこで、以下のような検証計画を行い、さらなる生産性向上への提案を検討した。

### 3.1 TLS の点群計測密度及び TLS 設置高の違いによる計測精度への影響と計測時間の比較内容

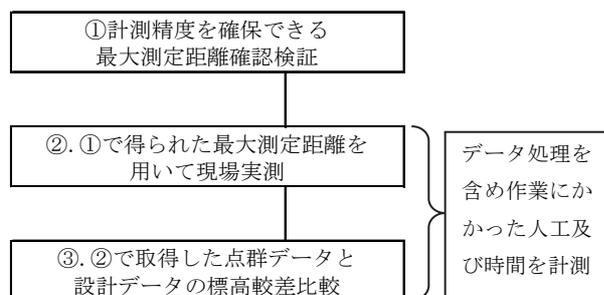
一般に汎用されている TLS を用いて計測を行うと、新基準の 0.01 m<sup>2</sup>に 1 点の計測密度を確保できる範囲は、半径 20m 程度である。また、1 回の計測時間は機械の設置も含め約 20 分である。このため、40m ごとの機械の据え替えが発生し、従来の 80m ごとの幅員の測定や 1000 m<sup>2</sup>に 1 箇所の切取供試体による厚さの測定に比べ、時間がかかることが懸念される。そのため、計測精度を担保しつつ、計測密度を粗くし 1 回の計測範囲を伸ばすことはできないか、また、TLS の計測精度は、機械の設置高差にも左右されるので、設置高を変えることにより計測精度を担保できるのではないかと考え、次のような測定条件(表-2)での検証を検討した。

表-2 測定条件

計測密度	TLS 設置高差
100 点/m <sup>2</sup> (新基準)	H=1.5m
	H=2.0m
50 点/m <sup>2</sup>	H=1.5m
	H=2.0m
25 点/m <sup>2</sup>	H=1.5m
	H=2.0m

上記の測定条件においてそれぞれ下記のフローで計測及びデータの処理を行う(表-3)。

表-3 測定内容詳細およびデータ処理内容



### 3.2 フロー毎の計測方法と計測結果の比較方法

#### 3.2.1 ①最大測定距離確認検証

計測を行う最大距離付近 1 箇所に 1 m<sup>2</sup>以下の検査面を設け、TLS で計測を行う。検査面の高さとして TLS を用いて計測した結果から得られる高さを比較し測定精度以内であることを確認する。検査面の高さは、検査面の中心を TS 及びレベルで計測し 4 隅の高さの平均値により高さを求める。この際の鉛直精度が±4mm 以内であることを確認する(図-5)。この作業を計測密度を 100 点/m<sup>2</sup>、50 点/m<sup>2</sup>、25 点/m<sup>2</sup>と変えてそれぞれの計測密度での最大測定距離を検証する。

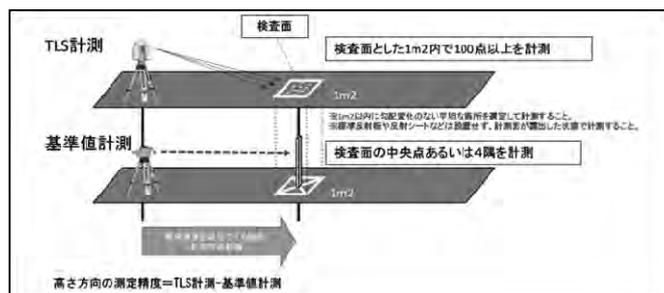


図-5 鉛直方向の精度確認方法

平面方向の計測性能については、TLS で計測を行う最大距離付近及びそれ以上離れた位置に 10m 以上離れた 2 つの既知点を設置し、2 点間の距離を TS にて計測する。その距離と TLS で計測した 2 点間の距離を比較し、±20mm 以内であることを確認する。(図-6)

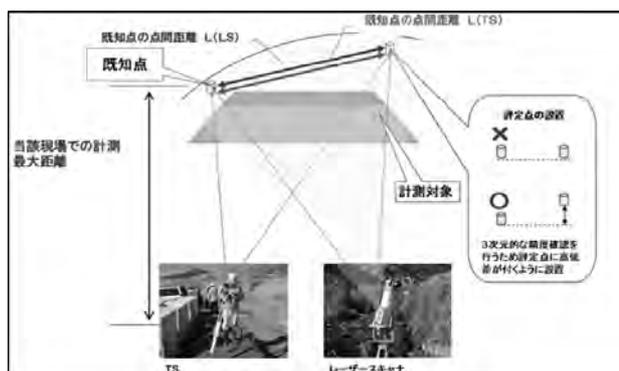


図-6 水平方向精度確認方法

#### 3.2.2 ②現場実測

TLS にて、①で得られた最大測定距離の間隔で機械を据え替え計測し点群データを取得する。この際のスキャンの設定は、①で最大測定距離を求めた設定条件で行う。この計測に要した人工及び時間を計測する。

#### 3.2.3 ③標高較差比較

②現場実測で得られた点群データを出来形評価評価の基準に則り処理し、設計データとの標高較

差を算出する。この処理に要した人工及び時間を計測する。

### 3.2.3 計測結果比較

計測結果より、以下のデータを取りまとめ、さらなる生産性向上が見込める方法を検討、提案する。(表-4、表-5、表-6)

表-4 ①についての比較

TLS の設置高	H=1.5m (H=2.0m)		
TLS の測定密度	100 点/m <sup>2</sup>	50 点/m <sup>2</sup>	25 点/m <sup>2</sup>
最大測定距離	L=〇〇m	L=〇〇m	L=〇〇m
鉛直方向計測精度(規格値)	実測〇mm (±4mm 以内)	実測〇mm (±4mm 以内)	実測〇mm (±4mm 以内)

表-5 ②についての比較

TLS の設置高		H=1.5m (H=2.0m)		
TLS の測定密度	従来方法	100 点/m <sup>2</sup>	50 点/m <sup>2</sup>	25 点/m <sup>2</sup>
計測延長及び面積	L=〇m, A=〇m <sup>2</sup>	L=〇m, A=〇m <sup>2</sup>	L=〇m, A=〇m <sup>2</sup>	L=〇m, A=〇m <sup>2</sup>
計測回数(計測箇所数)	幅〇箇所 厚さ 〇 箇所	〇回	〇回	〇回
現場作業時間	〇分	〇分	〇分	〇分
出来形管理表作成時間	〇分	〇分	〇分	〇分
合計時間	〇分	〇分	〇分	〇分

表-6 ③についての比較

TLS の設置高	H=1.5m (H=2.0m)		
TLS の測定密度	100 点/m <sup>2</sup>	50 点/m <sup>2</sup>	25 点/m <sup>2</sup>
計測延長及び面積	L=〇m, A=〇m <sup>2</sup>	L=〇m, A=〇m <sup>2</sup>	L=〇m, A=〇m <sup>2</sup>
設計データとの標高較差	〇mm	〇mm	〇mm

### 4. 今後の展開

今回は、さらなる生産性向上を目標に各実施内容の生産性向上への寄与度やボトルネックになる部分の抽出、検証内容の検討を行った。実際の現場での検証は未実施のため、この検証結果がさらなる生産性向上へつながるかは未知数であるが、早期に検証を実施し、ICT 土工において発表から1年で基準が改定されたように、より良い方法があれば取り入れてもらえるよう提案していきたい。

また、本論文で挙げた検証内容以外にも以下のような課題を解決する必要があると思われる。

①舗装面のレーザーの反射率による点群データ取得への影響

舗装舗設完了直後の舗装面を汎用されている TLS で計測しても舗装面のデータが得られない場合がある。黒色に対するレーザーの反射率が影響しているのではないかと考えられる。今後、既設舗装の修繕工事にも展開された際、即日 2 層の舗設を行うこともあり舗設完了直後に出来形測定を行うこともあるので、早期に解決策を検討する必要がある。

②標高較差による管理と厚さによる管理の併用の課題

ICT 舗装工では、出来形管理の方法として、各層の計測データの差分から厚さを求めて評価する方法と、各層ごとに設計データとの標高較差を求めて評価する方法の 2 種類がある。標高較差で管理する場合には、上層の設計面データを作成するためにその下層の標高較差の平均値を加減し、上層の設計面データとしなければならない。延長の長い道路や現場条件に制約がある現場では、例えば、全区間で路盤工が完了する前に、基層工を施工することも多々ある。全区間ある層が完了し、設計データを修正するまで上層の施工に進めないのでは、生産性が低下してしまう。従来通り厚さ管理のみの基準でよいのではないかと検討し提案する必要がある。

### 5. おわりに

平成 29 年 3 月に ICT 舗装工についての要領がでて数カ月が過ぎた。すでに ICT この基準を適用して施工を行っている現場もあると思われるが、国土交通省が進める i-Construction の目的は、建設産業全体の生産性の向上を目指しているものであり、それを阻害してまで基準にこだわるものではないと思われる。平成 28 年 4 月に出された i-Construction の報告書では、現状を「更に」よくするための提案は積極的に受け入れる「カイゼン」姿勢を国もとっている。そのためには、検証結果に裏付けされた施工性をさらにカイゼンする提案は、積極的に行う必要があると思われるし、積極的に受け入れてもらうことが可能であると思われる。

本論文がその一部を担えればと思う。

## 12. 群馬県における ICT 試行工事に関する研究

群馬工業高等専門学校  
群馬工業高等専門学校

○ 先村 律雄  
六本木晶瑚

### 1. はじめに

群馬県は、平成 28 年度から ICT を活用した試行工事を開始した。(図-1 参照) 今回、この工事データを利用できる機会があった。そこで、ICT によって生産性向上があると考えられる、準備工、起工測量および施工データ作成の 3 つの業務に着目して、従来法と ICT 工法の比較をおこなう。

群馬県の冬季は、赤城おろしと呼ばれる季節風があるため、UAV<sup>1)</sup>は生産性に何らかの影響を及ぼすと予想した。今回の工事は UAV 計測を利用しており、準備工、起工測量および施工データ作成に関して、作業時間および技術者の職種がどのように変わったのか、従来工法と比較をおこない考察する。そして、今後の進め方についても述べる。



図-2 工事場所 (Google Map より)



図-1 ICT 工事開始のお知らせ (群馬県 HP)

### 2.2 施工箇所

ICT 施工の工区は図-3 の“1 工区”、従来方法は“2 工区”と“F 工区”である。ICT 施工は、路線方向約 140m、図-4 は標準断面で施工区間の横断幅は約 28~70m である。従来施工は、両工区を合わせて路線長、約 140m である。

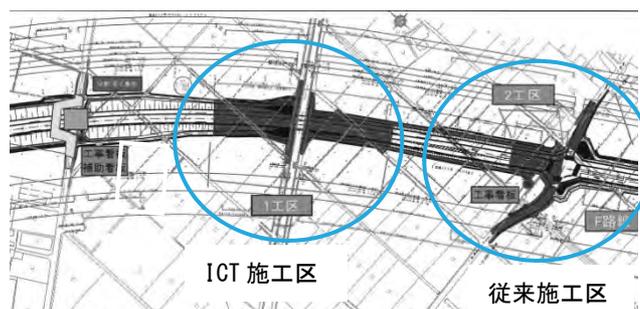


図-3 施工エリア

### 2. 試行工事概要

#### 2.1 概要

工事名：補助公共社会資本総合整備(活力・重点) 分割 5 号 軟弱地盤対策盛土工事及び取付町道築造工事

発注者：群馬県館林土木事務所長

路線名：国道 354 号 板倉北川辺バイパス

工期：平成 28 年 11 月 17 日ー平成 29 年 3 月 31 日

盛土工：ICT 工区:5164.2m<sup>3</sup> 従来工区:891.9 m<sup>3</sup>

工事場所：図-2 参照

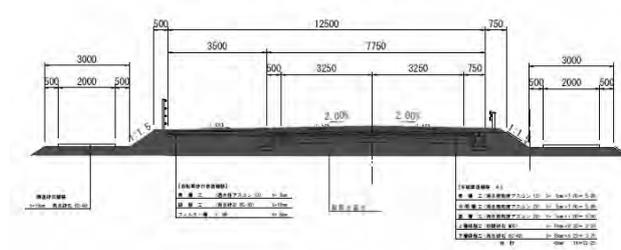


図-4 標準断面図

### 3. 従来工法と ICT 工法の比較

図-3 に示す通り、異なる工区・規模で比較するため、同一条件とはならない。よって、数値の大小による比較はおこなわない。

#### 3.1 作業時間

生産性向上の効果は、作業時間を用いる。作業時間は同時間でも、その現場で登場する技術者の職種によって、単価は変わる。表-1 に平成 29 年度の設計業務委託等技術者単価を示す。

表-1 平成 29 年度技術者単価表(設計業務)

技術者の職種	基準日額(円)
主任技術者	64,300
理事、技師長	60,400
主任技師	51,200
技師(A)	45,500
技師(B)	37,200
技師(C)	30,000
技術員	25,400

技術員の基準単価を 1.0 とした場合、主任技術者は同時間で 2.53 の生産性があると考え、これを職種ごとに換算時間した係数を表-2 に示す。

表-2 技術員を 1.0 とした職種換算時間係数

技術者の職種	職種換算時間係数
主任技術者	2.53
理事、技師長	2.38
主任技師	2.02
技師(A)	1.79
技師(B)	1.46
技師(C)	1.18
技術員	1.00
測量主任技師	1.63
測量技師	1.31
測量技師補	1.06
測量助手	1.06
測量補助員	0.86

図-3 の ICT 施工と従来施工で登場する技術者の、実作業時間と職種換算時間、およびその比率から比較をおこなう。

#### 3.2 作業時間の計算

今回比較する、準備工、起工測量および施工データ作成の 3 つに対して、各工程で登場した技術者および作業内容が何かを調査する。次に、その技術者が各作業内容にどれだけの作業時間を要したかを調査する。調査は施工業者が記入した作業

日報から求めた。

ある工程で技術者が要した総作業時間は式(1)、(2)で与えられる。

$$P_i = \sum_{j=1}^m WorkTime_j \quad \text{----- (1)}$$

$$PC_i = C_i \sum_{j=1}^m WorkTime_j \quad \text{----- (2)}$$

ここで、

$P_i$ : ( $i = 1 \sim n$ )

技術者がその業務に要した総作業時間(h)

$n$ : その業務で登場した技術者の数

$PC_i$ :  $P_i$ を職種換算した作業時間(h)

$C_i$ : 技術者の職種換算時間係数

$WorkTime_j$ : ( $j = 1 \sim m$ )

技術者がその作業に要した作業時間(h)

$m$ : その工程で発生した作業の数

とする。

式(1)、(2)から、その業務の総作業時間は式(3)、(4)で与えられる。

$$T = \sum_{i=1}^n P_i \quad \text{----- (3)}$$

$$TC = \sum_{i=1}^n PC_i \quad \text{----- (4)}$$

ここで、

$T$ : その業務の総作業時間(h)

$TC$ : その業務の職種換算時間した総作業時間(h)

とする。

式(1)~(4)を用いて作業時間を計算する。

#### 3.2 準備工比較項目

従来工法はトータルステーションとレベル、UAV 工法は UAV と GNSS を使用している。表-3 に比較する作業項目を示す。

表-3 準備工比較表

	従来工法	ICT 工法
作業項目	1 新点設置:7 点 2 水準設置:4 点	1 標定点設置:12 点 2 UAV 飛行計画作成 3 飛行申請 4 施工基準点作成
技術者	1 測量主任技師 2 測量技師 3 測量技師補 4 測量助手	1 測量主任技師 2 測量技師 7 技師(B) 8 技術員

### 3.3 起工測量比較

表-4 に起工測量の比較項目を示す。

表-4 起工測量比較表

	従来工法	ICT 工法
作業項目	1 中心線形計算 2 縦断測量 3 横断測量 4 成果作成	1 UAV 飛行作業 2 データ取り込み 3 写真測量解析 4 ポイントクラウド 5 3D モデリング 6 成果作成
技術者	1 測量主任技師 2 測量技師 3 測量技師補 4 測量助手	1 測量主任技師 2 測量技師 3 技師(B) 4 技術員

### 3.4 データ作成比較

表-5 に施工データ作成の比較項目を示す。

表-5 施工データ作成比較表

	従来工法	ICT 工法
作業項目	1 丁張設置	1 TIN データ作成 2 ローカライズ 3 モデルチェック
技術者	1 測量技師 3 測量技師補 4 測量助手	5 主任技師 6 技師(A) 2 測量技師

## 4. 作業時間計算

### 4.1 各作業項目の作業時間

結果を表-6 に示す。表の“従 1”、“技 1”は準備工であれば、“新点設置:7 点”、“測量技師”を意味する。

表-6 各作業項目の作業時間

業務：準備工(h)

	従 1	従 2	ICT1	ICT2	ICT3	ICT4
技 1	8.0	4.0	8.0		8.0	
技 2	8.0	4.0	8.0	8.0		8.0
技 3	8.0	4.0				
技 4	8.0	4.0				
技 7			8.0		8.0	8.0
技 8			8.0	8.0		8.0

業務：起工測量(従来工法:h)

	従 1	従 2	従 3	従 4
技 1	8.0	4.0	4.0	16.0
技 2	8.0	4.0	4.0	16.0
技 3	8.0	4.0	4.0	16.0
技 4	8.0	4.0	4.0	8.0

業務：起工測量(ICT 工法(h))

	ICT1	ICT2	ICT3	ICT4	ICT5	ICT6
技 1	24.0				8.0	16.0
技 2	24.0	4.0	8.0	16.0	24.0	
技 3	24.0	4.0	16.0	8.0		16.0
技 4	24.0					8.0

業務：施工データ作成(h)

	従 1	ICT1	ICT2	ICT3
技 1	16.0			
技 2		8.0	8.0	16.0
技 3	16.0			
技 4	16.0			
技 5		8.0	16.0	8.0
技 6		16.0	8.0	8.0

### 4.2 技術者が各業務に要した作業時間

式(1)、(2)を用いて、技術者が各業務に要した時間を計算する。結果を表-7 に示す。

表-7 技術者が各業務に要した作業時間

業務：準備工(h)

	従来	ICT	従来(換)	ICT(換)
技 1	12.0	16.0	19.6	26.1
技 2	12.0	24.0	15.7	31.4
技 3	12.0		15.7	
技 4	12.0		12.7	
技 7		24.0		35.0
技 8		24.0		16.0

業務：起工測量

	従来	ICT	従来(換)	ICT(換)
技 1	32.0	48.0	52.2	78.2
技 2	32.0	76.0	41.9	99.6
技 3	32.0	68.0	33.9	72.1
技 4	24.0	32.0	25.4	33.9

業務：施工データ作成(h)

	従来	ICT	従来(換)	ICT(換)
技 1	16.0		26.1	
技 2		32.0		41.9
技 3	16.0		17.0	
技 4	16.0		17.0	
技 5		32.0		27.5
技 6		32.0		57.3

表の(換)は、表-2 に示す職種換算時間係数を用いて時間を計算したものである。

### 4.3 各業務に要した総作業時間

式(3)、(4)を用いて、各業務に要した総作業時間を計算する。結果を表-8 に示す。

表-8 技術者が各業務に要した総作業時間

業務	従来	ICT	従来(換)	ICT(換)
準備工	48	80	61	109
起工測量	120	224	153	284
施工データ作成	48	96	60	127
総計	216	400	274	519

#### 4.4 強風による影響

表-6 の起工測量 (ICT) で” ICT1” : UAV 飛行作業は、半日程度の作業の見込みが、強風により3日間の作業時間となったため、作業時間を要した。予定の飛行ができれば、96h が 24h の可能性があった。

### 5. まとめ

#### 5.1 準備工に関する比較

表-9 の数値は、表-8 の総作業時間を職種換算時間で除したもので、単価の高い技術者が増えるとこの値は大きくなる。ICT 工法の準備工は、この数値が最も大きかった。これは、写真測量と解析およびマシンコントロール(MC)までの知識・経験を持った技師(B)が、基準点の選点および 3D 解析をおこなう必要があったためと考えられる。ICT 工法は、これらを扱える能力を持った技術者が望まれることがわかる。

表-9 総職種換算時間/総時間による比較

業務	従(換)/従	ICT(換)/ICT
準備工	1.27	1.36
起工測量	1.28	1.27
施工データ作成	1.25	1.32

#### 5.2 起工測量に関する比較

UAV は、気象条件の制約を受けやすい。ICT 工法は、強風により3日間 UAV の飛行ができなかった。群馬の冬は、強風ありきでの飛行計画が必要である。気象条件を満たせば、半日で現況データを取得できることは魅力的であるが、地域・時期によって UAV 計測は最適ではないことがわかった。

#### 5.3 施工データ作成に関する比較

従来工法は、現場での丁張設置作業が中心である。ICT 工法は、3D 設計データの作成、3D 施工データ変換等、机上作業が中心である。ICT 工法は、主任技師、技師(A)レベルの技術者が登場しているため、一般現場事務所レベルで、3D データを扱う技術者はまだ少ないと考えられる。施工データは、設計変更・施工プロセスに従い何回も作成

するため、3D データを扱える能力を持った技術者が望まれることがわかる。

#### 5.4 ICT 工法による成果物

図-5 は、今回の ICT 工法で得られた現況・設計モデルである。従来工法の成果と異なり、3D デジタルデータは施工中および維持管理のための再利用が容易であるため、生産性向上に不可欠である。

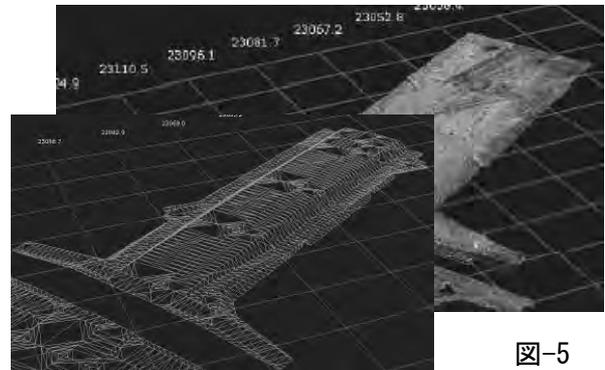


図-5 ICT 工法成果物例(現況・設計モデル)

### 6. 今後の課題

#### 6.1 UAV とレーザースキャナー

群馬県の冬季は、レーザースキャナーによる計測も考慮する必要がある。UAV とレーザースキャナーを状況に応じて選択、あるいは混在して計測および 3D 解析をおこなうことができる技術者の存在が必要である。

#### 6.2 3D データの扱いと作業分担

ICT 施工は、丁張設置作業を 3D データが担うが、3D データの扱いは、難しく面倒である。更に、3D データを編集するには複数のソフトウェアに精通する必要があり、敷居は高い。現場事務所は施工だけに集中し、3D データ作成は専門家に任せる分散型がよいのか、現場事務所でも 3D データ作成も含めた完結型が最適なのか、更に研究する。

#### 6.3 3D データに着目した調査・研究

群馬県は、今年度も引き続き ICT 試行工事をおこなう予定である。ICT 工法で必須の 3D 計測・3D データ作成のプロセス向上に着目して研究する。

#### 謝辞

群馬県県土整備部建設企画課より、本試行現場のデータ・情報等の提供を頂いた。ここに記して、感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省：空中写真測量(無人航空機)を用いた出来形管理要領(土工編)(案), pp35,2016, 24-32

# 13. フレッシュコンクリートの型枠内流動に対する 2次元リアルタイムシミュレータの開発

三重大学大学院工学研究科 ○ 三島 直生  
 琉球大学工学科 山田 義智  
 琉球大学工学科 崎原 康平

## 1. はじめに

将来的な労働者不足の対策が緊急の課題となっている建設業において、コンクリート工事は最も生産性の改善が遅れている分野の一つであり、早急な対策が求められている<sup>1)</sup>。

コンクリート工事における生産性向上および品質確保を目的として、フレッシュコンクリートの型枠内流動移動を数値解析により予測するための研究が多く行われている<sup>2)</sup>が、一般的な工事の大多数で使用されている普通コンクリートの振動締固めやポンプの筒先移動などを再現することのできる解析手法はほとんど無い。

本研究では、これらの複雑な状況をシミュレートすることを目的として、フレッシュコンクリートの流動解析をリアルタイム化し、振動機およびポンプの筒先の移動を、実施工と同じようにフレッシュコンクリートの流動状況を確認しながら解析内で行える手法の開発を試みている<sup>3)</sup>。

本報では、実際の無筋中型壁型枠内のフレッシュコンクリートの流動実験の結果と比較することで、本解析手法によるフレッシュコンクリートの流動挙動の再現性を検証した。

## 2. 中型壁型枠内流動実験

### 2.1 実験概要

#### (1) 使用材料およびコンクリートの調合

表-1に使用材料を、表-2にコンクリートの調合表を示す。本実験では、フレッシュコンクリート(以下、単にコンクリート)の目標スランブを18cmおよび8cmの2水準に変化させた。ただし、コンクリートは同一のものを扱い、表-3に示すように経時変化によるスランブの低下を利用してスランブを変化させた。スランブ試験は型枠内流動実験の前で実施した。

#### (2) 試験方法および測定項目

スランブ試験はJIS A 1101に準拠して行った。

型枠内流動実験は、後述する型枠に対するコンクリートの打込みの様子を、透明な型枠側面から

表-1 コンクリートの使用材料

使用材料	特性
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度: 3.15g/cm <sup>3</sup>
細骨材	安濃川産陸砂, 密度: 2.63g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	志摩産硬質砂岩砕石, 最大寸法 20mm, 密度: 2.68g/cm <sup>3</sup>
混和剤	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤

表-2 コンクリートの調合表

W/C	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				HAE/C (%)
	W	C	S	G	
0.56	182	325	804	924	0.46

[注]W: 水, C:セメント, S: 細骨材, G: 粗骨材, HAE/C: セメントに対する混和剤の質量添加率

表-3 実験のタイムスケジュール

時刻	作業内容	スランブ*
16:40	コンクリート練上り (静置: 10min)	
16:50	スランブ試験	19.2 cm
16:54	型枠内流動実験 (1回目)	
16:56	スランブ試験 (静置: 25min)	17.9 cm
17:23	ミキサでの再攪拌、スランブ試験	9.7 cm
17:27	型枠内流動実験 (2回目)	
17:30	スランブ試験	6.4 cm

[注]\*: 実測した生データを示す。

デジタルビデオカメラで測定した。測定画像から、打込み時は10sごと、振動締固め時は1sごとに画像を抽出し、コンクリートの充填形状を得た。

実験は2017年8月9日に実施し、実験実施時の環境条件は温度29.0℃、湿度65%RHであった。

#### (3) 型枠および打込み方法

図-1に使用した型枠の形状・寸法を示す。内寸は700×1400×100(mm)の無筋の壁型枠としたが、型枠固定用のセパレータは使用した。型枠材料にはコンクリート用型枠合板を用い、図-1の手前側の1面のみ、コンクリートの流動状況を計測するために12mm厚の透明ポリカーボネート板とした。

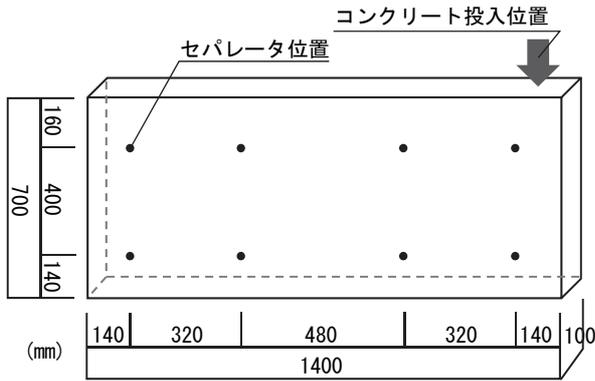


図-1 中型壁型枠の形状・寸法

コンクリートの投入位置は、図-1の右上角部とし、投入位置のコンクリートが型枠天端に達した時点で打込みを終了した。このため、コンクリートのスランプによって打込み時間および打込み体積は異なる。

打込み方法は、容量約1Lのハンドスコップを用いて2sで1杯のペースで連続して投入した。打込み速度および打ち込まれたコンクリートの体積は、型枠側面から見たコンクリートの面積を画像解析により求めて算定した。表-4に、目標スランプ、実測スランプ（型枠流動実験前後の平均値）、打込み時間、打込み体積および打込み速度を示す。

1回目の型枠内流動実験（目標スランプ：18cm）では、打込み完了後に、棒状バイブレータ（振動数200～250Hz、振幅1.5mm、振動部径28mm、振動部長さ186mm）による振動締め固めを行い、充填状況の測定を行った。

## 2.2 実験結果とその考察

写真-1に、型枠内流動実験から得られた測定画像の例を示す。補剛材に隠れた部分の形状は、周囲のコンクリートの位置から内・外挿して求めた。

### (1) 打込み過程

図-2に、壁型枠内の打込み過程の時刻歴を示す。

図(a)に示すスランプ18.5cmでは、打込み開始60s後にコンクリートが型枠の左端に到達し、その後、流動勾配が大きくなる傾向がある。これは、型枠底部のすべりの影響でコンクリートの先端が型枠左端に到達するまでは流動勾配が小さくなるためと考えられる。

図(b)に示すスランプ8.0cmでは、10～40sの間は水平方向の流動がほとんどなく、コンクリートが上方に積み上がっている。その後、50sの時点で上層のコンクリートが左下方に崩れ流動勾配が多少緩やかになったが、図(a)に示すスランプ18.5cmと比べると明らかに流動勾配は大きくなった。

### (2) 締め固め過程

図-3に、スランプ18.5cmの場合の、振動締め固め過程の時刻歴を示す。同図中には棒状バイブレータの挿入位置も示す。棒状バイブレータは振動さ

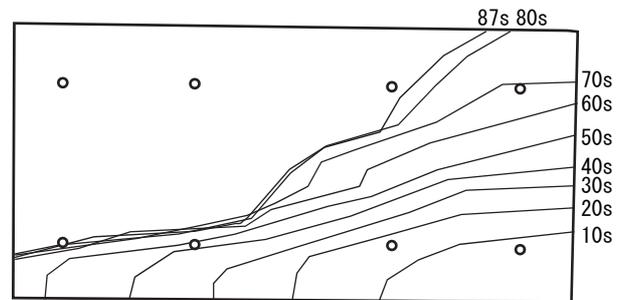
表-4 壁型枠への打込み条件

項目	1回目	2回目
目標スランプ (cm)	18	8
実測スランプ* (cm)	18.5	8.0
打込み時間 (s)	87	60
打込み体積 (L)	47.4	30.5
打込み速度* (L/s)	0.545	0.509
(m <sup>3</sup> /h)	1.96	1.83

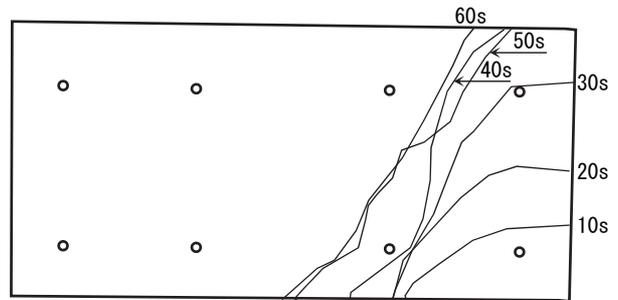
[注]\*：平均値を示す。



写真-1 型枠内流動実験の測定画像の例（1回目、50s）



(a) 1回目（スランプ18.5cm）



(b) 2回目（スランプ8.0cm）

図-2 コンクリートの打込み過程の時刻歴

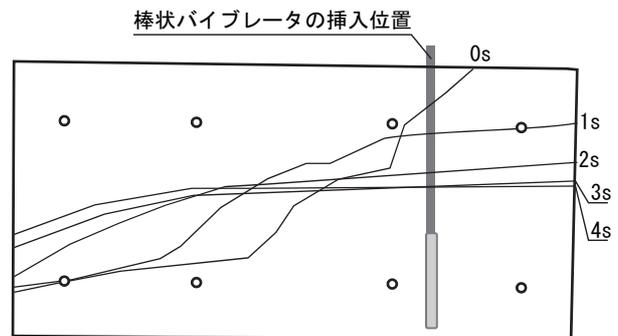


図-3 コンクリートの振動締め固め過程の時刻歴（1回目、スランプ18.5cm）

せた状態で鉛直に挿入し、底部に達した直後に鉛直に抜去した。振動時間は挿入開始から抜去完了までで4s間であった。コンクリートの流動は棒状バイブレータの抜去とほぼ同時に停止した。

コンクリートの流動は、振動開始とともに上部のコンクリートが左下方に流動し、棒状バイブレータ近傍はほぼ水平となって流動が停止した。本実験で用いた壁型枠は壁厚が100mmと薄いため、型枠自体も振動して流動化範囲が通常よりも広くなった可能性が考えられる。

### 3. 2次元リアルタイムシミュレータによる解析

#### 3.1 解析概要

本解析で用いる物理演算方法は、粒子法に近い解析手法を大幅に簡略化し、リアルタイム解析を実現した解析エンジン<sup>4)</sup>をフレッシュコンクリートの流動解析に適用したものである。本シミュレータの主な特徴は以下の通りである<sup>3)</sup>。

- 1) 2次元のリアルタイム解析である
- 2) 振動機およびポンプの筒先が自由に移動可能
- 3) 形状寸法の設定により型枠および配筋が自動作成される
- 4) コンクリートの状態を流動状態、停止状態、振動下の流動化状態の3段階に分類している(表-5参照)

本解析は、物理演算方法としては厳密性に欠けるため、解析で用いるコンクリートの流動パラメータをレオロジー試験などで実測して決定することができない。このため、実験と同じ条件を再現した逆解析により流動パラメータを同定する必要がある。本報では、先述の中型壁型枠内流動実験を再現した解析を行い、コンクリートの流動の再現性を検証する。

表-6に、本報で実施する解析の設定条件の一覧を示す。このうち、コンクリートの流動性を調整するために、粘性に関連したviscousStrength(以下、vis.Stre.)および降伏値に関連した流動停止速度 $v_s$ を変化させた。また、バイブレータの影響範囲(コンクリートが流動化する範囲)は型枠による振動伝播を考慮して、広めの500mmとした。ポンプの吐出速度およびコンクリートの打込み体積は、実験結果に基づき各スランブに対応した値を用いた。

#### 3.2 解析結果とその考察

##### (1) 解析結果の変動

図-4に、全ての設定条件を同一として実施した5回の解析結果(コンクリートの充填形状)の比較を示す。図(a)に示す打込み完了後の結果からは、充填高さで100mm程度、型枠中央部付近の流動勾配で25°程度の差が発生している。このような結果の変動の原因は、本解析でポンプの筒先から吐出されるコンクリート粒子が、ポンプ筒先の幅(200mm)の範囲内のランダムな位置に生成される

表-5 コンクリートの物性の分類<sup>3)</sup>

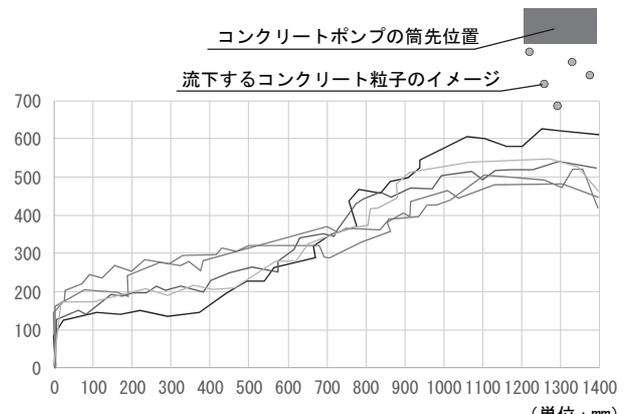
フレッシュコンクリートの状態	状態の存在条件	フレッシュコンクリートの特性
(a) 通常の流動状態	流速 $> v_s$	高粘度流体
(b) 流動の停止状態	流速 $\leq v_s$	剛体
(c) 振動下の流動化(液状化)状態	振動機による流動化範囲内	完全流体

[注]  $v_s$ : 粒子が流動停止する速度

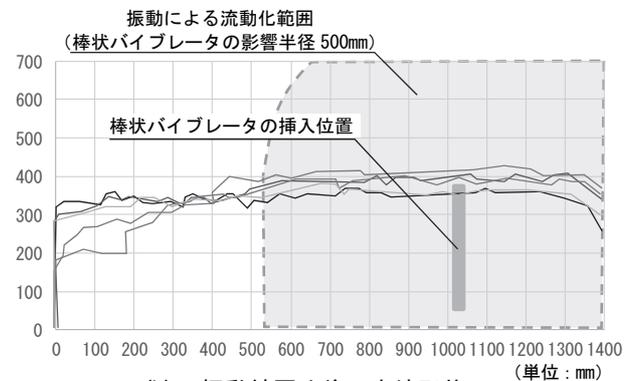
表-6 解析の設定条件一覧

項目	設定値等	
解析の時間刻み	1/60 (s)	
型枠・配筋	部材種別	壁
	型枠寸法	高さ 700×幅 1400×厚さ 100 (mm)
	配筋	無し
コンクリート	粒子半径	0.02 (m)
	粒子密度	2.23 (g/cm <sup>3</sup> )
	dampingStrength*	1.0
	viscousStrength* 粒子が流動停止する速度 $v_s^*$	解析対象の流動性に応じて変更
バイブレータの影響範囲	半径 500 (mm)	
ポンプの吐出速度**	1.96, 1.83 (m <sup>3</sup> /h)	
打込み体積**	47.4, 30.5 (L)	

[注]\*: 表-5(a)の状態における設定値、\*\*: スランブごとに実験の実測結果を設定

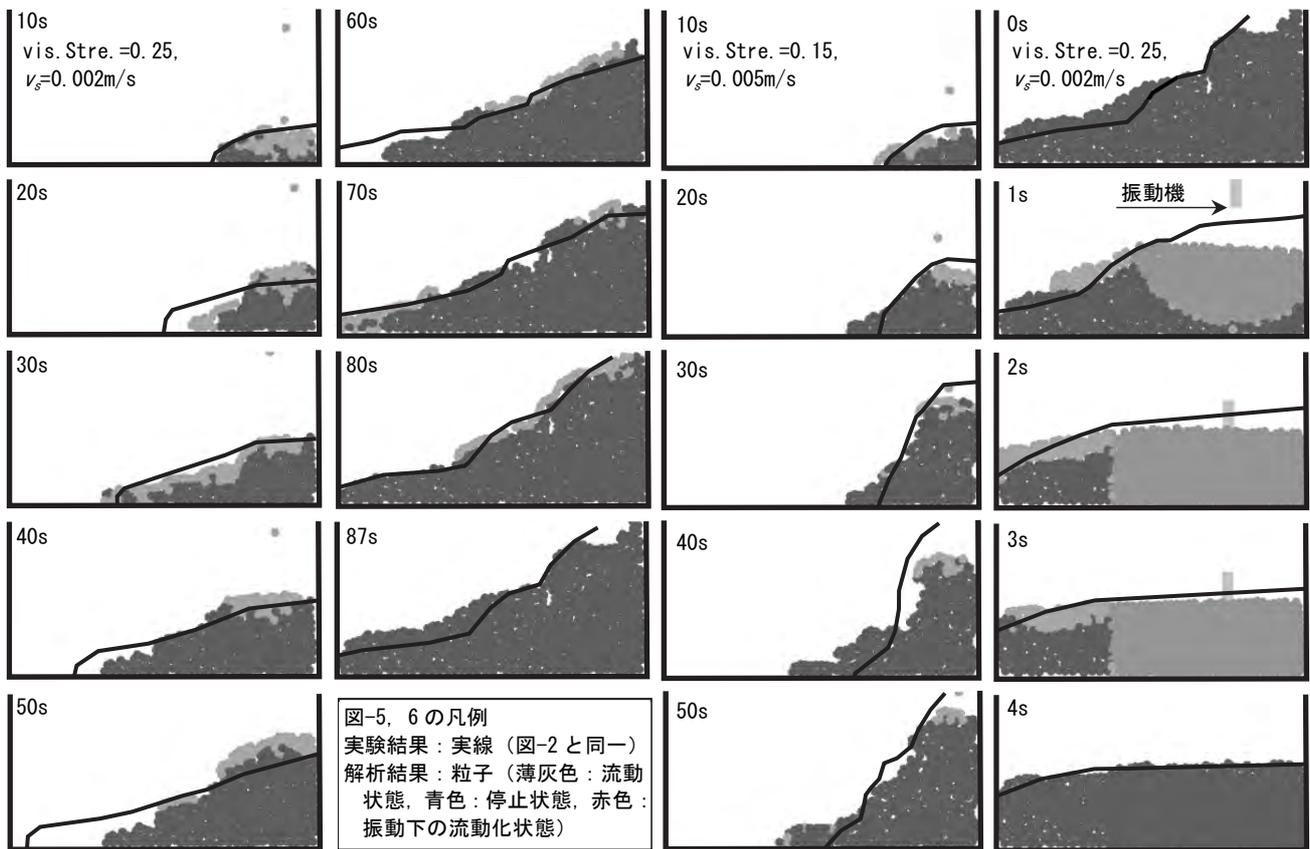


(a) 打込み完了後の充填形状 (単位: mm)



(b) 振動締め後の充填形状 (単位: mm)

図-4 同一設定条件下での5回の解析結果の比較  
(vis. Stre.=0.1,  $v_s = 0.002$ m/s,  
吐出速度=1.96m<sup>3</sup>/h, 打込み体積=47.4L)



(a) スランプ 18.5cm

(b) スランプ 8.0cm

図-6 振動締め時の比較 (スランプ 18.5cm)

図-5 打込み時における実験結果と解析結果の比較

ことによる微妙な違いに起因していると考えられる。この変動幅を減らす方法としては、コンクリートの吐出位置を固定すること、およびコンクリート粒子のサイズを細かくすること等が考えられる。ただし、実施工においても、同一調合、同一スランプのコンクリートで、同条件で打ち込んだとしても完全に同じ結果とはならず、ある程度の変動幅を持った挙動としてとらえる方が実用上は妥当と考えることもできるため、この解析結果の変動の取扱いについては今後の課題とする。

図(b)には、振動締め後の充填形状の比較を示す。振動の影響範囲を中心に、振動前と比べて変動幅は小さくなっているとみることができる。

## (2) 実験結果の再現性

図-5 および図-6 に、それぞれ打込み時および振動締め時の実験結果と解析結果の比較を示す。実験結果は前掲図-2 のデータをそのまま用い、解析結果については実験結果に近くなるように  $vis.Stre.$  および  $v_s$  を調整した結果の一例を示す。

図-5 からは、スランプの異なるコンクリートの型枠内の充填状況を、流動性に関する 2 つのパラメータの調整により、時刻歴まで含めて概ね一致させることができている。

図-6 からは、振動締めによる流動化および充填の状況をほぼ正確に再現できている。また、無振動で打ち込まれた時点では、コンクリート内部

に空隙が見られるが、振動締めされた領域ではこの空隙が充填され、緻密なコンクリートとなっていることが解析的に表現されている。

ただし、ここで示した解析結果は比較的实验結果に近いものを例示しており、同一条件下での解析でも前述したように結果がある幅で変動するため、流動パラメータの決定方法および運用方法についてはさらに検討を進める必要がある。

## 謝辞

本実験を実施するにあたり、木村洸貴君(三重大学学生)の助力を得た。付記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) i-Construction 委員会報告書, i-Construction 委員会, 2016.4
- 2) コンクリートの確実な施工のための PDCA サイクル研究委員会報告書, 日本コンクリート工学会, 2016.9
- 3) 三島直生・山田義智・崎原康平・谷口遼: フレッシュコンクリートの壁型枠内流動に関する 2 次元リアルタイム解析手法の開発に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39(1), pp.1213-1218, 2017.7
- 4) LiquidFun Programmer's guide, <http://google.github.io/liquidfun/Programmers-Guide/html/index.html>

# 14. 注水併用エアクーリング工法によるコンクリートの温度ひび割れ抑制対策

株式会社熊谷組 土木事業本部 神崎 恵三

## 1. はじめに

近年コンクリート構造物の品質向上として、施工時の水和熱の上昇による温度ひび割れ対策が取り上げられることが多い。この対策の一つとして、コンクリート中に設置したクーリングパイプに冷媒を流すことによりコンクリートの温度上昇を低減し、有害なひび割れの発生原因となる温度応力を抑制するパイプクーリング工法がある。従来から冷媒としては比熱の大きい水を用い、コンクリートダムや大型橋脚基礎など大規模なコンクリート構造物に適用されてきているが、近年では特別な冷却設備や複雑なクーリングパイプの配管を必要としない簡易な鉛直パイプクーリング工法が、一般的な函渠構造物や橋台等に適用される例も増えている。

また、橋梁等の PC 構造物においてはコンクリート内のシース管などをクーリングパイプとして利用し、冷媒として空気を送風することでコンクリートの温度上昇を抑制するエアクーリング工法が用いられる例もある。

## 2. 注水併用エアクーリング工法の特長

筆者は、施工スペースの制約がある地下構造物や中規模の構造物における温度ひび割れ対策として、通水によるパイプクーリング工法に代えて、設備が簡易なエアクーリング工法の採用を考えた。これをベースに、送風時に少量の注水を行うことで冷媒となる空気温度が低くなることに着目し、「注水併用エアクーリング工法」を考え、適用した(図-1)。

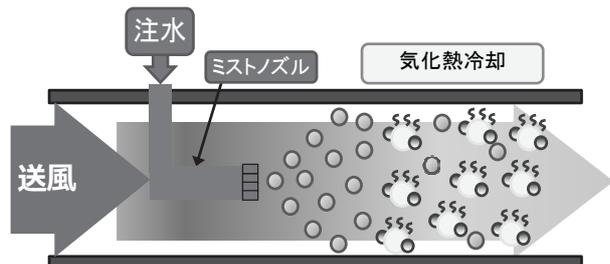


図-1 注水併用エアクーリング模式図

注水併用エアクーリング工法の特長は、従来の通水によるクーリング工法と比較して、大規模な給水設備や排水処理設備が不要で、簡易な設備で実施可能で、コストが抑えられる。また、空気によるクーリング工法は、夏季では冷媒となる空気の温度が高く、水に比べて比熱や熱伝導率が小さいが、注水することにより、これらの欠点を補い、温度抑制効果を高めるものである。

適用にあたり、室内試験による検証を行ったのち、実構造物で施工を行うこととした。

本稿では、このような注水を併用した新しいエアクーリング工法の適用事例として、室内試験および実施工における内容を報告する。

## 3. 函渠構造物側壁部への適用

### 3.1 工事概要

工事概要を表-1に示す。本工事は外環自動車道のうち市川市区間における延長 200m の大規模開削工事であり、図-2に示す函渠構造物を地下 15m に構築するものである。

表-1 工事概要

工事名称	田尻地区函渠その5工事
工事場所	千葉県市川市田尻5丁目
発注者	国土交通省関東地方整備局
工期	平成23年12月22日～平成28年3月25日

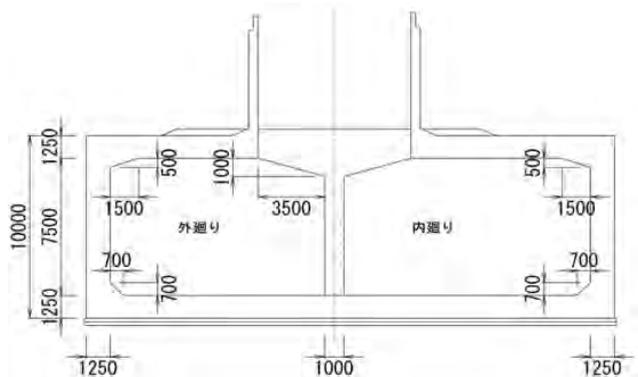


図-2 標準断面図

本工事では、厚さ 1.25m の側壁施工において底版の拘束による温度ひび割れが懸念されたため、当初は鉛直パイプクーリングによる対策が計画されていたが、これに代わり、より簡易な設備で温度ひび割れ対策が可能となる注水併用エアクーリング工法を適用したものである。

地下構造物への函渠構造物側壁部に、水平エアクーリング工法を採用する利点として以下の事項が考えられる。

- ・地下構造物では排水処理施設も考慮する必要がある。本工法は送風機と少量の水のみで実施可能で大規模な排水処理施設は必要ない。
- ・函渠側壁部のひび割れは、底版との打継ぎ目上部に発生しやすい。従来弊社が実施してきたクーリングは鉛直方向に使用するため、側壁全部位を冷却していたが、打継ぎ目上部を水平方向に集中的にクーリングを行う本工法を採用することで、効率的なひび割れ抑制対策が可能となる。

### 3.2 室内試験施工の実施

実施前に試験施工を室内にて実施した。室内試験施工の目的は、今回、壁部に使用するため施工中の強度面からパイプの材質を鋼管としたが、この場合の効果について確認するとともに、試験結果より見かけの熱伝達率を求めることである。

試験体の概要を表-2、図-3 に、試験状況を写真-1 に示す。試験ケースとしては、クーリングを行わない場合 (CASE1) に対して、従来のエアクーリング (CASE2)、注水併用エアクーリング (CASE3) の 3 ケースとし、断面 1.0m×1.0m、長さ 2.0m の試験体を 3 体製作した。また、試験体は木製型枠の内側に厚さ 100mm の発泡スチロールを設置し、簡易的な断熱状態とした。図-3 に示すとおり、CASE2 および CASE3 ではファンによって送風を行い、このときの風速は  $v=24\text{m/s}$  であった。また、クーリングパイプの鋼管は、外径 76.3mm、肉厚 4.2mm の仕様を用いた。各試験体には計測断面を 1 断面設け、図-3 に丸印で示す計測点においてコンクリート温度を計測した。注水量は、本試験条件において、流出口から水がミスト状に排出するように定め、150ml/min とした。なお、送風期間は打設日を含めた 3 日間、温度計測は 8 日間実施した。

表-2 試験ケース

	エアクーリング	注水	
CASE1	無し	無し	クーリング無し
CASE2	有り(24m/s)	無し	空気
CASE3	有り(24m/s)	有り(150ml/min)	水・空気併用

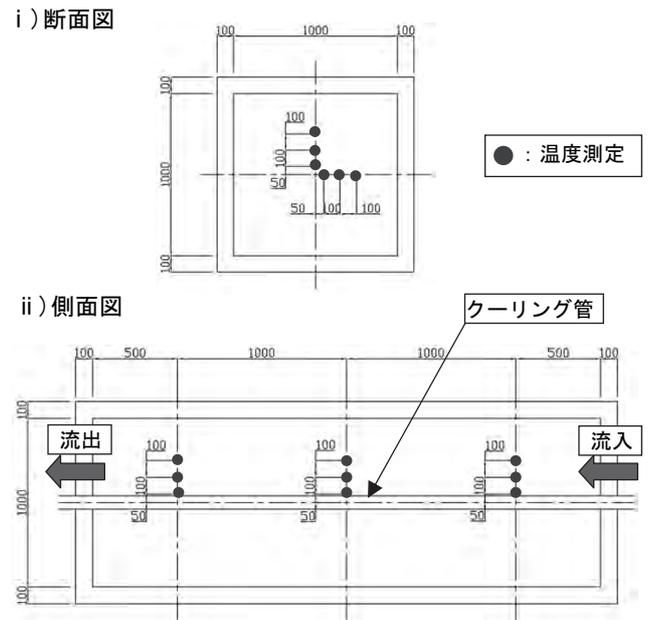


図-3 試験体 (CASE2、CASE3)

i) 養生状況

ii) 移動状況



写真-1 試験状況

### 3.3 室内試験施工結果

図-4 に各試験体の中央部のコンクリート温度を示す。クーリングを行わなかった CASE1 と比較して、クーリングを行った CASE2、CASE3 ではコンクリート温度の上昇を大きく抑制している。送風を停止すると、コンクリート温度はリバウンドし上昇するが、材齢の初期で温度上昇を抑制しているため、測定期間中を通して CASE1 を上回ることは無かった。また、CASE2 と CASE3 を比較すると、注水を併用している CASE3 では、より大きな温度抑制効果を発揮していることが明らかとなった。次に、送風期間中における外気温 (流入空気温度) と CASE2、CASE3 の流出空気温度を図-5 に示す。CASE2 では外気温に対して 5°C 程度の流出空気温度の上昇がみられるのに対し、CASE3 の流出空気温度は外気温よりは高いものの、CASE2 ほど上昇していないことが分かった。

このことは、CASE3 では注水の気化効果によって流れる空気の温度自体が冷却されていることを示しており、注水併用エアクーリング工法は、

従来のエアクーリング工法と比較して、温度抑制効果に大きく寄与しているものと考えられる。

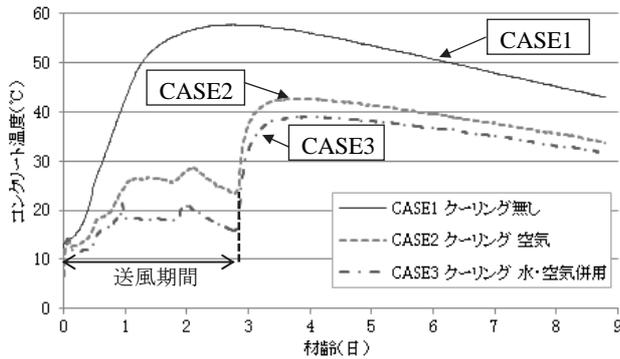


図-4 コンクリート温度比較

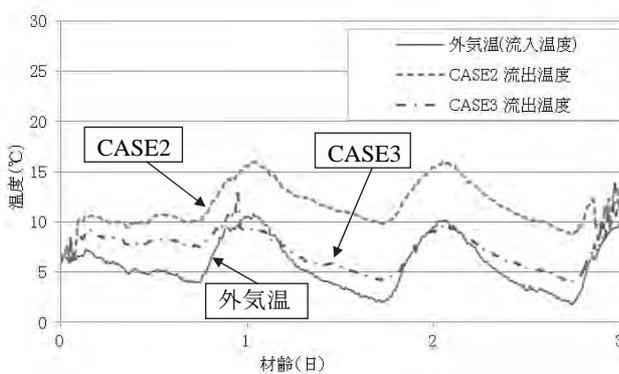


図-5 流入・流出空気温度比較

### 3.4 見かけの熱伝達率の決定

温度解析においてエアクーリングの効果を反映させる場合、一般にコンクリートとクーリングパイプの境界条件（見かけの熱伝達率とパイプ内温度）を与えることで考慮されており、見かけの熱伝達率はクーリングパイプ内の風速によって変化することが知られている。コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>によると、通常のコンクリートの露出面では、風速 2~3m/s の場合、熱伝達率は 12~14W/m<sup>2</sup>°C であり、風速 1m/s 当り 2.3~4.6W/m<sup>2</sup>°C 程度上昇するとされていることから、風速を  $v$ (m/s) とすると、熱伝達率  $\eta$  (w/m<sup>2</sup>°C) は式(1)で表される。

$$\eta = 12 + 3.45(v - 2) \quad \dots\dots\dots (1)$$

本試験での計測結果をもとに、同定解析により CASE2, CASE3 における見かけの熱伝達率の同定を試みた。解析モデルは、断面方向に左右・上下対称、奥行方向に対称の 1/8 モデルとし、外気温およびコンクリートの打込み温度は実測値を用いた。コンクリートの温度上昇量を表現する断熱温度上昇特性（式(2)）は、CASE1 における実測値を再現できるような値を同定した(表-3)。

$$Q(t) = Q_{\infty} [1 - \exp\{-\gamma(t - t_0)\}] \quad \dots\dots\dots (2)$$

$Q(t)$  : 材齢  $t$  日における断熱温度上昇量(°C)

$Q_{\infty}$  : 終局断熱温度上昇量(°C)

$\gamma$  : 温度上昇速度に関する定数

$t$  : 材齢(日)

$t_0$  : 温度上昇の原点に関するパラメータ

表-3 温度上昇特性係数同定値

$Q_{\infty}$ (°C)	50.0
$\gamma$	1.5
$t_0$ (日)	0.3

コンクリート温度の実測値と同定解析による値の比較を図-6 に示す。注水併用エアクーリング工法(CASE3)の場合は、見かけの熱伝達率を試験時の風速 24m/s より  $\eta=88\text{W/m}^2\text{°C}$  と設定（式(1)から推定）することで、実測値を概ね再現することができた。一方、従来のエアクーリング工法(CASE2)の場合は、実測値を再現する見かけの熱伝達率が式(1)からの推定値の半分である  $\eta=44\text{W/m}^2\text{°C}$  となった。

このことから、注水併用エアクーリングの効果の評価する場合に、見かけの熱伝達率として式(1)による推定値を一つの目安とすることが考えられる。ただし、見かけの熱伝達率には風速以外に送風空気温度の影響も含まれていることから、湿度や外気温等の環境条件により送風空気温度の気化熱冷却効果が異なる場合は、見かけの熱伝達率も変化することが考えられる。このため、注水併用エアクーリング工法を実際の構造物に適用する際には、事前に試験施工を行うことにより、適用条件における効果を把握することが望ましいと思われる。

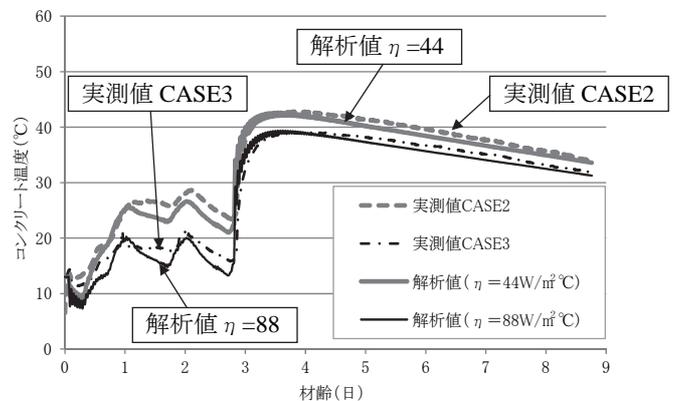


図-6 コンクリート温度（実測値・解析値）

### 3.5 実構造物への適用

実施工における配管位置図，計測位置図を図-7に，施工状況を写真-2に示す。実施工においては，側壁の鉛直方向に2段のクーリングパイプを配置した。また，延長方向の中央に計測断面を設定し，管表面，2段の管の中央部，クーリングの影響を受けない側壁中央部の3箇所においてコンクリート温度の計測を行った。

側壁部は打設高さが5m程度となるため，コンクリート打設時にクーリング管の変形が生じないように，シース管に比べて剛性の高い鋼管（SGP管）を用いた，施工中に変形・脱落等の不具合は特に生じなかった。また，クーリング管については脱枠後に躯体表面位置において切断した後，躯体コンクリートと同等以上の強度を有する無収縮モルタルでグラウト充填した。計測結果を図-8に示す。クーリングを行わない側壁中央のコンクリート温度と比較すると，管近傍では送風期間中24.5℃の温度抑制を確認した。図-8の計測結果から見かけの熱伝達率について同定解析を行い，得られた値により無対策時と注水併用エアクーリング工法の2ケースについて最小ひび割れ指数の推定を行った。

図-9に同定解析結果をもとに推定された最小ひび割れ指数の分布図を示す。無対策時と比較すると，実施工時に注水併用エアクーリング工法を用いた場合は，側壁部の最小ひび割れ指数が1.03から1.14へ向上することがわかった。

また，打設後の側壁には温度ひび割れは確認されておらず，注水併用エアクーリング工法によるひび割れ対策としての有用性を確認することができた。

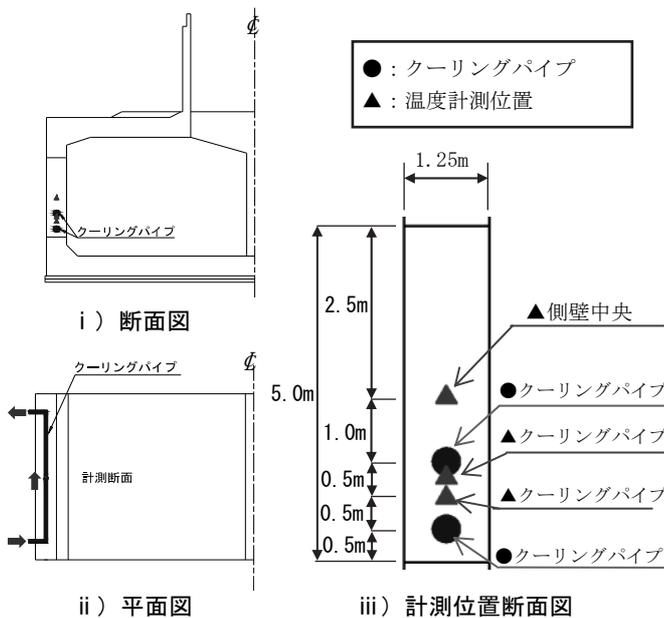


図-7 実施工時平面図，断面図，計測位置図

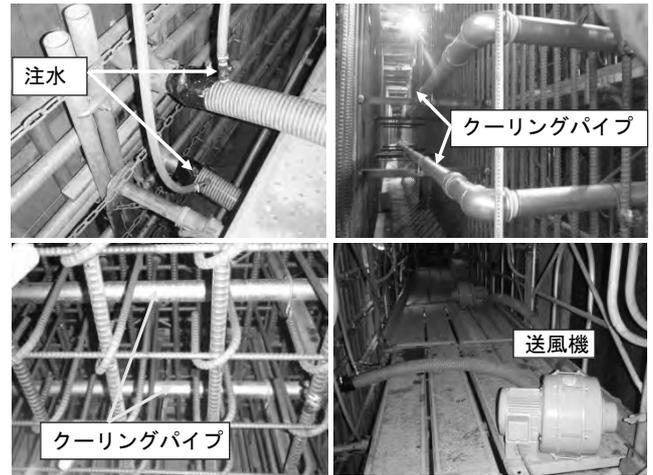


写真-2 クーリング機材設置状況

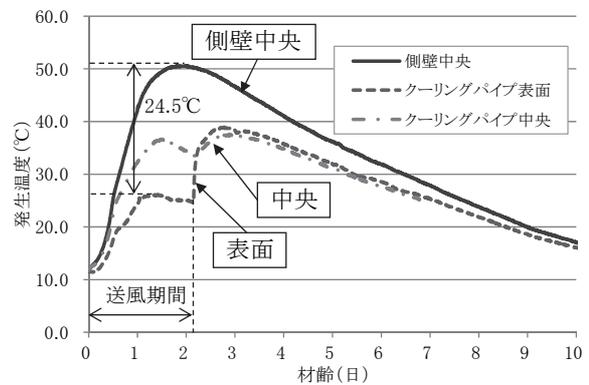


図-8 実施工時温度計測結果

i) 無対策時

ii) 注水併用エアクーリング工法

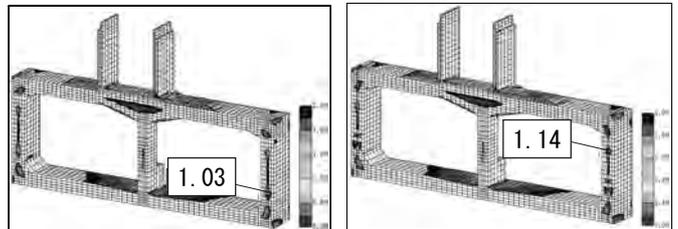


図-9 解析結果比較（最少ひび割れ指数分布）

### 4. 注水併用エアクーリング工法の定量的評価

注水による送風空気の冷却効果が確認できたことから，注水量と注水形態を変えて，定量的な評価を行うこととし，コンクリート試験体を用いたクーリング効果の室内試験を行った。試験体は幅0.5m×高さ0.5m×延長1.0mであり，コンクリート打設後は周囲を発砲スチロールで覆い断熱状態とした。クーリング管としては鋼管（内径φ65mm，管厚4.7mm）を用い，表-4に示す5ケースを実施した。注水形態として，微粒ミスト（粒径が非常に細かいもので100μm以下）（CASE3,4）と細粒ミスト（粒径が細かいもので300μm以下）（CASE5）とし，比較ケースとして

クーリングを行わない場合 (CASE1) と注水を併用しない従来のエアクーリングの場合 (CASE2) を加えた (表-4)。コンクリート温度はクーリング管表面近傍と 125mm 離れた位置において熱電対により測定した。クーリングはコンクリート打設後 3 日間行い、風速は 20m/s とした。供試体中心のクーリング管の横側表面近傍および 125mm 離れた位置における各ケースのコンクリート温度経時変化を図-10, 11 に示す。いずれの位置においても空気のみでのエアクーリング (CASE2) に対して、注水を併用したエアクーリング (CASE3~5) の場合はコンクリートのピーク温度が 10℃程度小さく、温度抑制効果が発揮されることが確認された。また、風速が 20m/s と大きい場合には、注水形態や注水量により温度抑制効果の顕著な相違はみられないことが確認された。

表-4 試験ケース

ケース	送風	注水形態	注水量
CASE1	—	—	—
CASE2	○	—	—
CASE3	○	微粒ミスト	150ml/min
CASE4	○	微粒ミスト	50ml/min
CASE5	○	細粒ミスト	150ml/min

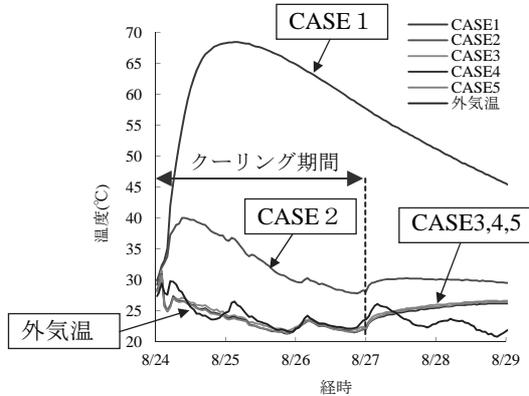


図-10 温度経時変化図 (クーリング管表面近傍)

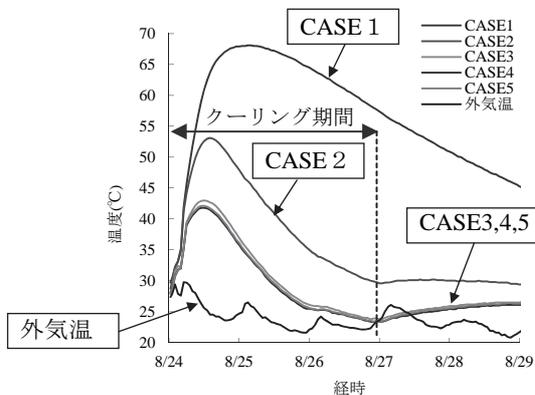


図-11 温度経時変化図 (クーリング管表面から 125mm)

## 5. 壁式橋脚への適用

### 5.1 工事概要

施工中の高松自動車道南唱谷トンネル工事内の古田橋 P1 橋脚は、部材厚 2.0m、幅 5.5m、高さ 16.1m、1 リフト当りの打設高さ 3~5m のマスコンクリートである。本橋脚は、温度応力解析による事前検討において、打ち継ぎ目上部に下部拘束体による有害なひび割れの発生が懸念された。ひび割れ発生が懸念される範囲が限定されること、設備が簡易であることから、本工法にて対策を行うこととした。コンクリート配合を表-5、構造物側面・断面図を図-12 に示す。

表-5 コンクリート配合

配合区分	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
BB30-8-20	45.5%	374	170	743	959	4.68

i) 側面図

ii) 断面図

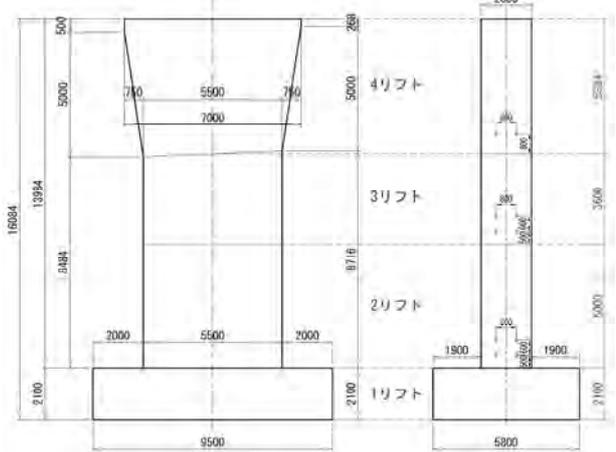


図-12 P1 橋脚側面図・断面図

### 5.2 実構造物への適用

橋脚への注水併用エアクーリングの施工状況を示す。事前解析により決定した位置にクーリングパイプをあらかじめ設置し、送風機を各々接続し、送風時には、現場に設置した水タンクからポンプによりミストノズルへ注水 (150ml/min) を行った (写真-3)。



写真-3 送風設備設置状況

構造物中心に計測断面を設け、熱電対を4測点(図-13)設置し、コンクリート温度を計測した。また、同時に外気温、パイプへの送風温度の計測も行った。打設開始と同時に送風・注水を開始し、無対策箇所(測点1)の温度がピークに達した時点で双方を停止させた。温度計測は打設開始時より6日間実施した。

### 5.3 温度計測の結果

図-14に、コンクリート内部4測点の温度、流入温度および外気温の変化を示す。クーリングの影響が小さいと考えられる箇所(測点1)のコンクリート温度は材齢2.5日でピークに到達し、79.1°Cであった。これに対し、測点2~4の最高温度は各々55.3°C、60.3°C、66.8°Cであり、対象範囲のピーク温度を10°C以上抑制できたことが確認された。

### 5.4 事後解析による評価

施工時におけるコンクリートの打設温度・温度上昇、特性、外気温、クーリングパイプへの流入温度の実測値を用いた再現解析結果を図-15に示す。実測値と再現解析値は概ね一致しており、事前解析手法の妥当性を確認することができた。また、同条件にて温度ひび割れの事後解析を実施した結果、無対策時における最小ひび割れ指数0.92が、注水併用エアクーリングにより1.22まで改善する結果となり(図-16)、対策により所定の効果が得られたと考えられる。

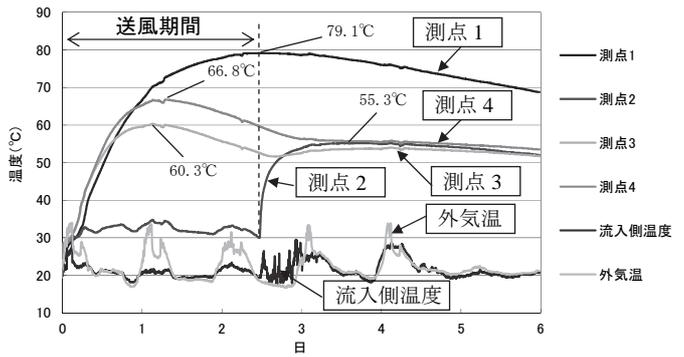


図-14 コンクリート温度の測定値

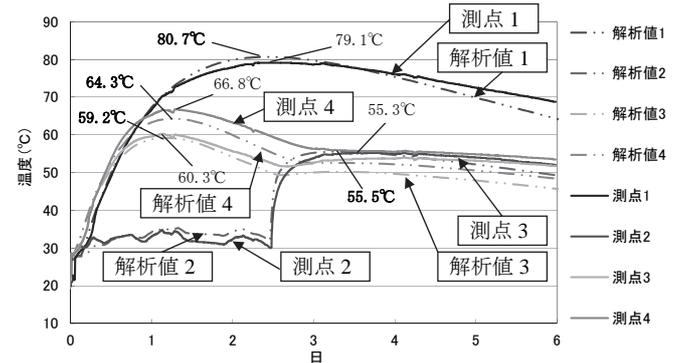


図-15 実測値と再現解析値の比較

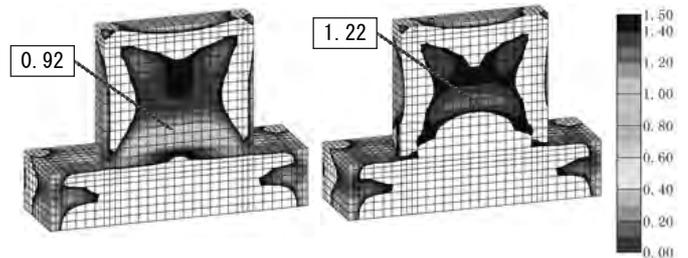


図-16 事後解析結果(最小ひび割れ指数分布図)

i) 断面図

ii) 側面図

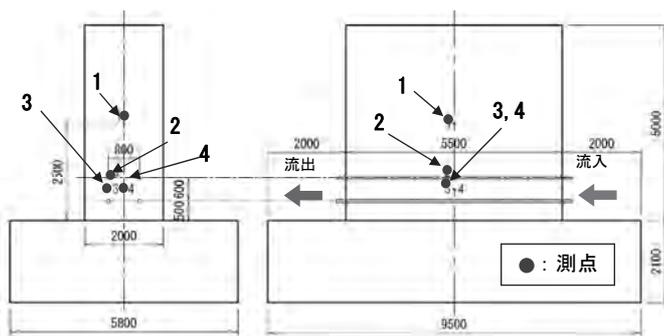


図-13 クーリング設備設置箇所

## 6. まとめ

- 空気に少量の水を加え、送風することで、より大きな温度制御抑制効果があることを確認した。
- 注水形態や注水量、風速を変えて比較を行い、空気冷却効果のより高いミスト注水について定量的に確認した。
- 函渠構造物の側壁、および壁式橋脚において本工法を適用し、温度抑制効果を確認した。
- 今後も多様な構造物へ適用を図ることでデータを蓄積・反映し、より有用性の高い工法に改良していきたいと考える。

### 参考文献

- 1) 土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書【設計編】，2012

# 15. 有楽町線小竹向原・千川間連絡線設置工事における シールドトンネル施工に関する報告

## 複合円形断面の開発経緯と施工実績

東京地下鉄株式会社  
改良建設部 改良建設企画課長 坂田 聡  
株式会社 熊谷組首都圏支店 ○ 山上 享

### 1. はじめに

東京地下鉄株式会社は、有楽町線・副都心線の小竹向原～千川間において、平成22年から連絡線設置工事を行っている。この連絡線設置工事は、安定輸送確保を目的とした平面交差を解消するためのものである。平成25年3月にA線（新木場方面線）、平成28年2月にB線（和光市方面線）の副都心線と東急東横線・横浜高速みなどみらい線の相互直通運転を開始した。

図-1に工事平面図を示す。

工事区間425mのうち、A線175m、B線145mのシールドトンネル工事を複合円形断面の単線シールドで施工した。

本稿は、単線シールドトンネルにおける複合円形断面の開発経緯および、施工実績について報告するものである。

### 2. 計画概要

図-2は平面交差部の現状を示したものである。この平面交差部において、先行列車が通過する際に、後続列車はその手前で通過待ちのため、一旦停車をしなければならない状態が発生し、遅延が生じる。こうした平面交差部の問題は、有楽町線の開業当初から顕在化していたものではない。有楽町線は、沿線や都市の発展に伴う利用者の需要増加に対応するため、和光市方面から新木場方面への運行本数を増発してきた。さらに、副都心線の開業により複雑化した運行形態となったため、遅延が発生すると運行の混乱が長時間・広範囲に波及してしまうこととなった。

図-3は連絡線設置後の概要を示したものである。

連絡線は和光市方面と新木場方面を結ぶ列車専用の経路となり、平面交差部が解消される。

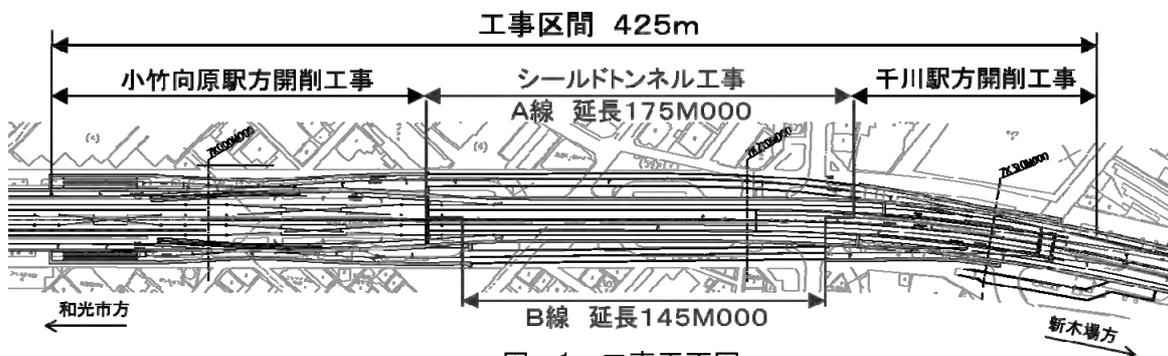


図-1 工事平面図

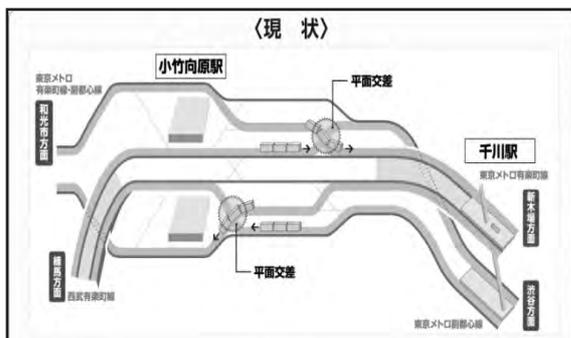


図-2

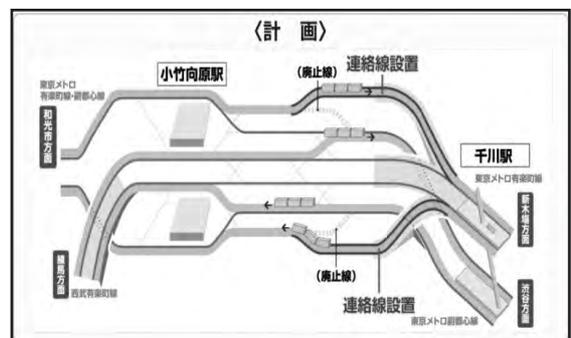


図-3

### 3. 単線シールドトンネルにおける複合円形断面の採用

当該地区は、緑の多い閑静な住宅街となっており、また都道 441 号（要町通り）にはアンダーパス等がある道路である。

そのため、線形を道路内に納める、有楽町線・副都心線への影響を最小限にする、地上への影響を極力減らす工法を選定することに注視し計画範囲が決定された。

その結果、計画範囲を約 425m として、両端を開削部、中間をシールド部とした。

さらに、シールド部においては、民地部との離隔を十分に確保する、既設構造物との離隔を十分に確保する、地下鉄運行に必要な空間を確保するため、副都心線で施工実績のある、複合円形断面シールドが採用された。

これにより掘削断面が円形に比べ約 10% 減ることになり、環境負荷低減にも貢献した。

## 4. 工事概要

### 4.1 工事場所

板橋区向原 1 丁目 4 番地先から豊島区要町 3 丁目 45 番地先の都道 441 号（通称：要町通り）上である。

シールドトンネル工区は開削工事である向原工区を発進基地として、同じく開削工事である千川工区に向けて、延長 A 線 175m、B 線 145m のトンネルを縦長形状の複合円形断面を採用した泥土圧シールド(6.8×5.7m)にて築造するものである。

### 4.2 シールド線形

A 線が平面線形で曲率半径 R=500m を 36% 有し、縦断線形は+2‰の勾配を 35% および+24‰の勾配を 65% 有している。

B 線については、平面線形は直線で、縦断線形は+2‰の勾配を 23% および+24‰の勾配を 77% 有している。

### 4.3 地質概要

地質概要を図-4 に示す。

当該付近は、豊島台（洪積台地）に区分され、その第四紀層は、江戸川層を基盤とし、東京礫層～東京層～段丘礫層～ローム質粘土層（凝灰質粘土層）～ローム層の順に重なるものである。

発進部は全断面が段丘礫層（N 値 40 以上）、到達部は段丘礫層と東京層砂層（N 値 50 以上）となっている。

土被りは、発進部約 12m、到達部約 10m であり、地下水位は GL-3.5m 付近に存在する。

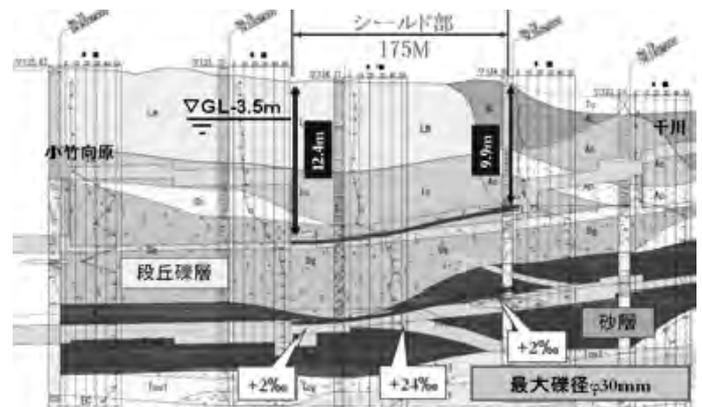


図-4 地質概要

### 4.4 セグメント

複合円形断面の特徴は、3 つの曲率半径（R=2,000mm, R=5,500mm, R=7,800mm）の曲線を組み合わせることで、円形の力学的特性を最大限に生かした形状、鉄筋コンクリート製セグメントで構築可能な形状、トンネル幅とセグメント厚さは円形シールドと同一、地下鉄の運行に必要なトンネル内空間を有することである。図-5 にセグメント構造図、表-1 にセグメント諸元、写真-1 にセグメント仮組立状況、写真-2 に現場搬入状況を示す。

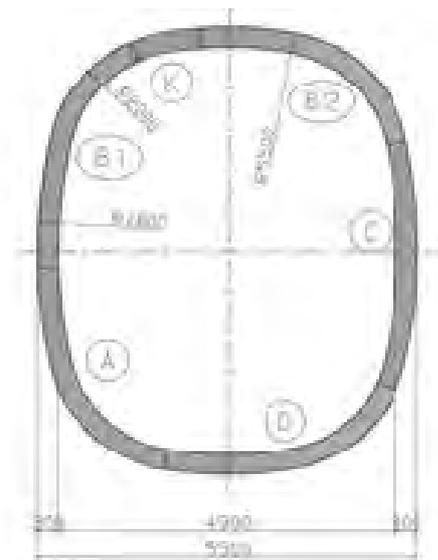


図-5 セグメント構造図

表-1 セグメント諸元

名	称	平板（300）型セグメント
材	質	鉄筋コンクリート製
寸法（外径）		6,600mm×5,500mm
分	割	6 分 割
K	セグメント	軸方向挿入式
	セグメント幅/厚	1500mm/300mm
	継手(セグメント間/リング間)	アーチ型インサート/DUET（A線）、SB継手（B線）
	設計基準強度	48N/mm <sup>2</sup>

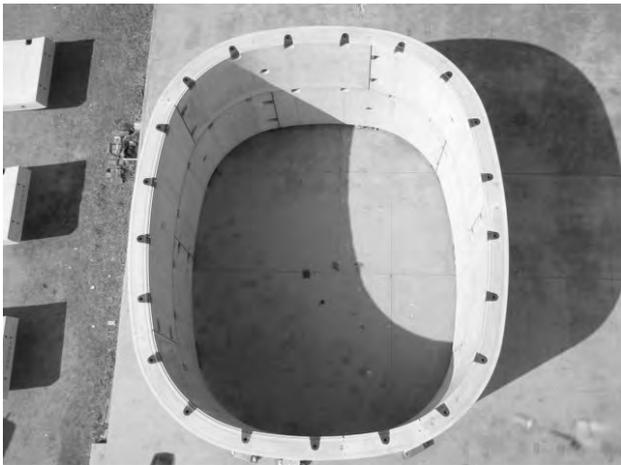


写真-1 セグメント仮組立状況



写真-2 現場搬入状況

#### 4.5 シールドマシン

当工区の掘削断面は複合円形断面になっているため、円形カッターで切削を行うと掘り残しが発生する。そのため、3本の伸縮カッターを装備して、未掘削部分が発生しないように伸縮カッターのストロークを管理した。また、円形断面でないため、マシンローリングが問題となる。ローリング対策として、ローリング修正ジャッキを8本装備した。

表-2にシールドの仕様、写真-3にシールド全景、写真-4に現地組立状況を示す。図-6に伸縮カッター、図-7にローリング修正ジャッキを示す。

表-2 シールドの仕様

項目	詳細	仕様	仕様
本体シールド機	外径	6,800mm × 5,700mm	
	機長	8,910mm	
	テールシールド	ワイヤラシ型 × 2段	
推進装置	シールドジャッキ	2,000kN × 2,550st × 21本	
	総推力	42,000kN	

項目	詳細	仕様	仕様
カッター装置	スポーク本数	3	本
	支持方式	中間支持方式	
	装備トルク	5,321kN・m	
	カッター回転数	0.77rpm	
	余掘り装置	コピ-カッター3本	
裏込注入	注入方式	同時注入方式	



写真-3 シールド全景

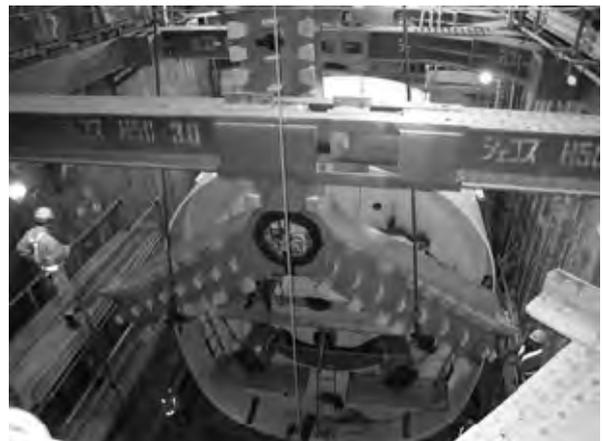


写真-4 現地組立状況

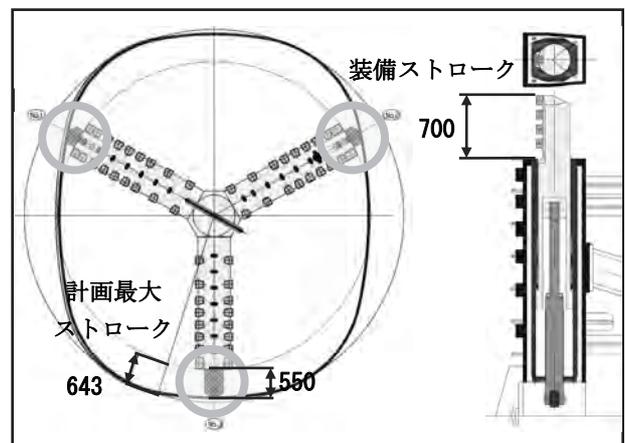


図-6 伸縮カッター

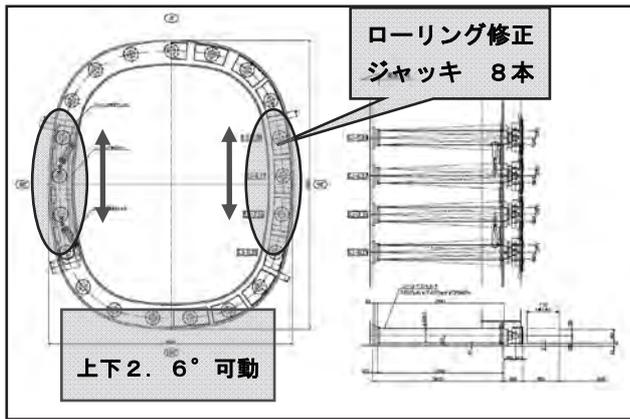


図-7 ローリング修正ジャッキ

## 5. 施工結果

今回の有楽町線連絡線設置工事におけるA線とB線の2本のシールド工事の実績から、縦長形状の複合円形断面シールドにおける施工上の留意点をまとめる。

### 5.1 セグメントスプリングライン付近に発生する曲げモーメントの抑制

A線の施工時に、RCセグメントのC型セグメントSL付近に規則的に水平方向の微細なクラックが発生した。ひび割れ調査結果より、セグメントに発生したひび割れは、設計発生ひび割れ幅0.23mm、許容ひび割れ幅0.28mmに対して、最大0.2mmであり微細であった。

C型セグメントの変形量(中央部のたわみ)とクラック分布から試算した結果、セグメントの健全性に問題はなかったが、セグメント計測の測定値から軸力と曲げモーメントを計算した結果、曲げモーメントはC型セグメントのSL付近で大きくなり、断面力はテール通過直後の裏込注入圧の影響を大きく受けていた。1)

計画段階では、段丘礫層での裏込注入の実績から裏込の計画注入率を130%としたが、A線の施工において、曲げモーメント・セグメントの変形が大きくなり、ひび割れ発生要因のひとつとなった。このためB線では、裏込注入の圧高傾向を抑制するため裏込材圧送ポンプを脈動のあるスクイーズポンプから定量注入が可能なモノポンプに変更した。

また、裏込注入開始直後にトライアル施工区間を設け、裏込注入率が120%であっても路面に大きな影響がないことを確認した。

この結果、B線施工ではA線同様C型セグメントSL付近にクラックが発生したものの、施工時のセグメント外面圧力を抑えたことで、ひび割れ幅はA線の0.2mmから0.1mmとなり、発生箇所も低減され、ひび割れ抑制に効果的であった。2)

このことから、通常円形断面と違い長辺短辺

を有する断面では、適正注入率の設定、圧高傾向の抑制といった裏込注入管理が重要である。

### 5.2 ローリング防止対策

縦長形状の複合円形断面においては、シールドマシンがローリングすると、テールクリアランスが確保出来ず、セグメントを正しく組立てられない恐れがある。

このため、本工事ではシールドマシンがローリングした際にローリングを修正する装置として、シールドマシンの左右に配置した4本のシールドジャッキを1セットとし、シールドジャッキを上下に2.6°揺動できる構造を採用した。シールドジャッキを揺動することで、シールドジャッキがセグメントに対して傾いて当たり、推進力の分力がローリング修正力となる。

線形管理におけるローリング修正ではA線、B線ともにシールドジャッキを揺動させることなく、カッタ回転方向の調整による姿勢制御を行い、トンネル自体のローリングを発生させることなく施工することができた。これは、今回の掘削対象地盤が、洪積層の地盤でN値が50以上の段丘礫層と砂層であったためである。

円形断面と違い、縦長形状断面で掘削対象地盤が軟弱粘性土などの地山から反力をとれない場合は、ローリング修正に対する検討を充分にする必要がある。

## 6. おわりに

一般的な円形断面とは異なり、縦長複合円形断面においては、軸力が卓越せずスプリングライン部において曲げモーメントの影響が大きく現れ、応力が集中する。そのため、裏込め注入等の施工時荷重については、セグメントの設計段階から考慮し、施工時の掘進管理においても影響を低減する対策をとることが重要である。

今後、限られた地下空間を有効に活用し、環境負荷低減にも寄与することができる複合円形断面シールドの施工の参考になれば幸いである。

### 参考文献

- 1) 伊藤 聡・嶋田 司・長谷 篤・斉藤 進, 山上 享: 有楽町線小竹向原~千川間改良工事におけるシールドトンネル施工に関する報告, 第22回トンネル工学研究発表会論文・報告集, Vol. 22, 2012
- 2) 坂田 聡・中村 守男・大槻 あや・山上 享・根岸 秀男: 小竹向原・千川間連絡線設置工事におけるシールドトンネルの施工に関する報告, トンネル工学報告集, 第25巻, II-1, 2015. 11.

## 16. 路面切削機での情報化施工（マシンガイダンス）活用事例について

前田道路 株式会社

○ 宇田川 健治  
森下 泰浩  
宮内 賢徳

### 1. はじめに

情報化施工は、i-Construction などの施策により導入がさらに推進されている。舗装工では敷均し機械のマシンコントロール技術（以下、MC）や施工管理技術の一般化・実用化が進んでおりレンタルでも調達できる段階となった。当社も情報化施工を積極的に導入しているが、維持修繕分野である路面切削工は専門工事業者に依頼しているため、自社保有でない路面切削機（以下、切削機）の情報化施工は取り組みづらく、条件が合致すれば部分的に適用している現状であった。

情報化施工のなかには MC とマシンガイダンス技術（以下、MG）があり、切削機の MC を行うためには数少ない対応機種を選定するか機械を MC 対応に改造しなければならない。一方、MG はオペレータの操作をサポートする技術であり機械の限定や改造をせずに情報化施工を実施することができる。

本論文は切削機の MG 方法について検討し施工精度を検証したものである。その結果、TS 出来形と同等の技術で情報化施工ができることを確認したので、その概要と結果について報告する。

### 2. 目的と概要

#### 2.1 目的

舗装修繕工事の現場から、道路の縦横断形状の修正が著しいため、切削機の情報化施工を実施したいと要望があった。しかし、用意できる切削機が情報化施工非対応機であったため、MG での施工方法を考案し、実施することになった。

#### 2.2 マシンコントロール (MC) とマシンガイダンス (MG)

当社では、モーターグレーダ、ブルドーザ、アスファルトフィニッシャ、スリップフォームペーパー等の情報化施工を実施しているが、そのほとんどが MC である。従来工法と情報化施工 (MC) の比較を図-1 に示す。

##### (1) マシンコントロール技術 (MC)

ブルドーザ等の排土板や、アスファルトフィニッシャ、スリップフォームペーパーの敷き均し装置の平面位置 (X 座標・Y 座標) 及び高さの 3 次元

データをリアルタイムで取得し、3次元設計データとの差分に基づき作業装置を自動制御する技術が MC である。

##### (2) マシンガイダンス技術 (MG)

排土板等、作業装置の自動制御は行わないが、作業装置の平面位置 (X 座標・Y 座標)・高さの 3次元データをリアルタイムに取得し、3次元設計データとの差分をモニタ表示し、表示された数値に基づきオペレータが操作する技術が MG である。

### 2.3 路面切削工の情報化施工

路面切削工は、20m や 10m などの等間隔で路面に切削厚さをマーキングし、その数値を切削機のオペレータが確認しながら機械の切削深さを調整するのが一般的である。

しかし既設路面の不陸が大きいと、切削厚さを表示した地点は設計どおり切削できるものの、高さの表示されていない区間（マーキング箇所の間）はオペレータの技能により操作するため、切削面に不陸が生じてしまう可能性がある。その上にオーバーレイ（アスファルト舗装）を行うと、舗装仕上り面に不陸が残ってしまうことになる。

この施工誤差を低減させるための方法として以下の方法が考えられる。

##### (1) マシンコントロール (MC)

切削機が情報化施工対応機の切削機で MC を実施する場合、以下のメリットとデメリットが挙げられる。

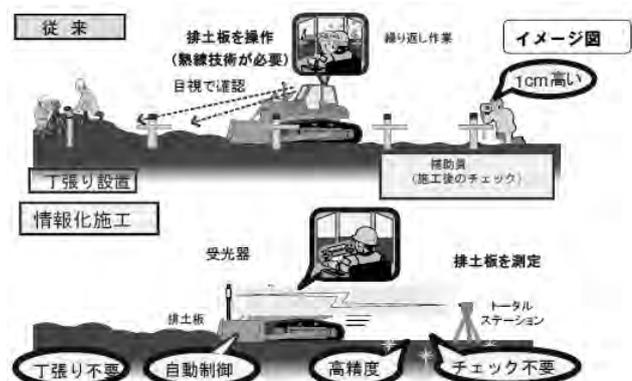


図-1 従来工法と情報化施工の比較<sup>1)</sup>

### ① メリット

切削深さを表示された箇所だけでなく、どの位置でもほぼ計画通り（数ミリの施工誤差有り）切削することができ、舗装仕上がり後の平坦性も向上すると考えられる。

### ② デメリット

一般的な、国産の切削機（以下、国産切削機）は情報化施工に対応した装備がないため、対応している外国産の切削機（以下、外国産切削機）や改造されたごく一部の国産切削機を使用しなければならない。そのため、MC 対応機の調達の課題が大きい。

## (2) ガイダンスシステム(MG)

情報化施工に対応していない切削機で MG を実施する場合、以下のメリットとデメリットが挙げられる。

### ① メリット

切削機の機種を問わず MG によってほぼ計画通りに切削することができ、舗装仕上がり後の平坦性も向上すると考えられる。又、MC と比較すると、重機への取り付け機器が少なく、脱着も容易にできる。

### ② デメリット

従来工法と比較すると、路面切削施工時に情報化施工担当者を配置し、トータルステーション(以下、TS)を2セット（重機用と切削深さ確認用）準備しなければならない。

## 3. 3次元設計データ及びシステム概要

### 3.1 3次元設計データの種類

情報化施工を行うためには3次元設計データが必要である。3次元設計データは2種類あり、どちらかを使用する。

#### (1) 線形データによる方法

設計データ作成ソフトウェア等使用し、平面線形、縦断線形、横断勾配を入力し、設計データを作成する。道路、空港等の工事は、通常こちらを使用することが多い。

##### ① メリット

平面曲線、縦断曲線、横断勾配の変化を正確に再現した設計データを作成することができる。主に新設工事、改築工事などで使用する。

##### ② デメリット

維持修繕等での切削オーバーレイの場合、新設工事のような、平面線形、縦断曲線、横断勾配等の設計がない場合が多い。この場合、現況の形状を測量し、設計データを作成することとなる。TS など3次元計測機器で現況測量後、測量成果をもとに平面線形、縦断線形、横断勾配を設定する必要がある。又、既設構造物等（巻き込み部等）に摺り付ける場合、設計データとは高さが合わない

ことがあるため、摺り付ける構造物等の現況測量を行い、設計データを作成する必要がある。

#### (2) 三角メッシュによる方法

三角メッシュによる方法は、多数の座標点(X, Y, Z)を、線で結び（三角形になるよう）設計面を作成する。又、線形データを変換し三角メッシュデータを作成する方法もあるが、現場形状によっては変換ピッチを細かくする必要がある。

##### ① メリット

舗装に接する構造物を現況測量することにより、容易に設計データを作成することができる。

##### ② デメリット

座標点間を直線で接続するため、平面曲線、縦断曲線をなめらかに作成するには、測点だけではなく、細かく座標点を測量する必要がある。

既設構造物に高さを合わせる場合や、施工形状の複雑な巻き込み部等では、三角メッシュによる設計データを使用することが多い。線形データと三角メッシュ(TIN)データのイメージを図-1に示す。

## 3.2 設計データの作成

### (1) 施工箇所の現況路面の測量方法

現況路面の測量方法として以下の方法が挙げられる。

#### ① レベル（従来法）

#### ② レーザプロファイラ（従来法）

#### ③ TS（TSを用いた起工測量）

#### ④ レーザースキャナ（レーザースキャナを用いた起工測量）

#### ⑤ その他の3次元計測技術を用いた起工測量

上記①と②で従来から行われていた現況路面の測量方法は、管理測点等の高さを取得することができるが、平面座標(X座標・Y座標)の取得ができないため、情報化施工の設計データを作成することができない。

情報化施工やTSを用いた出来形管理を実施する場合は、平面座標及び高さ取得のため、③又は④で縦横断測量を実施する。

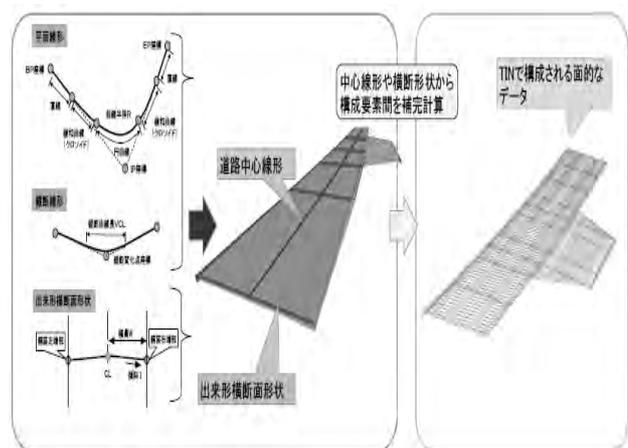


図-2 線形データ(左)と三角メッシュ(TIN)データ(右)

### (2)3 次元設計データの作成

従来は、現況路面の測量成果から、路面切削工測量成果表（従来法においての設計）を作成していた。情報化施工用の3次元設計データにおいても、現況路面の測量結果から、3次元設計データを作成するが、路面切削工測量成果表も作成する。

### 3.3 使用機器

今回、切削機でMGを行うために使用した機器は、Trimble社製TSである。重機に取り付けるプリズムは、アクティブターゲットと呼ばれる光信号機能を搭載した誤視準の少ないプリズムを使用した。TSの概略の仕様を表-1に、写真-1にTS設置状況を示す。

### 3.4 システム概要

今回使用したガイダンスシステムは、切削機の切削ドラムカバーに、マストや360°プリズムを簡易的に取り付けてTSで自動追尾を行うものである。TSにより測定されたデータは、無線モデムにより切削機に取り付けたデータコレクタ（以下、DC）に送信される。DCに提供された情報は、あらかじめ入力された設計データと照合される。その結果算出された偏差は、DCの画面上に表示されるシステムである。機器の取り付け状況を写真-2に示す。

表-1 TSの主要諸元

測角精度	5"
測距精度	10mm+5ppm
更新レート	2.5Hz
測距範囲	300～500m(Robotic)
測距時間(トラッキング)	2.0秒/0.4秒
稼働時間(内部バッテリー)	約6時間
稼働時間(外部バッテリー)	約18時間
測距範囲	300～500m(Robotic)
最大追尾速度	86°/秒
国土地理院登録	2級Aトータルステーション



写真-1 TS設置状況

### 3.5 作業装置の制御方法

切削機の切削ドラムの幅は2m程度あるため、切削ドラムの左側高さ及び右側高さの2か所を制御する必要がある。事前に検討した制御方法を以下に示す。

- ① 左右両側ともTSによるMG
- ② TSによるMGと、ならい制御(MC)
- ③ TSによるMGと、スロープ制御(MC)

切削機をMGで制御するには、オペレータがDCの画面上に表示された偏差を確認し、切削機の上下レバーを操作することになる。そのため、左右両側両方ともTSによるMGにすると、オペレータが左右2画面を確認し、それぞれの上下レバーを操作しなければならない。この作業はとても困難なため、今回は片側をTSによるMG、反対側を従来の制御方法である“ならい制御(MC)”で施工することとした。

## 4. 事前準備

### 4.1 マスト用ブラケット

施工に先立ち、使用する切削機に取り付けるマスト用のブラケットを製作した。協力会社の切削機を使用し、MGで使用する装備は毎日取り外しを行わなければならないため、できるだけ脱着が簡単な構造とした。又、フレームや油圧ホースなどに干渉しないか確認を行った。

### 4.2 現場条件の検討

切削オーバーレイでは、切削機をはじめ、複数台のダンプトラック、スイーパー、乳剤散布車、散水車、照明車、資材運搬車等、多数の車両等が行き来するため、常にTSの視準を確保するよう設置場所の選定が重要である。各重機の停止場所、待機場所、進入経路等を、施工日毎に検討し配置計画を行うことで、TSと重機の視通を確保し円滑な施工を心掛けた。



写真-2 機器取り付け状況

## 5. 施工結果

### 5.1 施工の実施と結果

MG用のTSを1台、出来形確認用のTSを1台現場に設置し、切削深さを確認しながら施工した。施工状況を写真-3に示す。今回の現場では、TSを用いた出来形管理を実施しており、その測定結果（路面切削工出来形）をまとめたものが表-2及び図-3である。これらの結果から、マシンガイダンスによる施工は従来の工法と比較し良好な結果が得られたことがわかる。

### 5.2 考察

切削機のマシンガイダンスを使用することによって次のようなメリット、デメリットがあった。

#### (1) メリット

- ① MCと比較して、システムの初期導入コストやリース料等を低減することができた。
- ② MCと比較して、重機側の設置機器が少なく、事前準備や、装置の脱着が容易であった。
- ③ MCを実施するほどの知識を必要とせず、TS出来形と同等の知識で実施することができた。
- ④ 従来工法と比較し、高精度な施工ができた。

#### (2) デメリット

- ① TSを使用するため従来工法と比較すると、初期導入コストやリース料等が必要となる。



写真-3 施工状況

表-2 路面切削工出来形結果 (TS 測定)

	従来	MG
標準偏差	5.91mm	4.05mm
平均値	-2.71mm	-0.84mm
最大値	6mm	6mm
最小値	-22mm	-16mm
最多値	-2mm	0mm
データ数	84 個	101 個

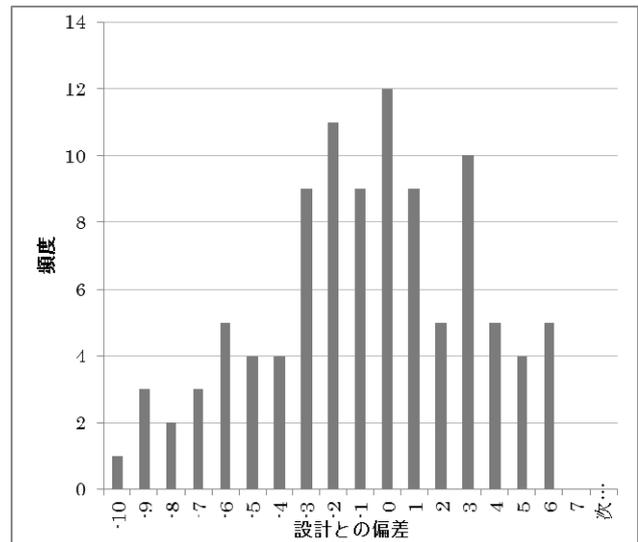


図-3 MG度数表 (TS測定)

## 6. 今後の課題

近年、情報化施工の導入が拡大している。情報化施工により施工の効率化や高精度な仕上がりが得られるが次のような課題もある。

- ① 初期導入コスト、リース料、外注費等により従来工法と比較し施工費用が高額である。
- ② システムを取り扱う専門知識を有した技術者が必要であり、技術者の育成が急務である。

## 7. おわりに

切削機を所有しない当社にとって、切削機のMCによる情報化施工は切削機の機種を選定や装置取付けに伴う機械の拘束など、現場に導入するには大きなハードルがあると考えていた。今回考案した切削機のMGによる情報化施工は、これらの課題を解決するとともに、従来と同等以上の出来形精度が得られることが分かった。さらに、切削機を所有する協力会社へのヒアリングでは、操作性の簡単さに加え、熟練オペレータ不足への対策としても期待できることが分かった。

一方、情報化施工を構成する主要技術は、機械制御技術、油圧制御技術、TS・GNSSによる測量・測位技術、3次元設計データを扱う情報利用技術など、多岐にわたる専門技術を駆使できる技術者の養成が重要となっている。弊社では、生産性の向上、高精度な施工を実現する情報化施工を様々な現場で利活用していきたいと考えている。

### 参考文献

- 1) 情報化施工推進会議資料
- 2) TSを用いた出来形管理要領（舗装工事編）平成29年3月
- 3) 地上型レーザースキャナを用いた出来形管理要領（舗装工事編）平成29年3月



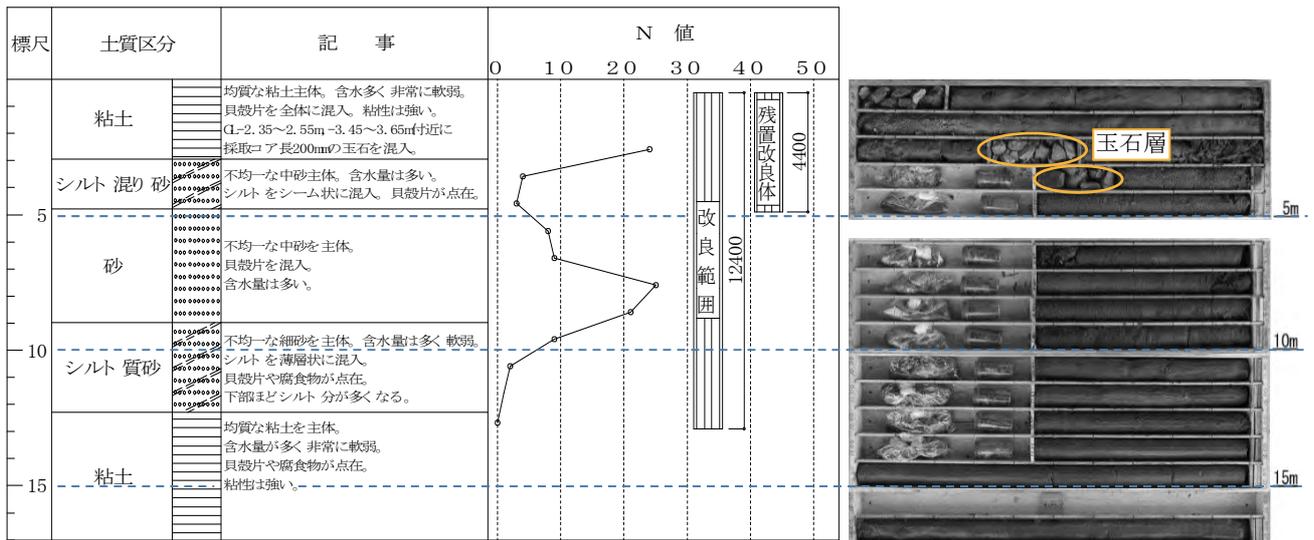


図-2 土質柱状図および残置地盤改良杭体の深度位置

写真-1 対象地盤の玉石混じりコア状況

### 3. 地盤改良困難要因が複合する地盤の施工事例<sup>2)</sup>

#### 3.1 工事概要

樋門の建設に際し、基礎の沈下抑止と液状化対策を目的に一般的なスラリー式攪拌工法が採用された。しかしながら、地盤改良域内には旧施設の樋管、張コンクリート・石積み等の障害物、さらには粒径 200mm の玉石が分布する粘土層さらに  $N > 20$  の層厚 2~3m の砂質中間層が存在する地盤改良困難層であった。このため、従来施工機では改良途中で貫入不能となり、深さ 4.4m 付近で地盤改良杭体に高止まりが生じた。

このような施工トラブルを解消し、当初の改良目的を達成するためには、i) 地中障害物、ii)  $N > 20$  の中間層に加え、新たに iii) 高止まった地盤改良杭体等の諸課題を克服する施工方法を検討する必要が生じた。特に残置された地盤改良杭体は直径  $\phi 1.6\text{m}$  × 長さ 4.4m ほどであり、しかも詳細は後述するが、平均的な固結化した強度は  $quf=2,400\text{kN/m}^2$  と高強度化している。

係る状況から、複合する改良阻害要因を克服して設計仕様に合致した改良体を造成する高い機能性を有する施工方法が検討された。その結果、高トルクで削孔能力に優れ、既に多くの改良困難地盤に施工実績を有する Taf 工法の機動性が着目されて選定されることとなった。なお、本工法の適用に際し、その改良径が当初の改良径と同等径 ( $\phi 1.6\text{m}$ ) であるため、改良杭配置を変更する必要はないと判断した。

#### 3.2 地盤条件

図-2 は、Taf 工法が対象とした地盤条件である。表層約 3m は非常に軟弱な粘土層で下層部には玉石が混在している。これに  $N$  値の分布が不均一で、特に GL-7m~9m の部分に  $N > 20$  の締まった砂層が続く。さらにその下部には極めて軟弱な粘土層が 25m に亘って堆積している。また、写真-1 は、

採取した試料の状況を示す。約 GL-3m の粘土層内には、玉石層が認められる。

施工不能で残置された  $\phi 1.6\text{m}$  の地盤改良杭体は、図-2 に示す土質柱状図の右側に示すように中間砂層上部に位置している。今回の施工課題の一つが Taf 工法により、これらを破碎・粉砕し、高止まった地盤改良杭体の当初計画位置に本来の改良体を新たに造成することにある。

図-3 は地盤改良体造成敷地 (46.3m × 35.8m) 内に計画された改良体の伏図である。同図には、旧構造物由来の残留物が懸念される領域、既往工法で造成した改良体ならびに高止りして残置された地盤改良杭体の位置、Taf 工法により計画された改良体位置情報が示されている。特に図中に示す● (塗りつぶし丸印 (●) の白抜き△) 位置は、Taf 工法による改良体造成位置と高止まりした地盤改良杭体がラップする場合である。一方、● (塗りつぶし丸印 (●)) 位置は、地中障害物が想定される範囲にあって、Taf 改良体と高止まりした地盤改良杭体が重なる場合を表わしている。それぞれの条件に該当する本数は、前者が 11 本、後者が 13 本である。

#### 3.3 施工結果と改良品質

写真-2 は、Taf 工法により高止りした残置地盤改良杭体を破碎・粉砕し、混合攪拌を同時施工したときの状況である。先にも指摘したように同地盤改良杭体の設計基準強度は  $quck=800\text{kN/m}^2$  であるが、採取深さに対する試料の強度は、表-3 のような結果が得られている。すなわち、上層部の強度が他に比べて大きな傾向を示すが、深さ 4.4m の範囲における平均強度はおおよそ  $quf=2,420\text{kN/m}^2$  である。このような高強度は地盤改良杭体施工からの材齢が 1 ヶ月を経過していることも要因の一つと考えられる。いずれにせよ、このような高強度の地盤改良杭体を Taf 工法により、先ず破碎粉砕

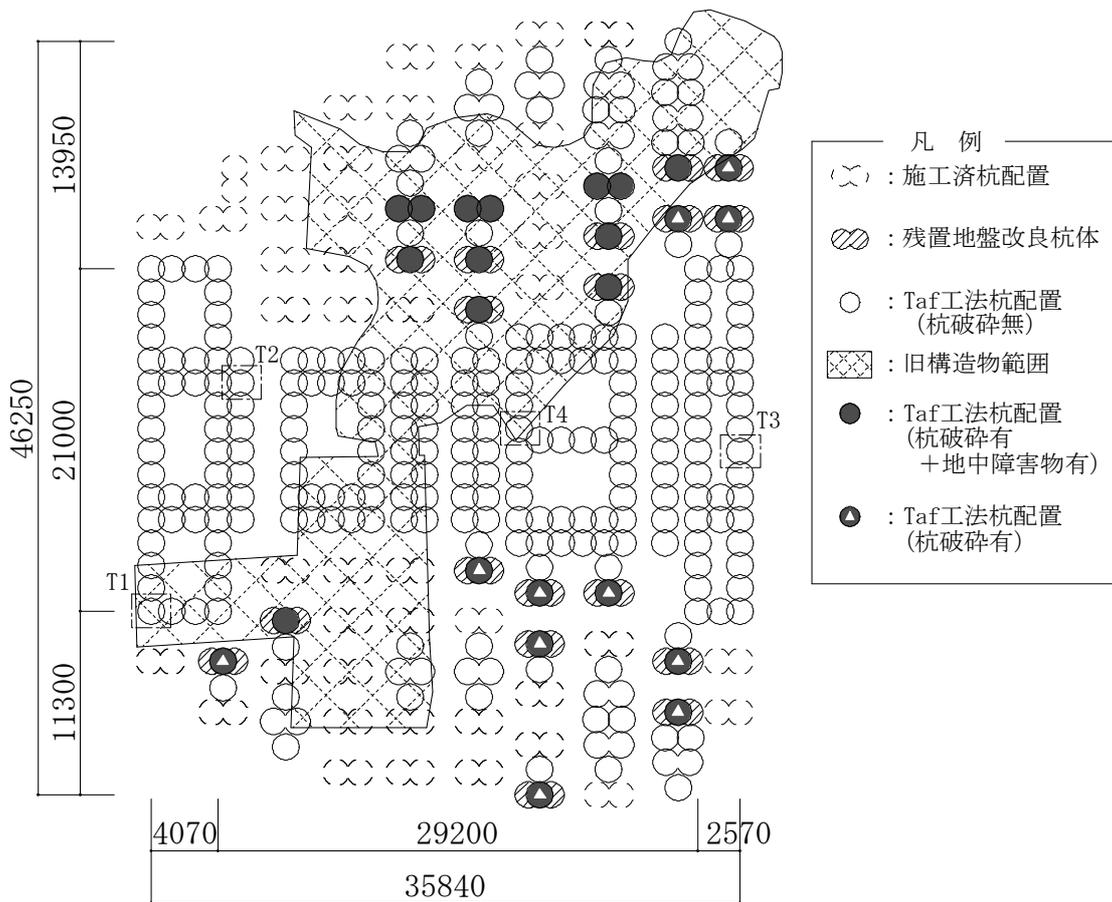


図-3 残置地盤改良体杭位置と地中障害物範囲, および Taf 改良杭配置図

表-3 残置地盤改良体の強度分布推移

	上層部 quf(kN/m <sup>2</sup> )	下層部(上) quf(kN/m <sup>2</sup> )	下層部(下) quf(kN/m <sup>2</sup> )
Z1	3,336	1,545	2,104
Z2	3,823	1,108	2,224
Z3	3,155	1,548	2,893
層平均	3,448	1,400	2,407
全平均	2,418		

表-4 Taf 施工後現場改良強度(材齢 28 日)

	上層部 quf(kN/m <sup>2</sup> )	下層部(上) quf(kN/m <sup>2</sup> )	下層部(下) quf(kN/m <sup>2</sup> )
T1	3,283	1,957	1,116
T2	3,382	2,058	1,788
T3	1,660	1,268	1,302
T4	2,010	1,673	1,000
層平均	2,584	1,739	1,302
全平均	1,875		



写真-2 残置改良体の破砕状況

し、混合攪拌を行わなければならず施工の円滑さが懸念された。

しかしながら、写真-2 より攪拌翼周辺には直径およそ 30cm 大の破砕片が散在し、滞ることなく残置地盤改良杭体を粉砕している状況が見取れる。

通常の地盤環境に比べ、厳しい条件が二重三重に取り巻く中で改良体造成となったが、Taf 工法は補助工法を援用することもなく、当初の計画配

置通りに改良体の造成を実現させた。Taf 工法による施工の妥当性を検証するため、No.T1~T4 改良体から採取深さを 3 層の各深さ域から得た材齢 28 日供試体の現場改良強度を取りまとめた結果が表-4 である。

Taf 施工後の現場改良強度は、採取深さに依存する傾向が認められるが、平均現場改良強度 quf =

1,000~3,382kN/m<sup>2</sup>であり、設計基準強度  $q_{uck}=800\text{kN/m}^2$  を十分満足する結果となった。

改良対象地盤は高止まった地盤改良杭体（改良径 $\phi 1.6\text{m}$ 、長さ $L=4\text{m}$ 、平均強度 $q_{uf}=2,420\text{kN/m}^2$ ）が残置し、コア長200mmの玉石が混在する粘土層と $N>20$ の締まった砂層から成る存在する厳しい地盤環境下にあった。しかしながら、Taf工法は輻湊する改良困難条件を克服し、補助工法を用いることなく当初の計画改良仕様通りに改良体の造成に成功し、同工法の高機能性を十分実証することができた。

#### 4. 低変位施工に向けた技術改良

##### 4.1 低変位施工に向けた技術改良

最近の都市部における再開発工事等では、地盤改良工事が既存の施設・構造物に近接して行われる機会が増大している。地盤改良に伴って発生する周辺地盤の変位は、施工原理から必然の現象であるが、これを抑止する確実な技術が強く求められている。

地盤改良が周辺地盤を変位させる主な要因として、i) 攪拌翼回転装置の挿入、ii) 固化材の圧入等が指摘されている。これらは削孔内に体積変化を強制し、結果として攪拌翼回転部の圧力を高

める。これと地盤の応力異方性が関連して水平変位が発生すると考えられる。したがって、貫入した攪拌翼回転部の圧力状態を把握し、その圧力を適切に調整する機構を備えることで水平変位を抑制することの可能性が示唆される。



写真-3 スパイラルロッド(PIs工法)による試験施工全景

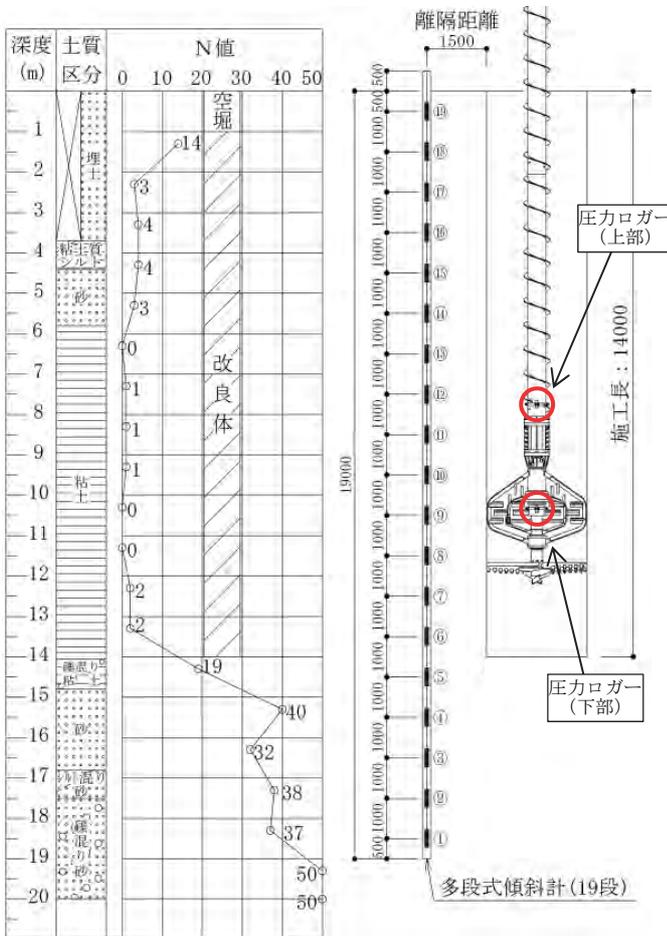
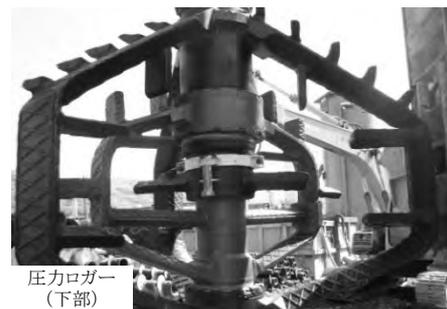


図-4 土質柱状図、改良深度ならびに多段式傾斜計配置図



圧力ロガー (上部)



圧力ロガー (下部)

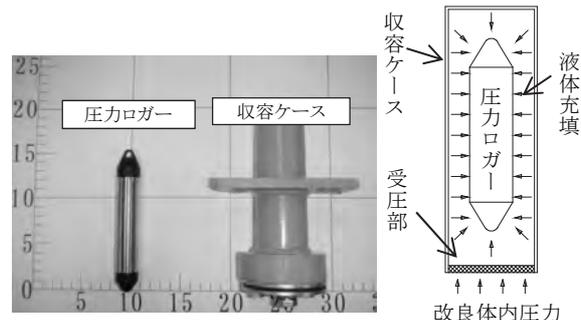


写真-4 圧力ロガーと設置状況

そこで本検討では、エポコラム攪拌翼回転部の圧力を独自のデータロガー付圧力センサー（以下、圧力ロガーと呼称する）で、2箇所計測することを試みた。同時に、周辺地盤の変位を抑止する方法として攪拌回転軸に取付けたスパイラルフィン（以下、スパイラルロッドと呼称する）で排土を促し、極力封入圧力を適正に保つことで低変位を実現することを目標とした。

写真-3は、スパイラルロッドを装着した Pls 工法の施工機全景である。

#### 4.2 地盤条件

図-4は、試験施工場所の深さ方向に分布する土質と  $N$  値の関係を表す土質柱状図である。また、同図には後述する改良体造成時の地盤変位を測定する多段式傾斜計の配置図が併記されている。地盤は、表層に  $3 < N < 4$  のガラを含む埋土層が存在し、その下部は  $N \approx 4$ 、層厚 1m 未満の粘土質シルトである。これに  $N \approx 3$ 、層厚 1m の砂層、さらに層厚約 8m、 $0 < N < 2$  の粘土層が堆積している。試験施工はこの粘土層底部と改良体下端が一致する範囲を対象に、改良体施工に伴う地盤変位の挙動を調査した。

表-5 改良仕様

試験 No	H-1	S-1
ロッド	標準	スパイラル
改良径	$\phi 2.5\text{m}$	
施工長	14.0m(空堀長 1.0m, 改良長 13.0m)	
添加量(W/C)	200kg/m <sup>3</sup> (80%)	

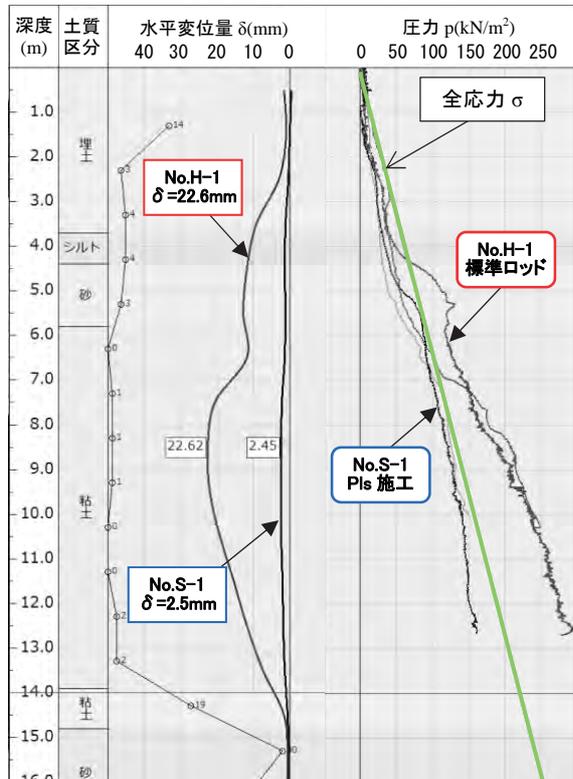


図-5 地中内応力分布と地盤変位量

#### 4.3 施工試験仕様

造成する改良体は改良径  $\phi 2.5\text{m}$  で、施工長は表層から層厚 8m の粘土層下端に達する  $L=14\text{m}$  である。固化材添加量は  $aw=200\text{kg/m}^3$  ( $W/C=80\%$ ) で、吐出量は攪拌翼先端ならびに翼中より、 $q=2220/\text{min}$  を各孔から吐出した。吐出方法は貫入時吐出とした。このような施工方法を共通として、一つは標準ロッド、他には新たに開発したスパイラルロッドを用いてそれぞれ改良体造成し、周辺地盤に与える変位を比較した。施工試験仕様を表-5に取りまとめて示す。

#### 4.4 攪拌混合時の地中内圧力ならびに周辺地盤の変位測定方法

改良体の造成に伴う地盤変位は、攪拌混合装置の挿入ならびに固化材スラリー吐出時の圧力によって発生すると考えられる。このため、写真-4に示すように攪拌翼内と攪拌翼上部のシャフトの2箇所計に圧力ロガーを取付けた。これによりエポコラム攪拌翼の挿入から攪拌・混合に至る地盤内の圧力変化を連続的に捉えられる。なお、圧力ロガーは液体が充填された収納ケースに納められ、受圧部を介して固化材と地盤土が混合した泥土の圧力が伝えられる。写真-4に圧力検出システムの構造を、ならびにこれを攪拌翼中、攪拌翼上部に取り付けた状況の全体図を図-4に示す。

一方、周辺地盤には、図-4のように外翼から離隔距離 1.5m ( $x/L=0.11$ ) の位置に、深度 1m ごとに地盤の傾斜を測定する多段式傾斜計 ( $\phi 30\text{mm} \times h450\text{mm}$ , 19 段) を設置し、測定結果を積分して攪拌混合時の経時的な水平変位量を算出した。

#### 4.5 攪拌混合時の圧力変化と周辺地盤変位の測定結果

図-5は標準ロッドおよびスパイラルロッドの先端に同じ攪拌翼を取り付けて、改良体造成開始から攪拌翼先端部着底までの間で攪拌混合部に生じた圧力  $p$  と周辺地盤の水平変位  $\delta$  の深さ  $z$  に対する変化を示している。なお、地盤深度  $z \sim$  攪拌混合圧力  $p$  の関係を表すグラフ中に全応力  $\sigma$  が併記されている。これは地表面を基準にして、固化材スラリー混合土の単位体積重量  $\gamma$  と深度  $z$  の積を深さに対して描いたもので、地盤内圧力の目安としている。

標準ロッドの場合のエポコラム施工では、固化材スラリーの吐出に伴い徐々に地中内応力が増加し、深度  $GL-5.0\text{m}$  付近通過後から全応力を超過する。深度  $GL-9.0\text{m}$  付近からは圧力上昇はなくなる。それ以降の圧力は低下せず、全応力  $\sigma=190\text{kPa}$  のおよそ 1.5 倍の  $\sigma=280\text{kPa}$  で着底した。

また水平変位量  $\delta$  は、固化材スラリーの吐出とともに圧力状態 ( $p > \sigma$ ) に応じて次第に増大する傾向を示し、着底時に地盤深度約  $L=8.5\text{m}$  で最大水

表-6 標準施工とPls 施工による造成結果比較

	標準ロッド	スパイラルロッド
最大水平変位(mm)	22.62	2.45
全応力との圧力差(kPa)	+85	-25
固化材総注入量(m <sup>3</sup> )	15.19	15.58
排土量(m <sup>3</sup> )	6.61	12.51
排土率(%)	44	80

平変位置量  $\delta_{max}=22.6\text{mm}$  が観測された。

一方、スパイラルロッドを装備したPls 工法の場合では、固化材スラリーの吐出開始から攪拌翼先端部着底に至る間の圧力  $p$  は、全応力  $\sigma$  の大きさにはほぼ一致し ( $p \cong \sigma$ )、標準ロッドのように  $p > \sigma$  のような過大な圧力の発生は認められなかった。

その結果、水平変位置量は小さく  $\delta=2.5\text{mm}$  の値に止まった。これは標準ロッドの場合のおよそ 1/10 の値である。表-6 に標準ロッドおよびPls 工法のスパイラルロッドを用いて  $\phi 2.5\text{m} \times \text{L}14\text{m}$  の改良体造成した比較データを取りまとめて示す。

同表から、2方法の施工方法では、改良体造成に使用した固化材注入量はほとんど同量である。しかしながら、地中より排出された1本施工当たりの排土量は標準ロッドで  $v=6.61\text{m}^3$ 、スパイラルロッドではその約2倍量の  $v=12.51\text{m}^3$  となった。この点にこそ、スパイラルロッドを装備したPls 工法の狙いがある。すなわち、周辺地盤に生じる変位の抑制には、排土を促すことが極めて効果的であることが首肯される。なお、Pls 施工時に排出される排出土の性状は、固化材を含み自硬性があるため固結化する。

#### 4.6 Pls 工法による低変位施工の実績

今回の試験工事よりスパイラルロッドが排土を効率高く促進させ、これを装備したPls 工法が高い低変位性能を有することが確認された。そこでPls 工法の低変位性を既存の工事実績より検証することを試みた。図-6 は、Pls 施工の6ケース、ならびに標準ロッドによる4ケースの計10ケースについて発生した水平変位置量を現場にて測定した結果である。なお、図中の縦軸に水平変位、横軸は改良域からの離隔距離  $x$  を改良体長さ  $L$  で規準化した  $x/L$  として、両者の変位置量の挙動を比較した。

改良域に近いすなわち、 $x/L=0.1$  のように小さな範囲では標準ロッドによる水平変位置量は  $\delta=70\text{mm}$  を超えるが、Pls 施工では高々  $\delta=10\text{mm}$  以下の 1/7 以下に止まり、周辺への影響を効果的に軽減している。また、 $x/L > 0.5$  範囲になれば両者はほぼ同程度の変位置量に収束している。

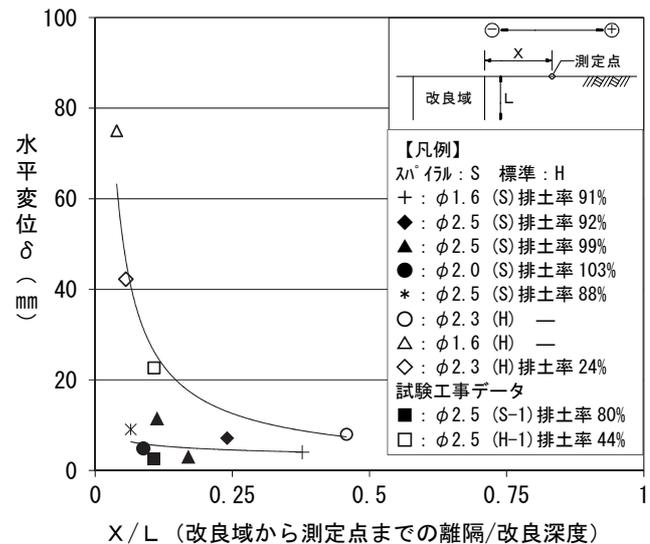


図-6 Pls 工法と標準ロッド施工による  $x/L$  比と水平変位置量

## 5. まとめ

エポコラム工法を基礎技術として、地盤改良を阻害する要因を克服する事例ならびに地盤変位抑止技術の適用性について紹介した。その結果、

(1) Taf 工法は 3 つの改良阻害要因 (地中障害物、中間層、残置改良体) が複合する地盤を、補助工法を使用することなく、同一工程で仕様に合致した改良体を造成することに成功した。

(2) Pls 工法では施工機の回転軸に装備したスパイラルフィンが地盤土の引上げを促し、攪拌混合部の圧力を抑え、周辺地盤の変位を最小限に抑止することを確認できた。当技術は、大口径化施工の低変位化を確実にする工法の一つと位置付けられ、都市部の再開発事業に大きく寄与することが考えられる。

すなわち、エポコラム工法がラインアップする技術は様々な施工環境における地盤工学上の諸課題に適用され、多大な成果をもたらしている。今後も先進的な技術開発に果敢に挑戦し、地盤改良技術の向上と適用性の拡大に務める所存である。

## 参考文献

- (一財)先端建設技術センター：先端建設技術・技術審査証明報告書「エポコラム工法—Loto工法、Taf工法、Pls工法—」, pp.7~14, 2017
- 松岡大介・西尾経・竹田敏彦・市川公彦・高倉功樹・齋藤邦夫：最新の地盤改良技術と施工事例, 第15回土質基礎に関する「我が社の誇れる技術」技術報告会, 北海道土木技術会, pp.32~39, 2017.2

## 18. トンネル工事の作業ライン生産性の可視化方法に関する研究

株式会社まざらん  
株式会社キック  
西松建設株式会社

○西垣 重臣  
才原 勝敏  
鬼頭 夏樹

### 1. はじめに

トンネル工事建設機械（ドリルジャンボ、ブレーカ、サイドダンプ、吹付け機など）が形成する作業ラインの生産性を可視化する予測判別モデルについて報告する。

この予測判別モデルの構築に際して、我々の研究活動で培った学習の仕方と蓄積してきた数理モデルを転移学習するとともに、強化学習の一つである Actor-Critic の枠組みを活用する。転移学習とは、ある問題を効果的かつ、効率的に解くために、別の関連した問題のデータや学習結果を再利用することをいう。Actor-Critic とは、試行錯誤の結果を評価して、より良い行動を選択して学習していく制御の枠組である。

まず、関連する研究と予測判別モデルの特徴について述べる。つぎに、研究対象とするトンネル工事の概要を示す。そして、転移学習の過程と Actor-Critic に枠組みに基づいた予測判別モデル、そして、このモデルの適用結果などを報告する。最後に、まとめと今後の課題を示す。

### 2. 関連する研究

切羽前方探査、変位予測、3Dレーザースキャナによる三次元形状計測、地盤判別、掘削機の自動化など多種多様な研究がある<sup>1)</sup>。これらの研究をみると、トンネル建設機械稼働管理に関して、転移学習や強化学習を活用した研究は少ないようである。

今までに、再帰分割手法を活用した不安全行動のテンプレート<sup>2)</sup>、協働的施工作業のための施工プロファイル<sup>3)</sup>、急峻な作業道において稼働する林業機械のオペレータを支援する取り組み<sup>4)</sup>などに関する研究を行ってきた。

予測判別モデルを構築する際に、これらの研究活動で培った学習の仕方と蓄積してきた数理モデルを改良のうえ再利用する。この予測判別モデルの特徴をつぎに示す。

- (1) トンネル工事建設機械の稼働により励起される三軸加速度の時系列データを対象とする。
- (2) このデータから有用なパターン、傾向など

を検出し、判断基準としての閾値などを形式化し、予測判別モデルを構築する。

(3) このモデルにより作業種別ごとの実稼働時間と全実稼働時間、サイクルタイム（ピッチタイム）、ラインバランス・ロスなどの定量的指標を出力する。ラインバランス・ロスとは、建設機械編成バランスによる作業配分の非効率性を示す定量的評価指標である、

(4) これらの定量的評価指標と時系列グラフ、箱ひげ図、ピッチダイヤグラムなどのグラフをインフォグラフィックスとして自動的に生成する。ピッチダイヤグラムとは各建設機械の稼働時間のバランス状態を図示したものである。

ピッチタイムとボトルネック、そしてラインバランス・ロスの関係を図-1に示す。

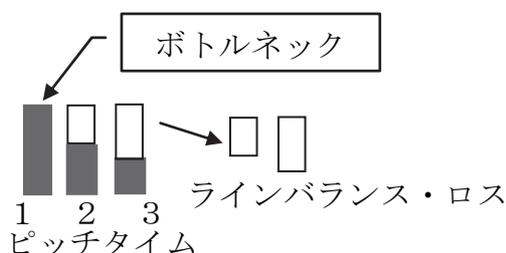


図-1 ピッチタイムとボトルネック、そしてラインバランス・ロスの関係

(5) 強化学習の一つである Actor-Critic の枠組みに基づいて予測判別モデルを構築し、適用する。

(6) 利用者は、これらの定量的評価指標とインフォグラフィックスを一目みることで、作業ラインの生産性の現況を視覚的に理解できる

(7) 結果として、作業ライン生産性の可視化により適時的確な意思決定と迅速な対策の促進が期待できる。

### 2. 工事概要

研究対象とするトンネルは、高知県幡多郡黒潮町佐賀橋川～拳ノ川間における全長 665m の

山岳トンネルである。このトンネルは高知県高岡郡四万十町金上野から幡多郡黒潮町拳ノ川にかけて計画されている自動車専用道路である一般国道56号片坂バイパスの最も終点側に位置する(図-2)。



図-2 片坂バイパス全体図

国道56号片坂地区は、急カーブ(R=80m以下7箇所)と急勾配(最急縦断勾配7%)の連続により事故危険箇所となっているとともに、落石や法面崩壊等の災害危険箇所となっている。このバイパスは、災害時の危険箇所の回避および南海地震・東南海地震に備えるための代替路線として整備が進められている。この事業により、安全で円滑な通行が可能となり、将来は四国8の字ネットワークの一端を担うとともに、高知西南地域における地域間交流の活性化に寄与することが期待されている。

## 2.1 地形概要

当該地域は標高200~400mの山地であり、周辺は隆起した地形面が強い侵食を受け形成された地形区で、「伊与木川侵食面」と称される。全体に山頂や稜線が狭く尖った山体形状を呈するとともに、斜面は急峻であり、尾根から山麓までおおむね一様な傾斜を示す。

拳ノ川トンネルは、延長665mのトンネルで、測点No. 101+50付近で最大土被り約80mとなる。測点No. 100+60付近、No. 103+70付近、No. 105+10付近で沢地の下を通過し、土被りはそれぞれ約20m、約20m、約15mである。

坑口部の地形とトンネル軸線との関係は、起点側で斜面直行型、終点側で尾根部進入型となる。また、終点側坑口に緩んだ尾根が認められる。

## 2.2 地質概要

当該地域周辺の基岩地質は、四万十帯北帯に属する、中生代白亜紀の野々川層と呼ばれる地層である。この地層は砂岩、泥質岩およびその互層で構成され、当地区では泥質岩優勢層を主体とする地層が分布する。地層の構造は場所により変化するが、概ね東西方向の走向を有し、

北傾斜となる。泥質岩は、岩自体に割れ目が非常に多く、破碎された箇所も多い。このため、場所によっては地表面下10m以上の深さまで土砂状に強風化するところもある。

具体的には、トンネル全線において露頭レベルで確認できる断層が5条存在すると想定されており、トンネル掘削への影響が懸念されていた(図-3)。

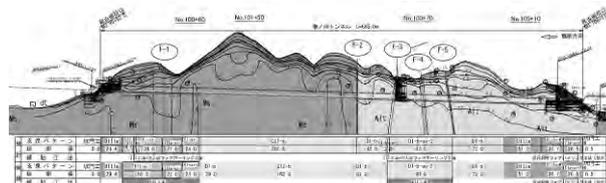


図-3 地質縦断図

## 3. 転移学習過程と予測判別モデル

### 3.1 センサ

工事現場におけるデバイス機器類の管理の煩雑を軽減するために、スマートフォンGalaxy S3に内蔵されている3軸加速度計を使用する。このセンサは計測データのログ機能とデータ送信を担うアプリケーションを持つ。そのアプリケーションの画面を図-4に示す。ここで得られる計測データの変数名は、時刻、x軸加速度、y軸加速度、z軸加速度などである。

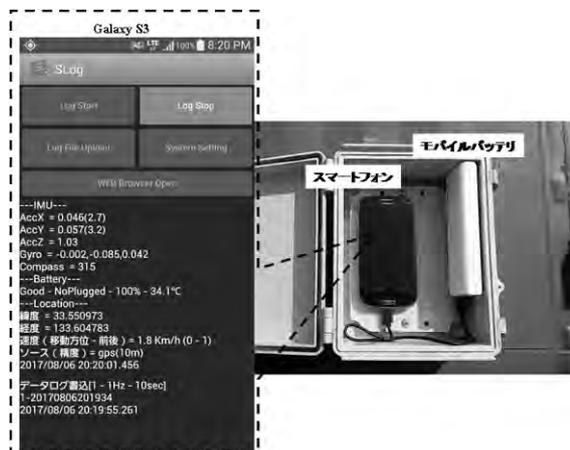


図-4 スマートフォンのアプリケーション画面

### 3.2 転移学習過程

本研究で採用した転移学習過程について述べる。今までの研究から、バックホウ、ブルドーザなどの建設機械の稼働によって励起する加速度応答値の平均値と分散の変化点、そしてその時刻を把握することにより、その実稼働時間を計算できることが分かっている。この情報と知

識をトンネル工事の作業ラインを形成する建設機械の生産性を可視化する予測判別モデルの開発に再利用する。

ここでの転移学習過程は、教師付きデータによる学習と目標とする教師なし観測データの学習に分かれる。

(1) 教師付きデータを得るための事前調査

作業種別ごとの時系列データの経時変化に注目する。対象とする建設機械とその作業種別の名称（ラベル）を以下に示す。

- ①ドリルジャンボ：上半穿孔，下半穿孔，ロックボルト
- ②ブレーカ：こそく
- ③サイドダンプ：ざり出し
- ④吹き付け機：一次吹き付け，二次吹き付け，支保工建て込み，下半吹き付け

これらの建設機械にスマートフォンを車載し、ワンシフト（昼番）間の三軸加速度を計測した。このときのサンプリング周波数は100HZである。同時に、作業種別ごとの開始時刻と終了時刻を目視判断で作業時間記録表に記録した(図-5)。両者をつき合わせて教師（ラベル）付き学習データを編集した。

作業内容	機械名称	エンジンON	エンジンOFF	作業開始	作業終了	エンジンON	エンジンOFF	備考
穿孔・装薬	ドリルジャンボ	10:07	10:08	10:13	11:15	10:07	11:21	
発破						11:15		11:24
ズリだし	サイドダンプ	11:40		11:43	12:19		12:30	11:40~11:45
コンク	ブレーカ	11:40		11:43	11:40		12:37	
一次吹き付け	吹き付け機	12:37		12:38	12:42			
支保工建て込み	吹き付け機	12:37		12:48	14:20			
二次吹き付け	吹き付け機			14:21	14:23	14:23	14:24	
下半吹き付け	吹き付け機				14:24	14:24	14:43	
カストリ	ブレーカ	14:23		14:24	14:34		14:42	
ロックボルト	ドリルジャンボ	14:43	14:48	14:50	15:38			

図-5 作業時間記録表

この学習データを解析することで得た知見をつぎに示す。

- ① 上下方向加速度の経時変化をみると、発破特に衝撃を受けて建設機械の自由落下事象が発生している。
- ② 平均値と分散の変化と作業種別  
加速度応答値の波形変化をみると、平均値と分散の変化に作業種別の違いがよく表れる。ドリルジャンボの作業種別の違いは、三軸加速度の前後方向加速度の波形変化によく表れる。吹き付け機の作業種別の違いは、三軸加速度の左右方向加速度の波形変化によく表れる。
- ④ ブレーカは前後方向加速度の、サイドダンプは左右方向加速度の分散の違いにより実稼働

を把握できる。

(2) 目標とする観測データの学習

長期間に亘るサンプリング周波数 100Hz の計測は、データ容量を非常に大きくし、計算負荷が重たくなる。そこで、実務適用時を想定して、サンプリング周波数を 1Hz とする。

この観測データは教師なし学習データである。この学習データの経時変化は事前調査時の学習データと類似の動きを示す。そこで、事前調査時の学習データで得られた知見に基づいて、この教師なし学習データの一部を取り出し、作業種別のカテゴリを付与して教師つき学習に整形する。

ドリルジャンボの前後方向加速度の波形変化を図-6 に、作業種別ごとの前後方向加速度の箱ひげ図を図-7 に、それぞれ示す。この図は、中央値を中心とした範囲値（上限値と下限値）により作業種別を識別できることを示唆している。

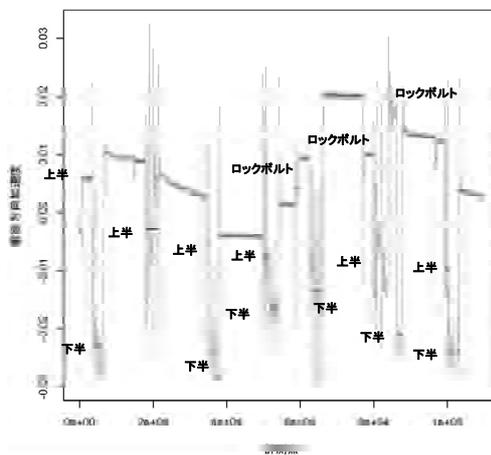


図-6 ジャンボドリルの前後方向加速度の波形変化と作業種別のカテゴリ

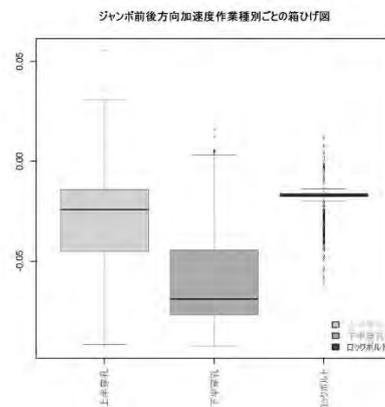


図-7 ジャンボドリルの前後方向加速度作業種別ごとの前後方向加速度の箱ひげ図

事前調査時の学習過程において得た知見と同様に、三軸加速度の経時変化をみると、特定の軸に待機時と実稼働時の分散が大きく異なる現象をみてとれる。そこで、分散の変化点とその時刻を検出することで、実稼働時間を計算する。

### 3.3 Actor-Critic の枠組みと予測判別モデル

Actor-Critic の枠組みに基づいた予測判別モデルの概要を図-8 に示す。

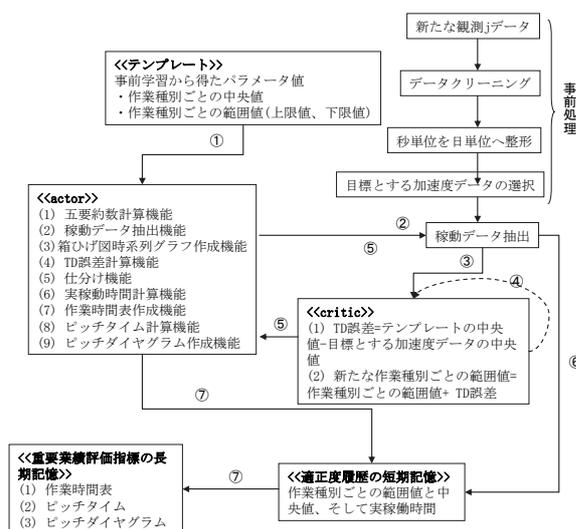


図-8 Actor-Critic の枠組みに基づいた予測判別モデルの概要

予測判別モデルは、テンプレート, actor, critic, 適正度履歴(eligibility trace)<sup>5)</sup> の短期記憶, 重要業績評価指標の長期記憶などで構成される。

#### (1) 事前処理

新たな観測データを入手したとき、まず、データクリーニングを行い、1秒単位の計測データを日単位に整形する。データクリーニングでは、既定の配列ではないレコード、欠測値を含むレコード、外れ値などを除去する。外れ値の除去には中央値絶対偏差(MAD: Median Absolute Deviation)を使う。つぎに、三軸加速度のうち目標とする加速度の軸を選択する。そして、分散の変化点とその時刻を捉え、稼働状態のデータを抽出する。

#### (2) テンプレート

テンプレートは、事前学習から得たハイパーパラメータ値である作業種別ごとの中央値と作業種別ごとの範囲値(上限値, 下限値)を持つ。ハイパーパラメータとは、学習を行う際に、これまでの知見に基づいて、予め設定しておかなければいけないパラメータである。

#### (3) 観測データの構造

予測していない作業環境の変化や事象生起により新たなデータは構造的に学習モデルのもの

と異なるかもしれない。例えば、歪みや尖りの変化と中央値の上方または下方にシフト、トレンドの発生、不規則変動の顕著な発生、欠測値の増加、新しい事象の発生などのような事象が想定される。

このような事象に直面したときは、センサの点検、計測データの品質チェックとデータクリーニング、ノイズ進入ルートの探索と遮断、予測・判別モデルのハイパーパラメータ調整などのような対策が必要になる。

対象とする計測データの構造が学習データの構造と乖離していないかを見る。その簡便な方法として、日単位の箱ひげ図の時系列グラフを作成する。ドリルジャンボの稼働データの箱ひげ図の時系列グラフを図-9 に示す。中央値の変動がみてとれる。

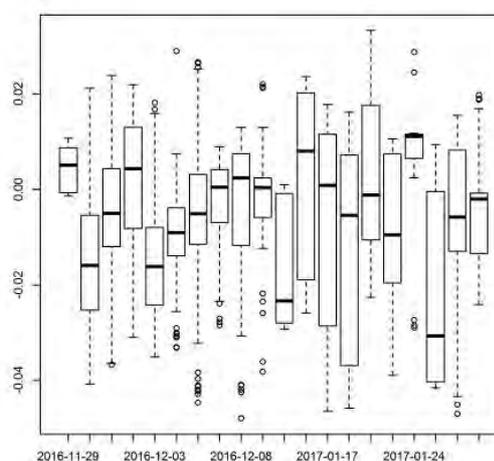


図-9 ドリルジャンボの稼働データの箱ひげ図の時系列グラフ

#### (4) Actor の行動

- ① Actor は行動選択と実行能力を持ち、テンプレートが持つパラメータ値を使って、目標とする計測データを解析する。
- ② Actor は、その計測データの分散の変化点とその発生時刻を把握する。分散の第一四分位数を閾値として、これを超える分散が発生している時刻に建設機械は稼働していると判断する。この判断に基づいて、稼働データを抽出する。
- ③ Actor は、目標とする稼働データの中から、作業種別ごとの中央値を中心として範囲値内にある計測値を選択する。その計測時刻を対象にして日単位の稼働時間を計算し合計を取る。
- ④ Critic は、actor による解析結果を評価する。計測値の中央値と学習モデルの中央値との差で

ある TD (temporal-difference)誤差により作業種別ごとの範囲値を補正する。

- ⑤Actor は Critic の評価結果を受けて、目標とする計測データを再度解析し、作業種別ごとの範囲値と中央値、そして実稼働時間を出力する
- ⑥これらの出力結果は適正度履歴として短期記憶される。
- ⑦Actor は、短期記憶情報に基づいて、重要業績評価指標である作業時間表、ピッチタイム、ピッチダイヤグラムなどの可視化情報を出力する。これらの可視化情報は長期記憶される。

### 3.4 中央値絶対偏差

中央値は、データの中心性を計る尺度であり、平均値よりは外れ値の影響を受けない。中央値を中心としたバラツキを考慮したい。そこで、中央値絶対偏差を活用する<sup>6)</sup>。中央値絶対偏差は、観測データの各値からその中央値を引いた値の絶対値の中央値として(1)式により計算される。

$$MAD(x) = median(abs(x, -median(x))) \quad (1)$$

ここで、MAD: 中央値絶対偏差、abs(): 絶対値、median()は中央値を計算する関数である。作業種別ごとの範囲値（上限値、下限値）の計算と外れ値の検出に(2)式を用いる。

$$outlierMAD = K \times abs(x - median(x)) / MAD(x) \quad (2)$$

ここで、K: cut off パラメータ、abs()は絶対値を取る関数などである。

### 3.5 分散の変化点の検知方法

時系列データの変化点を検知する手法として、2分割(binary segmentation)と最適分類<sup>7)</sup>に習い、観測データの分散の変化点を検知する手順をつぎのようにする。

- 手順1: 目標分割数を決める。
- 手順2: 時系列データを走査し、群間分散と全分散の尤度比が最も大きい点でデータを2分割する。
- 手順3: 2分割したデータ群、それぞれに手順2を適用する。
- 手順4: 分割したデータ群数が目標分割数に達したら、手順を終了する。

## 4. 予測判別モデルの適用

学習データ計測以後に計測されたデータに、予測判別モデルを適用した結果を報告する。

作業記録表から計測期間の稼働時間を抽出して作成した作業時間表を表-1に示す。予測判別

モデルの出力である作業時間表を表-2から表-5に示す。

表-1 作業記録表に基づく作業時間表

建設機械	作業種別	作業時間(分)	サイクルタイム(分/m)
ジャンボドリル	削岩ロックボルト	479	3.74
ブレーカ	こそく	78	0.61
サイドダンプ	ずり出し	225	1.76
吹き付け機	吹き付け・支保工建て込み	538	4.2
作業時間合計(分)		1320	10.31
進行長(m)		128	

表-2 ドリルジャンボ作業時間表

	時間(分)	比率%
待機時間	3863	89.421
上半穿孔時間	58	1.343
下半穿孔時間	265	6.134
ロックボルト時間	127	2.94
稼働時間	457	10.579
全計測時間	4320	100

表-3 ブレーカ作業時間表

	時間(分)	比率%
待機時間	4247	98.3
こそく時間	73	1.7
全計測時間	4320	100

表-4 サイドダンプ作業時間表

	計測時間(分)	比率%
待機時間	4098	95
ずり出し時間	222	5
全計測時間	4320	100

表-5 吹き付け機作業時間表

	計測時間(分)	比率%
待機時間	3765	87.153
一次吹き付け時間	31	0.718
二次吹き付け時間	196	4.537
下半吹き付け	97	2.245
支保工建て込み時間	200	4.63
稼働時間	555	12.847
全計測時間	4320	100

サイクルタイム(分/m)の棒グラフとラインバ

ランロス率のインフォグラフィックスであるピッチダイヤグラムを図-10に示す。このピッチダイヤグラムから、吹き付け機による作業がボトルネックとなっていることが分かる。ラインバランスロス率は(3)式で求められる。ここでピッチタイムはサイクルタイムを指す。

ラインバランスロス率 = (工程数 × ボトルネック工程のピッチタイム - 各工程のピッチタイムの合計時間) / (工程数 × ボトルネック工程のピッチタイム) (3)

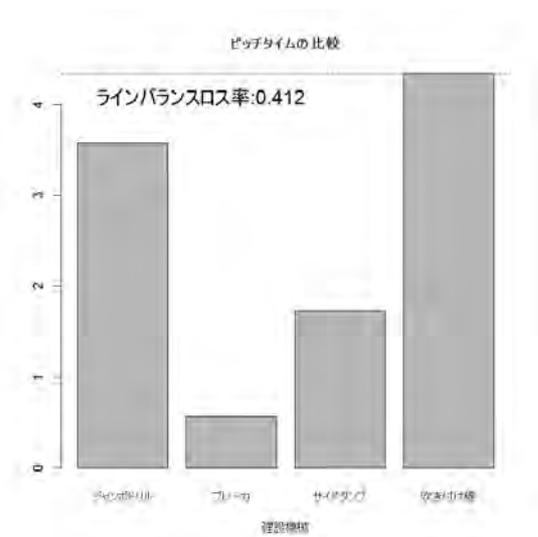


図-10 ピッチダイヤグラム

この予測判別モデルの予測能力を示す汎化誤差を表-6に示す。予測判別モデルを目標とするデータに適用した作業時間と作業記録時間表の作業時間の差を汎化誤差とする。表-6をみると、予測判別モデルの出力結果は、作業記録時間に大凡合っていることが分かる。

表-6 汎化誤差 単位：分

建設機械	作業記録時間	作業計算時間	汎化誤差
ジャンボドリル	479	457	22
ブレーカ	78	73	5
サイドダンプ	225	222	3
吹き付け機	538	555	-17
作業時間合計	1320	1307	13

## 5. まとめと今後の課題

転移学習による学習過程と Actor-Critic の枠組みに基づいた予測判別モデルについて報告した。そして、このモデルが箱ひげ図時系列グラフ、実稼働時間、ピッチダイヤグラムなどの作業ライン生産性可視化情報を出力することを示した。これらの情報は日単位でフィードバックされる。

利用者はこれらの情報を一目みることで、トンネル工事の作業ライン生産性の現況を理解することができる。

今後の課題をつぎに示す。

- (1) 新たなトンネル工事現場への転移学習による予測判別モデルのブラッシュアップ
- (2) 素早くより良い予測判別モデルを構築するための学習の仕方の学習、言い換えれば仕事術 (work hacks) の整理。ここで、仕事術とは、効率良く仕事をこなし、高い生産性を上げ、仕事のクオリティを高めるための工夫をいう。
- (3) トンネル工事の作業ライン生産性を可視化する動的モニタリング・システムの構築。ここで、動的とは情報の経時変化をいう。このモニタリング・システムは、一定間隔、例えば、5分乃至10分間隔で情報を更新する。

## 参考文献

- 1) 電力工事委員会 技術部会 電力情報化施工WG: 電力土木における情報化施工・ICT活用に関する調査、電力土木における情報化施工・ICT活用に関する調査報告書, 28\_4章2.2 山岳トンネル④No.4.2-22~No.4.2-26, 2017.
- 2) S. Nishigaki, J. Vavrin, N. Kano, T. Haga, J. Kunz and K. Law: "Human ware, Human Error, and Hiyari-hat: a Template of Unsafe Symptoms," Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, Vol. 120, No. 2, pp. 421~442, 1994.
- 3) S. Nishigaki, H. Sugiura, T. Takamura, H. Ogura and K. Hatori: "STUDY ON FRAMEWORK OF CONSTRUCTION PROFILE FOR COLLABORATIVE AND INTELLIGENT CONSTRUCTION," Journal of Applied Computing in Civil Engineering, Vol.14, 2005.
- 4) Katsutoshi Saibara, Shigeomi Nishigaki, Fujio Matsuda, Shinichi Kubota: "Contrivances to Assist Forest Machine Operator on Forest Road with Steep Slope," Proceedings of the 31st ISARC, pp. 458-465, 2014.
- 5) Singh, S. P. and Sutton, R. S.: "Reinforcement Learning with Replacing Eligibility Traces," Machine Learning, Vol. 22, pp. 123-158, 1996.
- 6) Christophe Leys, Christophe Ley: "Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median," Journal of Experimental Social Psychology, YJESP-03038; No. of pages: 3; 4C, 2013.
- 7) A. J. Scott and M. Knott: "A Cluster Analysis Method for Grouping Means in the Analysis of Variance," Biometrics, pp. 507~512, Vol. 30, No. 3, 1974.

# 19. 間伐施業の生産性・安全性指標の強化学習を活用した可視化方法

株式会社まざらん ○西垣重臣  
株式会社キック 才原勝敏  
溝渕林業株式会社 溝渕真一

## 1. 問題が潜在する環境と問題解決の動機

本研究の目的をつぎに示す。

- (1) 林業機械の IoT 化を図ることで林業機械の振る舞いに潜む特徴を把握する。
- (2) 強化学習過程を通じて、この特徴を整理し、予測・判別モデルを構築する。
- (3) 予測・判別モデルを活用して、間伐施業に関わる生産性と安全性の定量的評価指標とインフォグラフィックスを生成する。

IoT 化とは、オブジェクト、人々、システム、情報資源などを相互接続し、知的サービス提供するインフラストラクチャである<sup>1)</sup>。

著者らは、三軸加速度計を使って、オペレータに対するグラップルの登坂時と残渣処理時の危険警告機能、作業道に潜在するハザードの軽自動車走行による検知方法などについて研究してきた<sup>2)</sup>。この研究成果を活かし、発展させたものが、本研究である。

本研究が対象とする間伐施業工程は、図-1 に示すように、チェーンソーによる伐倒、単胴地曳き集材ウインチによる木寄せ、プロセッサによる造材（原木造材のための素材玉切りと作業道への原木仮置き）、フォワーダによる山土場への原木運搬、グラップルによる山土場への原木仮置き、10t 運搬トラックによる原木市場までの原木運搬などの一連の施業で構成される。施業方法は、定性間伐による単木伐採であり、全幹地引きである。



図-1 本研究が対象とする間伐施業工程

間伐とは、樹木の生長に伴って混み合ってきたが主伐(利用期に達した樹木の伐採・収穫)には至らない森林で、樹木の生育を促すために間引くための伐採である。林業経営において、施業とは、森林に入り、主として樹木を伐採することにより木材を生産する事業を経営管理し処理することを

いう。ちなみに、林道や作業道の開設では施工という。工期とは、要求に応じるタスクの割り当てることをいい、工程と同じ意味である。林業分野では工期ということが多い。

この間伐施業工程の特徴をつぎに示す。

- (1) 用材：杉檜 57 年生、杉檜の比率約 2:1、胸高直径 26~30cm、樹高 20m、1 本当たり材積約 0.62m<sup>3</sup>
- (2) 目標出荷材積：約 90m<sup>3</sup>/ha 間伐率 30%
- (3) 施業エリア地況傾斜 8 度-42 度/ (平均)24 度
- (4) 面積：伐採面積 5.72 ha, 集材面積 5.72 ha
- (5) 作業道：施業エリア内作業道延長距離 1,207m(うち新設 395m), 路網密度 211m/ha, 施業エリアへのアクセスや原木搬出に使用される作業道延長距離約 5,439m
- (6) 構成人員：プロセッサ・オペレータ 1 名, 伐倒作業員 2 名, フォワーダ運転手とグラップルオペレータ：伐倒作業員のうち 1 名が兼務

この間伐施業は、山深い急峻な地形での少人数による作業であり、非常に危険な作業である。この施業エリアにおいては幸運にも携帯電話が使えるとともに、GPS データを受信できた。一般には、携帯電話網の圏外であること、GPS 衛星を捕捉できるが PDOP の値は大きく、連絡網が非常に脆弱である。

施業エリアにアクセスする作業道を図-2 に示す。A は施業エリアへの近道である。B と C の作業道は原木を山土場から原木市場まで運搬するために使用される。

施工エリアの斜面勾配を図-3 に示す。図-3 中の陰影の濃いところの斜面勾配は約 34 度である。斜面勾配の記述統計量は、Min. 7.809, 1st Qu. 19.96, Median 24.82, Mean 24.13, 3rd Qu. 28.52, Max. 41.99, 標準偏差 6.365 である。

林業分野の生産性に関する多くの研究がある。ここでのデータの収集・整形については、その多くが手操作であり、自動化されているとはいえない。測量に関しては GPS 測量が活用され、林業専門の測量ソフトがある。高性能林業機械（ハーベスタ、プロセッサなど）が導入されている。しかし、これらの情報資源が相互連携し、施業データ

の計測と保存・演算が自動化されているとはいいい難い。

IoT は、つぎのことを期待する。

- ①遠隔リアルタイム観測監視
- ②モノの状態の遠隔制御
- ③モノの稼働状況の最適化

しかし、林業分野の現状はこの期待から大きく乖離している。

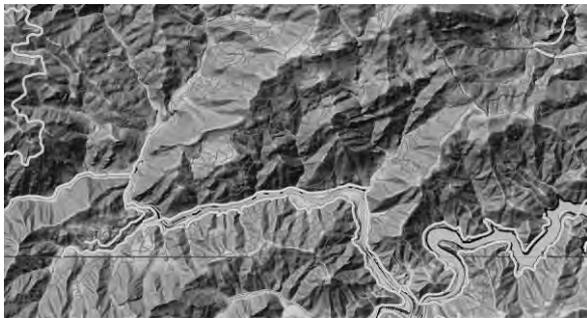
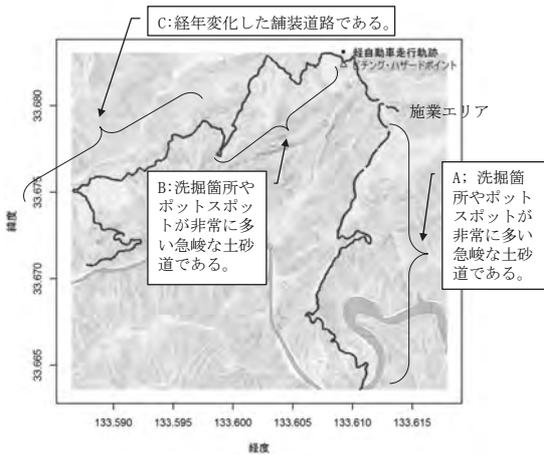


図-3 施業エリアの斜面勾配

まず、予測・判別モデルを構築する強化学習過程について述べる。つぎに、この予測・判別モデルにより生成した生産性と安全性に係る定量的評価指標とインフォグラフィックの例を示す。最後に、期待効果と現状の問題、そして今後の課題を述べる。

## 2. 強化学習による予測・判別モデル構築過程

### 2.1 センサ

「スマートフォンが内蔵するセンサ」と「シングルボード PC である Raspberry Pi をコアに組み立てたセンサ」を使用する。本論文では、前者をスマホ・センサ、後者を ras センサと単に呼ぶことにする。プロセッサにはスマホ・センサと ras センサ

を、フォワーダ、荷下ろし用のグラップル、軽自動車にはスマホ・センサを車載する。チェーンソーによる伐倒を行う作業員はスマホ・センサを胸のポケットに収納する。

サンプリング周波数は、チェーンソーによる伐倒 100HZ, 単胴地曳き集材ウインチによる木寄せ 1Hz, プロセッサによる造材 100HZ, フォワーダ運搬 1Hz, グラップル荷下ろし 1Hz, 軽自動車作業道走行 100HZ である。

### 2.2 強化学習過程

本研究で採用した強化学習過程を図-4 に示す。強化学習とは、試行錯誤を通じてより良い行動を選択していく制御の枠組みである。

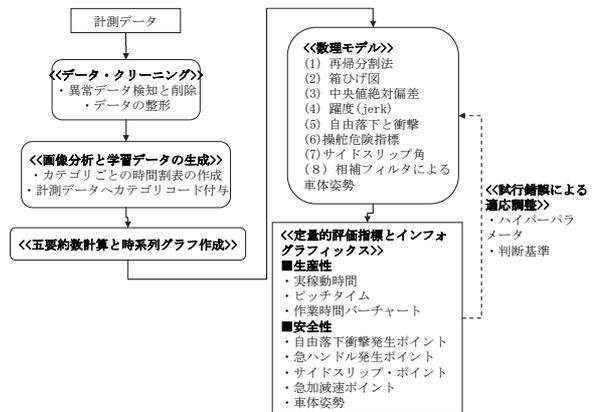


図-4 本研究で採用した機械学習過程

計測と同時にその作業状況を撮画する。画像データと計測時刻の同期は取り難い。そこでカメラ画像の中に時計が写るように工夫した(図-5)。最近、画像内に時刻を表示するカメラが市販されている。今後は、このようなカメラを使う。

画像と時刻に基づいて、作業種別の時間割表を作成する。作業種別ごとの id 番号を割り付ける。作業種別時間割表に基づいて、計測データに作業種別 id を付与し、学習データとする。



図-5 カメラ画像の中の時計

データ・クリーニング後に、五要約数の計算と時系列グラフを作成する。つぎに、問題に応じて、数理モデルを選択し、予測・判別モデルを作成する。予測・判別モデルにより、定量的評価指標の計算とインフォグラフィックスの作成を行う。これらの結果をみて、必要に応じてハイパーパラメータと判断基準の見直しを行い、定量的評価指標の計算とインフォグラフィックスの作成を行う。より良い結果を得るまで、この操作を繰り返す。

### 2.3 数理モデル

図-5 で示した数理モデルの一部についてその概要を以下に示す。

#### (1) 再帰分割法

再帰分割法は、説明変数の値を再帰的に分岐させ、それらを組み合わせて、予測・判別の樹木モデルを構築する。分析の結果を IF-THEN ルールとして返し、またそのルールを木構造で図示する手法である。手法として、AID(Automatic Interaction Detector)<sup>3)</sup>、CHAID(Chi-squared Automatic Interaction Detection)、CART(Classification And Regression Trees)、RPART (Recursive Partitioning and Regression trees)<sup>4)</sup>などがある。CHAID は AID を洗練した手法である。CART は RPART に組み込まれている。本研究では、RPART を使用した。RPART の使い方は、つぎのように大きく二つに分かれる。

- ① 目的変数が質的変数であるとき、群間分散が最大となるように再帰的分割を行い、分類木を作成する。AID と CHAID の手法と同じである。
- ② 目的変数が連続値などの量的データであるとき、回帰分析を使い、残差平方和が最小になるように再帰的分割を行い、回帰木を作成する。

再帰分割法は、データマイニングにおいて影響力のある因子（説明変数）を探索するために活用されることが多い。

#### (2) 中央値絶対偏差(MAD: Median Absolute Deviation)

中央値絶対偏差は、各値 ( $x_i$  から  $x$  の中央値を引いた値)の絶対値の中央値として(1)式により計算される<sup>5), 6)</sup>。

$$MAD(x) = \text{median}(\text{abs}(x_i - \text{median}(x))) \quad (1)$$

ここで、 $MAD$ : 中央値絶対偏差、 $\text{abs}()$ : 絶対値、 $\text{median}()$ は中央値を計算する関数である。

$MAD$  を使用した外れ値の検出に(2)式が用いられる。外れ値とは他の値から大きく外れた値である。

$$\text{outlier} = K * \text{abs}((x - \text{median}(x)) / MAD(x)) \quad (2)$$

ここで、 $\text{outlier}$ : 外れ値、 $K$ : cut off パラメータ、 $\text{abs}()$ は絶対値を取る関数などである。

#### (3) サイドスリップ角

自動車工学の分野では、サイドスリップ角把握のための計測装置と計測方法、計算方法などについて多くの研究があり、市販の計測装置もある<sup>7), 8)</sup>。ここでは精度のよい計測装置を多く車載している事例が多い。

間伐現場でのデバイス管理の煩雑さを回避するために、スマートフォンに内蔵されている三軸加速度計と GPS 受信機をセンサとして活用し、計算負荷の小さい計算方法を採用する。サイドスリップ角計算方法のイメージを図-6 に示す。建設機械が移動していないときは、サイドスリップ角を計算しない。

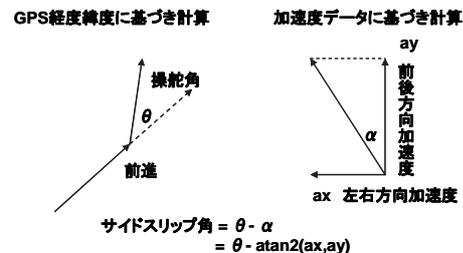


図-6 サイドスリップ角計算のイメージ

#### (4) 相補フィルタによる車体姿勢把握方法

3軸加速度データと3軸角速度のデータを使用し、相補フィルタを使い、車体姿勢（ピッチングとローリング）を計算する。車体姿勢計算のイメージを図-7 に示す。

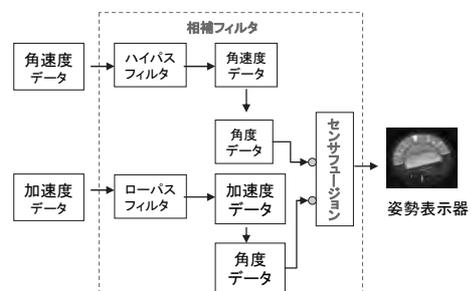


図-7 相補フィルタによる車体姿勢表示のイメージ

#### (5) 危険警告のトリガの考え方

定量的評価指標に関する危険警告のトリガの考え方について述べる。

簡便な方法であり、高い周波数や外れ値の影響を受けないと考えられる連検定の考え方を採用する。ここでは、計測データの連続的な上昇または下降を示す連数に注目する。連数”7”の事象が発生する確率は、一年内に交通事故に遭遇する確率に近似する。本研究では、連数が”7”に達したとき、または特性値(加速度応答値, サイドスリップ角, 車体姿勢角など)の既定の閾値に達したときに危険警告のトリガを引き、そのときの観測値(計測値, 時刻, 位置)を警告ポイントとする。

### 3. 定量的評価指標とインフォグラフィック

#### 3.1 チェーンソーによる伐倒

チェーンソーによる伐倒状況を図-8に示す。



図-8 チェーンソーによる伐倒状況

チェーンソーによる伐倒作業は、その他(移動, 切削準備態勢), 受け口切削, 追い口切削, くさび打ち込み, 伐倒追い切りなどの作業種別で構成される。チェーンソーによる伐倒を行う作業員はスマホ・センサを胸のポケットに収納する。このスマホ・センサにより三軸加速度, 三軸角速度, GPSなどのデータを計測した。サンプリング周波数は100HZである

ここでの強化学習手順をつぎに示す。

手順1:学習データの作成

記録動画に基づいて作業の時間割表を作る。

この時間割表に作業種別のカテゴリ番号を付与する。ここで作業種別は、その他:0と切削:1の二種類とした。

手順2:再帰分割法により最も影響力のある説明変数を選択する。

手順3:選択された説明変数の五要約数を計算する。

手順4:五要約数のうち中央値を選択し、(2)式を適用し該当する時刻を切り出す。

手順5:切り出した時刻に基づいて作業時間を計算し、作業時間表を出力する。

最も影響力のある説明変数は左右方向加速度あ

った。左右方向加速度の五要約数を表-1に示す。

表-1 左右方向加速度のカテゴリごとの五要約数

	Min.	1st Q	Med.	Mean	3rd Q	Max.
0	-0.975	-0.124	0.071	0.067	0.286	1.181
1	-1.325	-0.626	-0.442	-0.447	-0.261	0.385

(凡例 0:その他 1:切削)

手順4と手順5にて作成した作業時間表を表-2に示す。ここでcut offパラメータ=2とした。

伐倒本数は2本である。1本当たり材積は約0.62m<sup>3</sup>である。ピッチタイムは、

$$121.76(\text{秒}/\text{m}^3)=150.983/(0.62*2)$$

となる。

表-2 作業時間表

	時間(秒)	比率%
切削時間	150.983	53.373
その他時間	131.901	46.627
計測時間	282.884	100

#### 3.2 単胴地曳き集材ウインチによる木寄せとプロセッサによる造材

プロセッサ・単胴地曳き集材ウインチによる木寄せ状況を図-9に、プロセッサによる造材状況を図-10に、それぞれ示す。ここでの強化学習手順はチェーンソーによる伐倒の手順と同じである。最も影響力のある説明変数は前後方向加速度である。前後方向加速度の五要約数を表-3に示す。手順4と手順5にて作成した作業時間表を表-4に示す。ここでも同様にcut offパラメータ=2とした。木寄せ本数は3本である。1本当たり材積は約0.62m<sup>3</sup>である。

ピッチタイムは

$$401.134(\text{秒}/\text{m}^3)=\text{稼動時間}(\text{秒})/(1 \text{本当たり材積} * \text{本数})=746.109/(0.62*3)$$

である。



図-9 プロセッサ・ウインチによる木寄せ状況



図-10 プロセッサによる造材状況

表-3 前後方向加速度の五要約数

	Min	1stQu	Med	Mean	3rdQu	Max
その他	-0.01	0.001	0.003	0.008	0.005	0.1
ワイヤー	0.039	0.052	0.056	0.055	0.059	0.08
ウインチ	-0.01	0.058	0.062	0.06	0.066	0.09
玉切り	0.05	0.097	0.109	0.105	0.117	0.15

表-4 プロセッサ作業時間表

	計測時間(秒)	比率%
ワイヤー引き回し時間	161.024	11.387
ウインチ木寄せ時間	423.057	29.916
玉切り時間	162.028	11.458
稼働時間	746.109	52.761
その他時間	668.033	47.239
全作業時間	1414.142	100

フォワーダによる原木運搬，グラップルによる原木荷下ろしなどの作業についても，同様の手順にて作業時間とピッチタイムを計算している。これらの内容は紙面の都合上割愛する。

### 3.3 サイドスリップ

原木運搬時のフォワーダのサイドスリップ発生ポイントを図-11に示す。ここで，サイドスリップ角計算方法と危険警告のトリガの考え方を使った。図-12中の記号は，危険警告発生時の計測値をスケール化し，影響の強さとして円半径の長さで表した。オペレータは，このサイドスリップ発生ポイントを知覚していないようである。

オペレータの意見をつぎに示す。

- ① 視線位置は，遠近だいたい同じ程度の割合である。
- ② その場での転回（キャタピラの左右同時逆回転）は，機械に負荷がかかるので基本的にはしないが，狭い場所ではやることもある。
- ③ サイドスリップに関しては，通常作業でスリップを感じることはほぼ無いが路面状況等により，ごくまれに感じることもある。
- ④ 運搬中に一番気を付けることとしては，路肩の強

度の確認である。弱そうな路肩の場合は，山側ぎりぎりに寄せて路肩へ近づかないようにして転落を避ける。

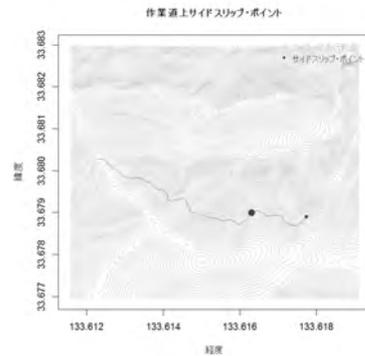


図-11 原木運搬時のフォワーダのサイドスリップ発生ポイント

同様に，自由落下・衝撃，急ハンドル，サイドスリップ，急加減速などの発生箇所図も出力している。これらの図については紙面の都合上割愛する。

### 3.4 作業道走行時の軽自動車車体姿勢

前述した相補フィルタによる車体姿勢把握方法を使ったプロセッサの造材時車体姿勢と作業道走行時の軽自動車車体姿勢について以下に示す。

#### (1) プロセッサの造材時車体姿勢

作業道走行時の軽自動車車体姿勢を図-12に示す。ここでrasセンサの計測データを使用した。太い縦線は危険警告のトリガの考え方を使った警告ポイントである。ここで，警告ポイントは，連数が“7”を超え，そのときの値が30度より大きく，または-30度未満のときのポイントである。単胴地曳き集材ウインチによる木寄せ作業時ときに警告が発生している。全幹地引きであるため，根株や急斜面にひっかり，外れたときの反動の影響と思われるが，オペレータは知覚していないようである。

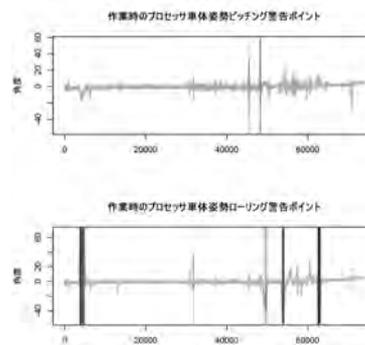


図-12 プロセッサの車体姿勢の経時変化

オペレータの意見をつぎに示す。

- ① 牽引力が強いので、無理をすると簡単にワイヤーが切れる
- ② 基本的には一定の動力で引くので、あまり大きな車体姿勢の変化はないはず。
- ③ 引いている最中に引っかかり等を感じた場合は、そのまま引いてよいかどうかを玉掛要員に確認をする。
- ④ 必要であればアームを下げるかワイヤーを出して調整をする。再度アームを上げて引く。

#### (2) 作業道走行時の軽自動車車体姿勢

図-2 に示した作業道を軽自動車で行き、相補フィルタを使い、そのときの車体姿勢を把握した。車体姿勢の経時変化を図-13 に示す。この急峻な作業道は、曲率半径の小さい曲線部、洗掘削とポットスポットが多く、非常に危険である。その結果、危険警告が多く発生している。煩雑な図を避けるため、危険警告の縦線表記は省略した。

この車体姿勢の経時変化を姿勢表示器で表現したデモサイトを

<http://ap.c2mp.com/f/Flight/AttDisp.asp>

に設定した。このデモでは車体姿勢の変化を読み取りやすいように値を修正してある。ご覧頂ければ幸甚である。

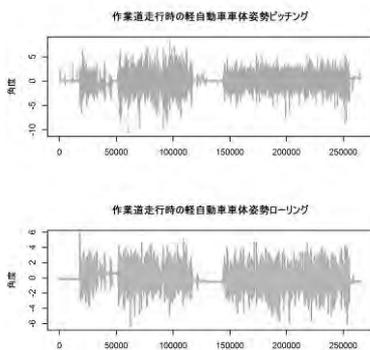


図-13 作業道走行時の軽自動車車体の経時変化

#### 4. 期待効果と現状の問題、そして今後の課題

本研究では、安全性と生産性に係る定量的評価指標とインフォグラフィックスを生成方法と一部の出力例を示した。これらの情報のフィードバックは働き手の状況認識を向上させると期待される。

一般に、間伐作業エリアは通信圏外であることが多い。GPSデータを受信できることが多いが、そのときのPDOP値は大きいであろう。一般に、少人数による作業であり、働き手は散在することになる。そのため、スマートフォン、ナビゲータなどを使って事前に位置確認を行うのが通例である。

今後の課題をつぎに示す。

#### (1) サンプリング周波数

それぞれの作業の特性を考慮して、適切なサンプリング周波数を探る。

#### (2) 予測・判別モデルの改良

他の作業現場に展開しながら、予測・判別モデルの汎化誤差評価とパラメータのチューニングを行う。ここでは、架線集材のIoT化を視野に入れる。

#### (3) 遅延/途絶耐性機能を持つ作業エリア内の通信網の構築

#### (4) 間伐対象地の概況調査におけるGISの活用

#### (5) 土工における活用

チェーンソー伐倒時間計測方法は棒状バイブレータ時間計測に、サイドスリップや自由落下・衝撃検知は運搬道路に潜在するハザード検知、プロセッサの車体姿勢把握は掘削積込機械の車体姿勢把握に活用できる。

#### 参考文献

- 1) ISO/IEC JTC 1 Information technology: "Internet of Things (IoT)," Preliminary Report, 2014
- 2) Katsutoshi Saibara, Shigeomi Nishigaki, Fujio Matsuda, Shinichi Kubota: "Contrivances to Assist Forest Machine Operator on Forest Road with Steep Slope," pp. 458-465, Proceedings of the 31st ISARC, 2014.
- 3) S. Nishigaki., J. Vavrin, N. Kano, T. Haga, J. Kunz and K. Law : "Human ware, Human Error, and Hiyari-hat: a Template of Unsafe Symptoms," Vol. 120, No. 2, pp. 421-442, Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 1994.
- 4) Terry M. Therneau, Elizabeth J. Atkinson, Mayo Foundation: "An Introduction to Recursive Partitioning Using the RPART Routines," 2017, on line: <https://cran.r-project.org/web/packages/rpart/vignettes/longintro.pdf>
- 5) Ronald K. Pearson , Yrjö Neuvo, Jaakko Astola and Moncef Gabbouj: "Generalized Hampel Filters," DOI 10.1186/s13634-016-0383-6, Pearson et al. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2016.
- 6) Christophe Leys, Christophe Ley: "Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median," YJESP-03038; No. of pages: 3; 4C.; Journal of Experimental Social Psychology, 2013.
- 7) Kire Serafimov, Natasa Koceska: "PERSVASIVE ALERT SYSTEM FOR FALL DETECTION BASED ON MOBILE PHONES," UGD Academic Repository, 2012.
- 8) Brendan Watts: "How and why does slip angle accuracy change with speed?" Slip Angle Accuracy, Version: 120802, 2012.

## 20. 土工事の働き手を支援する動的モニタリングに関する研究

株式会社まざらん ○西垣重臣  
株式会社キック 才原勝敏

### 1. 問題が潜在する環境と問題解決の動機

土工事においては、多くの働き手が目標に向かい協働することが求められる。一人作業を行うことが多いオペレータや運転手の孤独感をどう解消するか？ここでは、注意の狭隘化によるスリップとラプス、並びに近道心理によるルール違反などが発生するかもしれない。多くの働き手が多様な仕事をしている。施工状況を一目みて、理解することは難しい。施工状況が分からない苛立ちや不安をどのように解消するか？ここでは理解不足によるミステイクが発生するかもしれない。

働き手のコンストラクタビリティ(constructability)とヒューマンウェア(humanware)の低下はヒューマンエラーとルール違反、そして生産性低下の引き金になり得る。コンストラクタビリティとは、プロジェクト全体の目的を達成するために、計画、エンジニアリング、調達、建設作業に係る施工知識と経験を最適に活用することである<sup>1)</sup>。ヒューマンウェア(humanware)とは、リーダーシップ機能とフォロワーシップ機能、そして両者の相互作用を集合的に示す用語である<sup>2)</sup>。ヒューマンエラーとは、意図しない結果を引き起こす人間の行為である<sup>3)</sup>。ルール違反とは、安全に関わる規則違反と知りながら、また危険な状態に陥る可能性を知りながら行う行為である<sup>4)</sup>。

動的モニタリングは、施工プロファイルに関する情報を提供することで、働き手の状況認識を促す。ここで動的とは情報の経時変化をいう。施工プロファイルとは、施工に伴って発生する事象の特徴、その特徴のパターンを示す指標などに関するデータ項目の集合である<sup>5)</sup>。状況認識とは、自らの周囲に何が起きているかを知る能力をいう<sup>6)</sup>。

動的モニタリングを実現するために、計測、データ圧縮、データ送信、受信データの蓄積と演算、定量的評価指標とインフォグラフィックスの自動生成などの一連の処理の自動化を図る。ここでの研究課題を以下に示す。

#### (1) 建設機械のIoT化

IoTとは、オブジェクト、人々、システム、そして情報資源を相互接続する知的サービスを伴うインフラストラクチャである<sup>7)</sup>。これは、物理的世界と仮想的世界の情報を処理し、両者の相互作

用を可能にする。建設機械のIoT化を実現したい。そこで、工事現場でのデバイス管理の煩雑さを回避するために、建設機械への車載が容易な「スマートフォンが内蔵するセンサ」と「シングルボードPCであるRaspberry Piをコアに組み立てたセンサ」を活用する。本論文では、前者をスマホ・センサ、後者をrasセンサと単に呼ぶことにする。

#### (2) 物理的の働き手がかり情報の整理

SRK(Skill-Rule-Knowledge)モデル<sup>8)</sup>に習い、生産性と安全性に影響を与える物理的の働き手がかり情報の特性要因を整理する。つぎに、計測する物理量の種類、並びに求める定量的評価指標とインフォグラフィックスを整理する。

#### (3) 強化学習の一つであるActor-Criticの枠組みに基づいた予測判別モデルの構築

強化学習とは、環境に対する試行錯誤を通じて、より良い行動を選択する学習制御の枠組みである。Actor-Criticは、強化学習の枠組みの一つであり、環境に対するActorの行動によって得られた状態または行動の価値を評価するCritic機能を持ち、Criticの強化信号により行動を選択していく制御の枠組みである。Critic機能を持つことで、専門家や熟練経験者などが持つ暗黙知を形式化して、制御の枠組みに導入できる利点がある。ここではActor-Criticの枠組みに基づいた予測判別モデルの構築実施手順が求められるとともに、予測判別モデルを工事現場に適用するための学習の仕方を学習することが必要である。

#### (4) 動的モニタリング構築方策

all-in-oneではなく、イージーオーダー方式のソリューションを求める。必要と思われる数理モデル群を持つ。工事現場のニーズに応じて、数理モデルを選択する。工事現場において、建設機械の稼働に伴って励起する物理量を計測し学習データとする。選択した数理モデルの汎化誤差評価とパラメータのチューニングを行い、予測・判別モデルを構築する。このモデルにより定量的評価指標を出力し、インフォグラフィックスを作成する方法を研究する。

### 2. 建設機械のIoT化

前述したように、工事現場でのデバイス管理の

煩雑さを回避するために、建設機械への車載が容易なスマホ・センサと ras センサを活用する。

スマホ・センサはスマートフォン Galaxy S3 に組み込まれている三軸加速度計、三軸角速度計、電子コンパス計、GPS 受信器などを使用する。計測データのログ機能とデータ送信を担うアプリケーションを持つ。そのアプリケーションの画面を図-1 に示す。

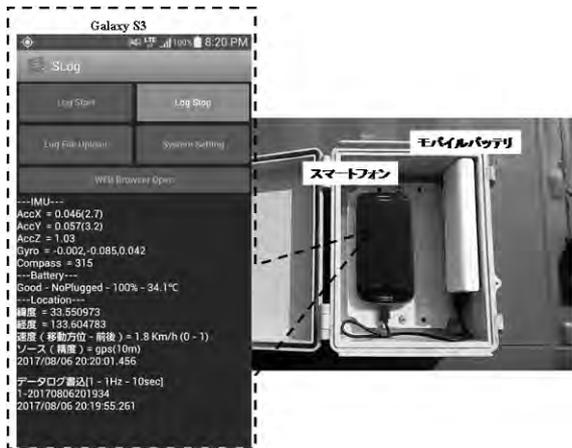


図-1 スマホセンサ・アプリケーション画面

ここで得られる計測データの変数名は、順に時刻、緯度、経度、移動方位、走行速度、x 軸加速度、y 軸加速度、z 軸加速度、x 軸角速度、y 軸角速度、z 軸角速度、No、電子コンパス、エリア id、x y、距離、FB(前進停止後進カテゴリ)などである。距離は建設機械間の大円距離である。エリア id は、計測装置が存在するエリアの識別番号(積込場、荷下場、途中の道路など)である。X、Y は施工領域にメッシュを張ったときの番号である。FB は、GPS データの移動方位と電子コンパスが示す方位に基づいて、アプリケーションの移動状況を前進:1、停止:0、後進:-1 の数値でカテゴリ化した数列である。サンプリング周波数は 1 Hz~100Hz の範囲で問題に応じて選択する。

ras センサは、つぎに示すパーツと組込ソフトを使用して組み立てたセンサである(図-2)。

- (1) MPU/超小型演算装置 Raspberry Pi 2 Model B
- (2) SparkFun 9 Degrees of Freedom - Sensor Stick
  - ① ADXL345 3 軸加速度センサ
  - ② HMC5883L 3 軸方位センサ
  - ③ ITG-3200 3 軸ジャイロセンサ
- (3) GPS
  - ① GPS モジュール PA6H
  - ② SMA 型 外部 GPS アンテナ
- (4) 組込ソフト: Raspbian, Python

Ras センサの組み立て状況を図-2 に示す。ここで得られる計測データの変数名は、順に時刻、x

軸加速度、y 軸加速度、z 軸加速度、x 軸角速度、y 軸角速度、z 軸角速度、緯度、経度、速度、移動方位などである。サンプリング周波数は 100Hz~200Hz の範囲で問題に応じて選択する。

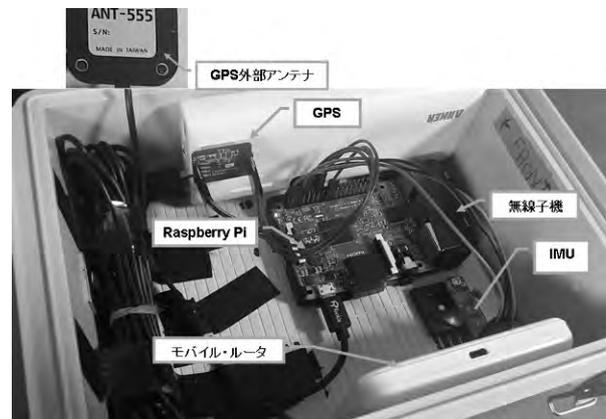


図-2 Ras センサの組み立て状況

### 3. 物理的の手がかり情報の整理

#### 3.1 生産性と安全性に影響を与える物理的の手がかり情報の特性要因

SRK (Skill-Rule-Knowledge) モデル<sup>8)</sup>に習い、生産性と安全性への影響要因を、つぎに示す3つレベルに分ける。

##### (1) ナビゲーション (知識)・レベル

目標、目標への方向付け、目標と現状の不一致などを理解して、解決への道を発見するための順序、組み合わせ、筋書きなどの構造的な設定を行う。

##### (2) ルール・レベル

このレベルでは、過去の経験に基づき、蓄積したルールが使われる。物理的世界に対する定型的な操作と状態の再認と記憶されたルールの想起が主である。

##### (3) スキル・レベル

このレベルでは物理的対象物に対する自動的感覚運動操作が主である。

この SRK モデルを考慮して作成した、生産性と安全性に影響を与える物理的の手がかり情報の特性要因図を図-3 に示す。

#### 3.2 安全性に係る定量的評価指標とインフォグラフィックス

##### (1) 自由落下と衝撃

三軸加速度の計測値に基づいて、次式により時刻 t における三軸合成値( $g_t$ )を計算する。

$$g_t = \sqrt{A_{xt}^2 + A_{yt}^2 + A_{zt}^2} \quad (1)$$

スマートフォンの自由落下に関して色々な研究がある<sup>9),10),11),12)</sup>。これらの研究を参考にして、自由落下と衝撃を検知するための判断ルールをつぎのように設定している。

三軸合成値=<0.75g のとき自由落下の途中  
三軸合成値>=1.2g のとき衝撃

三軸合成値>=1.4g のときやや強い衝撃  
三軸合成値>=2g のとき強い衝撃

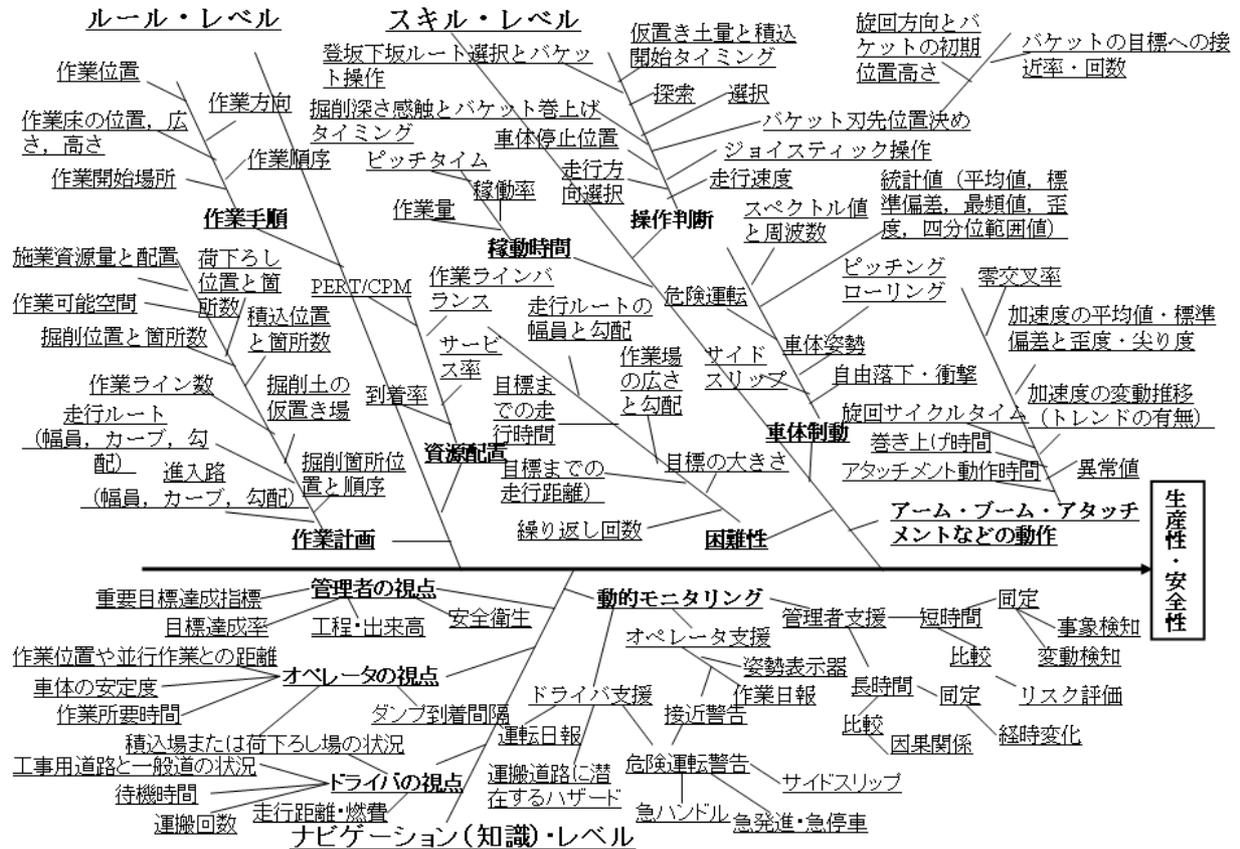


図-3 生産性と安全性に影響を与える物理的手がかり情報の特性要因図

(2) 急ハンドル

走行履歴の三点の緯度経度に基づいて、その三点が直線を形成しないときの曲率半径を求める。そのときの走行速度をその曲率半径で除した値を危険指標値とする。危険判断基準は道路構造令曲率半径第15条に示されている走行速度と曲率半径の値に基づいて設定する。本研究では、走行速度 20km/hr ときの許容基準を参考にして、危険判断基準値を”1.3”とする。危険指標値がこの値を超えるときに、急ハンドルが発生したと判断する。

(3) 急発進/急停止

三軸合成値の1階差分である躍度を求める。急発進/急停止の判断基準はつぎのとおりである。

- 急発進：躍度が+5km/s<sup>2</sup>以上のとき
- 急停止：躍度が-5km/s<sup>2</sup>未満のとき

(4) サイドスリップ

自動車工学の分野では、サイドスリップ角把握のための計測装置と計測方法、計算方法などについて多くの研究があり、市販の計測装置もある<sup>13),14)</sup>。前述したように、工事現場でのデバイス管理の煩雑さを回避するために、スマートフォンに内蔵されている三軸加速度計とGPS受信機をセンサとして活用する。操舵角は走行履歴(緯度、経度)から求める。サイドスリップ角を次式より求める。

$$\text{sideSlipAngle} = \theta - \text{atan2}(a_x, a_y) \tag{2}$$

ここで、sideSlipAngle: サイドスリップ角,  $\theta$ : 操舵角, atan2: 逆正接関数,  $a_x$ : 左右方向加速度,  $a_y$ : 前後方向加速度である。

自由落下と衝撃, 急ハンドル, 急発進/急停止, サイドスリップなどの発生箇所を施工平面図, 等高線図, google map, open street map な

どの上に重畳表示できる。どの図面または地図を選択するかは要求定義に依存する。

#### (6) 車体姿勢

三軸加速度と三軸角速度のデータに相補フィルタを適用して、車体のピッチングとローリングを求める。姿勢表示器(図-4)がオペレータにこれらの値を提示する。

#### (7) 接近警告

建設機械の現在位置(緯度経度)に基づいて、建設機械間の大円距離を求める。この大円距離が100m以下のとき、両者は接近していると判断し、スマートデバイスを起振することでオペレータにダンプトラックの接近を伝える。同時にスマートフォンの画面にどの方角から接近してくるかを表示する。図-4に、バックホウ・オペレータの例を示す。



図-4 オペレータを支援する車体姿勢とダンプトラック接近の早期警告の例

#### (8) 早期警告のトリガ

これまでに述べた定量的評価指標に関して、つぎに示す基準に基づいて早期警告を発する。

簡便な方法であり、高い周波数や外れ値の影響を受けないと考えられる連検定の考え方を採用する。ここでは、計測データの連続的な上昇または下降を示す連数に注目する。一般に、連数“5”のときは注意が必要、連数“6”のときはアクションの準備を整える、連数“7”のときは原因究明と対策などのアクションをとる、といわれる<sup>15)</sup>。連数が“7”の事象が発生する確率は、一年内に交通事故に遭遇する確率に近似する。本研究では、連数が“7”に達したとき、または

既定の閾値に達したときに早期警告のトリガを引き、そのときの観測値(計測値、時刻、位置)を警告ポイントとする。

### 3.3 生産性に係る定量的評価指標とインフォグラフィックス

生産性に係る定量的評価指標の一部を以下に示す。

#### (1) 進捗率

施工日の施工実績数量を施工目標数量で除した比率である。進捗率を進捗率ゲージで示す。

#### (2) 掘削土量と荷下ろし土量

経度と緯度の平面に対して、それぞれの土量を高さで表現した三次元ヒストグラムを示す。

#### (3) 積込場と荷下ろし場の作業状況

積込場と荷下ろし場の作業状況を示すために、それぞれの作業場におけるダンプトラックの到着発進状況を発着累積グラフで示す。

#### (4) 実稼働時間と実稼働率

三軸加速度の分散の変化点を捉え、待機状態、アイドリング状態、稼働状態を識別するとともにそれぞれの時間と全時間を自動計算する。そして、実稼働時間と実稼働率を計算する。これらの情報を作業時間表と作業時間バーチャートで示す。さらに、積込と荷下ろしの所要時間とサイクルタイムの経時変化を折れ線グラフで示す。

#### (5) ピッチタイム(サイクルタイム)

ピッチタイムは実稼働時間を施工実績数量で除した比率である。言い換えれば、1仕事量に対するサイクルタイムを表す。各工程のピッチタイムをピッチダイヤグラムで示し、ラインバランス・ロス率を計算する。ピッチダイヤグラムとは各建設機械の稼働時間のバランス状態を図示したものである。ラインバランス・ロス率は(3)式で求められる。ここでピッチタイムはサイクルタイムを指す。

$$\text{ラインバランス・ロス率} = (\text{工程数} \times \text{ボトルネック工程のピッチタイム} - \text{各工程のピッチタイムの合計時間}) / (\text{工程数} \times \text{ボトルネック工程のピッチタイム}) \quad (3)$$

#### (6) コンクリート打設速度管理

コンクリート打設速度をモニタリングする。センサとして、スマートフォンまたはアクティブ・タグを使う。コンクリート打設を行う区画ごとに、区画番号、練り混ぜ開始時間、完了目標時間、残時間などを表示する。カラーコード方式の警告を表示する。打設中の区画を背景が白で表示する。打設が終了した区画を背景が青

で表示する。残時間が1時間を切ると、背景が黄色になり、30分を切ると赤になる。

(7) ブルドーザ押土面積

ブルドーザの走行軌跡（緯度経度）に二次元カーネル密度関数を適用する。信頼区間を求め、その等値線を描画する。そして90%信頼区間の面積を求める。

(8) 出来高比率曲線図

横軸を時間経過比率、縦軸を出来高比率とし、進捗率の推移を示した図である。ベースライン曲線を施工時間時間経過比率30%と60%、並びに出来高比率25%と75%をマイルストーンとした折れ線を事前に描いておく。

(9) マッチファクタ

マッチファクタは施工資源のバランスを示す指標である。

例) 土運搬のマッチファクタ=トラック台数\*積込所要時間/積込機械台数\*トラックサイクルタイム

生産性に係るインフォグラフィックスの例を図-5に示す。



図-5 生産性に係るインフォグラフィックスの例

4. 動的モニタリングの枠組み

動的モニタリングの枠組を図-6に示す。この枠組みの構成要素をつぎに示す。

(1) 数理モデル群

①データクリーニング

イレギュラーな配列を持つレコード(tuple), 欠測値を含むレコード, 外れ値などを削除する。

②ローパスとハイパスのフィルタリング

③物理的手がかり情報に関する知識と、それを提供する数理モデルとインフォグラフィックス作成モデル

(2) 開発実行環境

R, Python, OpenCV, C++などのオープン・ソース・ソフトウェアを活用する。オープン・ソース・ソフトウェアは、ソフトウェアのソースコードが無償で公開され、改良や再配布を行うことが誰に対しても許可されているソフトウェアである。実行段階ではR.exe, Java script, SQL serverなどを活用する。

(3) 建設機械の振る舞いによって励起される物理量を計測するセンサ

(4) 計測データを保存するデータベース

(5) 動的モニタリング

動的モニタリングのモニタはオペレータとドライバを支援するモニタと現場管理者を支援するモニタに分かれる。動的とは経時変化する情報を取り扱うという意味である。オペレータとドライバの支援情報はリアルタイムに、現場管理者支援情報は5分乃至10分間隔で更新される。

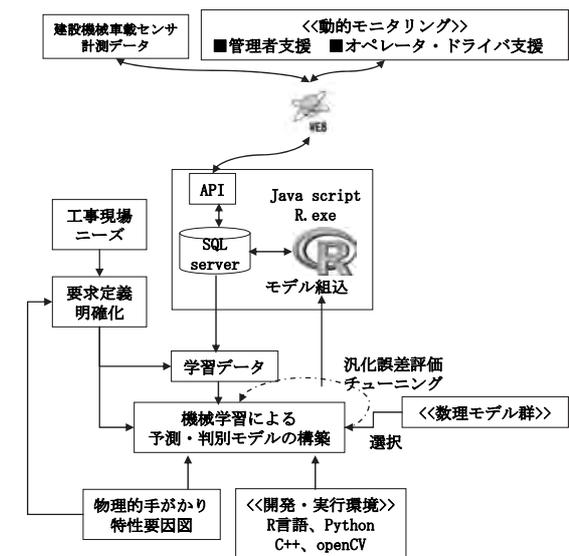


図-6 動的モニタリングの枠組

前述したように、動的モニタリングは、all-in-oneではなく、イージーオーダー方式のソリューションである。転移学習の考え方に基づいて、動的モニタリングを構築する。転移学習とは、ある問題を効果的かつ、効率的に解くために、別の関連した問題のデータや学習結果を再利用することをいう。工事現場のニーズに応じて要求定義を明確にし、学習データを取得する。学習データを解析することで、必要な数理モデルを選択し、Actor-Criticのモデルを構築し、ソリューションに組み込む。

## 5. 動的モニタリングの導入事例

動的モニタリングの導入事例を以下に示す。

### (1) 無人化施工におけるオペレータ支援

無人化施工では、オペレータは、遠隔操作する建設機械の車体姿勢、振動、衝撃などを体感することができず、モニタを通じて推定することになる。接近警告、工事用道路に潜在するハザードの可視化、進捗状況把握などのリアルタイムフィードバックは、事前に心的準備ができるとオペレータに好評価を得ている。

### (2) 土運搬工におけるドライバ支援

ドライバからつぎの評価を得ている。積込場と荷下ろし場、混雑する交差点などへの接近警告は注意を促され、心的準備ができる。さらに、運行履歴自動記録は運転日報作成業務の省力化になる。

### (3) トンネル工事の作業ライン生産性の可視化

転移学習を活用し、Actor-Critic の枠組みに基づいて、トンネル工事の建設機械が形成する作業ラインの生産性の可視化ソリューションを構築に取り組んでいる。このソリューションが出力する実稼働時間は作業記録による稼働時間に概ね適合している。

### (4) 林業機械の IoT 化

間伐施業工程において使用されるプロセッサ、フォワーダなどの林業機械の IoT 化に取り組んでいる。その際に、転移学習を活用し、作業時間自動算出、転倒、サイドスリップなどの危険警告などに関するソリューションを構築に取り組んでいる。

## 6. 今後の課題

この動的モニタリングの現場展開に係る今後の課題を、つぎに示す。

### (1) データフュージョンの枠組み構築と実施手順の整理

今後の現場展開に際し、多種多様なセンサに直面するであろう。ここでは、異なった複数のデータの融合が求められる。

### (2) 施工状況の総合評価指標

個々の定量的評価指標に加えて、一目みて理解できる総合評指標が求められる。

(3) 素早くより良いソリューションを構築するための学習の仕方の蓄積と仕事術 (work hacks) の整理。

## 参考文献

1) Construction Industry Institute Publication Nos.: 3-1 - Constructability: A Primer, 1986.

- 2) S. Nishigaki, J. Vavrin, N. Kano, T. Haga, J. Kunz and K. Law : "Human ware, Human Error, and Hiyari-hat: a Template of Unsafe Symptoms," Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 120, No. 2, pp. 421~442, ASCE, 1994.
- 3) 日本工業規格 JIS Z8115: ディペンダビリティ (信頼性) 用語 G20, p. 6, 2000.
- 4) Leadership and worker involvement toolkit: "Understanding human failure," the construction industry's Leadership and Worker Engagement Forum, HSE UK, 2003.
- 5) S. Nishigaki, H. Sugiura, T. Takamura, H. Ogura and K. Hatori: "STUDY ON FRAMEWORK OF CONSTRUCTION PROFILE FOR COLLABORATIVE AND INTELLIGENT CONSTRUCTION," Journal of Applied Computing in Civil Engineering, Vol.14, 2005.
- 6) Team Coordination Training (TCT): "SITUATIONAL AWARENESS," The U.S. Coast Guard's Boating Safety Division, 2004.
- 7) ISO/IEC JTC 1 Information technology: "Internet of Things (IoT)," Preliminary Report, 2014.
- 8) J. Rasmussen, "Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-13, No. 3, pp. 257~266, 1983.
- 9) S. Steidl, C. Schneider, M. Hufnagl: "FALL DETECTION BY RECOGNIZING PATTERNS IN DIRECTION CHANGES OF CONSTRAINING FORCES," Schreier G, Hayn D, Horbst A, Ammenwerth E, editors. Proceedings of the eHealth2012, pp. 27~32, 2012.
- 10) Ning Jia: "Detecting Human Falls with a 3-Axis Digital Accelerometer," Analog Dialogue, 2009.
- 11) Mitja Lutrek, Hristijan Gjoreski, Simon Kozina, Boidara Cvetkovi, Violeta Mirchevska, Matja Gams: "Detecting Falls with Location Sensors and Accelerometers," "Proceedings of the Twenty-Third Innovative Applications of Artificial Intelligence Conference, pp. 1662~1667, 2011.
- 12) Kire Serafimov, Natasa Koceska: "PERVASIVE ALERT SYSTEM FOR FALL DETECTION BASED ON MOBILE PHONES," UGD Academic Repository, 2012.
- 13) Brendan Watts: "How and why does slip angle accuracy change with speed?" Slip Angle Accuracy, Version: 120802, 2012.
- 14) Michael Sayers: "Standard Terminology for Vehicle Dynamics Simulations," The University of Michigan Transportation Research Institute (UMTRI), 1996.
- 15) 福田祐二: "生産現場の異常を検知, 品質管理に役立つ「C管理図」を使う," 2012.

## 21. 次世代建設生産システムの現場適用と生産性向上への展望

### ロックフィルダムへの適用検討

鹿島建設㈱ ○ 太田 裕士  
田中 秀昭

#### 1. はじめに

熟練作業員の高齢化による減少、低い生産性、高い労働災害発生率という建設業の重要問題を解決するため、省人化及び生産性向上と同時に安全性向上を図ることを目的として、筆者らは建設機械の自動化技術を核とした次世代建設生産システム

A<sup>4</sup>CSEL<sup>®</sup> (Automated Autonomous Advanced Accelerated Construction system for Safety and Efficiency and Liability : クワッドアクセル) の開発を進めている。<sup>1)</sup>その開発コンセプトは、定型的な作業や繰り返し作業は自動化した建設機械で行い、機械が不得意な作業の計画及び手順は人が指示することで、一人で複数の建設機械を同時に稼働させることである (図-1)。

これまでに振動ローラとブルドーザの自動化技術を開発し、RCDダムの工事現場においてコンクリートの自動転圧や自動まき出し・整形に関しての有用性を明らかにしてきた。今般、「土砂を運搬・荷下ろしして、まき出し後、転圧する」という一連作業の自動化を実現するため、新たにダンプトラックの自動化を進めた。本報告ではこれら3機種 of 建設機械と、新たな情報通信システムを中心に、ロックフィルダム堤体盛立て工事に導入し試行した実績について概要を報告する。

#### 2. 各システムの概要

##### 2.1 自動化振動ローラ<sup>2)</sup>

自動化した振動ローラを写真-1、2に示す。汎用の振動ローラに計測・制御機器を搭載して自動化機能を付加した。写真-2の操舵ロボットを考案して、これを後付けする方法を採用したことで低コ

ストで簡単に自動化することを可能とした。

RCDダムでの試行後、安全機能の強化、操作の簡略化、振動対策等を付加し、ロック材の転圧作業においても安定稼働できる性能を実現した。

ロックフィルダムの施工においては1つの転圧エリアに対して2台の振動ローラが分担施工することから、1台のタブレットによって複数の自動化振動ローラへの自動転圧指示を可能とし、実施工に適用した (図-2、写真-3)。



写真-1 自動化機器の配置 (振動ローラ外観)

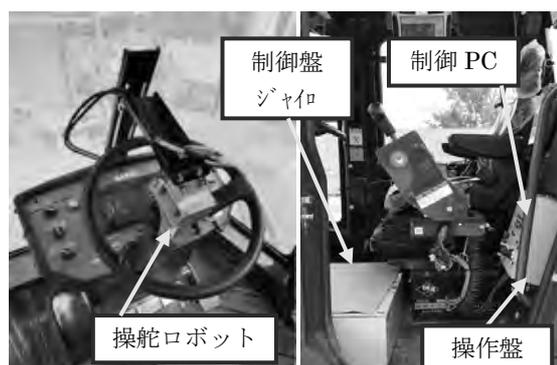


写真-2 自動化機器の配置 (振動ローラ車内)



図-1 次世代建設生産システム (A<sup>4</sup>CSEL) コンセプト

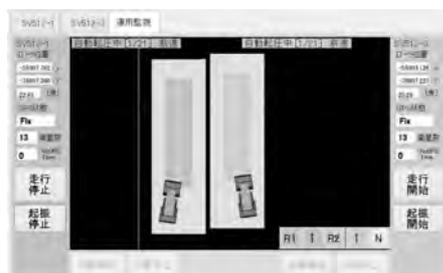


図-2 振動ローラ操作用タブレット画面



写真-3 2台の振動ローラによるコア材自動転圧

## 2.2 自動化ブルドーザ<sup>3)</sup>

ブルドーザの自動化は(株)小松製作所との共同研究開発により、同社製 ICT ブルドーザに自動化装置を追加することで実現した(写真-4)。自動化ブルドーザは、荷下ろしされた材料を指定した厚み(高さ)に自動まき出しを行う。ブルドーザの作業は荷下ろしされた材料の種類や位置、山の形状によってまき出し時の材料の挙動や最適なまき出し経路は異なり、これを現場実験において確認することは不可能である。このため次に述べる作業シミュレータを開発し、経路のモデル化と併せて走行経路、ブレード高さなどの制御法を計画した。なお、今回ロックフィルダムでの試行にあたり、19tブルドーザに加え22t、41tの自動化ブルドーザを新たに開発した。

### (1) 作業シミュレータ

作業シミュレータではブルドーザの移動に伴う材料とブレードの接触シミュレーションにより、材料の形状がどのように変化するかを予測する。一例として55tダンプ1台分の材料(ロック材約25m<sup>3</sup>)をまき出すシミュレーション結果と実際のまき出した状況の比較を図-3に示す。

### (2) 経路のモデル化

ロックフィルダムでは、コア、フィルター、ロックそれぞれにまき出しの形状や範囲、厚みの仕様などが異なる。このため実作業における熟練オペレータの作業解析を行い、施工条件ごとに経路のモデル化を実施した。

作業シミュレータと経路のモデル化により基準となる作業計画を作成、これを現場状況に応じて修正する方法で自動策定を行なう。事例としてフィルター材での自動まき出し結果を図-4と写真-5に示す。図-4に点線で示す目標まき出し範囲に対し、自動まき出し出来形がほぼ同じ形状であることから自動化ブルドーザの性能を確認できる。

これまでコア材、フィルター材、ロック材それぞれについて作業計画を作成、ダンプトラックと連携した自動まき出しを連続して行えることをロックフィルダムの試行において確認した。

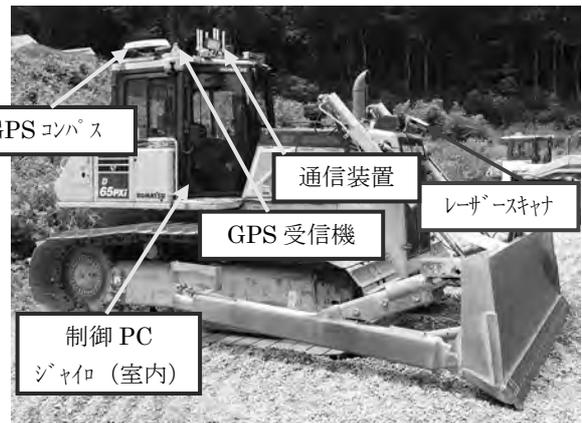


写真-4 自動化機器の配置 (ブルドーザ外観)

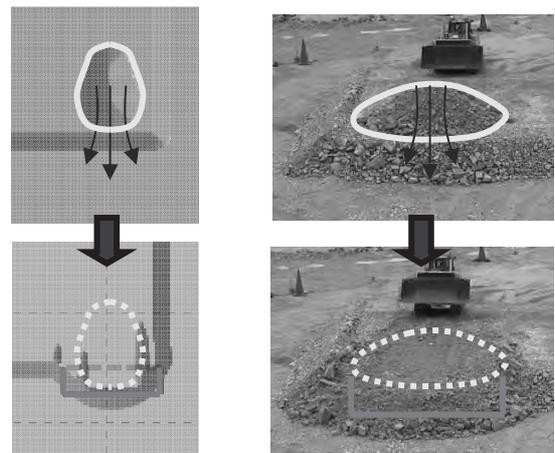


図-3 作業シミュレーションと実際の撒き出し

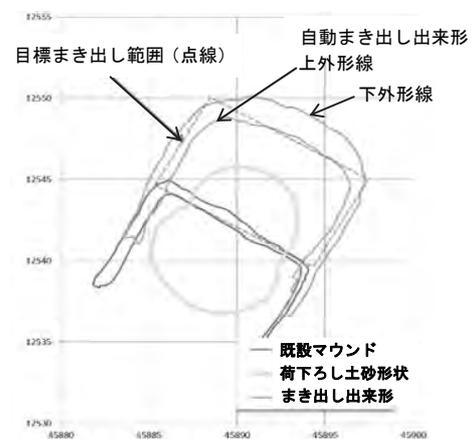


図-4 フィルター材自動まき出し結果 (幅 10m)



写真-5 フィルター材自動まき出し結果 (幅 10m)

## 2.3 自動化ダンプトラック<sup>4)</sup>

ダンプトラックの自動化はブルドーザ同様、(株)小松製作所との共同研究開発により、同社製55tダンプトラックに自動化装置を追加することで実現した(写真-6)。ダンプトラックの走行速度、操舵角などの情報は車体搭載のセンサを用いて計測している。ダンプトラックへの各種制御指令値はスロットル(アクセル)量、リターダ(ブレーキ)量、操舵速度、ベッセル昇降速度等である。これらは制御PCで演算し各装置へ指令される。

### (1) ダンプトラックの自動化に必要な機能

ロックフィルダム工事におけるダンプトラックの基本作業として次の①～③が挙げられる(図-5)。

- ① 材料ヤードで材料を積み込み
- ② ダム堤体まで材料を運搬
- ③ 堤体のまき出し領域で材料を荷下ろし

この作業を自動化するためにダンプトラックの基本機能として「走行」、「停止」、「操舵」、「作業(ベッセル昇降)」の自動化を実現した。その上でロックフィルダム工事においてダンプトラックの自動化に求められる機能と次の2点である。

### (a) 走行経路の自動生成機能

工事用道路など走行可能な領域、積み込み位置と荷下ろし位置、他の車両や重機との衝突回避など各種制約を満たす走行経路を自動で生成する機能を有する。



写真-6 自動化機器の配置(ダンプ外観)

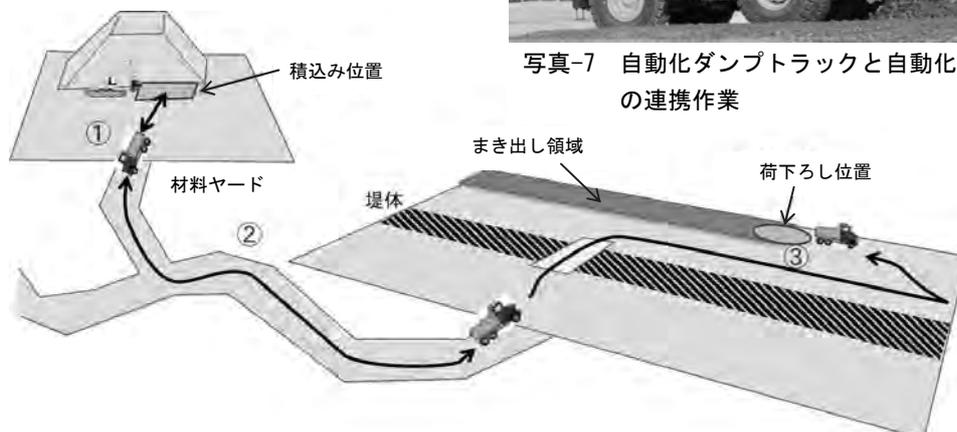


図-5 ロックフィルダムにおけるダンプトラックの作業

### (b) 指定経路への精度良い追従走行機能

自動生成した走行経路に対して、走行路面の勾配や不陸等の路面状況の変化があっても精度良く指定経路に追従できる走行機能を有する。

この2つの機能を堤体付近でのコア材の運搬および荷下ろし作業に対応できるように走行制御プログラムに実装、現場での実証を行った。

### (2) ロックフィルダムでの実証試験

堤体コア材盛立部において、自動化ダンプトラックを自動化ブルドーザと連携させ、ダム堤体内でのコア材運搬、荷下ろし、まき出し、整形の自動運転機能について検証した。

走行経路は事前に図-6の破線のように定めておき、走路上は障害物がない状態で自動運転を行った。その際の走行軌跡は図-6の実線となり、荷下ろし位置での誤差は約50cm以下であった。この精度であれば、自動化ブルドーザ側で経路の自動修正は可能であり、自動化ダンプトラックと連携した自動まき出しが行えることを確認した(写真-7)。

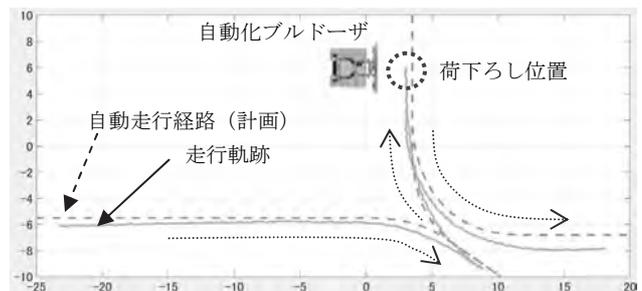


図-6 コア材運搬での自動走行経路と走行軌跡



写真-7 自動化ダンプトラックと自動化ブルドーザの連携作業

## 2.4 インフラ無線通信システム

次世代建設生産システムでは多数の自動化重機等を高速かつ確実な無線通信によって必要がある。またダム工事の地形に対応できる性能も必要であるため以下の試験を行った。

### (1) 広域・走行中の通信性能試験

ダム工事の堤体部では最大で左右岸 600m, 上下流 200m 程度の範囲内に重機は稼働する。また、ダンプトラックは最大 30km/h 程度にて走行する。これらを 1 台の無線アクセスポイント (以下、AP) によってカバーすることは困難なため、接続先 AP を順次切替える機能を持った無線装置を複数準備し、1 周 500m の試験走行区間を 30km/h にて走行させて評価した (図-7)。その結果、ローミング方式では AP 切替時に大きな遅延 (約+250msec) をこれが約 4 秒間継続発生する現象を確認した。一方メッシュ方式では遅延および AP 切替は 1~2 桁程度高速であった。これはメッシュ方式は常時複数回線の接続を保持し、瞬時に回線を切替えるのに対し、ローミング方式では通信状態の悪化後に切替えるためと考えられる。

### (2) 現場地形での信頼性評価

前記の結果よりメッシュ方式を用いて現場の材

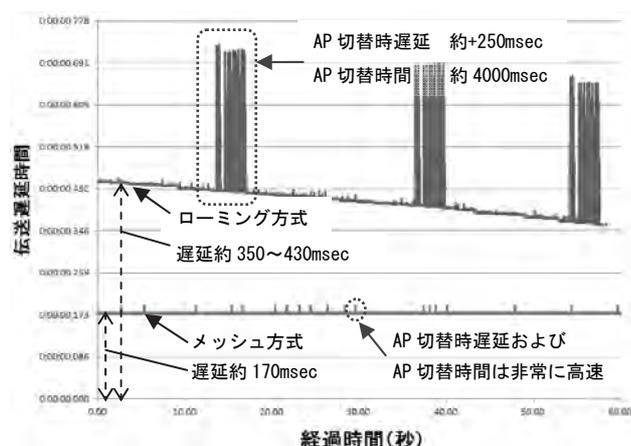


図-7 AP 切替方式による通信性能の比較

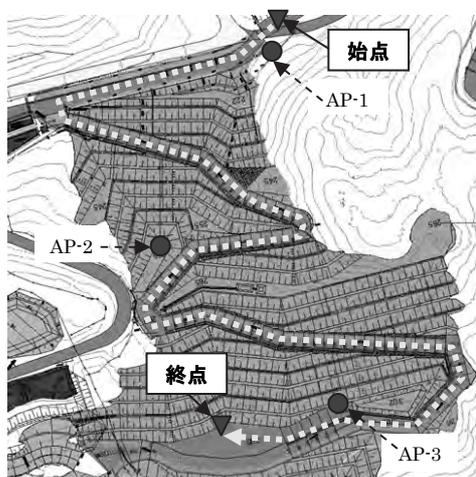


図-8 現場材料運搬路での実走試験

料運搬路を用いて実走試験を行った (図-8)。始点から終点までの走行距離約 1000m, 高低差 93m, 斜距離 320m の登り走路にメッシュ方式の AP を 3 台配置し、試験車両にはフル HD のカメラを搭載、最大 40km/h で走行中の画像 (約 2Mbps) 及びデータ伝送を行い遅延や中断の無い良好な結果を得た。この結果からメッシュ方式は実際の現場地形において有効であると判明した。一方、各自動化重機への指示を行うタブレットにはメッシュ機能はない。このため幹線部分にはメッシュ機能、支線部分には WiFi の AP 機能を持たせたハイブリッド構成のインフラ無線通信システムを構築した。これにより、自動化振動ローラ、ブルドーザ、ダンプトラックおよびタブレット等の通信を一元化するとともに、現場内走行中のダンプトラックにおいても安定した画像と信号の伝送を実現した。

## 3. おわりに

本報文中で紹介した各自動化システムは、単独の自動運転から複数台の同時運転、さらにブルドーザとダンプトラックの連携運転を実現するに至った。今後、次世代建設生産システムを次の段階へ進めるため、さらに多台数・多機種 of 総合的な自動化を進めていく所存である。その中では従来の施工方法の自動化だけでなく「自動化に適した施工方法」も求められる。そこで、これら多くの課題に取り組む、建設業における画期的な生産性向上を実現するためには、発注者を含めた建設業全体に加え、コンサルタント、大学、メーカーや異業種まで産官学一体となった幅広い研究開発活動を進めることが重要と考える。

**謝辞:** 本開発の現場実証試験において国土交通省九州地方整備局大分川ダム工事事務所より多大なご協力を頂き、ここに謹んで謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 三浦ら:「建設機械の自動化を核とした次世代施工システム」, 建設機械施工, Vol. 67, No. 12, pp. 21-25, 2015
- 2) 大塩ら:「振動ローラ自動転圧システムにおける自動化装置の開発」, 土木学会第 71 回年次学術講演会, VI-076, 2016.
- 3) 黒沼ら:「ロックフィルダム堤体材料のまき出しにおける自動化ブルドーザの試適用」, 土木学会第 72 回年次学術講演会, VI-703, 2017
- 4) 田島ら:「ダム工事におけるダンプトラックによる土砂運搬・荷卸し作業の自動化」, 土木学会第 72 回年次学術講演会, VI-702, 2017

## 22. 横型 2 連矩形掘進機による地下通路の施工実績

### 難条件下における矩形シールドの施工実績について

鹿島建設株式会社  
鹿島建設株式会社  
鹿島建設株式会社

品田 康二  
○宇留島 千明  
村上 謙介

#### 1. はじめに

本工事は施設建築建物（GINZA SIX）と晴海通りの既設地下通路を結ぶ歩行者専用の地下通路を新設する工事であり、あづま通りの地下に非開削工法（シールド工法）により構築する。銀座の中心という施工場所特有の様々な難条件であったが、無事に矩形トンネルの構築を完了した。本報文は、その条件に対する対応策について報告するものである。

#### 2. 工事概要

工事名称：銀座六丁目 10 地区第一種市街地  
再開発事業に伴う公共施設整備工事  
のうち地下連絡通路整備工事および  
東電管路移設等工事

工事場所：東京都中央区銀座五丁目  
8 番～9 番地先

施工者：鹿島建設株式会社

工期：2014 年 10 月 1 日  
～2017 年 11 月 15 日（予定）

掘進延長：109m

#### 2.1 掘進概要

掘進位置のイメージ図を図-1 に示す。



図-1 シールド掘削断面概要図

掘削対象土層はN値 16 程度の砂質土であり、上下に様々な既設地下埋設物があることから、土被りは最小 2.5m から最大 4.5m と低土被りの掘進となる。また、敷地境界との隔離はマシン外殻部から約 350mm 程度であり近接掘進となる。地下水位はGL-9.5m 程度であるため、発進から到達まで無水区間の掘進となる。平面線形は直線・縦断線形は下り 4.0% から 1.0% へと変化する。上記から、非常に慎重な掘進・線形管理が必要となる。

#### 2.2 セグメント概要

セグメントを図-2 に示す。

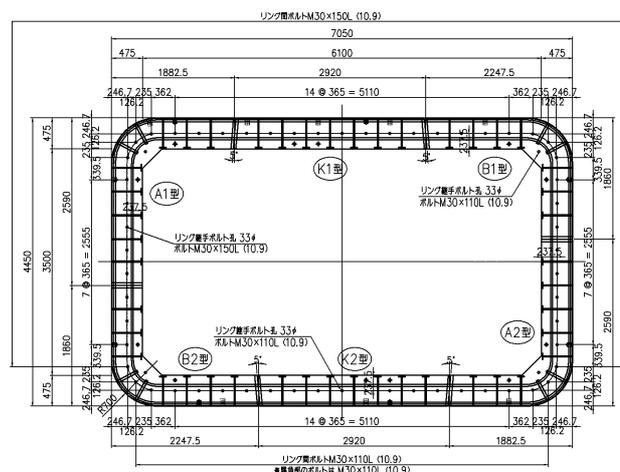


図-2 セグメント組立図

セグメントは 6 分割で構成され、幅 1,000mm、桁高 475mm の鋼製セグメントである。上下 2 カ所の K セグメントは半径方向挿入タイプである。重量は 1 ピース約 2t でボルトナットにより締結する。

#### 2.3 シールドマシン概要

シールドマシンは泥土圧式で、カッタを 2 基装備し大型のコピーカッタで矩形隅角部の切削することで矩形断面を掘進する機構である。特徴は①低土被り掘進時、路面変状を抑制するためにスキンプレート上部にフードを装備、②余掘り充填用の注入孔を前胴上部に 8 カ所装備したことである。

セグメント組立用のエレクタは左右 2 基装備し、6 ピースのセグメントを左右交互に組立てること

が可能であり、セグメントの形状保持装置を装備する。シールドマシンの外観を写真-1，全体構造図を図-3に示す。



写真-1 横型2連矩形シールドマシン

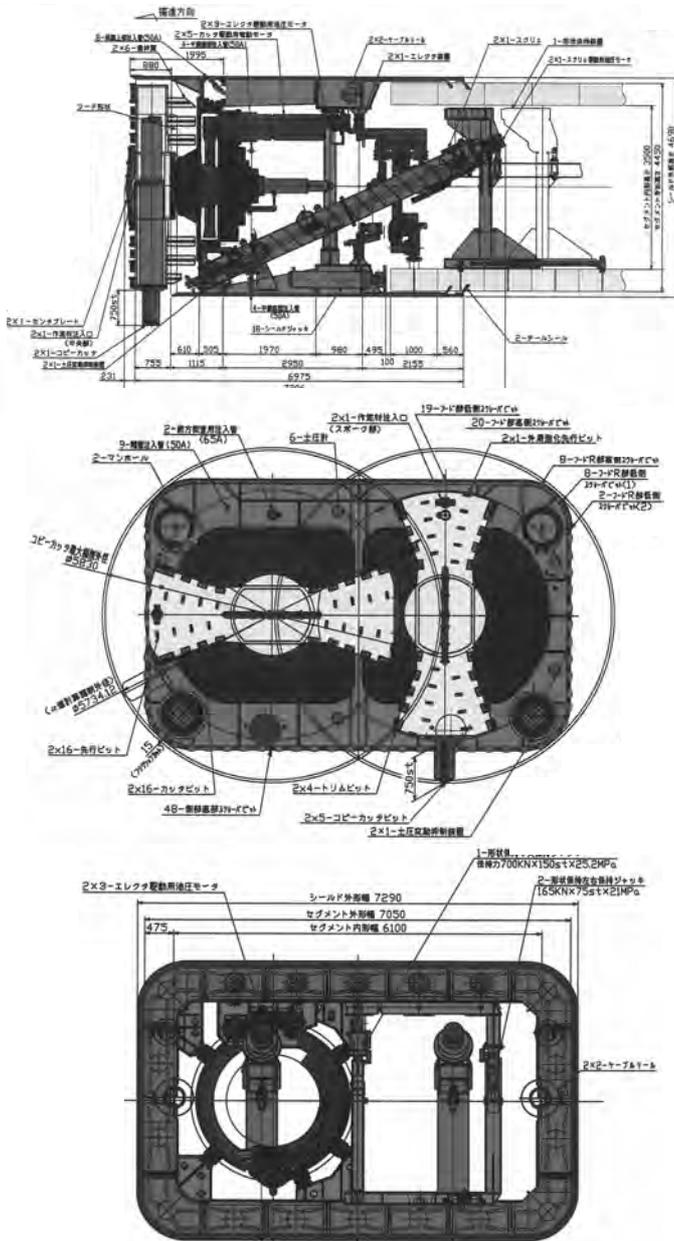


図-3 横型2連矩形シールドマシン

### 3. 問題点とその対応策

#### 3.1 常設作業帯の無い狭隘な作業基地

発進立坑は、非常に交通量の多い銀座4丁目交差点近傍晴海通りの歩車道の路下にある。常設作業帯設置の占用許可は下りなかったことから、通常地上に設置する様々な設備やセグメントのストックヤードなどが常時確保できない状況となり、夜間のみ作業帯の設置・撤去を繰り返し施工する必要があった。掘進時の作業基地となる作業帯内の重機配置を図-4に、夜間作業帯を設置している状況を写真-2, 3に示す。

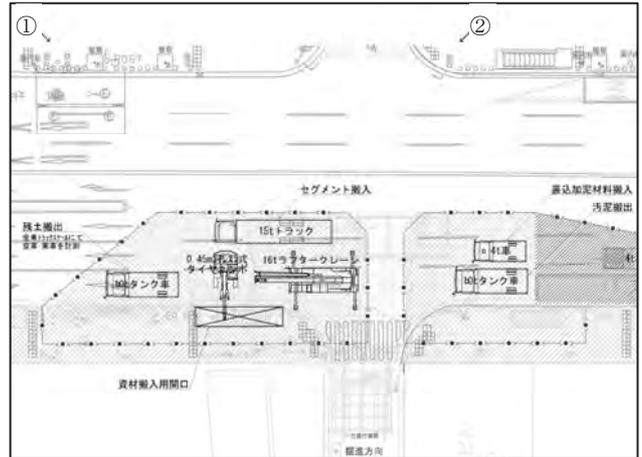


図-4 掘進時作業基地重機配置図



写真-2 夜間作業帯設置状況 (①より見る)



写真-3 夜間作業帯設置状況 (②より見る)

### 3.2 狭隘な発進立坑とシールドマシンの組立て

発進立坑付近は複数の地下埋設物が存在する。そのため、資機材を搬出入する開口位置が限定された。また、シールド掘進に必要な注入設備などを路下に設置するため、元々狭隘な立坑がさらに狭くなった。シールドマシンの投入を含め、各プラント類の設置は詳細な検討を重ねて施工した。揚重作業は立坑開口部でしかできないため、シールドマシンの組立作業は分割されたマシンを開口部から投入し、立坑内で横移動や回転作業を幾度も繰り返した。このため組立て作業に通常の約2倍の時間を要した。

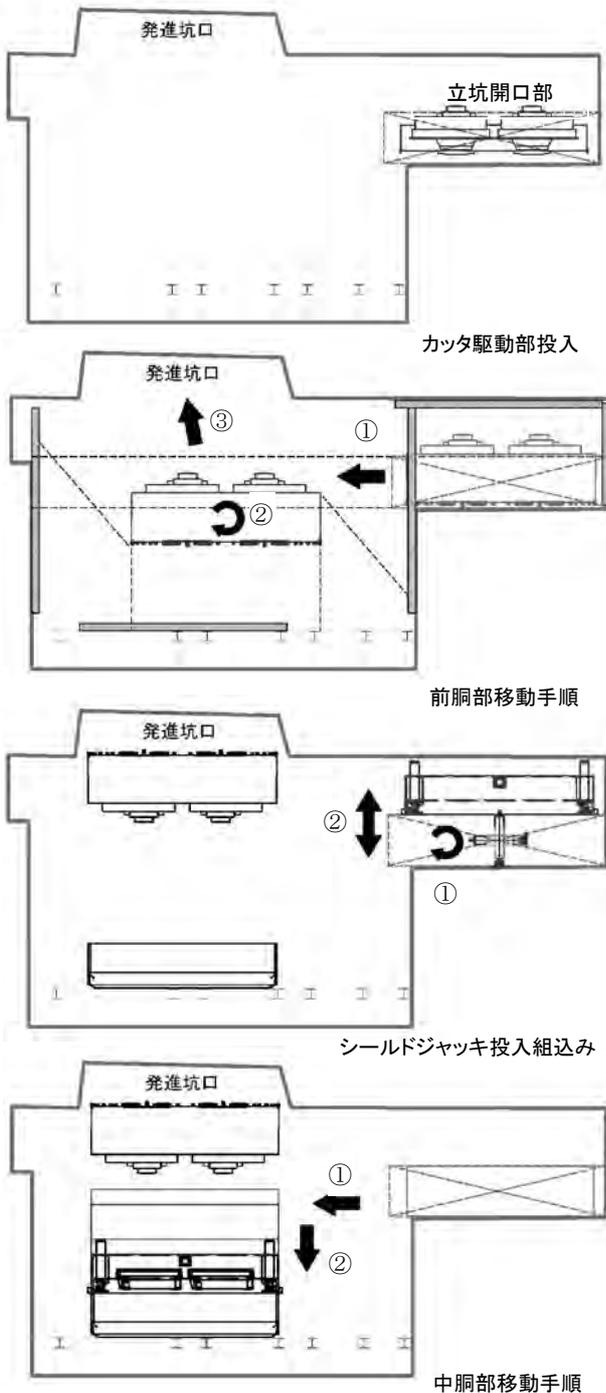


図-5 シールドマシン組立てイメージ図

シールドマシンの組立てイメージを図-5 に示す。また、組立て状況を写真-4～6 に示す。



写真-4 前胴下部投入状況

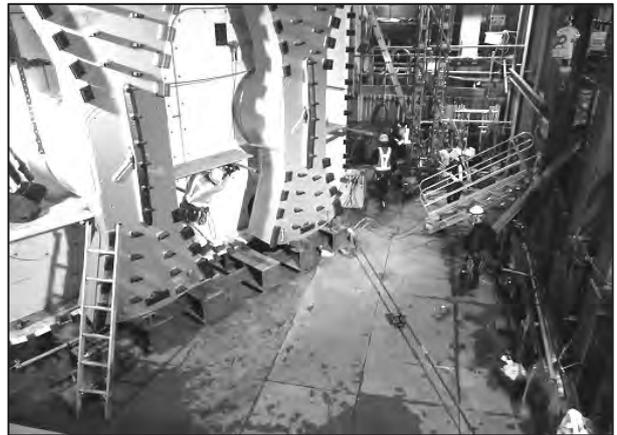


写真-5 前胴部回転状況

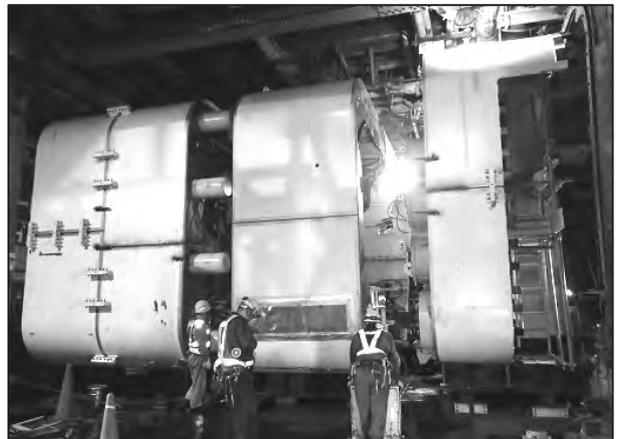


写真-6 中胴部横引き状況

### 3.3 掘進時の既設地下躯体への影響

既設地下躯体管理者と協議を行ったところ、図-6 に示すように地下1,2階の躯体へシールド掘進時の荷重をかけることができないことが判明した。そこで躯体に荷重をかけないようにするため、図-7 に示すようにスラブコンクリート・地盤改良体をグラウンドアンカーで一体化する構造に変更した。

反力枠の設計荷重は上段 6,000kN・下段 10,000kN とし、掘進時も最大推力を 16,000kN に制限して施工した。その結果、反力枠の水平方向の変位量は設計 4mm に対し、掘進時最大変位量は

3mmであった。また、地下躯体1,2,3階全てのフロアにおいて特に影響なく掘進を完了した。

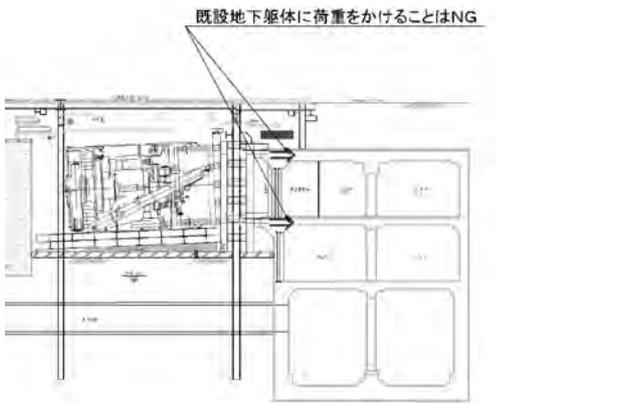


図-6 シールドマシン発進計画（当初）

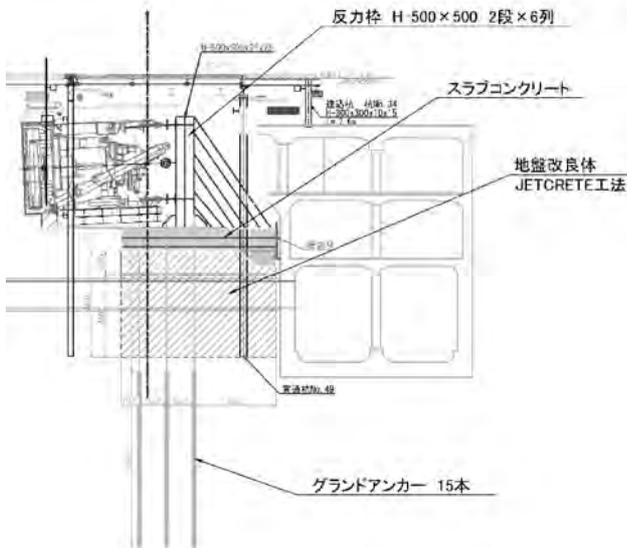


図-7 シールドマシン発進計画（変更後）

### 3.4 狭隘な発進立坑での掘進開始

発進立坑にてシールドマシンを組立て、後続台車を配置した状況を図-8に示す。通常の発進方法は仮組セグメントを組立てながらシールドマシンを押し出すが、立坑開口部から仮組用のセグメントを供給する空間がないため、通常の発進は困難であった。

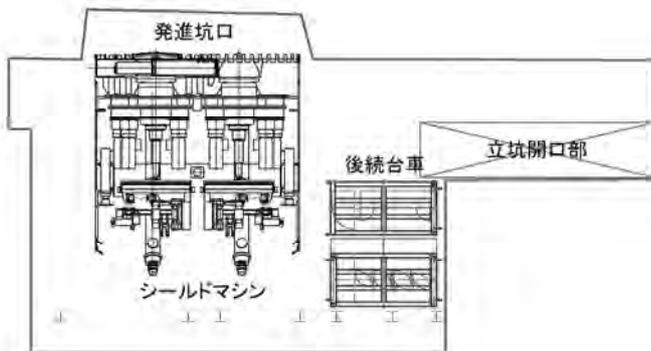


図-8 シールドマシン発進時状況図

そのため、図-9に示すように下部に仮押し用の鋼材及び仮押し用の反力棒を組立て、シールドマシンを仮押しした後にそれらを解体し図-7にある反力棒を組立て、掘進に伴い推力伝達用の鋼材を順次組立てながらシールドマシンを発進させた。推力伝達架台の最終形状を図-10・写真-7に示す。

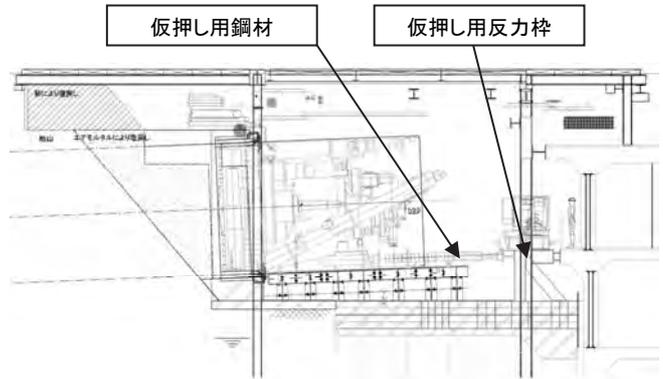


図-9 シールドマシン仮押し状況図

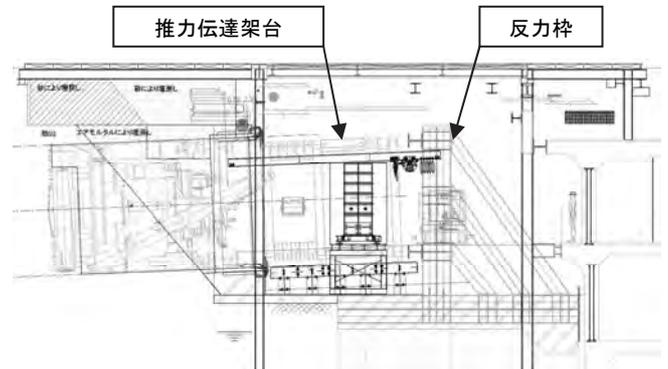


図-10 シールドマシン貫入状況図



写真-7 推力伝達架台設置状況

### 3.5 狭隘な発進立坑下での設備配置

通常地上に配置する設備も常設作業帯が無いために、立坑内に設置することを余儀なくされた。スペース的に裏込め注入・加泥注入設備は通常使用される自動練りプラントを設置することが困難であった。

そのため、裏込め注入プラントは、完全手動練りの設備を設置し、材料のセメントはセメント袋

で立坑内にストックした。プラントマンを2名配置し、人力にて材料をプラントへ投入して供給した。プラント関係の配置図を図-11に示す。

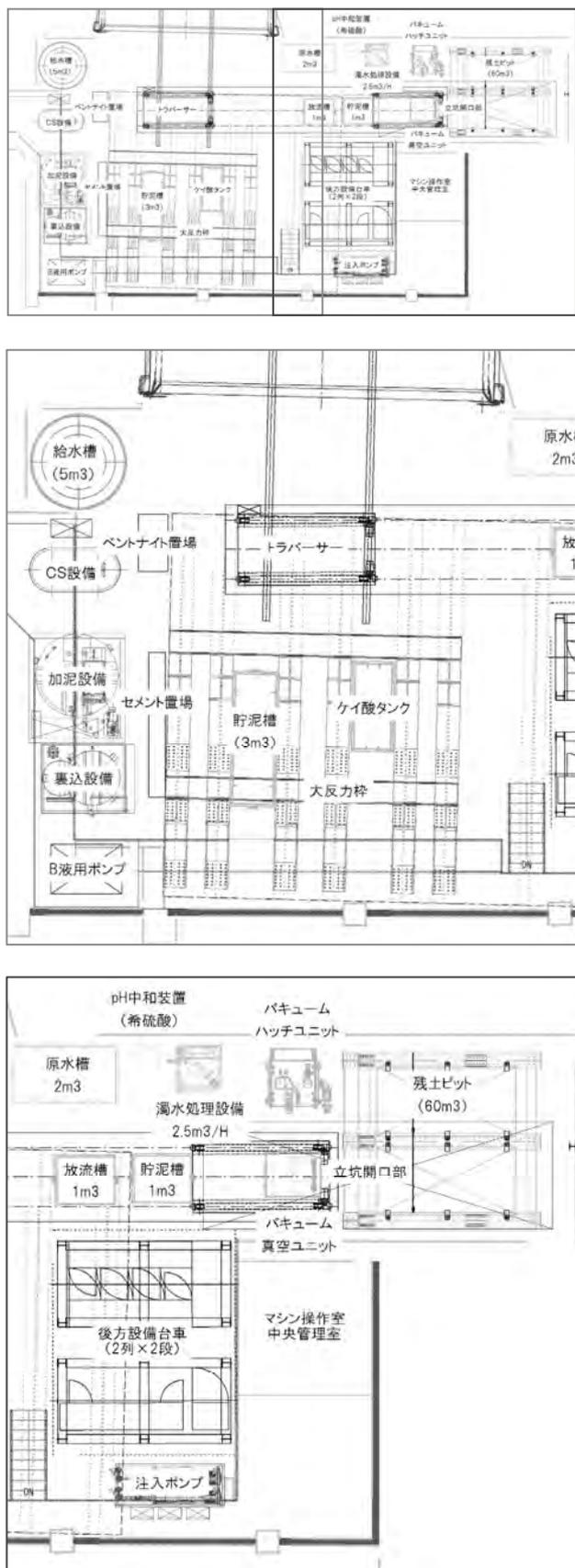


図-11 発進立坑内シールド関係設備配置図

### 3.6 低土被り・無水土層掘進での掘進管理

低土被り・無水土層での掘進であるために、フリクションカットのための余掘りによる路面沈下や土砂取込みの過不足による路面の変状、敷地境界からの注入材の漏えいなど不具合の発生が懸念された。そのため以下のような対策を実施した。

#### (1) 切羽管理について

無水土層での掘進では、加泥材の逸泥によりチャンパー内が塑性流動化した状態にできず土圧バランスがくずれることが懸念された。

事前のテーブルテストの結果から加泥材は高吸水性樹脂の入った高分子系の加泥材を採用した。実績として配合  $3\text{kg}/\text{m}^3$ ・注入率 30%程度の添加によって土圧制御も可能となり、スランプ 10cm 程度の状態で排土できた。

#### (2) 排土量管理について

切羽からの排土はポータブルのベルトコンベアを連動制御し使用した。立坑部に設置したベルトコンベアにはベルトスケール・レーザースキャナを装備し、リアルタイムな排土量計測を実施した。

また、リングごとに比重計測し、容積・重量の相関を把握して排土量管理を実施した。現場から搬出する土砂の重量については全車両地上の無線式トラックスケールで重量計測し、排土量と実搬出量の相関も把握し、土砂取込みの過不足がないことを確認しながら掘進した。

#### (3) 路面変状管理について

余掘りによる沈下抑制対策として、粘土系の高粘性な可塑状充填材をシールドマシン前胴部から注入しながら掘進した。裏込め注入はセグメントグラウトホールより即時に2系統で注入を行った。路面変状管理は、掘進箇所直上をリアルタイムに計測し、掘進中の路面変状度合いを確認して余掘り充填材・裏込め材の注入率を随時変更しながら掘進した。

#### (4) シールドマシンの姿勢制御について

本工事のシールドマシンは、上部にフードがあり、上部をオーバーカットできない構造であった。そのため勾配変化点でのピッチング制御や蛇行修正時の方向制御、ローリング発生時の姿勢制御が円滑に実施できるか課題があり、シールドマシンにテンションジャッキを装備するなどの対策を実施した。掘進の初期段階でシールドマシンは下を向きやすい傾向があることを確認できた。そのため下側を掘り残すことで上下のシールドジャッキの選択でピッチングを制御できることが判明した。水平方向の制御は左右シールドジャッキの選択で実施した。ローリングは主に余掘り充填材の注入反力から発生したと考えられ、対策としては①シールドジャッキの選択で偏芯モーメントを発生させる、②左右カッタの掘り残し量に変化をつける、

③余掘り充填材注入箇所を選択という3つの対策を実施した。以上の対策より、水平・鉛直変位ともに管理値の±50mm以内で掘進を完了できた。

### 3.7 シールドマシンの解体搬出

工事全体工程により、シールドマシンの解体材は到達立坑からの搬出となり、グランドオープン後のGINZA SIXの地下2階から場外へ搬出する必要があった。そのため以下のような対策を実施した。

#### (1) 隔壁・排気浄化装置の設置について

ガス切断時の煙・異臭がGINZA SIXへ流入を防止するため、シールド坑内に鋼製隔壁を設置し、シールド坑内が負圧の状態を保つように強制排気させた。マシン近傍と発進坑口付近には150 m<sup>3</sup>/minの処理能力を持つ排気浄化装置を各2台設置し、煙の浄化を行い発進立坑側へと排気した。排気浄化装置を2段構えに設置したこともあり、地上へ煙が排出されることは皆無であった。隔壁の設置状況と排気浄化装置の設置状況を写真-8・9に示す。



写真-8 鋼製隔壁設置状況（坑口付近）



写真-9 排気浄化装置設置状況（マシン近傍）

#### (2) 解体部材の仮置き・搬出について

ガス切断時はシールド坑内を常時負圧の状態にするためGINZA SIX側の隔壁は撤去できないことから、解体作業中は解体材の場外搬出ができず、

解体材を全て坑内に仮置きする必要があった。坑内に仮置きした状況を写真-10に示す。ガス切断完了後、隔壁を撤去した後にGINZA SIXより解体材を搬出した。GINZA SIX地下2階での解体材搬出状況を写真-11に示す。



写真-10 坑内に仮置きした解体材

- ①ターンテーブル架台上へ  
フォークリフトにて降ろす。
- ②ターンテーブルのピンを抜き、  
回転させる準備をする。



- ③ターンテーブルを回転させ、  
ピンを押しなおす。
- ④ターンテーブル架台ごと人力  
で押出す。



- ⑤EPS上で再度ターンテーブルを  
回転させ、荷取りする。
- ⑥フォークリフトにてトラックに  
積込む。



写真-11 解体材搬出状況

## 4. あとがき

様々な難条件の中、それぞれの対策を行うことで組立・発進・掘進・到達・解体搬出まで大きな問題なく完了することができた。

本報文が同工種の参考になれば幸いである。

## 23. i-Construction を加速する遠隔リアルタイム・ダッシュボード に関する研究

株式会社熊谷組  
株式会社まざらん

○北原 成郎  
西垣 重臣

### 1. はじめに

災害復旧工事の無人化施工において、働き手の状況認識の向上とヒューマンエラーの未然防止を図る遠隔リアルタイム・ダッシュボードを報告する。ここで、ダッシュボードとは、施工状況を一目で理解できるように、クリティカルな達成指標を整理統合して提示する機能をいう。本研究では、クリティカルな達成指標を安全性と生産性に係る定量的評価指標とインフォグラフィックスで構成する。

ダッシュボードについて様々な定義がある。本研究では、ダッシュボードをつぎのように分類する。

- (1) 様々な仕事をすばやく実行できる GUI (graphical user interface) を構成する部品要素 (Widget という小さなプログラム) の集合体
- (2) 複数の分散したアプリケーション、ネットワーク・デバイス、産業機械などを管理するソフトウェアで構成されたパネル
- (3) 様々な GUI を使い、ビジネス活動で生じた事象を、一目で、分かり易く、リアルタイムにデータを可視化し、要約するビジネス・ダッシュボード

遠隔リアルタイム・ダッシュボードはビジネス・ダッシュボードの範疇に含まれる。

有人操作ではオペレータは自らが操作する建設機械の車体姿勢、振動、衝撃などを体感することができ、自らの the seat of the pants を活かすことができる。ここで、the seat of the pants とは、自分の経験と勘で、計器に頼らず、反射的に判断・操作することをいう。一方、無人操作では、オペレータは遠隔操作する建設機械の車体姿勢、振動、衝撃などを体感することができない。オペレータは、遠隔操作用モニタを通じて、建設機械の振る舞いを推定することになる。現場管理者は、施工現場に立ち入れないため、遠隔操作用モニタをみて、またはオペレータからの口頭報告や作業日報により無人化施工状況を推測することになる。

無人化施工において働き手の状況認識の向上とヒューマンエラーの未然防止を図るために、安全

性と生産性に係る定量的評価指標とインフォグラフィックスを、働き手にリアルタイムに提供することは非常に有意義である。

大規模な斜面崩壊が発生した阿蘇大橋地区において、斜面上部に残る多量の不安定土砂がさらに崩壊する恐れがある。土砂崩壊による二次災害を防ぎ、国道をはじめとしたインフラの復旧を安全に行うため、阿蘇大橋地区斜面防災対策工事が施工されている。この工事に係る崩壊地内での土留盛土工の築造と上部工事用道路の開設に遠隔リアルタイム・ダッシュボードを適用した事例を紹介しながら、その機能と役割について報告する。

### 2. 関連する研究と本研究の特徴

無人化施工に関連する研究には、ハードウェア、カメラ、通信機器とネットワーク構成などに関するものが多く、情報モデルに関するものは希薄である。一方、the seat of the pants の重要性を論じた研究<sup>1)</sup>、触知覚の重要性<sup>2)</sup>、触覚を通じて情報を伝達する技術であるハプティクスの研究<sup>3)</sup>などオペレータの五感に注目するものがある。

著者らは、無人化施工の ICT を活用した作業管理<sup>4)</sup>、オペレータの操作性向、タスクの困難性、マシンの操作性などに関する定量的指標<sup>5)</sup>、機械化土の情報モデル<sup>6)</sup>、床固工工事における無人化施工 CIM<sup>7)</sup>などを研究してきた。本研究はこれらの研究成果を活用し、安全性と生産性に関する定量的評価指標とインフォグラフィックスを働き手にリアルタイムに提供するという視点で、さらに発展させたものである。ここでは、安全性に係る定量的評価指標として、建設機械の振る舞いにより励起される三軸加速度と三軸角速度、並びに移動速度と移動方位などに基づいた物理的手がかり情報を提供する。生産性に係る定量的評価指標として、建設機械による構内物流を把握することで、重要目標達成指標(KPI :Key Performance Indicators)を提供する。

### 3. 現場適用概要

遠隔リアルタイム・ダッシュボードの現場適用

イメージを図-1に示す。

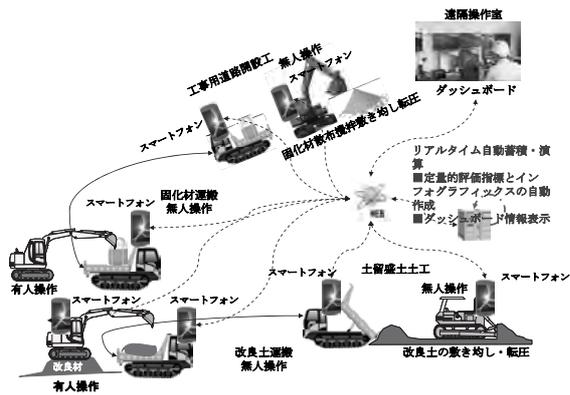


図-1 遠隔リアルタイム・ダッシュボードの現場適用イメージ

工事現場でのデバイス管理の煩雑さを回避するために、スマートフォン Galaxy S3 に組み込まれている 3 軸加速度計, 3 軸角速度計, 電子コンパス計, GPS 受信器などを使用する。このスマートフォンは、計測データのログ機能とデータ送信を担うアプリケーションを持つ。計測対象とした建設機械をつぎのとおりである。

- ① 固化材・改良土運搬用：11t 級クローラダンプ
- ② 積込作業用：0.8m<sup>3</sup> 級バックホウ
- ③ 固化材散布・攪拌転圧用 1.5m<sup>3</sup> 級バックホウ
- ④ 敷き均し転圧作業用：10t 級ブルドーザ

サンプリング周波数は 1 HZ～100HZ の範囲としている。この事例ではサンプリング周波数 1 HZ を選択した。スマートフォンの建設機械への車載状況を図-2に示す。

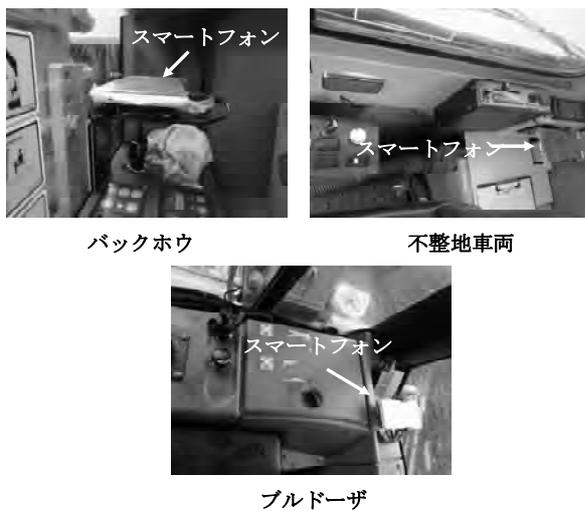


図-2 スマートフォンの車載状況

### 3.1 システム構成

遠隔リアルタイム・ダッシュボードは、10 分間

隔でフィードバック情報を更新する。その初期画面を図-3に示す。



図-3 遠隔リアルタイム・ダッシュボード

メニューの概要を以下に示す。

#### (1) 施工パラメータ登録

施工パラメータ登録画面を図-4に示す。

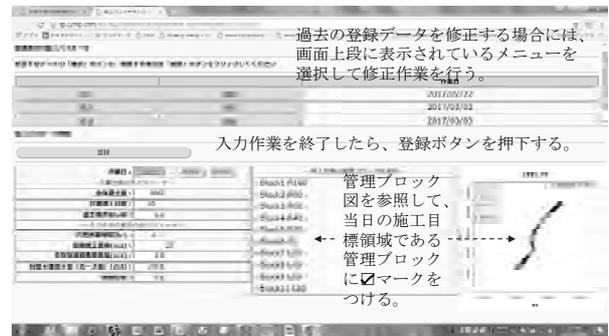


図-4 施工パラメータ登録画面

施工エリアをブロック分けして、管理ブロック図を作成している。管理ブロック図を参照して、当日の施工目標領域である管理ブロックに  マークをつける。そして、下記の情報項目に関するデータを作業前に登録する。これらは、計測データを解析し、生産性を評価する際に重要な情報項目である。

- ① 全体盛土量 m<sup>3</sup>
- ② 計画施工日数 day
- ③ 盛土撒き出し厚 m
- ④ 所定作業時間 hr
- ⑤ 目標施工面積 m<sup>2</sup>
- ⑥ 不整地運搬車積載量 m<sup>3</sup>
- ⑦ 目標土運搬量（ルーズ量） m<sup>3</sup>
- ⑧ 締め固め率 比率

#### (2) センサー死活監視

スマートフォンの稼働状態をモニタリングする画面である。該当ボタンを押下することで、スマートフォンによる計測状態を確認することができ

る。

### (3) データファイル作成

指定した日付の計測データのダウンロードを可能にする画面である。処理対象日の計測データファイルの名称が画面に表示される。この名称を押下することで、そのファイルをダウンロードできる。

### (4) データ時刻表示

計測しているデータの計測時間とデータ数を確認する画面である。

### (5) 作業状況解析

メニュー「作業状況解析」のボタンを押下すると、図-5 に示す画面に推移する。各メニューが提供する情報の概要をつぎに示す。

#### ① 施工状況

メニュー「施工状況」を押下すると、施工状況の概要（全体状況図、バックホウ、不整地運搬車、ブルドーザなどの施工状況図、進捗ゲージ、発着累積グラフ、荷下ろし土量ヒストグラムなど）を表示する画面に推移する。施工状況概要の画面を図-6 に示す。

#### ② バックホウ

メニュー「バックホウ」を押下すると、バックホウの施工状況（施工状況図、積込バーチャート、作業時間表、作業時間バーチャートなど）を表示する画面に推移する。バックホウの施工状況画面を図-7 に示す。

#### ③ 不整地運搬車

メニュー「不整地運搬車」を押下すると、不整地運搬車の走行状況（施工状況図、走行速度ヒストグラム、走行速度時系列グラフ、走行速度記述統計など）を表示する。不整地運搬車の走行状況画面を図-8 に示す。

#### ④ ブルドーザ

メニュー「ブルドーザ」を押下すると、ブルドーザの施工状況（走行軌跡によるポリゴンズ図、押土軌跡と押土密度、作業時間表、作業時間バーチャート、押土時走行速度記述統計、押土時走行速度時系列グラフ、押土時走行速度ヒストグラム、進捗ゲージなど）を表示する。ブルドーザの施工状況画面を図-9 に示す。

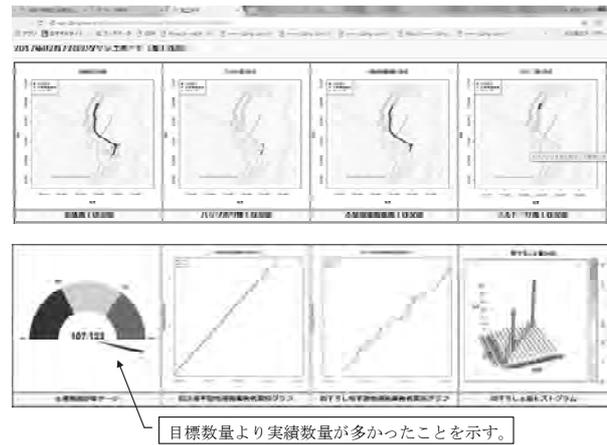


図-6 施工状況概要画面

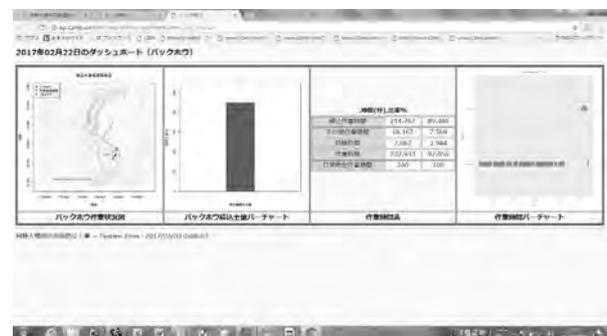


図-7 バックホウの施工状況画面

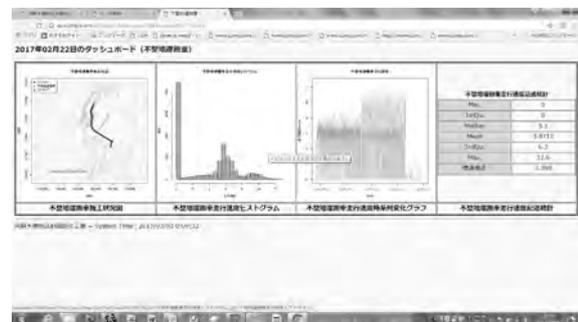


図-8 不整地運搬車の走行状況画面



図-5 作業状況解析画面

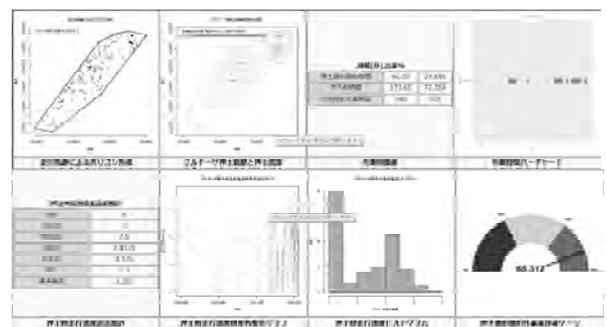


図-9 ブルドーザの施工状況画面

## (6) 生産性分析

日常の生産性分析情報を表示する。この情報は当日の作業時間バーチャートとラインバランシング情報、そして積込場と荷下ろし場の特性情報で構成される。作業や機械に均等に仕事を割当て工程間の流れる速さを均一化していくという技法をラインバランシングという。ラインバランシングの際に活用する重要な情報として、ピッチタイムとラインバランス・ロス率を提供する。ピッチタイムは、実作業時間を当該時間の仕事量で除した値である。ラインバランス・ロス率は(1)式で求める。

$$\text{ratio} = \frac{n \times t^* - \sum_{i=1}^n t_i}{n \times t^*} \quad (1)$$

ここで、*ratio*: ラインバランス・ロス率、*n*: 工程数、*t*\*: ボトルネックのピッチタイム、*t<sub>i</sub>* *i*=1,2,...,*n*: 各工程のピッチタイムである。

ピッチタイムとボトルネック、そしてラインバランス・ロスの関係を図-10に示す。

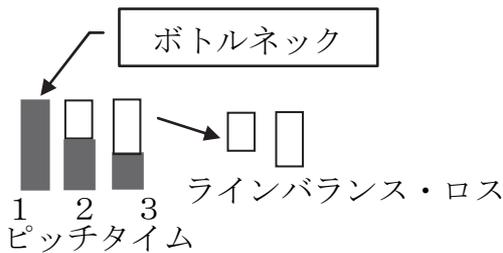


図-10 ピッチタイムとボトルネック、そしてラインバランス・ロスの関係

ピッチタイムの棒グラフの例を図-11に示す。上図からは積込作業と運搬作業がボトルネックとなっていることが分かる。

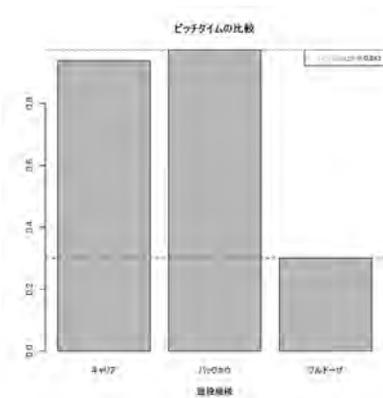


図-11 ピッチタイムの棒グラフ

この施工ラインは、積込、運搬、荷下ろし、押土作業などで構成されるプッシュ生産方式のラインである。このライン数は”1”である。そのため、このライン自体がクリティカル・パスとなっている。

積込場と荷下ろし場の特性情報はクローラダンプ滞在時間のヒストグラムと特性値で構成される。特性値は、計測開始時刻到着回数、平均到着率、平均滞在時間、滞在時間標準偏差などの項目で構成される。これらの特性値を使い、待ち行列シミュレーションを行うことができる。

## 4. 工事中道路に潜むハザードの可視化方法

工事中道路に潜むハザードの可視化方法について述べる。

### 4.1 危険警告判断基準

三軸加速度計測値の経時変化を表現する特性値として、平均値と分散の変化、周波数の変化、外れ値、連続的な上昇/下降傾向(トレンド)など、また導出属性として、自由落下・衝撃、縦横段方向の滑り、サイドスリップ角、車体姿勢角などを安全性に係る定量的指標として、遠隔リアルタイム・ダッシュボードは出力する。

これらの物理的手がかり情報に基づいて危険警告を発する。その危険警告発報基準として、簡便な方法であり、高い周波数や外れ値(outliers)の影響を受けないと考えられる連検定(run test)の考え方を取り入れる。

連検定とは、コインの表裏、丁半、YesかNoなどのように二つしかない結果や事象において、その生起回数に規則性があるかないかを検定するものである。ここでは、物理的手がかり情報の連続的な上昇または下降を示す連数に注目する。

一般に、連数”5”のときは注意が必要、連数”6”のときはアクションの準備を整える、連数”7”のときは原因究明と対策などのアクションをとる、といわれる<sup>8)</sup>。

連数が”7”の事象が発生する確率は、一年内に交通事故に遭遇する確率に近似する。ちなみに、連数が”15”の事象が発生する確率は交通事故で死亡する確率に近似する。

危険事象の判断基準を厳しくする(連数の値を大きくする)ことも考えられる。判断基準を厳しくすると、第二種の過誤確率が大きくなり、検定力が落ちる。一方、判断基準を甘くすると、危険事象の発生という判断が乱発される。本研究では、連数が”7”のとき、危険事象が生じたと判断し、警告を発する。そのときの観測値(計測値、時刻、位置)を物理的手がかり情報に係るハザードが潜在するポイントとする。

### 4.2 リスク評価の方法

リスク評価の流れを図-12に示す。

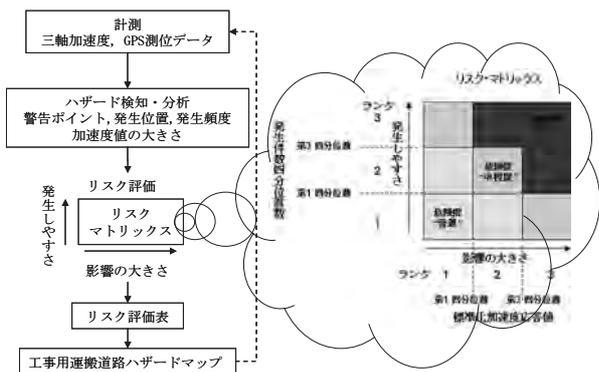


図-12 リスク評価の流れ

危険警告発生件数を発生しやすさとする。計測値の絶対値の大きさを影響の強さとする。両者の値を四分位数によりランク付けし、スコアを付与する。両者のスコアをリスクマトリックスと突合せ、リスク・スコアを付ける。そして、リスク・スコアをリスク評価表に基づいてリスク評価を行う。リスク評価表を表-1に示す。

表-1 リスク評価表

スコア	リスク評価
33	危険度が高い
32	危険度が高い
31	危険度が中程度
23	危険度が高い
22	危険度が中程度
21	危険度が普通
13	危険度が中程度
12	危険度が普通
11	危険度が普通

### 4.3 ハザードの可視化例

前述した危険警告判断基準とリスク評価の方法に基づいたサイドスリップのハザードの可視化例を示す。土留盛土工の築造のための運搬道路のハザードの可視化例を図-13に、上部工事用道路開設の作業路のハザードの可視化例をと図-14に、それぞれ示す。

土留盛土工の築造のための運搬道路では、登り口に多くのハザードがみられる。ここは急勾配なところで、道路が傷みやすく、道路の維持改良作業に追われる箇所である。ハザード存在箇所の経時変化をみることで、道路維持改良作業のタイミングを計ることができる。

上部工事用道路開設の作業路では、登り口と曲線部、そして固化材散布攪拌敷き均し転圧施工箇所手前にハザードが存在する。固化材散布攪拌敷

き均し転圧施工箇所手前のハザードは特にリスクが高い。

図中の円の半径は、そのときの計測値をスケール化した値である。

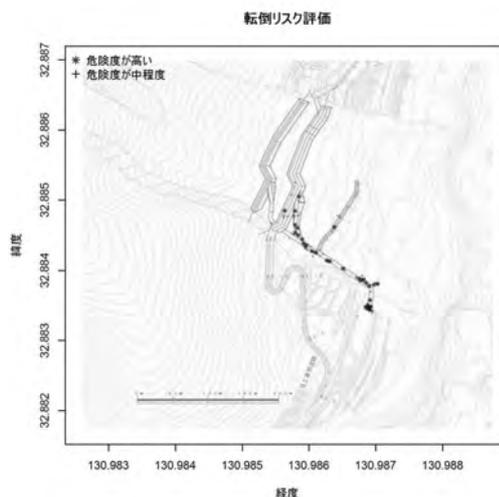


図-14 土留盛土工の築造のための運搬道路のハザードの可視化例

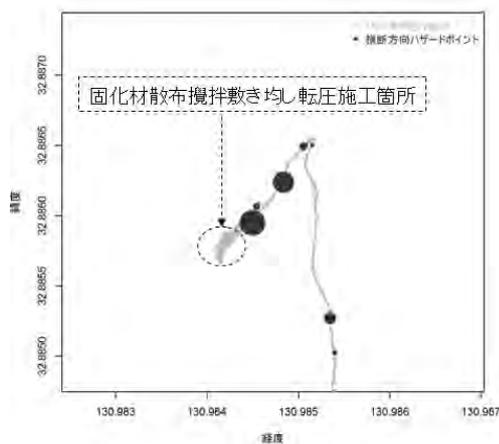


図-14 上部工事用道路開設の作業路のハザードの可視化例

## 5. 目標管理

### 5.1 ブルドーザ押土転圧施工の目標管理

先ず、ブルドーザの稼働時間把握方法を示す。つぎに、ブルドーザの施工面積を計算することで、ブルドーザ施工の目標管理を行う方法を示す。ブルドーザ施工時の上下方向加速度の分散は大きい。上下方向加速度の分散の変化を求め、分散の(中央値+平均値)/3の値を待機と押土転圧作業の境界線の閾値とした。分散の値が、この閾値より大きいとき、押土転圧作業を行っている判断す

る。そのときの時刻を切り出し、作業時間を計算する。この事例では教師なしの学習データであるため、分散の五要約数、ヒストグラムの形状などから、上記の閾値を採用した。動画記録などをみて、教師つき学習データを生成することが望ましい。

押土面積と進捗率を求め、可視化する方法を図-15に示す。稼働時間、押土面積、進捗率などをリアルタイムに求め、定量的評価指標とインフォグラフィックスとしてフィードバックすることで、ブルドーザ押土転圧施工の目標管理が可能となる。

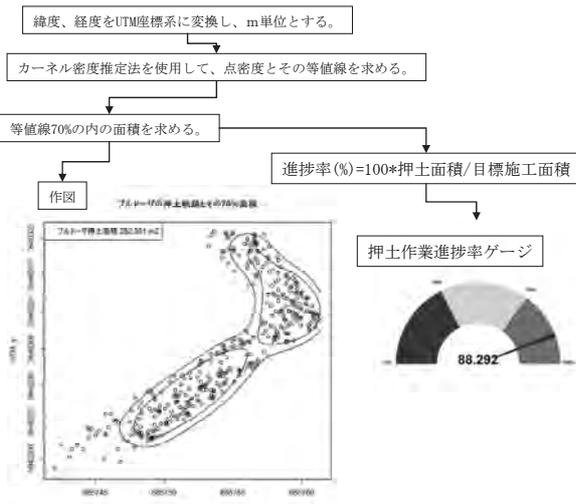


図-15 ブルドーザ押土転圧軌跡と面積、その進捗率を求める方法

## 5.2 バックホウによる固化材散布攪拌敷き均し転圧施工の目標管理

同様にして、バックホウによる固化材散布攪拌敷き均し転圧についても目標管理が可能となる。固化材散布攪拌敷き均し転圧軌跡と面積の可視化例を図-16に示す。

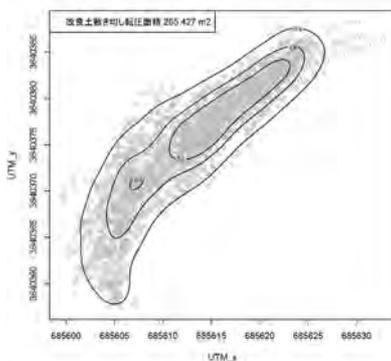


図-16 バックホウによる固化材散布攪拌敷き均し転圧軌跡と面積の可視化例

## 6. まとめ

安全性に係る定量的評価指標として物理的の手がかり情報を提供する建設機械による構内物流を把握することで、生産性に係る定量的評価指標として重要目標達成指標を提供する。そして、これらの指標をインフォグラフィックスにより可視化する。遠隔リアルタイム・ダッシュボードは、定量的評価指標とインフォグラフィックスをリアルタイムにフィードバックする。

このフィードバック情報は、働き手の状況認識の向上とヒューマンエラーの未然防止を図り、適時的確な意思決定と迅速な対策を促す。その結果として、施工品質の向上、トレーサビリティの確保、安全性と生産性の向上などが期待される。

i-Constructionとは、調査・設計から施工・検査、さらには維持管理・更新までの建設分野のプロセス全体の最適化を図る活動であるといわれる。遠隔リアルタイム・ダッシュボードは施工と検査の最適化を加速する。

## 参考文献

- 1) Yoshio Ban: "UNMANNED CONSTRUCTION SYSTEM: PRESENT STATUS AND CHALLENGES," pp. 241-246, Proceedings of the 19th ISARC, 2002.
- 2) 茂木 正晴, 藤野 健一, 三嶋 博之: "無人化施工による破碎・解体作業時における触知覚情報の必要性と実態 : 媒体を通じた人の触知覚の実態," pp. 64~73, 68巻, 8号, 建設機械施工, 2016.
- 3) Kyeong Won Oh, Dongnam Kim, Nam Hoon Kim, Daehie Hong: "The Virtual Environment For Force-Feedback Experiment Of Excavator Using A Novel Designed Haptic Device," pp. 51~56, Proceedings of the 28th ISARC, 2011.
- 4) Shigeomi Nishigaki, Kazutoshi Saibara, Shigeo Kitahara, Hajime Iwasaki, Kazuhiro Yamada, Hideaki Satoh: "ICT-BASED WORK MANAGEMENT TO SUPPORT UNMANNED CONSTRUCTION FOR POST-DISASTER RESTORATION," pp.508-513, 28th ISARC, 2011
- 5) Shigeomi Nishigaki, Katsutoshi Saibara, Shigeo Kitahara: "QUANTITATIVE INDEXES TO EVALUATE OPERATOR'S BEARING, DIFFICULTY IN TASK, AND MACHINE OPERABILITY WHEN REMOTELY CONTROLLING BACKHOE," pp. 587~594, Proceedings of the 30th ISARC, 2013.
- 6) Shigeomi Nishigaki, Katsutoshi Saibara, Shigeo Kitahara: "Information Modelling on Mechanized Earthworks," pp. 992-999, Proceedings of the 31st ISARC, 2014.
- 7) 北原成郎, 才原勝敏, 西垣重臣: "床固工工事における無人化施工CIMに関する研究," pp. 71~78, 第14回 建設ロボットシンポジウム論文集, 2014.
- 8) 福田祐二: "生産現場の異常を検知, 品質管理に役立つ「C管理図」を使う," 2012.

## 24. カメラ位置を直接計測するUAV写真測量システム

### TSトラッキングUASの概要と評価結果

株式会社 トプコン ○ 大谷 仁志  
株式会社 トプコン 佐々木 剛  
(一社) 日本建設機械施工協会 椎葉 祐士

#### 1. はじめに

平成28年度に公表された空中写真測量（無人航空機）を用いた出来形管理要領（土工編）（案）が今年度改訂され、新方式としてUAVに搭載されたカメラ位置を直接計測し、標定点を不要とする新手法が掲載された。UAVを用いた写真測量は、撮影時のカメラ位置を正確に求めるために、建設現場に多数の標定点（対空標識）を設置しなければならない。しかし、実現場で計画通りに設置できない場合や撮影後に写真測量ソフトウェア：SfM（Structure from Motion）を用いて画像上に写っている標定点を抽出する処理がほとんど手作業であることなどがUAV写真測量の計測精度や生産性向上に関する大きな課題であった。

我々はこうしたUAV写真測量の課題をカイゼンするために、自動追尾トータルステーション（以下自動追尾TS）を用いて、空撮時のUAVに搭載されたカメラ位置を直接計測し、標定点を使わない写真測量システムを開発した。本論文ではシステムの概要、技術的要素、地上型レーザースキャナーやトータルステーションを用いた面的精度、作業性などについて報告する。

#### 2. UAV写真測量の課題

UAV写真測量の計測精度を決める要因としては、撮影した画像の品質とカメラキャリブレーション、SfMの精度確保に必要な空中写真のラップ率、そして建設現場に設置する標定点の配置が重要である。特に、標定点はSfMで得られた三次元モデルを工事基準点に座標変換（絶対標定）するため、標定点は外側標定点として100m以内に1点、内側標定点として天端上に200m間隔で設置・固定するように出来形管理要領には記載されている。しかし、図-1に示すように重機が稼働している建設現場では、安全性の観点から重機を停めて標定点を設置・測量しなければならず、足場などの問題により規定通りに設置できない場合がある。また、日々変化する建設現場では、標定点の保存が難しく、その都度、設置が必要であり、前回フライトさせたUAVの撮影計画が同じ

であっても同様の計測精度を得られる保証はない。さらに、現状ではUAVの自律飛行による空撮やSfMでの解析はほぼ自動で行えるが、建設現場での標定点の設置・測量作業や写真測量ソフトウェアを用いて画像上に写っている標定点の検出作業は基本的に手作業のため、UAV写真測量の生産性向上の最大の課題であった。

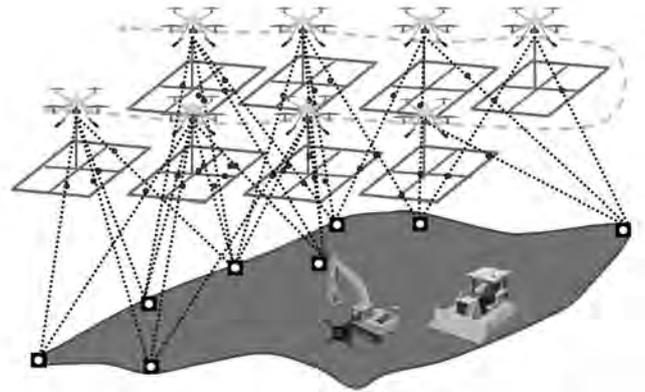


図-1 従来のUAV写真測量の課題

#### 3. システムの概要

カメラ位置を直接計測する手法として、当社で開発した「TSトラッキングUAS」（以下本システム）の構成を図-2に示す。

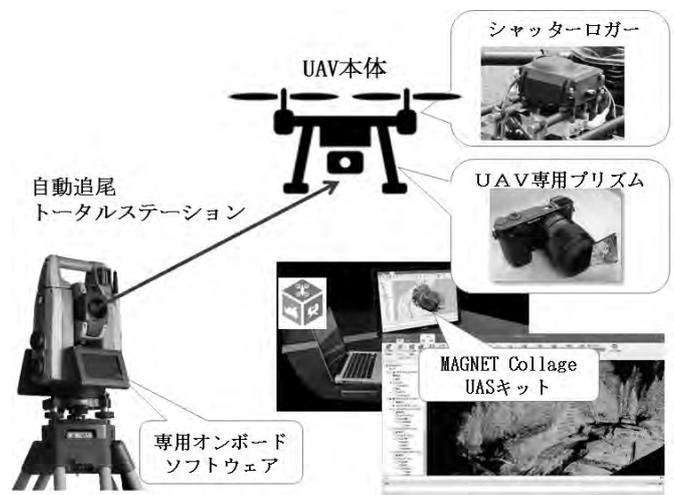


図-2 TSトラッキングUAS

本システムは、カメラのレンズ部分に全周プリズムを取り付け、さらにカメラのシャッタータイミングをGNSS時間で記録するシャッターロガー装置をUAV本体に搭載する。また、図-3に示すようにカメラのプリズムを高速追尾しGNSS時間で三次元データを出力できる自動追尾TSを用いる。これらのデータを専用の写真測量ソフトウェア(MAGNET Collage UAS キット)に入力すると、シャッターロガーと自動追尾TSの時間同期処理により、各画像の撮影位置が求められ、最新のSfMアルゴリズムにより、自動的に点群データが生成できる。本システムは、UAVの機体に搭載する新規に開発したセンサー&部品と既存の製品を改良することでシステム化を実現した。



図-3 自動追尾TSを用いたカメラ位置計測

#### 4. 本システムの技術要素

写真測量では、撮影時のカメラの位置と傾き(外部標定要素と呼ぶ)を必要とする。そのため、空中写真測量(無人航空機)を用いた出来形管理要領(土工編)(案)では、「SfMの利用においてカメラ位置を直接計測できる手法」(p34)と記載されており、各々のカメラの傾きは別途SfMソフトウェアにより後処理で解析できることを前提としている。これまで、航空測量カメラではカメラの位置・傾きを求める直接定位システムとしてGNSS-IMU装置を用いるが、IMUはカメラの三軸の傾きを求めるセンサーとして非常に高価なため、本システムは、後処理でSfMの解析から得られる各カメラの傾きを利用している。以下に本システムの技術的要素について説明する。

##### 4-1 カメラキャリブレーション

本システムは、基本的にカメラの外部標定要素が既知に基づく前方交会法による計測のため、カメラのキャリブレーションは正確でなければならない。独立(事前)したキャリブレーションを高精度に行う方法が理想ではあるが、本論文の精度検証では撮影環境や全体のシステム誤差も考慮してSfMの解析時にセルフキャリブレーションを

行っている。

##### 4-2 レバーアーム補正

写真測量のカメラ位置で必要なのはレンズの主点位置の三次元座標である。そのため、図-4に示すように追尾用全周プリズムはレンズの主点近くに設置した。プリズムはレンズ口径に合わせてホルダー化しており、事前にプリズムとカメラ主点との関係は精密に計測されている。カメラの機種に依存するが、プリズムアダプターをレンズに取り付ければ、その都度計測する必要はない。通常、マルチコプター(回転翼)UAVにはカメラを鉛直方向に制御できるジンバルが取り付けられているが、風等の影響により揺れる場合があり、さらにUAVによる空中撮影時の飛行旋回等によりヘディングが回転するため、カメラの三軸の傾きからプリズム位置をカメラ主点に変換する必要がある。本システムでは、SfMで得られた各画像の三軸の傾きを利用して自追尾TSで求められた各々のカメラのプリズム位置をカメラの主点位置に三次元変換する。



図-4 全周プリズムとレバーアーム

##### 4-3 カメラ位置の高速・高精度な計測

自動追尾TSはUAVの飛行スピードに対応した高速・高精度な性能を必要とする。図-5に自動追尾TSとその同期方法を示す。

本システムで用いる自動追尾TSは、当社のGT、iXシリーズであり、移動体追尾機能を利用する。自動追尾TSの測距及び測角センサーは独立したセンサーで常時観測しており、同時刻における測距、測角データにて移動体の高精度な三次元計測が行える。さらに自動追尾TS内部にはGNSSのモジュールが搭載されており、計測された三次元データに関連づけられたGNSS時間が20Hz(0.05sec)で出力可能である。

UAVにはカメラのフラッシュ・シューに取り付けられた検出センサーにより、撮影時のシャッタータイミングを正確に検出し、GNSS時間で撮影時間を記録できるシャッターロガー装置が搭載される。例えばカメラのインターバルタイマーを2秒に設定した場合、2秒毎の撮影時間をGNSS時間でロガーに記録し、そのログデータと自動追尾TSとのGNSS時間の同期を行い、正確なカメラの撮影位置を計算している。

今年度改訂されたラップ率の緩和により、進行方向のラップ率が90%から80%になり、UAVのスピードを倍にすることが可能になったが、本システムはUAVのスピードが4.2m/s程度の場合でも追尾可能である。

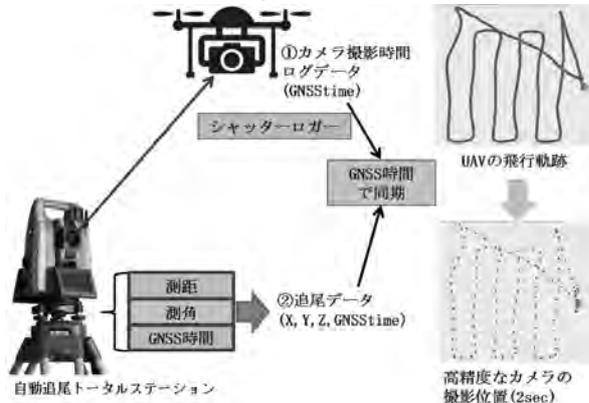


図-5 自動追尾TSと同期方法

### 5. 精度検証実験

本システムの計測精度と作業性を確認するために、施工技術総合研究所において検証実験を実施した。(図-6)

実験の実施内容は、出来形管理要領に記載されているカメラ位置計測を併用する空中写真測量の事前精度確認試験に従い、UAVとの追尾距離を150mから300mの50m間隔で4フライトのデータを取得した。各フライトの点群データの面的評価としてレーザースキャナー(以下TLS)やトータルステーション(以下TS)との較差を評価した。さらに検証点誤差及び従来の写真測量(標定点設置)との作業時間を比較した。



図-6 自動追尾TSの設置と実験風景

#### 5-1 撮影カメラ

本実験で使用したカメラの仕様を表-1に示す。

表-1 カメラの仕様

メーカー型名	SONY α6000
撮像素子	APS-C (23.5×15.6mm)
焦点距離	28mm
撮影画素数(3:2)	6000×4000 2430万画素
画素サイズ	3.91μm
外形寸法 幅×高×奥	120mm×66.9mm×45.1mm
本体質量	344g

#### 5-2 飛行計画

UAV撮影諸元と飛行計画を表-2に示す。対地高度は50mに設定し、地上画素寸法は7mm、解析に用いた撮影枚数は140枚であった。

表-2 UAV撮影計画と諸元

対地高度	50m	
コース間距離	11.1m	
地上画素寸法	7mm	
進行方向ラップ率	90%	
隣接コースラップ率	60%	
UAVスピード	2.1m/s	

検証点はテストエリア(50m×140m)に10点、さらに事前精度確認試験用検証点として先端に10m間隔で6点設置した。ここで「調整点」とは、計測エリア内で測量した少なくとも1点の任意点であり、本システムの補正に使用する。本実験では点番号10を使用した。

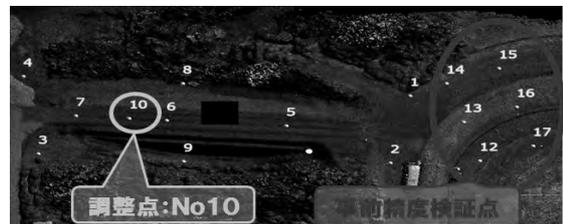


図-7 検証点の配置図

#### 5-3 面的評価

本システムで得られた点群データを図-8に示す。計測密度:10cm間隔(全9017点)で作成し、TLSで得られた点群データとの較差を求めた(表-3)。調整点ありの場合、目標精度内率(出来形計測規格値:±5cm以内)は、全て100%であった。



図-8 点群データ (MAGNET Collage UAS)

表-3 TLS (GLS-2000) との較差

条件	TS距離	点群数	標準偏差	最大誤差	目標精度内率(±5cm以内)
調整点なし	150m	9017	1.0cm	7.8cm	81% (7313)
	200m	9017	1.0cm	-4.8cm	100% (9017)
	250m	9017	1.8cm	21.3cm	4.6% (422)
	300m	9017	0.7cm	-8.0cm	70.2% (6329)
調整点あり 1点使用 (NO.10)	150m	9017	0.8cm	4.0cm	100% (9017)
	200m	9017	0.9cm	-4.2cm	100% (9017)
	250m	9017	1.2cm	-4.3cm	100% (9017)
	300m	9017	1.0cm	-4.2cm	100% (9017)

福井コンピュータ（株）のTREND-POINTを用いて図-9に示す各フライトのヒートマップを作成した。調整点を用いた場合、各フライトにおいて天端、法面部分が目標値：±5cm以内に点群データが分布していることを確認した。

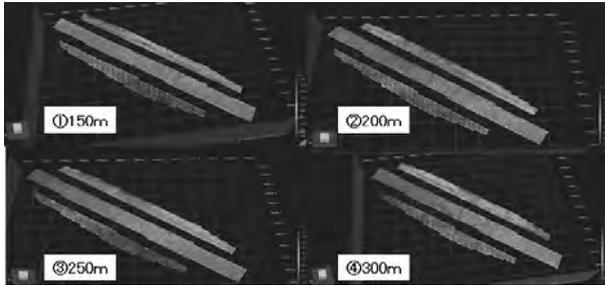


図-9 各フライトのヒートマップ

TSを用いてメッシュ測量（252点）をした結果を表-4に示す。これも上記TLSと同様な結果が得られ、調整点ありの場合では各フライトにおいて、全て目標値：±5cm以下であった。

表-4 TSメッシュデータとの較差

条件	TS距離	点群数	標準偏差	最大誤差	目標精度内率 (±5cm以内)
調整点なし	150m	296	1.1cm	7.2cm	80.2% (202)
	200m	252	0.9cm	-5.1cm	99.6% (251)
	250m	252	4.0cm	19.7cm	4.8% (12)
	300m	252	1.1cm	-10.1cm	67.1% (169)
調整点あり 1点使用 (NO.10)	150m	252	0.9cm	3.2cm	100% (252)
	200m	252	1.1cm	-4.6cm	100% (252)
	250m	252	1.4cm	4.7cm	100% (252)
	300m	252	1.4cm	-6.2cm	99.2% (250)

#### 5-4 検証点精度評価結果

検証点は、テストエリア内に16点設置し、各検証点の三次元座標の最大誤差を表-5にまとめた。調整点ありの場合は全ての検証点は目標値：±5cm以内であった。

表-5 TS検証点の最大誤差

条件	TS距離	検証点数	ΔX Max	ΔY Max	ΔZ Max
調整点なし	150m	16	-5.2cm	-4.0cm	8.8cm
	200m	16	-7.0cm	-8.4cm	-2.1cm
	250m	16	12.8cm	-4.7cm	15.8cm
	300m	16	1.9cm	3.3cm	-3.8cm
調整点あり 1点使用 (NO.10)	150m	15	-2.6cm	-1.8cm	-1.9cm
	200m	15	-3.7cm	-1.8cm	2.3cm
	250m	15	1.6cm	-1.4cm	-4.4cm
	300m	15	-1.8cm	-1.1cm	-1.6cm

#### 5-5 作業性評価

従来の写真測量とカメラ位置を直接計測する手法の作業時間を比較した結果を図-10に示す。従来の写真測量は90分、本システムのカメラ位置を直接計測する手法は25分であり、作業時間が7割程度削減できる。

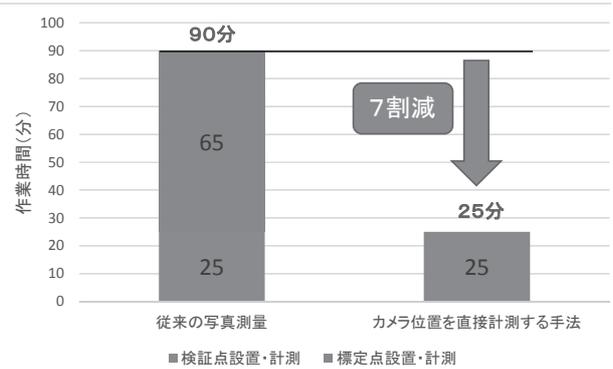


図-10 作業時間評価

## 6. おわりに

本実験の結果、本システムを用いると、TLSやTSメッシュ測量との面的な較差および検証点の最大誤差の結果は、調整点ありの場合において全て目標値：±5cm以内であることが確認できた。また作業時間は、本システムは標定点の設置・測量作業が不要になるため、7割程度削減できる。これは、UAV写真測量のメリットでもあるが、建設現場の計測範囲が広がるほど生産性向上が見込める。

本手法を用いる場合には、①自動追尾TSを精度よく設置する。②調整点は計測範囲の内側に少なくとも1点設置する。③自動追尾TSが確実にUAVを追尾できるように太陽光が入らない位置に設置することが必要である。

本システムは、i-ConstructionにおけるUAV写真測量の計測精度と生産性向上を目的として、現行製品を改良し早期に商品化を進めた。従来の写真測量に必要な標定点そのものを不要とするため、建設現場だけでなく、災害現場や河川などで有効である。さらに本手法は非GNSS環境下でのUAVの機体の制御も可能であり、将来的に橋梁などのインフラ点検に応用できると考えられる。

## 参考文献

- 1) 空中写真測量を用いた出来形管理要領（案）：  
<https://www.mlit.go.jp/common/001179704.pdf>
- 2) T. Anai, T. Sasaki, H. Otani, K. Osaragi, N. Kochi” AERIAL PHOTOGRAMMETRY PROCEDURE OPTIMIZED FOR MICRO UAV” ISPRS Volume XL-5, 2014, pp.41-46
- 3) 黒台昌弘、澤正樹、小川満、大谷仁志：造成工事の出来形・土量管理に適用する3次元計測技術の比較検討、土木学会第70回年次学術講演会第VI部門、pp.15-26、2015
- 4) 佐々木剛、深谷暢之、佐々木大輔、穴井哲治、大谷仁志：小型UAVによる空撮画像からの自動標定とモデリング、日本写真測量学会平成27年度年次学術講演会、pp.5-2、2015

## 25. ICT ブルドーザの効率的な制御検証のための ニューラルネットワークシミュレーション手法

株式会社小松製作所

○ 挟間 優佳  
大林 薫  
齋藤 芳明

### 1. はじめに

近年、建設機械に対し容易な操作性や施工の効率化が求められており、ICT (Information and Communication Technology) の普及や機能改善に期待されるが多くなってきている。ブルドーザは地形や土質によって車体挙動が変動し、この車体挙動の変化は直接ブレードに影響するため出来形の精度確保に影響することになる。例えば、車体と比較して小さく柔らかい障害物であれば完全に踏み潰して走行するだろうし、比較的大きく硬い障害物であれば踏み潰せずに車体は障害物を乗越えて通過することになる。このような車体の動きは直接ブレードに伝わるためにブルドーザの操作を難しくしている要因の1つであると言える。従来のブルドーザでは、土質や含水率等様々な作業条件への対応はオペレータの熟練操作に頼るところが多かったため、熟練オペレータの不足や技術の伝承が課題となってきた。ICT ブルドーザの実用化により、初心者オペレータでも容易に計画図面通りの施工が可能となってきた。しかしながら、その ICT ブルドーザの開発過程において制御を作り込んでいくためには、多様な土壌での実機試験が必要となる。また、様々な土壌条件を用意し実機によってテストを行うには多大な工数を要することになる。このような課題に対し、土壌から受ける力や作業による土壌形状の変化をシミュレートする土壌モデルを作成し事前に多くの土壌パターンにおいて制御検証を実施することで実機試験の効率化が期待される。

土壌から受ける力や作業による土壌形状の変化をシミュレートする土壌モデルは非線形性を有しており、土壌を組成する成分や粒度、含水率によってブルドーザの履帯と土壌との相互作用が変動するため単純に物理式によって運動を規定することは難しい。先行研究において車輪と土との相互作用を車輪下に発生する土との反力について検討した研究<sup>1)</sup>、土壌変形に関しては有限要素法を使

用した研究<sup>2)</sup>が提案されているが、これらの先行研究は車輪走行時の動特性を対象としており、履帯における走行では挙動が異なると考えられる。一方で、数値シミュレーションとして個別要素法 (Discrete Element Method, 以下 DEM) を用いた土壌挙動のシミュレーションにおける課題として、土壌の形状変化を正確に模擬するには粒子径を小さくする必要があり、それによりシミュレーションの計算に多くの時間を要してしまう<sup>3)</sup>。また土壌を弾性体として内部で発生する力と変形を簡易的にモデル化する方法がある。これによりシミュレーションの高速化が可能になるが、多様な土壌を模擬するには限界がある。そこで本稿においては土壌の挙動を実測し、統計モデルの一種である Neural Network (以下 NN) を使ってモデル化することを検討した。NN は非線形性を考慮したモデル化が可能であり、車輪の走行において NN を用いた非線形モデリングに関する研究が報告されている<sup>1), 2)</sup>。本稿では、履帯走行において NN を用いた土壌モデル化を実施しシミュレーション結果と実測値を比較することで妥当性を検証した。2章では土壌から受ける力の NN モデルおよび作業における土壌形状の変化の NN モデルについて説明し、3章ではモデルパラメータの調整、4章ではモデルの妥当性検証について述べる。

### 2. モデル

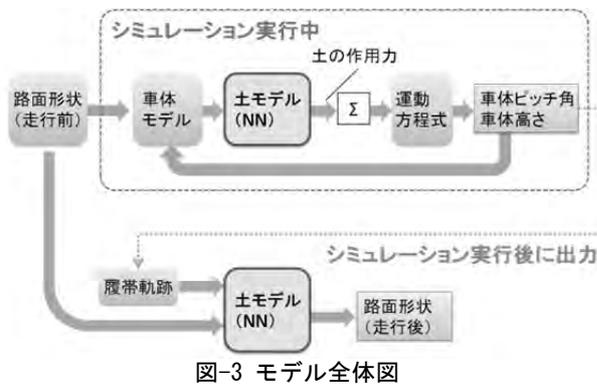
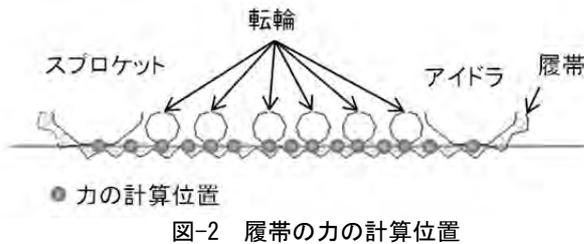
#### 2.1 シミュレーション概要

ブルドーザの車体挙動をシミュレーションで評価するにあたり、本稿ではまず図-1 に示すような二次元の車体運動および土壌を踏むことによる走行前後の路面形状変化を対象とした。



図-1 ブルドーザの車体挙動

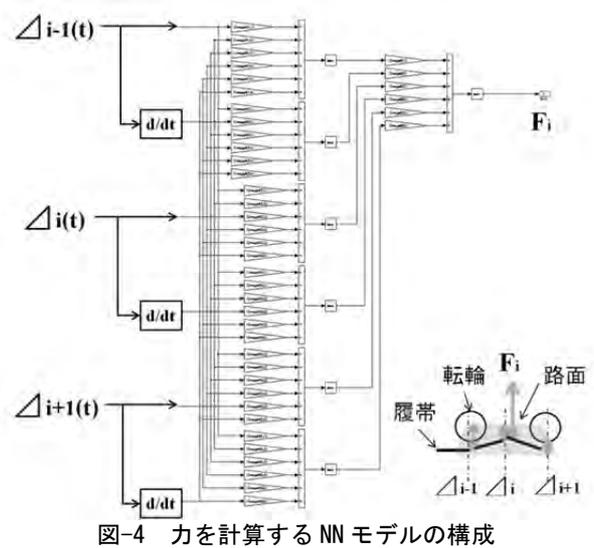
シミュレーションモデルでは車体の上下運動、ピッチ方向の回転運動を質点系の運動方程式で模擬した。車体運動の力の算出においては NN を用いた（以下、力の NN モデル）。さらに、車体挙動のシミュレーション結果から、走行前後の路面変化を NN によって再現した（以下、路面形状の NN モデル）。また、車体挙動のモデル化に関して、履帯にかかる力の計算は簡単化のため転輪と転輪の間を代表点として計算した（図-2）。以上のシミュレーションの全体図を図-3 に示す。



## 2.2 力の NN モデル

力の NN モデルは図-2 の力の計算位置にて発生する力を出力する。NN モデルの構造を図-4 に示す。入力変数は対象とする計算位置と隣り合った計算位置における履帯と路面の高さ差分  $\Delta$  とした（図-4 右下）。また、各路面高さの微分値も入力としたこれは運動の連続性を考慮するため、先行研究である NN を使用した車両挙動模擬の研究<sup>1)</sup>を踏襲した。NN モデルは 3 層構成としたが、これも NN を使用した先行研究<sup>4)</sup>では NN モデルは 3 層程度で構成されていたのを利用した。

NN モデルの入力値および出力値は 0 から 1 となるよう規格化した。6 つの入力  $x_i$  ( $i=1,2,\dots,6$ ) に重み係数  $w_{ij}$  をかけ、その合計がニューロンの入力  $y$  となる。重み係数は、その入力の寄与度を表しており、学習によって決まる値である。今回は 6 つの入力があり、最初の層 ( $j=1$ ) での計算は式(1)のとおりである。

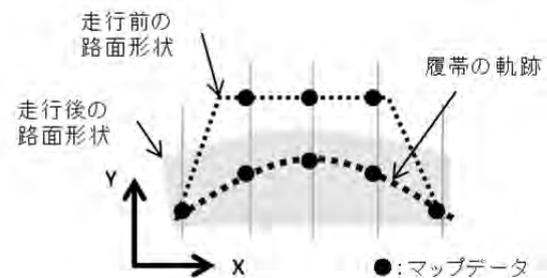


$$y = \sum_{i=1}^6 w_{i1} \cdot x_i \quad (1)$$

## 2.3 路面形状の NN モデル

車体挙動シミュレーション結果及び走行前の路面形状から、路面形状の NN モデルは走行後の路面形状を出力する。路面形状データは二次元マップ形式とした。走行前の路面形状マップとシミュレーション結果である走行後の履帯軌跡を入力変数とした（図-5）。路面形状マップは車体進行方向を X、鉛直上向きを Y とした。NN モデルはマップの各 X 点に対し、高さを算出し出力するとした。

NN モデルの構成を図-6 に示す。ここで計算位置  $X(i)$  における入力変数は、その地点での走行前路面高さ  $Y_{br}(i)$ 、車両の軌跡  $Y_{trac}(i)$ 、さらに隣り合った計算位置での車両軌跡  $Y_{trac}(i-1)$ 、 $Y_{trac}(i+1)$  とした。隣り合った計算位置を入れた理由は、履帯での走行では地形に階段のような不連続点が発生することはなく、地形の空間的な連続性を考慮したためである。路面形状を出力する NN モデルは以上 4 つのデータを入力とする 3 層のモデルとした。



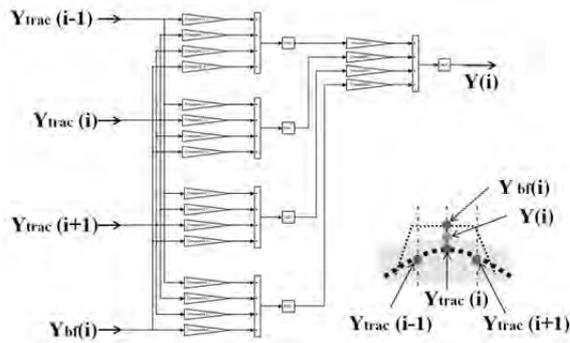


図-6 路面形状を出力する NN モデルの構成

### 3. モデルパラメータの調整

#### 3.1 計測

土台の形状変化が車体挙動に与える影響を解析するため、本研究では土台上を走行するときのブルドーザの車体ピッチ角と高さの時系列データを、土台の水準幅を変えて計測した。計測の概要を図-1に示す。両輪で十分乗り越えられる幅の土台を1つ作成し、その上を車体が時速1kmで走行し乗り越える。計測を容易にするため車速は時速1kmで一定とした。土台の高さは10cmとし、幅20cmの土台と幅40cmの2水準で計測した。車体挙動は、車体ピッチ角、高さを10ms間隔で計測した。

また、路面においては走行前と走行後の土台形状を、車体進行方向と鉛直上向きの二軸の路面形状マップとして計測した。図-7に路面形状マップ計測の方法について示す。路面形状マップは、車体の進行方向をX軸、車体の鉛直上向きをY軸にとった2軸で、履帯踏込み側の土台の端を原点とした。土台形状が変化する代表点の(X,Y)についてそれぞれメジャーを用いて計測した。1つの土台につき10点程度を計測し、その間は線形補完した。路面形状マップは1cm単位にて計測した。路面形状マップの単位精度は制御検証を行うシミュレーションの要求精度から決定した。

図-8に二種類の水準における計測結果を示す。上の図が走行前後の土台形状変化、下の図が車体挙動のデータである。このデータに対して幅を変えた土台を車体が乗り越える時のピッチ角と高さ変化を模擬する路面モデルをNNで作成し、妥当性を検証した。

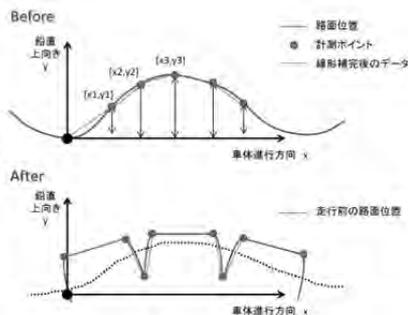


図-7 路面形状計測方法

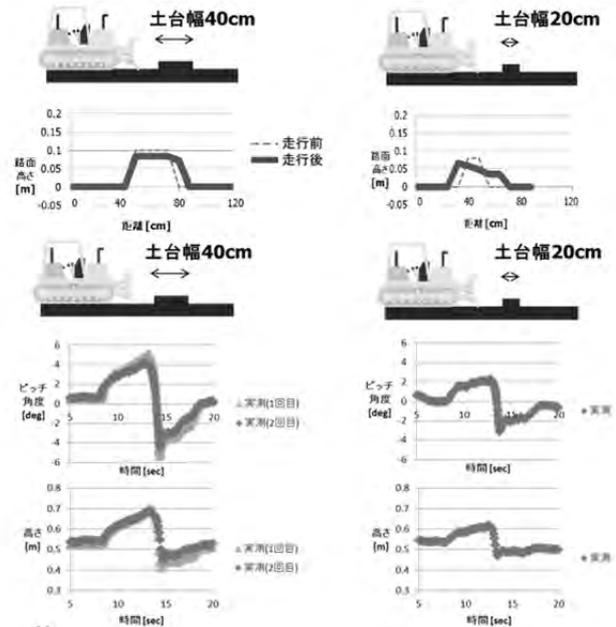


図-8 計測結果

#### 3.2 モデルパラメータ調整用データの取得

車体挙動を精度よく表現するためには路面が車両に及ぼす力を求める必要があるが、センサ等によってその力を取得するのは容易ではない。しかし本事例においては、車体が複雑な挙動を示していないためにバネマス系モデルを用いてシミュレーションを構築しそこから車両に及ぼす力を推測した。具体的にはバネ係数及びダンパ係数を調整することによって走行中の車両挙動を再現することで路面から受ける力を推定した。バネマス系モデルで再現しにくい事例では計算時間を要するがDEMを用いたシミュレーションにより今回と同様の手法で推測できると考えられる。

#### 3.3 モデルパラメータの調整方法

NNモデルにおけるパラメータ調整は、以下の学習則に基づいて行う。パラメータ調整は式(2)および式(3)で定義されている重み係数を $\delta$ 学習則によって決定する。本研究では $\delta$ 学習則の一つで一般的に使われるBackPropagation法<sup>6)</sup>を学習に用いた。BackPropagation法は出力側の差から入力側の重みを調整する方法で、式(2)から(5)を使用した。

$w_{ij}$  および  $v_{jk}$  は重み係数である。 $\alpha(x)$ 、 $\Delta$ は調整係数でありここでは固定値で0.001とした。 $f(x)$ はシグモイド関数である。

$$v_{jk}^{new} = v_{jk}^{old} - \frac{\Delta}{|X|} \sum_x \delta_{2k}(x) f(x) \quad (2)$$

$$w_{ij}^{new} = w_{ij}^{old} - \frac{\Delta}{|X|} \sum_x \delta_{1j}(x) f(x) \quad (3)$$

$$\delta_{1j}(x) = \left\{ \sum_{k=1}^l \delta_{2k}(x) v_{jk} \right\} (1 - f^2(x)) \quad (4)$$

$$\delta_{2k}(x) = \alpha(x) [f(x) - d(x)] (1 - f^2(x)) \quad (5)$$

学習の処理の流れを図-9 に示す。学習する目標出力データ及び入力データは計測データ及びバネマス系モデルのシミュレーションデータとする。履帯が土台を乗り越え始めてから乗り越え終わるまで約 10 秒あるが、学習に使うデータは 0.5 秒間隔の 20 データとした。

BackPropagation 法による学習には局所解に陥りやすいデメリットがある。40 データの各データを時系列に学習する場合、その学習順によって重み係数が偏ったデータに調整されることで局所解になる可能性がある。従って今回は 40 の各データに対して評価関数を定義し(E), その合計を評価関数 E' として、E' が小さくなるよう  $w_{ij}$  を調整した。

以上の学習を 1,000 回繰り返す、最適な  $w_{ij}$  の値を求めた。

力の NN モデルの学習において使用した路面形状データは、土台幅 40cm の時系列データと 20cm の時系列データを直列に並べた 40 個 (ID) のデータを目指出力とした。路面形状の NN モデルの学習に使用した路面形状データは、土台幅 40cm のデータと土台幅 20cm のデータでそれぞれ 10 点のマップである。これを直列に並べた合計 20 個 (ID) の学習データとした。調整係数の  $\alpha(x)$ ,  $\Delta$  はそれぞれ固定値で 0.1 とし、学習回数は 50,000 回とした。

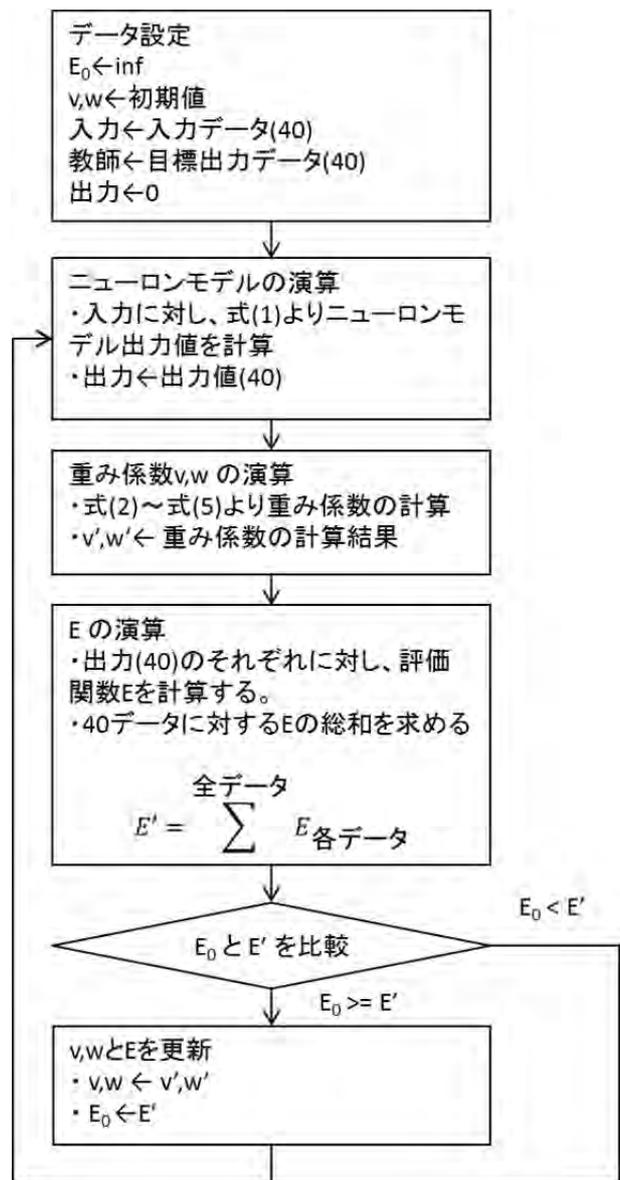


図-9 学習の処理フロー

#### 4. モデルの妥当性検証

NN モデルの妥当性検証の結果について述べる。図-10 に目標出力と NN モデルの出力を比較した結果を示す。上の図が力を出力する NN モデル、下の図が路面形状を出力する NN モデルの結果である。横軸はデータの通し番号 (ID) で、データは土台幅 40cm と土台幅 20cm の時系列データを直列につなげている。

図-10 から、全体的に NN モデルが教師信号のデータと同様の出力になっていることが分かる。しかし力の模擬において、ID8~10 付近と 33~35 付近において相違がみられる。これは先行研究<sup>1)</sup>にてデータが少ないことにより誤差が発生すると考えられており、ここでも同様の現象であると考えられる。

また、この NN モデルが車体運動のシミュレーションに適用可能であることを確認するために、

力の NN モデルと路面の NN モデルを図-3 に示したモデルに組み込み、実測と比較することで NN モデルの妥当性を検証した。車体運動モデルの出力値である車体ピッチ角と車体高さを土台幅 40cm と土台幅 20cm における実測と比較した結果を図-11 に示す。全体的に NN モデルを適用した車体運動モデルの出力値は実測データを再現できており、本研究で作成した NN モデルが車体運動のシミュレーションに適用可能であることを確認することができた。なお、教師信号として学習に利用したバネマスダンパモデルのデータを参考値として記載した。

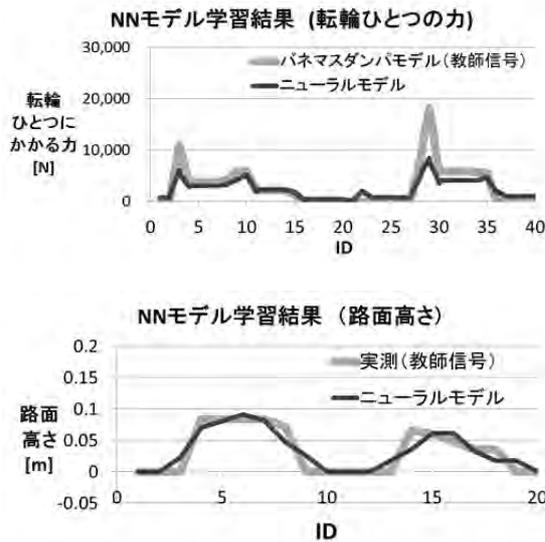


図-10 NN モデル出力の比較結果

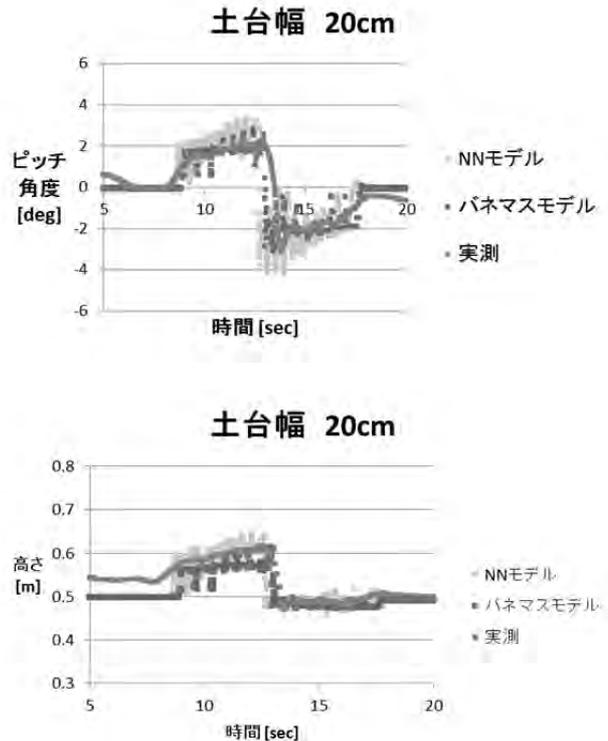
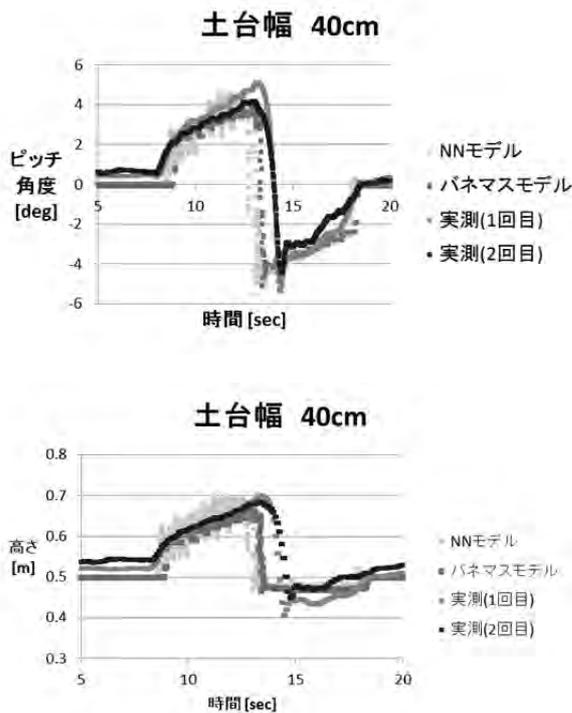


図-11 シミュレーション出力の比較結果

## 5. まとめ

ICT ブルドーザの制御開発のためのシミュレーション構築において、路面が車体に与える力および路面形状変化を模擬できる NN モデルを作成した。実測データを用いてモデルの妥当性を検証した結果、一部実測との誤差が見られたがおおむね実測値を再現できており、車体運動のシミュレーションが可能な精度のモデルであることを確認した。

今後の展開としては、今回提案した手法を他の土質および路面形状にも適用することで、様々な土壌状況下での制御検討が可能なシミュレーション環境を構築し、ばらつきの少ない制御の実現に取り組みたい。また、シミュレーションを活用することにより実機を用いるよりも短時間で制御検証を行えるため、制御開発の効率化にも貢献できると考えている。

## 参考文献

- 1) 王秀崙・田中孝・山崎稔：ラグ車輪と土との相互作用に関する研究(第3報)，農業機械学会誌，Vol.52，No.2，pp.11~18，1990
- 2) 広間達夫・太田義信・須山啓介：車輪下の土壌変形の有限要素法による解析(第2報)，農業機械学会誌，Vol.47，No.2，pp.201~209，1985
- 3) 中嶋洋・川瀬芳順・笈田昭：DEMの計算の高速化に関する検討，農業機械学会誌，Vol.66，No.Supplement，pp.291~292，2004
- 4) 野口伸・石井一暢・寺尾日出男：NNによる農用車両の

最適制御（第1報），農業機械学会誌，Vol.55，No.5，  
pp.83~92， 1993

- 5) Wanrat ABDULLAKASIM et.al. : Neural Network Modeling  
and Sensitivity Analysis of the Bulk Density Response in  
Sandy Loam Soil under Vehicle-Induced Stress, Journal of  
JSAM Vol.67, No.2, pp.77~85, 2005

- 6) 上坂吉則：ニューロコンピューティングの数学的基礎，  
pp53~58, 1993

## 26. 次世代型油圧ショベルの開発

### 情報化施工対応テクノロジーを標準搭載した SMART IRON

キャタピラー・ジャパン合同会社 ○ 白澤 博志

#### 1. はじめに

建設機械に対する排出ガス規制は段階的に強化され、当社でもそれに対応する形で油圧ショベルを始めとする製品の開発、モデルチェンジを繰り返して、サステナビリティを追求しつつユーザーズに伝えてきた。現時点、国内の排出ガス規制強化は、オフロード法 2014 基準の適合により最終段階に至った事から、建設機械メーカーは、排出ガス規制対応に縛られない、今まで以上に自由なコンセプトのもと開発できる状態にあると言える。また、国土交通省の i-Construction の推進を受け、ICT 建設機械に対する期待が非常に高まっている。

この背景を受け、当社は油圧ショベルの新モデル開発において、全ての面でデザインを一新し、ICT 機能を盛り込む事は勿論、多数の新しいシステムを採用し、ユーザーの期待を上回る Next Generation (次世代) の製品と言える 20 トンクラス油圧ショベル Cat320/323 を導入した。(図-1) これらのモデルは以下の先進機能を標準装備しており、情報化施工にも対応している。

- ・2D セミオートマシンコントロール 標準装備
- ・ペイロード計測システム 標準装備
- ・作業範囲制限機能 標準装備

本論文では 320/323 に適用された ICT システムに代表される新技術について解説する。



図-1 Cat 油圧ショベル 320

#### 2. 新コンポーネント

320/323 は、様々な ICT システム、オペレーターサポート機能が搭載されており、それを可能とする

コンポーネントが標準装備されている。(図-2)

##### 2.1 IMU (Inertial Measurement Unit: 慣性計測装置)

3 軸のジャイロと 3 方向の加速度計の機能を有するセンサをアーム側面、ブーム側面とスイングフレームに設置し、アーム・ブームの姿勢及び車体の傾斜 (ピッチ・ロール) をセンシングする。

##### 2.2 AMR センサ (Anisotropic Magneto Resistive: 磁気センサ)

アーム先端第 2 ピン部に装備されており、バケットアイドラリンクの回転角度をセンシングする事で、バケットの姿勢 (角度) をセンシングする。

##### 2.3 旋回角度センサ

上部旋回体と下部走行体の油圧ラインを接続しているスイベル部に設置し、上部旋回体の旋回角度をセンシングする。

##### 2.4 EH (Electro-Hydraulic) 制御油圧システム

先進的な油圧システムを新たに採用している。従来の油圧パイロット方式に対し、新システムでは、操作レバーの動きを電気信号としてコントローラに入力、コントローラがコントロールバルブの各スプールのシフト量を調整する電磁比例弁を制御する方式に置き換えている。優れた操作性をもたらすと同時に、自由度の高いスプール制御が可能となり、セミオートマシンコントロールの実現に大きく貢献するシステムである。また、高効率の電子制御式メインポンプも新たに採用し、燃料消費量の低減 (最大 25% 低減) に貢献している。

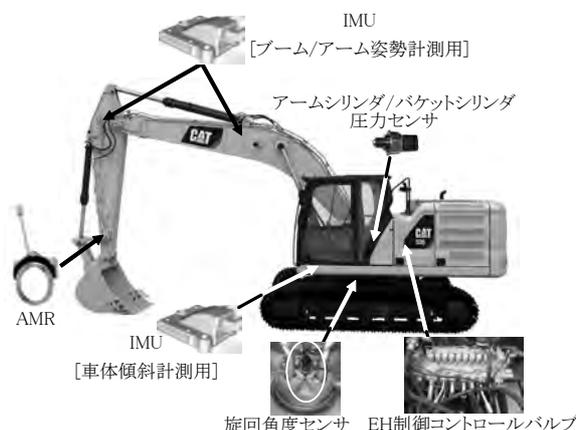


図-2 新コンポーネント

### 3. セミオートマシンコントロール

320/323は2Dセミオートマシンコントロールを標準装備している。(図-3)本機能を活用する事で作業効率が向上し、同じ施工でもサイクルタイムを45%短縮させる事も可能である。

#### 3.1 ブーム/バケット半自動制御

基準点に対して、設計施工面の深さ・勾配を車両に入力すれば、バケット刃先の設計施工面に対する距離、勾配をリアルタイムでモニタ上に示す事ができる(ガイダンス機能)だけでなく、グレードアシスト機能を利用すると、アームの動作をマニュアルで操作するだけでブームの上下の動きが自動制御され、設計通りの深さ・勾配に掘削する事ができる(マシンコントロール機能)。

また、バケットアシスト機能は、ブーム・アームを動かしても、バケットの対地角度を一定に保つ様にバケットを自動制御するもので、法面整形や水平平均しなどバケットの底面を使って作業する場合に活用すると有効である。

#### 3.2 旋回自動停止制御

トラック積込や溝掘削、ホッパへの投入作業等では、旋回操作を頻繁に繰り返す。このような作業で、旋回アシスト機能を使い、旋回を停止させたいポイントを設定すると、旋回操作レバーをフルに入れても、設定して旋回角度ポイントで、旋回が自動的に停止する。一度自動停止した後は、再度旋回操作レバーを入れると、旋回動作を継続して行えるので、作業効率にも優れており、オペレータの負荷を軽減する機能である。

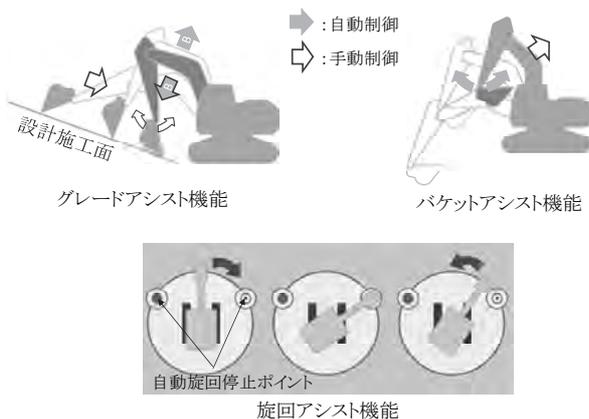


図-3 セミオートマシンコントロール機能

#### 3.3 アップグレード対応

標準装備の2Dセミオートマシンコントロールは直線的な設計施工面を対象としているが、段付きの法面・溝の掘削を対象としたCatグレード2Dアドバンスド(図-4)を工場出荷オプションとして用意している。このシステムにはコントローラ、10インチタッチパネルモニタが第二モニタとして

追加され、モニタ上で指をなぞる要領で段付きの法面などの施工設計図をキャブ内で作成(インフィールドデザイン)、その設計図通りに、セミオートマシンコントロール機能で掘削する事ができる。



図-4 Cat グレード 2D アドバンスドの機能

また3Dセミオートマシンコントロール(Catグレード3D)も工場出荷オプションとして用意しており、GPS/GLONASSアンテナと受信機、10インチタッチパネルモニタが追加され、別途入手頂く無線機と併せて利用する事で、車両の位置を把握する事が可能となり3D設計図面通りの掘削施工の対応が可能となる。(図-5)

### 4. ペイロード計測システム

バケット内の荷重を計量して、トラック積載量の管理、生産量の管理に貢献するシステムを標準装備している。

#### 4.1 トラック積込時計量機能

トラック積込作業時に、ブーム持ち上げ旋回操作中にバケット内荷重を計量し、モニタ上にトラックへの積載量を示すと同時に、予め設定した目標積載量までの残り必要なペイロードを示すガイダンス機能を有している。これにより、トラックへの過積載や過小積載を回避する事ができる。

#### 4.2 静的計量機能

ブーム上げ操作だけの場合でもバケット内荷重を計量する事ができ、ホッパ投入作業時等のバケット内ペイロード把握に利用できる。

#### 4.3 オートキャリブレーション機能

システムのキャリブレーション時にはブーム持ち上げ旋回操作が必要であるが、旋回操作だけ手動で行えば、車両がブーム持ち上げ操作を自動制御してくれるので、連動操作が必要なキャリブレーション作業を容易に行える。



図-5 ペイロード計測システムのモニタ表示画面

## 5. 作業範囲制限機能

建設現場においては、稼働する油圧ショベルの周囲に障害物や作業者が存在し、接触事故を引き起す危険性が高い。320/323 は、接触事故を回避するのに貢献する作業範囲制限機能を標準装備している。(図-6)

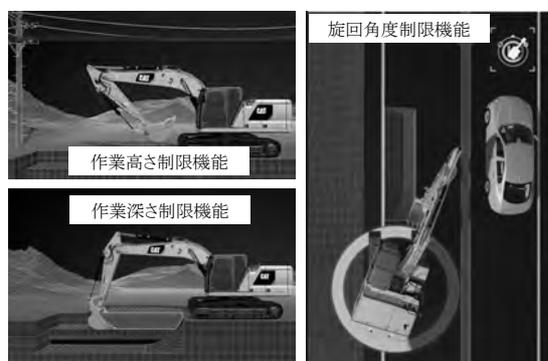


図-6 作業範囲制限機能

### 5.1 作業高さ/作業深さ/半径距離制限機能

設定した作業高さ、作業深さ、半径距離にフロントが近づくと、フロントの上昇、下降、伸ばしの動きを自動停止させる。車両上部に電線や橋梁がある、地中にガス管や水道管等の埋設物がある、車両前方に壁や建物があるなど、作業範囲の高さ方向、深さ方向、半径方向に制限を与えたい場合に有効と言える機能である。

### 5.2 旋回角度制限機能

設定した旋回角度に近づくと、旋回の動きを自動停止させる。停止ポイントは右旋回位置・左旋回位置の2点を個別に設定可能であり、車両側方に道路や壁があるなど、右旋回・左旋回の動作を制限したい場合に有効と言える機能である。

### 5.3 キャブ干渉防止機能

大型のバケットを装備する場合など、フロント姿勢によってはバケット刃先がキャブ構造物と干渉する作業範囲を有する場合に、バケットがキャブに接近すると、自動的にフロントの動きを自動停止させ、接触を回避させる機能である。装備するフロント・バケットの寸法をモニタ上で入力する事で機能を利用できる。

## 6. オペレータインターフェース

様々な機能・システムを車両に付与した事から、それらの操作をより簡単に、直感的に行えるようにオペレータインターフェースを従来モデルから一新した。(図-7)

### 6.1 タッチスクリーンモニタ

8インチのタッチスクリーンモニタが標準装備されている。モニタ上に表示されるメニュー選択画面、数値入力画面、アイコン等を指でタッチして操作する事が出来る。軍手などの手袋をはめた状態でもタッチスクリーンモニタを操作可能である。

### 6.2 ジョグダイアルスイッチ

モニタはタッチスクリーンで操作できるのに加え、操作レバーのすぐ近くに設置されているジョグダイアルスイッチでも操作が可能である。モニタまで手を伸ばさずとも、手元のジョグダイアルの回転動作・上下左右動作・クリック動作で直感的にモニタ操作が行える。

### 6.3 操作レバースイッチ

左右の操作レバーにはそれぞれ、頭頂部には親指で操作するスライダースイッチ1個とプッシュスイッチが2個、更に操作レバー前方に人差し指で操作するプッシュスイッチが2個装備されている。これらのスイッチにはそれぞれ20種類以上の様々な機能の割り振りが可能で、良く使う機能やオペレータの好みに応じて自由に設定でき、操作レバーから手を離さずに様々な機能进行操作する事ができる。



図-7 インターフェース

### 6.4 オペレータ ID

最大50件のオペレータIDを車両に登録可能であり、エンジン始動時(プッシュスタート)にそのオペレータIDをパスワードとして入力する事で、エンジンの始動が可能となるセキュリティシステムを標準装備している。また、予め登録されたキーFOBあるいは専用アプリをインストールした個人のスマートを持っていれば、Bluetooth通信で認証

され、このパスワード入力をスキップしてエンジン始動する事ができる。オペレータ ID にひもづいて、レバー操作方式の切替、操作レバースイッチの機能割り振りが、エンジン始動時に自動的に変更される機能も有しており、一台の車両に複数人のオペレータが乗車する場合に有効である。

## 7. メンテナンス・サービス性

メンテナンス間隔の拡大等でメンテナンスコストを最大 15% 低減(12,000 時間稼働時)し、メンテナンス作業の更なる容易化を図る新技術を適用している。

### 7.1 グランドレベルでの日常点検

全ての日常点検アイテムを、地上から実施する事ができる様に、エンジンオイルレベルゲージをエンジンルームだけでなく、車体右側ポンプ室内に第二エンジンオイルレベルゲージを新たにリモート設置している。

### 7.2 電動冷却ファン

従来のファンベルト駆動の冷却ファンを、モータ駆動の 5 個の電動冷却ファンに置き換えている。(図-8)それぞれの電動冷却ファンが、冷却対象のラジエータ、オイルクーラ、アフタクーラの温度に応じて、個々の電動冷却ファンは最適な回転数に制御される。ファン騒音の低減、過冷却の回避、寒冷期のエンジン始動時には回転数を最低化して暖機を促進させる事ができる。冷却ファン駆動の為にエンジン馬力消費も低減される事から、燃料消費量の低減にも貢献している。また、リバースファン機能も標準装備されており、クーリングパッケージのコアに詰まったホコリや異物を、ファンの逆回転による送風で吹き飛ばす事ができる為、エア吹きによるクーリングパッケージ清掃の手間が軽減できる。

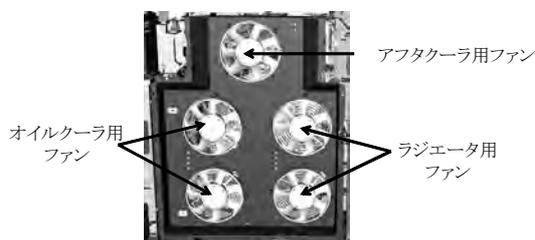


図-8 電動冷却ファン

### 7.3 プレクリーナー体型エアフィルタ

従来、プレクリーナーはエアフィルタとは別置きで、オプション扱いとしていたのに対し、新型のエアフィルタシステムは、標準でプレクリーナー体構造としている事から、エアフィルタエレメントの寿命が 2 倍に拡大している。

## 8. 安全機能

上述した作業範囲制限機能以外にも、安全性の向上に寄与する新技術が適用されている。

### 8.1 オペレータ視界/アクセスシステム

燃料タンクは、複雑な形状に成形可能な樹脂素材を採用している。柔軟なデザインが可能となった事から燃料タンクの高さを低減してオペレータの車体右側視界を向上させると同時に、燃料タンク形状を機体上面昇降用ステップも兼ねるデザインとし、車体右側センター位置から昇降する新アクセスシステムを採用している。左右にハンドレールが装備されている事もあり、確実に 3 点支持をキープできる。(図-9)



図-9 機体上面アクセスシステム

### 8.2 走行方向表示/電子水準器

足回りに対する上部旋回体の相対位置をリアルタイムでモニタ上にアニメーション表示できる事から、180° 旋回状態で起きやすい走行操作レバーの誤操作を回避できる。また、IMU により、車体のピッチ・ロール状態をセンシングし、モニタ上にピッチ角度とロール角度を表示する電子水準器を採用している。

### 8.4 360° ビューカメラシステム

カウンタウェイト部にリアビューカメラを標準装備し、後方の映像をモニタ上に表示する事で後方視界を確保している。また、オプションで用意されている 360°ビューカメラシステムは、車体周囲 360°の視界を 4 つのカメラの映像を俯瞰図状にひとつの画につなげてモニタ上に表示するものであり、一目で車体全周囲の視界を確認することができる。

## 9. 最後に

最新の 20 トンクラス油圧ショベルについて解説したが、ここでは紹介しきれない他の新しい特長も多数適用されており、Next Generation の名にふさわしい先進性を有していると自負している。本製品が建設施工分野において、飛躍的な生産性・効率向上、コスト低減、安全な作業に貢献する事を期待している。本製品は将来的なアップデートを見越したベースデザインとなっており、今後もニーズに応えられる新技術を適用、導入していく所存である。

## 27. 次世代型ビーコンを利用した 屋内作業員の可視化による現場管理システムの開発

### ーメッシュ型 Beacon による入退場および原位置把握ー

株式会社 大本組 東京本社 ○ 橘 伸一  
株式会社 大本組 東京支店 佐藤 浩郁  
株式会社 W H E R E 藤島 伸吾

#### 1. はじめに

建設業において高齢化等により技能労働者が大量に離職することが予想され、将来にわたる社会資本の品質確保と適切な機能維持を図るためには、建設業の将来を担う若者の人材確保や生産性向上技術の開発等が重要となっている。

屋内空間等における現場において原位置把握のための GPS 技術を利用できない個所ではその情報をリアルタイムに得ることは困難である。しかしながら、山岳トンネル、シールドおよび地下施設等において、入場者・資機材（以下、入場者等）の原位置把握は、生産性（施工効率）向上に重要な要素の一つである。

#### 2. 開発目的

既設構造物の再構築工事において、下記条件下にて正確な労務管理を行うことを目的とした。

- ・ 施工箇所が 4 系列に分かれ施工の進捗により目視による入場者の確認が仮設物・構造物により遮られる。進捗に伴い足場支保工により上空が遮られる
- ・ 多工種の作業員が多数入場する
- ・ 従来の入場札等では入場漏れが発生する

以上より GPS 技術に代わりビーコン技術に着目した。複数個所での作業や支保工足場等もあることから設置が容易なことが重要であり、LAN ケーブル等での接続を必要としないメッシュ型ビーコンを利用して入場者等の入退場および位置把握ができるシステムを開発し実用化を図った。

#### 3. システム概要

##### 3.1 システム構成

本システムは、作業エリア各所に次世代型ビーコン（EXBeacon）を設置し、入場者等が小型・軽量のモバイル用ビーコンを所持することにより、EXBeacon の電波が届く範囲にあればゲートウェイを通じてクラウドに自動的にデータが集約す

る。集約されたデータから入場者等の位置情報を特定し、監視モニタにて可視化する。

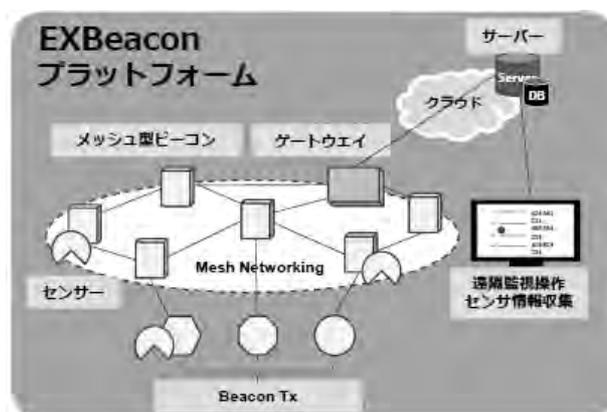


図-1 EXBeacon プラットフォーム

##### 3.2 システム機器

モバイル用ビーコンが 500ms 毎に送信した電波を EXBeacon が受信・マルチホップし、EXBeacon は ID 情報と受信電波強度をゲートウェイを介しクラウドに送信する。モバイル用ビーコンの受信電波強度からその位置を判断し、監視モニタに表示する。

- ・ 受信範囲は、電波強度が $-97\text{dB}$ 以上
- ・ 受発信機の電波強度は $\pm 10\text{dB}$ 程度の変動



図-2 受発信機電波フロー

##### (1) 次世代型ビーコン「EXBeacon」

- ①新しい消費電力通信規格である BLE(Bluetooth LE) 規格に準拠 (2.4GHz 帯)
- ②電波を発信すると同時に相互通信するメッシ

ネットワーク形成機能を搭載しているため、有線回線が不要

③柔軟なネットワークトポロジー構成により、配置・増設が安易

④電力：AC100V



写真-1 Exbeacon

(2) モバイル用ビーコン「無指向性」

①省電力型の近距離通信 (Bluetooth LE) を使用

②モバイル用ビーコンを識別する ID や、電波強度を示す識別子などを発信する装置

③仕様

・外形寸法；W:24.5 H:46 D:3.5(mm) 約 5g

・動作温度；-25～75° C

④電力：ボタン電池



写真-2 モバイル用ビーコン

(3) 監視モニタ

入場者（発注者、大本組、協力会社）別に区別し位置情報をアプリの現場内 3D マップ上に色別にプロットする。1F,2F,3F の入場者は図形で表現する。

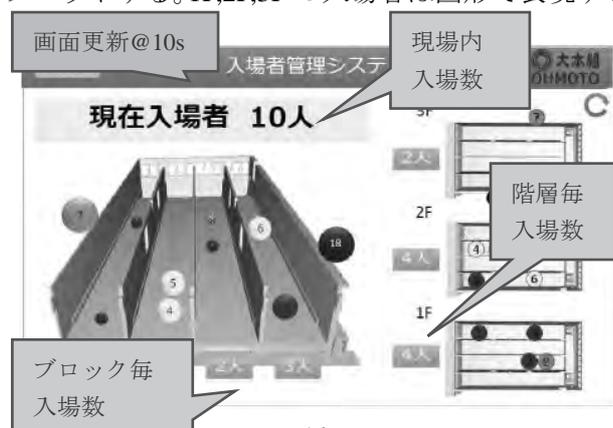


図-3 監視モニタ

・作業箇所に設置された EXBeacon がモバイル用ビーコンの電波を受信した際に、該当する場所にモバイル用ビーコンの番号を表示する。

・同時に複数の EXBeacon でモバイル用ビーコンを受信した場合、過去 1 分間のモバイル用ビーコンの受信強度の平均で、値がより大きい場所にモバイル用ビーコン番号を表示する。

・出入口に設置した EXBeacon がモバイル用ビーコンの電波を受信した際に、現在のステータスを参照し入退場となる。

## 4. 適用事例

### 4.1 現場条件およびシステム設置イメージ

本システムは、下記に示す既設構造物に設置し運用した。

・既設構造物：全長 L=60m,全幅 W=26m  
(@5m×4 ブロック),高さ H=4.5m

・モバイル用ビーコン：60 基

・EXBeacon：32 基「1F(14 基),2F(16 基),3F(4 基)」

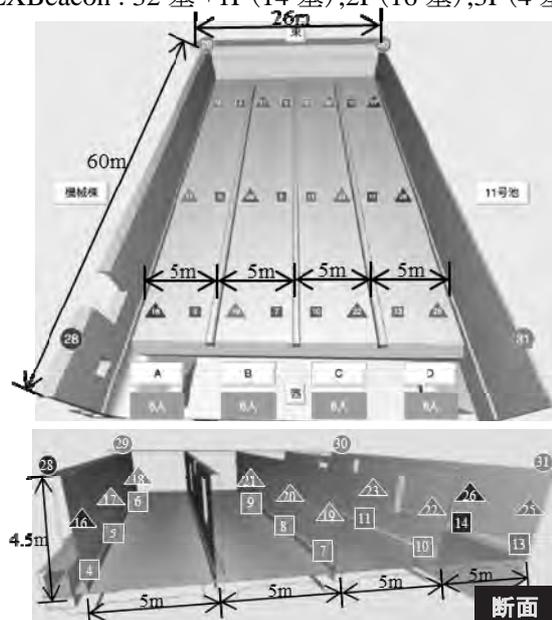


図-4 現場状況および EXBeacon 設置イメージ

### 4.2 帳票作成

入退時間等の作業員情報をデータベース化し入退記録（出勤記録）管理表を作成する。協力会社別に取り纏め CSV 出力する。

### 4.3 問題点

- ・足場支保工設置後、1F と 2F を誤検知する箇所もあったため部分的には電波遮断シート等で指向性を持たせることも必要となる。
- ・位置測位精度を高めるためには EXBeacon の設置基数を増やす必要がある。
- ・モバイル用ビーコンの電池交換が必要である。

### 4.4 導入効果

- ・入場者等の情報を俯瞰的に確認できるため、管理者からの指示等が効率的となる。
- ・EXBeacon 同士がネットワークを構築するため接続ケーブル敷設が不要である。
- ・機器の小型化,単純化により現場作業員にて設置や移動が可能である。

## 5. おわりに

閉鎖空間においておおよその位置を把握できた。今後は、山岳トンネルおよびシールドにおける入退場管理、機械・資材の搬出入および位置把握に利用する予定である。

また、安全対策として体温・脈拍等のバイタル信号を取得するセンサーと組み合わせることにより転倒や熱中症等の早期確認も可能となる。

## 28. 排出ガスの測定値から読み解く燃費・熱効率と燃費改善策

(国研)土木研究所

○ 吉永 弘志

### 1. はじめに

排出ガスの測定においては、ガスの濃度のみならず、エンジン回転数、排出ガスの流量等も測定する。また、建設機械の排出ガスを測定した文献のなかには、仕事量比および燃料の質量比の双方で排出ガス量が記載されているものがある。測定値等は異なる発想で再解析すれば新たな知見を得ることができる。本稿では、文献、および土木研究所での排出ガス測定時のデータ（以下、「排出ガス測定データ」という。）を読み解いて得られた知見を報告する。文献の解析では、油圧ショベルの平均的な熱効率 $\eta$ 、および年式が新しくなると排出ガス量が減少する相関図を示す。排出ガス測定データの再解析では、図-1の模式図のA、B、およびEの関係を利用してエンジン回転数とCO<sub>2</sub>濃度のデータから燃料消費量(以下、「燃費」という。)が計算できることを示す。さらに、燃費改善策についての考察を述べる。

### 2. 文献

#### 2.1 調査方法

建設機械に測定器を搭載して排出ガスを測定した文献をオンライン・データベース DB で検索した。DB は科学技術振興機構 (JST) の科学技術文献情報 (主として和文) の JDream III, および米 Thomson Reuters 社の Web of Science とした。また、これらの文献に記載された情報を元に web site で公開されている文献も入手した。

#### 2.2 調査結果と活用策 1-燃費と CO<sub>2</sub> の関係

##### 2.2.1 調査結果

Phill Lewis, P.E. は North Carolina State University の H. Christopher Frey が測定した<sup>1)</sup>34 台の建設機械の燃費  $x$  (liter/h) と CO<sub>2</sub> (g/h)  $y$  の関係を整

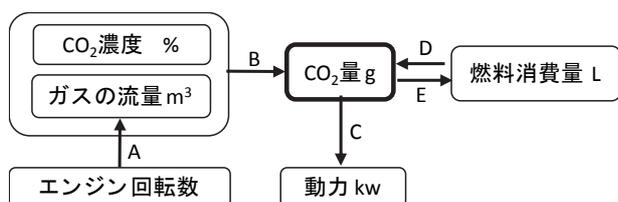


図-1 CO<sub>2</sub>等の測定値の関連の模式図。

理し、式(1)の関係が得られた旨を報告している<sup>2)</sup>。この値は環境省が公表<sup>3)</sup>している軽油の排出係数から算出した値  $2624 \times 10^3 \text{ g-CO}_2/\text{m}^3\text{-軽油}$  と整合する。さらに文献ではアイドリングによる過剰なCO<sub>2</sub>排出量の測定値についても述べている。式(2)で定義した operational efficiency  $\eta$  (ここでは「熱効率 $\eta$ 」とは異なる変数。) 過剰な燃料 additional fuel の割合  $N_E$  の関係を散布図にしており、0.32~0.97 の範囲で分布する  $\eta$  と 0~0.5 の範囲で分布する  $N_E$  の回帰式を式(3)としている。

$$y = 2638x \quad (R^2 = 0.9952) \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\text{Nonidle Time}}{\text{Nonidle Time} + \text{Idle Time}} \quad (2)$$

$$N_E = -0.41 \cdot \ln(\eta) - 0.03 \quad (R^2 = 0.85) \quad (3)$$

#### 2.2.2 活用策

自動車の燃費測定ではCO<sub>2</sub>等の測定によるカーボンバランス法も使用されている(文献例<sup>4)</sup>)。上記の文献は、建設機械についても、カーボンバランス法で燃費が測定できることの拠り所、および建設機械のアイドリングストップ機能の効果を予測する際の参考として活用できる。

#### 2.3 調査結果と活用策 2-熱効率

##### 2.3.1 調査結果

建設機械の排出ガスは国内外ともに排出ガスの質量  $M_G$  (g) と仕事量  $W$  (kwh) の比  $R_{GPW}$  (g/kwh) で規制されているが、収集した海外の文献の排出ガス量の単位は図-2 となった。エンジンのトルクは建設機械に搭載した条件では実測できないため、エンジンの制御用ユニット (ECU : Engine Control

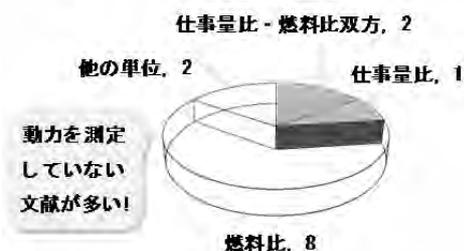


図-2 建設機械から排出されるガスの測定値の単位 (文献数)。

Unit ) の電気信号のデータを測定値とみなすことになるが、建設機械ではインターフェースが標準化されていない<sup>5)</sup>ことや企業秘密的な情報が含まれているため測定できない<sup>6)</sup>ことがある。このため仕事量比の測定数が少ないと解釈した。

ここで油圧ショベルの仕事量比の排出量 $R_{GpW}$ が

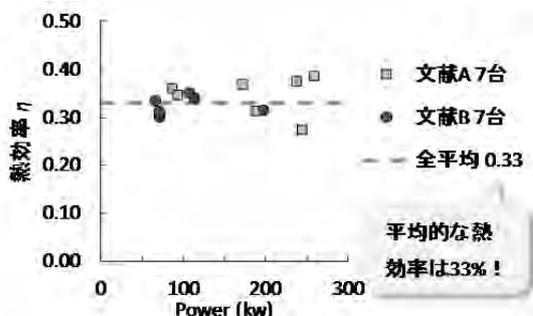


図-3 熱効率の推定値.

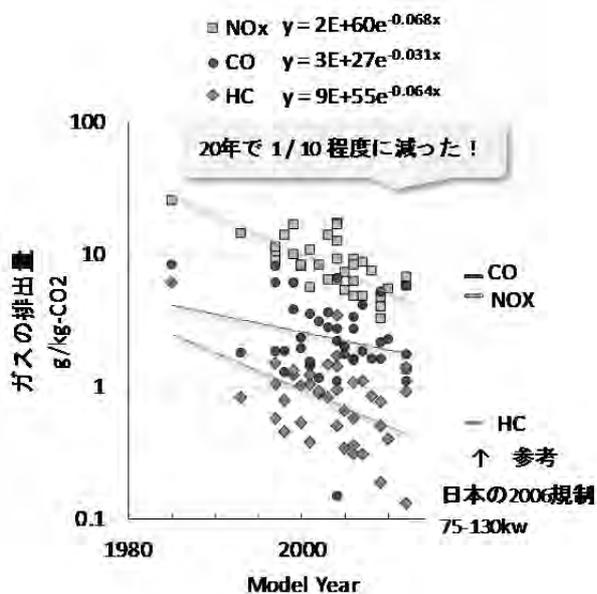


図-4 油圧ショベルの年式と排出ガス量.

表-1 測定概要.

測定時期	2015年度(10月, 1月), 2016年度(12月)	
測定場所	土木研究所構内	
建設機械	油圧ショベル, 20tクラス, DPF装着 1台	
測定項目と測定装置	測定項目	測定装置
	エンジン回転数, トルク	CAN データロガー (VECTOR, GL1000)
	排出ガス濃度	FTIR (岩田電業, FAST-2200)
	排出ガス流量	ピトー管式流量計 (2015年度は1台, 2016年度は2台)
測定対象 (ガス)	CO <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, NO, NO <sub>2</sub> , NMHC (非メタン炭化水素), NH <sub>3</sub> 他	
サンプリング周波数	5Hz (0.2秒間隔)	

記載されている3編の文献での測定値から以下の方法で熱効率 $\eta$ を算出した。まず、公表値<sup>3)</sup>等を使用して燃料比( /ガロン, /リットル)の排出量をCO<sub>2</sub>比の排出量 $R_{GpCO_2}$  (g / kg-CO<sub>2</sub>) ( $R_{GpCO_2}$ の補足説明は後述する。)に換算した。次に、 $R_{GpW}$  (g / kWh),  $R_{GpCO_2}$ , および軽油のCO<sub>2</sub>排出原単位 $m = 0.24732$  (kg/kwh) (公表値<sup>3)</sup>0.0687 kg/MJの単位

を変換した値。)と式(4)から $\eta$ を算出した。計算式の詳細は付録に示す。3編の文献のうち、1編の文献値は $\eta$ が1.0を超える等の異常値になったので除外し、他の2編の文献値<sup>7),8)</sup>から計算した14台の $\eta$ を図-3に示す。 $\eta$ の平均値は0.33となった。

$$\frac{R_{GpW}}{R_{GpCO_2}} = \frac{1}{\eta} m \quad (4)$$

補足： $R_{GpCO_2}$

$R_{GpCO_2}$ は、文献<sup>9),10),11),12)</sup>で提唱されている排ガス評価量である。計算式の詳細は付録に示す。熱効率の優劣が反映できない点で $R_{GpW}$ に劣る。しかし、 $R_{GpW}$ で使用するECUのトルク値は実測値ではなく室内試験値に基づく自己申告的な推計値であるのに対して、 $R_{GpCO_2}$ で使用する測定値は全て後付けの測定装置で実測できる。さらに、測定が簡素化できて誤差が小さいこと<sup>12)</sup>、および2.3のように燃料比( /ガロン, /リットル)等で測定した測定値を活用することで非常に優れていると考えている。

### 2.3.2 活用策

$\eta$ を仮定して式(4)にあてはめることで、 $R_{GpCO_2}$  (g / kg-CO<sub>2</sub>)と $R_{GpW}$  (g / kWh)の換算ができる。油圧ショベルの排出ガスの測定値が仕事量比( /kwh, /hp), または燃料比( /ガロン, /リットル)で記載されている8編の文献の測定値(45台)を全てCO<sub>2</sub>比( /kg-CO<sub>2</sub>)に換算し、年式の関係で散布図にした(図-4)。右端には日本の75-130kwクラスの2006規制値を2.2の方法で換算した値を併記している。油圧ショベルが排出するNO<sub>x</sub>, CO, HCはおおむね20年間で1/10に抑制されたと解釈できる。

## 3. 排出ガス測定データ

土木研究所が2015年度に測定した排出ガス量については既に報告している<sup>12),13)</sup>。2016年度の排出ガス量についても別途報告する予定である。本稿ではCO<sub>2</sub>の測定値で簡易に燃費が計算できることを示すとともにその活用策について述べる。

### 3.1 測定方法

測定の概要を表-1および図-5に示す。ディーゼル微粒子捕集フィルター (DPF: Diesel Particulate Filter) を搭載した20tクラスの油圧ショベルに測定装置を設置し、表-2に示す「待機」、「走行」、「ならし(模擬動作)」、「掘削(実作業)」、および「掘削積込(模擬動作)」の動作を行って排出ガスの流

量と濃度を連続測定した。2015年度の測

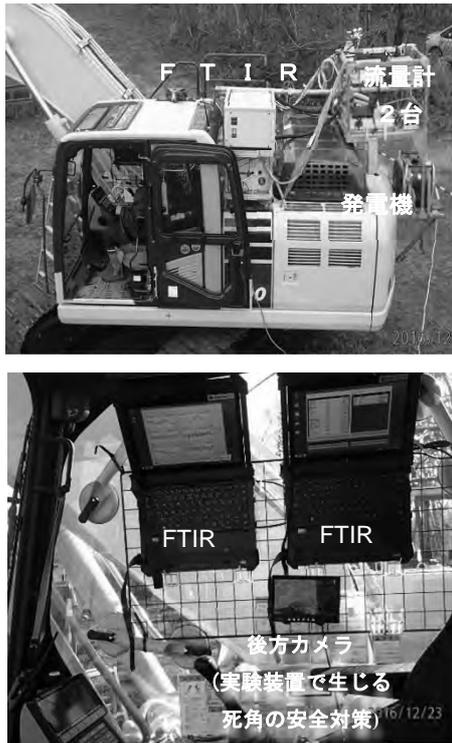
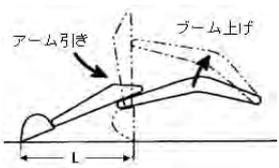


図-5 油圧ショベルに搭載した測定装置.

表-2 測定時の動作.

動作	内容
待機	アイドリング / 5分 (異なる時間の測定有)
走行	片道 25mの区間往復/3 サイクル
ならし (模擬)	 <p>アーム, およびバケットが一直線になる状態を開始姿勢とし, L=4.5m の範囲で水平引き ( JCMAS H 020:2014 引用 )</p>
掘削 (実作業)	掘削, 45度の旋回, およびバケットダンプ /5 サイクル
掘削積込 (模擬)	 <p>開始姿勢, 水平引き, バケット掘削, ブーム上げを伴う 90度の旋回, およびバケットダンプ /5 サイクル (異なる時間の測定有) ( JCMAS H 020:20142 引用 ) ( 開始姿勢はアーム, およびバケットが一直線 )</p>

定数は, 測定時期, オペレータ, および運転モードの条件を 2 期 (10 月と 1 月), 3 人, および 2 種類 (パワー優先と燃費優先) の組み合わせとした約 30~40 分間の測定が合計で 12 回 (2×3×2) となった。2016 年度は, 運転モード, アクセル開

度, 動作の緩慢, 測定回数, コールドスタート

表-3 燃費測定方法の比較.

測定項目	測定方法		
	一般的な方法	カーボンバランス法	本稿が提案する簡易な燃費測定法
燃料の流量	○		
ガスの流量	実測		○
	エンジン回転数から推定		○
ガスの濃度	CO <sub>2</sub>	○	○
	CO, THC		○

(○: 測定)

(エンジン冷却水の温度) 等を変化させた各種の測定を 15 種類行った。

### 3.2 CO<sub>2</sub>の測定値に基づく燃費計算

3.1 の測定では燃料の流量を測定していない。しかし, 2. で述べたように測定した CO<sub>2</sub> の質量  $M_{CO_2}$  g と軽油の排出係数  $2624 \times 10^3$  g-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>・軽油 から軽油の燃費  $V_{oil}$  m<sup>3</sup> を算出することができる (式 (5))。  $M_{CO_2}$  は, 排出ガスの流量  $v$  と CO<sub>2</sub> の濃度の測定値から計算できる (付録)。本節では,  $v$  をエンジン回転数から推定すること (図-1 の A) による簡易な燃費測定法と活用案について述べる。

$$V_{oil} = \frac{M_{CO_2}}{2624 \times 10^3} \quad (5)$$

#### 3.2.1 簡易な燃費測定法

表-3 は燃費の測定方法について燃料の流量を測定する方法, カーボンバランス法, および本稿で提案する簡易な燃費測定法を比較したものである。燃料の流量を後付けの装置で直接測定するには配管の加工が必要になる。CO<sub>2</sub> 等と燃費には図-1 の模式図の関連があるので CO<sub>2</sub> 等を測定すれば燃費を測定できる。カーボンバランス法では燃料の流量測定を排出ガス流量の測定に代替するが, 排出ガスの流量の測定で排気管の加工が必要になる。本稿の簡便法ではこれをエンジン回転数で代替する (図-1 の A)。排出ガスの流量  $v_p$  の計算式は付録の式 (付.6) に示す。  $v_p$  は過給を考慮しないことで過小, 排気再循環 (EGR: Exhaust Gas Recirculation) と体積効率を考慮しないことで過大となる。エンジン回転数の測定方法は, ECU の信号, 光学センサー, オルタネータの漏れ磁束, および音等の測定方法のなかから選択できる。また, 精緻なカーボンバランス法では CO<sub>2</sub> 以外の炭素化合物の CO, および THC (非メタン炭化水素) の測定値を要するが, 図-4 に示すようにこれらは CO<sub>2</sub> 比で 0.1% 程度なので簡便法では測定を省略する。

図-6 は「エンジン回転数から推定した流量  $v_p$  に基

づく燃費 $V_{oil,P}$ 」と「実測した流量に基づく燃費

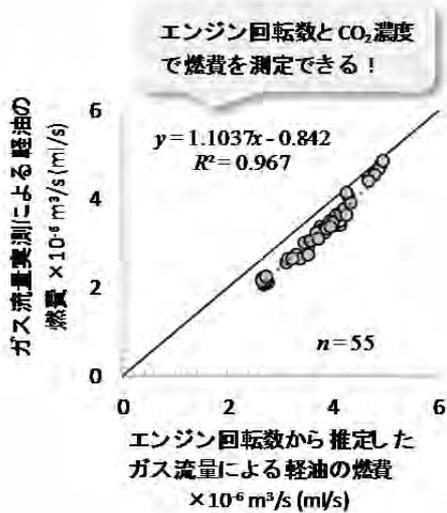


図-6 ガス流量推定の燃費とガス流量実測の燃費.

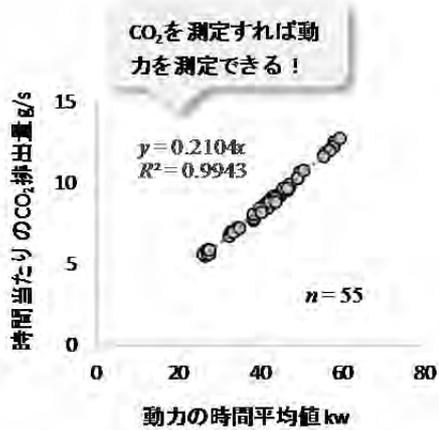


図-7 動力とCO<sub>2</sub>排出量の測定値.

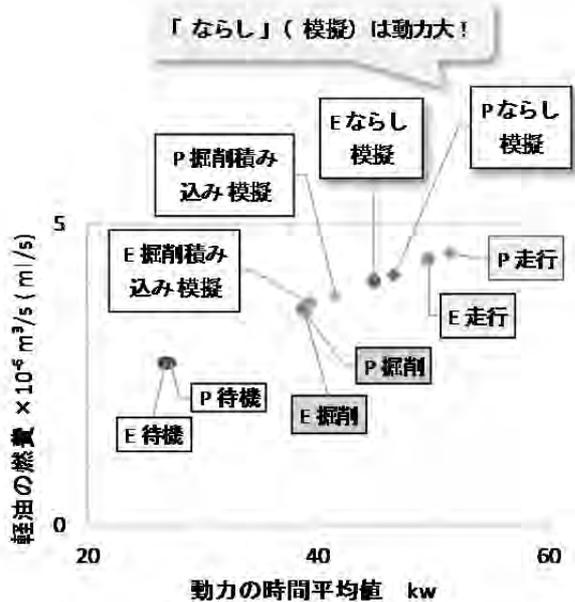


図-8 動作別の動力と燃費の測定値.

$V_{oil,M}$ 」の関係を図示したものである。軽油の燃費の単位 $\times 10^{-6} m^3$ は、 $\times 10^{-3} l$  (リットル)、および ml (ミリリットル) に相当する。図-6 の回帰式で  $V_{oil,P}$  を  $V_{oil,M}$  に換算できる。

なお、流量計による測定値は流量が少ない条件では過少になることや、条件によっては台上試験装置より 20%程度低い値になることも報告されており(文献例<sup>14</sup>)、必ずしも  $V_{oil,M}$  が  $V_{oil,P}$  よりも真値に近いとは限らない。

### 補足：動力

図-7 は時間平均した動力と時間当たりの CO<sub>2</sub> 排出量の関係を整理したものである。動力 (kw) は、ECU のエンジン回転数とトルク (比例値)、および熱効率  $\eta = 0.33$  から計算した。CO<sub>2</sub> の排出量は濃度と流量の測定値から算出した。図-6 での相関が良好であることから、以下の解釈ができる。

- ・ ECU の出力に基づく熱効率が動作の内容によらずほぼ一定。
- ・ 動力の多寡を CO<sub>2</sub> の多寡で判断できる(図-1 の C)。

### 3.2.2 活用例 1-動作の種類と燃費

図-8 は図-7 を動作別に整理し横軸を動力、縦軸をエンジン回転数から算出した流量で計算した燃費としたものである (P は 5 データの平均, E は 6 データの平均)。動力、および燃費は大きい順に走行、ならし (模擬)、掘削積込 (模擬)、掘削、待機となり、パワーモードがエコモードより大きい傾向も把握できる。地面に触れることのない「ならし (模擬)」が「掘削」よりも動力が大きくなったのは予想外であった。要因として、動作のスピードが比較的早く、運動エネルギー(速度の 2 乗に比例)が大きいことが考えられる。このことから、以下を予測する。

- ・ 過度な速度の抑制や速度の速い動作に着目したエネルギーの回生は燃費改善の効果が大きい。
- ・ 大きな力の低速作業は、小さな力の高速作業よりも燃料消費が少ない。

なお、この実験とは無関係であるが、図-9 は土工用機械の経費の算出に使用する損料表<sup>15</sup>)に記載

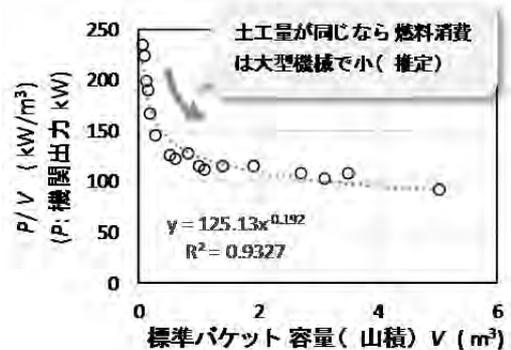


図-9 バックホウの大きさと土量比の動力.

されていたバックホウ（油圧ショベル）について、横軸をバケット山積容量  $V \text{ m}^3$ （ここでの  $V$  は排出ガス流量  $V$  とは異なる。）、縦軸を機関出力  $P \text{ kW}$  と  $V$  の比  $P/V$  としてプロットしたものである。この文献では仕事量あたりの燃費  $L/\text{kwh}$  は機械の大きさによらない一定値が記載されているので、縦軸は土量比の燃費に比例するとみなせる。このデータからは大きい機械を使用して掘削回数を減らせば燃費消費が少なくなると推定できる。

### 3.2.3 活用例 2-燃費の詳細分析

図-10 は試行的に一人のオペレータで運転の緩慢を「乱暴」,「普通」, および「穏やか」に変化させた際の測定値である。動作は「掘削積込（模擬）」, および「掘削」を異なる場所で行ったが、測定値は一連の動作とみなして合算した。燃費は「実測した流量に基づく燃費  $V_{\text{oil,M}}$ 」と「エンジン回転数から推定した流量に基づく燃費  $V_{\text{oil,P}}$  を図-6 の回帰式で補正したもの」を併記した。動力の時間平均値（左上）は大きい順に「乱暴」,「普通」,「穏やか」となり毎秒(1/s)の燃費（左下）も同じ傾向になった。動作に要した時間（右上）は大きい順に「穏やか」,「乱暴」,「普通」となった。燃費（右下）も同じ順になった。簡易な燃費測定法は燃費の詳細な分析に使用できることが確認できた。

なお、この測定は試行的な一例であり、個人差など条件により異なる結果となる可能性もある。また、「穏やかな操作」は時間を要し燃費も大きいが、1回あたりの土量 ( $\text{m}^3$ ) を大きくできる可能性があること、騒音・振動が抑制されること、安全確認のための心理的なゆとりを確保できること等も考えられるので「穏やかな操作」が劣ると短絡的に解釈されるのは本意ではない。

## 4. まとめと展望

### 4.1 まとめ

排出ガス測定にかかる海外の文献を調査し、以下のことがわかった。

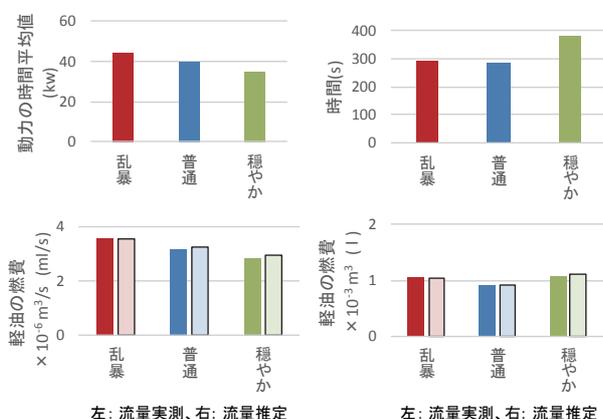


図-10 動作方法別の測定値の一例.

◆建設機械の燃費は  $\text{CO}_2$  の測定によるカーボンバランス法で測定できる。 $\text{CO}_2$  以外の炭素化合物を考慮しないことによる誤差は 0.1 % 程度。

◆現行規制の排出ガスの単位は、仕事量あたりの排出量 ( $\text{g}/\text{kwh}$ ) であるが、この単位で適切に測定されたと解釈できた論文の割合は 13 編のうち 2 編と低かった。この要因はエンジントルクの測定が困難であることに起因すると推定した。

◆2 編の論文に基づいて油圧ショベル 14 台の熱効率  $\eta$  を推定した。平均値は 33% であった。

◆ $\eta$  を仮定することで仕事量比の排出量  $R_{\text{GpW}}$  ( $\text{g}/\text{kwh}$ ) と  $\text{CO}_2$  比の排出量  $R_{\text{GpCO}_2}$  ( $\text{g}/\text{kg-CO}_2$ ) の換算ができる。

◆油圧ショベルが排出する  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ , および  $\text{HC}$  はおおむね 20 年間で 1/10 に抑制されたと解した。

土木研究所で測定した排出ガスのデータを分析して以下のことがわかった。

◆エンジン回転数と  $\text{CO}_2$  濃度による簡易な燃費測定法を提案した。この方法での測定値は、実測したガス流量に基づく燃費に直線回帰 ( $R^2=0.97$ ) で補正できることを確認した。

◆熱効率 (ECU のデータからの計算値) は、動作の内容によらずほぼ一定。

◆動力 (ECU のデータからの計算値) と  $\text{CO}_2$  の直線回帰の決定係数  $R^2$  は 0.99 なので  $\text{CO}_2$  で動力の多寡を判断できる。

◆簡易な燃費測定法を活用し、動作の種別ごとに動力・燃費を計算した。地面に触れることのない「ならし」の模擬動作時の動力・燃費が他と比較して大きいことから、速度の速い動作は燃費が大きいと解釈し、以下を予測した。

- ・過度な速度の抑制や速度の速い動作に着目したエネルギーの回生は燃費改善の効果が大きい。
- ・大きな力の低速作業は、小さな力の高速作業よりも燃料消費が少ない。

◆簡易な燃費測定法は、操作方法が「乱暴」,「普通」, および「穏やか」と異なることによる燃費の違い等、燃費の詳細な分析に使用できることを確認した。

### 4.2 展望

$\text{CO}_2$  のみならず、土量 ( $\text{m}^3$ )・騒音・振動等の測定を追加し、機械の大きさ、バケット容量、操作の速度・丁寧さ、1 回当たりの掘削量、およびオペレータの個人差等を変数とした解析を行うことで施工時間、燃費、安全・環境、個人差等を総合的に評価した最適な施工方法を見出すことも可能になると考えている。既に実務担当者は経験的に実践している可能性も高い。数値で明確になることの波及効果は大きいと考えている。

付録 計算式

計算式	番号	記号
$R_{GpW} = M_G / W$	(付. 1)	$R_{GpW}$ : 仕事量比の排出量 ( g / kwh ), $M_G$ : 排出ガスの質量 ( g ), $W$ : 仕事量 ( kwh )
$M_G = \int \frac{C_G \rho_G V}{1,000,000} dt$	(付. 2)	$C_G$ : 排出ガスの濃度 ( ppm ), $\rho_G$ : 排出ガスの密度 ( g / m <sup>3</sup> ), $V$ : 排出ガスの流量 ( m <sup>3</sup> / s )
$W = \int \frac{2\pi R_E T_E}{1000 \cdot 3600} dt$	(付. 3)	$R_E$ : エンジン回転数 ( / s ), $T_E$ : トルク ( N・m )
$R_{GpCO_2} = M_G / M_{CO_2}$	(付. 4)	$R_{GpCO_2}$ : CO <sub>2</sub> 質量比の排出量 ( g / kg-CO <sub>2</sub> ), $M_{CO_2}$ : CO <sub>2</sub> の量 ( kg )
$k = \frac{R_{GpW}}{R_{GpCO_2}} = \frac{M_{CO_2}}{W} = \frac{1}{\eta} m$	(付. 5)	$k$ : 仕事量比の排出量と CO <sub>2</sub> 比の排出量の比, $\eta$ : エンジンの熱効率, $m$ : 軽油の CO <sub>2</sub> 排出原単位 ( kg/kwh ). 0.0687 kg/MJ ( 環境省 web site 掲載値 <sup>3)</sup> ) を採択して単位を変換すれば, $m = 0.24732$ kg/kwh.
$V_{oil} = \frac{M_{CO_2}}{2624 \times 10^3}$	(5)	$V_{oil}$ : 軽油の燃料消費量 m <sup>3</sup> . 軽油の排出係数 2624 × 10 <sup>3</sup> g-CO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup> 軽油は環境省 web site 掲載値 <sup>3)</sup> に基づいて算出した.
$V_P = R_E \frac{D}{2} r_G$	(付. 6)	$V_P$ : エンジン回転数から推定した排出ガスの流量の概算値 ( m <sup>3</sup> / s ). 2回転で排気量に相当するガスが排出されると仮定, $D$ : エンジンの排気量 ( m <sup>3</sup> ), $r_G$ : 排気と吸気の体積比 ( 同一温度に換算 ). 注) この推定値は過給を考慮しないことで過小, 排気再循環 ( EGR: Exhaust Gas Recirculation ) と体積効率を考慮しないことで過大となる.
$r_G = 1 / ( 1 - r_F \frac{C_{CO_2}}{1,000,000} )$	(付. 7)	$r_F$ : 軽油の燃焼での体積増加率. 軽油成分 C <sub>14</sub> H <sub>30</sub> , C <sub>15</sub> H <sub>32</sub> , C <sub>16</sub> H <sub>34</sub> のうち中央値的な C <sub>15</sub> H <sub>32</sub> の燃焼式 C <sub>15</sub> H <sub>32</sub> +23O <sub>2</sub> =15CO <sub>2</sub> +16H <sub>2</sub> O を仮定すると $r_F = (-23 + 15 + 16) / 15$ .
$r_G = 1$	(付. 8)	CO <sub>2</sub> の濃度の上限は約15%, 平均的には5%程度なので, $r_G$ は最大で約1.09, 平均で1.03程度になるが, 排気再循環EGRを考慮しないラフさとは不釣り合いなことから本論文の解析では $r_G = 1$ とした.

参考文献

- |  |   |
|--|---|
| <p>1) Frey, H. C., Rasdorf, W., and Lewis, P.: Results of a comprehensive field study of fuel use and emissions of nonroad diesel construction equipment, Transport Research Record 158, Transportation Research Board, 2010.</p> <p>2) Lewis, P; Leming, M; Rasdorf, W: Impact of Engine Idling on Fuel Use and CO2 Emissions of Nonroad Diesel Construction Equipment, JOURNAL OF MANAGEMENT IN ENGINEERING, vol.28, no.1, pp.31-38, 2012.</p> <p>3) 環境省: 事業者からの温室効果ガス排出量算定方法ガイドライン (試案ver1.6) , 環境省web site.</p> <p>4) 独立行政法人自動車技術総合機構審査事務規程: Test Requirements and Instructions for Automobile Standards (TRIAS) 99-005-01 燃料消費率試験 (10・15 モード)</p> <p>5) Abolhasani Saeed, Frey H. Christopher, Kim Kangwook, Rasdorf William, Lewis Phil, Pang Shih-Hao: Real-world in-use activity, fuel use, and emissions for nonroad construction vehicles: A case study for excavators, JOURNAL OF THE AIR &amp; WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION, vol.58, no.8, pp.1033-1046, 2008.</p> <p>6) Heidari Bardia, Marr Linsey C.: Real-time emissions from construction equipment compared with model predictions, JOURNAL OF THE AIR &amp; WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION, vol.65, no.2, pp.115-125, 2015.</p> <p>7) U.S. Environmental Protection Agency, Populations, Activi-ty and Emissions of Diesel Nonroad Equipment in</p> | <p>EPA Re-gion 7, 2010.</p> <p>8) Cao, T; Durbin, TD; Russell, RL; Cocker, DR; Scora, G; Maldonado, H; Johnson, KC: Evaluations of in-use emission factors from off-road construction equipment, ATMOSPHERIC ENVIRONMENT, vol.147, pp.234-245, 2016.</p> <p>9) 山本敏朗, 堤玲子, 岩田恒夫, 小川恭弘, 加藤裕: 尿素SCRシステム搭載貨物車の路上走行時におけるNOx, NH3およびN2Oの排出挙動, 公益社団法人 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.68-13, 2013.</p> <p>10) 山本敏朗: センサベースのポータブル排出ガス計測器による車載計測, ENGINE REVIEW, Vo1.5, No.3, 2015.</p> <p>11) 山本敏朗, 堤玲子, 水嶋教文, 渡辺敬太郎: NOxセンサベースの車載計測器による路上走行時における重量貨物車のNOx排出量評価, 自動車技術会論文集, Vol.46, No.5, 2015.</p> <p>12) 吉永弘志, 野村正之: 油圧ショベルが各種の動作で排出する温室効果ガスおよび窒素酸化物の測定, 平成28年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.109-114, 2016.11.</p> <p>13) 野村正之: 建設機械における稼働時の温室効果ガスの検討, 建設機械2016.5, pp.63-69, 2016.5.</p> <p>14) 公益社団法人 自動車技術会 [GIAフォーラム] Real Worldエミッション低減に向けた車載排ガス計測: PEMSの最新動向. pp.17, 2017.</p> <p>15) 一般社団法人 日本建設機械施工協会 平成28年度建設機械等損料表.</p> |
|--|---|

## 29. 油圧システムとハイブリッドシステムを 統合制御したハイブリッド油圧ショベルの開発

日立建機株式会社

○ 太田 泰典

### 1. はじめに

自動車業界においては、ハイブリッド技術は特別なものではなく、低燃費に対する要求は至極当然のこととなっている。建設機械業界においても、低燃費への要求は高まっているが、油圧ショベルとしての操作性や作業性能が優先される傾向があり、自動車業界とはその特徴が異なる。

当社においては、操作性を重要視して製品展開を進めてきており、ハイブリッド油圧ショベルもその方針は同様である。

最新の排出ガス規制である、オフロード法 2014 年基準に適合する当社のハイブリッド油圧ショベル『ZH200-6』(図-1)には、より高いレベルの燃費性能を実現するため、ハイブリッドシステムと油圧システムを統合制御する『TRIAS-HX II システム』(図-2)を搭載した。

本システムは、アシスト発電モータを一体化したハイブリッドエンジンやリチウムイオンバッテリー等で構成されたハイブリッドシステムと、電子制御を含む油圧回路の改良等で効率を向上させた油圧システムを高度に融合させ、車体性能を最大限に引き出すよう、これらを統合制御している。

本論文では、ハイブリッドシステムと油圧システムの統合制御の機能と特徴について報告する。



図-1 ZH200-6

### 2. 車体システム

#### 2.1 車体システム構成

車体システム (TRIAS-HX II システム) を、図-2 を用いて説明する。

アシスト発電モータとエンジンを一体化構造としたハイブリッドエンジン (図-3) を用い、油圧ショベル特有の急峻な負荷変動に対し、応答性の良いアシスト発電モータの特長を生かしながら、燃料消費を低減するよう、エンジンとアシスト発電モータを協調制御し、油圧ポンプへ動力を供給する。

リチウムイオンバッテリー (図-4) は、PCU (Power Control Unit) を介して、電動モータを駆動するのに用いられ、リチウムイオンバッテリーの充電量 (SOC : State of Charge) が適正範囲を保つよう、主にアシスト発電モータによって充電される。

旋回装置は、従来と同様、油圧電動複合体とし、旋回電動モータのトルクを増加させることで、電動モータによる旋回加速時の旋回アシスト量や旋回減速時のエネルギー回収量を強化している。

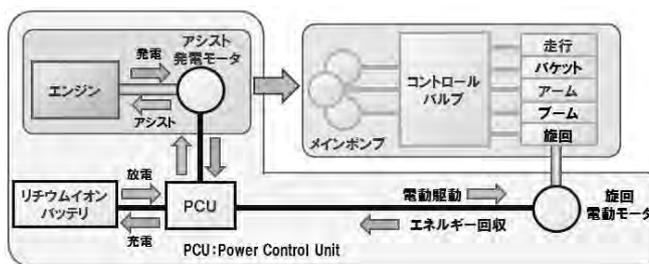


図-2 TRIAS-HX II システム



図-3 ハイブリッドエンジン

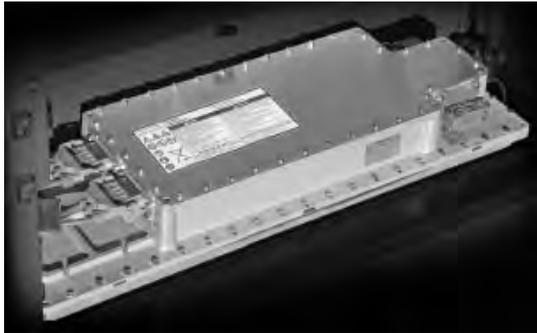


図-4 リチウムイオンバッテリー

油圧システムは、車体センサ情報と電磁弁でエネルギーロスを低減するよう電子制御し、低燃費と操作性を両立する。

## 2.2 制御システム

複雑化・大規模化する本システムの開発においては、システム構造を適正化するよう検討した。

制御システムの構造を図-5 に示す。標準機と共通機能部とハイブリッド拡張部で機能分割し、動作計画層、車体動作決定層、認識・制御層の3つの階層構造で構成した。

動作計画層では、操作レバー情報等により、オペレータ操作を解釈し、車体動作の制限範囲内で目標動作を決定する。車体動作決定層では、機器動作の制限範囲内で、システムが安定稼働するように調停を行い、動作計画層で決定された目標動作を、機器ごとの目標動作に分配する。認識・制御層では、故障回避のため機器状態を取得し、機器動作の制限範囲を決定する。また、車体動作決定層に基づき、機器動作の制限範囲内で目標動作を実現する。

このように、中間層の車体動作決定層において、オペレータからの操作情報と複数の機器の状態情報を含めた調停を実施し、車体性能を最大限に引き出すよう、油圧システムとハイブリッドシステムを統合制御している。

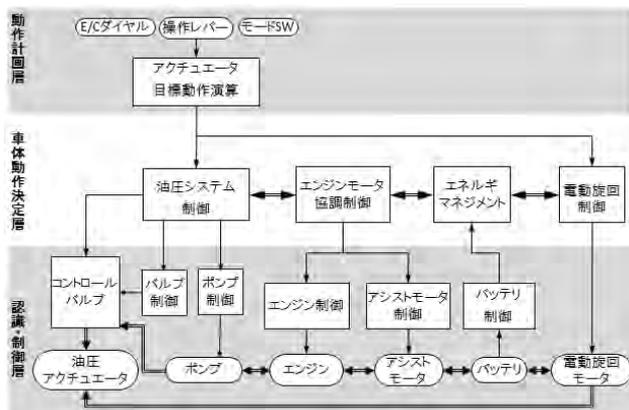


図-5 制御システム

## 3. 主要制御の機能と構成

### 3.1 エンジン制御

最新のオフロード法（2014年基準）に対応するため、排ガス後処理装置として、尿素SCR（選択触媒還元：Selective Catalytic Reduction）システムを採用している機種が多い。しかしながら、尿素SCRシステムには還元剤として尿素水を定期的に補給する必要があり、ユーザにとって手間のかかる作業となる。

ZH200-6では、排ガス後処理装置として尿素SCRを採用せず、従来機と同様、マフラーフィルタ（DOC：Diesel Oxidation CatalystとDPF：Diesel Particulate Filterで構成）を採用し、ターボやEGRシステムを改良することで、排出ガス規制に適合させている。

EGRシステムを図-6に示す。通常のエGR（High Pressure Loop-EGR）に加え、DPF後段からターボ入口に排気を再循環する独自のLPL-EGR（Low Pressure Loop-EGR）を追加している。排出ガスの一部を冷却して吸入空気に戻すEGRシステムを強化することで、燃焼効率を向上すると同時に、燃焼温度を抑制できるため、低燃費とNOx（窒素酸化物）低減を両立させている。

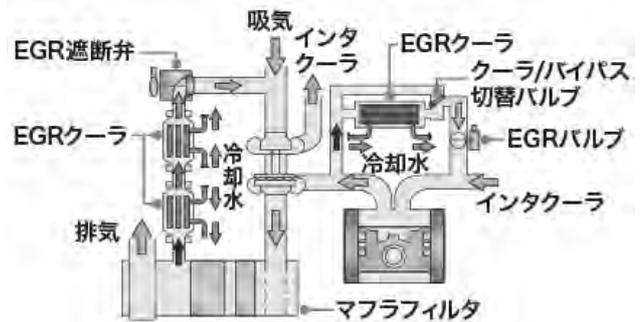


図-6 EGR システム

また、PM（粒子状物質）は従来と同様DPFで捕集し、DOC内で燃料を酸化させ、DOCおよびDPF温度を上昇させることで、堆積したPMを再燃焼させる（DPF再生）。

### 3.2 エンジンモータ協調制御

エンジンモータ協調制御を図-7に示す。図-5の油圧システム制御により演算されたポンプ駆動パワー推定値とエネルギーマネジメント制御によるバッテリーの充放電要求値を入力値として、エンジンとアシスト発電モータを協調させ、油圧ポンプへの動力供給とリチウムイオンバッテリーのSOCが適正範囲に保つよう制御する。

急峻なトルク変動成分を応答性の良いアシスト発電モータで対応し、エンジンのトルク変動量を

抑制（平準化）することで、不具合発生リスクを低減している。

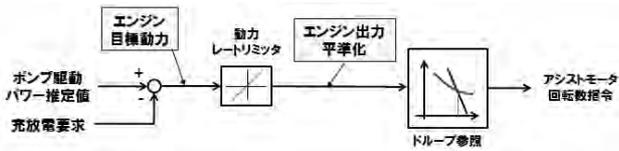


図-7 エンジンモータ協調制御

水平均し動作時における油圧ポンプ、エンジン、アシスト発電モータのトルク、およびリチウムイオンバッテリーのSOCの結果を図-8に示す。油圧ポンプの負荷変動成分を高応答のアシスト発電モータが主に対応し、エンジン出力の平準化を実現できていることが確認できた。また、リチウムイオンバッテリーのSOCを一定以上に保っている。

一般的にエンジンは、高トルク領域の燃費効率が良いため（図-9）、作業頻度の高い領域を最良燃費点に設定することで燃費低減を実現する。また、リチウムイオンバッテリーのSOCを一定以上に保つことで、アシスト発電モータによるエンジンアシストを安定化させている。

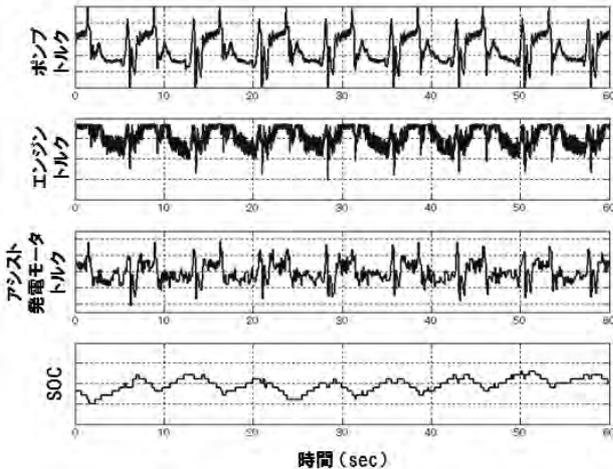


図-8 エンジンモータ協調制御の結果

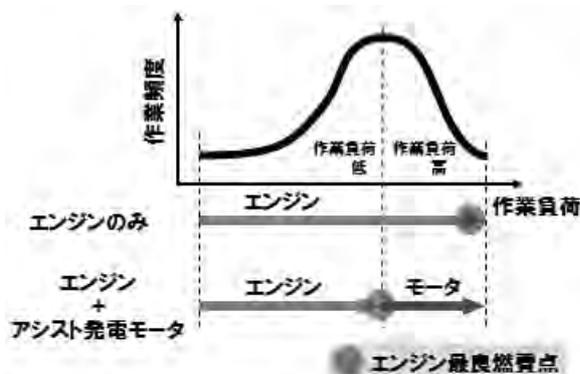


図-9 動作頻度とエンジン燃費の関係

### 3.3 バッテリ制御

リチウムイオンバッテリーのシステム構成を図-10に示す。リチウムイオンバッテリーは複数のバッテリーセルで構成され、バッテリーコントローラがこれらのバッテリーセルの状態監視や各種演算をし、バッテリーの状態を適正に保っている。

また、図-4に示したアルミケース内にバッテリーを収納することで、耐衝撃性や防水性を確保している。リチウムイオンバッテリーは、性能や寿命に影響するバッテリーのセル温度を適正範囲に保つことが重要で、アルミケースに冷却、および暖機回路を各々設け、バッテリーの温度を監視しながら、電動水ポンプや暖機用バルブを制御し、バッテリーを適正温度に保つよう制御をしている。

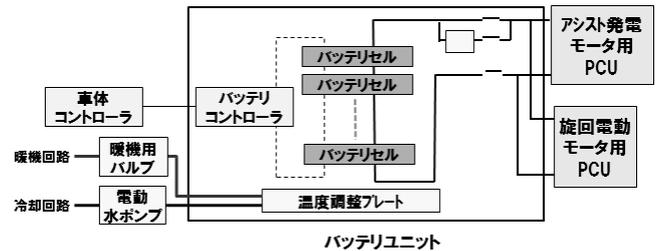


図-10 リチウムイオンのシステム構成

### 3.4 エネルギーマネジメント制御

エネルギーマネジメント制御では、バッテリーのSOCが適正範囲を保つよう、SOCに応じて、エンジンモータ協調制御へ適切にアシスト発電モータの力行・発電を要求する。

### 3.5 油圧電動複合旋回制御

油圧電動複合旋回制御では、従来と同様、可能な限り、エネルギー効率が良い旋回電動駆動とする。旋回電動モータと旋回油圧モータの合計トルクが、油圧電動複合旋回制御の有/無で変化がないよう、旋回電動駆動アシスト時には、旋回リリーフを低圧に切り換え、旋回油圧部の損失が最少となるよう、油圧システム要求動力を決定する。

### 3.6 油圧制御

油圧制御は、目標動作演算、ポンプ・バルブ制御等で構成されている。油圧制御のシステム構成を図-5および図-11で説明する。

目標動作演算では、車体に設けたセンサにより、レバー操作量やアクチュエータ圧に応じ、車体パワー許容範囲内で、各アクチュエータの目標流量・目標パワーを分配する。

油圧システム制御では、アクチュエータの目標流量・目標パワーを実現し、かつ、エネルギー効率が最適となるように、ポンプとバルブを電磁弁等で制御し、低燃費と操作性を両立する。

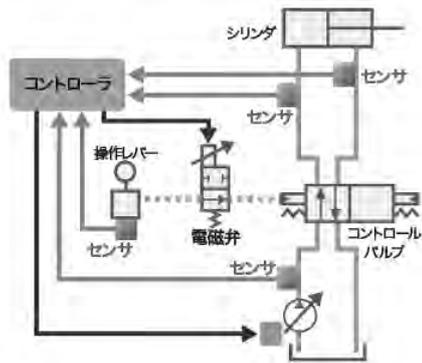


図-11 油圧システムの電子制御

### 3.7 アイドリングストップ制御

マルチモニタのインタフェース等を活用し、アシスト発電モータでエンジン再始動する使い勝手の良いアイドリングストップ制御を採用する。

従来と同様、オペレータがロックレバーをロック位置とした状態が、設定時間が経過した時に、エンジンおよびアシスト発電モータを停止する。アイドリングストップ中は、車体システムを待機状態にして、アシスト発電モータによるエンジン再始動が可能な構成とする。

アイドリングストップ中は、図-12に示すように、マルチモニタにはエンジン再始動のための操作内容を表示する。エンジン再始動には、マルチモニタのインタフェースを活用し、マルチモニタの表示を利用することで、オペレータの意思を確認し、安全にエンジン再始動する。

また、エンジンが停止してから所定時間が経過した場合、オペレータの再始動の意思がないと判断し、機器の保護の為、車体システムを全てシャットダウンする。このシャットダウンまでの時間もオペレータが認識できるように、マルチモニタにはシャットダウンまでの時間をバー表示する。



図-12 アイドリングストップ制御

### 3.8 ハイブリッドシステムインジケータ

ハイブリッドシステムインジケータ (図-13) は、リチウムイオンバッテリーの使用可能エネルギー残量を示すゲージである。オペレータはマルチモニタ上に表示されたインジケータにより、リチウムイオンバッテリーの残量を確認することができる。

作業負荷が大きい時には、一時的にハイブリッドシステムインジケータが減少するが、エネルギーマネジメント制御により、自動的にバッテリーのSOCが回復し、インジケータも回復する。

このようにバッテリー使用可能な残量を分かりやすくモニタ表示することで、オペレータに負荷の大きさを視覚的に教示することが可能で、ムダな負荷の抑制や燃費の良い操作方法への誘導も期待できる。



図-13 ハイブリッドシステムインジケータ

## 4. まとめ

本論文では、ハイブリッドシステムと油圧システムの統合制御の機能と特徴について報告した。

これらの機能を搭載したZH200-6は、標準機ZX200-6に対し20%、従来のハイブリッド油圧ショベルZH200-5Bに対し12%の燃費を低減している。

今後も低燃費への市場ニーズに応じていくよう、取り組んでいく予定である。

# 30. センサネットワーク技術を活用した作業員見守りツールの開発

## －合材工場と道路建設現場における取り組み－

株式会社NIPPPO  
株式会社NIPPPO  
株式会社NIPPPO

○ 駒坂 翼  
宮本 多佳  
中田 真弥

### 1. はじめに

建設業界においては、熟練技能労働者の退職や若手入職者の減少により、近い将来労働者不足が懸念されている。限られた人数の中で行う業務は、一人一人の業務負担を増やし、ワークライフバランスの乱れや注意力の欠如を生むことが予測できる。人員の確保や省人、省力化技術の導入とともに、現在働いている労働者が安全かつ健康に働き続けられる環境の整備が必要である。

筆者らは、安全かつ健康に働き続けられる環境の整備のために、センサネットワーク技術を活用した作業員見守りツールを開発した。ここでは合材工場および道路建設現場における取り組みについて紹介する。

### 2. 合材工場における取り組み

#### 2.1 現状と課題

合材工場は、アスファルト混合物を製造するアスファルトプラント、再生骨材および再生路盤材を製造する破砕プラントなどで構成される。写真-1 は一般的な合材工場である。



写真-1 合材工場

工場は広い敷地内に屋内と屋外が複雑に混在し、建屋内には多くの装置が設置されていることから、安全管理、稼働管理のために多数の監視カメラを設置しているものの死角が多い。また、作業員とは無線機を利用して

居場所の確認をするが、装置の騒音が大きくままならぬ状況である。このようなことから、作業員の安全確認を補完するツールを開発するに至った。

#### 2.2 工場用見守りツールの概要

##### 2.2.1 開発コンセプト

前述の現状と課題を踏まえ、下記3つのコンセプトをもとに開発を行った。

- (1) 屋内外いずれにおいてもリアルタイムで位置が検知できる
- (2) 検知された作業員の位置は、操作室のモニターで確認することが出来る
- (3) 作業の邪魔にならず負担の少ない端末

##### 2.2.2 位置検知と情報集積

屋内外での位置検知をするために、GNSS（衛星測位システム）とビーコン（Bluetooth Low Energy を使用した信号発信機）を併用したハイブリッド型 IC タグ（以下、IC タグ）を採用した。これにより、作業員が屋内にいればビーコンで、屋外にいれば GNSS で位置が検知される。位置検知のイメージを図-1 に示す。検知した情報は、作業員が IC タグとセットで携帯するスマートフォンを介してクラウドサーバーに集積される。

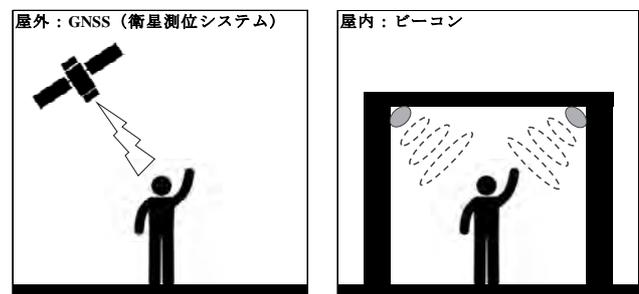


図-1 IC タグの位置検知イメージ

##### 2.2.3 リアルタイムビュー

集積されたデータは、アプリケーションにより可視化され、操作室に設置したモニターでリアルタイムに誰がどこにいるかを確認できる。（図-2）

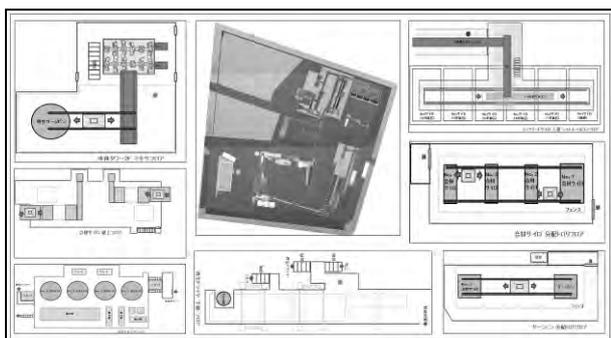


図-2 リアルタイムビュー

## 2.3 導入事例

新設合材工場において、作業員見守りツールを導入した。工場内を18のブロックに区切り5~10m程度の間隔でビーコンを設置(写真-2)、作業員にはそれぞれ個別のICタグとスマートフォンを携帯させた(写真-3)。これにより操作室に設置した専用モニターで作業員の居場所をリアルタイムに確認することができ、安全管理等に役立っている。さらにICタグには気圧センサと加速度センサが内蔵されており、作業員が転倒した際には同モニターに警告音とともに、位置情報がピックアップされる。これにより今まで死角となっていた場所を含めた位置検知が可能となった。



写真-2 ビーコン設置状況



写真-3 ICタグ携帯状況

## 2.4 今後の取り組み

合材工場において重篤災害が起こりやすい状況は、立ち入り禁止エリアへの侵入や装置の稼働部に手を出すことである。このような状況には、フェ

ンスの設置やルールの制定など防止策がとられている。しかし、作業員の意思で取り払うことができ、事故につながっていることは否めない。

このような状況に対応するため、作業員見守りツール上で立ち入り禁止エリアにジオフェンス(仮想境界線)機能を付加し、接近した作業員に警告を発するシステムや、さらには稼働部を自動制御、停止させるシステム(図-3)などにも取り組んでいきたい。

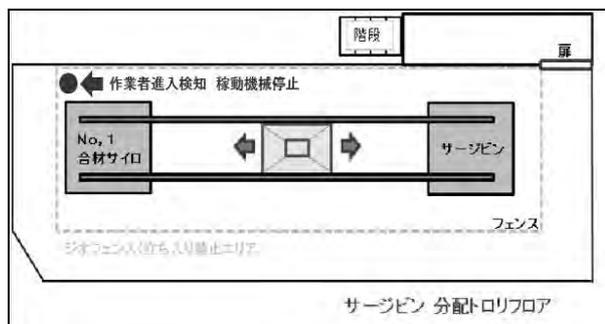


図-3 ジオフェンスシステムイメージ

## 3. 道路建設現場における取り組み

### 3.1 現状と課題

道路建設現場では、屋外での連続作業だけでなく、炎天下や夜間での作業もあることから、作業員の体調管理は非常に重要である。一般的な体調管理としては、下記のような管理や対応が行われている。

- (1) 新規入場教育時、直近の健康診断結果の提出やヒアリング
- (2) 朝礼時、作業員同士で顔色などの確認
- (3) 現場巡視時、各作業員とのコミュニケーションによる体調の確認
- (4) 休憩所やテントなどの設置
- (5) 熱中症時期にはWBGT指数の掲示など、気象情報に関する注意喚起

このような管理や対応は、客観的な指標や数値によるものは少なく、確認者や作業員自身の自己判断に委ねている割合が大きい。また、資料提出時や確認時というような瞬間的な管理方法で実施しているため、その結果がいつまで有効なのか不確かである。また、リアルタイム性がないことも課題に挙げられる。

### 3.2 道路建設現場用見守りツールの概要

#### 3.2.1 開発コンセプトとシステムイメージ

前述の現状と課題を踏まえ、下記5つのコンセプトと図-4のようなシステムイメージをもとに開発を行った。

- (1) 客観的な指標、数値を用いて管理する
- (2) 取得データがリアルタイムで計測できる
- (3) 異常時を作業員本人、周辺作業員および管理者が認識できる機能を持つ

- (4) 作業の邪魔にならず装着感の少ない端末
- (5) 継続的に管理できるもの

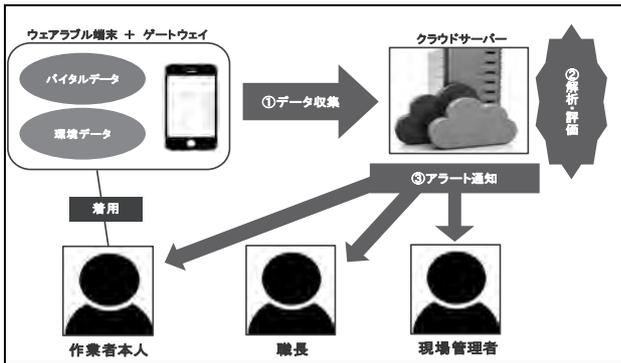


図-4 システムイメージ

### 3.2.2 測定端末の選定

測定端末選定のため、複数の作業者に数種類のバイタルデータ（生態情報）測定用端末を装着してもらい、使用後にアンケートを実施し評価を行った。アンケートを用いた現場評価結果（表-1）より、腕時計式測定端末を採用した（写真-4）。また、環境データの取得に関しては、装着感の少ないキーホルダ型端末を採用した（写真-4）。

表-1 現場評価結果

バイタルデータ 測定方式（測定箇所）	評価項目						合計点
	背腕のし易さ	装着感	追従性	持続時間	データ精度	コスト	
①腕時計式	○	○	○	×	○	○	15
②耳たぶクリップ式	○	△	△	○	△	△	10
③シャツ（上着）式	×	○	×	△	×	△	5
④肩バンド式	×	×	○	△	○	×	7
⑤胸板式	△	△	×	×	△	○	6

※配点 ○:3点 △:1点 ×:0点



写真-4 測定端末携行状況

### 3.2.3 管理者画面

端末により収集されたデータはスマートフォンを介してリアルタイムでクラウドサーバーへ集積される。集積されたデータは、図-5のように管理者画面に整理され、タブレットまたはスマートフォンで閲覧することができる。



図-5 管理者画面

### 3.2.4 アラート機能

取得したバイタルデータあるいは環境データが設定した閾値を超過した場合、作業者本人と管理者に警告を通知するシステムを採用している。通知方法は、作業者が携行しているスマートフォンおよび管理者が携行しているタブレット等に警告音とともにメッセージを送信するものである。

### 3.2.5 アラート機能の閾値

アラート機能の閾値を設定する上で、様々な状況下のデータを収集し、影響力のある要因に関して検証する必要があるため、実際の現場において、データ収集のために実証実験を行った。朝礼時に各種センサを起動し、作業終了までデータ収集を行い、作業者には作業終了後に時間ごとの作業内容や主観による疲労具合を数値化し報告させた。

その結果、ブレーカを用いた破碎作業など肉体的負荷が大きい作業は、バイタルデータも大きく変化しており（図-6）、作業負荷の大きさが作業者のバイタルデータに影響することが確認できた。また、同じ作業者の季節ごとのデータを比較した結果、夏場のような高温多湿環境においてバイタルデータが大きく変化しており、四季や天候など気象条件がバイタルデータに影響することが確認できた。更にこの変化は、年齢の高い作業者のほうが大きくなる傾向も確認できた。これらの要因を考慮し、アラート機能の閾値を決定した。

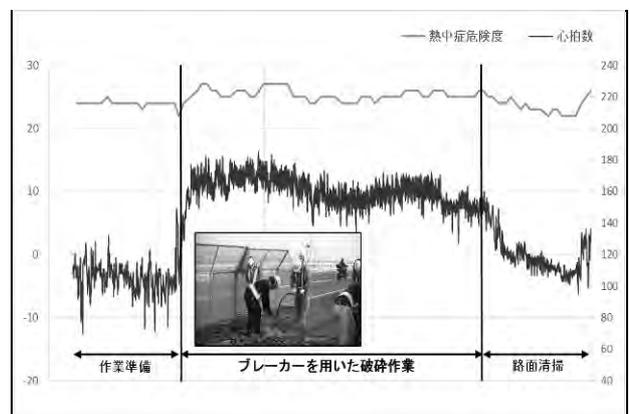


図-6 破碎作業時のバイタルデータ

### 3.3 導入事例

作業員数が多く、同一工種の作業が連続する大型の高速道路建設現場において、本ツールを導入した。対象者は、作業負荷の大きいコンクリート舗装工と熱環境負荷の大きいアスファルト舗装工の作業員とした。管理者1名に対し作業員3名を1チームとして(図-7)、4チーム計16名に導入した。

実証実験をもとに設定したアラート機能の閾値の妥当性検証やアラート発生機能の効果、管理者画面の利用効果について確認した。

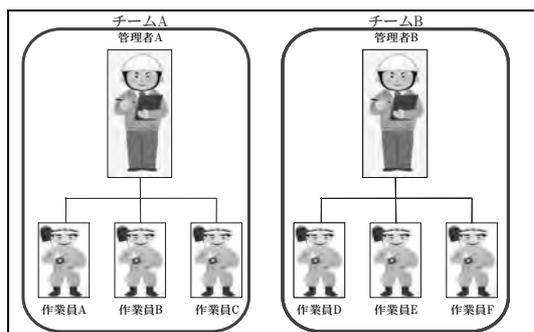


図-7 導入体制図

アラート機能の閾値の妥当性については、別途計測を行った心電図データや作業員の主観による報告を照らし合わせて検証を行った。「自覚しているよりも警告音が多く鳴りすぎている」などの意見があったものの、数値的には本人が気づいていない危険を検知しているため、客観的な指標、数値を用いた判定という意味では妥当な閾値だと考えられる。

アラート発生機能の効果に関しては、発生時、未発生時の各場面で下記の効果を確認した。

[発生時]

- (1) 作業員が警告内容の確認を行う
- (2) 周辺作業員が警告音の発生者を確認し、問題ないかどうか声をかける

[未発生時]

- (1) 作業員が表示されるバイタルデータや環境データの確認を行う
- (2) 作業員同士がお互いに声をかけ気遣う場面が自然と増えた

今導入において、装着者だけでなく周辺作業員の体調管理に対する意識の向上に効果があることを確認した。

また、管理者からはやむを得ず現場を離れることもあるため、手持ちのタブレットで作業員の体調を遠隔かつリアルタイムで一括管理できるツールは便利であるとの評価を得た。アラート頻度の多い作業員に対しては、管理者ツールのメッセージ機能を活用し、休息や水分補給の指示を遠隔で行っていた。

各効果検証の結果からも「作業員見守りツール」の道路建設現場への導入は、一定の効果が期待できることを確認した。

### 3.4 今後の取り組み

今回、開発した見守りツールは、取得したデータが一定の閾値を超過した際にアラートとして通知するものである。効果が期待できるものではあるが、瞬間的な管理方法という面を脱していないと感じている。

筆者らは、コンセプトの中でも謳っている継続的に管理できるツールを目指しており、試行錯誤を繰り返している。

例えば、現在の見守りツールにおいて取得データの利用は、取得直後の閾値超過判定に限定されている。しかし、取得したデータを蓄積していくことにより、個々の正常時と異常時のバイタルデータをパターン化し、閾値超過判定直後でなく予防段階での判定ができると考えている。

また、健康面だけでなく安全面での利用方法として、作業員のバイタルデータに異常が検知された際に、操縦する建設機械が停止する機能や運転アシスト機能の利用などが考えられる。どちらも近年大きな発展をみせているICT、IoT技術との連携が不可欠であるが、今後の取り組みとして視野に入れている。

### 4. 取得データの取り扱い

センサネットワーク技術は、特定の個人を識別できる可能性のあるデータを扱うため、個人情報保護法に抵触する恐れがある。ICT、IoT技術の発展に伴い、法改正も進められているが、個人情報の適切かつ効果的な活用のために、下記のようなルールにもとづき取り組んでいる。

- (1) 利用目的を本人に説明し、承諾を得てから情報の取得および活用を行う
- (2) 情報漏えいが生じないようにセキュリティ管理を行う（IDパスワード入力機能やウイルス対策ソフトの利用）
- (3) 個人情報を第三者に提供する場合は、本人の同意を得るとともに提供元の記録、保管を行う
- (4) 本人より取得データの確認またはデータ取得を中止したいとの要求があった際は、速やかに対応を行う

### 5. おわりに

技能労働者の減少が想定されるなか、作業場の安全管理や作業員の体調管理については、年々緊急性、重要性が高まっている。

筆者らは、今後も検証を続け、精度や信頼性を高めるとともに、より多くの現場へ普及、展開を図っていきたいと考える。

# 31. 基礎工事中建設機械の転倒防止のための地盤養生に関する実験的検討

(独)労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所 ○堀 智仁  
 (独)労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所 玉手 聡

## 1. はじめに

くい打機などの基礎工事中用機械による転倒災害が後を絶たない。このような大型建設機械が転倒した場合、工事現場内の被害にとどまらず、付近の民家等を損壊する等、第三者をも巻きこむ災害に発展する危険性がある。法令等では、軟弱な地盤の上に機械を設置する際には、敷鉄板等の使用を義務付けているが、その設置方法や機械設置時の安全性の検討手法については十分な知見がない。そこで筆者らは、敷鉄板模型を作製して、敷鉄板の敷設方法と接地圧の分散効果について調査を行い、理想的な敷設方法を明らかにした<sup>1)</sup>。しかし、検討で用いた敷鉄板模型は、短辺と長辺の比が1:2のものであった。一般的には寸法比1:4の敷鉄板が多く使用されていることから、本稿では、寸法比1:4の敷鉄板模型を作製して、敷鉄板の敷設方法と接地圧の分散について調査した結果について報告する。

## 2. 実験の概要

### 2.1 敷鉄板模型の製作

既報<sup>1)</sup>では、実物の敷鉄板(914mm×1829mm×25mm)の1/25スケール(36mm×72mm×1mm)で敷鉄板模型を作製したが、結果の比較のため36mm×144mm×1mmの模型を作製した。本研究では、前者を「寸法比1:2」、後者を「寸法比1:4」と呼ぶ。

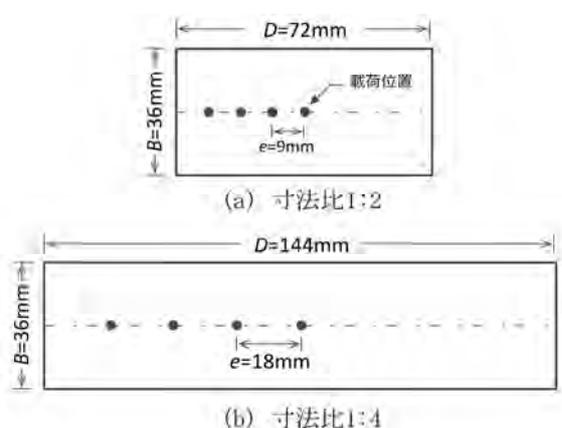


図-1 敷鉄板模型の寸法および載荷位置

図-1に敷鉄板模型の寸法を示す。

### 2.2 実験装置および実験条件

載荷実験では、島津製作所製の精密万能試験装置AG-100KNIS (Autograph)を用いた。当該試験機の定格荷重は100kNであり、高精度の定速変位制御が可能となっている。試験時の荷重はミネベア製のロードセル(定格容量500N)で計測し、変位については接触型の変位計(定格容量50mm)で計測した。荷重は変位制御(1mm/min)で載荷した。載荷位置については、敷鉄板の中央からD/8ずつ偏心量eを増加させた全4箇所載荷実験を行った。図-1に載荷位置を示す。

模型地盤は発泡ポリエチレンフォームにより作製した。その理由は、均質な化学材料であるため実験の再現性が確保できることと、関東ロームのような圧縮性の高い粘性土地盤を模擬するためである。一般的な地盤材料と異なる点は、引張強度を有していることである。載荷実験において沈下の増加とともに引張強度の影響が大きくなり、支持力を高めに示す傾向がある。この点について、実際の地盤材料と性質が異なる。

図-2および図-3に敷鉄板の敷設方法を示す。本研究では、Cs1~Cs9の9種類に加え、1枚敷きと2枚の敷鉄板を完全に重複させた条件(完全重複)についても検討を行った。

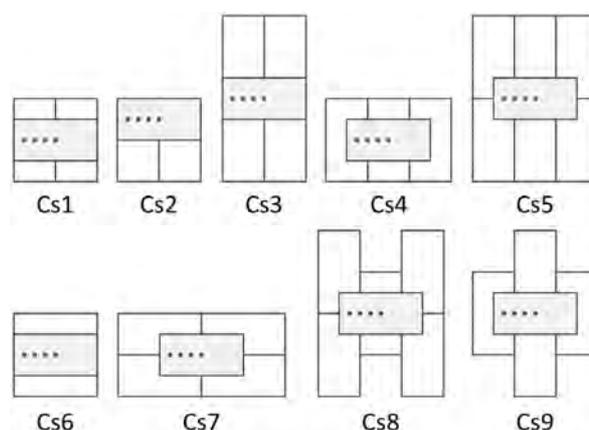


図-2 敷鉄板模型の敷設方法(寸法比1:2)<sup>1)</sup>

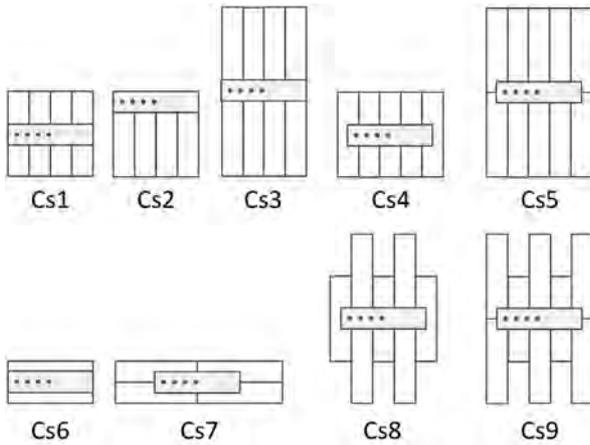
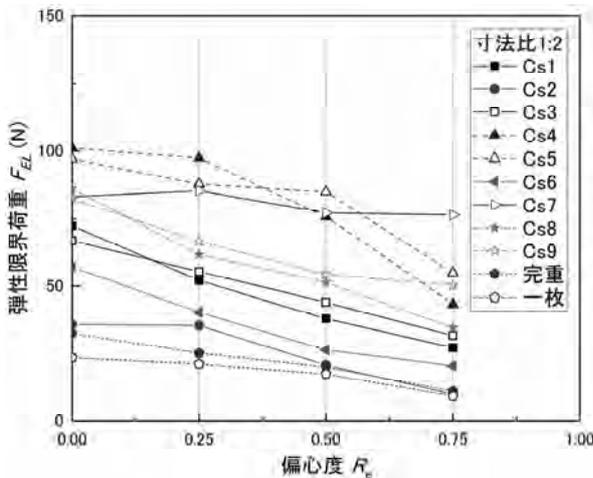
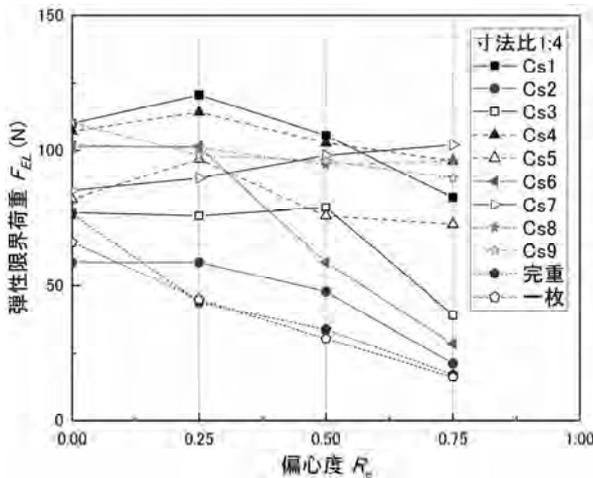


図-3 敷鉄板模型の敷設方法(寸法比1:4)



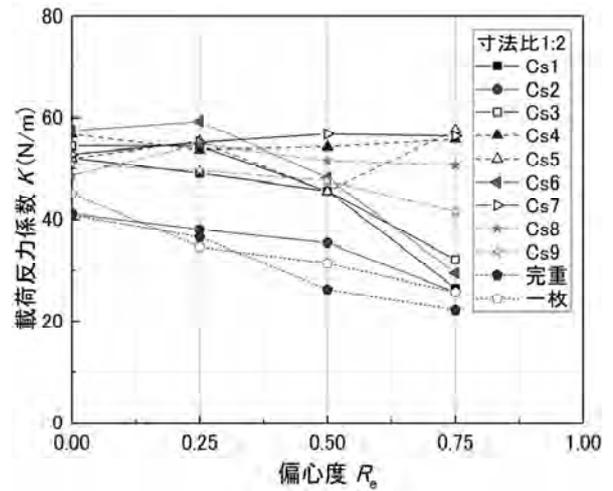
(a) 寸法比 1:2



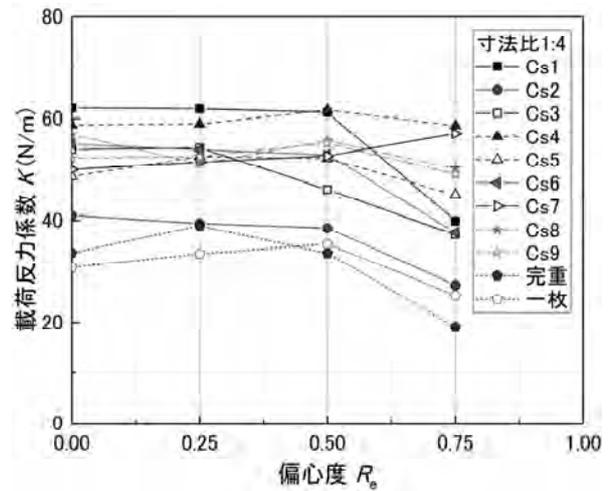
(b) 寸法比 1:4

図-4 弾性限界荷重  $F_{EL}$  と偏心度  $R_e$  の関係

本研究では、建設現場の地盤を平面的に養生することを想定している。例えば、Cs1とCs3は同一設置パターンであり、Cs4およびCs5、Cs8およびCs9も同様である。本研究では、重ね敷きの条件において、地盤に接するように設置された敷鉄板を「下部敷鉄板」と呼び、その上に設置された敷鉄



(c) 寸法比 1:2



(d) 寸法比 1:4

図-5 載荷反力係数  $K$  と偏心度  $R_e$  の関係

板を「上部敷鉄板」と呼ぶこととする。

### 3. 実験結果

#### 3.1 弾性限界荷重と偏心度の関係

図-4に弾性限界荷重 $F_{EL}$ と偏心度 $R_e$ の関係を示す。ここで、 $F_{EL}$ は載荷荷重 $F$ と沈下量 $s$ の関係の弾性限界に相当する荷重であり、 $R_e$ は偏心量 $e$ を最大偏心量 $e_{max} (=D/2)$ で除した値である。寸法比1:2の結果を示した図-4(a)では、Cs7の結果を除き、 $R_e$ の増加に伴って $F_{EL}$ が減少している。すなわち、上部敷鉄板の中央と端部で $F_{EL}$ の値が異なる。特に、Cs2や完全重複は全体的に低く、1枚敷きの結果と比較しても大きな差はない。一方、Cs4およびCs5については、敷鉄板の中央付近の $F_{EL}$ は高いが、端部( $R_e=0.75$ )では中央に比べ $F_{EL}$ は約1/2に低下している。それに対して、Cs7では、 $R_e$ の違いによらず $F_{EL}$ はほぼ一定である。1枚敷きの結果と比較すると、Cs7の $F_{EL}$ は1枚敷きに比べ約3倍であった。

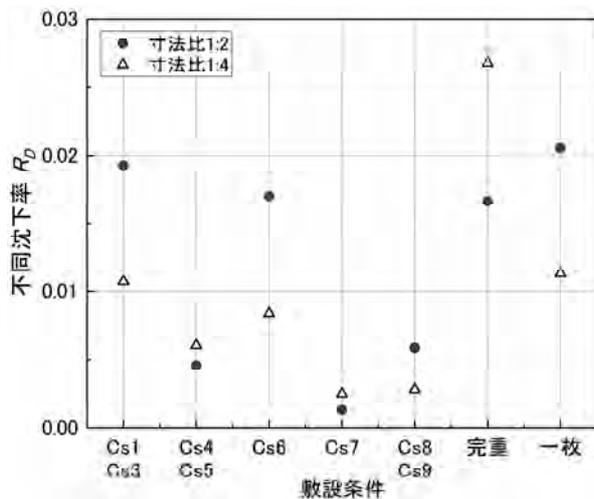


図-6 各敷設条件における不同沈下率  $R_D$

寸法比1:4の結果を示した図-4(b)では、寸法比1:2と同じような傾向を示しているが、Cs7のほか、Cs4やCs8、Cs9の結果は、 $R_e$ によらず一定して高い値を示している。また、寸法比1:4の結果は寸法比1:2の結果に比べ全体的に高い値を示している。両者の平均値で比較すると、寸法比1:4は寸法比1:2の約1.5倍であることがわかった。これは、敷鉄板模型の面積の違いによる影響であると考えられる。

### 3.2 地盤反力係数と偏心率の関係

次に、荷重荷重 $F$ と沈下量 $s$ の弾性域の直線の傾きを荷重反力係数 $K$ と定義して、結果の比較を行った。図-5に $K$ と $R_e$ の関係を示す。 $K$ が大きい場合、同一荷重に対して発生する沈下量 $s$ が小さく、相対的に接地圧力の低減効果が高いことを意味する。寸法比1:2の結果では、1枚敷きと完全重複、Cs2の $K$ は、 $R_e$ の増加とともに低下している。その他、Cs1やCs3、Cs6についても $R_e=0\sim 0.25$ では $K$ の値は大きいものの、端部に荷重した $R_e=0.75$ では $K$ が小さい。それに対して、Cs4およびCs7は $R_e$ の違いによらず $K$ はほぼ一定である。

寸法比1:4の結果においても、1枚敷きと完全重複、Cs2の $K$ は全体的に小さい。また、Cs1、Cs3、Cs5およびCs6は中央に荷重した条件に比べ端部に荷重した条件 ( $R_e=0.75$ ) で $K$ は減少している。それに対して、Cs4、Cs7、Cs8およびCs9は、 $R_e$ の違いによらず $K$ はほぼ一定して高い値であった。

### 3.3 不同沈下率の検討

敷鉄板上を通過する移動荷重により生じた沈下量 $s$ の最大値と最小値の差を不同沈下量 $\Delta s$ とし、単位荷重増分 $\Delta F$ に対する $\Delta s$ の割合を不同沈下率 $R_D$ と定義した。次式にその関係式を示す。

$$R_D = \Delta s / \Delta F \quad (1)$$

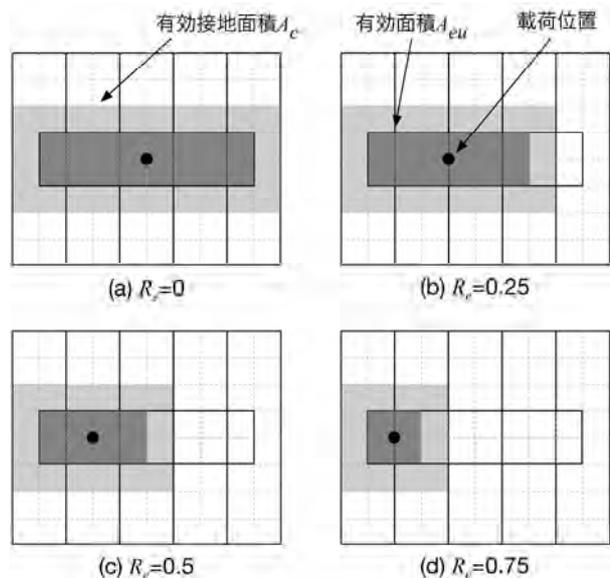


図-7 寸法比1:4のCs4における有効接地面積の算出例

図-6に各敷設条件における $R_D$ を示す。前述のとおり、Cs1およびCs3、Cs4およびCs5、Cs8およびCs9は同一の敷設パターンであるため、それぞれの最小沈下量の小さい方の値と最大沈下量の大きい方の値から $R_D$ を算出した。図より、Cs7は敷鉄板の大きさの違いによらず $R_D$ は小さく、不同沈下が発生する可能性が小さい。その他、Cs8およびCs9の寸法比1:4についても $R_D$ が小さいことがわかる。それ以外の結果については、 $R_D$ が大きく、不同沈下が発生する可能性が高い。また、寸法比1:2と寸法比1:4の結果を比較すると、全体的に寸法比1:4の方が $R_D$ は小さく、不同沈下が発生する可能性が小さいことがわかった。

### 3.4 有効面積の算出

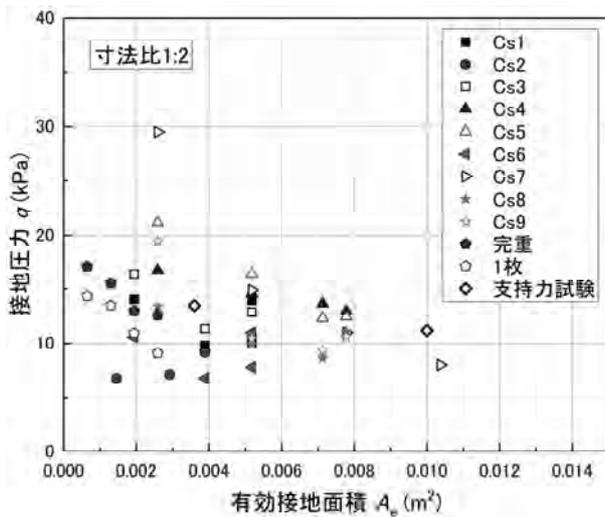
これまでの検討結果から、1枚敷きや完全重複では、Meyerhofの有効幅法を利用することで有効面積の算出が可能であることが明らかとなっている<sup>1)</sup>。そこで、同手法の重ね敷きへの応用の可否を検討した。

Meyerhofの有効幅法<sup>2)</sup>の概念は、幅 $D$ の基礎に対して、基礎中心から $e$ だけ偏心した位置に鉛直荷重 $F$ が作用した場合、荷重は実質的に幅 $D'$  ( $=D-2e$ )の部分で支持されると述べている<sup>2)</sup>。この仮定より、1枚敷きの $A_e$ は次式で求まる。

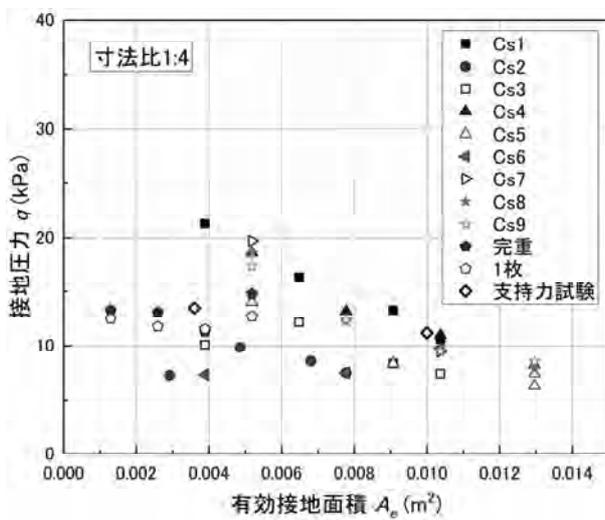
$$A_e = D' \times B \quad (2)$$

ここで、 $B$ は敷鉄板の短辺の長さ ( $=36\text{mm}$ ) である。

次に、この方法を応用してCs1～Cs9における $A_e$ の算出を試みた。図-7に寸法比1:4のCs4における $A_e$



(a) 寸法比 1:2



(b) 寸法比 1:4

図-8 接地圧力と有効面積の関係

の算出例を示す。上部敷鉄板の有効面積は、式(2)より算出した。図-7の有効面積 $A_{eu}$ がそれに該当する。下部敷鉄板には、 $A_{eu}$ の範囲に分布荷重が作用すると仮定し、それに対する有効面積を有効接地面積 $A_e$ とした。

Meyerhofの有効幅法では、敷鉄板の端部から載荷位置までの距離の2倍を有効幅 $D'$ とするため、 $A_e$ は基本的に上部敷鉄板の有効面積 $A_{eu}$ の各辺長の2倍とした。

図-8に接地圧力 $q$ と $A_e$ の関係を示す。ここで、 $q$ は弾性限界荷重 $F_{EL}$ を $A_e$ で除した値である。図中には、寸法の異なる2種類の正方形基礎（幅60mmおよび幅100mm）で行った支持力実験の結果（◇印）も示している。

模型地盤の強度のばらつきはほぼゼロと見なされるため、 $q$ は $A_e$ によらずほぼ一定値になると考え

られたが、 $A_e$ の減少に伴って $q$ のばらつきはやや大きい。すなわち、敷鉄板の端部に載荷した条件ではバラツキが大きい。しかし、 $A_e$ の増加とともに $q$ は一定値に収束している。

正方形基礎による支持力実験の結果は約12kPaであり、この値を模型地盤の支持力の基準値として、 $q$ の最大値（約30kPa）と比較すると、その比は2.5倍である。このような違いを生じた原因は、 $A_e$ の評価法にある。具体的には、 $A_e$ を過小評価したことによって、比は大きくなったと考えられる。したがって、本手法で $A_e$ を求める際は、その不正確さを考慮して安全率は2.5以上にすべきである。

なお、 $A_e$ は敷鉄板の剛性と地盤の強度の相対的な関係により変化することが考えられる。そのため、今後は、異なる地盤材料でのデータを蓄積して、有効接地面積と必要安全率について検討する予定である。

#### 4. まとめ

寸法比の異なる2種類の敷鉄板模型を作製して、敷鉄板の敷設方法と地盤養生効果について検討を行った。その結果、以下に示す知見を得た。

- 1) 寸法比1:2に比べ、寸法比1:4の方が $F_{EL}$ は全体的にやや高く、接地圧力の低減効果が高いことが確認された。
- 2) 敷鉄板の寸法の違いによらず、Cs7の敷設方法は、不同沈下が発生しにくい敷設方法であることがわかった。
- 3) Meyerhofの有効幅法を応用して、有効接地面積 $A_e$ の算出を試みた。その結果、 $A_e$ が小さい範囲において、 $A_e$ が過小評価されることが示唆された。そのため、同手法によって $A_e$ を算出する場合には、安全率として2.5以上の余裕をもって使用すべきと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 堀智仁・玉手聡：大型建設機械の転倒防止のための地盤養生法に関する基礎的検討，平成28年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集，pp.121～124，2016。
- 2) Meyerhof, G. G. : The bearing capacity of foundations under eccentric and inclined loads, *Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.440-445, 1953.

## 32. インフラ点検のための音波照射加振による高速非接触音響探査法

### マルチトーンバースト波を用いた橋梁における検証

桐蔭横浜大学大学院  
桐蔭横浜大学大学院  
佐藤工業(株)技術研究所

○ 杉本 恒美  
杉本 和子  
歌川 紀之

#### 1. はじめに

2012年12月に発生した笹子トンネル天井板落下事故がきっかけとなり、広く一般大衆にも我が国の高度経済成長期に建設された多くのコンクリート構造物に対する維持管理の重要性が認識されるようになってきている。コンクリート構造物表面のクラックや劣化の程度を調査する方法としては、画像処理法、レーダ法、マイクを使用した打音法など様々な手法が開発されているが、実際の点検時には計測対象面に接触するか、ほぼ接触に近い状態での計測が必要であり、いまだに目視点検と叩き点検が主流であるというのが現状である。特に叩き点検の場合には、点検時に足場や高所作業車を必要とするという根本的な問題点を抱えている。そのため、遠距離から非接触かつ従来の叩き点検と同等な検査が可能な点検手法の開発が期待されるようになってきている。

実際に、5m以上の遠距離から非接触で行える非破壊検査手法としては赤外線カメラを用いた赤外線法とパルスレーザを衝撃波源とするレーザリモートセンシング法<sup>1,2)</sup>および本研究室で実施している音波照射加振とレーザドップラ振動計を用いた非接触音響探査法の三手法が現在存在している。最初の赤外線法は基本的に温度の変化や分布を計測する手法であり、原理的にもごく表面に近い亀裂しか検出することはできない。屋外で使用する場合は、日照等の環境条件に依存するほか、温度変化の少ないトンネル内部等で使用する場合はヒータ等を使用してアクティブに加熱する必要がある、高い天井部等での使用は困難であるという問題点が存在している。次のレーザリモートセンシング法は、強力なパルスレーザによる衝撃加振を利用した手法であり、基本的に金属材料の検査には適した手法である。しかしながら、計測対象がコンクリートの場合には測定対象の融点が低い上に、検出対象である欠陥の共振周波数も低いことから、効率的な振動励起を行うことはきわめて困難である。すなわち、大電力を必要とする割には振動エネルギーへの変換効率率はきわめて低いため、

出力を上げすぎるとコンクリート表面に孔を穿ってしまうことになる。さらに、人体に影響がある高出力レーザを複数使用することによる取り扱いの危険性の存在も課題となっている。一方で、著者らが研究開発を行ってきた非接触音響探査法は、従来の打音法と同様に欠陥部のたわみ共振を利用した手法であり、極めてエネルギー効率が高くかつ安全な手法である。似たような手法として、ガスガンによる圧力波<sup>3,4)</sup>やラウドスピーカによる空中放射音波<sup>5)</sup>を用いた手法も過去に提案されてきたが、当時はたわみ共振を利用した効率的な加振法とS/N比の高い計測法に関する検討が不十分であったため、実際に5m以上の離隔における安定的な計測を実現することは出来なかった。

実際に遠距離から音波照射加振によりたわみ共振を効率的に発生させ、かつS/N (Signal to Noise) 比の高い計測を行うには、加振用信号波形の工夫およびそれに応じた信号処理の適用が必要となる。著者らはこの一見困難に思われる課題を、トーンバースト波および時間周波数ゲートを用いることで克服した。実際に市販の低出力(1~10mW)のレーザドップラ振動計であっても5m以上の遠距離において、従来の打音法とほぼ同程度の欠陥検出が可能であることをコンクリート供試体や実コンクリート構造物(鉄道や道路のトンネル覆工および橋梁)を用いて明らかにしてきた<sup>6-13)</sup>。さらに、計測可能な時間帯を有効活用するマルチトーンバースト波を考案することにより、従来よりも高速な計測も実現した<sup>12)</sup>。このマルチトーンバースト波は離隔が大きくなると、一度に送波できる周波数帯の数が増えるために計測高速化という面で威力を発揮する。しかし、従来は10mを超えるような遠距離での探査はコンクリート供試体のみでしか実施しておらず、実際のコンクリート構造物では試みたことが無かった。そこで、今回は本州四国連絡高速道路株式会社の管理する因島大橋東高架橋において、実際に30mを超える遠距離計測実験を行い、非接触音響探査法の遠距離計測に関する適用性検討を行った。

## 2. 非接触音響探査法の概要

### 2.1 欠陥検出の基本原則

図-1 に示すようにコンクリート構造物の表面近傍に空洞欠陥もしくは亀裂が表面に対して水平かつ平面的に存在していた場合、その欠陥上で板状の構造が存在するとみなすことができる。ハンマーによる叩き点検を実施すると、縦振動とたわみ振動の2種類の振動が発生することになる。

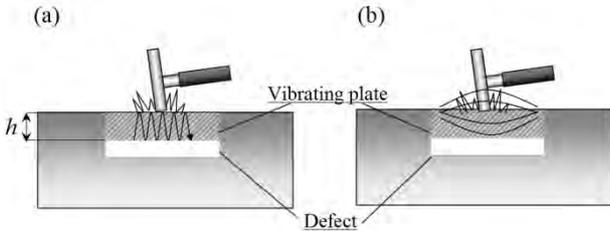


図-1 欠陥部の振動パターン (a)縦振動, (b)たわみ振動

コンクリート中の縦波音速を  $3000\sim 4000\text{m/s}$ 、欠陥までの深さ  $h$  を  $10\sim 100\text{mm}$  程度とすると縦振動の共振周波数は  $15\sim 200\text{kHz}$  となり、ほぼ非可聴域である。一方でたわみ振動の場合は、コンクリートの材料定数（ヤング率、ポアソン比、密度）等に依存するが、その共振周波数は縦振動よりも低く、ほぼ可聴域の周波数となる。そのため、通常、ハンマーを用いた打音法では、このたわみ共振時の発生音を聞いて欠陥の有無を判定していることになる。本手法では音波照射加振によりこのたわみ共振を発生させることにより欠陥を検出する。

### 2.2 非接触音響探査法の基本セットアップ

非接触音響探査法の基本セットアップ図を図-2 に示す。最初に音源から発した空中放射音波により対象壁面を励振する。次に励振時の壁面上の振動をレーザドップラ振動計(LDV : Laser Doppler Vibrometer) もしくはスキャニング振動計(SLDV : Scanning Laser Doppler Vibrometer) により光学的に検出し、欠陥部と健全部の振動特性の違いから欠陥を検出するという手法である。

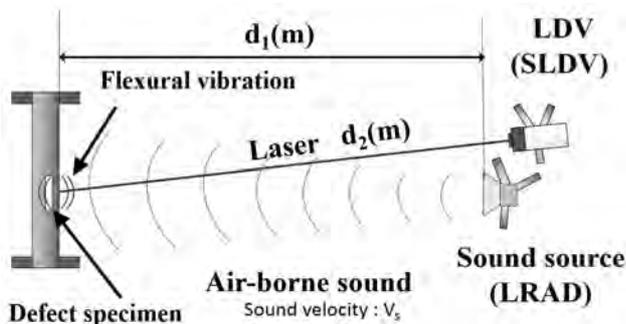


図-2 非接触音響探査法の基本セットアップ

$d_1$ :音源から測定対象面までの距離  
 $d_2$ :測定対象面からLDVまでの距離

音源としては、指向性が鋭くかつ  $5\text{m}$  以上の遠距離でも  $100\text{dB}$  以上の音圧を発生可能なものとして、長距離音響発生装置(LRAD : Long Range Acoustic Device)もしくは強力超音波音源(UNAS : Ultrasonic Nonlinear Speaker)等を用いることができる。しかしながら、音波照射加振によりコンクリート表面に加わる圧力は、測定表面での音圧が  $100\text{dB}$  としても、高々  $2\text{Pa}$  程度でしかない。これは直接ハンマーで叩く打音法に比べると百分の一程度の加振力でしかないことを意味している。

### 2.3 音波送信方法

欠陥部のたわみ共振を利用すれば、音波照射のような極めて弱い加振力でも振動を発生させることが可能になる。このたわみ共振周波数で振動させるためには、その周波数を含んだ音波を送信する必要があるが、単に広い周波数範囲を含むという理由でノイズ波やチャープ波といった波形を安易に使用すると S/N 比の低い計測となってしまうことになる。その主な理由は計測対象物からの反射音波の影響により、計測用の高感度 LDV 自体が振動してしまうためである。また、極めて弱い加振力によりたわみ共振振動を発生増幅させるためにはその共振周波数による加振をある程度は持続した方が効率的であることも理由の一つである。

#### (1) シングルトーンバースト波

そこで、著者らは図-3 に示すような中心周波数の異なる短いバースト波を、逐次的に送信するトーンバースト波を考案した<sup>8)</sup>。この波形は一回の音波送出時に1つの周波数を使用することから、シングルトーンバースト(STNB : Single tone burst)波と呼称することにする。この波形を用いれば欠陥探査に必要とされる広帯域の周波数成分を得ることができる。同時に送信バースト波間のインターバルを十分長く取ることにより、測定対象に音波が到達してから、計測対象面からの反射音波がレーザヘッドに到達するまでの時間帯(計測可能時間帯)に時間ゲートを適用して、目的信

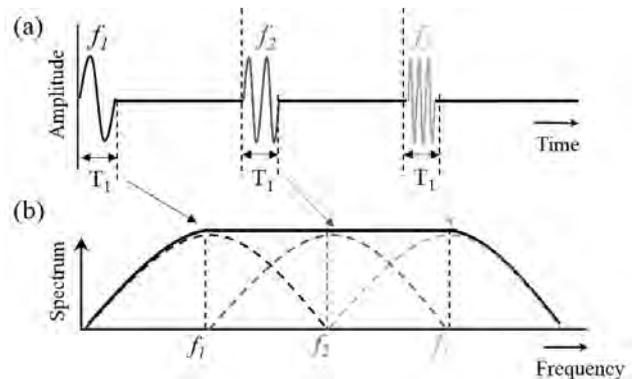


図-3 シングルトーンバースト波の模式図

(a)時間波形, (b)スペクトル

号を抽出することにより LDV の振動による影響を軽減することが可能となる。さらに送信周波数は逐次変化させているために、その周波数に合わせた周波数ゲートも適用すれば、時間ゲートでは除去できないトンネル内等における多重反射の影響すらも低減可能となり、周囲の外乱ノイズに強くかつ極めて高い S/N 比の計測が実現できることになる。

### (2) マルチトーンバースト波<sup>12)</sup>

計測可能時間帯内であれば、1つの周波数だけでなく複数の中心周波数をもつ短いバースト波が順次連続していても、計測は可能である。このような一回の音波送出時に複数の周波数を含んだ形式の送信波を、マルチトーンバースト(MTNB: Multi tone burst)波と呼ぶことにする。この MTNB 波の模式図を図-4 に示す。

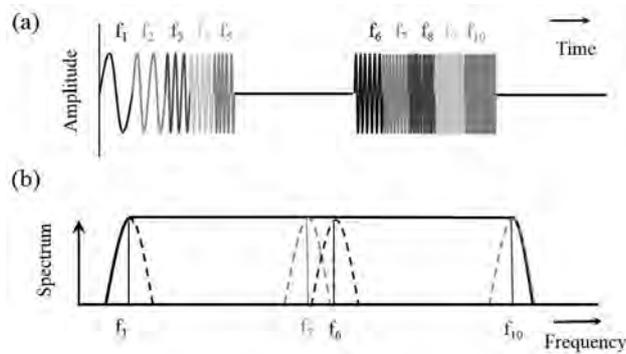


図-4 マルチトーンバースト波の模式図  
(a)時間波形, (b)スペクトル

LDV と計測対象面間の距離が大きくなるほど、計測対象面からの反射音波がレーザヘッドに到達するまでの時間は長くなる。すなわち、距離が大きくなるほど、1回の音波送出時に送出可能な周波数帯の数も増えるために、このマルチトーンバースト波を用いることによる計測高速化という面で効果があることを意味している。

### (3) 計測時間の比較実験

コンクリート供試体(2×1.5×0.3m<sup>3</sup>)に埋設された模擬空洞欠陥を用いて STNB 波と MTNB 波を用いた場合の計測時間の比較を行った。欠陥部には厚さ 25mm、直径 200φの発泡スチロールが深さ(かぶり)80mm の位置に埋設されている(図-5 参照)。実験セットアップは図-2 と同じで、d<sub>1</sub> および d<sub>2</sub> はそれぞれ約 5m および約 5.3m であった。音源としては LRAD-300X(Lrad Corp.), SLDV としては PSV-400-H4(Polytec Corp.)を用いている。測定点数は 35 点、使用した STNB 波のアベレージ回数は 5 回で、音波の送信間隔は 50ms とした。また比較のために使用した MTNB 波の送信間隔は 30ms のものを使用した。なお、STNB 波と同じアベレージ回数をさらに短時間で実現するために、

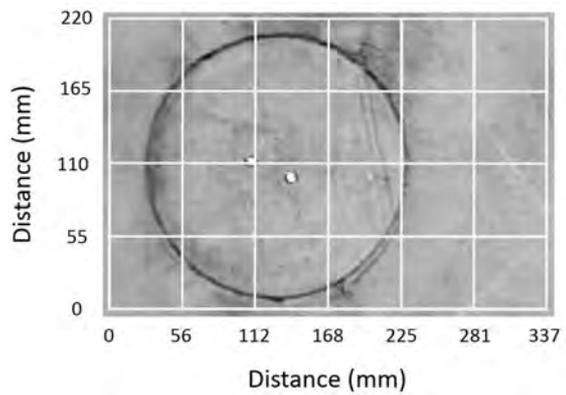


図-5 コンクリート供試体のスキャンエリア図

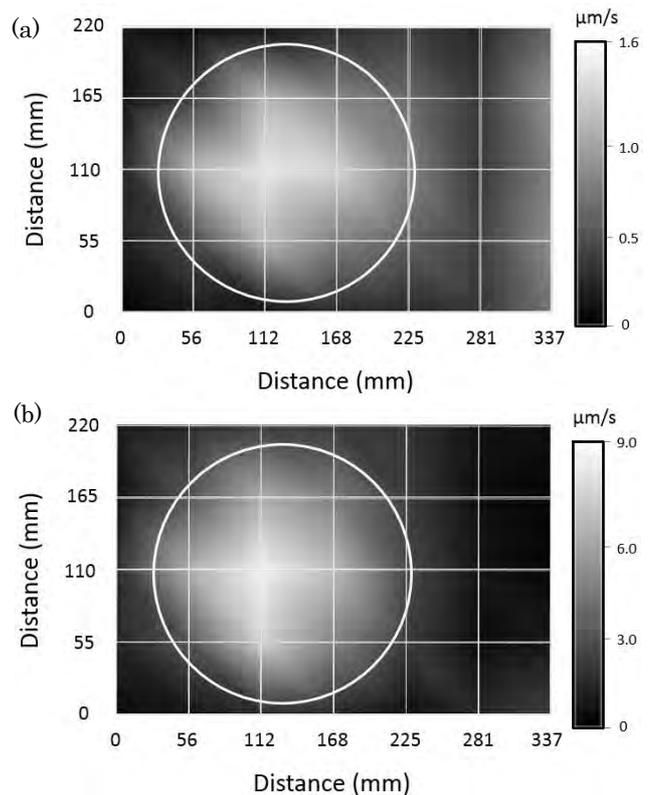


図-6 振動速度(2867.2Hz)の分布図  
(a)STNB, (b)MTNB×5

同じ MTNB 波を 5 回連続して送出した波形(MTNB×5)を使用している(どちらもパルス長 3ms、周波数範囲 1000-4800Hz、周波数変調インターバル 200Hz とした)。なお、実験時のコンクリート表面近傍の音圧は約 100dB である。

振動速度(2867.2Hz)の分布図を図-6 に示す。白円は欠陥部の大きさと位置を、白線交点はスキャン位置を示している。図より、白円内に振動速度が高い領域が集中していること、および最大値も白円内に存在していることなどが共通していることから、ほぼ同等の欠陥検出が出来ていることがわかる。計測時間は、STNB 波の場合が 210 秒、MTNB 波の場合が 28 秒となり、従来の約 7.5 倍の計測高速化が実現できることを確認できた。

## 2.4 欠陥検出アルゴリズム<sup>9,13)</sup>

### (1) 振動エネルギー比

実際のコンクリート構造物の欠陥は複雑な形状をしていることが多く、共振周波数のみを使用した映像化では欠陥規模を明らかにできないことが多い。しかしながら、ある周波数範囲での振動速度のパワースペクトルの和が振動エネルギーに対応する値であるとする、欠陥部と健全部には明確な差が生じていることが考えられる。そこで、振動エネルギー比(VER : Vibration Energy Ratio)を(1)式のように定義する。

$$[VER]_{dB} = 10 \log_{10} \frac{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{defect}) df}{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{health}) df} \quad (1)$$

ここで、 $PSD_{defect}$ 、 $PSD_{health}$  は欠陥部、健全部のパワースペクトル密度、 $f_1$  および  $f_2$  は下限および上限周波数である。実際のコンクリート構造物では健全部でもばらつきがあることが考えられるが、ここでは計測された健全部で振動エネルギーが最も低い値を健全部の基準として計算する。振動エネルギー比は欠陥部、計測不良点ともに高い値を示す。

### (2) スペクトルエントロピー

計測対象であるコンクリート表面上の汚れや凹凸等の影響でレーザ戻り光が減少すると、受光漏れに起因する光学ノイズが生じる場合がある<sup>5)</sup>。このような信号の周波数特性は白色雑音に近い特性を示す。そこで、信号の白色性を表す特徴量であるスペクトルエントロピー $H$ を導入する。これは、信号のスペクトルを確率分布と見なし、情報エントロピーを計算したもので、(2)式で定義される。

$$H = -\sum_f p_f \log_2 p_f, \quad p_f = \frac{S_f}{\sum_f S_f} \quad (2)$$

ここで、 $S_f$  は測定点での振動速度のパワースペクトルである。スペクトルエントロピー $H$  はスペクトルが均一な白色信号では高い値となる。受光漏れによる計測不良点は白色ノイズレベルが高く、健全部では信号レベルは低い特徴的なピークを持たないため、ともに高い値を示すことになる。

### (3) 音響特徴量を用いた欠陥検出アルゴリズム

前述の振動エネルギー比とスペクトルエントロピーといった 2 つの音響特徴量を組み合わせることにより、閾値を適切に選択することができれば、表-1 に示すように欠陥部、健全部および計測不良点の識別が可能となる。

表-1 健全部・欠陥部・計測不良点の識別

	振動エネルギー比	スペクトルエントロピー
健全部	低い	高い
欠陥部	高い	低い
計測不良点	高い	高い

## 3. 橋梁での遠距離計測実験<sup>13)</sup>

### 3.1 実験セットアップ

非接触音響探査法が遠距離でも実際に適用可能であるかどうかを検討するために、広島県尾道市にある因島大橋東高架橋にて探査実験を行った。実験セットアップを図-7 に示す。音源およびレーザと計測対象面までの計測距離は約 33.5m である。音源としては LRAD-300X(LRAD Corp.)、SLDV としては PSV-500 Xtra (Polytec Corp.) を使用した。計測箇所は事前の叩き点検で、浮きがあると判定された箇所である。図-8 に計測範囲図を示す。図の左側には目視できる細い亀裂が入っていることがわかる。図中の白線交点が SLDV による計測位置を示している。測定点数は 77 点(7×11)で、計測領域の大きさは約 57×72 cm<sup>2</sup> であった。使用した音波はパルス長 5ms、300~4000 Hz の周波数範囲を持つマルチトーンバースト波を用いた。波形全体の長さは 400ms でアベレージ回数は 3 回としたため、全体の計測時間は約 224 秒であった。

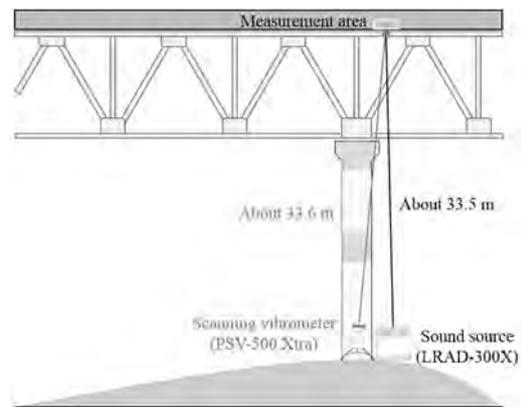


図-7 高架橋における実験セットアップ図

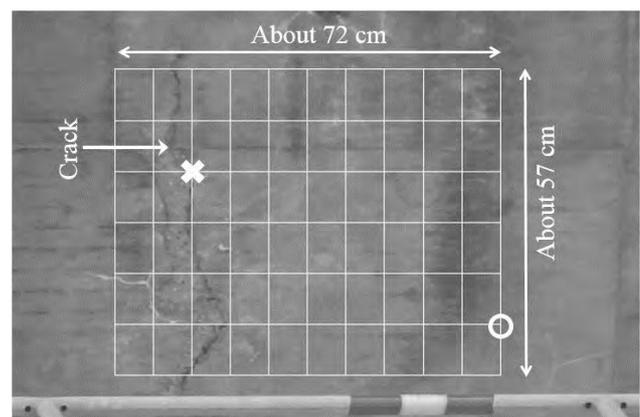


図-8 計測範囲 (57×72cm<sup>2</sup>)

### 3.2 実験結果

#### (1) 振動速度スペクトル

時間&周波数ゲート処理後の振動速度スペクトル例(欠陥部:黒線, 健全部:灰線)を図-9 に示す。計測位置は図-8 中の白×部と白○部であり、それ

ぞれ欠陥部および健全部と思われる箇所に対応している。図より、630Hz および 1.5kHz に大きな振動速度ピークが見られるが、これは反射音波に起因するスキャニング振動計特有のXY2軸のガルバノミラーによるヘッド共振であることが、事前の確認実験で明らかになっている（無音時の計測では発生しない）。したがって、実際の欠陥部の反応は、灰線に対して黒線のみが飛びだしている500Hz 前後の低い周波数帯域であることがわかる。

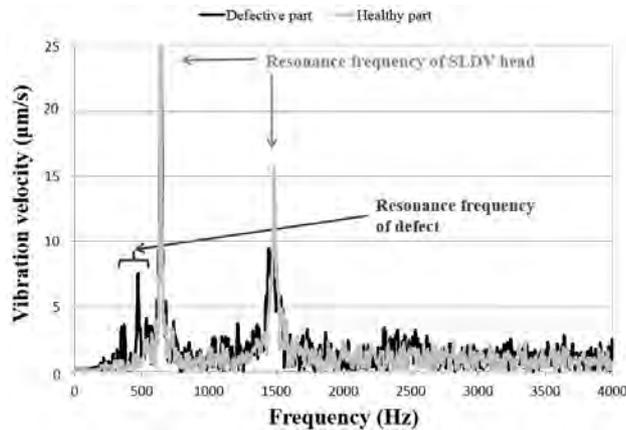


図-9 振動速度スペクトル（黒線：欠陥部、灰線：健全部）

(2)振動エネルギー比分布

振動エネルギー比(300-4000Hz)による映像結果例を図-10に示す。ただし、SLDV (PSV-500Xtra)のヘッド共振(630 Hz, 1.5 kHz)を除くために300-620 Hz, 640-1480 Hz および 1520-4000 Hzの積分値の合計を使用している。図より、目視できる亀裂のやや右側に強い振動エネルギー比が存在していることが確認できる。

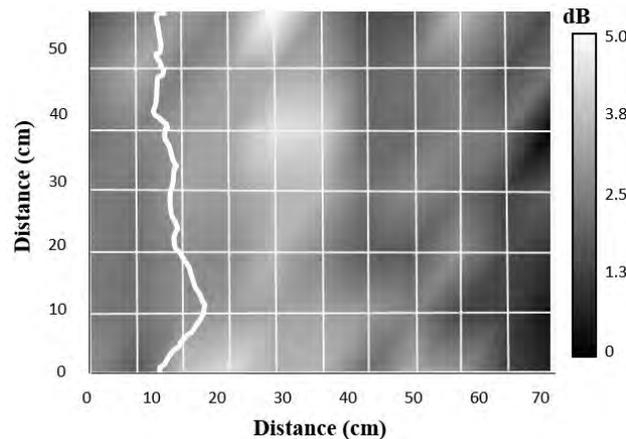


図-10 振動エネルギー比(300-4000Hz)の分布図

(3)周波数帯域毎の振動エネルギー比分布

次に積分する周波数帯域を300Hz から700Hzまで100Hz 毎に変化させた場合の振動エネルギー比分布の変化を図-11に示す。図より、300~400Hzといった低い周波数帯域では亀裂付近も振動エネルギー比が高いが、周波数帯域が高くなるにつれ

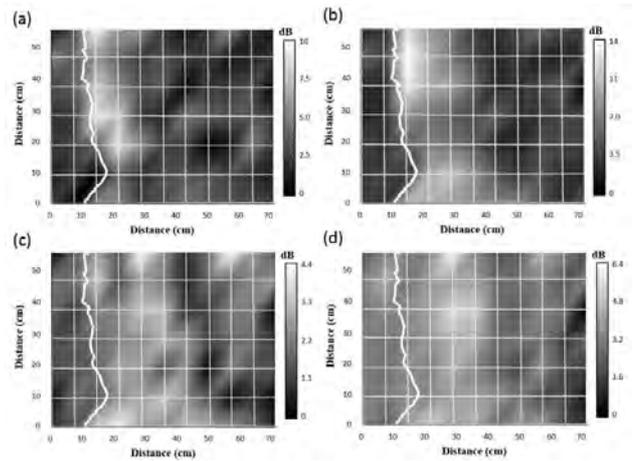


図-11 振動エネルギー比分布の変化

(a) 300-400Hz, (b) 400-500Hz,  
(c) 500-600Hz, (d) 600-620Hz+640Hz-700Hz

て亀裂の右側に振動エネルギー比の高い箇所が移動していくことがわかる。これは、目視できる亀裂とコンクリート内部に存在する亀裂がつながっていることを示唆しており、積分する周波数帯域を変化させることで、内部亀裂のつながり具合を推定できることを意味している。

(3)比較用の打音点検結果

振動エネルギー比による映像結果と比較するために、ハンマー加振時の振動速度分布を SLDV により計測した。加振位置は SLDV の計測用レーザー光の近くとし、音圧を下げた LRAD の音をトリガ

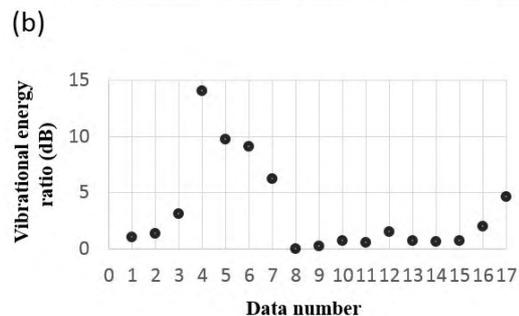
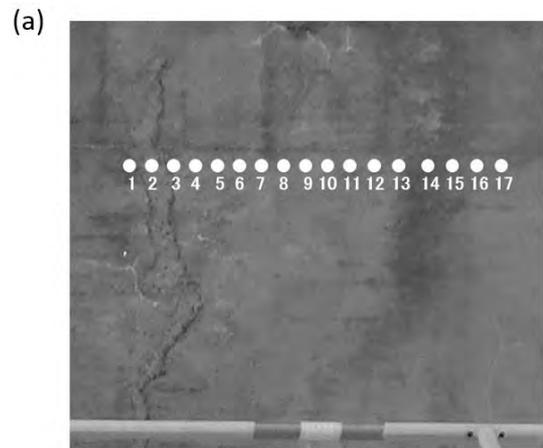


図-12 ハンマー加振による振動エネルギー比  
(a)計測位置, (b)振動エネルギー比分布(100-5000Hz)

用の信号音として利用して3回の加算平均を行った。ただし、高所におけるハンマー加振作業の困難性を考慮して、計測は横方向1ライン(17点)のみで行われた。計測位置およびその位置における振動エネルギー比を図-12に示す。なお、この実験の場合にはSLDVのヘッド共振の影響は無視できるために積分範囲は100-5000Hzとしている。図より、亀裂部のある計測点3から、計測点7にかけて振動エネルギー比が高く、亀裂部の右側に振動エネルギー比が高い箇所があることが確認できる。この結果は非接触音響探査法により得られた結果と同様な傾向を示していることがわかる。

#### 4. まとめ

今回の実験結果より実際の橋梁において30mを超える離隔であっても、マルチトーンバースト波を用いた高速非接触音響探査法により打音法とほぼ同等な欠陥検出が可能であることが確認された。また、特に30mが限界であるというわけでもなく、さらに遠距離での計測も可能であると思われる。以下に、現在までに判明している本手法の特徴を列挙する。

- (1) コンクリート点検時に一般的に用いられている打音法と同じたわみ共振を利用した非破壊検査法であるため、本質的に打音法の代替手法となりうる手法であると同時にエネルギー効率が高い手法であること(小型発電機1台で1日中計測可能)
- (2) 模擬空洞欠陥を埋設したコンクリート供試体を用いた実験結果より、打音法とほぼ同程度の深さと大きさの欠陥を検出できること<sup>7,8)</sup>。
- (3) 模擬亀裂欠陥を埋設したコンクリート供試体を用いた実験結果より、亀裂幅0mmの欠陥であっても検出可能であること<sup>6,8)</sup>。
- (4) トーンバースト波と時間周波数ゲートを用いることで高いS/N比を実現し、交通振動やトンネル内残響の影響もほとんど受けないこと。
- (5) 振動エネルギー比とスペクトルエントロピーという2つの音響特徴量を用いた欠陥検出アルゴリズムにより、実コンクリート構造物における欠陥検出にも適用可能であること<sup>9,13)</sup>。
- (6) 面的加振を用いているために凹凸のある面でも計測可能であること。吹付けコンクリート面においても打音法と同じ欠陥検出精度を実現。
- (7) 音波照射加振を用いているために基本的に安全な手法であること。

本手法には周囲環境騒音や角度依存性といった固有の問題は存在するものの、実はこれらは音源自体に起因する問題であるため、強力超音波音源等を用いれば解消することが既に明らかになっている<sup>10-11)</sup>。このような遠距離から非接触的に打音法

とほぼ同等な検査結果を得ることが可能な高速非接触音響探査法が実現したことにより、今後、世界中の打音点検に変革が起きることが予想される。

#### 参考文献

- 1) Y.Shimada, O.Kotyaev : Development of Laser Based Remote Sensing System for Inner-Concrete Defects, *IEEJ Trans. Electr., Info. & Systems*, 129[7], pp.1192-1197, 2009.
- 2) 島田義則, コチャエフ オレグ, 篠田昌弘, 御崎哲一, 高橋康将, 瀧浪秀元 : レーザを用いたコンクリート欠陥検出の進展, 非破壊検査 61(10), pp.519-524, 2012.
- 3) 森和也, Andrea Spagnoli, 村上敬宣, 鳥越一平 : コンクリート構造物の圧力波を用いた新しい非接触非破壊検査法, コンクリート工学年次論文集 Vol.24, No.1, pp.1473-1478, 2002.
- 4) 森和也, Andrea Spagnoli, 近藤悟朗, 村上敬宣, 鳥越一平 : 衝撃波を用いたコンクリート構造物の非接触非破壊検査法の開発とその自動化に関する研究, 日本機械学会論文集 A 編 70 巻 695 号 pp. 986-994, 2004.
- 5) 貝戸清之, 阿部雅人, 藤野陽三, 熊坂和弘 : 局所的な振動特性に着目したコンクリート構造物の空隙検出, 土木学会論文集 No.690/V-53, pp.121-132, 2001.
- 6) R.Akamatsu, T.Sugimoto, N.Utagawa and K.Katakura : Proposal of Non-Contact Inspection Method for Concrete Structures, Using High-Power Directional Sound Source and Scanning Laser Doppler Vibrometer, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.52, 07HC12, 2013.
- 7) K.Katakura, R.Akamatsu, T.Sugimoto and N.Utagawa : Study on detectable size and depth of defects in noncontact acoustic inspection method, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.53, 07KC15, 2014.
- 8) 杉本恒美, 歌川紀之, 片倉景義 : コンクリート構造物非破壊検査のための遠距離非接触音響探査法, 建設施工と建設機械シンポジウム論文集, pp.137-142, 2014.
- 9) K.Sugimoto, R.Akamatsu, T.Sugimoto, N.Utagawa, C.Kuroda, K.Katakura : Defect-detection algorithm for noncontact acoustic inspection using spectrum entropy, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.54, 07HC15, 2015.
- 10) 杉本恒美, 杉本和子, 歌川紀之, 片倉景義 : 強力超音波音源を用いたコンクリート非破壊検査のための非接触音響探査法の検討, コンクリート工学年次論文集 pp.1753-1758, 2015.
- 11) T.Sugimoto, I.Uechi, K.Sugimoto, N.Utagawa, K.Katakura : Study on the Non-contact Acoustic Inspection Method for Concrete Structures by using Strong Ultrasonic Sound source, *Physics Procedia*, Vol.70, pp.398-401, 2015.
- 12) T.Sugimoto, K.Sugimoto, N.Kosuge, N.Utagawa, K.Katakura : High-speed noncontact acoustic inspection method for civil engineering structure using multitone burst wav, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.56, 07JC10, 2017.
- 13) 杉本恒美, 杉本和子, 川上明彦, 歌川紀之 : 遠距離音波照射加振を用いた非接触探査法の欠陥検出アルゴリズム, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, pp.1849-1854, 2017.

### 33. 短工期を実現した神戸長田トンネル天井板撤去の取組み

鹿島建設株式会社  
阪神高速道路株式会社

○ 村岸 聖介  
高田 英樹

#### 1. はじめに

阪神高速道路では、天井板崩落事故のあった笹子トンネルと類似の構造を有するトンネルは32号新神戸トンネルと31号神戸山手線・神戸長田トンネルがあり(図-1)、これまで実施した緊急点検で天井板の落下に対する安全性に問題がないことを確認していた。しかし、国から「常時引張力を受ける接着系ボルトで固定された既存の吊り天井板については、可能な限り撤去されたい」という通知が出され、近年のトンネル換気技術の向上と自動車の排気ガス低減で換気方式の変更が可能となったことも踏まえて検討した結果、長期的な老朽化の可能性は否定できないことから、これら2つのトンネルの天井板を撤去する方針を決定した。

新神戸トンネルの天井板は平成27年2月に撤去が完了し、平成28年1月25日から神戸長田トンネルの上下線合わせて4.4kmの区間において、横流換気方式の換気ダクトを構成する天井板の撤去を白川南～湊川ジャンクション間の終日通行止め14日間で行った(図-2、写真-1)。

本稿では、14日間という短工期で神戸長田トンネルの天井板撤去を実現するために行った取組みとその成果について報告する。



図-1 天井板を有するトンネル(阪神高速道路)



写真-1 天井板撤去前

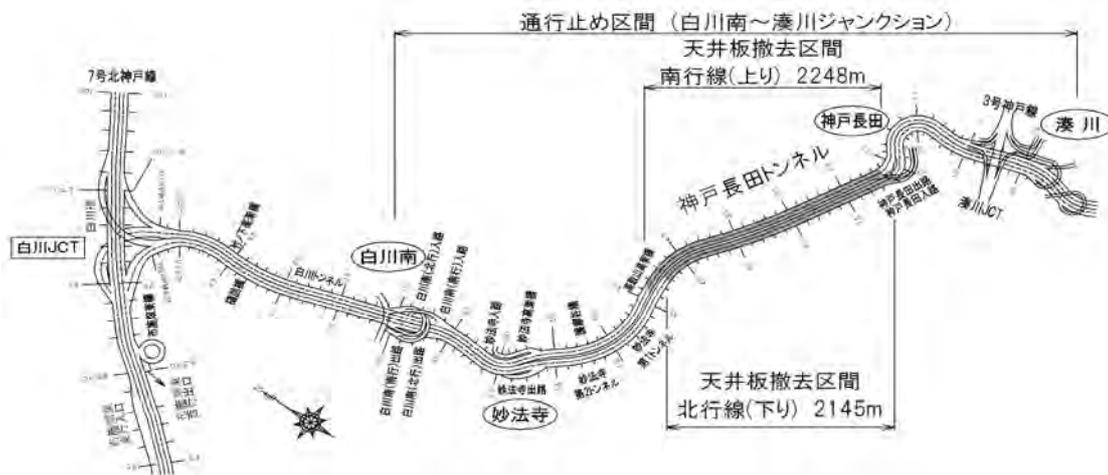


図-2 天井板撤去位置図(阪神高速31号神戸山手線)

## 2. 天井板撤去工事の概要

### 2.1 天井板内部の構造

天井板内部の構造は、天井板と隔壁によって送気ダクトと排気ダクトが構成されており、トンネル頂部と左右側壁部の覆工コンクリートには接着系アンカーによって中央金具（隔壁）と端部受台が定着されている（図-3）。中央金具と端部受台には、トンネル軸方向に沿った受け形鋼が設置されており、この受け形鋼の上に押出成形セメント板を並べて固定アングルで押えたものが天井板である（写真-2）。全ての天井板には落下防止ワイヤーを取り付けており、万一の天井板落下に備えたフェールセーフの役割を有している。

また、送気ダクトと排気ダクトを仕切っている隔壁は、中央金具にボルトでALC板を隙間なく連続して取り付けられたものである。

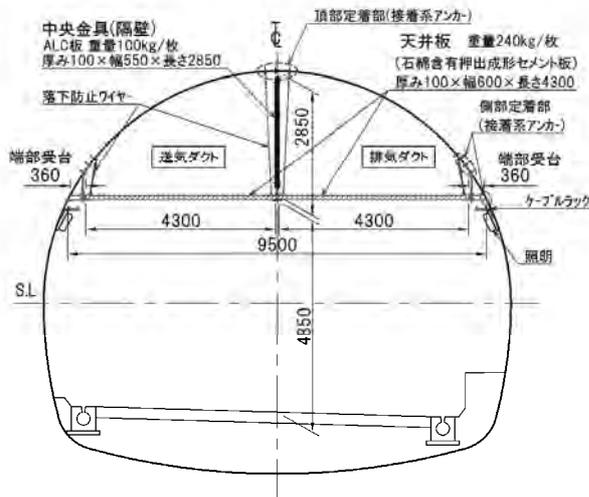


図-3 天井板内部構造 標準断面図

なお、天井板（押出成型セメント板）は、石綿含有製品（非飛散性）であることから、撤去の際には原則として、切断・破碎等の粉塵が発生する行為は行わないことを基本方針とした。



写真-2 天井板内部

### 2.2 トンネル断面区分と換気方式の変更

トンネル断面区分は図-4 と図-5 に示すようにS、Nの記号で表される標準断面と、それ以外の異形断面となるSL、NLの記号で表される非常駐車帯（拡幅部）、換気塔接続部、および分岐・合流部（開削部・南伸部）がある。異形断面の大半は不規則な天井板構造となっており、天井板撤去に支障となる道路施設や換気設備と近接している箇所があった（写真-3）。

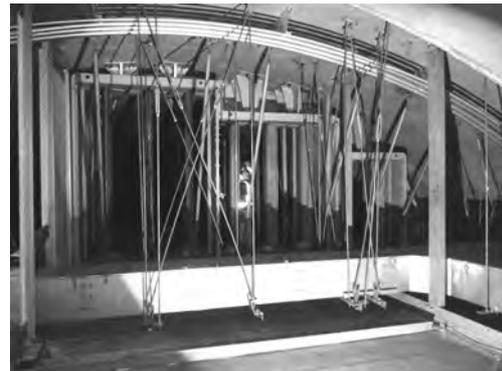


写真-3 換気塔接続部

今回の天井板撤去に伴い、横流換気方式からジェットファンによる縦流換気方式に変更するため、新換気方式の運用に支障となる設備（コーナーバーン、ダンパー）の撤去と、必要となる設備（点検歩廊、金網・風路閉塞）の設置も通行止め期間中に実施した。



図-4 南行線（上り）トンネル断面区分

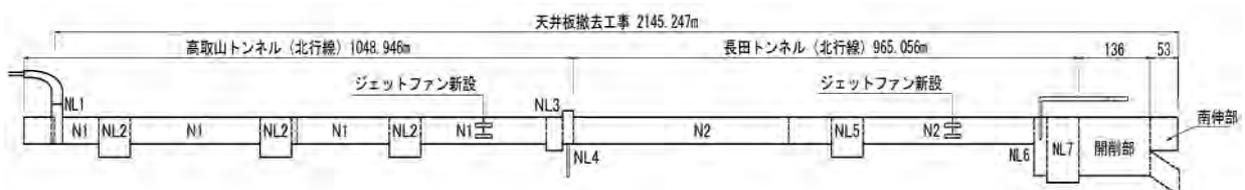


図-5 北行線（下り）トンネル断面区分

### 2.3 天井板撤去の作業手順

天井板撤去の基本的な作業手順は、次のフローのとおりである。

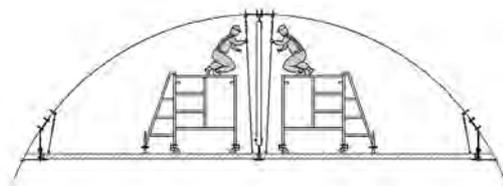
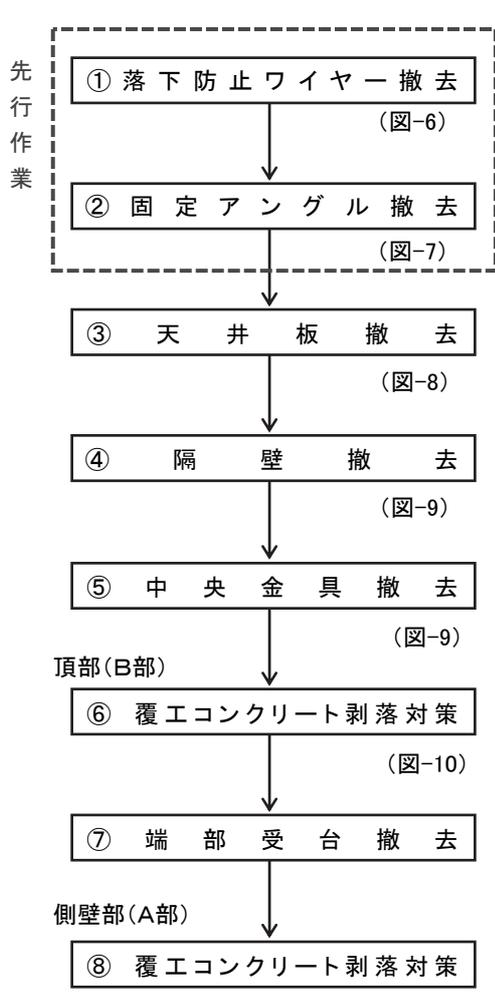


図-6 落下防止ワイヤー撤去 (3,859本)

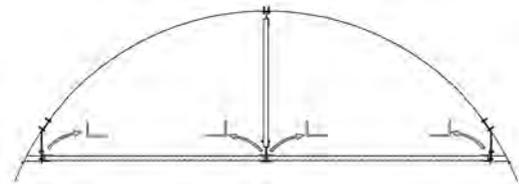


図-7 固定アングル撤去

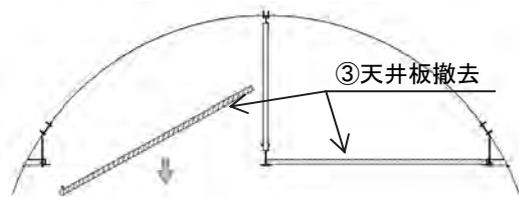


図-8 天井板撤去 (16,710枚)

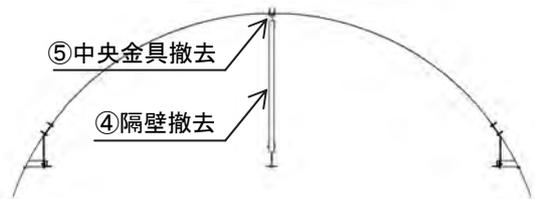


図-9 隔壁撤去 (5,625枚)・中央金具撤去 (834t)

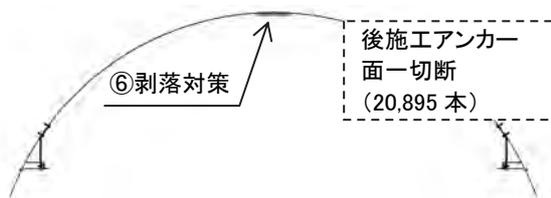
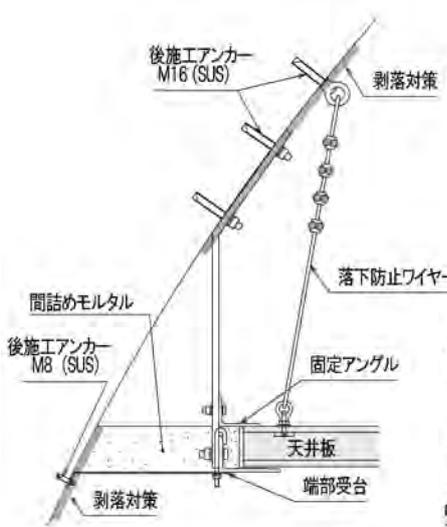


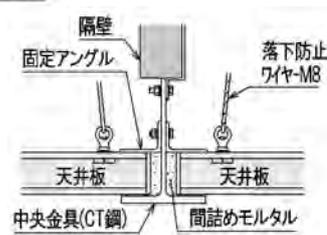
図-10 覆エコンクリート剥落対策 (1,501m<sup>2</sup>)

#### A部詳細



**【剥落対策】**  
後施工アンカー切断部は長期的には落下の恐れがあるため、剥落防止対策として繊維入り補修材を塗布する。

#### C部詳細



#### B部詳細

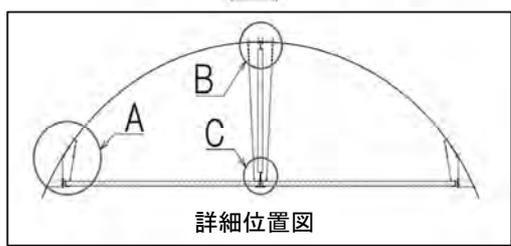
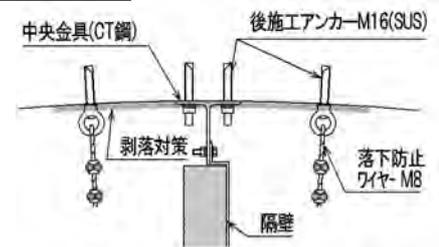


図-11 天井板構造各部詳細

### 3. 短工期実現に向けた天井板撤去の取組み

工事着工時点で全国の約 40 ヶ所のトンネルで吊り方式の天井板の撤去が完了していたが、撤去規模と交通規制形態・期間の施工条件の組合せにおいて、同様の実績はなく、以下の課題やリスクに対する取組みを行う必要があった。

- ① 関連工事の作業を考慮すると、トンネル延長 4.4 km を上下線同時で実質 12 日間という短期間で天井板撤去から覆工コンクリート剥落対策まで完了させなければならない（表-1）。

表-1 通行止め期間中の要求工程

工程	数量	日													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
先行作業	5.130m		4日												
天井板撤去	16,710枚	開口部設置0.5日+撤去7日													
隔壁撤去 中央金具撤去	5,625枚 834t					撤去6.5日									
覆工コンクリート 剥落対策（頂部）	1,501m <sup>2</sup>								5日						
点検歩廊・トンネル 換気設備改修	26ヶ所	11.5日													
路面清掃・点検	4.4km													1日	
（関連工事） ジェットファン設置 換気総合試験					ジェットファン設置10日							換気総合試験1日			

- ② 作業開始後に、採用した撤去方法の施工面や安全面の問題が露呈した場合、短期間の一発勝負なので見直しによる修正・改善が期間内に間に合わない。
- ③ 供用中の高速道路につき、検討した撤去方法の可否やサイクルタイムの事前検証ができない。
- ④ 標準断面以外の異形断面の一部には、撤去に支障となる設備や機械が使えない狭隘箇所が存在するため、全体工程に悪影響を及ぼすロスが生じる（全体撤去数量の約 20%に相当）。

以下、取組みとその成果について詳述する。

#### 3.1 天井板撤去実証実験設備の活用

神戸長田トンネルは供用中で撤去方法の事前検証ができないので、同じ仕様の天井板モデルを設置し、所定のサイクルタイムで撤去できる方法の開発と検証を行うほか、後述するハンドリングマシンのオペレータの習熟訓練施設として活用した（写真-4）。

この実証実験設備での事前検証により、机上の議論では想定していなかった問題もここで判明するなど、この設備の活用は非常に有効であった。



写真-4 天井板撤去実証実験設備

#### 3.2 天井板撤去にハンドリングマシンを採用

天井板の撤去は、通行止め開始直後から実施するメインの作業であり、撤去対象物の中で最も撤去数量が多い。したがって、16,710 枚の天井板を迅速かつ安全に撤去できる方法を確立することが、短工期実現の成否の鍵を握る重要な取組み課題であった。そこで、全国のこれまでの天井板撤去の実績を調査し、当工事の交通規制と施工条件で適用可能と考えた複数の撤去方法の比較検討を行った。その結果、ハンドリングマシンを使用した撤去方法を採用し、前述の実証実験設備で検証と本番に向けた改善を行った（図-12）。

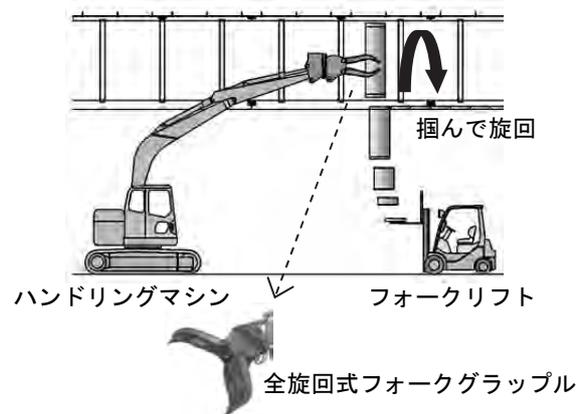


図-12 ハンドリングマシンによる天井板撤去

ハンドリングマシンは、全旋回式フォークグラップルを装備した 0.45m<sup>3</sup>級油圧ショベルである。撤去は、1 枚ずつ天井板を水平に掴んで上に持ち上げて取り外し、そのまま受け形鋼をかわすために旋回、降下して前方に待機したフォークリフトに受け渡して行う。

配置台数は目標とした撤去サイクルタイム 5 分/枚と要求工程 7 日から算出した 12 台に加え、故障時の予備 2 台で合計 14 台とした。0.45m<sup>3</sup>級油圧ショベルは、旋回アタッチメントを装備できる配管 5 本仕様のために流通台数が少なく、当初は調達に難航したが、最終的には機械リース会社の協力を得て新規製作するなどして必要台数を確保した。

また、天井板は中空断面構造で、全旋回式フォークグラブで直接掴むと破損するので、それに取り付けるアタッチメントが必要であった。そこで、実証実験設備で試験を繰り返し行い（写真-5）、天井板とのあたり面やその角度、あたり面のゴムの材質や取付け構造に関して、天井板を把持した際に破損せず、旋回しても滑り落ちないアタッチメントの仕様を考案した。



写真-5 実証実験設備での試験

目標とした5分/枚というサイクルタイムを実現し、さらに短縮するため、フォークリフトのみで仮置きから搬出トラックへの積込作業ができるよう、架台の柱をガイドに天井板の上げ下げとフォークを引き抜ける構造の天井板仮置用の専用架台を考案した。これにより、作業員が石綿を含有する天井板に直接接触することなく、機械との接触リスクなしに撤去・積込・搬出の一連の作業を迅速に行うことが可能になった。本番における天井板撤去の一連の流れを写真-6に示す。



写真-6 天井板撤去作業の流れ

一方、従事予定のハンドリングマシンのオペレータ29名には、事前の実証実験設備でこの流れに沿った天井板撤去作業の習熟訓練を数回にわたり実施した。

以上の取組みの結果、ハンドリングマシンによる天井板撤去は目標サイクルタイムの5分/枚を上回る3分/枚を達成した。ハンドリングマシンで直接撤去できない異形断面の狭隘部や道路施設が近接した箇所では、4.9t吊クローラクレーンを使って1枚ずつ慎重に吊り上げて取外しを行ったが、全体の天井板撤去は要求工程であった7日で無事完了した。

### 3.3 隔壁・中央金具撤去における取組み

天井板以外の隔壁（ALC板）と中央金具の撤去方法についても、実証実験設備で開発と検証を実施し、要求工程以内で無事撤去を完了した。

#### (1) 隔壁の撤去方法（図-13、写真-7）

中央金具に取り付けられた隔壁の撤去方法は、以下の条件を踏まえて検討を行った。

- ① 天井板の作業時制限荷重が $0.98\text{kN/m}^2$ で、撤去した隔壁（ $0.98\text{kN/枚}$ ）を仮置きすると、作業員と使用機材の重量が加わって制限荷重をオーバーする（天井板上の仮置きなし）。
- ② 隔壁は中央金具に3枚1組（重量 $2.9\text{kN/組}$ ）で取り付けられており、隣同士が縦目地の凹凸かみ合わせになっているので、人力で1枚ずつ撤去する場合は縦目地の事前切断が必要になるなど作業効率が大幅に低下する（3枚1組での一括撤去が必要）。

検討の結果、隔壁撤去は、高所作業車から作業員が治具を使って3枚1組の隔壁を反対側に押し出し、 $1.3\text{m}^3$ 級ホイールローダに装着した拡大ホッパーに落下させる方法を考案した（撤去した隔壁は $22\text{m}^3$ 産廃コンテナに直接投入、場外搬出）。

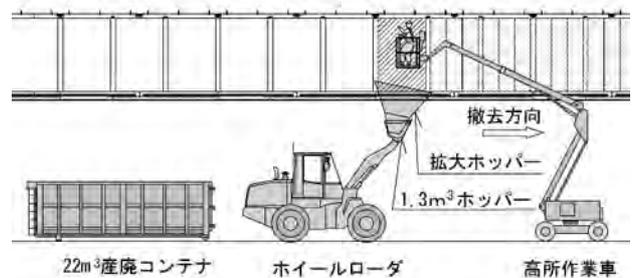


図-13 隔壁撤去時の機械配置（側面）



写真-7 隔壁撤去状況

## (2) 中央金具の撤去方法 (図-14, 写真-8)

中央金具は吊鋼材や水平鋼材を個別に分解して撤去すると手間がかかることから、フォークに中央金具撤去用アタッチメントを装着したハイマスト式フォークリフト (2.5t・5.5m) を使い、構造単位 5.4m を 1 組 (重量 6.4kN/組) として中央金具を取り外して地上付近まで下ろす方法を考案した (撤去した中央金具は 4.9t 吊クローラクレーンで地上に吊り下ろし、ガス溶断で切断分割してスクラップ車で場外搬出)。

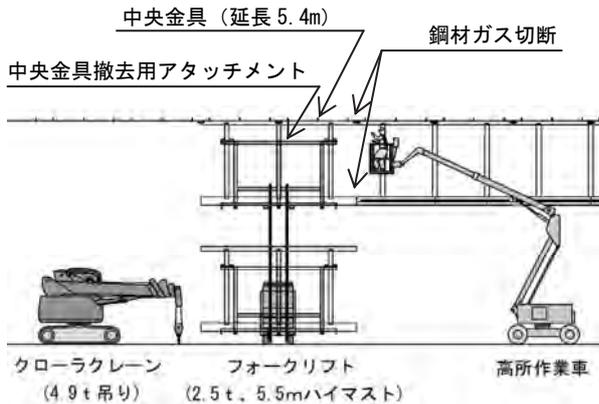


図-14 中央金具撤去時の機械配置 (側面)



写真-8 中央金具撤去状況

フォークの爪に装着した中央金具撤去用アタッチメントは、試作品を製作し、実証実験設備の試験施工で迅速な撤去ができるように改良を重ねて完成させた (写真-9)。



写真-9 中央金具撤去の試験施工

## 4. おわりに

短工期実現に向けた様々な取組みの結果、天井板撤去はその後の剥落対策も含めて要求工程であった 14 日間で無事完了した。その後、引き続き 1 車線規制で側壁部の端部受台の撤去を進め、全ての撤去を平成 28 年 4 月上旬に終えた (写真-10)。



写真-10 天井板撤去完了

最後に、短工期実現の要因として、これら撤去計画が重要であったことはもちろんであるが、人的な要因も大きかったことを強く述べておきたい。計画準備段階で難航した必要人員の確保や大量の機械調達においては多くの方々から支援や協力があり、撤去工事本番では各々の使命感と情熱が現場全体に満ち溢れ、これらのことも短工期実現の大きな要因となった。14 日間の撤去工事に携わった人は、1 日最大で 445 人、延人数は 5,490 人であった。撤去期間中、40 年ぶりの大寒波が押し寄せた厳しい寒さの中、これだけ大勢の人が短期間に 1 つの目的で結集し、成功に導いてもらったことは、どんなに感謝してもしきれない気持ちである。

## 参考文献

- 1) 森川信・高橋政秀: 神戸長田トンネル天井板撤去工事, 土木施工 2016 年 7 月号, pp.104~108
- 2) 高田英樹・村岸聖介・久板正弘・宇留島千明・森口智聡・岩本靖: 短工期を実現した天井板撤去の取り組み, (一社) 日本建設業連合会関西支部・(公社) 地盤工学会関西支部・(公社) 土木学会関西支部・(一社) 日本建設機械施工協会関西支部 施工技術報告会講演概要 2017 年 2 月, pp.17~26

# 34. IH装置を用いた加熱による鋼溶接部の疲労寿命向上に関する 基礎的検討

名古屋大学大学院  
名古屋大学大学院  
名古屋大学大学院  
日本橋梁株式会社

○中村 将章  
Aung May Phyo  
廣畑 幹人  
小西 日出幸

## 1. はじめに

橋梁に代表される社会基盤構造物の高経年化に伴い、多数の損傷や劣化の事例が報告されている。鋼構造物においては、疲労き裂の発生と腐食による部材の板厚減少が主たる損傷の要因となっている<sup>1,2)</sup>。疲労き裂は応力集中の度合いが大きい溶接部において発生することが多く、き裂が主部材まで進展すると構造物の機能や安全性の低下をもたらす。このため、疲労き裂の発生を防止する技術に関する研究が広く実施されてきている。例えば、溶接部に局所的な塑性変形を与え、周辺の母材が変形を拘束することで溶接部に圧縮残留応力を導入するピーニングに関する研究などが実施されている<sup>3),4),5)</sup>。一方、通常の溶接材料を用いると、溶接時の冷却過程における溶接金属の収縮を周辺の母材が拘束することで引張残留応力が生じるが、冷却過程の比較的低温の領域で変態膨張する特徴を有する低温変態溶接材料と呼ばれる特殊な材料を用いることで、溶接部に圧縮残留応力を生成させる方法も検討されている<sup>6)</sup>。いずれの方法も、溶接部の残留応力が疲労寿命に大きく影響することから、溶接部の引張残留応力を圧縮に転じさせ疲労寿命の向上を図るものである。しかしながら、ピーニングなどの機械的処理方法では、溶接部を直接打撃する必要があり狭隘で複雑な継手に対しては施工難度が高くなる問題がある。また、開発段階にある低温変態溶接材料は圧縮残留応力導入効果が得られる反面、非常に硬い性質を有し、疲労以外の特性や施工性に課題があり実施工への本格的な適用には至っていないのが現状である。

これに対し、本研究では異なる残留応力制御方法として、溶接部近傍を加熱し、付加的な残留応力を溶接部に重畳させることで残留応力分布を制御することを考える。そのための熱源として、高周波誘導加熱装置 (Induction Heating, IH) を採用した。IH装置は、電流を印加したコイルを鋼部材に接近させ、誘導電流を部材に発生させその抵抗

熱で鋼材自身の温度を上昇させる方法である。この方法では数秒程度の短時間で鋼材の温度を上昇させることができる<sup>7),8),9)</sup>。IH装置では、ピーニングなどの機械的処理方法が適用できない狭隘で複雑な溶接継手に対しても残留応力を制御できる可能性があり、既設構造物に対する疲労寿命向上技術の選択肢となり得るものと考えられる。本研究では、IH装置による溶接部近傍の加熱により溶接残留応力を制御し、溶接部の疲労寿命を向上させる手法の有用性を検証するための基礎的検討を実施した結果を報告する。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験供試体

本研究では、鋼橋において疲労き裂の発生事例が多い面外ガセット溶接継手を供試体として用いた。供試体の形状および寸法を図-1に示す。板厚12mmのSM400A鋼板(降伏応力:293MPa,引張強度:441MPa)を用い、幅300mm,長さ540mmのベースプレートに幅80mm,長さ120mmのガセットプレートをCO<sub>2</sub>半自動溶接(溶接ワイヤ:490MPa級,直径1.2mm)で接合した。

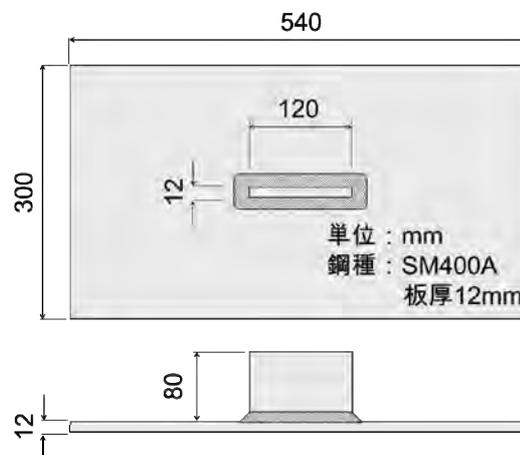


図-1 実験供試体



(a) IH装置主機



(b) インダクションヘッド

図-2 IH装置（防食塗装剥離用）

## 2.2 加熱装置

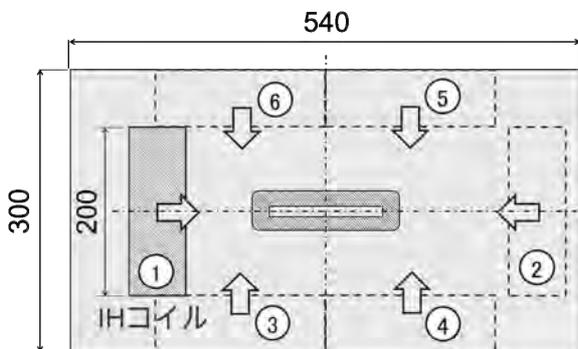
本研究では、鋼橋の防食塗装剥離用の IH 装置（図-2）を利用して供試体の溶接部近傍を加熱した。この装置は400 Vの IH ユニット用発電機と200 Vの冷却水供給ユニット用発電機を有し、20 mのケーブル先端に可搬型のインダクションヘッドを取り付けたものである。インダクションヘッドの幅は200 mmであり、電流を印加したコイルを鋼材に近接させると鋼材に誘導電流による抵抗熱が生じ、数秒から1分未満の通電で鋼材の温度を300 °C程度まで上昇させることができる<sup>9)</sup>。

## 2.3 加熱条件

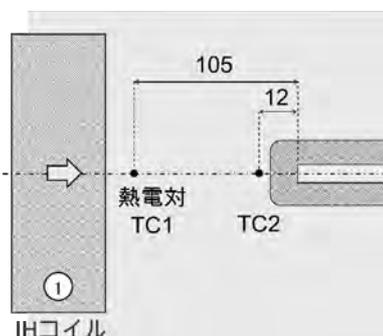
IH装置による供試体の加熱順序および熱電対位置を図-3に示す。幅200 mmのインダクションヘッドを供試体端部から溶接部に向かって、約14 mm/sで移動させながら加熱した。加熱は図の①～⑥の順に実施し、非接触温度計と供試体に取り付けた熱電対（TC1 および TC2）により温度を管理した。加熱においては鋼材の機械的性質の変状が生じない温度<sup>10)</sup>として、250 °C を目標とした。

## 3. 実験結果

### 3.1 温度履歴

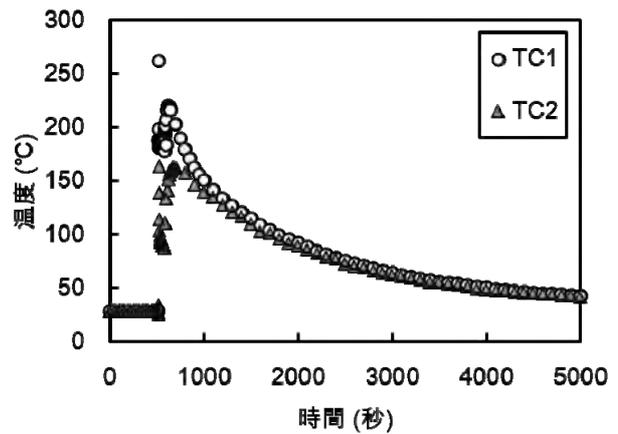


(a) 加熱順序

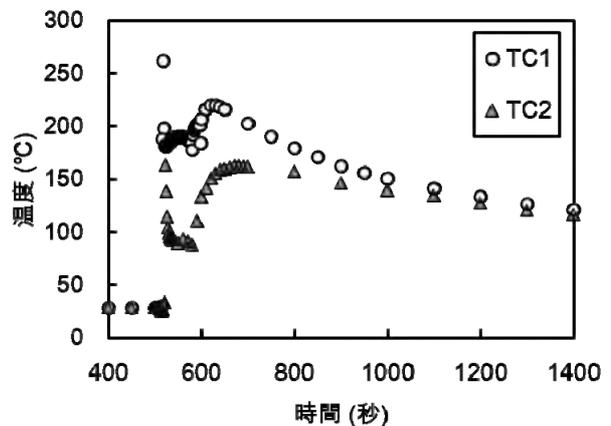


(b) 熱電対位置

図-3 供試体の加熱順序および熱電対位置

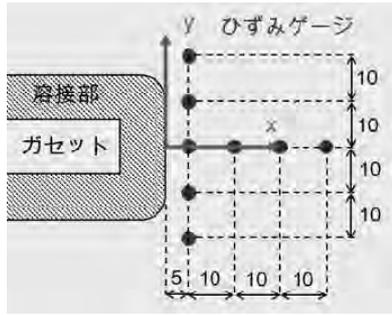


(a) 全過程

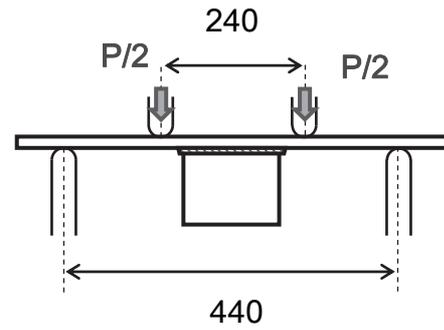


(b) 高温時

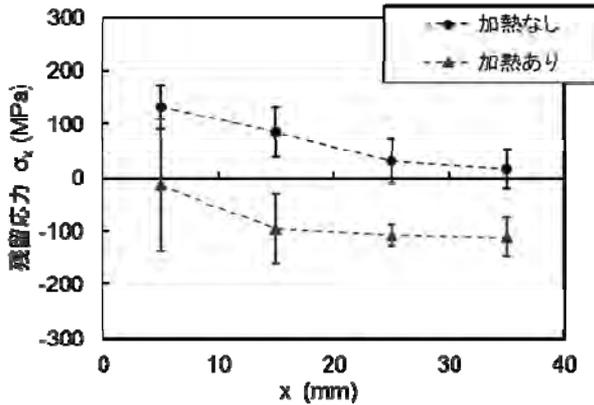
図-4 温度履歴



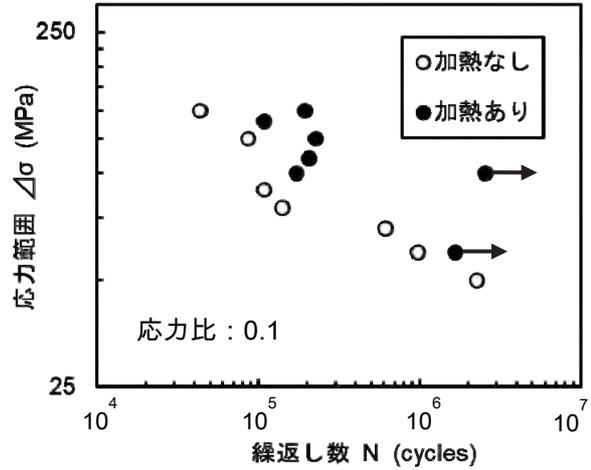
(a) 測定位置



(a) 4点曲げ载荷方法

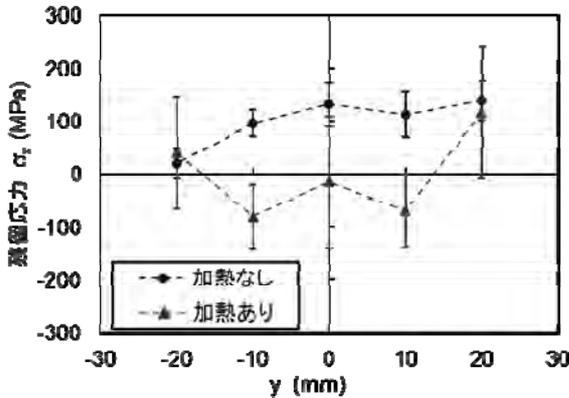


(b) x 軸に沿う方向の応力分布



(b) 疲労寿命

図-6 疲労実験結果



(c) y 軸に沿う方向の応力分布

図-5 残留応力測定結果

このような加熱順序を設定した理由について、①側のまわし溶接部を対象に説明する。まず、①の加熱により、被加熱部を膨張させる。この膨張を被加熱部周辺の温度の低い部分が拘束するため、被加熱部に圧縮応力が導入されると考えた。その後、冷却過程では引張応力が生じると予想されるが、加熱前に導入されていた溶接による引張残留応力の値よりも低減されることを期待した。③～⑥の加熱では、加熱から冷却後に被加熱部には引張残留応力が生じ、この引張残留応力に対し合うように被加熱部からやや離れた位置に圧縮応力が生じると予想されるため、この圧縮応力

がまわし溶接部に重畳されることを期待した。

熱電対により計測した温度履歴を図-4に示す。図-4(a)は加熱から冷却終了までの全過程であり、図-4(b)は加熱過程を中心に高温時を抽出し示している。ガセットプレートから離れた位置に取り付けた熱電対 TC1 の直上近傍をコイルが通過する時に温度が約 260°C に達した。まわし溶接止端部に取り付けた熱電対 TC2 では、コイルが近接した時の温度は約 160°C であった。これは、インダクションヘッド加熱面の縁端部はコイルがなく、TC2 の近傍では溶接ビード部が十分に加熱できていないためと思われる。②以降の加熱は TC1 および TC2 の位置の温度にほとんど影響しなかった。

### 3.2 残留応力測定

加熱前および加熱後の供試体のまわし溶接部近傍にひずみゲージを貼り付け、ゲージ周辺を切断し解放されるひずみを計測することで、残留応力を測定した(応力弛緩法)。得られた残留応力分布を図-5に示す。測定結果は2つの供試体の2箇所のまわし溶接部の応力の平均値および標準偏差を示している。すなわち、1つのデータは4つの測定値の平均値である。また、ここではまわし溶接止端部に沿って発生する疲労き裂を想定し、き裂発生および進展に影響を及ぼす x 方向の応力成分

に注目する。まわし溶接部近傍に生じていた引張残留応力が、IH 装置による加熱後に低減し圧縮に転じている傾向が確認された。

### 3.3 疲労実験

加熱前および加熱後の供試体を用いて 4 点曲げ疲労実験を実施した。4 点曲げ载荷状況を図-6(a) に示す。なお、まわし溶接止端部から 5 mm 離れた位置にひずみゲージを貼り付け、繰返し载荷時のひずみ振幅をモニターした。止端部に疲労き裂が発生、進展するとひずみ振幅が初期値から減少するため、この減少率が 5 % に達した時点を実験における疲労寿命と定義した。疲労実験結果を図-6(b) に示す。IH 装置を用いて加熱した供試体は、加熱なしの供試体に比べ耐疲労性が向上した。応力範囲が 125MPa 以下の条件では、加熱した供試体の疲労寿命は加熱なしの場合の 1.6~2.6 倍程度となった。また、1 体だけではあるが、応力範囲 100MPa の場合は、加熱した供試体は 250 万回以上の繰返し荷重荷を行ってもき裂が発生しなかった。耐疲労性の向上は加熱による引張残留応力の低減に起因するものと推察されるが、残留応力の低減メカニズムについては実験のみでは検証が困難である。よって、熱弾塑性解析によるシミュレーションを実施し、IH 装置による加熱が残留応力に及ぼす影響を検討する。

## 4. 熱弾塑性解析によるシミュレーション

### 4.1 解析モデルおよび解析方法

IH 装置を用いた溶接部近傍の加熱が溶接残留応力に及ぼす影響を検討するため、有限要素法に基づく熱弾塑性解析を実施した。解析モデルを図-7 に示す。汎用有限要素解析ソフト ABAQUS Ver. 6.14 を使用し、8 節点ソリッド要素を用いてモデルを構築した。材料の機械的性質および物理定数の温度依存性は既往の文献を参照した<sup>11),12)</sup>。なお、本解析では溶接入熱ではなく IH 装置による加熱

要素：8 節点ソリッド要素

力学的境界条件：剛体変位のみ拘束

熱的境界条件：空气中への熱伝達

物性値：温度依存型

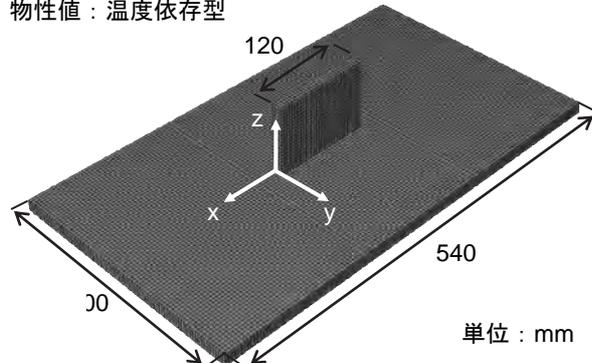
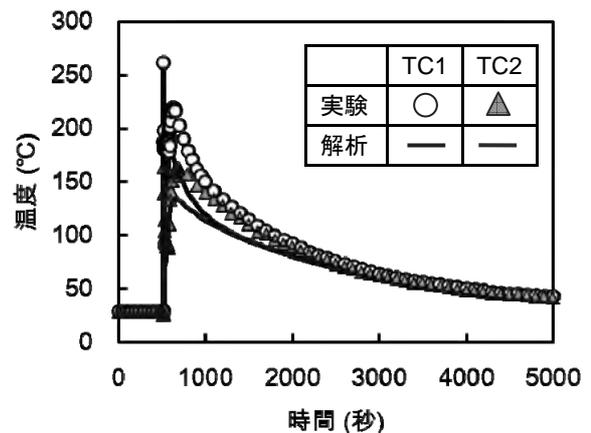


図-7 熱弾塑性解析モデル

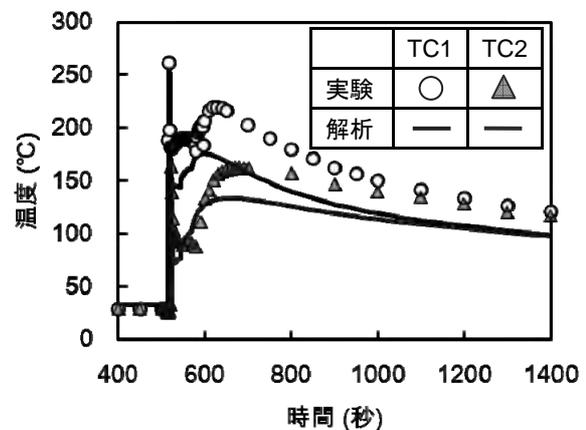
に注目する。このため、溶接ビードはモデル化せず、溶接ビードに相当する位置の要素表面から仮想的な大きさの熱流束を与え、溶接残留応力分布を簡易に再現した。その後、図-3(a) に示す IH 装置による加熱順序を模擬し、モデル表面の幅 200 mm の範囲に対し図の①~⑥の順に入熱を与えた。入熱量の大きさは図-4 に示す実験で得られた温度履歴が再現できるように調整し決定した。

### 4.2 解析結果

IH 装置による加熱順序を模擬した温度履歴の再現結果を図-8 に示す。熱電対 TC1 および TC2 で測定した温度履歴に比べ解析はやや温度が低いですが、その傾向は概ね再現することができた。また、溶接部近傍の残留応力分布の解析結果を図-9 に示す。本解析では、溶接の過程は簡素化し仮想的な入熱を与えたが、溶接部近傍の溶接線直交方向の応力成分  $\sigma_x$  の分布傾向を概ね再現することができた。また、IH 装置による加熱を模擬した入熱を解析モデルに与えることで、溶接により生じた引張残留応力が約 50 MPa 低減される傾向が再現できた。解析では実験結果に比べ残留応力の低減効果が小さいが、これは、図-8 の温度履歴の比較でも示されるように、解析で与えた入熱量が小さかったことが原因と推察される。



(a) 全過程



(b) 高温時

図-8 実験および解析による温度履歴の比較

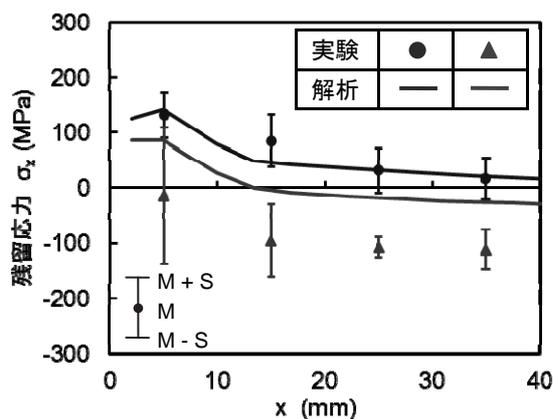
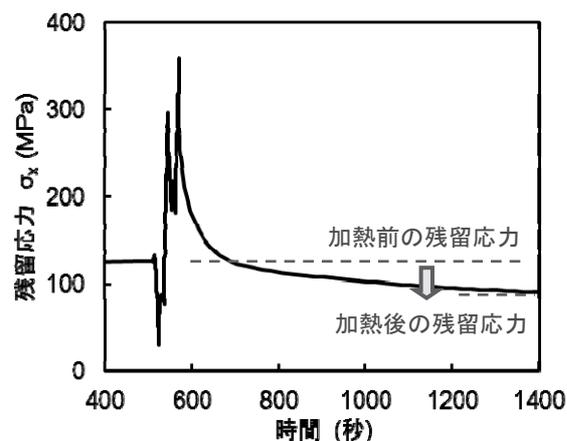
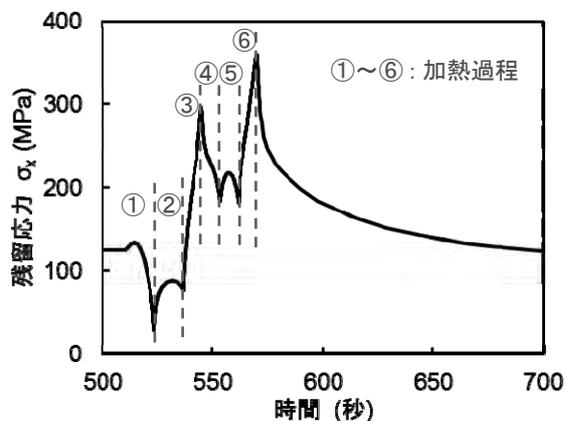


図-9 実験および解析による残留応力の比較



(a) 加熱—冷却過程



(b) 加熱過程

図-10 溶接部に相当する要素の応力履歴

IH装置を用いた加熱により溶接残留応力が変化した理由について検討するため、①側(図-3(a)の左側)のまわし溶接部に注目し、溶接部に相当する要素( $x = 2 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$ , 鋼板表面側の要素)の溶接線直交方向の応力成分  $\sigma_x$  の履歴を図-10に示す。①の加熱過程において、引張応力が低下していることが分かる。これは、3.1で述べたように被加熱部の熱膨張を周辺の低温部が拘束し、非加熱部に圧縮応力が作用すると想定し加熱した結果

の妥当性を示唆している。その後、②の加熱過程では①側はほとんど温度上昇しない。この間に①側の非加熱部は冷却するとともに収縮し、周辺がこれを拘束することで再び応力は上昇する。しかし、被加熱部と周辺の温度差は①の加熱過程の間よりも小さくなっているため、応力の上昇割合はさほど大きくない。続いて、③~⑥の加熱では、冷却後に被加熱部に生じると想定される引張残留応力に対しつり合うように被加熱部からやや離れた位置に圧縮応力が生じると予想し、この圧縮応力がまわし溶接部に重畳されることを期待した。しかし、最終的な被加熱部がまわし溶接部に近付きすぎたため、圧縮応力がまわし溶接部に効果的に重畳されず応力の低減効果がさほど得られなかったと推察される。しかし、加熱前の溶接による引張残留応力の値からは加熱後は応力が低減されており、定性的ではあるが実験による応力低減の傾向が説明できると考えられる。

今後は、入熱方法の再検証により解析精度の向上を目指すとともに、まわし溶接部の引張残留応力をより効果的に低減させるための最適な加熱条件(温度、位置)を明確にすることを課題とする。

## 5. まとめ

IH装置による溶接部近傍の加熱により溶接残留応力を制御し、溶接部の疲労寿命を向上させる手法の有用性を検証するための基礎的検討を実施した。得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 面外ガセット溶接継手を対象にIH装置による加熱を施し、まわし溶接部近傍の引張残留応力を低減する加熱順序を提示するとともに、その妥当性を検証した。
  - (2) 4点曲げ疲労実験を行った結果、まわし溶接部近傍を加熱した継手は無加熱の継手に比べ耐疲労性が向上した。本研究では、溶接部近傍のひずみ振幅が初期値から5%低下した時点を疲労寿命と定義したが、応力範囲が125 MPa以下の条件では、加熱した供試体の疲労寿命は加熱なしの場合の1.6~2.6倍程度となった。また、1体だけではあるが、応力範囲100 MPaの場合は、加熱した供試体は250万回以上の繰返し载荷を行ってもき裂が発生しなかった。
  - (3) IH装置による加熱が残留応力の低減に及ぼす影響を検討するため、熱弾塑性解析によるシミュレーションを実施した。まわし溶接部の引張残留応力が低減される機構を解析により定性的に説明することができた。
- 今後は、入熱方法の再検証により解析精度の向上を目指すとともに、まわし溶接部の引張残留応力をより効果的に低減させるための最適な加熱条件(温度、位置)を明確にすることを課題とする。

## 参考文献

- 1) 玉越隆史・横井芳輝・石尾真理：全国規模の道路橋点検データに基づく鋼橋の劣化の特徴，鋼構造論文集，Vol. 21，No. 82，pp.99-113，2014
- 2) 横山薫・小西拓洋・三木千壽：鋼橋の疲労損傷と補修事例のユーザー参加型データベースの構築とその分析，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 73，No. 1，pp. 126-145，2017
- 3) 森影康・中西克佳・伊木聡・中野隆：母材打撃ハンマーピーニングによる溶接継手の疲労強度向上機構，溶接学会論文集，Vol. 33，No. 2，pp. 111-117，2015
- 4) 島貫広志：超音波衝撃処理による溶接継手の疲労寿命向上効果に及ぼす影響因子，溶接学会誌，Vol. 85，No. 2，pp.10-18，2016
- 5) 崎野良比呂・吉川健一・佐野雄二・角谷利恵・金裕哲：レーザピーニングを大型構造物に適用するための基礎的検討，溶接学会論文集，Vol. 31，No. 4，pp.231-237，2013
- 6) 志賀千晃・平岡和雄：低変態温度溶接材料を利用したの高張力鋼溶接部疲労強度向上技術，溶接学会誌，Vol. 85，No. 8，pp.10-28，2016
- 7) 岡部次美・吉川博・小野秀一・中村順一：IH（電磁誘導加熱）による鋼橋の塗膜除去工法，日本橋梁・鋼構造物塗装技術協会第 17 回技術発表大会予稿集，2014
- 8) 柿添智之・瀧本一也・中山太士・坂本達朗・廣畑幹人：鋼鉄道橋の塗膜除去に対する高周波誘導加熱の適用性検討，鋼構造年次論文報告集，Vol. 24，pp.723-728，2016
- 9) 小西日出幸・鈴木直人・田中正裕・鮫島力・西谷朋晃・廣畑幹人：許田高架橋補修工事における IH 装置による塗膜剥離工法の適用，橋梁と基礎，第 51 巻第 7 号，pp.14-20，2017
- 10) 土木学会鋼構造委員会 火災を受けた鋼橋の診断補修技術に関する研究小委員会：火災を受けた鋼橋の診断補修ガイドライン，土木学会鋼構造シリーズ 24，2015
- 11) 中川弘文，鈴木弘之：鋼梁の崩壊温度，鋼構造論文集 第 6 巻第 22 号，pp. 57-65，1999
- 12) 金 裕哲，李 在翼，猪瀬幸太郎：すみ肉溶接で生じる面外変形の高精度予測，溶接学会論文集第23巻第3号，pp. 431-435，2005

## 謝辞

本研究の一部は，一般社団法人日本建設機械施工協会平成 27 年度研究開発助成を受けて実施した。ここに記して謝意を表す。

## 35. 幅員が狭い橋梁の点検等に適した移動式検査路の開発

(一社) NME 研究所 ○ 牧角 龍憲  
エスイーリペア株式会社 村上 俊明  
西尾レントオール株式会社 藤田 全彦

### 1. はじめに

縣市町村の地方公共団体が管理する橋梁には狭い幅員の橋梁が非常に多い。例えば、平成 26 年度および 27 年度の橋梁点検結果（道路メンテナンス年報<sup>1)</sup>）では、点検を実施した全 18 万 3 千橋の内 8 万 5 千橋（約 46%）が幅員 5.5m 未満である。

そのような幅員が狭く、かつ地上から近接することが困難な橋梁で点検や補修などを行う場合、幅 3m 以上を占有する橋梁点検車は一般交通の妨げになり、住民や公共交通の通行時に作業を中断して回避せざるを得ず、極めて非効率になるとともに利用者に不便をもたらすことになる。一方、吊り足場は、その設置と撤去に多大な工費と時間を要するため、明確な必要性がない限りは採用し難いことになる。

すなわち、幅員が狭い橋梁において、近接目視点検ならびに部分補修工事などを効率的経済的に行える足場はないのが現状である。そこで著者らは、幅員が狭い橋梁において通行規制を必要とせず、複数名搭乗可能で移動しながら連続して点検・補修作業などを効率的に行える装置として、移動式橋梁検査路「ブリッジハンガー<sup>2)</sup>」を開発した。ここに、その報告をする。

### 2. 狭幅員（幅員 5.5m 未満）橋梁の状況

#### 2.1 全国の状況

地方公共団体が管理する地方道の総延長は約 115 万 km であるが、その内 87 万 km（76%）の道路が幅員 5.5m 未満である。この道路幅員の比率を用いて単純に幅員 5.5m 未満の橋梁数を試算すると、地方公共団体が管理する橋長 2m 以上の橋梁数が 62 万橋であるから、45 万橋という多さになる。

地方道は生活道路が大半で接地形式が多いため、橋梁数は試算値より少なくなると想定されるが、平成 26 年度から近接目視を基本とする橋梁点検が義務化されて、その点検結果を集計した道路メンテナンス年報によれば、平成 26 年度と 27 年度における地方公共団体の点検橋梁の約 46% が幅員

5.5m 未満である（図-1）。さらに、その内で橋長 40m 以上は 4,666 橋にもなっている。

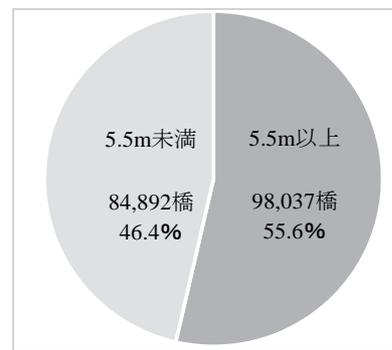


図-1 地方公共団体点検橋梁の幅員別内訳  
（平成 26 年度および平成 27 年度）

#### 2.2 都道府県別の状況

地方公共団体が管理する橋梁の幅員は、地域の地理的特性、路線の種別・幅員、架橋周辺の環境条件などから一様ではない。表-1 に、平成 26 年度および 27 年度における地方公共団体の点検結果に基づいて、幅員 5.5m 未満の橋梁の状況を都道府県別に示すが、幅員が狭い橋梁の比率は都道府県によって異なることがわかる。

幅員が狭い橋梁の比率が 50% 以上は 15 県あり、島根県（65.9%）、高知県（60.0%）、長野県（58.9%）、徳島県（56.2%）、愛媛県（56.0%）の順に多く、四国地方の 4 県はすべて 50% 以上である。一方、北海道（19.7%）、沖縄県（20.1%）、青森県（26.6%）、富山県（28.1%）、大阪府（29.8%）は 30% 以下であり、地域による違いが明白になっている。

表-1 右欄には、平成 30 年度までの 5 年間に行う全橋梁数ならびにそれに実績比率を乗じた狭幅員橋梁の推定値を示している。推定値は約 30 万橋であるが、橋梁点検車が利用できずに近接目視点検の手段が難しい橋梁は未実施である可能性が高く、その数はさらに増えることが想定される。

地方に数多い狭幅員橋梁における近接目視点検等に有効な手段の開発は喫緊の課題といえる。

表-1 都道府県別の狭幅員橋梁数（平成26年度および平成27年度点検結果ならびに管理施設数<sup>1)</sup>）

都道府県名	平成26年度および平成27年度の橋梁点検結果						平成26年度～30年度	
	点検橋梁数	幅員5.5m未満				幅員3.5m 未満	管理橋梁数	幅員5.5m 未満の橋梁 (推定値)
		橋梁数	比率	橋長15m 以上	橋長40m 以上			
北海道	4,719	929	19.7%	372	150	221	25,959	5,110
青森県	2,157	573	26.6%	190	60	134	6,597	1,752
岩手県	2,896	1,338	46.2%	427	131	263	12,683	5,860
宮城県	4,008	1,954	48.8%	250	57	554	11,502	5,608
秋田県	4,752	2,477	52.1%	655	184	615	11,429	5,957
山形県	2,638	1,119	42.4%	353	115	244	8,261	3,504
福島県	4,031	1,625	40.3%	389	94	566	16,385	6,605
茨城県	2,396	1,317	55.0%	225	48	467	14,033	7,713
栃木県	2,577	856	33.2%	283	78	185	12,485	4,147
群馬県	4,187	1,944	46.4%	537	97	843	14,605	6,781
埼玉県	5,224	2,078	39.8%	360	116	963	18,926	7,528
千葉県	2,245	1,080	48.1%	315	82	364	10,616	5,107
東京都	1,890	620	32.8%	217	60	237	5,792	1,900
神奈川県	2,216	948	42.8%	297	87	397	8,180	3,499
山梨県	2,182	932	42.7%	280	102	308	20,764	8,869
長野県	5,606	3,301	58.9%	303	61	1,091	11,360	6,689
新潟県	4,945	2,095	42.4%	654	191	589	8,477	3,591
富山県	3,641	1,024	28.1%	131	30	257	9,299	2,615
石川県	2,268	729	32.1%	129	40	208	7,589	2,439
岐阜県	8,581	4,378	51.0%	680	160	1,229	21,133	10,782
静岡県	8,857	4,334	48.9%	524	92	1,484	24,752	12,112
愛知県	7,735	3,605	46.6%	556	76	1,085	28,454	13,261
三重県	5,696	3,117	54.7%	693	169	956	23,006	12,589
福井県	2,600	946	36.4%	196	24	229	18,323	6,667
滋賀県	3,083	1,027	33.3%	220	43	260	10,900	3,631
京都府	3,264	1,588	48.7%	321	55	651	11,902	5,791
大阪府	2,563	765	29.8%	221	47	320	9,779	2,919
兵庫県	7,655	3,775	49.3%	1,121	249	1,321	27,708	13,664
奈良県	2,179	1,082	49.7%	288	75	427	9,947	4,939
和歌山県	2,401	1,288	53.6%	346	98	646	11,195	6,005
鳥取県	2,402	1,113	46.3%	166	30	351	7,059	3,271
島根県	3,603	2,376	65.9%	565	155	939	13,706	9,038
岡山県	6,438	3,088	48.0%	536	151	1,080	31,441	15,081
広島県	7,591	3,830	50.5%	958	243	1,180	21,416	10,805
山口県	3,182	1,511	47.5%	416	104	487	13,571	6,444
徳島県	4,240	2,381	56.2%	482	132	712	11,810	6,632
香川県	2,647	1,366	51.6%	312	90	387	7,246	3,739
愛媛県	4,220	2,364	56.0%	437	94	771	11,736	6,574
高知県	2,470	1,483	60.0%	476	128	607	12,718	7,636
福岡県	7,526	3,011	40.0%	479	118	828	28,005	11,204
佐賀県	4,004	1,786	44.6%	238	52	523	11,687	5,213
長崎県	2,181	1,128	51.7%	257	50	373	9,644	4,988
熊本県	5,119	2,613	51.0%	619	135	542	19,300	9,852
大分県	2,891	1,524	52.7%	444	105	433	10,243	5,400
宮崎県	3,121	1,515	48.5%	589	160	334	8,925	4,332
鹿児島県	2,102	959	45.6%	243	48	144	9,957	4,543
沖縄県	229	46	20.1%	18	6	9	2,147	431
<b>合計</b>	<b>182,929</b>	<b>84,892</b>	<b>46.4%</b>	<b>18,750</b>	<b>4,666</b>	<b>26,805</b>	<b>662,652</b>	<b>302,817</b>

### 3. 狭い幅員の橋梁に適用できる装置の条件

狭い幅員の橋梁における点検・補修等の作業用足場として、以下の条件が求められる。

- ①設営完了後、一般車両の通行が可能
- ②作業中の路面専有面積の最小化
- ③短時間で設営・撤去が可能
- ④作業員数名が搭乗し、同時作業が可能
- ⑤装置の移動が容易で人力でも可能
- ⑥現地までの運搬が4トン車程度で行える

これらの条件を満たすべく、以下のような検討を行った。

まず、作業中の路面専有面積を最小化して一般車両の通行を可能とするために、橋面上の支持面積を小さくできる吊り（ハング）形式で左右対称の逆門型構造を採用した。次に、短時間で設営・撤去を可能とするために、装置を左右で二分して接地部材、吊り部材および足場部材をユニット化し、それらの接続部を可動にすることにより、組立・解体が容易な構造にした。

装置の組立て時に最も重要になるのが橋梁下面における左右ユニットの足場部材の橋渡しである。高所で安全に行うには人間による作業を最少化する必要がある、種々の方法を試行した結果、吊り部材の足場部材を支持する箇所すべてにローラーをつけ、それにより足場部材を容易に送り出せる方法が安全かつ確実であることが確認された。

次に、数名が搭乗可能な足場部材にするために、中央の接合部をオスメス構造にして緊結し、手摺材も一体構造とすることにより、従来の検査路規格に準じた剛構造にした。そして、装置の移動を容易にするために、橋面上の接地部3点のすべてに車輪（キャスター）構造を採用した。

幅員が狭い橋梁は、当然ながら幅員が狭い道路の路線にあるため、大型車では装置の搬入出が困難な場合が生じやすい。そこで、4トン車でも運搬可能にするために、ユニット部材を折り畳み構造にし、かつ2ユニットが荷台に並置可能な形状にした。その際、運搬時の荷長さを制限寸法内にし、かつ桁高が異なる橋梁に対応可能にするために、吊り部材を伸縮可能な構造にして調整した。

以上の検討を重ねた結果、4tデリック車で運搬可能な狭幅員橋梁用移動式橋梁検査路「ブリッジハンガー」が完成した。これを実橋において設営した状況を写真-1に示す。

### 4. 移動式橋梁検査路の実用化と検証

#### 4.1 仕様と耐荷性能確認試験

ブリッジハンガーの全容を写真-2に示す。作業ステージは幅600×長さ4380~7175mm（可変）で、一般車両交通が可能な間隔を確保できる状態で橋梁幅員3800~7180mmに対応でき、また、左右の



写真-1 ブリッジハンガーの設営状況



写真-2 ブリッジハンガーの全容

吊下げ部は昇降路兼用で桁下高さ925~2625mmに対応した可変式である。橋面には移動車輪で設地し、路面上の高さは地覆高欄の状況に対応できるように400mmの伸縮幅を設けている。

装置の左右片側をそれぞれ1ユニットとして、運搬時は作業ステージと吊下げ部を折り重ねて4t車に載せ、設置時は、デリッククレーンを用いて片側ユニットを組み立てた後に残りのユニットを組み立て、作業ステージ中央で堅結して完成させる仕組みで、設置および解体に要する時間は約30分である。

ブリッジハンガーの定格荷重は300kgf/8.4m<sup>2</sup>としており、その耐荷性能を確認するため工場内の模擬橋梁に設置した状態（写真-2）で、作業ステージ中央に400kgfを載荷した時のたわみを計測した。除載荷を5回繰り返して計測した結果、載荷時たわみは18mmで除荷時はすべて0mmであり、安全性が確認された。

#### 4.2 実橋における検証結果

開発段階の試作機も含めて、すでに20橋（平成29年8月現在）の現場において、本機を用いた橋

梁点検等の業務が行われている。20 橋ではあるが、各橋梁は構造形式や用途によって様々であり、とくに地覆・高欄、縦断勾配、ピア形状、添架物状況などは、同一のものが無いのが現状である。そのような様々な現場条件下で対応できるよう検証しつつ、本機の改良を積み重ねている。

実橋検証においては、一般車両の交通を阻害しないため、利用する住民から驚かれるとともに感謝された事例がある（写真-3）。また、本機の移動は人力で容易に出来、数%の縦断勾配でも移動可能であることが確認されている（写真-4）。橋梁側面に添架物が設置されている場合、その架台（アングル等）が高欄から外側に 35cm 張り出した状態でも対応できることを確認している（写真-5）。



写真-3 作業時における一般車両の通行状況



写真-4 人力による装置の移動状況



写真-5 35 cm張り出した添架物がある橋梁での状況

狭い幅員の橋梁においては重量規制がある橋梁も多く、そのような場合においても、車両を橋外に駐車してデリッククレーンにてユニット部材を橋端で組立て、完成後に点検箇所へ移動する作業が短時間で行えることを確認している（写真-6）。



写真-6 重量規制がある橋梁での設営状況

## 5. おわりに

膨大な数の橋梁点検を行うに際しては、限られた予算の中で、効率的かつ安全に遂行できる手段の確立が必要不可欠である。その実現に向けて、本機が貢献できれば幸いである。

### 参考文献

- 1) 国土交通省、道路メンテナンス年報（平成 26 年度）および同（27 年度）、データ集（地方公共団体）
- 2) NETIS:QS-160032-A 移動式橋梁検査路（ブリッジハンガー）

## 36. 画像処理を用いたダム堤体の外観調査

### UAV マルチコプタ撮影画像によるひび割れ抽出例

安藤ハザマ  
同  
同

○ 野間 康隆  
武石 学  
澤田 純之

#### 1. はじめに

社会インフラが老朽化していくなか、厳しい財政状況や技術者不足の状況下であっても維持更新が可能となる技術の開発が求められている。維持更新のためのインフラ点検業務では河川橋脚やダム堤体など大規模な足場設置が必要で墜落の危険がともなう場合もあり、これらの点検に費用、人手や時間がかかることが課題となっている。

これらの解決策として、対象物を遠方から撮影し、劣化具合やひび割れ箇所を調査する方法もあるが、カメラ解像度の関係からひび割れ幅や長さなどの詳細な情報を得るには限界がある。UAV マルチコプタ（以下 UAV）を適用することで対象物を近接撮影する方法も試みられているが、既存の UAV には安全に対象物に接近する機能は装備されていないため、操作者の操作ミスや GPS 測位精度の限界から接触、墜落する懸念があった。

そこで、筆者らは、撮影対象物まで安全に接近してひび割れを自動で検出できる「構造物のひび割れ検出システム」を開発し、実用化した。

#### 2. システムの概要

##### 2.1 システムの機器構成

今回開発した「構造物のひび割れ検出システム」は、衝突回避機能付き UAV と当社独自の画像処理アルゴリズムを用いたシステムで、以下の 2 つの機器で構成されている。

##### (1)衝突回避機能付き UAV（写真-1）

- ・マルチロータ式 UAV：6 ロータ、離隔距離制御用のワンボードマイコン装備
- ・ペイロード：4kg
- ・耐風性能：10m/秒
- ・小型レーザ距離計：写真-1,表-1 参照

表-1 レーザ距離計の仕様

重量	22g
大きさ	20mm×48mm×40mm(B・W・H)
測定範囲	0~40m
精度	±25mm
測定周波数	500fps
レーザークラス	1

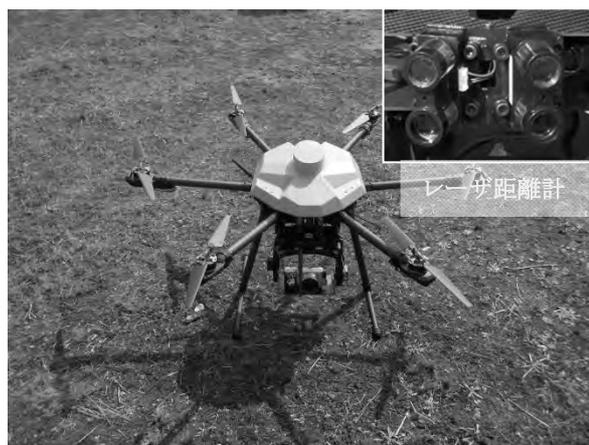


写真-1 衝突回避機能付き UAV

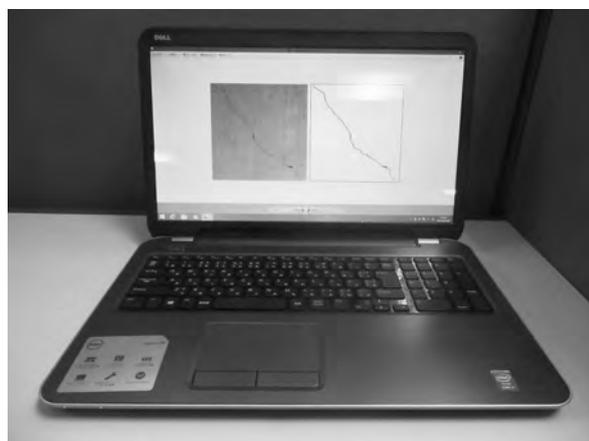


写真-2 ひび割れ抽出システム

##### (2)ひび割れ抽出システム（写真-2）

- ・画像処理用パソコン
- ・ひび割れ抽出画像処理プログラム

##### 2.2 システムの仕組み

##### (1)衝突回避機能付き UAV

- ・2つのレーザ距離計で前方の対象物までの距離を計測し、測定した距離を基にワンボードマイコンで離隔距離を保つようフライトコントローラを制御している。

## (2)ひび割れ抽出

UAV に搭載したカメラで取得した画像を画像処理用パソコンに転送し、ひび割れ抽出画像処理プログラムで処理を行うことで、ひび割れ抽出を行う。ひび割れ画像とこの画像からひび割れを抽出した結果の一例を図-1 に示す。この事例のように本システムを使用すれば、図-1(a)に示すようなひび割れ画像から、図-1(b)に示したひび割れ抽出結果が得られる。

使用したひび割れ抽出は下記の手順で行った。

- ①コンクリート背景色調の演算：メディアンフィルタを使用して、画像の全領域でコンクリートの背景色調を計算する（コンクリート表面の背景色調の処理は、藤田らの研究<sup>1)</sup>を参考にした）。
- ②背景色調より暗い箇所抽出：①で求めた背景色調より一定の閾値で暗い箇所を抽出する。
- ③幾何学的特徴を使用したひび割れ領域の選別：抽出した箇所の面積と細長比を用いた幾何学的な特徴からひび割れ部のみを抽出する。

また、本研究ではエフロッセンスが充填したひび割れの検出も行ったが、この際は、画像の黒白を反転させ上記の処理を実施することで、このようなひび割れの検出を行った。

## 2.3 システムの特長

本システムの特長は 3 つあり、これらの特長がシステムの安全、効率化に寄与している。

### (1)UAV の特長

- ・前方の対象物から指定した離隔距離を保って飛行できる
- ・2 つのレーザ距離計により対象物に対して UAV を正対させることができる
- ・離隔保持機能の作動中でも上下左右、対象から離れる方向への操作ができる

### (2)撮影の特徴

- ・対象物に近接することで高精細な撮影ができる
- ・カメラから撮影対象までの距離が一定となることで写真画素サイズも一定となり、それを基にしたひび割れ長さの算定ができる
- ・UAV が正対して撮影することで正面からのゆがみのない撮影ができる

### (3)ひび割れ検出プログラムの特徴

- ・パラメータを数個設定することで、ひび割れを撮影した画像からひび割れの抽出ができる。
- ・コンクリートに汚れや影が入った場合でも安定してひび割れ抽出を行うことができる<sup>1)</sup>。
- ・黒色の線状部を判定する方法を使用しているため、型枠跡等も抽出することがあるが、ひび割れを概ね自動的に抽出することができる。

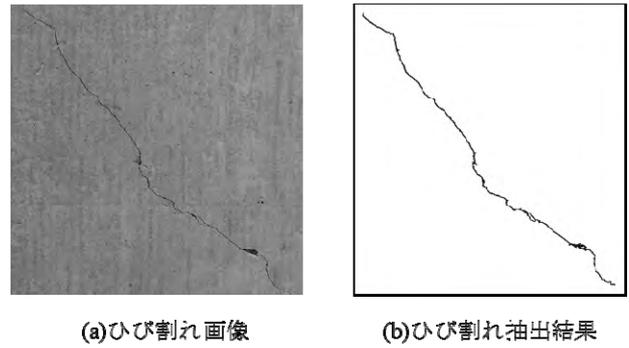


図-1 ひび割れ抽出例



写真-3 横川ダム

## 3. 実用化に向けた実証実験

### 3.1 実証実験の概要

福島県および経済産業省・内閣府が共同で進める「福島浜通りロボット実証区域での実証試験」に採択されている福島県南相馬市の横川ダム(写真-3)において、UAV 撮影画像からのひび割れ抽出の可能性の確認を目的としてひび割れ調査に関する実証試験を実施した。

### 3.2 実験項目

本試験の検討方法としては、まず、ダムの近接構造物(写真-3 のダム堤体下部中央)に発生しているひび割れを対象に、目視、クラックスケールでの計測、三脚による固定状態での撮影画像を用いたひび割れ解析、UAV を飛行させ空撮した撮影画像を用いたひび割れ解析を比較することで本システムの有効性の検討を行う。

次に、幅の既知な黒色の線を使用した模擬ひび割れを対象に(場所は、写真-3 のダム堤体下部中央)、三脚による固定状態での撮影画像を用いたひび割れ解析、UAV を飛行させ空撮した撮影画像を用いたひび割れ解析を比較することでシステムの検出精度の検討を行う。

最後に、ダム堤体のひび割れの UAV を飛行させ空撮した撮影画像を用いたひび割れ解析を行う。

### 3.3 実験の手順

実験では、表-2 に示すひび割れを対象として計測あるいは撮影を行った。

ひび割れの計測では、目視によるスケッチ図の取得とクラックスケールによるひび割れ幅の計測を行った。撮影に関して、三脚と UAV を使用してひび割れや模擬ひび割れ周辺を撮影し、UAV で撮影した画像がブレによる影響を受けていないか検証した。この際の調査範囲は、UAV が落下しても回収可能な場所で実施し、オペレータと画像撮影の指示者を設けるなど安全に配慮した。使用したカメラは sony 製  $\alpha$  6000 で画素数は、 $6000 \times 4000$  画素である。レンズには、焦点距離 35mm の単焦点レンズを使用し、ISO 感度は 800、プログラムオート(シャッター速度と絞りの自動設定)の機能で撮影した。

得られた画像を基にひび割れ検出解析を実施した。この際、画像の収差補正は実施していない。

### 3.4 実験の結果

ダム近接構造物のひび割れの計測・抽出結果を図-2 に示す。図-2(a)に対象とするひび割れを示す。このひび割れを、三脚と UAV を使用して撮影した画像を図-2(b)(c)に示す。この際、ダム近接構造物

とカメラの距離は、4.1m であり、分解能は 0.5mm である。この図から撮影方法によらず同様な画像が取得できたことが確認できる。目視、クラックスケールによる計測結果を図-2(d)に示したように今回対象としたひび割れ幅は、0.3~1.4mm 程度であった。三脚と UAV を使用して撮影した画像の図-2(b)(c)の破線で囲まれた領域を使用してひび割れ抽出を行った結果を図-2(e)(f)に示す。三脚と UAV を使用して撮影した画像を解析することにより検出されたひび割れは、目視による結果と相違ないことがわかる。また、撮影方法による影響も見られなかった。これにより本システムのひび割れ検出の有効性が確認された。クラックスケールによる計測結果から、検出したひび割れの最低値は 0.3mm であり、三脚と UAV を使用した画像解析結果から、分解能 0.5mm に対し、0.3mm のひび割れが抽出できることが分かった。しかしながら、エプロセッサがひび割れ周辺に存在し、クラックスケールによる計測よりも幅の大きい白色領域を抽出している可能性もある。そのため、システムの検出精度の確認は、あらかじめ用意した幅の既知な黒色の線を使用した模擬ひび割れを使用し行うことにした。

上記構造物にあらかじめ用意した模擬ひび割れの抽出結果を図-3に示す。三脚と UAV を使用して撮影した画像を図-3(a)(d)に示す。この際、ダム近接構造物とカメラの距離は、4.5m であり、分解能は 0.5mm である。三脚と UAV を使用して撮影した画像である図-3(a)(d)の中で破線で囲まれた領域の拡大したものを図-3(b)(e)に示す。また、図-2(b)(c)を使用してひび割れ抽出を行った結果を図-2(c)(f)

表-2 計測あるいは撮影対象のひび割れ

No.	計測あるいは撮影対象のひび割れ
1	ダムの近接構造物のひび割れ
2	幅 0.2,0.4,0.6,0.8,1.0,1.2,1.4mm の黒色の線を印刷紙に印刷し、これをダムの近接構造物に設置することで模擬ひび割れとしたもの
3	ダム堤体のひび割れ

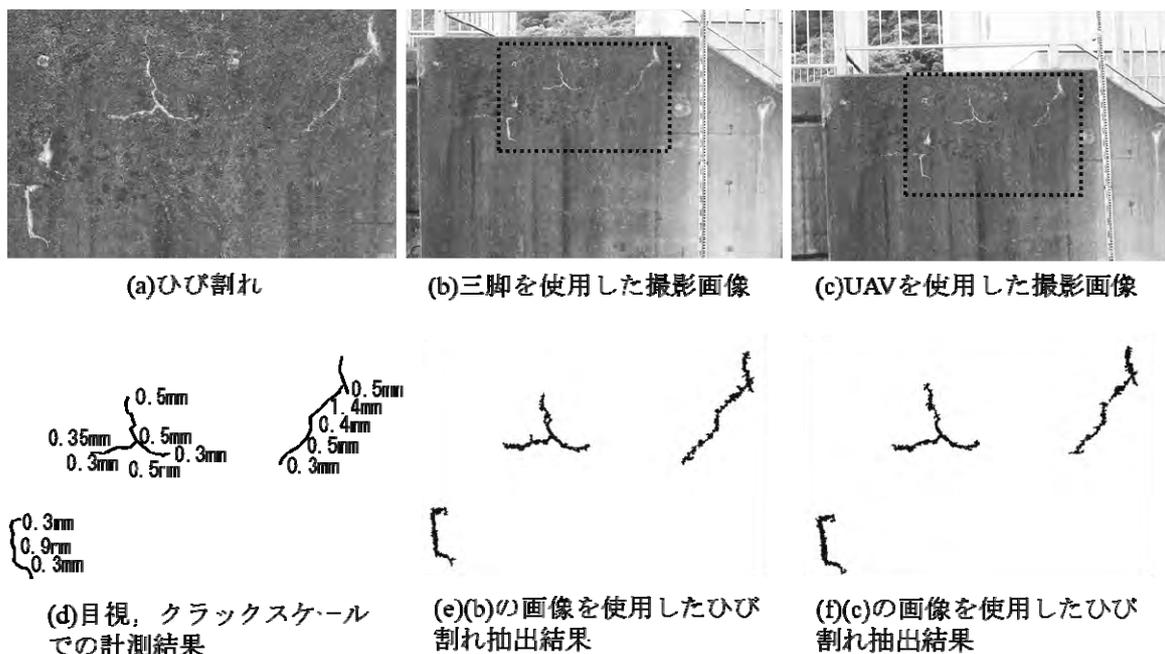


図-2 ダム近接構造物のひび割れの計測・抽出結果

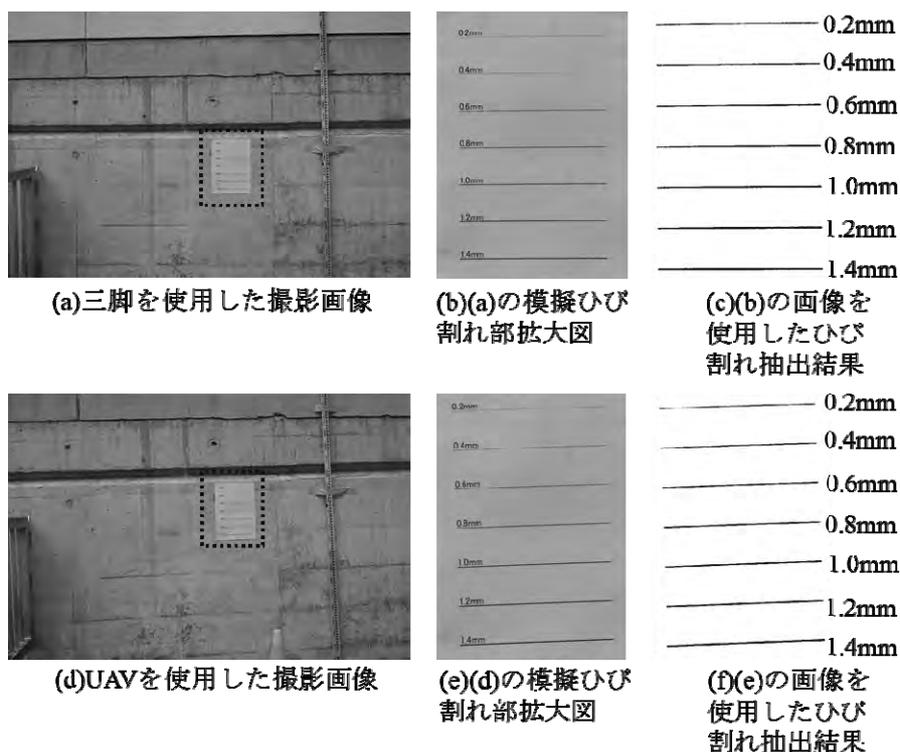


図-3 模擬ひび割れの抽出結果

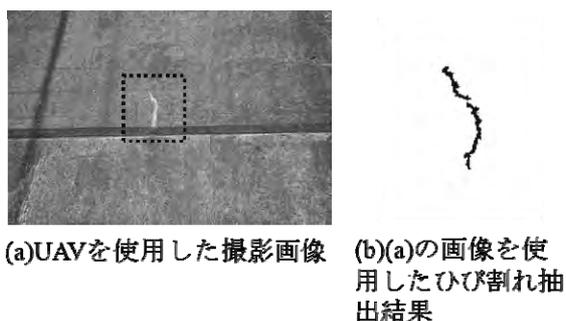


図-4 ダム堤体のひび割れの抽出結果

に示す。

これらの図から撮影方法によらず、0.2mm以上の模擬ひび割れが確実に抽出できているのが確認できる。コンクリート構造物では、防水性から補修の必要なひび割れ幅は、0.2mm以上とされている<sup>2)</sup>。実際には、コンクリートの汚れなど背景色調の影響等に関して検討を行う必要があるが、本システムでこのようなひび割れを検出できる可能性を示すことができた。

最後にダム堤体のひび割れの抽出結果を図-4に示す。UAVを使用して撮影した画像を図-4(a)に、図-4(a)の破線で囲まれた領域のひび割れ抽出を行った結果を図-4(b)に示す。この画像は、ダムの傾斜によるあおり補正等を実施したものではないため、幾何学的に正確なものではないが、ダム堤体のひび割れを正しく検出することができた。

以上のように本実験からUAVを用いたひび割れ検出システムによりダムのひび割れ幅(0.2mm以

上)を検出できる可能性を示すことができた。

#### 4. おわりに

本試験では、衝突回避機能付きUAVが壁面から一定の距離を保ちながら安定して飛行し、近接して高精細な撮影が可能であることを確認した。また、撮影した画像解析は、ひび割れ幅を定量的に考慮したひび割れの検出が可能であることを確認した。

現状の結果では、経年劣化部の色調変化に対応した測定精度の向上、状態変化による異物の抽出、など課題が残っているものの、これらは技術改良により解決できるものと考えられる。今後は、ダム、橋梁、橋脚等の一般的なコンクリート構造物のひび割れ点検調査に活用するため本システムの改良を進めていく所存である。

#### 参考文献

- 1) 藤田 悠介・中村 秀明・浜本 義彦：画像処理によるコンクリート構造物の高精度なひび割れ自動抽出，土木学会論文集F，Vol.66・No.3，pp.459～470，2010
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針，2003，pp.61，2003

## 37. 大水深対応型水中作業ロボットの活用事例と今後の展望

東亜建設工業株式会社

○小川 和樹 飯田 宏

### 1. はじめに

水中での潜水作業の安全性と施工能力向上を目的に「水中バックホウ」が平成7年に開発・実用化され、現在までに遠隔操縦に対応した機種の開発も行われているが、耐水深に関しては水深50mまでしか対応していないのが現状である。耐圧性能向上を目指し、平成26年に開発した大水深対応型水中作業ロボット(写真-1)(以下「本ロボットとする」)は、設計耐圧水深を3,000mとしている。この性能を活かし、大水深下までの海洋調査・作業から、海底資源開発に至るまで、幅広い用途での活用を視野に入れている。現在までに、マニピュレータ先端に取り付けた光学式カメラを用いて、海底ケーブルの敷設状況調査、放水路内部での堆積物確認調査など、調査用ロボットとして実績を重ねてきた。本稿では、これまでに現場で活用した事例と共に、今後の展望について報告する。

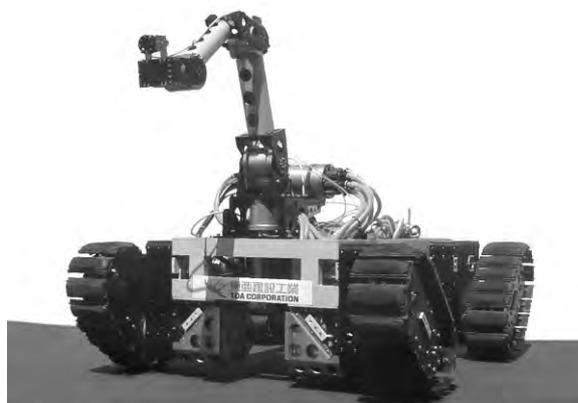


写真-1 水中作業ロボット本体

### 2. ロボットの概要

本ロボットは電動駆動方式を採用しており、遠隔による操作を行う。足回りにはクローラを4基装備しており、1基ずつ単独で可動させることが可能である。また各クローラには小型の調査ロボットなどで実績のあるフリッパー機構を採用しており、クローラを360°回転させることができる。この機構により、凹凸のある場所での走行性能を向上させている。

機体上部には4軸式のマニピュレータを搭載しており、先端に作業ハンドやコアリング装置等を取り付けることにより、様々な作業が可能となる。

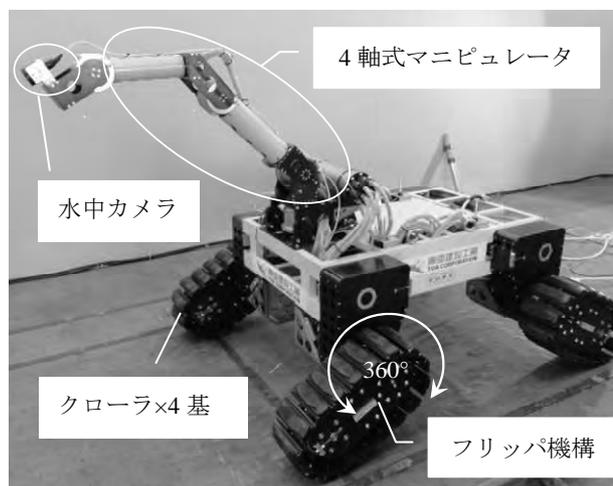


写真-2 水中作業ロボット概要

#### 【装置主要目】

寸法	2.25×1.65×2.20m (L×B×H)
駆動方式	電動式
質量	約1.0t
耐圧性能	水深3,000m 耐水圧
操作方式	遠隔操縦
通信方式	光ファイバー通信
装備	4軸マニピュレータ 光学式水中カメラ 水中音響カメラ搭載可能 3Dソナー搭載可能

#### 【特徴】

- ① アクチュエータには水深3,000m相当の耐圧試験<sup>1)</sup>を行い、仕様通りの耐水圧性能を確認している。
- ② フリッパー角度調整可能な4つのクローラを装備しており、不陸のある場所での走破性能を向上させている。
- ③ 小型軽量の装置であるため、運搬や搬入に大型の設備が不要であり、狭隘な環境下でも導入し易い。
- ④ 無人化施工可能な、遠隔操縦システムを採用している。
- ⑤ 簡単なフレーム構造であるため、多様な装備が可能である。
- ⑥ 波浪や潮流の影響を受けやすい橋脚下部、岸壁の調査・補修にも活用可能である。

### 3. 活用事例

#### 3.1 海底ケーブル敷設状況調査

我が国には数多くの離島があり、送電用や通信用の海底ケーブルも数多く敷設されている。一昨年の10月に、九州地方の離島間に敷設された海底ケーブル調査において本ロボットが適用された。

海底ケーブル調査の目的は、敷設状況の確認と、敷設ルート上の位置確認であったが、この種の作業にはスラスタを搭載した泳動型ROVが有用である。しかし、海岸線（波打ち際）から浅い海域や、波浪の厳しい海域、本調査場所のような潮流の速い海域などでは泳動型ROVによる作業が難しいため、クローラ型のROVである本ロボットを採用した。

本ロボットの気中重量は約1.0t、大きさも2tトラックで運搬できる程度であり、20kVA以上の発電機1台のみで運用することができるため、潜水作業に利用される小型船舶で運用可能である。本調査業務では、潜水士船の船尾ガントリーに本ロボットを吊り下げ現場海域まで運搬し、そのまま潜水士船のウインチを用いて沈降を行った（写真-3）。



写真-3 潜水士船への搭載状況

写真-4には現場海域での本ロボット稼働状況を示す。海底ケーブル調査は、送電用1系統と通信用1系統で調査対象区間の水深は10～20m程度、調査したケーブルの総延長は約500mとなった。現場の海底地形は一部に岩礁や転石もある砂地盤であったため、海底ケーブルの一部は砂に埋もれた形で埋設されており、調査が難しい箇所もあったが、ケーブルの通りを確認しながら本ロボットを走行させることにより、ケーブル敷設座標、水深、敷設状況を確認することができ、所期の目的を達した。また点在していた障害物は、フリック角度を調整し、障害物に合わせて本ロボットの姿勢を変化させることにより安定した走行を可能とした。

現場海域の透明度は非常に高く、マニピュレータ先端に搭載した光学式水中カメラで十分に視認可能であった。また船上にて本ロボットの走行状況を確認すべく、本体後方に俯瞰用のカメラを搭載し（写真-5）、操縦をサポートする形で調査を行った。

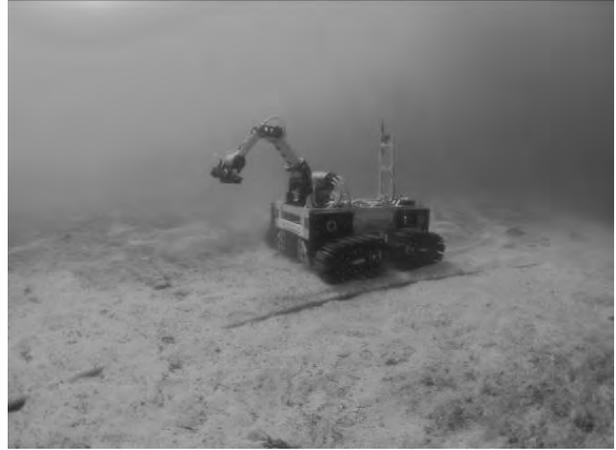


写真-4 海底ケーブル調査状況



写真-5 俯瞰用カメラ映像

#### 3.2 放水路内での堆積状況確認調査

暗渠の維持管理では、経過年数による劣化や生物の付着、土砂の堆積により機能が低下する恐れがあるため、定期的に調査を行い、状況によっては補修や堆積物の除去を行う必要がある。水中構造物における調査や補修工事は、潜水士による作業が一般的であるが、暗渠での作業は安全面から制約が多く、水中を走行することができる機械による対応が望ましい。

当社で保有する水中作業ロボットは、本ロボットの他にも遠隔操縦型の水中バックホウ（写真-6）があり、これまでに数多くの工事に活用してきた。水中バックホウのアタッチメントは、用途に応じて換装することができ、放水路内部の調査以外にも、堆積物を除去する等、多岐にわたる作業に対

応可能である。しかし、狭隘な環境下での作業は、サイズの水中バックホウのような重機での走行は厳しく、設備も大がかりになる。その点、本機は、小型の水中作業ロボットであるため狭隘箇所でも進入が可能であり、運用も 20kVA 以上の発電機 1 台で行うことができる。これらの点から、今回の調査業務では小型軽量で大型設備を不要とする本ロボットが採用された。



写真-6 水中バックホウ (イエローマジック7号)

放水路内部の調査を行うにあたり、障害物の状況を把握し、走行経路を確認しながら操作を行う必要がある。透明度の高い水域で作業を行う場合は、マニピュレータ先端に標準装備している光学式水中カメラのみによる視認も可能であるが、今回調査を行った暗渠は非常に狭隘であり、クローラ走行により発生する濁りによって、光学式水中カメラの映像のみでは走行することが難しい状況であった。そこで今回の調査業務では、周囲を常時確認できる映像を取得すべく、水中音響カメラ (写真-8) と、3D ソナー (写真-9) を装備した。



写真-7 機材搭載状況



写真-8 水中音響カメラ本体

表-1 水中音響カメラ仕様

動作周波数	1.1MHz / 1.8MHz	
ビーム幅	水平	0.6° / 0.3°
	垂直	14°
ビーム数	48 本 / 96 本	
視野角	29°	
耐水深	300m	



写真-9 3D ソナー本体

表-2 3D ソナー仕様

送信周波数	375kHz / 375kHz ,610kHz
ビーム数	128×128
ピン・レート	最速 12Hz
探査レンジ	1~120m / 1~120m, 1~90m
レンジ解像度	4.0cm
探知範囲	最大 50°×50°
耐水深	600m

水中音響カメラと、3D ソナーを現場に導入するにあたり、本ロボットへの取り付け方法と、実際にどのように視認できるのか確認すべく、事前に試運転を行った（写真-10）。

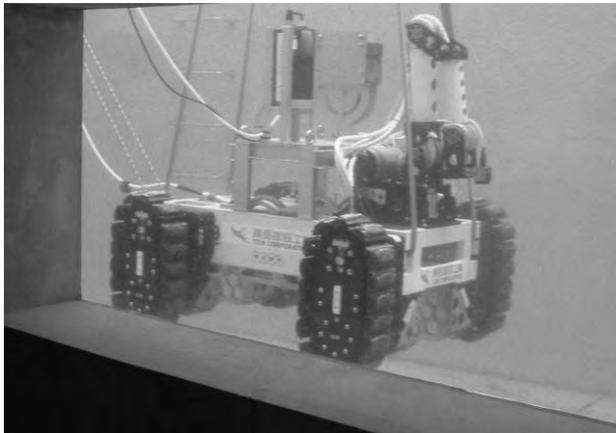


写真-10 試運転状況

今回使用した水中音響カメラは、1.8MHz及び1.1MHzと極めて高い周波数の超音波を使用した音響ビデオカメラであり、音響ビームによる反射でターゲットを映像化するものとなっている。実際に取得した映像を図-1に示す。画面左側が放水路内左壁面、右側が右壁面となり、今回の調査では本ロボットの位置から10m先までの映像を取得し、放水路内部を上から俯瞰的に見下ろすような形で確認しながら調査を行った。水中音響カメラの映像により、壁面との距離と障害物の位置情報をリアルタイムで取得でき、常時安定して走行することが可能であった。

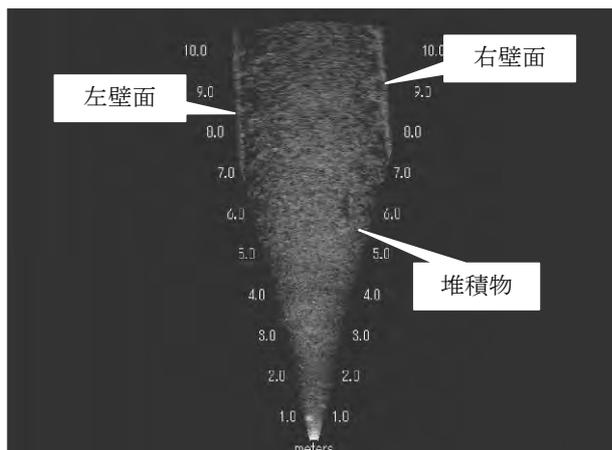


図-1 音響カメラ映像

3D ソナーにて取得した映像を図-2に示す。実際に撮影された映像から、ほとんど堆積が無く平坦な場所でも、水中の遮蔽物やノイズなどの影響を受けて、堆積物があるような凹凸が多く見られたため、3D ソナーにて堆積状況を正確に把握するこ

とは難しい印象を受けた。しかし比較的大きな堆積物（高さ 300 mm程度）に関してははっきりと確認することができた。また底面の堆積状況によってはクローラの走行痕が残るため、音響カメラによる映像と併用し操縦の目安として用いる分には有効的であった。

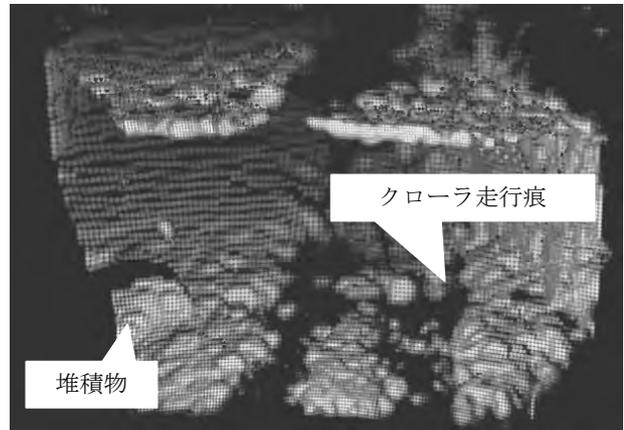


図-2 3D ソナー「Echoscope」映像

壁面に付着した堆積物の調査は、本ロボットのマニピュレータ先端に搭載した光学式水中カメラを用いて撮影した（写真-11）。また、本体左側面にも同カメラを搭載し、壁面と本体との間隔を確認しながら走行した（図-3）。

放水路内は、通常より流量を減らしながらも排水を行っており、常時流れがある状況であった。しかし、本ロボットの走行時に発生した濁りが滞留してしまい、水中ライトの光によって撮影した映像がハレーションを起こしてしまうことから、光学式水中カメラで調査を行うためには、被写体までできる限りカメラを近づける必要があった。そのためマニピュレータ先端に 500mm のメジャーを取り付け、カメラと被写体との撮影間隔が毎回一定になるように調整しながら調査を行った。



写真-11 光学式水中カメラ

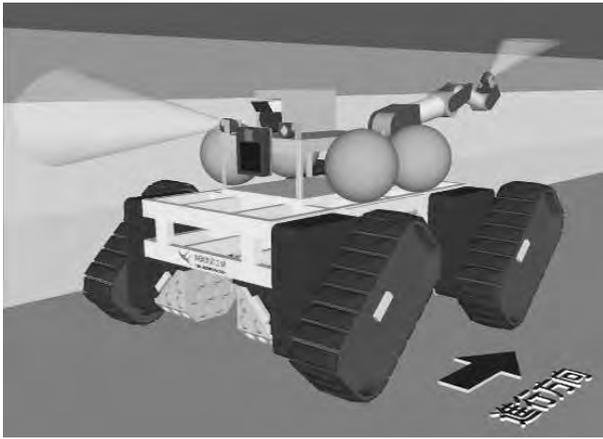


図-3 調査状況イメージ図

撮影場所によって堆積状況にばらつきが見られたが、一番堆積物が多い箇所では写真-12 の様に、海生生物が隙間なく付着している状況を確認した。放水口から 5m 間隔で上下左右の撮影を行い、所定の距離までの測点を調査することができた。



写真-12 光学式水中カメラ映像（放水路内壁面）

#### 4. 今後の展開

##### 4.1 アタッチメントの開発

本ロボットは、箱型に組み込まれたフレームにクローラなどを搭載した簡単な構造としているため、多様な装置の搭載が可能である。現状、本ロボットのアタッチメントとして 4 軸マニピレータを取り付けており、先端には光学式水中カメラを搭載している。今後は、海洋資源開発・海洋インフラの調査・施工などへの活用も視野に入れており、より多機能な水中作業ロボットとすべく、使用用途に合わせたアタッチメントの開発が望まれる。

本ロボットのフレーム上に搭載するアタッチメントの一例として、図-4 に双腕型アーム装着時のイメージ図を示す。

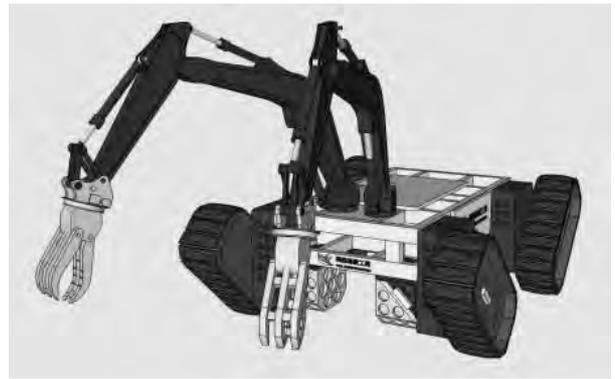


図-4 双腕型アーム装着イメージ

アームを双腕とすることによって、より繊細な作業にも対応できる。しかし、それに起因して機能が複雑化するため、今後オペレーターの育成も視野に入れたアタッチメントの開発が求められる。

図-5 には削孔機（ドリフター）を装着したイメージ図を示す。これにより、岩盤掘削にも活用可能と考えられる。また、図-6 のようなダンプユニットを搭載することにより、海底の荷役機械として活用することも考えられる。今後、多様な作業に対応できる汎用性の高い装置とすべく、これらのアタッチメントの実用化に向けた開発に取り組んでいきたい。

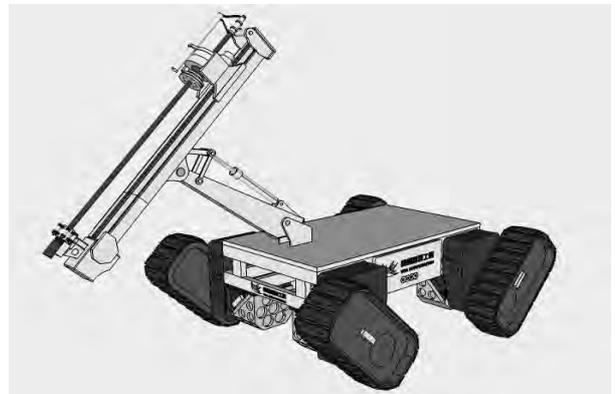


図-5 削孔機（ドリフター）装着イメージ

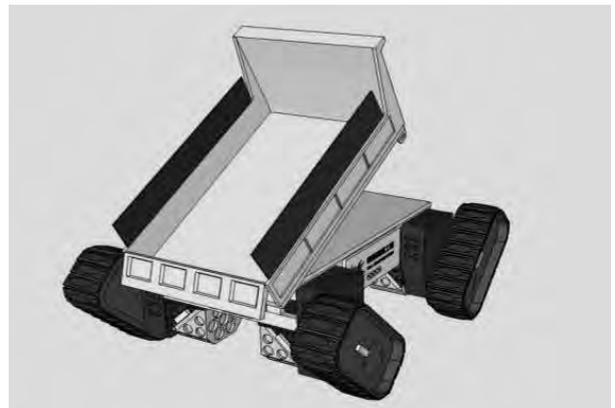


図-6 ダンプユニット装着イメージ

## 4.2 作業性の拡大

本ロボットは、小型軽量で耐水圧が水深 3,000m と大水深での作業も可能であるため、水中のインフラ施設の調査・メンテナンスの他（図-7）、海底資源開発（図-8）にも活用できると考えられる。

また、動解析シミュレーションを用いた性能確認試験により、本ロボットにスラスト（推進装置）を取り付けることによって、壁面上を平面的に移動しながら作業可能であることを確認している。これにより、図-9 に示すような垂直に近い壁面上での調査や、障害物が多く堆積する暗渠において、目的地点到達の実現性を飛躍的に向上させることができると考えられるため、今後の導入を検討中である。



図-7 橋脚下部 洗掘調査 イメージ図

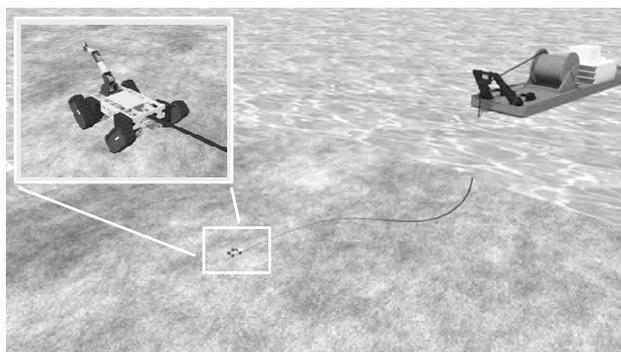


図-8 大水深での海洋開発 イメージ図

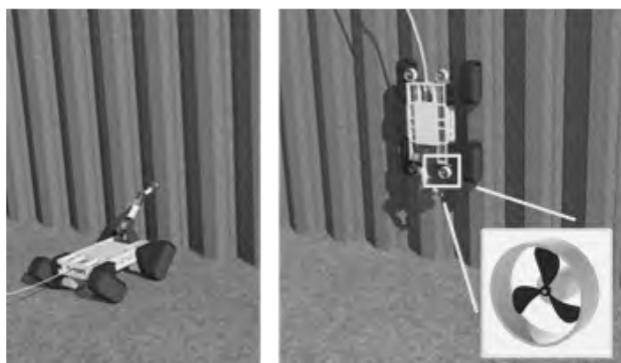


図-9 鋼矢板側面調査 イメージ図

## 5. おわりに

本稿で紹介した大水深対応型水中作業ロボットは、新たな事業を開拓できるツールとして非常に有用な施工機械であると考えている。現状の作業実績としては、前述した海底ケーブル調査（最大水深 20m）や、放水路内部調査と、比較的水深が浅い環境下において「調査ロボット」という形で用いられているが、今後は大水深での構造物の建造、調査、メンテナンス、更には海底資源開発、石油天然ガスなどの開発も視野に入れた技術開発にも積極的に取り組んでいく所存である。

当社は港湾工事を得意とする建設業として、事業を発足してから 100 余年を迎えている。今後はこれまで培ってきたノウハウを活かし、従来の建設工事にとらわれない独自の発想で海洋インフラ調査・施工や海洋開発などの分野に参画していきたい考えである。また本開発で得た知見をもとに、既存の水中作業ロボットの作業フィールド拡大に繋げていければと考える。

### 参考文献

- 1) 泉信也, 飯田宏, 津久井慎吾, 大村誠司, 高橋弘 : 大水深対応型水中作業ロボットの開発, 第15回建設ロボットシンポジウム講演集, O-51, 2015

## II 梗概集



## ● ポスターセッション要旨

### 1. 自動追従台車「かもーん」の紹介

株式会社レンタルのニッケン ○飛山 太郎

株式会社竹中工務店 永田 幸平

#### はじめに

国内建設需要が増加傾向にあるなか、建設技能労働者の不足が大きな課題となっている。建設現場では、これまで重量のある建設資材を大量に運搬するために、1台ごとに人が押して運んでいた。時間がかかり、体力も消耗する重労働であった。建設現場の労働環境を改善するために、追従可能な自動搬送ロボットが要望されていた。



写真2

#### ・操縦支援モード

ジョイスティックによる操作で台車を走行させるモードで、レーザセンサが検知した障害物に接近すると、速度を落とし、さらに接近すると停止して衝突を防止する。

#### ・操縦モード（衝突防止機能無効）

ジョイスティックによる操作で台車を走行させるモードで、レーザセンサによる衝突機能防止は働かない。

#### ・安全装置

1. 本体側面に非常停止スイッチを装備
2. 本体前後に衝突防止バンパースイッチを装備



写真1

#### 特徴

##### ・自動追従機能

レーザセンサによって認識させた人や物を自動走行で追従するモード。追従対象以外の検知物は障害物として判断し、避けたり停止して衝突を防止する。



写真3



写真4

#### おわりに

建設現場だけでなく、工場や物流施設からもお問い合わせをいただいている。今後さらに改良を重ねより多くのユーザーにご利用いただけるよう目指していく所存である。



## 2. 地盤改良施工管理システム 「Visios-3D」 (ビジオス・スリーディー)

株式会社不動テトラ ○ 深田 久  
岡戸 雅則  
秋間 健

### 1. 概要

地盤改良工事では地盤内に貫入する施工装置の動作を把握することが重要となるが、施工中は直接見ることができず、運転席の施工支援画面に表示される管理計器の値で施工状況を確認していた。そのため、支持層への到達の判断などは、主にオペレータの判断に委ねられることになる。そこで、施工状況をリアルタイムに、複数のスタッフが共有できる「可視化技術(見える化)」が求められてきた。

さらに、施工記録はオシログラフや集計表の様式で、改良体ごとの帳票に出力してきたが、現場全体で視覚的に評価することも困難であった。

これらの課題を克服するために、不動テトラとソイルテクニカは、地盤改良の施工状況を随時アニメーションで確認できる「リアルタイム施工管理システム」と、施工情報を3次元で表示できる「3次元モデル化システム」を組み合わせた「Visios-3D(ビジオス・スリーディー)」を開発した。

従来の施工機に本システムを搭載することで、タブレット端末等を使ってリアルタイムに施工状況を確認できるとともに、3次元モデルで視覚的に情報を表現することができるようになった。

本システムは開発2社の代表的な機械攪拌式深層混合処理工法である「CI-CMC工法」に適応しており、今後随時、他の地盤改良工法にも展開していく予定である。

### 2. 特徴

「Visios-3D(ビジオス・スリーディー)」の特徴を以下に示す。

- (1) 施工状況をアニメーションで表示  
施工中にオペレータが見る施工支援画面に、地盤内

の施工状況がリアルタイムにアニメーション表示されると同時に、「攪拌翼の先端深度」、「攪拌翼の貫入・引抜速度」、「セメントスラリーの流量」、「攪拌翼の回転数」、「オーガモーターの電流値(貫入抵抗)」も表示され、視覚的な状況把握により適切な判断ができる。

- (2) 複数の現場スタッフで施工状況を確認  
オペレータの施工支援画面と同じ情報を、現場内LANを使用して、タブレット端末や事務所内に設置したパソコン等でリアルタイムに見ることができ、施工状況を複数の現場スタッフが確認できる。

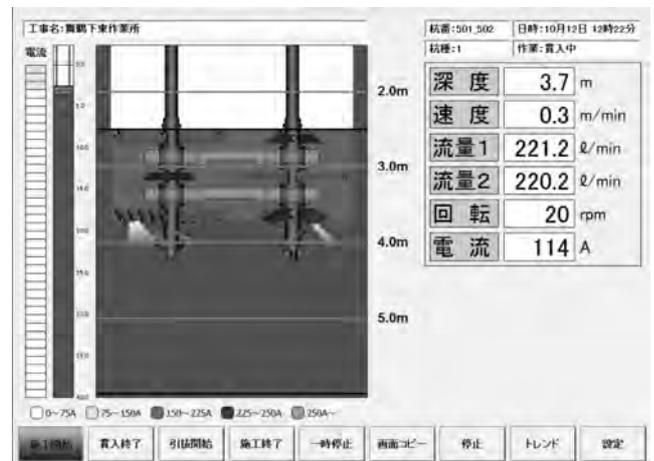


図-1 施工支援画面に表示されるアニメーション(上)とタブレット端末を使用した確認状況(下)

### (3) GNSSによる施工機の誘導と位置情報の記録

GNSS（全球測位衛星システム）を併用することが可能であり、打設位置まで施工機を誘導できるため、施工精度が格段に向上する。また従来は、実際に施工した改良体の杭頭部を掘り起こして確認していた打設位置（設計と実施工の差異）を、GNSS座標データとして記録することができる。

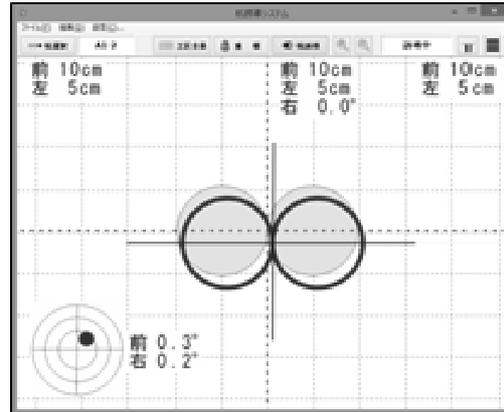


図-2 施工機械の誘導画面の一例

### (4) 国土交通省が推進するCIMに適応

地盤改良の成果を従来の帳票（オシログラフと集計表）だけではなく、国土交通省が推進するCIM（Construction Information Modeling/Management）に適応した3次元モデルデータを作成でき、現場全体の施工記録を視覚的に評価できる。

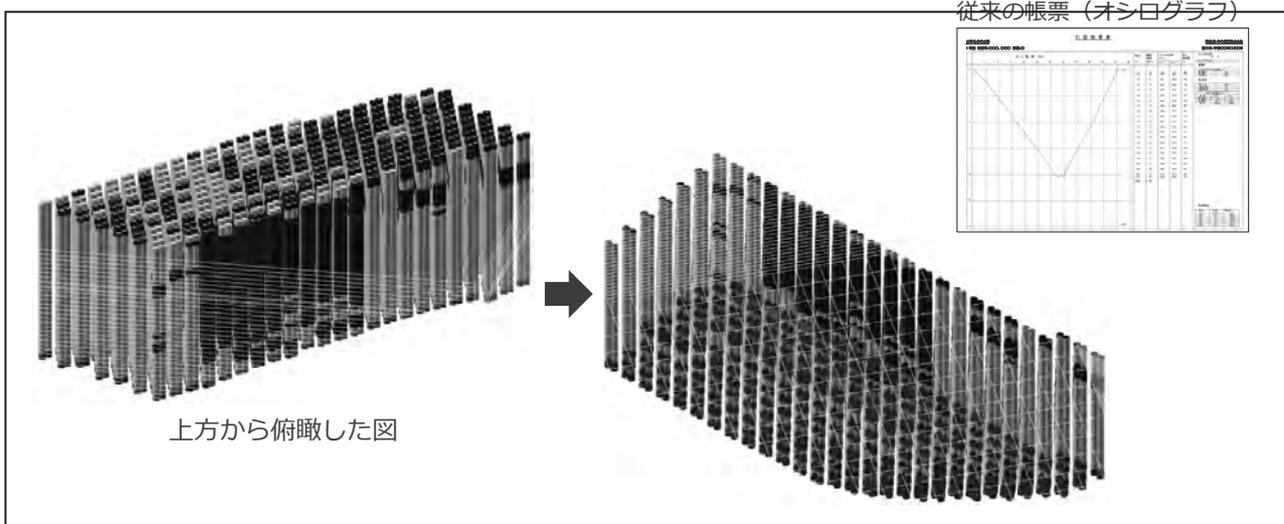


図-3 3次元モデルの図化例

（上図では攪拌抵抗を示す電流値を色分け表示することで、支持層への到達確認をしている）

## 3. 施工実績

今までの適用実績は6件である。代表事例を以下に示す。

- 1) 工事名：下東地区基盤整備工事、発注者：国土交通省近畿地方整備局福知山河川国道事務所
- 2) 工事名：平成28年度[第27-C5431-01号]（都）金岡浮島線単独街路整備工事（地盤改良工）、発注者：静岡県沼津土木事務所

## 4. おわりに

今後は、さらに実績を積み重ね、適用現場を拡大していきたいと考えている。

参考文献：

- 1) 新工法紹介，地盤改良施工管理システム Visios-3D（ビジオス・スリーディー），建設機械施工，Vol.69，NO.4，April，2017.

### 3. ICT 施工ソリューションの中核を担う新クラウドソリューション

#### Solution Linkage Cloud を開発

日立建機株式会社 ○篠倉 美紀

#### 要旨

i-ConstructionをはじめとするICT施工ソリューションが急速に広まる中、施工現場のニーズに応えるソリューションを迅速に提供することが建設機械メーカーの課題であった。そこで日立建機は、ICT 施工ソリューションに有用なアプリケーションを集結したクラウドソリューション「Solution Linkage Cloud」を開発し、2017年9月に提供を開始した。

#### Solution Linkage Cloud の概要

日立建機の事業戦略は、日立グループ内の高い技術力を活用する「One Hitachi」と、迅速なソリューション提供を可能とする「オープンイノベーション」である。これらの戦略に則り、(株)日立ソリューションズ、測量機器メーカーのトリンブル社とともにポータルサイト、プラットフォームを開発した。そのプラットフォーム上で、ICT 施工で必要となる「大容量データの保管・共有」、「進捗管理」、「土量管理」などの各種アプリケーションを提供している(図1)。

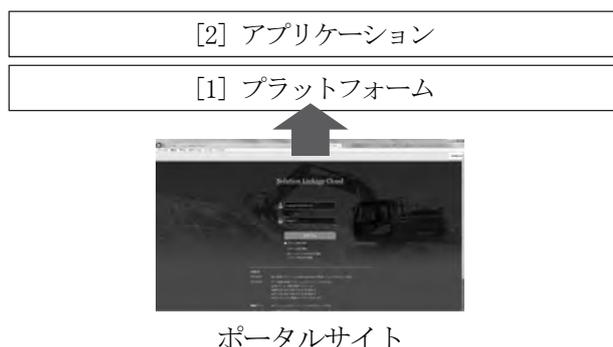


図1. Solution Linkage Cloud の模式図

#### [1] プラットフォームの特長

ICT 施工では、測量会社、3次元データ製作会社など様々なステークホルダ間でデータのやり取りが発生する。そこで、必要なデータを必要なときに取り出し、

アップデートできる「自由度の高さ」を実現した。また、施工会社は用途に応じて様々なメーカーの機材やシステムを使い分けしている現状があることから、「互換性」があることも重視した。

#### [2] アプリケーションの特長

Solution Linkage Cloud では、トリンブル製のアプリケーションに加え、日立建機独自のアプリケーションを土木業界向けに提供する。

独自アプリとして、2018年4月、スマートフォンなどのモバイル端末を活用した施工管理ソリューション「Solution Linkage Mobile」を提供開始予定である。基本機能は、人、建設機械、ダンプの位置情報をもとにした、①施工現場の見える化(図2)、②施工現場の進捗管理、③接近検知の3つである。開発にあたっては、複数の施工現場で実証実験を行い、現場の方々とともに機能の作り込みを行った。これにより、施工現場の安全性、生産性向上に寄与する機能を実現できた。



図2. 施工現場の見える化画面

#### 今後の展開

現場のニーズや社会動向の変化等を捉え、ビジネスパートナーや日立建機独自のアプリケーションの充実を図る。土木業界向けソリューションの更なる充実と、他の業種向けソリューションへの対応を計画している。



## 4. 自動追尾型トータルステーションを利用した 機械施工の効率化の提案

「E三S」

株式会社 カナモト ○清水 亮

株式会社 カナモト 笹原 久之

株式会社 佐藤工務店 大和田 弘光

### 1. はじめに

昨年度より国土交通省において、「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り、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り組みである i-Construction が始まりました。

その中で、盛土や切土工事での法面整形にバックホウ（法面バケット付）を使用して施工を行いますが、施工現場にておいて品質確保や施工効率の向上を目的として ICT 機材の導入が進んでいます。しかしながら現状では、

- ① 機器コストが高く、費用対効果が見えにくく、導入に踏み切れない。また、リースレンタルを活用した場合でも費用対効果が出にくい。
- ② 重機施工用や測量用など用途に応じて3次元データを用意しなければならず手間がかかる。などの課題があります。

本報告は、これらの課題を解決する新しい技術として、E三Sを提案するものです。

### 2. 「E三S」

「E三S」は、耐衝撃全周囲プリズム付きバケット勾配目視装置と自動追尾型トータルステーション（TS）から構成されます（写真-1）。バケット勾配目視装置は、バケットの角度と連動して動く本体と振り子の原理で常に一定の角度を示す水平器で構成されます。水平器を法面整形の角度に合わせておく事で、均一な角度で設計通りの法面整形作業を行う事が出来ます。また、バケット勾配目視装置の上に設置してある耐衝撃全周囲プリズムを、従来より現場にて測量や出来形

管理に使用されている自動追尾型TSにて追尾することにより、バックホウの運転席に装着したコントローラにてバケット刃先と設計データの差異が目視確認できる、三次元マシンガイダンスシステムとなります。バケット勾配目視装置で法面の勾配を合わせながら、コントローラの画面にてバケット刃先と設計面の差分を確認しながら作業する。（写真-2）

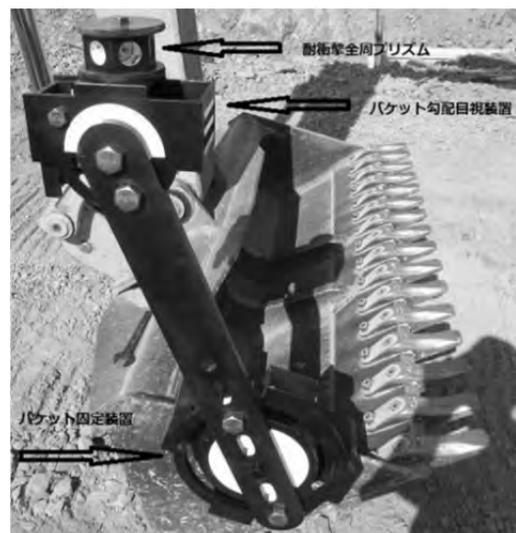


写真-1



写真-2

### 3. 「E三S」の効果

#### (安全)

・勾配の確認など検測作業で、作業員と建設機械との接近する状況を減らすことが出来る。

#### (品質)

・容易に法面勾配や設計データとの差異が確認出来、高い品質の法面形成作業が可能となる。

#### (作業効率)

・丁張りを減らすことが出来ると共に、常時安定した勾配を表示出来る為に、作業効率の向上が図れる。

#### (早期操作習熟)

設置された丁張りを確認しながらの作業よりも、より判りやすく勾配を確認しながら作業ができるため、作業の早期習熟に効果がある。

### 4. 「E三S」の特徴

本体は3つの部品で構成されていて、取り付けは短時間に行うことが出来ます。取付方法も角度調整後ボルトの締付けのみで、簡単に取り付けや取り外しが出来ます。(写真-3)



写真-3

また中間の連結器にはショートタイプとロングタイプの2種類あり、大きさの異なるバケットにも対応することができます。(写真-4)



写真-4

### 4. NETIS登録

仕上り精度や施工速度が、補助員を要する通常施工に比べて、精度や効率の向上を実証しており、その結果2017年1月にNETISへ登録されました。

NETIS登録番号 TH-160014-A

### 5. 現場への導入に対する改善効果

三次元マシンガイダンスバックホウは、センサーやGNSS受信機などを取り付けた専用機で運用しているが、E三Sは現場で運用しているバックホウに装着して使用するために、別途専用機を用意する必要が無く、また取付が簡単に出来るので必要な時にすぐ使用が出来る。こういったことから、初期導入費用を含めコストを抑えて三次元マシンガイダンスシステムの導入が可能。また、結果として機材の運用効率が向上し、機器の運用コストの低減に寄与することと考えます。

### 6. 終わりに

施工現場に多様なICTツールが導入され、その選択肢が広がりました。しかし、現場の規模や施工量、取り巻く環境など問題点もあり、使用する機材の選定に苦慮する場面もあります。その状況の中で、このE三Sや他の情報化施工などICTツールを、現場に見合った最善の選択を行い使い分けることで、現場施工の安全や品質・効率化がさらに進むものと考えております。

## 5. 油圧ショベルの衝突軽減システム

～事故のない油圧ショベルを目指して～

コベルコ建機株式会社 開発本部ショベル開発部 越智 智彦

### 1. はじめに

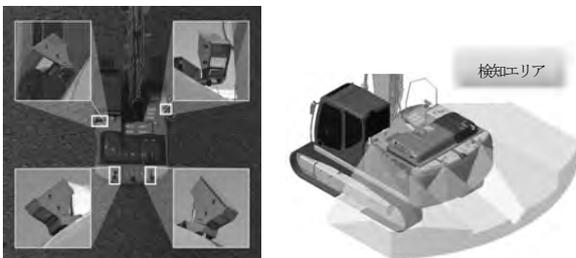
K-EYEPRO（衝突軽減システム）は油圧ショベル後方に接近した人や障害物を検知し走行／旋回動作を自動的に減速停止させる。作業現場で多く発生する周囲作業員との接触事故撲滅を目指して開発した。

### 2. 開発の背景

国土交通省が提言するi-Constructionでは建設現場の死亡事故ゼロ、安全性の飛躍的改善を目指しており、国として建設現場の安全性は重要な課題と認識されている。実際の建設現場で油圧ショベルの関わる事故の約6割は挟まれ／轢かれ事故で、そのうち旋回、走行時の事故が8割以上を占めている。事故のほとんどは機械後方の死角エリアで発生しており、作業者に気づかず操作したことが原因となっている。このような問題に対し、赤外線センサーを応用し死角となる油圧ショベル後方での接触事故防止を目指した衝突軽減システムを開発した。

### 3. システムの概要

機体の左右に各1個、後方側に2個の赤外線深度センサーを搭載。オペレーターからの死角エリアである後方側での人や障害物を検知する。

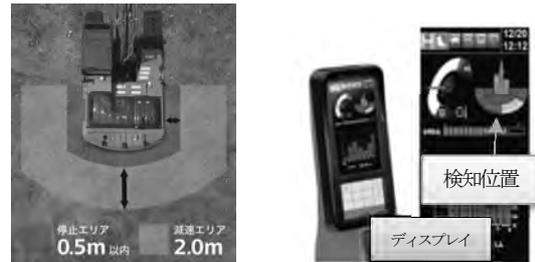


夜間でも検知可能な赤外線深度センサーを採用

### 4. 衝突軽減機能の概要

赤外線深度センサーで人や障害物を検知すると、検知位置をディスプレイに表示。警報音にてオペレータ

ーに情報発信するとともに、検知した位置に応じて走行や旋回動作を自動的に減速・停止する。



機械より2m以内に人や対象物が入った際に減速制御、0.5m以内では停止制御を行う。

（地表面の検知エリアではありません）



対象物の検知から停止までのイメージ

### 5. 安全レポート

現場の危険箇所・事象・時間等をユーザーに認識させ、安全意識の向上と安全活動に活用を目的として、衝突軽減システムの作動状態をユーザーにレポートとして発信。



※本システムはあらゆる条件にて衝突を回避する機能を持つものではありません。性能には限界があります。



## 6. 建設重機災害防止のための重機の緊急停止装置

### 「スリーエスバックホー」による安全性の実現

株式会社アクティオ 稲葉 誠一

株式会社アクティオ ○安田 勇介

#### 1. はじめに

建設工事における労働災害の撲滅は建設業が抱える重要な課題である。建設工事での事故の中で建設重機に関わるものは少なくなく、建設重機の安全性向上が労働災害削減に有効であると考えられる。

そこで我々は建設重機災害を防止する重機の緊急停止装置を開発した。以下ではこの緊急停止装置を搭載したバックホーである「スリーエスバックホー」(スリーエス: 3S = Safety Sonor Stop) について報告する(写真1)。

#### 2. 開発の背景

建設工事では重機オペレーターが作業に集中するあまり他の作業員の存在に気が付かないことや、重機の旋回動作等によりオペレーターが方向感覚を失うことが発生し得る。この問題に対応する従来の重機安全装置として、警報を鳴らす装置が存在しているが、重機の機械音が大きいこと、作業員が耳栓をしている場合があることなどが障壁となり本来の機能を活かしていなかった。そこで警報音以外の方法を用いた重機安全装置の必要性が認知され、スリーエスバックホーの開発へ着手した。

#### 3. スリーエスバックホーの概要

スリーエスバックホーに搭載される安全装置は、工事中に発生するバックホーによる作業員との接触事故を未然に防止する事を目的に開発した安全補助装置である。オペレーターが他の作業員に気づいていないといった危険な状況でバックホーが作業員に近づいた際、作業員のヘルメットに取り付けたヘルメットセンサーが、バックホーに取り付けた赤外線発光器からの信号を受信し、建機に停止信号の電波を送り返す。作業員には音と振動で、オペレーターにはブザー音で警報し、

さらにバックホーの動作すべて(走行、旋回、掘削)を停止することにより事故を未然に防止する。

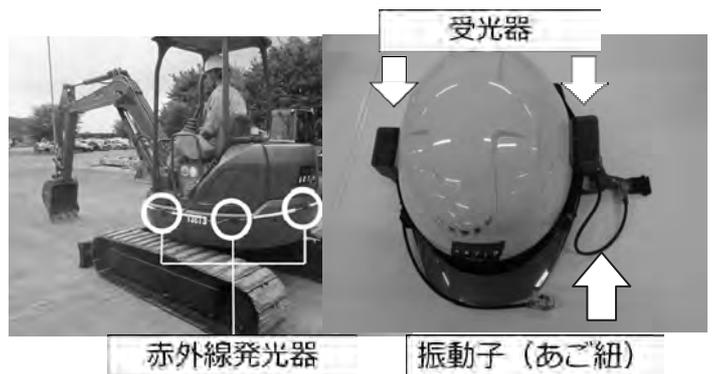


写真-1 スリーエスバックホー、ヘルメットセンサーの外観

#### 4. スリーエスバックホーの特徴

##### ① 危険な作業員の検出

バックホーの危険な作業半径内に侵入した作業員(ヘルメットセンサー装着者)を検出する(図-1)。赤外線を用いているため、雨や風、音など現場のノイズに影響を受けにくい。

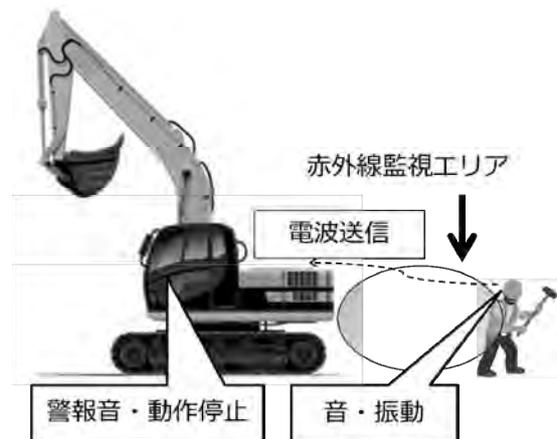


図-1 スリーエスバックホー作動イメージ

##### ② 無駄な警報の回避

作業員のヘルメットに装着した受光器(ヘルメットセンサー)のみに反応するので、周囲のカラーコーンや壁など

の障害物に対し「警報」や「動作停止」といった反応をしない。

### ③ 作業半径全体の監視

バックホーは後方も危険であるが、右前方部は運転席からブームで死角となるため、慣れたオペレーターでも危険を感じ取れないことがある。そこでセンサーはケーブル上にし、丸みを帯びた機体全体に取り付けて監視することを可能にした(図-2)。

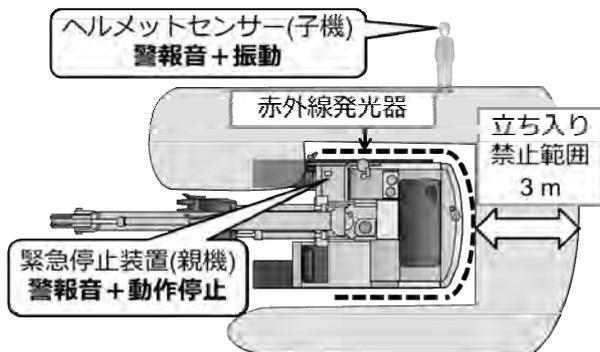


図-2 立入禁止範囲を3mに設定したバックホーの場合の作動範囲。

## 5. スリーエスバックホーの設計方針

### ① 赤外線発光器の監視距離は最短約3mとする

バックホー走行時に作業員と接触せずに停止するためには作業員との距離が3mは必要であるため、1個のセンサー部に赤外線発光部を3個取り付け、確実に3mの距離が監視できるようにしている。

### ② バックホーの停止時間は5秒間

バックホーの停止時間が長すぎると作業の妨げに繋がる可能性があるため、停止時間は5秒間としている。ただし、作業員が監視エリア内に居続ける間は停止状態は保持される。オペレーターに対してはブザーで停止中を知らせ、作業員に対しては音と振動で監視エリア内であることを知らせる。復帰のタイミングはブザーが鳴り止んだタイミングとなる。

### ③ 3チャンネル仕様

本装置は、赤外線で作業員を検知し、作業員側からは電波信号を送ってバックホーを停止する仕組みだが、近くに本装置を装備したバックホーがあると、そのバックホーも停止させてしまうことが考えられる。そこ

でコントローラー側にチャンネルを設置した。重機が3台までであれば、同時運転でも混信することはない。また、5チャンネルに増設することも現在検討している(写真-2)。



写真-2 コントローラーの側面。上・中・下の3チャンネルで切替えを行なう

### ④ 防水対策

雨による故障を防ぐためコントロールボックスは防水ケースを使用している。

## 6. 使用者からの評価

現在建築の現場で5現場、土木の現場で2現場採用されている。「重機作業では作業員の立ち入りを禁止する範囲を設定し、合図者も置いているが、その合図者が範囲内に入ってしまう、接触するケースも少なくない。この装置はそうした事故も防ぐことができる。」との評価をいただいた。

## 7. 今後の展開・まとめ

停止装置が電気系統でない重機への対応、カメラ型などの次世代センサーに切り替えることによるヘルメットを被っていない第三者への対応等、改善を進めている。

建設現場においては、安全第一、品質確保、環境保全が求められている。これらの観点から、より良いものをレンタルで現場に提供し、作業環境の改善に寄与することが我々レンタル会社の使命であると考えている。これからも現場の生の声を拾い集め、商品化を推進していく。

## 7. AI を利用した打音検査の自動判定

	佐藤工業株式会社 技術研究所	○黒田 千歳
	佐藤工業株式会社 技術研究所	歌川 紀之
筑波大学 大学院 システム情報工学研究科		島田 拓夢
筑波大学 大学院 システム情報工学研究科		安永 守利

はじめに

橋梁やトンネルの維持管理のため行われる打音検査の結果を、検査者の技量によらず健全と欠陥を判定するための分析手法が求められている。AI（人工知能）的な手法により判定を行った結果について述べる。

分析手法

打音はインパルスハンマーと検査面に密着させた収録マイクにより行い、収録した音圧波形から求めた周波数分布を入力ベクトルとして以下の分析手法を適用する。

### (1) 主成分分析

主成分分析の目的は、多次元ベクトルの入力データからなるべく少ない合成変数で、なるべく多くの情報を把握するという情報の縮約である。打音データについては、後述するように、第1～第3主成分を表示すると健全部、欠陥部、また異常値の分布状態がわかる。

### (2) k 近傍法

k 近傍法では入力ベクトル間の距離を計算し、その距離から判別（クラス分け）する。健全部の周波数分布同士は距離が近くなり、欠陥部と区別することができる。対象ベクトルのk個までの近傍を調べて、多数決により対象ベクトルの種別を判定する。

### (3) 自己組織化マッピング (Self-Organizing maps, SOM)

大脳皮質の視覚野をモデル化したニューラルネットワークの一種である。教師なし学習により、一般に2次元へのマップを作成してトポロジカルなクラスタリングが得られる。

### (4) ディープラーニング (Deep Learning, DL)

多層のニューラルネットワークに教師データとして健全・欠陥の区分と対応する入力ベクトルを多量に学習させ、作成されたニューラルネットワークにより未

知の入力ベクトルが健全であるか欠陥であるかの判定を行う。

対象試験体

図1に示すかぶりと直径が異なる円形空洞試験体の打音データにAI的な分析手法を適用した。

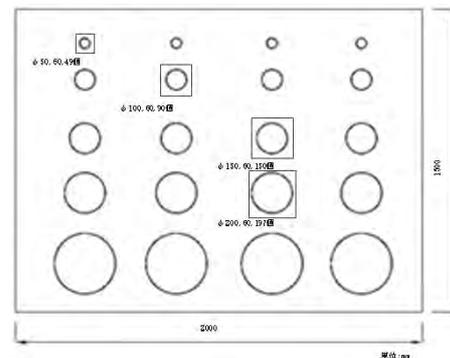


図1：円形空洞試験体

打音データは当社で開発した健コン診断ポータルにより取得した。欠陥部と健全部の打音点の周波数分布は、例えば次のようになっている。

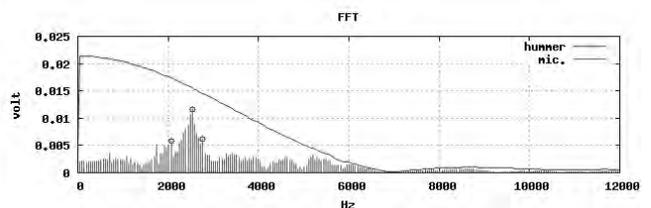


図2：欠陥部の周波数分布

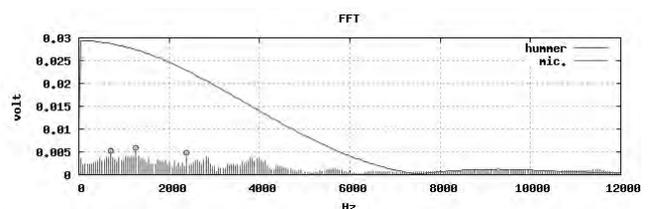


図3：健全部の周波数分布

空洞上の点では 2kHz 付近で固有振動が発生しており、健全部では振動は小さく、フラットになっている。

### AI 的な分析手法の適用結果

図1の4種類の円形空洞欠陥のまわりの格子点の打音結果を用いて前述の分析手法を実施し、20個のテストデータ(健全部と欠陥部それぞれ10個ずつ)について判定を行なった。入力ベクトルとしては、波形からFFTで求めた4kHzまでの80次元のデータを与えた。自己組織化マッピング(SOM)、k近傍法(kNN)、ディープラーニング(DL)による正答率は次のようになる。

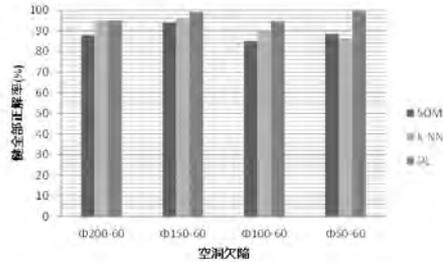


図4：健全部の正答率

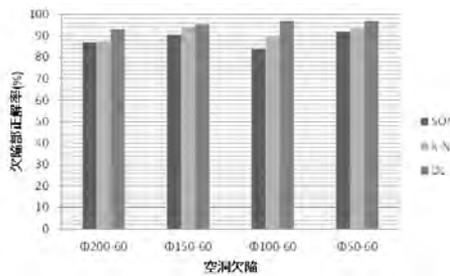


図5：欠陥部の正答率

正答率は、20個のテストデータをランダムに20回与えた場合の結果となっている。本結果から、各手法の正解率は健全部、欠陥部ともに80%を超えていること、特にDLでは、90%を超えていることがわかる。

次に、DL以外の各手法の結果について述べる。

主成分分析の結果より、各入力データの第1～第3主成分を3次元でプロットすると図6のようになる。

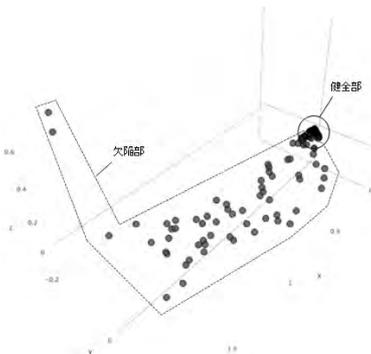


図6：主成分分析の結果

健全部は一箇所にとまっております、欠陥部は広く分

散している。

k近傍法についてはkとして1～10について正答率が高かったものを示している。

自己組織化マッピングの結果を直径20mm、深さ60mmの欠陥の場合について示す。

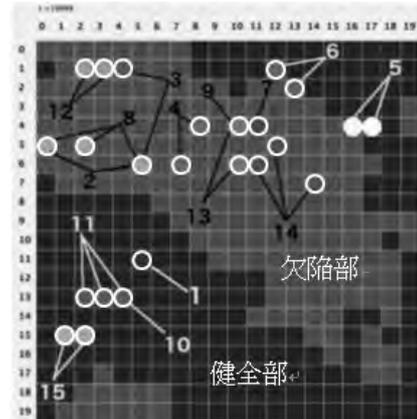


図7：自己組織化マッピングの結果

番号1, 5, 6, 10, 11, 15が健全部でその他は欠陥部である。マップの灰色部分は欠陥箇所、黒色部分は健全箇所を示す。健全と欠陥のクラスタリングができていることがわかる。テストデータは○で示している。6以外は欠陥が欠陥の領域に、健全が健全の領域に入っており、正解となっている。6の測点は健全部であるが欠陥部との境界近くにあり、SOMでも健全部と欠陥部の境界近くにマッピングされていることがわかる。

### まとめ

人工知能的な手法を打音法に適用し、円形欠陥モデルを対象としたテストでは、80%以上の正解率が得られた。今後、各手法の正解率を向上させるためには、学習データの充実、改良や従来手法を含めた組み合わせの検討が必要である。さらに、実構造物における判定に用いるための課題を整理する予定である。

## 8. ブリッジハンガー（小規模橋梁を対象とした移動式橋梁検査路）

(一社) NME 研究所                      ○ 牧角 龍憲  
エスイーリペア株式会社              村上 俊明  
西尾レントオール株式会社              藤田 全彦

### 1. はじめに

県市町村の地方公共団体が管理する橋梁には狭い幅員の橋梁が非常に多い。例えば、平成 26 年度および 27 年度の橋梁点検結果（道路メンテナンス年報<sup>1)</sup>）では、点検を実施した全 18 万 3 千橋の内 8 万 5 千橋（約 46%）が幅員 5.5m 未満である。

そのような幅員が狭く、かつ地上から近接することが困難な橋梁で点検や補修などを行う場合、幅 3m 以上を占有する橋梁点検車（写真-1）は一般交通の妨げになり、住民や公共交通の通行時に作業を中断して回避せざるを得ず、極めて非効率になるとともに利用者に不便をもたらすことになる。



写真-1 橋梁点検車による作業状況

そこで幅員が狭い橋梁において通行規制を必要とせずに、複数名搭乗可能で移動しながら連続して点検・補修作業などを効率的に行える装置として、移動式橋梁検査路「ブリッジハンガー<sup>2)</sup>」を開発した。（写真-2、3）



写真-2 作業状況 (1)



写真-3 作業状況 (2)

### 2. 特徴

特徴として以下項目が挙げられる。

- ① 設営完了後、一般車両の通行が可能（写真-4）
- ② 作業中の路面占有面積の最小化（写真-5）
- ③ 短時間で設営・撤去が可能（写真-6）  
（設置および解体に要する時間は約 30 分）
- ④ 作業員数名が搭乗し、同時作業が可能
- ⑤ 装置の移動が容易で人力でも可能（写真-7）
- ⑥ 現地までの運搬が 4 トン車程度で行える



写真-4 一般車両の通行状況



写真-5 路面占有面積の最小化



写真-6 ブリッジハンガーの設営状況



写真-7 装置の移動状況

### 3. 仕様

ブリッジハンガーの全容を**写真-9**に示す。作業ステージは幅 600×長さ 4380~7175mm(可変)で、一般車両交通が可能な間隔を確保できる状態で橋梁幅員 3800~7180mm に対応でき、また、左右の吊下げ部は昇降路兼用で桁下高さ 925~2625mm に対応した可変式である。橋面には移動車輪(**写真-10**)で設地し、路面上の高さは地覆高欄の状況に対応できるように 400mm の伸縮幅を設けている。



写真-9 ブリッジハンガーの全容



写真-10 移動車輪設置状況

### 4. おわりに

膨大な数の橋梁点検を行うに際しては、限られた予算の中で、効率的かつ安全に遂行できる手段の確立が必要不可欠である。その実現に向けて、本機が貢献できれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省、道路メンテナンス年報(平成 26 年度)および同(27 年度)、データ集(地方公共団体)
- 2) NETIS:QS-160032-A 移動式橋梁検査路(ブリッジハンガー)

平成29年度 建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集

---

平成 29 年 11 月 6 日 印刷

平成 29 年 11 月 8 日 発行

編 集 一般社団法人 日本建設機械施工協会  
発行所

〒105-0011 東京都港区芝公園 3 - 5 - 8  
(機械振興会館内)

T E L (03)3433-1 5 0 1

F A X (03)3432-0 2 8 9

---

複製厳禁

印刷所 (株)アクセス