

点群データの取得条件と検知可能な ポットホールの規模との関係の基礎分析

糸氏 敏郎¹・今野 新²・関谷 浩孝³

¹国土技術政策総合研究所 社会資本マネジメント研究センター 社会資本情報基盤研究室 主任研究官
(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

²中国地方整備局 岡山河川事務所 防災情報課 課長 (〒700-0914 岡山県岡山市北区鹿田町2丁目4-36)

³国土技術政策総合研究所 道路交通研究部 高度道路交通システム研究室 室長
(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

国土交通省では特車通行許可の審査の迅速化等に向けて、各地方整備局等にMMS (Mobile Mapping System)を導入し、点群データの収集を進めている。本研究では、このデータを道路管理の高度化・効率化にも活用することを見据え、現場事務所の活用ニーズが高い「路面損傷の確認」のうち発生頻度が高いポットホールの検知を対象とした。具体的には、国土技術政策総合研究所の試験走路に模擬的なポットホールを作成し、計測時の走行位置、速度及びMMSの性能等の取得条件と検知可能な規模との関係を分析した。

キーワード 道路管理、3次元点群データ、MMS、ポットホール、RANSAC法

1. はじめに

国土交通省ではMMS (Mobile Mapping System)を各地方整備局等に導入し、交差点形状等の点群データを収集することで特車通行許可の自動審査システムの強化を図り、手続きの迅速化に向けた取り組みを進めている¹⁾。これにより、道路管理用車両等を用いて各地方整備局等が大量の点群データを取得している。そのため、取得した点群データにより路面損傷等の確認が可能であれば、道路管理業務の高度化・効率化に繋がる。しかし、検知したい事象に対してどのような走行条件等で点群データを取得する必要があるかについては明らかにされていない。

本研究では、現場事務所へのヒアリングの結果、活用ニーズが高かった「路面損傷の確認」のうち発生頻度が最も高いポットホールの検知を対象として、取得条件 (MMSの性能及び走行条件)と検知可能なポットホールの規模・形状との関係を分析した。

試験走路に1.5m間隔で作成した。ポットホールの大きさは、2015・2016年に関東地方整備局管内で発生した事例をもとに、直径20cm、30cm及び短軸10cmかつ長軸40cmの楕円形とした。深さも同様に現場の事例を参考に5cm及び10cmとした。形状は、「円柱状」及び「すり鉢状 (レーザの平均的な入射角である45°を傾斜角とする。)」の2パターンを設けた。

(2) MMS搭載車両の走行条件

走行位置は、「ポットホールが同一車線にある場合」、「隣接車線にある場合」及び「中央分離帯を挟んで反対車線にある場合」の3パターンを想定し、道路構造令を基にそれぞれポットホールから0m、3.5m及び5.25m離れた位置とした (図-1)。

走行速度は、「都市部の平均旅行速度」、「地方部の平均旅行速度」、「制限速度」を想定し、全国道路・街路交通情勢調査を基にそれぞれ20km/h、40km/h及び60km/hの3パターンとした。これらの走行条件の組合せ計9パターンをそれぞれ2回計測した。(図-2)

低密度MMS及び高密度MMSで取得した点群データ (すり鉢状の直径20cmかつ深さ5cmのポットホール)をそれぞれ図-3及び図-4に示す。

2. 点群データの取得

(1) ポットホールの形状

表-1及び表-2に示す14種類の模擬的なポットホールを

(3) MMSの種類

MMSの性能による違いを分析するため、多くの地方

表-1 ポットホールの種類（円形）

円形		深さ			
		5cm		10cm	
		円柱状	すり鉢状	円柱状	すり鉢状
直径	20cm	○	○	○	○
	30cm	○	○	○	○

表-2 ポットホールの種類（楕円形）

楕円形 長径 40cm 短径 10cm		深さ			
		5cm		10cm	
		円柱状	すり鉢状	円柱状	すり鉢状
進行方向		○	○	○	-
横断方向		○	○	○	-

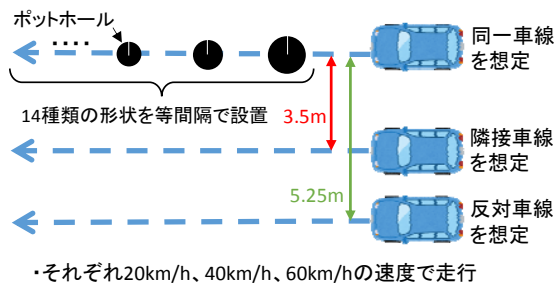


図-1 走行条件イメージ

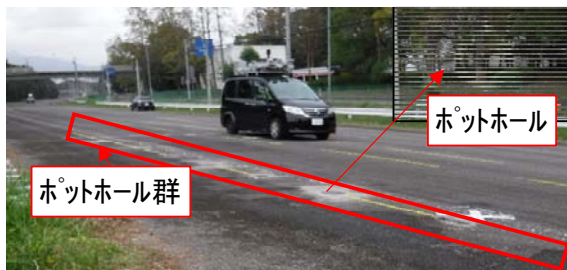


図-2 試験走路での点群データ取得状況

低密度 MMS	走行位置	
	同一車線	隣接車線
	20km/h	20km/h
走行速度	40km/h	40km/h

図-3 低密度MMSで取得した点群データ（平面図）（すり鉢状 直径20cm 深さ5cm）

高密度 MMS	走行位置	
	同一車線	隣接車線
	20km/h	20km/h
走行速度	40km/h	40km/h

図-4 高密度MMSで取得した点群データ（平面図）（すり鉢状 直径20cm 深さ5cm）

表-3 本研究で用いたMMSの諸元

商品名	MMS-AT220 (低密度 MMS)	MMS-X500ZL (高密度 MMS)
LiDAR 機種名	SICK LMS511×2台	Z+F Profiler 9012×1台
発射レート（最大） [スキャンレート]	27.1KHz×1台 [100Hz]	1,016KHz [200Hz]
1台当りの点群密度	50点/m ² (計測距離5m)	2,000点以上/m ² (計測距離5m)
計測距離(実行)	65m	118m
測距精度(1σ)	6mm	2mm
反射強度	取得可	取得可

整備局が保有するMMS-AT220（以下、「低密度MMS」という。）と、比較のために高性能なMMS-X500ZL（以下、「高密度MMS」という。）を用いてMMSの性能による違いを分析した。本研究に用いたMMSの諸元を表-3に示す。

3. ポットホールの検知手法

(1) ポットホールの検知手法の比較

取得した点群データから、ポットホールを検知する手法として、RANSAC法²⁾、主成分分析(PCA)、スキャンライン追跡の3種類（図-5）を検討した。この際、それぞれの手法によりポットホールと判断した領域の中心を点群データ上にピンで明示した画像（以下、「ポットホール検知画像」という。）を比較し、道路管理業務に最適な検知手法を決定した。

一例としてポットホールと同一車線上を40km/hで走行して取得した点群データを用いた検知手法別のポットホール検知画像を図-6に示す。図-6より以下のことが明ら

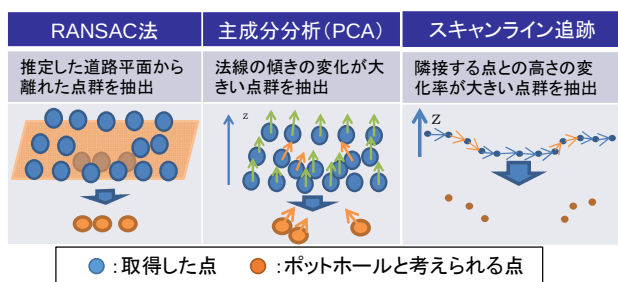


図5 ポットホールの検知手法

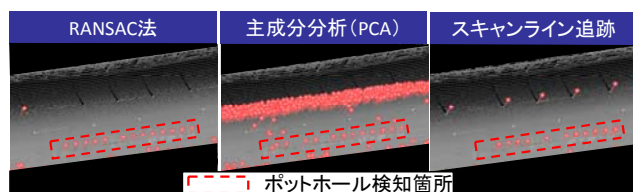


図6 ポットホール検知画像

かになった。

- ・14種類のポットホールのうち、正確な位置に検知できた個数は、主成分分析（PCA）、RANSAC法、スキャンライン分析の順に多い。
- ・主成分分析（PCA）は、ポットホールではない箇所を誤ってポットホールと判断した箇所（誤検知）が多く存在する。

また、他の取得条件の場合も同様の傾向であった。以上より、本研究で用いるポットホールの検知手法は、道路管理業務への適用を考慮し、ポットホールを比較的多く検知でき、誤検知が少ないRANSAC法を用いることとした。

(2) RANSAC法の最適パラメータの検討

RANSAC法を基に、図-7のような手順で処理する。この処理は、2つのパラメータからポットホールの候補点を検知するものである。1つは、「平面判定距離」であり、点群から道路面の平面を推定する際に、平面との距離が閾値（平面判定距離）以内の点の数を計測する際に使用する。この点の数が最も多かった平面について、平面判定距離以内の全ての点に最小二乗法を用いて確定平面を決定する。もう1つは、「平面除去距離」であり、上記の確定平面から一定の距離以上離れた点を抽出する際に使用する。

「平面判定距離」は、想定したポットホールの深さよりも浅い値である必要がある。さらに、MMSに搭載したレーザの測距精度より余裕をもった1cmを基準とし、これに加え5mmと2cmの3パターンを設定した。また、「平面除去距離」も同様の理由で1cmを基準とし、これに加え5mmと2cmの3パターンを設定し、合計9パターンの組合せを用いて、それぞれの場合における再現率及び適合率から最適なパラメータを決定する。

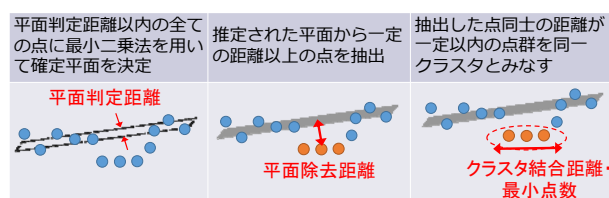


図-7 RANSAC法

表-4 パラメータ別ポットホール検知画像

		平面判定距離		
		5mm	1cm	2cm
平面除去距離	5mm	【パラメータ3】 再現率: 100.0% 適合率: 100.0% F値: 7.7%	【パラメータ4】 再現率: 100.0% 適合率: 100.0% F値: 7.7%	【パラメータ5】 再現率: 100.0% 適合率: 100.0% F値: 8.2%
		【パラメータ6】 再現率: 100.0% 適合率: 100.0% F値: 7.5%	【パラメータ7】 再現率: 100.0% 適合率: 100.0% F値: 7.7%	【パラメータ8】 再現率: 100.0% 適合率: 100.0% F値: 7.7%
		【パラメータ9】 再現率: 100.0% 適合率: 100.0% F値: 7.5%	【パラメータ10】 再現率: 100.0% 適合率: 100.0% F値: 7.7%	【パラメータ11】 再現率: 100.0% 適合率: 100.0% F値: 7.7%
	1cm	【パラメータ12】 再現率: 100.0% 適合率: 100.0% F値: 7.5%	【パラメータ13】 再現率: 100.0% 適合率: 100.0% F値: 7.7%	【パラメータ14】 再現率: 100.0% 適合率: 100.0% F値: 7.7%
		【パラメータ15】 再現率: 100.0% 適合率: 100.0% F値: 7.5%	【パラメータ16】 再現率: 100.0% 適合率: 100.0% F値: 7.7%	【パラメータ17】 再現率: 100.0% 適合率: 100.0% F値: 7.7%
		【パラメータ18】 再現率: 100.0% 適合率: 100.0% F値: 7.5%	【パラメータ19】 再現率: 100.0% 適合率: 100.0% F値: 7.7%	【パラメータ20】 再現率: 100.0% 適合率: 100.0% F値: 7.7%

一例として、低密度MMSを用いた場合における、隣接車線を40km/hで走行した際のパラメータ別のポットホール検知画像、再現率及び適合率を表-4に示す。表-4を見ると、平面除去距離が1cmや5mmの時は適合率が低いことがわかる。一方、平面除去距離が2cmのときは、平面判定距離が5mm（パラメータ3）もしくは1cm（パラメータ6）の時に再現率50.0%となり、再現率が高く、適合率も100.0%と誤検知がない。

しかし、パラメータ3は「平面判定距離」が5mmであり、表-3に示したように低密度MMSの測距精度が6mmと差が少ないため、結果が安定しないことが予想される。そのため、40km/h走行時はパラメータ6を最適値とした。同様の方法で、低密度MMSの20km/h、60km/h及び高密度MMSの20km/h、40km/h、60km/h時の最適なパラメータを決定し、ポットホールの検知を行った。

(3) 後処理

後処理として、RANSAC法より求めたポットホールの候補点が正しく検知されたかを判断するために、クラスタリングをした。具体的には、それぞれの点同士の距離がL（クラスタ結合距離）内である点集合をクラスタ候補として扱う。クラスタ候補のうち、点数がNmin～Nmax（クラスタ最少点数～クラスタ最多点数）までのクラスタの重心をポットホールの箇所と判断する（図-8）。すなわちこのクラスタリングでは、3つのパラメータを利用して分析を行った。1つ目は、「クラスタ結合距離」であり、同一クラスとみなす点間距離の最大値

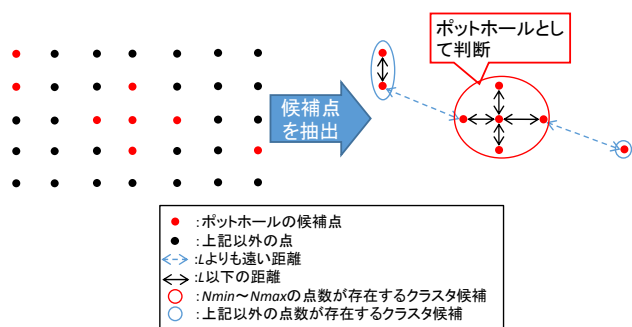


図-8 クラスタリング方法

を表す。2つ目は、「クラスタ最小点数」であり、同一クラスタとみなす点の最小数を表す。3つ目は、「クラスタ最大点数」であり、同一クラスタとみなす点の最大数を表す。

4. 分析結果

(1) 点群データの取得条件と検知結果

14種類のポットホールのうち、本報文では、すり鉢形状の直径20cm、深さ5cmのポットホールについての分析結果を述べる。2種類のMMS（低密度MMS、高密度MMS）を用いて、走行条件を変えた場合にこのポットホールが検知可能か分析した。今回は、2種類のMMS共に走行条件毎に2回取得したため、2回検知した場合に「○」、1回のみ検知した場合に「△」、1回も検知しない場合に「×」とした。この結果を表-5及び表-6に示す。結果について、低密度MMSでどの速度で走行すれば今回対象とした、すり鉢形状の直径20cm、深さ5cmのポットホールが検知できるか、という観点で分析した。表-5と表-6を比較することで、次のことを明らかにした。

- (i) 同一車線上のポットホールを確実に検知するには、40km/hで走行する必要がある。
- (ii) 隣接車線上のポットホールについては、低速20km/hで走行すると検知できる可能性がある。ただし高密度MMSを用いると、40km/hで走行しても確実に検知可能。
- (iii) 反対車線上のポットホールは、20km/hで走行した場合でも検知できない。

5. まとめ

現場事務所の活用ニーズが高い「路面損傷の確認」の

表-5 低密度MMSの検知結果

低密度 MMS		走行位置		
		同一車線 (0m)	隣接車線 (3. 5m)	反対車線 (5. 25m)
走行速度	20km/h	○	△	×
	40km/h	○	×	×
	60km/h	△	×	×

表-6 高密度MMSの検知結果

高密度 MMS		走行位置		
		同一車線 (0m)	隣接車線 (3. 5m)	反対車線 (5. 25m)
走行速度	20km/h	○	○	×
	40km/h	○	○	×
	60km/h	○	×	×

うち発生頻度が高いポットホールの検知を対象として、計測時の走行位置や速度等の取得条件と検知可能な規模との関係に関する分析を実施した。この結果、例えば直径が20cmで深さが5cmのすり鉢状のポットホールであれば、20km/hで走行すれば隣接車線までは検知可能であることや、今回利用した高密度MMS程度の性能を持つ機材を用いれば40km/hまで走行速度を大きくしても検知可能である等の知見を得た。

今後、各地方整備局等がMMSを用いて取得するデータを道路管理業務に利用するための研究を引き続き進める課題として、以下の2点が挙げられる。

○実際の現場に存在する複雑な形状のポットホールや他の路面変状でも応用の可能性を検証する必要がある。

○地方整備局が保有するMMSでは画像データも取得可能であるため、画像と点群データとを併用し、変状の検知精度を向上する方法を研究する必要がある。

そのため、本年度に各地方整備局等が全国で取得予定の三次元点群データ等を用いて、これらの課題の検証方法について検討したい。

参考文献

- 1) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：車両搭載センシング技術を活用した道路基盤地図データの収集実験の開始について、
<<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/kisya/journal/kisya20170106.pdf>>.
- 2) Fischler, M.A. and Bolles, R.C. : Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, Communications of the ACM, vol.16, no.24, pp.381-395, 1981.

積雪寒冷地の公共建築物における ZEBの推進について —積雪寒冷地のZEBの実現をめざして—

杉田 瑞季¹・志保井 隆²・飯塚 和志²

¹北海道開発局 営繕部 保全指導・監督室 (〒060-8511 北海道札幌市北区北8条西2丁目)

²北海道開発局 営繕部 営繕整備課 (〒060-8511 北海道札幌市北区北8条西2丁目)

政府目標として、ZEB（ゼロ・エネルギー・ビル）を2020年までに新築公共建築物で実現することが掲げられている。積雪寒冷地では暖房時のエネルギー消費量が多く、ZEBの実現のためには積雪寒冷地固有の省エネルギー技術の採用を検討する必要がある。本報告では、先進事例の設計手法を分析し、積雪寒冷地の公共建築物におけるZEBを実現する省エネルギー技術について報告する。

キーワード：ZEB、省エネルギー、積雪寒冷地

1. はじめに

我が国の最終エネルギー消費のうち、業務他部門（事務所、店舗、病院、学校等）の2015年のエネルギー消費量は、1973年比で2.4倍、1990年比でも1.4倍と、他部門に比べ増加が顕著であることから、徹底的な省エネルギーの推進は我が国にとって喫緊の課題となっている。

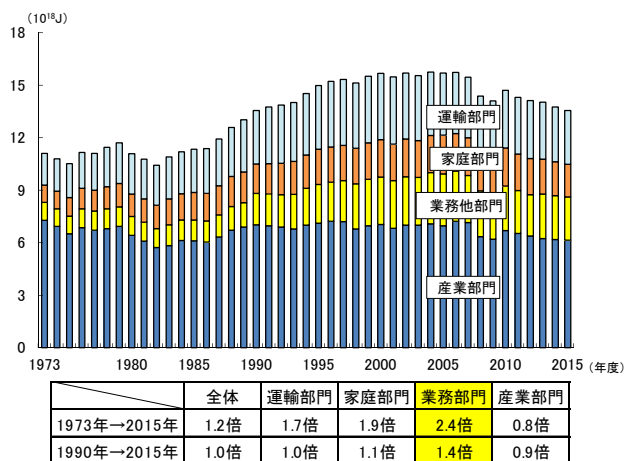


図-1 我が国の最終エネルギー消費の推移¹⁾

これを踏まえ、2014年に閣議決定された「エネルギー基本計画」では、2020年までに新築公共建築物等において、2030年までに新築建築物の平均でZEBを実現することを目指している。

しかしながら、北海道を含む積雪寒冷地においては、ZEBを実現した事例が非常に少ない現状である。

本報告では、ZEBを実現した先進事例の設計手法を分析し、積雪寒冷地の公共建築物におけるZEBを実現する省エネルギー技術について報告する。

2. ZEBの定義

ZEBとは「Zero Energy Building」の略で、「室内及び室外の環境品質を低下させることなく、負荷抑制、自然エネルギー利用、設備システムの高効率化等により、大幅な省エネルギーを実現した上で、再生可能エネルギーを導入し、その結果、運用時におけるエネルギー（あるいはそれに係数を乗じた指標）の需要と供給の年間収支（消費と生成、又は外部との収支）が概ねゼロもしくはプラス（供給量>需要量）とすることを旨とした建築物」とされている²⁾。

ZEBを達成させるためには、空調・換気・給湯・照明・昇降機設備の効率化と高断熱化・日射遮へい・自然換気・昼光利用など建築外皮の高度化を行い、エネルギーを削減すること、また、再生可能エネルギーの導入により、年間一次エネルギー消費量の収支をゼロとすることが有効である。

ZEBには以下に示す3種類の定義がある。

ZEB Ready：再生可能エネルギーを除き、基準一次エネルギー消費量から50%以上の一次エネルギー消費量削減

Near ZEB：ZEB Readyに加え、再生可能エネルギーを含んで基準一次エネルギー消費量から75%以上100%未満の一次エネルギー消費量削減

ZEB：ZEB Readyに加え、再生可能エネルギーを含んで基準一次エネルギー消費量から100%以上の一次エネルギー消費量削減

ZEB は、エネルギー消費性能計算プログラム³⁾を用いて計算を行い、設計段階の BEI (Building Energy Index) を指標として評価することとされている。

BEI は、2013年省エネルギー基準を満たすモデルビルと設計建築物の一次エネルギー消費量の比率であり、次式のように BEI が0.5以下の場合に ZEB (ZEB Ready含む) と判定される。

なお、ZEB の判定には、エネルギー利用効率化設備(太陽光発電等)とその他一次エネルギー消費量は加味されない(図-2)。

$$BEI = \frac{\text{設計一次エネルギー消費量}}{\text{基準一次エネルギー消費量}} \leq 0.50$$



図-2 ZEB の定量的イメージ⁴⁾

3. 積雪寒冷地におけるZEBの実現が少ない要因

我が国における ZEB (ZEB Ready以上) を実現した施設は、2018年4月現在で202施設である。その内、積雪寒冷地における実現事例は、民間施設においては7施設(北海道 5施設、青森県2施設)、公共施設においては1施設と極めて少ない。

ここで、積雪寒冷地における ZEB の実現事例が少ない原因を考察する。

事務所用途の施設全体のエネルギー消費量のうち、空調に占める割合は40~50%程度であり、空調に要するエネルギー消費割合が多い(図-3)。

図-4に北海道内5施設及び道外1施設の官庁施設における冷房・暖房別の年間一次エネルギー消費比率(実績値)を示す。北海道内の官庁施設における空調に要する年間エネルギー消費のうち、暖房の占める割合は約80%と大幅に大きい(図-4)。

一般に、冷房熱源は高効率化がされており、省エネルギー化を図ることが容易である。しかし、暖房熱源は、成績係数(冷暖房能力を消費エネルギーで除した値)が1.0程度と低いことから、省エネルギー化には課題が多い(図-5, 6)。

これらのことから、暖房に要するエネルギー消費割合が多い積雪寒冷地では、ZEB を実現する施設数が少ないと考えられる。

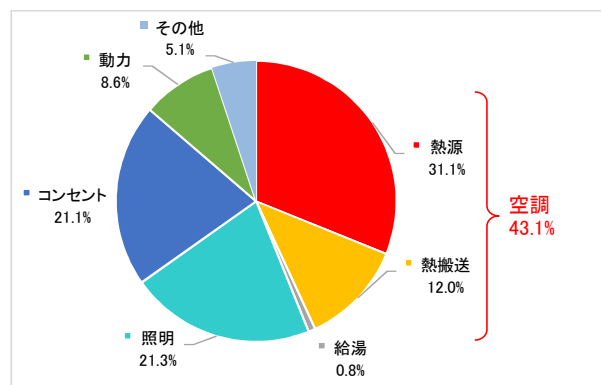


図-3 オフィスビルにおけるエネルギー消費割合⁵⁾

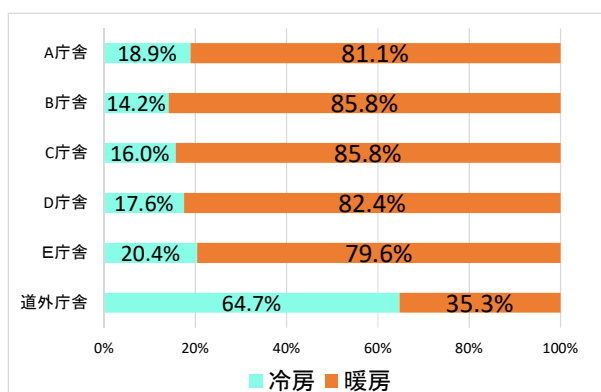


図-4 官庁施設の年間空調一次エネルギー消費比率

注1) 各庁舎のエネルギー消費比率は、エネルギー消費量の実績値を元に算出している。

注2) 道外F庁舎は関東地区におけるA~E庁舎と類似用途の庁舎である。

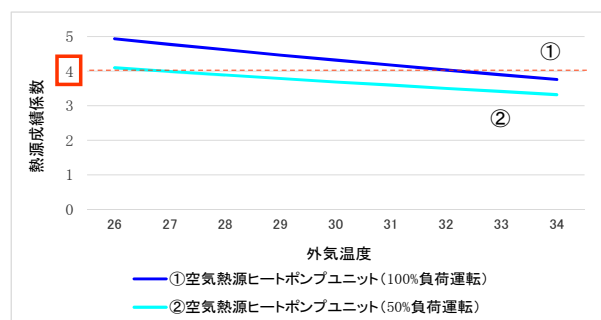


図-5 冷房熱源における成績係数の算出例⁶⁾

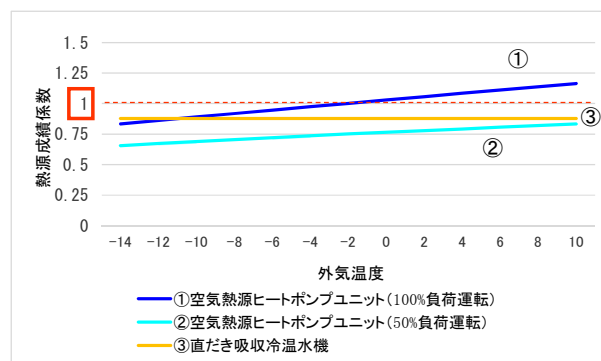


図-6 暖房熱源における成績係数の算出例⁶⁾

4. 積雪寒冷地におけるZEBの実現技術の分析

ZEB を実現した施設において採用されている省エネルギー技術について、北海道内・全国別に分析を行った結果を表-1に示す。北海道内5施設、全国86施設（いずれも、採用された省エネルギー技術が公開されている施設に限る）を分析対象としている。

北海道内のZEBの実現施設では、主な採用技術のうち「高断熱（外断熱）」、「Low-E 複層ガラス」、「LED 照明」、「照明制御」、「地中熱ヒートポンプ」「全熱（顕熱）交換器」の技術が多く採用されている。

全国では、「Low-E 複層ガラス」、「全熱交換器」、「LED 照明」、「照明制御」、「BEMS・エネルギーの見える化」の技術が採用されている。

表1 ZEB 実現施設における省エネルギー技術（抜粋）⁷⁾

採用技術・施設用途		施設数		2014～2018年	
		道内ZEB 実現施設 (5施設)		実現予定施設 (全国86施設 [※])	
実現 ZEB種類	ZEB	1	(20%)	5	(6%)
	Nwary ZEB	0	(0%)	10	(12%)
	ZEB Ready	4	(80%)	71	(83%)
主な 採用 技術	建築	高断熱(外断熱)	5 (100%)	46	(53%)
		Low-E複層ガラス	5 (100%)	70	(81%)
		自然換気*	2 (40%)	21	(24%)
	電気	LED照明	5 (100%)	75	(87%)
		照明人感センサー等制御	3 (60%)	79	(92%)
	機械	地中熱ヒートポンプ	4 (80%)	2	(2%)
		放射・輻射空調	1 (20%)	12	(14%)
		全熱(顕熱)交換器	4 (80%)	61	(71%)
		太陽熱集熱	1 (20%)	13	(15%)
	EV	EV電力再生制御	-	5	(6%)
	BEMS、エネルギー見える化*		2 (40%)	85	(99%)

※ ZEBを実現した施設の内省エネルギー技術が公開されている施設。

・ 数字は採用施設数、%は採用施設の割合を示す。

・ 黄色は道内のZEB実現施設で採用が多い技術を示す。

・ * (青字)はエネルギー消費計算上反映出来ない技術を示す。

北海道内のZEBの実現施設において多く採用されている省エネルギー技術について以下のとおり考察した。

(1) 高断熱（外断熱）

北海道内で ZEB を実現した全ての施設で採用されている。

図-7は札幌及び東京地区における外皮性能（総熱貫流率及び総日射透過率）と年間冷暖房負荷（外皮負荷）との関係性を示した試算例である。グラフ内の矢印は年間冷暖房負荷（外気負荷を含まず）が小さくなる傾向を示しており、札幌地区では、断熱性能が向上することによる年間冷暖房負荷の削減割合が東京地区より大きいことが分かる。

このことから、暖房時の外皮負荷が多い積雪寒冷地における有効な省エネルギー技術として、全ての施設で採用されたと考えられる。

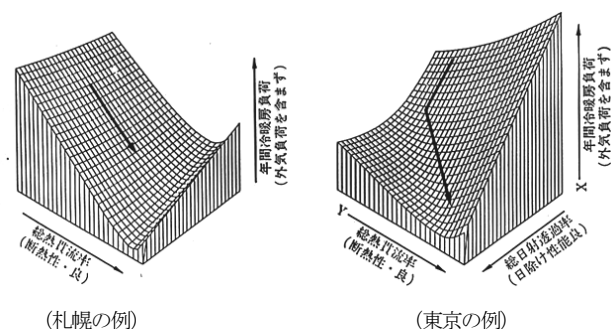


図-7 外皮総熱貫流率と年間冷暖房負荷の試算例⁸⁾

(2) Low-E複層ガラス

外皮負荷を低減する技術として、北海道内は全ての施設で採用されている他、道外でも採用事例が多くなっている。

Low-E ガラスは遮熱タイプと断熱タイプがあり、道外では遮熱タイプが、北海道では断熱タイプが多く使われ、外皮負荷を削減する有効な技術として採用されたと考えられる。また、北海道内のZEB実現施設において、冷房・暖房時の外皮負荷をバランス良く低減するため、窓方位により遮熱タイプと断熱タイプを使い分けをし、冷房／暖房熱負荷の低減を図った事例が1施設で見られた。

(3) 地中熱

北海道内での採用事例は道外と比較して高い状況であり、4施設で空調熱源として地中熱ヒートポンプが採用されている。

夏季には外気温度より低く、冬季には外気温度より高い地中のエネルギーを利用することにより、熱源を冷房・暖房とも高い効率で運転することが可能となる。

特に、暖房時の能力低下が大きく、暖房時のエネルギー消費割合が多い北海道での有効な技術として多くの施設で採用されたと考えられる。

(4) 全熱（顕熱）交換器

空調における外気負荷低減技術として、北海道内・道外とも採用事例が多い。外気温度が低い積雪寒冷地では、省エネルギー化において有効な技術として採用されたと考えられる。

(5) 照明

北海道内・道外とも、LED 照明がほぼ全ての施設で使用されているほか、人感センサーによる照明制御も多くの施設で採用されており、省エネルギー化において有効な技術として採用されたと考えられる。

(6) その他

現状のエネルギー消費計算上反映されないが、運用上省エネルギーに資する技術である BEMS・エネルギーの見える化や自然換気についても、採用事例が見られた。

5. 積雪寒冷地におけるZEBの実現に向けての検討

前述の ZEB の実現事例を踏まえ、北海道内の官庁施設をモデルとして、エネルギー消費計算に反映ができる技術を用いてZEB化の検討を行う。

検討を行った建物概要、導入した省エネルギー技術、及び、エネルギー消費性能の検討結果を以下及び表-2に示す。

a) 建物概要

鉄筋コンクリート造4階建て 延べ面積2,728㎡
(2009年設計、2011年完成)

b) 所在地

北海道札幌市



図-8 庁舎外観

c) 主な環境配慮技術

外断熱工法（通気層工法）、断熱サッシ、断熱複層ガラス（Low-E）、LED照明、照明制御（初期照度補正、昼光利用制御）、太陽光発電設備、空気熱源ヒートポンプ

d) 省エネルギー技術の設定

■現状

空調設備：空気熱源ヒートポンプ（直膨コイル式ユニット形空気調和機、パッケージ形空気調和機）、全熱交換器（1フロア）

換気設備：遠心送風機

照明設備：LED照明、照明制御（初期照度補正、昼光利用）

給湯設備：貯湯式電気温水器

昇降機：インバーター制御

■ZEBの実現に向けての省エネルギー技術の導入

建築：断熱材を厚さ50mmから100mmに変更

Low-E ガラスを東西方向を遮熱タイプに変更（南北方向は断熱タイプから変更なし）

空調設備：熱源を空気熱源ヒートポンプから地中熱ヒートポンプに変更

空調機をインバーター制御に変更

全熱交換器の採用範囲を4フロアに変更

換気設備：便所等定常排気系統を第3種換気から第1種換気（顕熱交換ユニット）に変更し、空調設備の全熱交換効率を向上

照明設備：照明制御（人感センサー制御（設備室以外）、タイムスケジュール（全館）を追加）

換気設備：送風機の全てをインバーター制御に変更

昇降機：電力回生を追加

表-2 ZEB の実現に向けて導入した省エネルギー技術と検討結果 (PAL*, BEI)

設定条件	建築	空調設備	換気設備	給湯設備	照明設備	昇降機	庁舎全体 BEI
現状	・外断熱(通気層工法)、断熱厚さ 50mm ・Low-E 複層ガラス(断熱タイプ)	・空気熱源ヒートポンプユニット ・ユニット形空気調和機(直膨コイル) ・空冷式パッケージ形空気調和機 ・全熱交換器(1フロア)	・送風機	・電気温水器(混合水栓)	・LED 照明(全館) ・照明制御(初期照度補正、昼光利用)	・インバーター制御	0.85
	319	0.99	2.18	1.98	0.51	1.00	
ZEB の実現に向けての導入した省エネルギー技術	・外断熱(通気層工法)、断熱厚さ 100mm ・Low-E 複層ガラス(東西方向:遮熱タイプ、南北方向:断熱タイプ)	・地中熱利用ヒートポンプユニット ・地中熱利用パッケージ形空気調和機 ・全熱交換器(4フロア) ・送風機インバーター制御	・顕熱交換ユニット(便所等) ・送風機インバーター制御	・電気温水器(自動水栓)	・照明制御(人感センサー制御、タイムスケジュール)	・電力回生(ギアレス)	0.50
	307	0.57	1.39	1.27	0.36	0.81	

※数値は建築は PAL*を、その他は設備毎の BEI を示す。

6. 検討結果

各条件に基づく設備毎の設計年間一次エネルギー消費量及びBEIを図-9に示す。

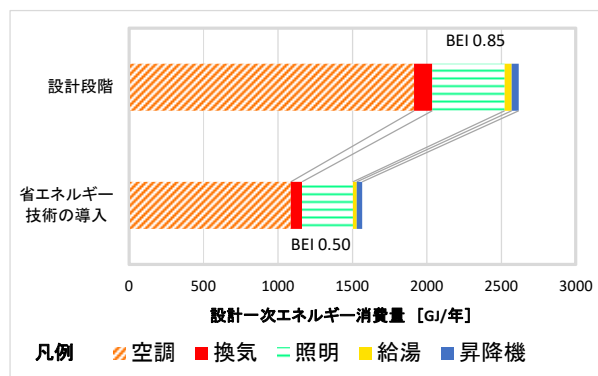


図-9 BEIと設計一次エネルギー消費量

検討の結果、省エネルギー技術導入前より設計年間一次エネルギー消費量が約42%削減され、またBEIが0.50となり、ZEB Ready を達成することが出来た。

イニシャルコストは、ZEB の実現に向けて導入した省エネルギー技術の費用増加分として、施設全体の建設費より約15% 程度高くなった。費用対効果として、省エネルギー技術の費用の増加分を光熱費の削減額で除した回収年数は約40年程度となった。

また、再生可能エネルギーを加えて、基準一次エネルギー消費量から100%以上設計一次エネルギー消費量を削減する「ZEB」の検討として、再生可能エネルギーを太陽光発電設備で全てを賄う場合、約180 KW の設備を設置すると ZEB の達成が可能となった。

7. 考察

積雪寒冷地に有効な省エネルギー技術を組み合わせることにより、ZEB の実現が可能となった。特に、空調設備及び照明設備で消費するエネルギーを削減する効果が大きい結果となった。

空調設備においては、暖房における省エネルギー化に有効な地中熱ヒートポンプ及び全熱交換器、空調機インバーター制御などの組み合わせによる省エネルギー効果が大きく、ZEB を実現する技術として有効であった。また、高断熱（外断熱）による外皮性能の向上に伴う空調熱負荷の削減も ZEB の実現に寄与している。

照明設備においては、人感センサー制御、スケジュール制御による省エネルギー技術の効果が大きく有効である。

8. おわりに

積雪寒冷地の公共建築物においてZEBを達成するためには、地中熱などの自然エネルギーを有効に活用した建築・電気設備・機械設備の省エネルギー効果が高い技術を採用する必要がある。

今回検討を行った施設では、施設全体の建設費から約15%程度高くなった。公共建築物におけるZEBの実現に向けては、必要な予算の確保が重要となる。予算の確保の方法として、通常の建設費とは別枠でZEBに特化した予算を確保する制度を制定し、ZEB を実現しようとする施設に対し、省エネルギー技術の費用の増加分に必要な予算を充当できるようにすることで、ZEB の実現の可能性が高くなると考える。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁：エネルギー白書 2017
- 2) ZEB ロードマップフォローアップ委員会：ZEB 設計ガイドライン
- 3) 国立研究開発法人建築研究所：エネルギー消費性能プログラム
- 4) 環境共創イニシアチブ：ZEB のすすめ(事務所編)
- 5) 一般財団法人 省エネルギーセンター：オフィスビルの省エネルギー
- 6) 国土交通省大臣官房官庁営繕部：ライフサイクルエネルギーマネジメント（LCM）ツール
- 7) 環境共創イニシアチブ：ネット・ゼロ・エネルギー・ビル実証事業調査発表会 2016, 2018
一般財団法人ヒートポンプ蓄熱センター：平成 30 年度電力平準化・省エネルギー社会実現セミナー（講演資料）
- 8) 一般財団法人建築環境・省エネルギー機構：平成 14 年度国土交通大臣指定特別講習 「建築環境・省エネルギー講習」（講習会資料）
- 9) 国土交通省大臣官房官庁営繕部：官庁施設における地中熱利用システム導入ガイドライン(案)

除雪機械の下回り塗装の試行について

田中 誠¹・落合 信孝²・泉 実¹

¹東北地方整備局 秋田河川国道事務所 防災課（〒010-0951 秋田県秋田市山王1丁目10-29）

²東北地方整備局 青森河川国道事務所 防災課（〒030-0822 青森県青森市中央3丁目20-38）

近年、維持管理予算が削減されてきている中、建設機械の維持にかかる費用は縮減することができず、維持管理予算を圧迫している状況である。そこで、機械の信頼性を損なうことなく機械寿命の延命や、修理費の縮減ができないかを検討し、その中でシャシフレームの腐食が機械寿命に大きく影響する除雪機械に着目し、各種防錆塗料を試行的に実施した。

2013～2015年度納入車両に新車時から2種類の防錆塗装を実施し、継続的に発錆状況を比較検証した結果、その防錆効果に確認がとれたことから検証結果を報告するものである。

キーワード 除雪機械の延命化、維持管理コスト縮減、塗装

1. 試行対象車両と塗装仕様

(1) 試行対象車両の選定

試行対象車両の選定にあたり、除雪機械の機種別の平均寿命を調査した結果、短命1位は表-1に示すとおり凍結防止剤散布車である。

また、同じトラックシャシを使用している除雪トラックは、凍結防止剤散布装置を搭載しているものと除雪作業のみの専用車があり、前者と後者では下回りの腐食進行度合いに差があることから、腐食の原因は自らが散布する凍結防止剤の影響であると言える。除雪トラックの近年における使用実績年数は比較的長くなっているものの、腐食が顕著で毎年整備に多額の整備費用がかかっており、整備や維持管理に苦慮している。これらの凍結防止剤散布車両はシャシフレームの腐食による強度低下が原因で更新されていることから、腐食が抑えられれば延命化につながると考え「凍結防止剤散布車」と「凍結防止剤散布装置付除雪トラック」の2機種を試行対象機種として選定した。

表-1 除雪機械機種別使用年数
(東北管内過去5ヶ年実績)

機 械 名	更新年数	短命順位
除雪トラック	19.3	4
除雪グレーダ	22.1	5
ロータリ除雪車	16.9	2
小型除雪車	18.7	3
凍結防止剤散布車	14.8	1
平均	18.4	

対象車両の選定については、事務所管内の該当機種のうち、2013～2015年度にかけて納入された表-2に示す新車3台とし、公正な防錆の評価を得るため車両納入直後の現場で使用する前に、防錆効果が高いとされている2種類の下回り塗装を実施した。

なお、追跡調査対象車両のうち1台は散布装置無しの特用車である除雪トラックであるが、配備工区の凍結防止剤散布量が事務所管内でトップクラスであり、更新車両の腐食が激しかったことから、凍結防止剤の影響が大きいものと考え、検証材料として試行調査対象車両とした。

表-2 追跡調査対象車両

機 械 名	規 格	試行開始年度
除雪トラック	10t 6×6 MT P ATG	2015 新車時
	10t 4×4 P ATG MS	2013 新車時
凍結防止剤散布車	4×4 MS	2014 新車時

※規格欄の「MS」は凍結防止剤散布装置を表す。

(2) 各種下回り塗料の特徴

各種下回り塗料の特徴を下記に示す。(表-3)

水性パスターはシャシブラックとも呼ばれるごく一般的な塗料で、除雪機械においても標準塗料となっている。

これに代え試行として採用した試行塗料Aは塗料中の特殊セラミックとエポキシ樹脂との組み合わせにより高い防錆効果を発揮する。試行塗料Bは2種類の塗料で構成され、下地のステンレスフレーク含有塗料で重防食性を発揮し、パラフィンワックスを主剤とする上層塗料で水分を弾き腐食環境を作らせないことで防錆効果を発揮するものである。

表-3 各種下回り塗料の特徴

塗装種別	仕様又は主成分
水性パスター	合成樹脂系又は水溶性樹脂系
試行塗料A	エポキシ変性アルキド樹脂系
試行塗料B	B1 ポリ塩化ビニリデン変性エポキシ樹脂+ステンレスフレーク
	B2 主剤=パラフィンワックス

※塗料Bについては初年度B1+B2にて施工、以降次年度からB2のみ施工。

2. 車両の下回り状況

(1) 水性パスター（標準塗料）

図-1は、水性パスター塗装のまま10シーズン程度経過した車両の整備前状況である。シャシフレーム内側の外観は3シーズンを経過した辺りから概ね、この状態となる。

水性パスターは試行塗料のような防錆機能を有していないため、それほど防錆効果は高くなく、毎年整備で下回りを全面下地処理・全面塗装を実施しているにも関わらず腐食の進行が早い。稼働が終了する頃には塗装の下にある錆が膨れることにより塗装膜を破壊し、フレームの素地が剥き出しとなっていることも少なくない。そしてこのまま年々シャシフレームの板厚が減少していく。

錆によるダメージは顕著かつ深刻であり、最終的に鋼材の減肉が進行し、図-2のようにフレームに穴が開くような状態となる。

この状態になると修繕に多額の費用がかかることになる。また、サブフレーム程度であればフレームごと交換することで修繕対応は可能であるが、メインフレームになると修繕は不可能で、車検を通すことができず稼働不能となってしまう。



図-1 シャシフレーム内側状況



図-2 シャシ後部サブフレーム穴あき状況

(2) 試行塗料A

図-3～5は、試行塗料Aを新車納入直後、現場配備前に施工し、6シーズンが経過した車両の整備前の状況である。

シャシフレーム内外面共に平面部の発錆は無く、非常に良好な状態である。端部や継ぎ目部に少々錆汁は見られるが軽度であり、水性パスターのように全面的下地処理・塗装をする必要がなく、部分的な下地処理・塗装のみで作業完了となる。



図-3 塗料A シャシフレーム外側状況



図-4 塗料A シャシフレーム内側状況



図-5 塗料A 車両前部フレーム状況

(3) 試行塗料B

図-6～8は、試行塗料Bを新車納入直後、現場配備前に施工し、5シーズンが経過した車両の整備前状況である。

試行塗料Aと同じくシャシフレーム内外面共に平面部の発錆は無く、非常に良好な状態で、端部や継ぎ目部に少々の錆汁がある程度で軽度であることから、部分的な下地処理と上層の塗料であるB 2塗料のみの施工で作業完了となる。



図-6 塗料B シャシフレーム外側状況



図-7 塗料B シャシフレーム内側状況



図-8 塗料B車両前部フレーム状況

(4) 試行塗料B（除雪専用車の除雪トラック）

図-9～10は、試行塗料Bを新車納入直後の散布装置無し除雪専用車である除雪トラックへ、現場配備前に施工し、3シーズンが経過した車両の整備前状況である。

この車両についても同じく非常に良好な状態を維持できている。



図-9 塗料B 除雪専用車シャシフレーム外側状況



図-10 塗料B 除雪専用車シャシフレーム内側状況

(5) 参考データ（新車ではない車両に試行塗料A施工）

参考として、水性パスターのまま数年稼働した車両を全面下地処理のうえ試行塗料Aを施工し、2シーズン経過した車両の状況を図-11～12に示す。

水性パスターのまま継続するよりは錆の進行が抑えられているが、新車納入直後に施工した車両のように良好な防錆効果を発揮しないことを確認した。

一度広範囲に発錆してしまうと下地処理で全ての錆を除去することが困難であり、結局残った錆部分が内側から塗膜を破壊しつつ広がっていくものと思われる。

このことから、シャシフレームの鉄素地が健全な状態で防錆性能に優れた下回り塗装を施すことが重要であることが分かる。車両製造段階でこれら防錆性能に優れた塗装が施されていることが、コスト的にもシャシフレームの防錆性能的にも最良の結果が得られる最も有効な手段と考える。

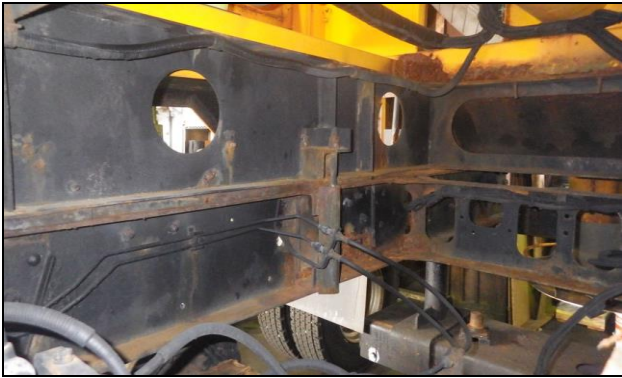


図-11 途中から試行塗料Aを施工した車両状況1



図-12 途中から試行塗料Aを施工した車両状況2

3. 各塗装仕様におけるコスト比較

各塗装におけるコスト実績を基に、機械寿命を一律15年と仮定し、下回り塗装のランニングコストを比較した結果を図-13に示す。

生涯の下回り塗装にかかる費用は、塗料単価にはあまり左右されず、下地処理にかかる工数をどれだけ低減できるかが最重要となる。

(1) 水性パスター（標準塗装）

錆の進行が早いことから下地処理に要する費用が年々

増加していく。3年経過時点辺りから費用増が顕著になり、15年間のコストとしては最も高くなるか、または15年を待たずに稼働不能に陥り車両更新の必要に迫られる可能性がある。

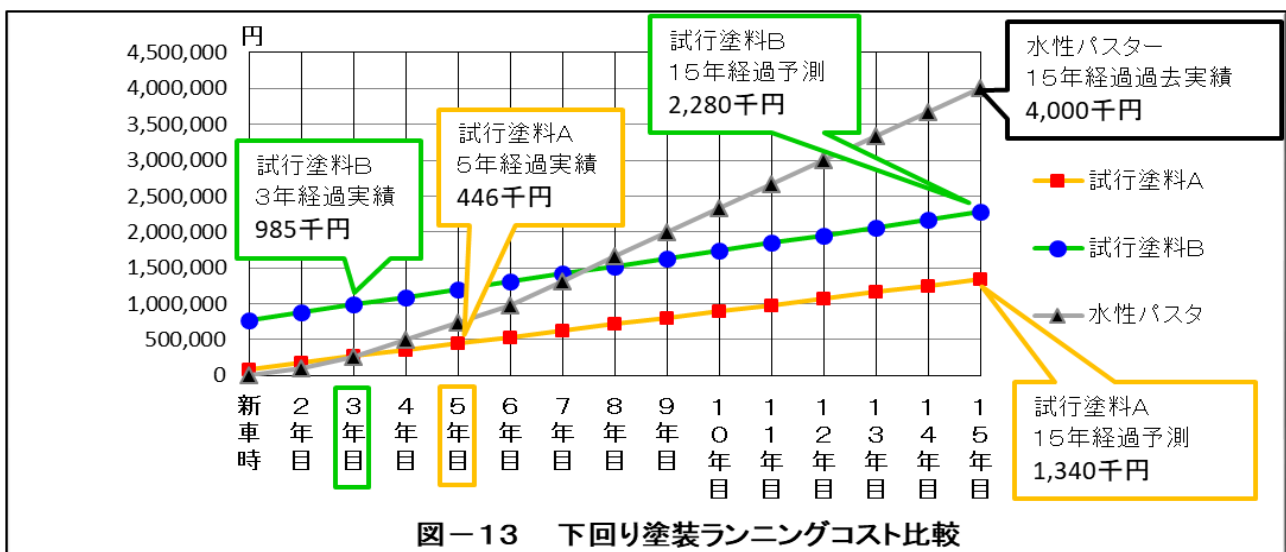
(2) 試行塗料A

防錆性能が高く、下地処理に要する費用を抑えることができるほか、新車納入直後における塗装施工費用についても、軽度な下地処理でよいことから費用が大幅に抑えられ、現時点では試行した中で下回り塗装ランニングコストが最も経済的であると推測される。

15年間の水性パスターと試行塗料Aで要する総コストを見ると、試行塗料Aがかかる費用は約3分の1に削減でき、単純平均で1台当たり年間180千円程度削減される試算となる。1台当たりではごく少額だが、当事務所の対象車両は14台あるため、全台で試行を行うと年間2,500千円以上の削減となり、仮にこれが地盤全体となると該当車両が約200台、年間36,000千円以上の維持管理費を削減できることになる。これは凍結防止剤散布車を追加で1台交換できるほどの削減額である。

(3) 試行塗料B

試行塗料Aに比べ初期費用が大きくなっている。これは下層塗料であるB1塗料が少々高価であることと、この塗装を施工するために水性パスターを全て除去する必要があり、下地処理工数がかかることが要因となっている。しかし最初に施工してしまえば以降の補修は上層のB2塗料のみでよく、試行塗料Aと同様に防錆性能が高いことから下地処理工数を抑えられる。これにより初期投資はかかるものの、8年経過時点でランニングコストが水性パスターと逆転し、15年間の水性パスターにかかる総コストと比較すると試行塗料Bで要するコストは約半分程度になるものと推測される。



(4) コスト比較の考察

トラックシャシをベースとした除雪機械について試行塗料Aと試行塗料Bを比較検証した結果、防錆性能はいずれも良好で、現時点では補修塗装にかかる費用に差が無いことから、試行塗料Bは初期塗装時にB 1 塗料を施工するための下地処理工数が嵩む分、コスト差を挽回できない。これにより、同等の性能で総コストで安価な試行塗料Aが優位と推測される。

4. おわりに

試行の結果、車両納入後直ちに防錆塗装を実施することが発錆を抑えるため非常に重要であり、防錆塗装を実

施することで除雪機械寿命の延命化と、除雪機械の維持管理コスト縮減に大きく寄与することが期待できる。機械寿命を延命化できることになれば更新サイクルの延びに伴う購入コストを含めた全体コストの縮減額は非常に大きなものとなる。

本試行結果については、本局の機械購入担当課へ情報発信し、今年度から凍結防止剤散布装置付除雪トラック一括購入の仕様書に試行塗料Aが試験的に反映されると共に、東北管内の他事務所にも情報提供し取組の拡大を図っている。

今後も各試行塗料の経年による状態を確認しつつ、また、他に有効な塗料があれば試行に取り入れながら継続して検証し、最終的な評価を行いたい。

新たなICT施工の取組 ～MCツインヘッドによる軟岩・中硬岩の法面 整形について～

岩間 亮友¹・野村 賢一¹

¹北陸地方整備局 金沢河川国道事務所 輪島国道出張所（〒928-0079 石川県輪島市鳳至町畠田99-21）

通常、軟岩・中硬岩の法面整形は、大型ブレーカで荒掘削した後、バックホウの岩掘削バケットで法面をひっかけ削り落とすように整形を行うため施工性が非常に悪く法面に爪痕が残り、仕上がり面の凹凸が大きくなることが課題となる。

本論文では、「H29・30能越道 長沢道路その7工事」において施工した岩掘削バケットを使用した従来の法面整形とMCツインヘッド（試験施工）による法面整形の比較結果を報告する。

キーワード 輪島道路，ICT，MC（マシンコントロール），法面整形，ツインヘッド

1. はじめに

一般国道470号能越自動車道は、富山県西部と石川県能登半島地域を結ぶ延長116.8kmの自動車専用道路である。現在建設中の輪島道路は、延長116.8kmのうち「輪島IC（仮称）」から「のと里山空港IC」を結ぶ延長11.5kmの区間を指す。

輪島道路は、Ⅰ期（三井IC（仮称）～のと里山空港IC）とⅡ期（輪島IC（仮称）～三井IC（仮称））からなる。Ⅰ期は平成18年度、Ⅱ期は平成24年度から事業化しており、平成28年度には輪島国道出張所が発足し工事が本格化した。この年、国土交通省が推進するi-Constructionの3本柱の1つである「ICT技術の全面的な活用」にICT土工が導入され、輪島道路の平成30年度施工工事（工種に土工を含むものに限り）20件のうち17件とほぼ全ての工事でICT土工を実施している。

その中でも「H29・30能越道 長沢道路その7工事」については、更なるICT活用事例としてマシンコントロールバックホウにツインヘッドを搭載し、軟岩・中硬岩の法面整形を実施した。

本論文では、岩掘削バケットを使用した従来の法面整形とツインヘッドを使用した法面整形の各比較検討結果について報告する。



図-1 輪島道路平面図

2. ICT技術と建設機械

ICT（Information and Communication Technology）技術のうち、位置情報を基にしたICT建設機械のマシンコントロール技術は飛躍的に向上しており、この技術を応用して新しい施工方法をイノベーションする時代となってきた。

ICT建設機械にはマシンコントロール（以下MCという）技術とマシンガイダンス（以下MGという）技術があり、最近ではMC建設機械が多く使用されるようになってきた。このMC技術は重機の掘削バケット等の形状を設定し、GNSS等で得られた重機本体の位置情報を基にバケット先端の位置情報を制御する技術で、三次元設計データと組み合わせることにより設計面に合わせてバケットが動きセミオートで作業ができる。

この技術により、これまで熟練オペレーターしかできなかった作業が、未熟練者でも比較的容易に出来形精度が確保できる。また、バケットの形状は自由に設定できることからアタッチメントの工夫で応用が広がり、今後この技術による土工事の効率化、省力化、省人力化が期待できる。

3. 現状と課題

通常、軟岩・中硬岩の法面整形は、大型ブレーカーで荒掘削した後、MCバックホウの岩掘削バケットにより整形を行っている。岩掘削用バケットでの整形は、バケットについた爪で法面をひっかけ削り落としながら行う。このため、法面に爪痕が残る、縦方向の凹凸が大きくなる（図-2）。

また、岩掘削バケットでの整形は施工性も非常に悪い。施工能力の大きい大型ブレーカをMC技術で制御し施工性を向上させたいところであるが、大型ブレーカは先端の矢がストロークして打撃を行うことから、先端の位置情報を制御するMC技術には不向きであり、衝撃掘削であることから法面が大きく壊れる可能性が高く、出来形精度が確保できない。

これらのことから、軟岩・中硬岩の法面整形における施工性を向上させることが課題であった。



図-2 岩掘削バケットで中硬岩を整形した法面の仕上がり

4. 技術的解決策

課題に対する解決策として、MCバックホウのアタッチメントをバケットからツインヘッドに替えて法面整形を試みた。このツインヘッドは、円筒形の形状に複数のビットがついたアタッチメントにより、回転打撃で掘削整形する機械である。

これまでツインヘッドによる掘削はその形状から、オペレーターから掘削している深さが把握しづらく、出来形を考慮しない荒い掘削にしか利用されていなかった。しかし、MC技術と組み合わせたツインヘッドは操作室内のモニターに法面とバケットの位置情報が表示されることから、オペレーターによる先端位置の把握が容易であることや、先端位置が制御しやすい回転掘削であることから、MC技術には理想的であった。また、複数のビットで回転して掘削整形するため、法面の凹凸が小さくなると考えられた。



図-3 ツインヘッド

5. アタッチメントの形状設定

MCバックホウで精度良く施工するためには、バケット等のアタッチメント形状を正確に計測して事前にMCバックホウに入力する必要がある。通常のパケットは形状設定がしやすく、バケット先端の爪先を基準位置とするが、円筒形のツインヘッドは明確な刃先がないため形状設定が難しく、形状設定を3パターンで検討した。

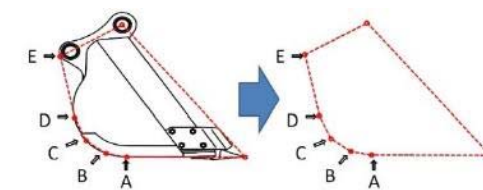


図-4 通常バケットの形状設定イメージ

(1) Aパターン (図-5)

ツインヘッド底面とドラム両端からの垂線を構成点（アタッチメントの輪郭を決定する点）として設定する。

取り外し可能な専用治具により刃先等の構成点を決定しているため、精度管理が確実で比較的容易にできることや、モニターに表示される形状が実物と近いいため、オペレーターが違和感なく施工できる。

しかし、バケット形状の底面を施工面へ水平に接触させるように施工することから、建機の座る位置の調整が必要で、施工面へのアプローチ角度も限られるため、施工性が低下する。

しかし、構成点が仮定の点であるため、ビットの位置等により十分な精度が得られない可能性がある。

(3) Cパターン (図-7)

ドラム回転軸を刃先として構成点を決定し、ドラム回転軸からドラム外周（ビットの先端）の寸法を設計面からオフセットし施工する。

Aパターンのデメリットであるアプローチ角度を気にする必要がなく、トータルステーションを使用することでBパターンのデメリットである精度確認も可能である。

Aパターンは施工性の低下、Bパターンは精度の信頼性が懸念されるため、Cパターンを採用した。

なお、MGバックホウで施工する場合は、モニターで表示される形状と実際の形状の差異は大きな問題となる。しかし、MCバックホウで施工する場合は、設計面に対しバケットを自動制御するため大きな影響はないと考えられる。

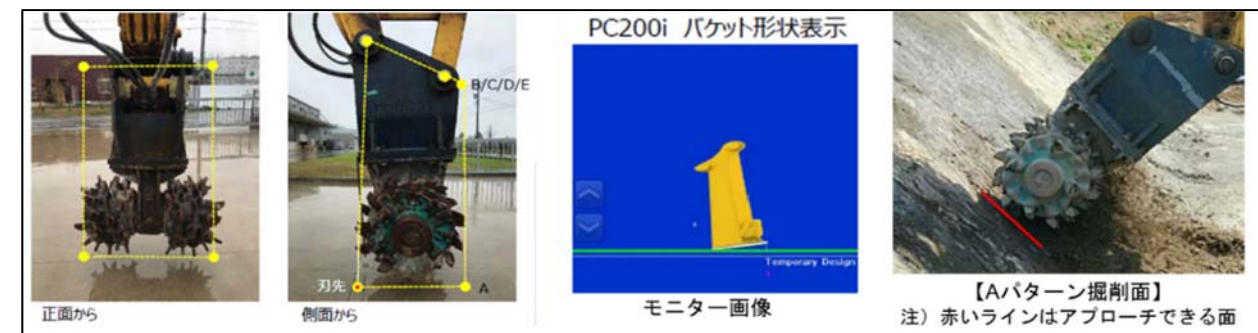


図-5 Aパターンの形状設定

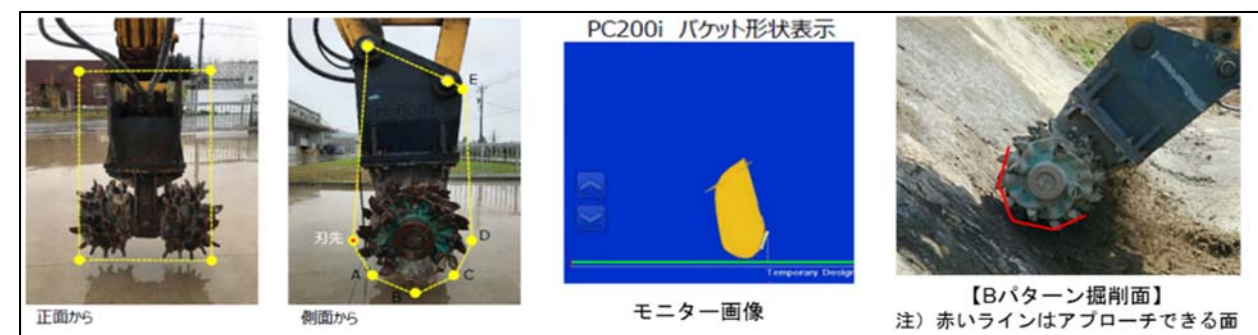


図-6 Bパターンの形状設定

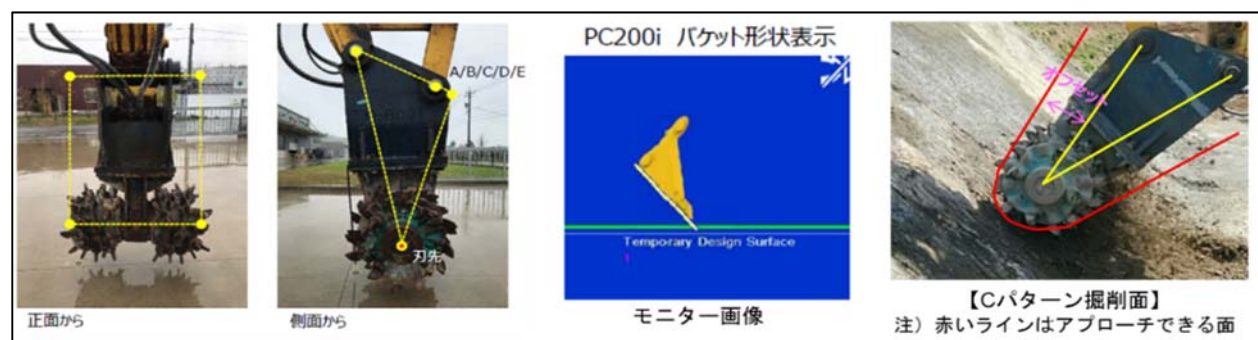


図-7 Cパターンの形状設定

6. 従来工法との比較検討結果

(1) 出来形精度

出来形精度の測定方法として、レーザースキャナーによる点群測量を行い、ヒートマップ（点密度 1cm×1cm）を作成して従来工法とツインヘッド工法の比較を行った。平均値の数値には 10mm 程度しか差はないが、見た目に分かるほど従来工法は凹凸が大きく、ツインヘッド工法は凹凸が小さく平坦性が良い（図-8）（表-2）。

ツインヘッド工法の最小値が大きくなった理由は、施工中の岩の肌落ちにより深く抉れた箇所が発生し、その値を測定してしまったためと考えられる。

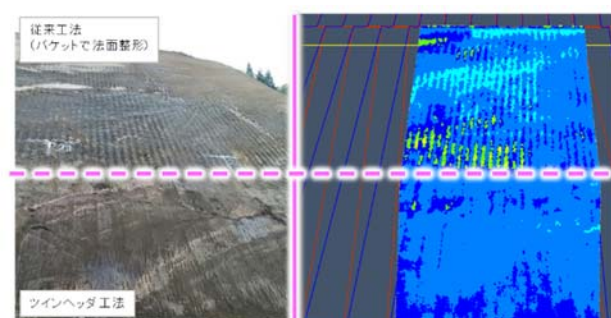


図-8 法面の出来形比較

(2) 施工性

事前に従来工法（岩掘削バケット）における施工性調査を実施し、この得られた結果とツインヘッド工法を比較し施工性を評価した（表-1）。評価方法を統一するため、両工法とも設計面より20cm手前まで大型ブレーカで荒掘削を行った後の評価とした。

従来工法では7m²/h、ツインヘッド工法では21m²/hと3倍の施工性があった。

また、岩掘削バケットでの整形は法面をひっかくように整形することから、重機への反動が大きい。

表-1 施工性の検証

①従来技術(岩掘削バケット)

日付	作業時間	施工整形	時間当たり施工量
12月1日	2時間	15.66m ²	7.83m ² /h
12月7日	8時間	63.33m ²	7.92m ² /h
12月9日	4時間	38.60m ²	9.65m ² /h
12月11日	8時間	38.61m ²	4.83m ² /h
12月14日	8時間	39.78m ²	4.97m ² /h
12月15日	8時間	46.31m ²	5.79m ² /h
12月18日	4時間	42.71m ²	10.68m ² /h
12月19日	8時間	56.89m ²	7.11m ² /h
12月20日	2時間	14.82m ²	7.41m ² /h
合計	52時間	356.71m ²	6.86m ² /h
54.88m ² /日			

②検証工法(ツインヘッド)

日付	作業時間	施工整形	時間当たり施工量
5月10日	3時間	70.00m ²	23.33m ² /h
5月11日	6時間	120.00m ²	20.00m ² /h
合計	9時間	190.00m ²	21.11m ² /h
168.88m ² /日			

しかし、ツインヘッドは法面を回転打撃で削り取ることから、重機への反動が少なく、オペレーターへの負担の面でも肩こりやストレスが少なく好評であった。

(3) 騒音

従来工法、ツインヘッド工法、大型ブレーカー工法の騒音を、2m離れた箇所騒音計により測定した。

結果は従来施工が91.0dB、ツインヘッド工法が81.6dB、大型ブレーカー工法が104.4dBとツインヘッド工法はかなり低騒音であった。

(4) 比較検討結果のまとめ

試験施工の結果を以下の表-2に示す。

比較検討した出来形精度、法面の不陸、施工性、騒音の全ての項目において、ツインヘッドが有効という結果になった。

7. おわりに

ツインヘッドによる軟岩・中硬岩の法面整形は検証項目すべてにおいて従来工法より優れており有効であると考えられる。しかし、機械の賃料が非常に高価であることから、導入するには大規模な法面整形現場や工期が厳しい現場等、費用対効果を詳細に検討する必要がある。今後、ツインヘッドによる施工が大型ブレーカの施工のように汎用性が高くなり、市場に機械台数が多くなれば価格は低下すると考えられる。

ツインヘッドは主にトンネルの施工現場で用いられる機械であるが、MC技術と組み合わせることにより法面整形工において高い有効性を発揮した。また、ツインヘッドに限らず、用途外の建設機械とMC技術と組み合わせることで、従来工法より有効な技術と成り得る。本事例のようにMC技術を応用し、新たな施工方法を模索することが生産性向上の鍵になると思われる。

謝辞：本論文作成にあたり、ご協力いただいた関係各位に謝意を表す。

表-2 検証結果のまとめ

項目	細目	従来工法	ツインヘッド	大型ブレーカ
1-1) 出来形精度	平均値	-51mm	-42mm	—
	最大値	82mm	21mm	—
	最小値	-125mm	-110mm	—
1-2) 法面の不陸	平均値	40mm	10mm	—
2) 施工性	平均値	7m ² /h	21m ² /h	—
3) 騒音	平均値	91.0dB	81.6dB	104.4dB

デジタル技術を活用した各種効率化に関する 開発研究

三島 直生¹

¹国土技術政策総合研究所 住宅研究部 住宅ストック高度化研究室（〒305-0802 茨城県つくば市立原1）

近年のデジタル技術の進歩は目覚ましく、これまでは不可能であると思われていた高度な処理が速く、安く、容易に実現できるようになってきている。これらの最新技術はゲームやエンターテインメント分野への適用が進んでいるのに対して、実務の現場への普及は進んでいない現状がある。本研究では、これらの最新技術に関して公開されているプログラムや既存のデバイス等を活用することで、開発期間およびコストを大幅に縮減した普及技術の開発を進めている。本報では、昨年度実施された研究を中心に、AIによる画像診断、デジタル画像相関法、拡張現実、リアルタイム流動解析の各テーマに関する開発技術の概要を紹介する。

キーワード AI、画像診断、デジタル画像相関法、拡張現実、リアルタイム流動解析

1. はじめに

近年のデジタル技術の革新には目を見張るものがあり、さらにスマートフォンなどの高性能端末の普及により各種のデジタル技術がより身近なものとなっている。また、Web 上には汎用的なものから専門的なものまで、各種のオープンソースプログラムが公開されており、各種モバイル端末のセンサ等にリンクした高度な処理を行うための開発エンジンなどもアプリケーション開発者向けに公開されている。

このような状況は一昔前では考えられなかったものであり、アプリケーション開発時にはゼロからプログラムを書くのではなく、これらの公開されたプログラムを組み合わせて活用することで大幅な開発期間の短縮とコストダウンが可能となるだけでなく、場合によってはよりバグ等の少ない高品質なプログラムの開発も可能となる。

また、ある種の計測システムを新規開発する際にも、スマートフォンに内蔵されたセンサを利用できる場合には、ハードの開発が不要となるだけでなく、開発した技術を普及させる際には、既にユーザが対応するスマートフォンを所持している場合にはアプリケーションソフトの購入のみで利用できるため、普及のためのハードルは一気に低くなる。

本稿では、筆者がこのような視点で実施してきた研究テーマとして、人工知能（AI）、デジタル画像相関法（DIC）、拡張現実（AR）およびリアルタイム流動解析の各技術の建設材料・施工分野への活用の検討事例について概説する。

2. 人工知能（AI）による画像診断の活用事例

近年、AIによる評価・診断技術が急速に発展している。その中でも特に進歩が著しいのがAIによる画像診断である。同技術では、画像をそのままインプットデータとして使用できるため、人間が目視判定するような曖昧な事象を客観的かつ定量的に評価することが可能となることが最大の利点である。また、後述するような、有償でクラウドサーバ上の汎用画像診断AIが使用できるサービスも出てきており、開発期間の短縮および開発コスト削減に大いに貢献する技術として期待される。

(1) AI による高流動コンクリートの材料分離判定システムの開発¹⁾

建設工事に用いられる生コンクリートの品質管理として、材料分離の評価は非常に重要であるにもかかわらず、現状の JIS では目視により確認する以外に方法がなく、受入検査時に判定が分かれるなどの懸念がある。このような状況を改善する 1 つの方法として、本研究では AI による画像診断技術を応用し、現場での受入れ検査にも適用可能な簡易かつ客観的な材料分離の判定システムの開発を目指した。ここで、本開発対象は人間による目視判定のセカンドオピニオンを得るためのツールと位置づけ、最終の判定は人間が行うことを想定している。

図-1 に、本研究で採用したシステムの概要を示す。試験者が受入れ検査時に、スマートフォンのアプリでスランプフロー試験後の試料を真上から撮影すると、数秒後に AI による材料分離の判定結果（確信度）が画面に



図-1 材料分離判定システムの構成

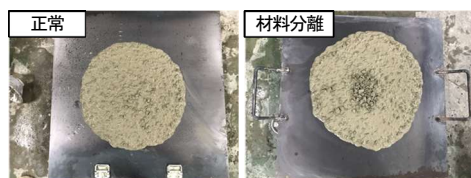


写真-1 学習用画像の例

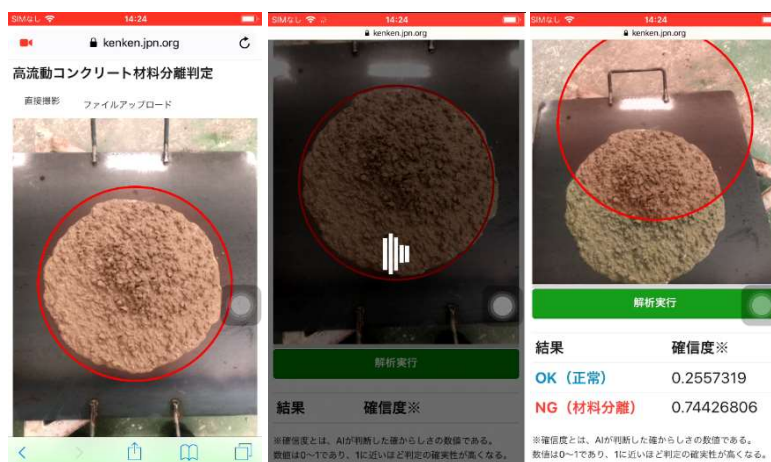


図-2 アプリ使用時のスマートフォン画面の例（丸枠は撮影時の目印）

表示される。アプリ使用時のスマートフォン画面の例を図-2に示す。ここで、AI エンジンには、開発コストおよび開発期間を大幅に短縮することが可能な汎用エンジン²⁾を用いた。

写真-1 に学習用の画像の例を示す。本開発では正常：26 枚、材料分離：19 枚を学習用データとして用いた。目視判定で材料分離および正常と判定された画像計31 枚（学習用データは含まず）で検証を行った結果、9 割前後の正答率となった。本システムは、一般的な画像判定と比べて学習データの量が非常に少ないものの、同一調査、同一使用材料に対する判定精度については十分に実用レベルにあると言える。また、今後の学習用データの蓄積により判定精度と汎用性を向上させることは可能である。本システムは、試験時の手間と時間、コスト、客観性など全ての面において、現状では最も現実的な材料分離の判定方法と言え、実用化に向けた早急なデータの蓄積が求められる。

(2) AIによる再生粗骨材の不純物混入率の推定システムの開発

コンクリート用再生粗骨材の活用において、不純物混入率の評価は限度見本による目視判定によらざるを得ず、客観的かつ定量的な評価が難しい。このような問題に対して AI による画像判定技術を応用し、簡易かつ客観的な不純物混入率の推定システムの開発を試みた。本開発では、AI による画像判定に加えて、従来技術である一般的な画像解析（彩度 0.3 以上となる画素の面積率を算出）も同時に行い比較した。各不純物混入率の撮影画像の例を写真-2 に、学習用画像の例を写真-3 に示す。AI による画像判定システムは既述の 2. (1) と同様なものを用い、本検討では不純物の混入率を数値で得るために、不純物混入後の撮影画像を 100 分割し、不純物が映っている画像を不純物と分類し、その比率に補正係数を乗じて不純物混入率を算出した。このため、本検討では 1 枚の撮影画像に対して 100 回の画像判定を実施している。学習用データとしては、写真-3 に示すような撮影画像を

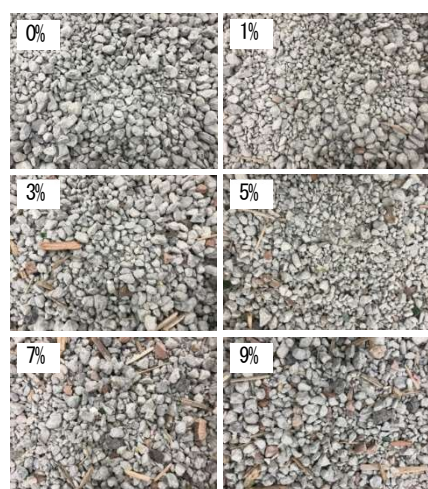


写真-2 模擬不純物の混入率ごとの再生粗骨材の画像の例（数値：不純物混入率、撮影範囲：約 300×400mm）

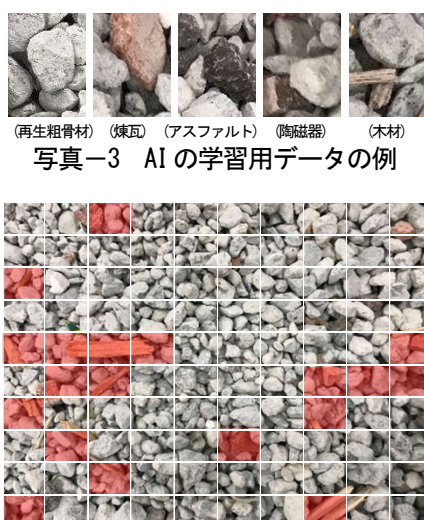


写真-3 AI の学習用データの例

図-3 AI によるの判定方法のイメージ〔赤色を不純物と判定した場合の不純物混入率：19 マス×0.2＝3.8(%)〕

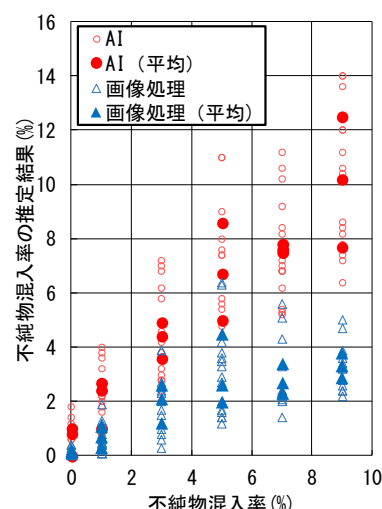


図-4 不純物混入率の推定結果

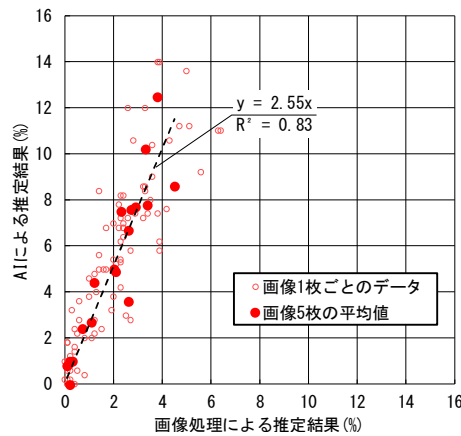


図-5 AI と画像解析の結果の比較

分割したもののうち、再生粗骨材：500 枚、不純物 458 枚を用いた。不純物混入率の算定方法のイメージを図-3に示す。

図-4 および図-5 に、AI および画像解析による不純物混入率の推定結果と両者の比較を示す。ここで、同図は各不純物混入率につき 5 枚 1 組の評価を 3 回繰り返した結果（計 15 枚）を示す。また、AI と画像解析ではそれぞれ同じ画像データを用いている。図-4 によれば、ばらつきは大きいものの、実際の不純物混入率と推定値で良好な相関関係は見られる。また、AI では大きめの、画像処理は小さめの推定結果となる傾向があるが、この結果は補正係数や彩度の閾値などの設定により変化するものである。図-5 によれば、AI と画像解析で推定結果には線形の強い相関関係が見られ、現状の AI の推定結果は特徴量として彩度が重視されたものとなっていると推定される。このような場合にはより簡易な画像解析による手法の採用が望ましいとする考え方もある。

3. デジタル画像相関法を用いた建築物の損傷検知システムの開発³⁾

地震発生後の被災建築物に対しては、余震等に対する安全性を迅速に判定し、人的被害の防止と避難の可否の判断を示すことが求められる。現状では、建物被災後に応急危険度判定士が現地に赴き、建物 1 棟毎に目視による外観調査および建物の沈下や傾斜などの簡易な計測を行うことで判定が実施されている。しかし、これらの被害調査は、地震発生直後の危険かつ制約の多い条件下での実施が想定され、人員の確保および調査日数を要するだけでなく、調査員を危険にさらすことになるという問題も残されている。これに対して、建物に事前に加速度センサ^{例えは 4)}や変位の計測装置^{例えは 5)}等を設置しておき、それらの計測結果から自動的に地震後の構造安全性を判断する手法などが既に実用化段階にある。一方で、応急危険度判定としては躯体の構造安全性だけでなく、外装材等の破損や脱落などまで含めた、外観変状による評価も重要となる。本研究では、このような目視調査により

検出される建物の外観変状を対象として、デジタル画像相関法 (Digital Image Correlation: DIC) を応用した、建築物の損傷検知システムの実用可能性に関する基礎的な検討を行った。

DIC では、解析対象の画像内にサブセットと呼ばれる任意の範囲の画素パターンを認識し、このサブセットの移動を追跡することで変位およびひずみを算出する。一般に、DIC による変形計測では、このサブセットを検出しやすくするために、材料表面にまだら模様が塗布されることが多いが、本研究では建物外装の模様をそのまま認識パターンとして用いることとした。DIC の優位性は、変形の面的な分布が特殊なセンサ等を用いることなく容易に計測できる点にあり、地震被害のように厳密な破壊位置を予測することが難しい場合には、非常にメリットが大きい。その反面、変形前後の画像が必ず必要であること、および計測対象に模様がないと計測できないなどの制約もある。

図-6 に、本研究で想定する DIC を応用した損傷検知システムを示す。地震による損傷前後の画像が必要となるため、ここでは監視カメラのような常時の動画撮影を前提とし、地震発生後に地震直前と直後の計 2 枚の画像を自動抽出して解析することで、建物の損傷を定量的に検知するシステムを想定する。DIC 解析はクラウドサーバで行うこととし、結果として得られるひずみまたは変位の値により損傷程度および危険性を判定し、結果を当該建物に避難情報として返すとともに、災害対策本部等の情報集積機関に送る。ここでは上記システムのうち DIC 解析によるひび割れの検出精度に対して実験的な検証を行った。

実験では、写真-4 に示すような実建物の外壁パターンを印刷した 600×450(mm)のパネル (厚さ 2mm) を建物外壁に設置し、そのパネルの一部をひび割れ幅だけ移動させて隙間を作りひび割れを再現した。ひび割れ幅は隙間ゲージにより調整した。測定対象は色調の異なる 2 種類のマンションのタイル外装および戸建て住宅の外装パネル (サイディング) とした。カメラはカメラ 1: 1280×960(pixel)、およびカメラ 2: 3280×2464(pixel) の 2 種

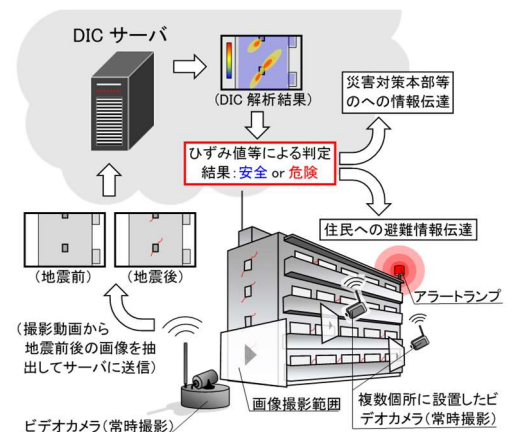


図-6 DIC による損傷検知システムの概要

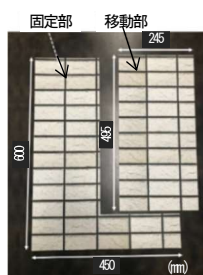
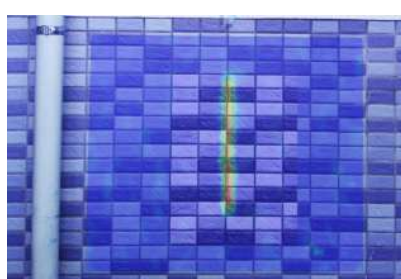


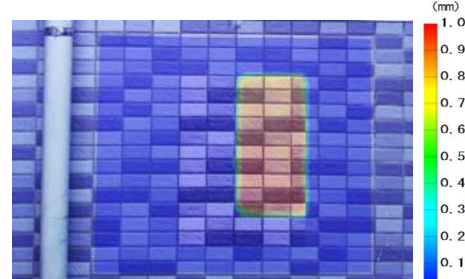
写真-4 ひび割れの再現方法
（上：使用したパネル，
下：ひび割れの調整状況）



写真-5 パネル設置後の撮影画像の例（カメラ1，撮影距離2000mm，ひび割れ幅0mm）



(a) 水平方向ひずみ分布



(b) 水平方向変位分布

図-7 DIC 解析結果の例〔マンション（茶タイル），カメラ2，撮影距離2000mm，ひび割れ幅1.0mm〕

類を用いた。写真-5に撮影画像の例を示す。

図-7に、市販のDICソフト⁶⁾による解析結果の例を示す。図によれば、タイル外装のパターンによりDICによるひずみおよび変位の検出が可能であることがわかる。

図-8に、DICによる解析値（変位の最大値）とひび割れ幅の関係に及ぼす各測定条件の影響を示す。図によれば、ひび割れ幅の小さい領域を中心にノイズ検出による誤差が見られるものの、両者には良好な相関がみられた。また測定条件による明確な傾向は見られず、全体的にひび割れ幅が実際よりも大きめに測定される結果となった。

DICのメリットは、画像のみからひずみや変位といった、物理量が計測できる点であり、特殊なセンサ等が不要なためコストも最も低い部類になると予想される。また、DICにより建物外装の模様から直接変位の計測が可能であることは、実用化に向けては大きな知見であり、今後の応用が期待される。

4. AR打音アプリによる欠陥の自動検出技術の開発⁷⁾

建築物のタイル外装や鉄筋コンクリート構造物の表層部欠陥を非破壊で調査し、早期に発見することは住空間の安全確保および構造物の適正な維持管理において非常に重要である。構造物の欠陥検出のための非破壊検査手法としては様々な方法が適用されているが、その中でも打音検査は検出精度の高さなどの理由で広く用いられている。しかし、検査コストは高額となるため、打音検査の効率化・省力化が社会的な要求となっている。

本研究ではこれまでに、打音検査を効率化することを目的に、打音検査による時間周波数分析結果を拡張現実（Augmented Reality: AR）により検査部位に仮想的に貼

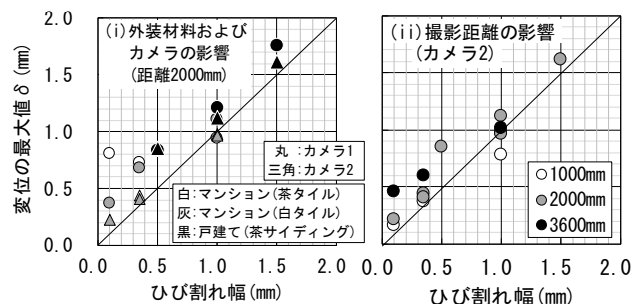


図-8 DICの解析値とひび割れ幅の関係の例

り付けて表示させることのできるスマートフォン用アプリを開発した⁸⁾。写真-6に、AR打音アプリを用いて外装タイル供試体の表面にTFFT（時間周波数分析）画像および円錐形のマーカを表示させた状態の例を示す。その結果からは、ARの導入は欠陥位置の検出および記録に対して非常に有効であることが確認された。しかし、既存のアプリでは、測定が直線上でしかできないこと、測定可能距離が2m程度と短いこと、および欠陥部をTFFT画像から人為的に目視判定する必要があること等の問題点が残されていた。これらの問題点を解決するために、欠陥部の異常音を自動で判定し、直接欠陥部にARマーカを表示させるための改良を行った。

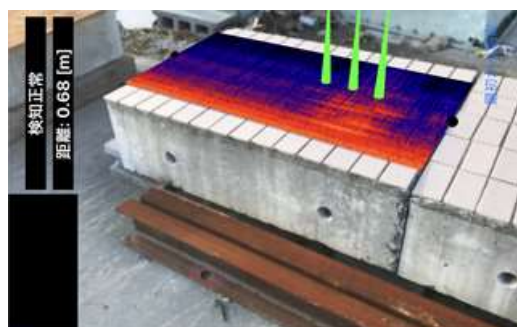


写真-6 AR打音アプリによるARオブジェクトの表示例〔動画は9〕



写真-7 AR 打音検査装置の構成 (左) と測定状況 (右)

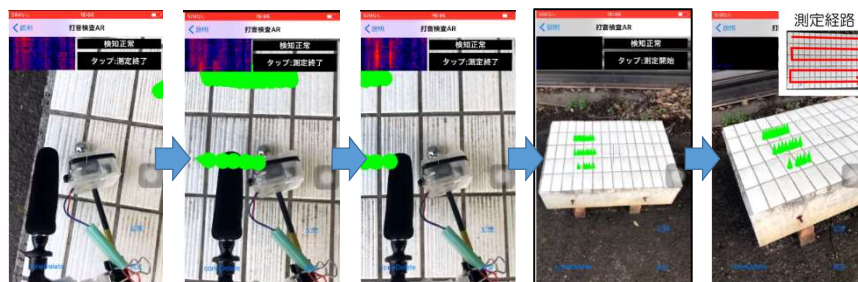


図-9 タイル供試体に対する測定状況の例 (供試体サイズ: 700×490mm, 計測時間: 約 30s)

写真-7に本研究で使用した AR 打音検査装置の構成と測定状況を示す。試作した振動機付き打診棒とスマートフォンとマイクという、非常にシンプルな構成となっており、計測は1人で実施可能である。振動機付き打診棒としては、市販の打診棒の鋼球近傍に振動機を固定することで連続的に打撃が加えられるようにしたものである。超指向性マイクロホンで収録された打撃音の処理には iPhone7 を使用し、AR オブジェクトの表示にはアプリ開発者向けに公開されている AR エンジンである ARKit¹⁰⁾ を利用した。収録された打撃音は、高速フーリエ変換を行った後に欠陥の判別に用いた。欠陥の判別は、閾値となる音圧レベルを設定できるようにし、それ以上の音圧レベルが検出された部位を欠陥と判定した。また、健全部の打撃音およびモータ音などの周囲ノイズを計測し、その周波数帯を自動でマスクして計測する機能も実装した。

図-9 に、外装タイル供試体の測定の様子を連続写真で示す (ここではマスク機能は使用していない)。同図右上に示す計測経路で測定し、欠陥部の異音を検出された部分に AR マーカがリアルタイムで設置されている。計測終了後に供試体にスマートフォンをかざすと、AR マーカにより欠陥位置が容易に視認できる。

現時点では、欠陥の検出方法との組合せによっては検出できない欠陥もあるが、計測の容易さ、装置のシンプルさ、および計測速度の面では充分に実用レベルであり、また計測結果の視覚的な解りやすさは従来技術には無いものといえる。欠陥の検出精度の改善に対して最も影響が大きいと思われるのが振動打診棒の性能 (打撃の強さ) であり、この開発が今後の課題となる。

5. フレッシュコンクリート用リアルタイムシミュレータの開発^{11, 12)}

建設現場の生産性向上は緊急の課題となっており、その中でもコンクリート工事は最も生産性の向上が遅れている分野の1つとされている。このため、コンクリート工事の合理化および生産されるコンクリート構造物の品質確保を目的として、フレッシュコンクリートの流動解析技術に関する研究が数多く行われてきた。既往のフレッシュコンクリートの流動解析の対象はほぼ全てが高流

動コンクリートを想定した単調な自重流動であるのに対し、一般的な工事の大多数で使用されているのは普通コンクリートであり、普通コンクリートの配筋された型枠内への打込みでは振動締固めが不可欠である。このため、振動による流動化を再現できない限り実務では適用範囲が極端に限定されることになる。コンクリートポンプの筒先 (吐出口) の移動についても同様のことが言える。

本研究の最終目標は、施工現場で、ある程度の精度を持った実大施工シミュレーションを、リアルタイムで簡易に行うことのできるツールを開発することにある。本研究では、解析精度をある程度犠牲にしても、解析負荷を低減してリアルタイム解析とすることで得られるメリットが充分にあると考え、2次元のリアルタイム解析を採用して研究を進めている。リアルタイムシミュレーションの優位性としてまず挙げられるのは、実際の施工と同様に、振動機やポンプの筒先の位置といった境界条件を、コンクリートの流動状況を確認しながら変更できる点にある。実施工で行われているこれらの条件変更を解析的に再現するための、ほぼ唯一の解決方法であると考えられる。また、結果がすぐに得られること、および解析負荷が少ないためにスマホやタブレット端末で解析可能であることなどから、これまで数値解析に馴染みのない実務者 (現場管理者および現場作業員) にも普及が期待できることなどが挙げられる。

本解析で用いる物理演算方法は、リアルタイム解析を実現するために大幅に簡略化された解析エンジン¹³⁾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。フレッシュコンクリートの構成モデルは厳密なレオロジーモデルではなく、フレッシュコンクリートの状態を流動状態 (粘性流体)、停止状態 (剛体)、および振動下の流動化状態 (完全流体) の三相と仮定し、流動状態と停止状態の判別は流動速度のみで行う簡易的なモデルを採用している。図-10 に、iPad で実行中の解析画面の例を、図-11 に 1400×700×100 (mm) の壁型枠を用いた施工実験と解析結果の比較を示す。ここで、流動パラメータは事前に無筋型枠に対する施工実験結果に対する逆解析により決定した値を用いている。図によれば、流動の先端で解析結果が先行する傾向はみられるものの、全体の流動形状は実験結果を良く再現している。また、加振後の結果は、いずれの配筋条件も概ね良好な対応関係を

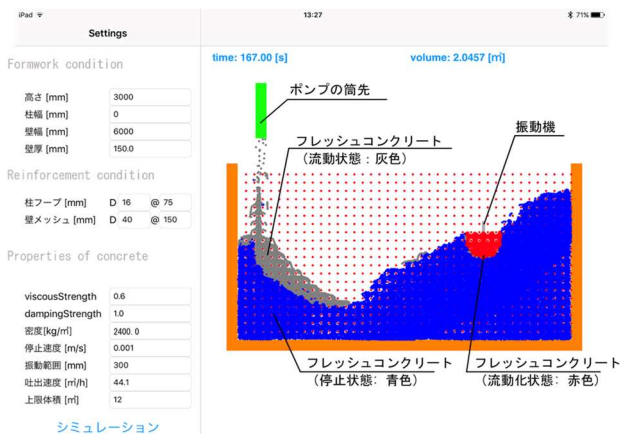


図-10 リアルタイム解析の画面の例
(iPad を使用) [動画は 14]

示している。さらに、自重流動後には鉄筋周囲などにフレッシュコンクリートの未充填部が見られるが、振動締めによりこれらの未充填部が密実に充填される様子も解析的に再現されており、欠陥の形成と振動による緻密化が再現できるなど、実務解析としての要件を十分に備えていると言える。

現場打ちコンクリート工事の生産性改善に対しては、ロボットによる機械化施工が 1 つの有力な回答となると思われるが、そこで不可欠となるのが材料の挙動予測、すなわち型枠内のフレッシュコンクリートの流動予測である。リアルタイム解析であれば実際の施工と同時並行で解析を行い、そこで把握された流動状況に基づき筒先や振動機などの機器を移動させるような制御も可能となる。ただし、現在の研究段階はまだ基礎的な段階にあり、解析に用いる流動パラメータの整備が直近の課題となる。

6. まとめ

本稿では、筆者が最近行った 4 種類のデジタル技術に関する研究を概説した。ここで紹介した技術に共通して言えるのは、最新技術を用いることでこれまでは不可能であったことが実現しているだけでなく、公開されたプログラム等をうまく活用することにより短期間で安く開発を進めることができている点であると思われる。

いずれの技術もまだまだ改良の余地はあり、精度検証も今後の課題となる。ただし、必要な精度を適正に判断し、活用方法まで含めて検討することで早期の技術導入は可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 三島直生, 鹿毛忠継, 山田義智, 崎原康平: AI による高流動コンクリートの材料分離判定システムの開発に関する基礎研究, 第 73 回セメント技術大会講演要旨, 論文番号 1317, 2019. 5

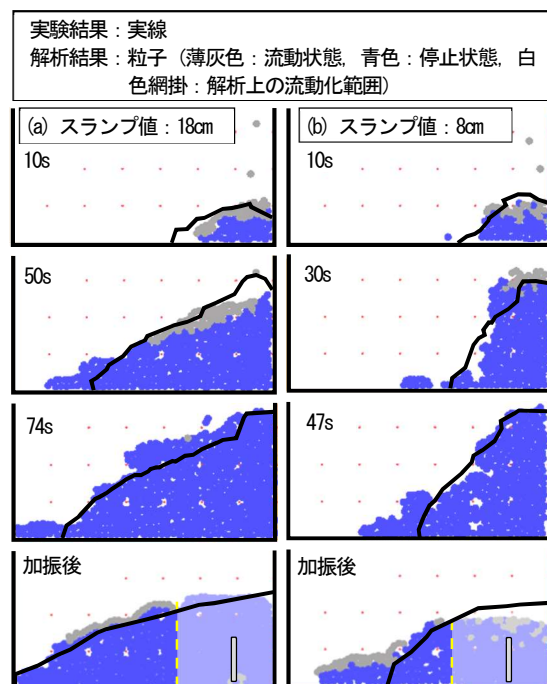


図-11 実験結果と解析結果の比較

- 2) Google, Cloud AutoML Vision β : <https://cloud.google.com/vision/automl/docs/> (閲覧日: 2019. 2. 11)
- 3) 三島直生, 宮内博之, 向井智久: デジタル画像相関法を用いた建築物の損傷検知システムの実用可能性に関する基礎実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 情報システム技術, pp. 181-182, 2019. 9
- 4) 楠浩一ほか: リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その 1~28, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2003~2015
- 5) 山田哲也: 地震時建物変位計測システムの防災上の活用方法に関する提案, 地域安全学会論文集, No. 29, pp. 15-24, 2016
- 6) <https://www.gom-correlate.com/> (閲覧日: 2019. 8. 30)
- 7) Mishima N.: Fundamental Study on Automatic Detection Method of Surface Defect of Structure by AR Hammering Test Application, The 3rd ACF Symposium 2019, 2019. 9
- 8) 三島直生, 住田賢司, 藤原聖史, 中山研人: AR 技術を応用した外装タイルおよびコンクリートの内部欠陥の打音検査システムの開発研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 40, No. 1, pp. 1767-1772, 2018. 6
- 9) <https://www.youtube.com/watch?v=SAqtrOmZENI> (閲覧日: 2019. 8. 30)
- 10) <https://developer.apple.com/augmented-reality/> (閲覧日: 2019. 1. 30)
- 11) 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. 6
- 12) Naoki MISHIMA, Yoshitomo YAMADA, Kohei SAKIHARA and Ryo TANIGUCHI: Fundamental Study on Development of Two-Dimensional Real-Time Flow Simulation Method of Fresh Concrete in Wall Form, CIB World Building Congress 2019, Ab0099, 2019. 6
- 13) LiquidFun Programmer's guide, <http://google.github.io/liquidfun/Programmers-Guide/html/index.html> (閲覧日: 2016. 1. 15)
- 14) <https://www.youtube.com/watch?v=NLFJFlc2mLE> (閲覧日: 2019. 8. 30)

ICT 活用工種の拡大に向けて

ー構造物設置に ICT 技術を取り入れた試験的施工ー

岡本 佳洋

茨城県 水戸土木事務所 (〒310-0802 茨城県水戸市柵町 1-3-1)

現在、土木工事における i-Construction の取組みとして、土工や舗装工等に ICT 活用工事が導入されるようになっており、2019 年度からは付帯構造物設置工でも ICT を活用する方向性が示された。このような ICT 活用工事の拡大の動きを踏まえ、プレキャストカルバートを対象として、ICT 技術を取り入れた施工を試験的に実施した。施工では GNSS 受信機を用いて構造物の位置情報を取得し、3 次元設計データを基に座標管理によるプレキャストカルバートの誘導・設置を行った。また、この施工結果を基に施工性及び精度について検証を行い、付帯構造物設置工での ICT 活用の有用性を確認した。

キーワード i-Construction ICT 活用工事 GNSS 受信機 プレキャストカルバート

1. はじめに

現在、土木工事における i-Construction の取組みとして、ICT 技術を活用した ICT 土工、ICT 舗装工の技術基準類が整備されている。茨城県では平成 28 年度に ICT 活用モデル工事に着手し順次導入を進め、県内の建設産業全体の生産性向上のために ICT 技術の普及に努めている。

土工や舗装工では ICT の活用が進んでいる一方で、関連する排水構造物等の付帯構造物設置工では従来施工のままとなっており、ICT 活用効果が限定的となっているのが現状である。

こうした状況の中で、国土交通省では ICT 活用工種の拡大を進めており、2019 年度からは付帯構造物設置工でも ICT を活用する方向性が示された。これにより一連の工事で ICT が活用できる環境が整ったことから、さらなる生産性の向上が期待される。

今後、適用工種が増加していくなかで、ICT 技術のメリットを享受するためには、工事の中で積極的に ICT を活用し、経験と施工実績を重ねて知見を深めていくことが重要である。

今回は、付帯構造物設置工について、2019 年度から ICT の適用に先駆けて、プレキャストカルバート（以下、カルバート）を対象として ICT 技術を取り入れた“施工”を試験的に実施し、有用性の検証を行った。

2. 工事概要

事 業：石岡小美玉 S I C アクセス道路整備事業

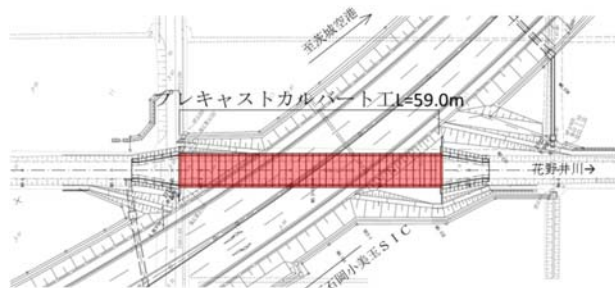


図-1 施工箇所図

工事箇所：茨城県小美玉市竹原地内
構造形式：プレキャストカルバート（2 分割）
W6.8m×H3.6m
施工延長：L=59.0m（40 部材）

3. ICT 技術の導入

(1) ICT 活用工事（付帯構造物設置工）

2019 年 4 月に示された ICT 活用工事（付帯構造物設置工）実施要領^りにおいて、「ICT 活用工事」とは以下の①②④⑤の全ての段階で ICT 施工技術を活用することと定義されている。

- ① 3 次元起工測量
- ② 3 次元設計データ作成
- ③ 施工（該当なし）
- ④ 3 次元出来形管理等の施工管理
- ⑤ 3 次元データの納品

上記のとおり、施工での ICT 技術の活用は考えられていないことが分かる。そのため、今回の試験施

工は、活用の可能性を模索するための試金石となる。

なお、施工当時（2018年2月）に実施要領は未策定であるため、プロセス等は独自のものとなる。

(2) 施工における ICT 技術の活用の検討

従来の ICT 施工では MC または MG のバックホウやブルドーザを使用して施工している。これらは、バケットや排土板の位置情報をリアルタイムで取得し、ICT 建機による施工用データとの差分に基づきバケット等を自動制御する 3 次元マシンコントロール技術、または、ICT 建機による施工用データとの差分を表示し、バケット等を誘導する 3 次元マシンガイダンス技術を用いている。

一方で、付帯構造物設置工で ICT 建機を用いることを想定すると、設置するにはワイヤー等で吊り上げることから、建機の位置情報が分かることにあまり意味はないと考えられる。

そこで、カルバート自体の位置情報を取得し、取得した情報を基に誘導・設置することで ICT 技術を活用した施工を行うことを目指した。

(3) 位置情報取得の測位システムの整理

ICT 技術を用いた施工において位置情報を取得する方法としては、①GNSS で取得、②自動追尾 TS で取得の 2 通りある。各測位システムの特徴を表-1 に示す。それぞれの特徴を踏まえ、施工条件に適合する手法を選択した。

今回は、衛星補足数が多いことや、支保工等で視準の確保が難しいといった現場特性及びコストを踏まえ、①GNSS による方法を採用した。

表-1 測位システムの比較

名称	GNSS	自動追尾TS
測位方法	人工衛星からの信号を用いて受信機の位置情報を取得。 上空視界があり、常にFIX解を得る衛星補足数(5個以上)が必要。 Ex. RTK法 ネットワーク型RTK法等	TS本体から発信するレーザーがプリズムの反射光を検知し自動追尾することでプリズムの位置情報を取得。 プリズムとの間の視準が確保でき、距離も適正な位置に本体を設置。
精度	水平方向±20mm 高さ方向±30mm	±10mm以下
コスト	低	高

4. ICT 活用施工

(1) 施工モデル

3 章を踏まえ、「GNSS でカルバートの位置情報を取得し、カルバートと設置位置との座標値の差分を表示し、それに基づきカルバートを誘導・設置」を行う施工モデルとした。

a) GNSS 受信機の設置位置

受信機を取り付ける箇所は図-2、図-3 のとおり横断方向は各部材の中心、縦断方向は上流側からオフセット 150mm をとった位置の 1 箇所とした。

オフセット 150mm は、受信機をカルバートに固定するために必要であり設けている。

b) 3 次元設計データ

本施工モデルでは、受信機を取付ける特定の点の座標値のみ把握できればよいことから、土工や舗装工のように TIN 形式による 3 次元化を必ずしも必要としない。

そこで、今回はカルバートの中心線形に 3 次元座標を与え、3 次元設計データとした。受信機の設置位置を踏まえ図-4 のように各部材に 3 次元座標を与えた。

c) 施工プロセス

- ① 構造物の割付配置が決定後、各部材の特定の 1 点に設計座標値 (x,y,z) を付与し、カルバートの 3 次元データ化
- ② 座標値を付与した箇所に GNSS 受信機を取り付け、カルバートの位置情報を取得
- ③ データコレクタに表示される座標値の差分を基に計画した設置位置へ誘導・設置
- ④ 各部材で順次、②～③の工程を繰り返す

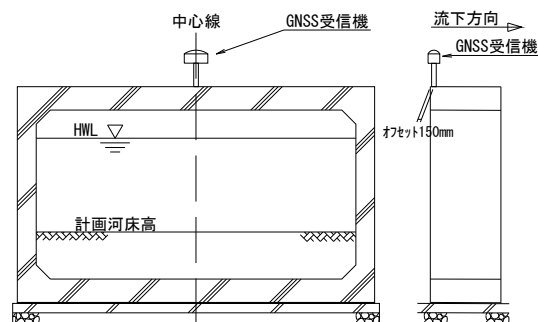


図-2 GNSS 受信機設置位置図

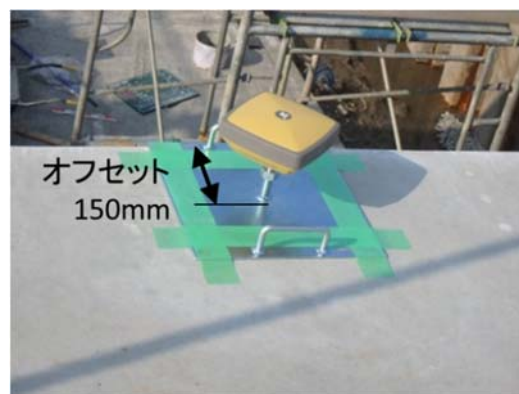


図-3 受信機設置状況

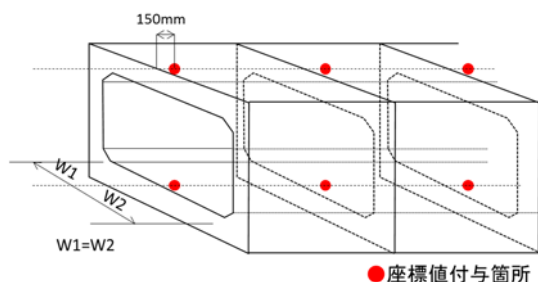


図-4 3 次元化イメージ

(2) 通常施工と ICT 施工の比較

通常施工と ICT 施工の施工フローを図-5 に示す。通常施工で行う芯出し（墨出し）作業が、ICT 施工では不要となり、他の ICT 施工と同様に事前の準備作業が短縮できる。

また、据付工では、通常は墨の位置を確認しながら作業を行うことから、作業員は墨の位置、自分の手元等複数の視点へ注意を向ける必要があり、注意力が散漫となり、事故の危険性がある。今回の ICT 施工では、墨の位置の確認が不要となることで、事故の危険性が低減でき、安全性の向上を図ることが出来る。

加えて、省人化や施工日数短縮が可能となれば、ICT 施工の意義があるものと言える。

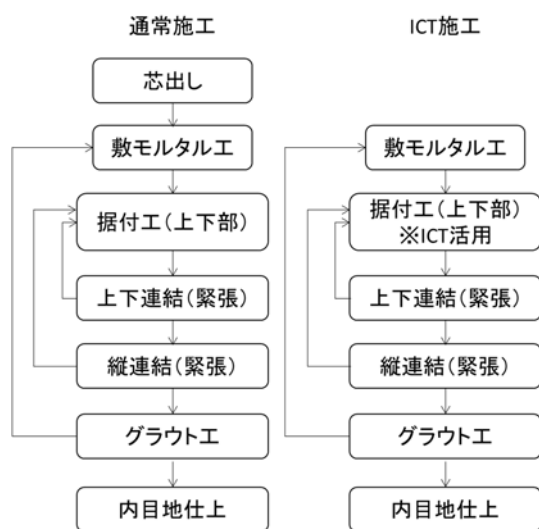


図-5 施工フロー

(3) 施工

a) 3 次元起工測量

UAV による起工測量（図-6、図-7）

b) 3 次元設計データ作成

土工、カルバートの 3 次元設計データ作成（図-8）

c) 床掘

MC バックホウによる床付け面の仕上げ

d) カルバート据付

受信機を取り付け、誘導の合図者がデータコレクタで常に座標の差分を確認しながら誘導し、作業員は合図に基づき据付（図-9、図-10）

e) 出来形計測

GNSS ローバーにより出来形計測（図-11）

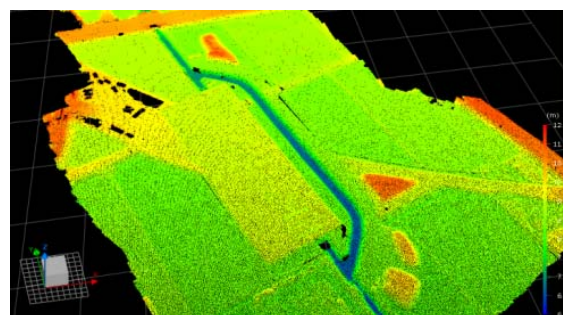


図-7 起工測量の点群データ

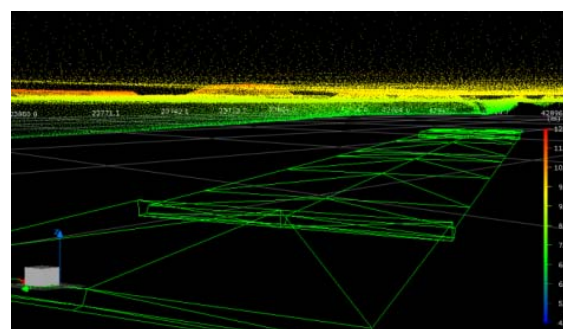


図-8 3次元設計データ



図-9 カルバート据付状況



図-10 データコレクタ画面表示



図-6 UAV 測量状況



図-11 出来形計測

5. 施工の検証

(1) 配置人員及び施工工程

受注者へのヒアリングによるカルバート工の配置人員を表-2に示す。通常施工の場合、据付班4人の他にレベルで高さを計測する2人を必要としていたが、ICT施工では、データコレクタで高さを確認できることから、レベル計測が必要なく、敷モルタル調整のために1人配置できればよかった。これにより、通常施工と比べて配置人員を1人削減することができた。

全体の施工工程は図-12のとおり、ICT施工にすることで57日から51日に工程を6日間(12%)短縮できた。そのうち、据付工では5日分削減した。

また、通常施工とICT施工のそれぞれの据付スピードを計測した結果、1セットあたり通常施工は約50分に対して、ICT施工は約40分となり、約10分(20%)短縮できた。1日4セット設置する工程であったため、1日あたり計40分の短縮となった。

なお、カルバート施工は、1日の作業工程として敷モルタル〜グラウト工(4セット)までの施工を見込んでおり、工程通り行うためには効率的な施工に努める必要があった。仮にある作業が終わらなければ、次の日はその作業からの開始となり、その日の作業工程がさらに厳しくなるといった悪循環に陥る可能性があった。しかし、今回、据付で40分短縮できたことで、1日の作業工程を確実に終わらせることができ、ICT活用は工程管理において有利に働いた。

(2) 施工精度

施工精度は、設計座標値と実測座標値の差分で評価する。なお、縦断方向は、施工誤差が蓄積されていくことから個々の設計値との差を評価することは

表-2 配置人員の比較

	オペレータ	玉掛者	合図者	据付班	高さ調整班	計
通常施工	1人	1人	1人	4人	2人	9人
ICT施工	1人	1人	1人	4人	1人	8人

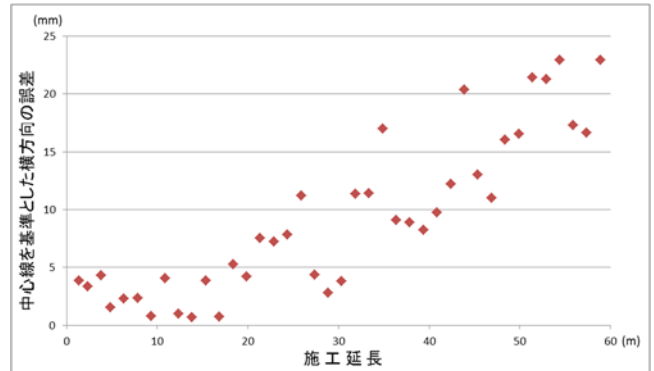


図-13 横断方向の誤差

難しい。そのため、今回は横断方向の施工誤差のみを評価することとする。

ただし、構造物の線形のずれに対して明確な規格値がない。道路の付帯構造物の場合、線形のずれが舗装幅に影響することから、評価モデルとしてカルバートを道路両側の付帯構造物と仮定し、舗装工の幅の規格値・50mmと比較した。

横方向の施工誤差を図-13に示す。誤差は最大で23mmで、平均では9mmであった。同精度で両側に設置できたとすると線形のずれは最大で46mmとなり、試験施工では、舗装工の幅の規格値と比較しても、良好な精度であった。

(3) 考察

今回の試験施工は多くの作業員と各部材の設置に時間を要す大型の構造物を対象に行ったことから、

項目	単位	数量	10	20	30	40	50	60
【通常施工】		合計57日						
準備工	式	1.0	基準点確認・丁張設置2人(2日)					
床掘	式	1.0	1次掘削 2人・2次掘削手元作業員・合図者含3人(14日)					
基礎工	式	1.0	砕石基礎・均しコンクリート10人(7日)					
据付工	式	1.0	据付け・上下連結・据付け・縦締め・グラウト注入・内目地仕上げ計9人(23日)					
埋戻	式	1.0	埋戻め3人・合図者1人(10日)					
出来形測量	式	1.0	レベル・光波測距測量2人(1日)					
【ICT施工】		合計51日						
準備工	式	1.0	ローカライズ・UAV測量2人(1日)					
床掘	式	1.0	1次掘削2人・2次掘削2人(14日)					
基礎工	式	1.0	砕石基礎・均しコンクリート10人(7日)					
据付工	式	1.0	据付け・上下連結・据付け・縦締め・グラウト注入・内目地仕上げ計8人(18日)					
埋戻	式	1.0	埋戻3人・合図者1人(10日)					
出来形測量	式	1.0	GNSS測量2人(1日)					

※準備工(ICT)・床掘(ICT)・基礎工・据付(ICT)・埋戻は施工実績に基づく施工日数
※据付(通常)は歩掛に基づく施工日数
※準備工(通常)・床掘(通常)は想定施工日数
※起工測量の点群処理や3次元設計データ作成等の内業、仮設支保工の日数は含めない

図-12 施工工程の比較

人員や施工日数について、ICT 活用の効果が明確に表れたと考えられる。そのため、側溝等の小型構造物へ適用した際に同様の結果が得られるのか、さらなる検証が必要と考える。

6. 課題と対策

(1) 施工性

a) 課題

施工では据付スピードは上昇しているものの、部材毎に受信機の取付を繰り返しているため、その分、施工性の低下が見られた。部材が多くなれば、その手間が大きくなるため、施工日数が延びてしまう可能性もある。

b) 対策

すべての部材に受信機を取付けていたものを一部の部材では受信機なしで据付けを行う等の従来施工との併用による施工の簡略化が考えられる。

(2) 方向の精度

a) 課題

受信機の取付位置を中央 1 箇所にしたことで、カルバートの向きが確認できないという問題がある。図-13 が示すように施工延長と横方向の誤差は概ね比例している傾向があり、カルバート設置の際に、どこかで回転が生じたことで施工延長に対して誤差が増大していった可能性がある。

b) 対策

受信機の他に、慣性センサー等を取り付けて向きの確認を行うことで方向の誤差が改善できると考えられる。ICT 建機では、建機の向きや位置を同時に把握して施工が可能であることから技術的にも実現可能性がある。

7. まとめ

カルバート工に ICT 技術を導入し、次の 2 点について検証を行い、その有用性を確認できた。

①省人化や工事日数短縮が可能であり、生産性向上へつながる

②GNSS による誘導の精度は、既存の規格と照らし合わせた結果、良好であった

加えて、掘削坑内での作業日数の削減されたこと、ICT 技術が施工を補助することで安全性の向上が図れた。

なお、同時に課題も生じており、本格的な運用には、誘導から設置までの施工の簡略化、座標と方向を同時に把握するための技術手法の導入が求められる。

参考文献

- 1) 国土交通省：ICT 活用工事（付帯構造物設置工）実施要領

由比地すべり対策事業における CIMの取り組みについて

村野幸宏¹・大西竜太²・川瀬将之¹・小松良行¹

¹富士砂防事務所 地すべり対策課（〒418-0004 富士宮市三園平1100）

²富士砂防事務所 由比出張所（〒424-0922 静岡市清水区日の出町9-1）

由比地区地すべり対策事業では、CIMによる調査・計画・設計・施工を試行するとともに、そのほかにも、情報共有システム、WEB会議、複合現実などの新技術を積極的に導入しており、これにより生産性向上、品質の確保、維持管理の効率化を進めている。本稿では、由比地すべり対策事業におけるCIMの取り組みについて報告する。

キーワード：生産性向上、品質確保、CIM、複合現実（MR）、WEB会議

1. はじめに

国土交通省では、ICTの全面的な活用等を建設現場に導入することによって建設生産システム全体の生産性向上を図り、魅力ある建設現場となるよう「i-Construction」の取り組みを進めている。また、「i-Construction」の一環として、調査・計画・設計・施工・維持管理の各段階において3次元モデルを活用することで、事業全体にわたる関係者間の情報共有を容易にし、一連の建設生産システムの効率化・高度化を図ることを目的としたCIM（Construction Information Modeling / Management）の導入を進めている。

富士砂防事務所でも、ICTサポート事務所として由比地すべり対策事業において各工事現場の状況に合わせながら、積極的にICT、CIMの活用を図っている。由比地すべりにおけるICTやCIMの活用については、当初、施工段階から導入を開始したが、順次、調査・計画・管理段階への活用拡大を図っているところである。本稿では、それらの取り組みについて報告する。

2. 由比地すべり対策の概要及び懸案事項

由比地すべりは、静岡市清水区由比地区に位置し、地すべり斜面の末端にJR東海道本線、国道1号、東名高速道路といった重要交通網が並走しており、仮に地すべりが発生した場合の人的被害と社会的影響は甚大である

（図-1）。そのため、豪雨や東海地震等による大規模地すべり災害の発生を未然に防ぐため、平成17年度より

富士砂防事務所にて地すべり対策事業を行っている。

実施している地すべり対策事業としては、地すべりが発生する大きな要因である地下水の水位を下げ、地すべりの動きを停止もしくは緩和させる抑制工、構造物の持つ抵抗力を利用して、地すべりの動きの一部もしくは全部を直接止める抑止工を実施している。抑制工としては、



図-1 由比地すべり防止地域

横ボーリング、集水井、排水トンネルを実施しており、抑止工としては深礎杭を実施している。現在は横ボーリング及び集水井の整備が完了し、排水トンネル及び深礎杭の整備を進めている。

当地区にて地すべり対策事業を進めていく際の懸案事項として、調査・計画段階では、地すべり地形、すべり面形状、地質構造、地下水分布、移動ベクトル等の多数のデータを総合的に分析し判断する必要がある点が挙げられる。多数の図面を基に地すべりのイメージを組み立てていくのは、経験の深い技術者以外には容易ではない。

設計・施工段階での懸案としては、施工ヤードの確保すら難しい急峻な地形、抑止工として施工する深礎杭の複雑な配筋が挙げられる。さらに測量データを作成する際も足場の悪い場所での作業となり、重い測量機器を人力で運びながら測量を行うことは滑落等の危険もある。また、深礎杭については坑内の作業スペースが狭く、加えて数十メートルの深さ（最大約80m）の中で足場を設置し、複雑な鉄筋を組み立て、コンクリートを打設する必要がある、危険性が高い作業環境となっている。

これらの懸案事項に対処するため富士砂防事務所ではCIMを活用した取り組みを進めている。

3. CIMを活用した取り組み

(1) 調査・計画段階での取り組み¹⁾

調査・計画段階における取り組みとして、CIMを用いた地すべり機構解析を実施している。（地すべり対策施設の計画には多数のデータを総合的に分析し、地すべりの発生・移動機構を解析することが必要である。）従来は、多数の図面を基に頭の中で地すべりのイメージを組み立てる事が求められたが、CIMによって各データを3次元的に統合して表示（いわゆる「見える化」）することにより、理解が容易になる。更にこれらを活用することで、適切な対策工の選定、施設配置、施工優先度の設定に資することも期待される。当事務所では下記のデータを統合して、地すべり機構解析（図-2）に用いている。

- ・ 地表面形状（ドローンレーザー測量）
- ・ 想定すべり面（コア性状より設定）
- ・ 地下水面（地下水観測データより設定）
- ・ 地質・土質性状（ボーリングコアより設定）
- ・ 地すべりブロック・遷緩線（地形判読より設定）

加えて、3次元モデルは有識者委員会における討議の際にも説明ツールとして活用しており、以下のメリットが得られている。

- ・ 地表面形状、想定すべり面、地下水面等を3次元モデル化し、視点を自由に動かしながら、相互の関係をチェックすることで、すべり面の位置・形状の設定の妥当性を確認することが容易であった。

- ・ 想定すべり面に対する地下水の影響、流入メカニズム等を3次元的に把握しやすかった。
- ・ 想定すべり面と地質・土質性状の関係が3次元的に把握しやすかった。
- ・ 複数の技術者や有識者間で議論する場において、従来の2次元図面よりも認識の齟齬がおきにくく議論が円滑であった。

(2) 設計・施工段階での取り組み

a) CIMによる設計モデルの修正

深礎杭の配筋は、複雑に鉄筋が密集しているため平面2次元の図面を頭の中で3次元に変換する事は、熟練の技術者でも難しく間違いを起こしやすい。そこで、鉄筋の組上がり方を容易に把握することができるよう、組み上がる順序等をアニメーション化し、作業打合せ等で活用することにより、作業過程について、作業員全員で共通認識を持つことが可能となった（図-3）。平面2次元の図面だけでは伝わりにくいことも、3次元モデルを利用することで、容易に関係者全体で共通の認識を持つことができ、作業の効率化などにつながっている。

また、鉄筋の干渉やかぶり等を施工計画の立案段階で確認することも可能となる。今回は施工計画の段階で施工者に3次元モデルの確認を依頼したところ、施工性の観点から鉄筋の分割を少なくすることや、中間帯鉄筋を機械定着工法への有意義な提案があった。これにより、鉄筋加工や組立手間、配筋作業の単純化がされ、より作業がしやすく簡単な方法へと改善された（図-4）。

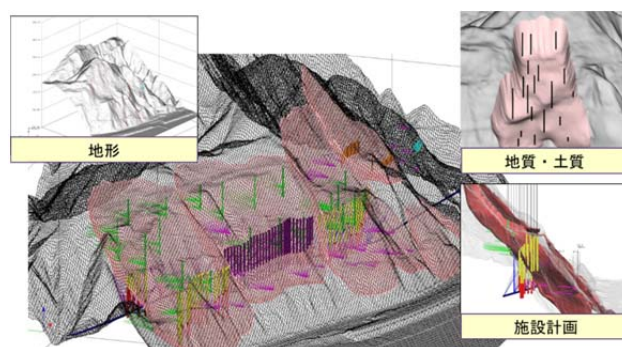


図-2 3次元モデルによる解析

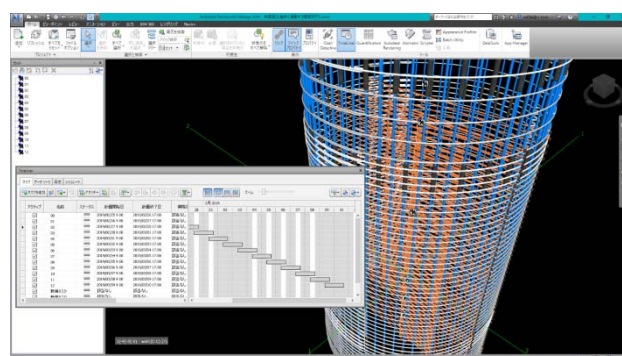


図-3 鉄筋組立て数量と連動させた配筋アニメーション

施工ヤードの設計についても3次元モデルで確認することにより、設計では地形との不整合を事前に把握することができた（図-5）。

安全対策の利用としては、工事着手前に施工ヤードの3次元モデルによる施設配置計画を行い、バックホウやダンプトラック等の重機を運転するオペレータの視野の死角確認を行った。重機の旋回範囲と歩行通路が交錯し、オペレータの死角になる箇所が確認できたため、重機が歩行者通路まで旋回できないような措置を講じた。また、これらの3次元データを、新規に現場に入場する作業員への教育等にも活用している。

b) 情報共有システムとWEB会議の実施

深礎杭のCIMモデルを用いて設計段階から建設プロセス改善の検討として、発注者、設計者、施工者を合わせた情報共有システムの活用とWEB会議（図-6）を行った。一般的な工事の流れは、設計、施工、維持管理の順に各段階で打合せを行うが、CIMモデルを用いた情報共有システムとWEB会議を用いることでそういった業務プロセスをまたいだ情報共有を試みた。

情報共有システムでは、モデルを共有し各自で確認を行い、設計の可視化により意見交換、合意形成が促進され、WEB会議ではモデルの形状確認、チェック等を参加者全員がリアルタイムで閲覧しながら合意を得ることができた。

これまで情報共有システムでは参加者のモデル、ソフトに対する習熟度・理解の差異が把握できなかったが、今回WEB会議を導入することによって理解度に対する支援が可能になり、個人の習熟度・理解の平準化をすることができた。

c) UAV（ドローン）の活用

由比地すべりにおける工事箇所は急峻であることが多く、足場の悪い場所においては滑落等の危険を伴う。そのため、従来のトータルステーション等による起工測量の代わりに、UAV（ドローン）による空中写真測量やレーザースキャナーによる測量を活用する取り組みを行っている。その結果、危険な作業の軽減や現場作業時間の大幅な短縮などの効果が得られた²⁾。

また、土量計算において、従来は図面から平均断面法で施工土量を算出しているが、UAV（ドローン）によって取得した現況地形の点群データと3次元設計データの差分から土量計算することにより、精度の向上を図ることができた。

d) 複合現実(MR)³⁾技術の活用

施設管理におけるCIMデータの利活用の検討としてHoloLensによる現地点検補助効果の現地検証（図-7）を行った。MR技術を使うことで、図面で確認していた深礎杭を現実世界に投影し、実際の現場でどのように

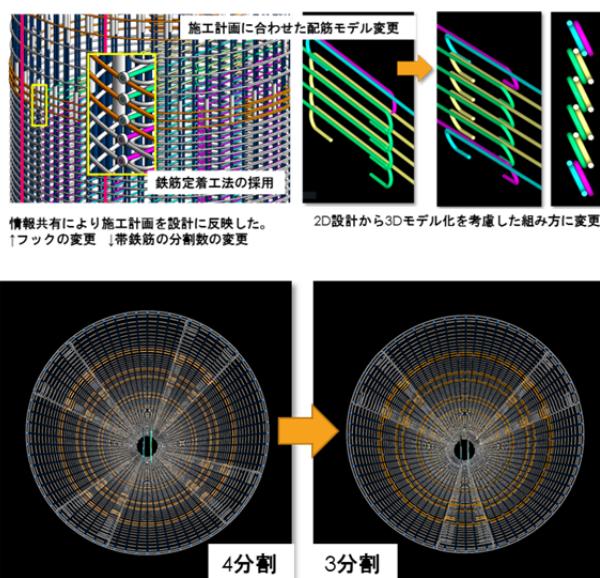


図-4 配筋モデルの変更



図-5 地形との不整合の確認

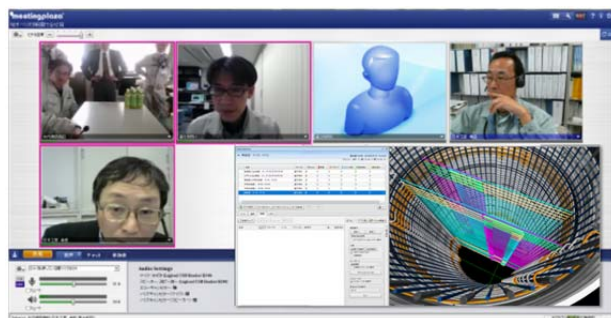


図-6 WEB会議の様子



図-7 MR技術による深礎杭の可視化

配置されているかの確認を行った。深礎杭等の地下構造物は、完成後は目視による確認は行えないため災害時に斜面崩壊した場合、崩壊と位置関係は図面より間接的に確認できるだけである。そこでMR技術を用いて現地に投影することで崩壊箇所における杭の配置を把握することができると考えられる。現時点では視野角が狭くモデルの確認は限定的ではあるが、今後の開発により改善される可能性があるため将来性のある情報機器だといえる。

4. 受注者等からの意見

(1) 設計コンサルタント

ソフトウェア作業においては技術者のスキルと環境による作業量の差が大きく、その操作に習熟するほど効率化が図られるが、その一方で熟練者を育成する環境に厳しい現状がある。高度な作業になるにつれてハード・ソフト導入費が増大し、要員不足に悩まされているうえに、設計業務発注件数が減少すれば作業員の経験を積む機会が不足すると考えられる。また、2次元から3次元への過渡期のためソフトウェアの機能が必要とされる仕様に追いついていない。このことからオペレータの習熟度だけでは大幅な効率化が難しいため、ソフトの改良とCIM技術に精通した設計者による3次元設計ワークフローの確立を行い、オペレータのスキルアップを支援する環境作りが必要である。

(2) 施工会社

施工会社から多く挙げられた意見が、3次元モデル作成によってデータ量が増えモデルがスムーズに用いられない、ということである。例えば、モデルデータに関して、配筋モデルの可視化、干渉チェックについて配筋のかぶり・組み方等の確認結果はわかりやすく、モデルを安全管理・教育訓練等で活用したいという意見はあったが、ソフトウェア上でモデルがスムーズに表示されない事がある。具体的には、以下のとおりである。

- ソフト・モデルが重いと普段使うのには適さない
 - 全体モデルは軽くないと使えない。部分的に詳細なモデルが必要
 - 配筋モデルを軽くできれば作業性が向上する
 - WEB会議でモデルがスムーズに表示されない
- モデルの利活用について、施工会社側で考えている利活用に必要な詳細度・範囲は、設計段階での詳細度と必ずしも一致しない。そのため情報共有での確認から、施工者側で必要とする内容をモデルの作成に反映した。例えば深礎杭全体モデルは、モデル形状としてもファイル容量にしても利用するには大きすぎるため、過密配筋部分のモデルを作成し、干渉チェックや組み立ての確認に利用した。

(3) 発注者

WEB会議等で3次元モデルを見ながら内容を把握することはできるが、ソフトウェアの利用に関しては経験が少ないため、詳細を理解できないこともある。モデルが意図されたものとして作られているか、必要な情報が付与されているか確認する技術を身につけることが重要である。今後、発注者においてもCIM技術者を含めた講習会に積極的に参加し担当者の理解を深める必要がある。

5. まとめ

由比地すべり対策事業は、調査・計画・設計・施工・維持管理の各段階においてCIMの活用を試みた。

CIMモデルの利用に情報共有を活用することで、設計・施工の段階で関係者間の相互理解が深まり合意が円滑に進んだことから、一定の効率化が図れたといえる。

CIMモデル単体でも、2次元の平面的な図面から3次元のモデルによって設計が可視化され、施工上の問題点や不整合な点を事前に修正することはできる。

情報共有システム・WEB会議は、CIMの取り組みと親和性が高くその有用性を促進する効果がある。リアルタイムかつシームレスな会議、デスクトップ共有によるモデルの共有は、相互理解を深め関係者間での理解度のギャップを埋めることに効果がある。

CIMに新技術を活用することは、関係者間の理解や合意形成に大きな効果があるが、技術者の経験不足やハード、ソフトの整備が進んでいない現状も課題としてある。

今後は新技術の試行、導入に積極的に取り組み、経験やスキルを身に付けながら、必要なハード・ソフトを整備して、更なる生産性の向上、品質の確保、維持管理の効率化につなげていきたい。

参考文献

- 1) 杉本宏之・白木久也・荒木孝宏・奥山剛：由比地すべり対策事業におけるICTの活用，地盤工学会誌 Vol.66, No.9, pp.20-23, 2018.
- 2) 川嶋浩一：由比地すべり対策事業におけるi-Constructionの取り組み，砂防と治水，Vol.49, No.4, pp.18～21, 2016.
- 3) 複合現実(Mixed Reality; MR)とは、グラス型のデバイス(HoloLens等)越しに目の前に見える現実の風景の中に、仮想のAR (Augmented Reality、拡張現実) オブジェクトを重ねて表示し、デバイスを掛けた人に現実空間と仮想空間を融合した世界を見せる技術である。これにより実際の建設現場において、設計予定の土木構造物を実物大のARで表示し、構造物の配置を現地で確認できるため、設計成果の妥当性を示すことに役立てることができる。

水圧変動下での鋼管矢板による 大水深締切について

加藤 達也¹

¹近畿地方整備局 浪速国道事務所 工務課 (〒573-0094 大阪府枚方市南中振3-2-3)

天ヶ瀬ダム再開発事業は既設天ヶ瀬ダムが持つ治水・利水の機能を向上するために、ダムの左岸側に全長617mのトンネル式放流設備を建設する事業である。ダム湖を運用しながらトンネルへ水を取り入れる流入部を施工するため、本事業では鋼管矢板によりダム湖の締切を行った。鋼管矢板はダム湖水位（最大水深約40m）による静水圧及び水位変動（最大水位差約20m）に耐える必要がある。本報告では、今後の同種事業の参考となるよう、鋼管矢板締切の設計方法や止水処理など、運用中のダム湖を締切る上で生じた課題を解決するために講じた対策を紹介する。

キーワード 締切、鋼管矢板、止水、天ヶ瀬ダム、ダム再生

1. はじめに

厳しい財政状況等の社会経済情勢、洪水・渇水被害の頻発化、既設ダムの有効活用 of 様々な特長やこれまでの事例の積み重ねによる知見の蓄積、これを支える各種技術の進展等を踏まえれば、ソフト・ハード対策の両面から既設ダムを運用しながら機能向上を図るダム再生の重要性はますます高まっている。

平成30年7月豪雨がきっかけとなってまとめられた「異常豪雨の頻発化に備えたダムの洪水調節機能に関する検討会」（国土交通省水管理・国土保全局河川環境課流水管理室）の提言においては、ダム再生の推進や加速化を図る施工に係る技術の開発・導入を促進することとされている。天ヶ瀬ダム再開発事業においても、先端的な技術の開発・導入、官民連携した技術開発によりダム再生に取り組んでいる。

2. 天ヶ瀬ダム再開発事業の概要

天ヶ瀬ダムは京都府南部の淀川水系宇治川に位置する1964年に完成したダムで、治水・水道用水補給・発電に用いられている多目的ダムである。位置及び集水域を図-1に示す。本事業は、天ヶ瀬ダム下流の宇治川・淀川の洪水調節及び琵琶湖周辺の浸水被害軽減、水道用水の安定供給、発電機能増強を目的として、天ヶ瀬ダムの放流能力を900m³/sから1500m³/sへ600m³/s増強させるた

め、ダムの左岸側に全長617mのトンネル式放流設備（図-2）を建設する事業である。トンネル式放流設備は、流入部、導流部、ゲート室部、減勢池部、吐口部で構成される。そのうち流入部においては、主に洪水調節の影響により水位変動が大きい運用中のダム湖において、最大水深約40mという厳しい環境下にもかかわらず内径28mという規模で締切を行っており、実績が少ない貴重な施工事例といえる。



図-1 天ヶ瀬ダム集水域図



図-2 トンネル式放流設備のイメージ図

そこで本稿では、今後の運用中のダム湖における締切を行う上で参考となるように、本事業において鋼管矢板締切が静水圧及び水位変動に耐えられるよう行った設計及び施工上の対策を報告する。

3. 流入部建設工事の概要

流入部はトンネル式放流設備の最上流に位置するダム湖からの取水口となるもので、安定してトンネルに水を取り込めるよう最大水深約40mの位置にある。流入部の側面図を図-3、平面図を図-4に示す。流入部本体はコンクリート構造物であり、次のようなステップで構築する。まず、ダム湖上に作業ヤードを確保するため仮設栈橋を設置。岩盤を含む地盤の掘削（掘削土量約17,000 m³）を効率よく行えるように鋼管矢板でダム湖内を締切る。締切内を約40m掘削、流入部本体を構築する。トンネル式放流設備全体が完成後、鋼管矢板を一部切断してトンネルへ通水する。2019年6月現在、図-5に示すように流入部は本体構築まで完了している。

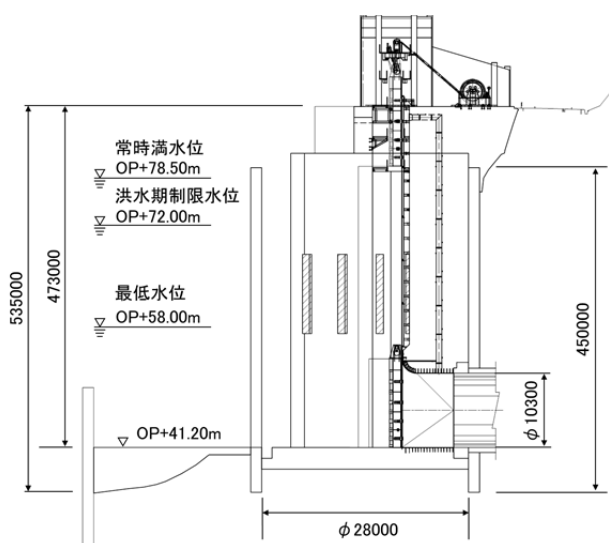


図-3 流入部側面図

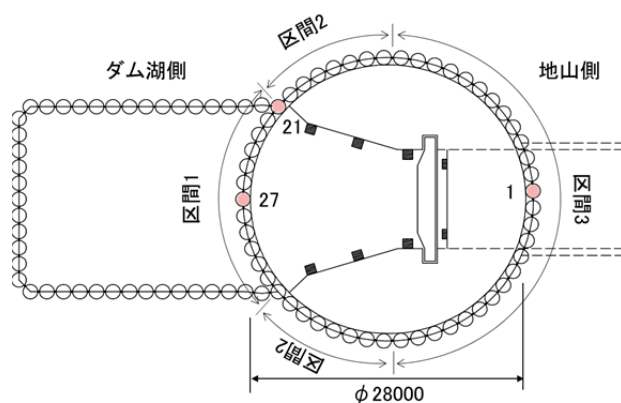


図-4 流入部平面図



図-5 流入部の施工状況（2019年6月）

4. 水圧に耐える締切の設計

流入部の締切は、運用中であるダム貯水池による静水圧及び水位変動に耐える必要がある。締切の方法は、地盤条件から鋼管矢板による締切を選定した。本事業では直径1,500 mm、長さ45 mの鋼管53本を円形状に打ち込んで締切を行い、締切内を掘削しながらリング状の支保工（円環支保工）を11段設置して締切を内側から支える。

(1) 貯水池条件と鋼管矢板締切の設計

天ヶ瀬ダムの貯水池運用条件は、常時満水位O.P. 78.5 m、最低水位O.P. 58.0 mである。施工時制限水位を設定して貯水池水位を低減させておくことで締切自体のコスト削減は可能であるが、1ヶ月当たり12.5 億円の発電補償が発生することが見込まれたため、本事業では設定できない。

作用する水圧から鋼管矢板と円環支保工について許容応力度計算を行い部材を選定する。計算は道路土工一仮設構造物工指針¹⁾に基づき弾塑性法を用いる。貯水池の水位は、大きく分けて①最も高い水位（常時満水位 O.P. 78.5 m）の場合と、②洪水調節のためにダム湖の水位が急速に低下（最低水位 O.P. 58.0 m）して地山側

(洪水時制限水位 0.P. 72.0 m) と水位差が生じた場合を想定する。締切内の条件は10次掘削を最終として掘削・支保工設置ごとにステップ計算を行う。締切は図-4に示すような3つの区間に分け、区間を代表する鋼管矢板 (No. 1, 21, 27) について計算を行った。これを基に、鋼管及び円環支保工に用いるH鋼の部材厚を検討する。

計算の結果、鋼管矢板に作用する応力が最も大きくなるのは、②の場合であることが判明した。そのときの計算結果を図-6に示す。曲線が掘削ステップごとの応力である。図-6から鋼管の深さ方向について作用する応力が大きく変化することがわかる。そのため、異なる部材厚の鋼管を深さ方向に溶接することで、必要な耐力を持たせつつ合理的な設計となるようにした。図-6のMrが選定した部材の短期許容応力、Myが降伏応力を示している。部材の選定結果を図-7に示す。鋼管矢板の最大部材厚は37 mm となり、これは一般的に製造されている鋼管矢板 (最大部材厚25 mm) の約1.5倍の厚さである。円環支保工に使用したH型鋼は一般に流通する大きさのものでは設計条件を満たせない箇所もあったため、厚さ90mmの鋼板を溶接して製作することとした。円環支保工は締切内を約3~5m掘削するごとに設置した。支保工の段数は11段、重量は合計約1,000tである (図-8)。

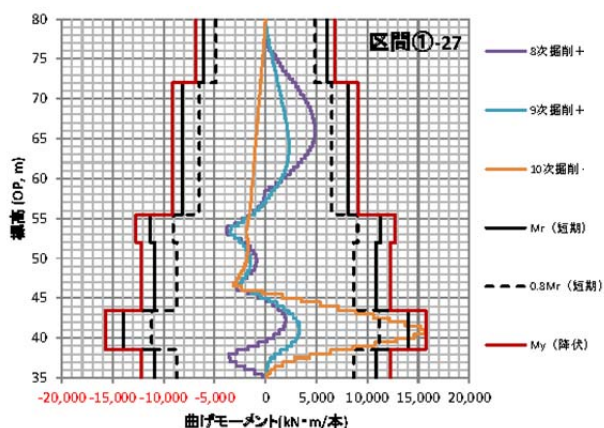


図-6-1 許容応力度計算の結果 (鋼管No. 27)

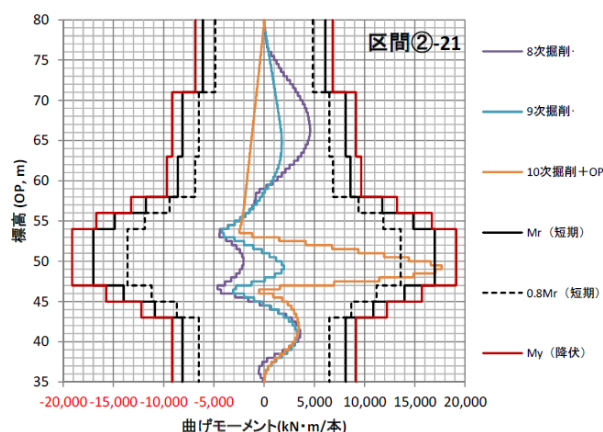


図-6-2 許容応力度計算の結果 (鋼管No. 21)

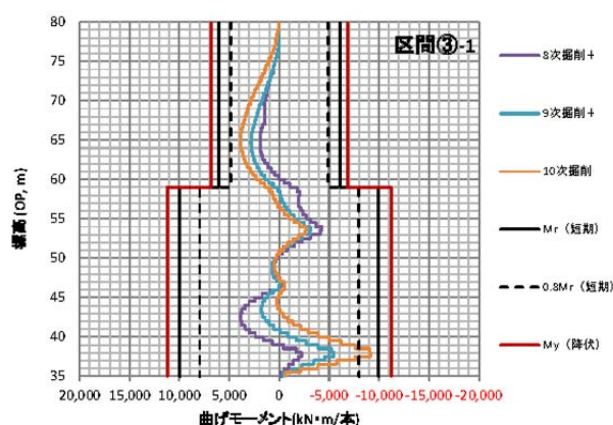


図-6-3 許容応力度計算の結果 (鋼管No. 1)

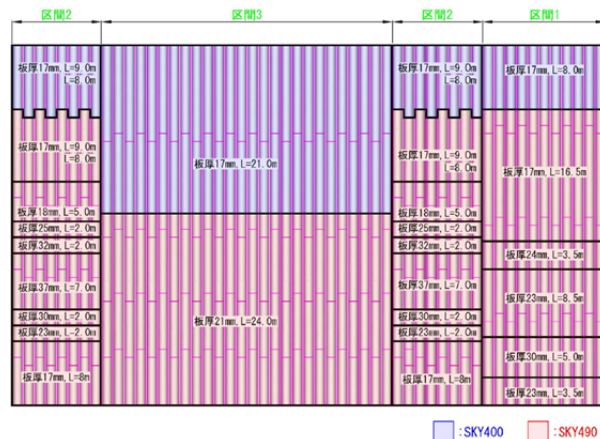


図-7 鋼管矢板の選定結果



図-8 締切内の様子 (2017年8月)

(2)止水計画

締切内は安全のため確実な止水性が求められる。本工事においては、図-9に示すように鋼管内カーテングラウチング、鋼管背面薬液注入、継ぎ手モルタル注入を行うことで止水性を高めている。

鋼管内カーテングラウチングは、立坑底盤側からの貯水の浸入を防止する目的で実施する。図-10に示すグラウト範囲は、グラウチング技術指針・同解説²⁾に基づき、透水性を表すルジオン値で改良目標 (2 Lu 以下) を設

定し、地盤の透水性から範囲を決定することで合理的な設計とした。施工は鋼管矢板建て込み後に鋼管内より実施した。

流入部締切の鋼管矢板は、全周回転掘削により掘削し、岩盤を砂に置換された孔に建込んでいるため、その砂が水みちとなる恐れがある。そのため、鋼管背面に薬液注入を行った。これは継ぎ手の止水性を向上させている。

継ぎ手は水密性の良いP-P型を採用しており、それに加えモルタル注入を実施して止水性を高めた。このことは、継ぎ手のせん断応力も向上させている。

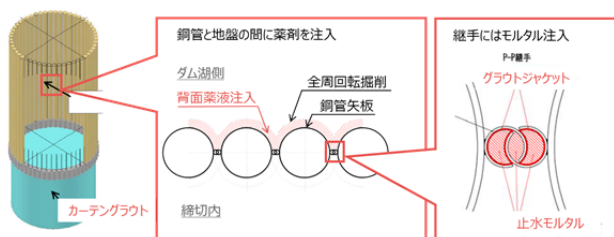


図-9 止水計画図

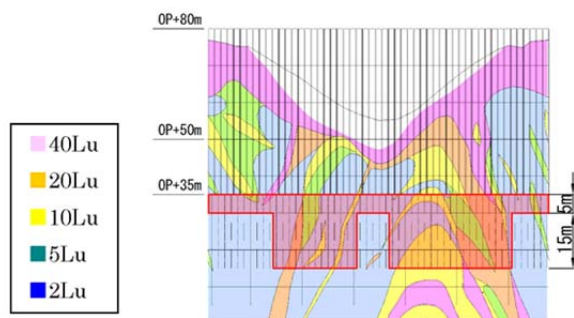


図-10 カーテングラウト施工範囲

5. 施工上の対策

(1) 鋼管矢板の打設

鋼管矢板(φ1500)を配置する箇所の地盤は岩盤であったため、直接そこに鋼管矢板を打込むことが困難であった。そのため、事前に岩盤を全周回転掘削機(φ2000)により鋼管矢板打設1箇所ごとに掘削し、砂及び碎石で置き換えた。その際に掘削機のビット摩耗が著しく工程の遅延が見込まれたが、施工機械を増やして先端ビットの修理・取り替えを繰り返しながら施工することで対応した。ビット摩耗の原因は、岩の強度が想定よりも高かったからである。円周回転掘削機を用いる場合は岩盤の一軸圧縮強さが大きいほど施工日数が増加する。ボーリングデータで岩級区分する場合、岩の亀裂や風化を総合的に判定するが、それに加えて一軸圧縮強さを把握して計画を立てることが重要であるとわかった。

鋼管矢板はバイブロハンマを利用して打設する計画であった。しかし、バイブロハンマのみでは埋戻砂部及び継手管部の摩擦抵抗により矢板を最終位置まで打ち込め

ないことが判明したため、より高い打撃性能を持つIHCハンマーを併用して打設した。

岩盤を精度良く砂に置換られなかった場合は鋼管矢板を打設できない可能性があるため、全周回転掘削の施工は位置及び傾斜の高い精度管理が求められる。鋼管矢板の打設は、施工基板より打設地盤面が30m以上下方にあること、鋼管矢板の長さは45mあることから、これも高い精度管理が求められる。そのため、自動計測を実施して施工を行うことで、鋼管矢板締切の閉合を精度良く行うことが可能となった。これは2方面からトータルステーションで施工座標を自動で計測、オペレータ用の画面にリアルタイムで表示するものである。鋼管矢板打設時にはガイドローラーを設置、その中心座標と鋼管の座標から傾斜を算出してモニターに表示させた。このシステムを図-11に示す。これらにより、鋼管の円周及び半径方向の打込み誤差は±2.5cm以下、傾斜量の誤差は1/1000以下と、高い精度管理を実現した。

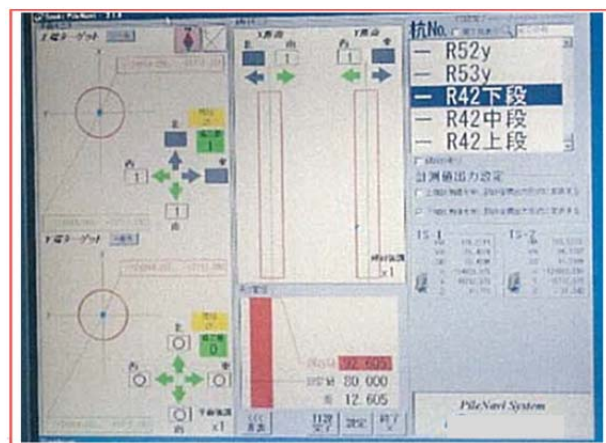


図-11 鋼管位置の自動計測システム

(2) 締切の自動計測管理システムの構築

工事の安全確保のために、締切後の鋼管矢板及び支保工の挙動を監視する計測管理を行った。計測項目及び計測器を表-1に、図-12に計測器の配置を示す。挿入式傾斜計を用いて計測する以外の項目に関しては自動計測が可能で、1時間ごとにデータを収集し記録するシステムを構築した。管理値は道路土工一仮設構造物工指針を参考に設定し、自動計測項目が管理値を超えた場合にはメールで警報を発するシステムとした。

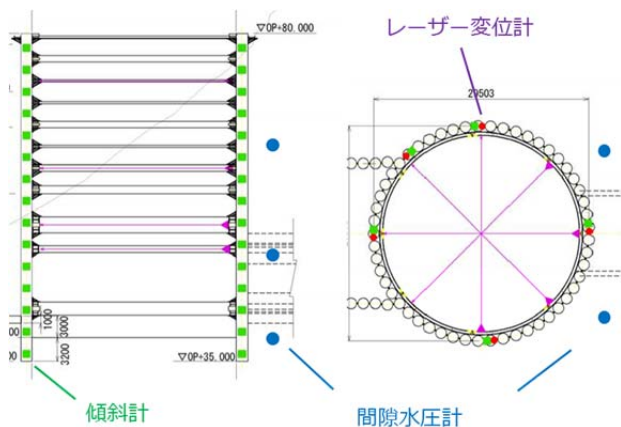


図-12 計測器の配置

(3) 鋼管矢板変位の状況

全鋼管矢板打設完了後から流入部本体のコンクリート打設完了（2016年11月～2019年3月）までに天ヶ瀬ダムが洪水調節を行った出水のうち、最大のものが2017年の台風21号であった。そのときの鋼管矢板の変位とダム湖水位を図-13 に示す。計測機器は鋼管矢板 No. 20 の頂部に設置されたもので、変位は半径方向で表しており、締切内側へ変位する場合にプラスとなる。図-14 に示す区間2 の鋼管矢板 No. 21 の解析において、洪水時制限水位 0.P. 72.0 mから最低水位0.P. 58.0 mへ水位低下させたときの変位は10次掘削後で242 mm であったのに対し、このときの変位は約16 mm であった。この要因は、解析よりも水位の変動幅が小さかった（約10 m）こと、流入部本体コンクリートの打設が0.P. 47.5 mまで完了しているため鋼管矢板の安定性が高まったことが考えられる。水位が上昇後も鋼管の変位が戻らないのは、残留応力が原因と考えられる。1ヶ月経過後も変位は約-40 mm までしか戻らなかった。

結果として、鋼管矢板締切は洪水調節によるダム湖水位の変動に耐え、その後も安全に施工を続けることができた。

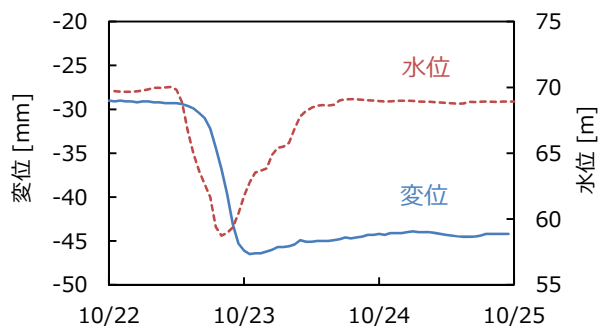


図-13 2017年の台風21号通過時の鋼管変位とダム湖水位

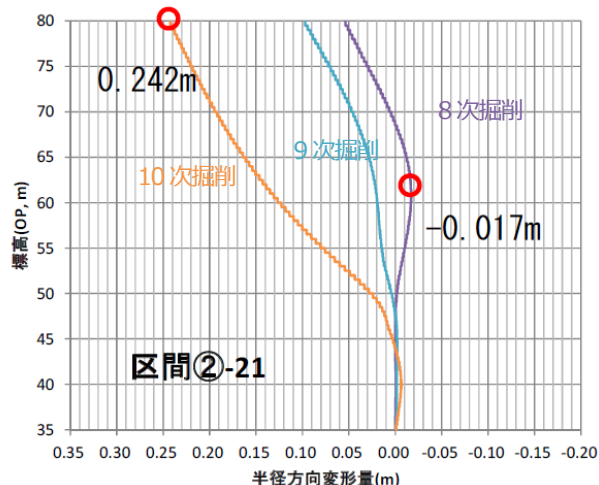


図-14 洪水調節を行ったときの鋼管矢板変位の解析結果（鋼管No. 21）

(4) 鋼管矢板変状への対応

流入部立坑において、掘削途中の段階（10 段支保工設置時）に図-15 のように一部の継手が外れて鋼管矢板が締切内側に変位していることが確認された。また、図-16 のように一部の鋼管矢板が内側に押しつぶされていることも確認された。

表-1 鋼管矢板締切の計測項目と管理値

対象	計測項目	使用計器	点数	管理 /参考	1次管理値	2次管理値
鋼管矢板	鋼管変位	傾斜計	75台	参考	-	-
		挿入式傾斜計	1台	参考	-	-
	締切 内空変位	レーザー 変位計	16台	管理	2次管理値の80%	躯体の鉄筋かぶりを 侵さない変形量
	応力	ひずみ計	150台	管理	2次管理値の80%か 設計値の小さい方	許容応力
円環支保工	応力 (軸力)	ひずみ計	80台	管理	2次管理値の80%か 設計値の小さい方	許容応力
周辺地山	背面水圧	間隙水圧計	6台	参考	-	-

鋼管矢板継手が外れた位置からの湧水は、ほとんど発生しなかった。これは、継手が外れるリスクや止水の信頼性向上のために、背面側に薬液注入を実施して止水強化を図った結果と考えられる。この事象が発生してから本体の構築が完了するまで1年以上かかることから、継手が完全に外れているところに関しては鋼管背面に薬液注入を再度行った。

継手には鋼管矢板締切全体の変位を抑えるためのせん断抵抗力を期待する設計となっている。そのため、継手が外れた部分はせん断抵抗力の不足部分を補うために図-17に示すような追加せん断プレートを設置した。

鋼管矢板のつぶれた箇所は鋼管の断面が小さくなっており、鋼管の鉛直方向の曲げ剛性が低下していると考えられるため、鋼材を用いて鋼管矢板の補強を行った。使用した補強リングH鋼により隣接する鋼管と一体化させることで、剛性が低下した鋼管矢板の補強を図った。これにより、立坑内側への鋼管矢板の変形を抑えることができる。鋼管矢板への補強を図-18に示す。

これらの変状が生じた箇所は締切の地山側であった。地山は亀裂が多いため緩みやすい状態であった。そのため山側から緩み土圧が作用し、これらの変状が生じたと考えられる。このことから今後類似の施工時には、地山の緩みに留意する必要がある。



図-15 継手の変状

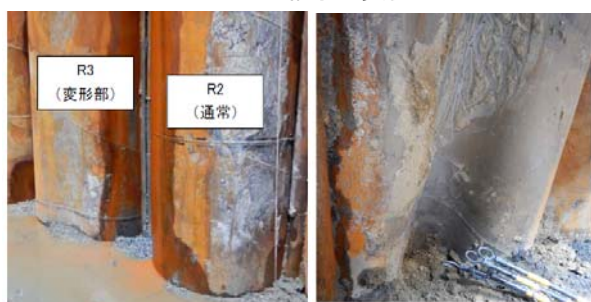


図-16 鋼管矢板の変状

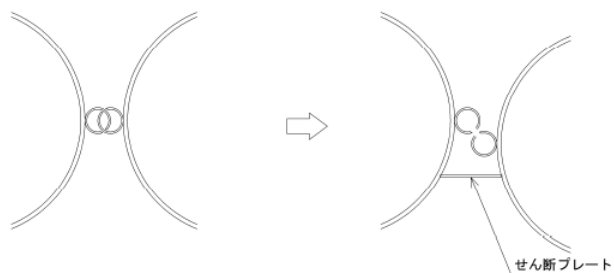


図-17 継手変状への対応

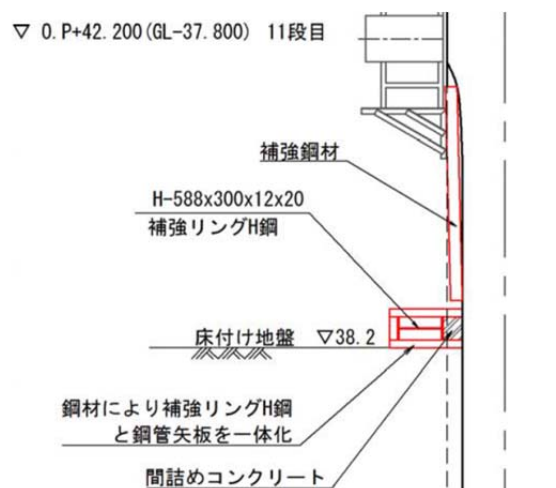


図-18 鋼管矢板変状への対応

6. おわりに

本事業では運用中のダム貯水池による静水圧及び水位変動に耐える鋼管矢板締切を設計・施工した。設計時の支配的な条件は、ダムが洪水調節を行ったときに、締切の地山側とダム湖側で水位差が生じた場合であることがわかった。施工時は鋼管矢板に変状が生じたが、補強で対応できる範囲内であった。継ぎ手が外れた箇所でも漏水はほとんど発生せず、多重の止水処理が有効であったことがわかった。この変状の原因として考えられる地山の緩みに今後の類似施工では留意が必要である。

2019年6月現在、流入部は本体構築まで完成している。今後、トンネル式放流設備全体を完成後させ、鋼管矢板を一部切断してトンネルへ通水する。本事業が安全に完了し、広く淀川流域の治水、利水に資することを願っている。

※本稿の内容は筆者の前所属である琵琶湖河川事務所工務課の所掌である。

謝辞：本稿の執筆にあたっては施工業者である大成建設の水野智亮さま、矢部和史さまからヒアリング、資料提供でご協力いただきました。また、本工事を担当していた琵琶湖河川事務所の方々からは本稿に関する助言等でお世話になりました。最後に、私が現在所属している浪速国道事務所の方々からは執筆内容に関する助言をいただいただけではなく、応援の言葉もいただき、おかげで本稿を作成することができました。末筆ながら、深く感謝の意を表します。

参考文献

1. 日本道路協会. 1999. 道路土工一仮設構造土工指針
2. 国土技術研究センター. 2003. グラウチング技術指針・同解説

無人化施工へのHMDの活用について

橋本 毅¹・山内元貴¹・新田恭士¹

¹ (国研) 土木研究所 技術推進本部 先端技術チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

災害発生後の被害拡大防止や早期の復旧は二次災害の危険性が高いため、遠方より遠隔操作が可能な建設機械を用いた「無人化施工」が用いられる。一般的に無人化施工では、安全地域に多数のディスプレイやPCを設置した運転室を構築し、オペレータはそこから建設機械の操作を行うが、災害は周辺の交通環境悪化を引き起こす場合が多く、人員・機材・資材の輸送困難による運転室の構築時間の遅延が、迅速な無人化施工の展開に対する課題点となっている。本報では、上記の課題点に対する解決策として、頭部装着型ディスプレイ(以下HMD)の活用を提案し、実際にHMDを用いた2種類のシステム検証実験の結果を述べる

キーワード 無人化施工, 遠隔操作, HMD, VR

1. はじめに

我が国はこれまで地震や火山、台風、津波といった多くの災害に見舞われており、甚大な被害が発生している。災害発生後の被害拡大防止や早期の復旧のためには、被災状況の調査や道路啓開などの災害緊急対応を迅速に行うことが非常に重要であるが、これらの対応は二次災害の危険性が高く、安全性に配慮しつつ迅速に高効率で施工を行うことは極めて困難である。このような危険箇所での施工では、遠方より遠隔操作が可能な建設機械を用い、オペレータは安全な場所から操作を行うことで、安全に施工することが可能となる。遠隔操作型建設機械を用いる施工は「無人化施工」と呼ばれ、1993年度に実施された「雲仙普賢岳水無除石工無人化施工試験工事」

を契機に発展し、実用的な工法としてこれまで日本国内で200件以上の活用実績を持っている¹⁾。

施工現場と安全地域が離れており肉眼で建設機械を操作できない場合、建設機械に搭載されたカメラの映像や建設機械外に設置したカメラの映像などを安全地域に設置したディスプレイに表示し、オペレータはそれらの映像から現場の状況を判断し建設機械の操作を行う(図-1)。この場合、オペレータの労働環境や各種機器の保全などから、一般的には安全地域に運転室を構築することが必要となる。しかし、災害は周辺の交通環境悪化を引き起こす場合が多く、人員・機材・資材の輸送困難による運転室の構築時間の遅延が、迅速な無人化施工の展開に対する課題点のひとつとなっている。

本報は、上記の課題点に対する解決策として、頭部装

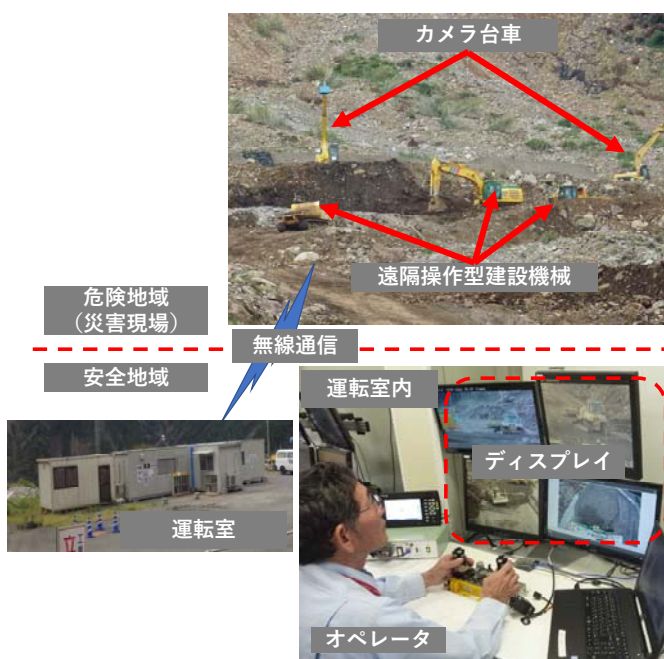


図-1 無人化施工概要



図-2 頭部装着型ディスプレイ(HMD)



図-3 HMD一式

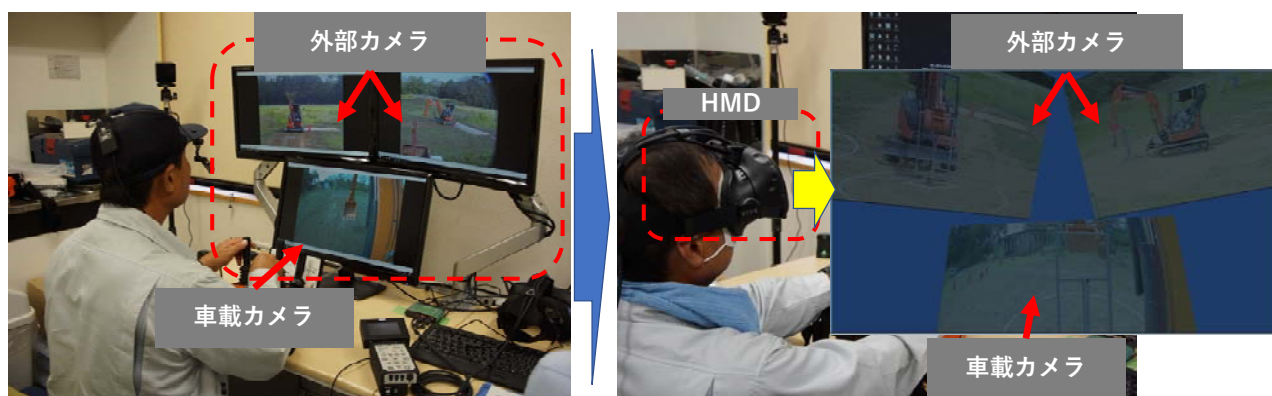


図-4 複数映像表示システム

着型ディスプレイ(以下HMD)の活用を提案するものである。次章にてHMDの有効性を述べるとともに、3章以降に実際にHMDを用いた2種類のシステムの概要と、従来のディスプレイを用いたシステムと比較した施工効率およびオペレータ使用感に関する検証実験の結果を述べる。

2. HMDの有効性

HMDは図-2のように頭部に装着するディスプレイであり、これを利用することにより図-1に示したディスプレイ類をすべて省略することが可能となる。またHMDそのものはコンパクトで軽量(本研究で使用したHTC社製VIVEの場合一式約3kg、図-3)であるため、可搬性に優れており、多数のディスプレイに比べると災害現場へ容易に到着できる利点がある。さらにディスプレイのように机や架台、広い場所を必要としないため広い運転室が必要なくなり、場合によっては乗用車内から操作をすることも可能となる。したがって、HMDの活用は災害地域への迅速な無人化施工の展開に有効であるといえる。

上記利点を実現する具体的なシステムとして、本研究では「複数映像表示システム」「VRシステム」の2種類のシステムを提案・開発した。それぞれの概要および検証実験について次章以降に述べる。

3. 提案システム1「複数映像表示システム」

(1) 複数映像表示システム概略

カメラ映像を介して無人化施工を行う場合、一般的には建設機械運転席付近に設置したカメラ(車載カメラ)と、建設機械周辺状況を把握するため作業地域全体を俯瞰でとらえるカメラ(外部カメラ)の映像を見てオペレータは操作を行う。この手法は「雲仙普賢岳水無除石工無人化施工試験工事」にて確立され、現在では主流となっているものである。本章で提案する複数映像表示システムは、これらの映像の配置、大きさをほぼ同等にHMD内部に再現し、オペレータに表示するもの

表-1 複数映像表示システム検証実験オペレータ

	年齢	経験年数
A	38	20
B	35	10
C	34	10
D	34	10
E	30	15
F	32	10
G	31	15
H	46	20
I	39	15
J	57	30

である²⁾(図-4)。この方法の場合、カメラ、通信機器などは従来機器をそのまま流用することができるため、比較的システム構築が容易である。

(2) 検証実験概要

複数映像表示システムと従来のディスプレイを用いたシステム(以下従来システム)との、施工効率およびオペレータ使用感に関する比較・検証実験を行った。実験は茂木らが提案した³⁾モデルタスクを用いて行うものとした(詳細は参考文献3)参照)。参加したオペレータ10名を表-1に示す。各オペレータは従来システムを用いた操作、および複数映像表示システムを用いた操作をそれぞれ10回ずつ行い、モデルタスクにかかる時間(以下サイクルタイム)を計測した。

(3) 実験結果

10名それぞれの4回目以降のサイクルタイムを平均したものを図-5に示す。ここで4回目以降のサイクルタイムを採用したのは、モデルタスクに対するオペレータの「習熟度」の影響を排除するためである。また、各オペレータにおけるサイクルタイムの差異が有意であるかを調べるためにt検定を行い、有意確率 p が0.05より小さい場合は有意差があるとし、グラフに★印を追記した。

図-5によると、10名中3名のオペレータでは従来システムと複数映像表示システムを用いた場合のサイクルタイム差に有意差があるとはいえないが、残り7名のオペレータにはサイクルタイムに有意差があり、すべて複

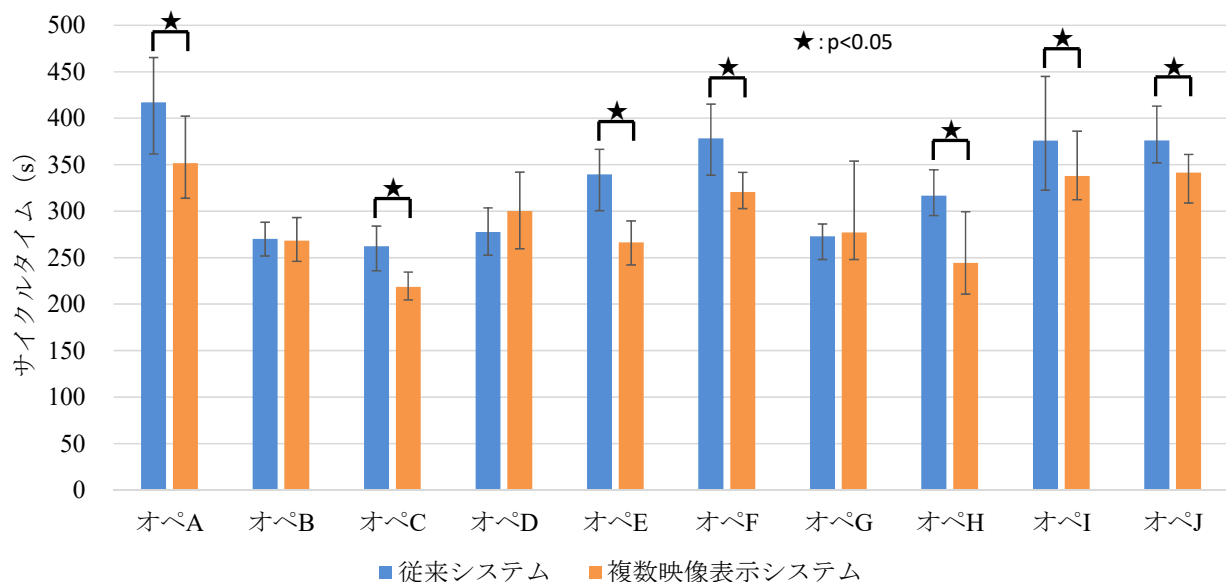


図-5 複数画像表示システム検証実験サイクルタイム

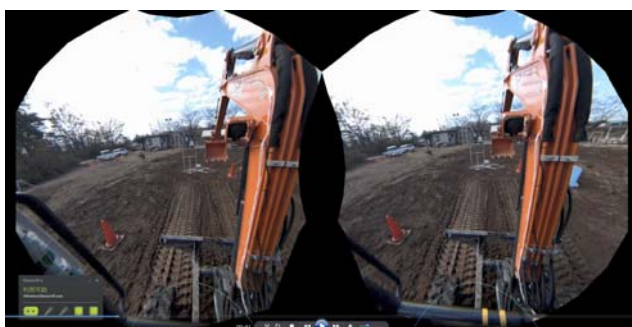


図-7 VRシステム HMD 内部映像

数映像表示システムのサイクルタイムの方が短い、すなわち施工効率が低いことがわかる。このことから、複数映像表示システム用いた場合の施工効率は従来システムと同等以上であるといえる。

また、実験後オペレータの複数映像表示システムを使用した感想を調査した。その結果、操作のやりやすさに関する感想では、10名中2名から「操作しやすい」、1名から「操作しにくい」残り7名は「あまり変わらない」との回答があり、操作のやりやすさに関しては、複

数映像表示システムは従来システムとおおむね同等と考えられる。

一方装着感に関する感想では、10名中6名から「HMDが重い、窮屈、暑い」などの回答があった。HMD本体質量は約500gと軽量ではあるが、オペレータは通常顔面に装置を装着することはほとんどないため、HMDが大きな違和感を引き起こしていると考えられる。この点は今後の課題であると言える。

4. 提案システム2「VRシステム」

(1) VRシステム概略

本章で提案するVRシステムは、建設機械運転席にステレオ魚眼カメラを設置し、その映像を平面処理しHMDの両眼にそれぞれ投影することで、あたかも運転席に座っているような立体視をオペレータに提供するものである⁴⁾(図-6, 7)。この方法の場合、死角はあるが建設機械周辺状況をほぼ把握できるため、外部カメラの省略が可能である。しかし、ステレオ魚

眼カメラを使用しているため建設機械～運転者間の無線通信容量が大きく、さらにその通信を低遅延で行いたいため、本システムでは専用無線（5GHz帯無線）を左右それぞれのカメラに使用している。その結果、通信容量は約1.5Gbps×2台、通信システムのみでの遅延時間は約9msとなった。

(2) 検証実験概要

VRシステムと従来システムとの、施工効率およびオペレータ使用感に関する比較・検証実験を3章と同様にモデルタスク³⁾を用いて行った。参加したオペレータ5名を表-2に示す。

(3) 実験結果

3章と同様に5名それぞれの4回目以降のサイクルタイムの平均値、および有意確率 p が0.05より小さくなったオペレータに★印を追記したものを図-8に示す。

図-8によると、5名中4名のオペレータでは従来システムとVRシステムを用いた場合のサイクルタイム差に有意差があるとはいえないが、残り1名のオペレータにはサイクルタイムに有意差があり、すべてVRシステムのサイクルタイムの方が短い、すなわち施工効率が高いことがわかる。このことから、VRシステムを用いた場合の施工効率は従来システムと同等以上であるといえる。

また、実験後オペレータにVRシステムを使用した感想を調査した。その結果、操作のやりやすさに関する感想では、5名中4名から「操作しやすい」、1名から「操作しにくい（VR酔いをおこした）」との回答があり、操作のやりやすさに関しては、VRシステムは従来システムとおおむね同等と考えられる。しかしVR酔いに関しては今後の課題であると言える。

一方装着感に関する感想では、5名全員から「HMDが重い、窮屈、暑い」などの回答があった。3章と同様にこの点も今後の課題であると言える。

5. まとめ

災害発生地域への迅速な無人化施工の展開を目標として、HMDを活用した無人化施工システムの提案を行った。HMDの有効性を整理したところ、HMDの活用は迅速な無人化施工の展開に効果的であることが確認できた。

また、HMDを活用した具体的なシステムとして、「複数映像表示システム」「VRシステム」の2種類のシステムを提案・開発し、従来システムと比較した施工効率およびオペレータ使用感に関する検証実験を行った。その結果、両システムともに施工効率は従来システムと同等以上、操作のやりやすさも従来システム

表-2 VRシステム検証実験オペレータ

	年齢	経験年数
K	49	0
L	34	10
M	30	15
N	22	1
O	34	10

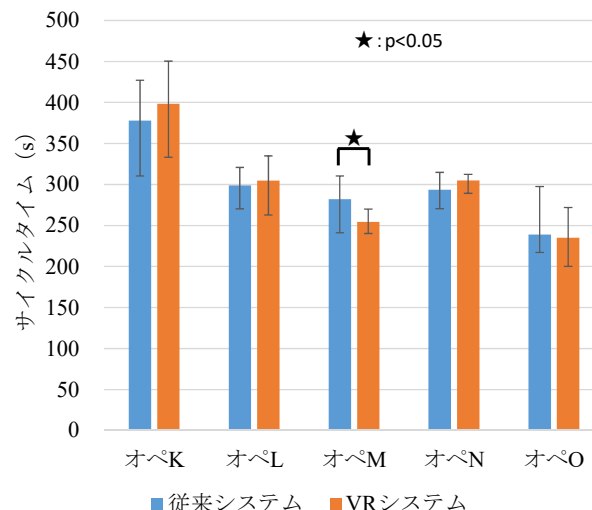


図-8 VRシステム検証実験サイクルタイム

とおおむね同等であることが判明した。一方、「HMDが重い、窮屈、暑い」という装着感や、VRシステムにおけるVR酔いに関しては今後の課題であることも判明した。今後さらなる研究を行っていきたい。

なお、本研究では、複数映像表示システム、VRシステムの比較検証は行っていない。両システムはどちらが優れているといったものではなく、現場の状況に応じて使い分けられるべきと考えている。

また、本VRシステムは大成建設(株)にて開発されたものを使用し、検証実験は大成建設(株)と土木研究所との共同研究にて実施したものである。

参考文献

- 1) 新田恭士：災害復旧に貢献する無人化施工技術，土木技術，Vol. 67, No. 4, pp. 16-23, 2012.
- 2) 山内元貴、橋本毅、藤野健一：HMDを用いた遠隔操作型油圧ショベルの視覚提示システムの開発、ロボティクス・メカトロニクス講演会2018、2A2-A04、2018.
- 3) 茂木正晴、油田信一、藤野健一：油圧ショベルの遠隔操作による作業の効率評価のためのモデルタスクの提案，建設機械施工，Vol. 66, No. 8, pp. 71-79, 2014.
- 4) 加藤崇、木下勇人、西田与志雄、橋本毅、山田充：HMDを用いた臨場型遠隔映像システムの開発その1. 基本性能検証，第74回土木学会年次学術講演会，pp. VI346-VI347, 2019.

自分で地図をデザインできるウェブ地図 「地理院地図Vector（仮称）」の開発

茂木 宏仁¹・渡辺 亮佑¹・本嶋 裕介¹・佐藤 壮紀¹

¹国土地理院 地理空間情報部 情報普及課 （〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番）

国土地理院では、ウェブやスマホアプリ等での利用に適した地図データである「地理院タイル」を提供しており、ウェブ地図「地理院地図」で閲覧することができる。しかし、これまでの地理院タイルは画像データが主であり、コンピュータでの地図の内容（地物の種類や属性情報等）の読み取りや地図デザインの変更はできなかった。そこで、現在、ベクトル形式のタイル（ベクトルタイル）の提供とその閲覧環境の構築を進めている。本稿では、ファイルサイズが小さく、ウェブやスマホアプリ等での利用により適したバイナリ形式のベクトルタイルの試作と、その閲覧サイト「地理院地図Vector（仮称）」の開発の取組について紹介する。

キーワード 地理院タイル，ベクトルタイル，機械判読，地図デザイン

1. はじめに

国土地理院では、以前から、ウェブやスマホアプリ等での利用に適した地図データである「地理院タイル」を提供している。地理院タイルは、国土地理院が運用するウェブ地図「地理院地図」（<https://maps.gsi.go.jp/>）で閲覧することができ、政府標準利用規約（第2.0版）に準拠した国土地理院コンテンツ利用規約（<https://www.gsi.go.jp/kikakuchousei/kikakuchousei40182.html>）に従い誰でも自由に利用できるオープンデータである。地図データを自由に利用できる環境を整備することで、様々な分野における地理空間情報を活用したサービスの創出につながる。

現在、地理院タイルは、主に画像形式のタイル（以下、「画像タイル」という。）で提供されているが、国土地理院では、防災や教育等様々な分野において、ニーズに合わせた地理院タイルのより高度な活用を実現するため、ベクトル形式のタイル（以下、「ベクトルタイル」という。）の提供とその閲覧環境の構築を進めている。ベクトルタイルの提供に向けた取組は、2018年度の国土交通省の注目施策集「国土交通フォーカス2018」¹や生産性向上につながる先進的な取組の施策集「国土交通省生産性革命プロジェクト」²にも選定されている。本稿では、ベクトルタイルに関するこれまでの取組と今後の展望を紹介する。

2. ベクトルタイル導入の背景

地理院タイルは、あらかじめ小区画のタイル状に分割した地図データである。ウェブやスマホアプリ等で地図を表示する際、画面範囲内のタイルのみを読み込めば良いことから、データ通信量を少なくでき、サーバ側にも利用者側にも負荷をかけることなく高速な表示を実現できる。また、地理院タイルで採用しているXYZ方式というタイル方式は、民間のウェブ地図サービスも含め広く一般的に採用されているものであるため、地図を使ったウェブサイトやアプリケーション等を開発する際に、容易に地理院タイルを利用することができる。

これまで、地理院地図から提供している標準地図（電子地形図に類似したデザインの地図）、淡色地図（淡い色の地図）等の主な地理院タイルは、画像タイルであった。しかし、画像タイルは、データの中に画像のピクセルごとの色情報しか有していないため、コンピュータプログラムは、自動的に地図の内容を把握してデータを加工、編集等をする「機械判読」を行うことは困難である（図-1a）。また、地図のデザインに関しては、「等高線のない標準地図が欲しい」「別の情報を重ね合わせても見やすい色合いの地図にしてほしい」等のニーズもあるが、それに応えるためには、個別のニーズごとに画像タイルを作成する必要がある。

一方で、ベクトルタイルとは、ベクトル形式のデータをタイル方式で分割したものである。ベクトル形式のデータには、画像とは異なり、道路、鉄道、建物といった地物の位置とあわせて、その種類や属性情報等が機械判読可能な形で格納されている（図-1b）。そのため、機械的に地図の内容を読み取り、コンピュータ処理による

高度な利用が可能である。具体的には、利用者側で地物の種類に応じて表示/非表示を設定したり、デザインを目的に応じて変更したりすることができる（図-2）。また、地図の凡例を参照することなくワンクリックで地物の属性情報を確認することも可能である。

政府の「オープンデータ基本指針」³⁾においても、機械判読に適した構造及びデータ形式でデータを公開することが原則とされている。このような機械判読に優れたベクトルタイルをオープンデータとして自由に利用できるように環境整備を進めることで、これらのデータをより高度に活用した創意工夫のなされた多様なサービスの創出が期待される。

また、国土地理院はこれまでもベクトル形式の地図データとして「数値地図（国土基本情報）」等を提供しているが、これらを利用するには、GIS ソフトウェアのような専門的なソフトウェアの準備と、GIS に関する一定の専門知識が必要であった。これに対し、ベクトルタイルは、ウェブブラウザで扱いやすいタイル形式で配信しているため、ベクトルタイルを表示する閲覧サイトを開発することにより、インターネット環境さえ整っていれば、一般的に使用されているウェブブラウザのみでGIS ソフトウェアがなくとも誰もが利用できることが大きな利点である。

ベクトルタイルの提供により、今後、国土地理院の地図データ管理の効率化も期待できる。現在検討中のベク

トルタイルの仕様では、ベクトルタイル自体には地図のデザインの情報を含まないこととしている。そして、デザイン設定用のファイルをベクトルタイルとは別に用意することで、地図としての描画を行う。このようにすることで、このデザイン設定用のファイルを差し替えるだけで、1つのベクトルタイルから、複数の地図表現を実現することができる（図-3）。そのため、道路や鉄道の開通等で地図を更新する際には、画像タイルの場合は標準地図や淡色地図等、それぞれのタイルを再作成する必要があったが、ベクトルタイルの場合は、タイルを1種類修正すれば自動的にユーザ側ですべてのデザインの地図が更新されることとなる。また、ユーザが複数のデザインの地図を切り替えて表示する場合においても、ベクトルタイルは同一のものを利用し、デザイン設定用のファイルを変えるだけなので、タイルデータの再読み込みを行う必要がない。このため、サーバからのデータ配信量も減り、通信費やサーバ運用費の削減も期待できる。

3. バイナリベクトルタイルの導入と閲覧サイト「地理院地図Vector（仮称）」の開発

国土地理院では、2014年度から、ベクトルタイルの1つであるGeoJSON形式（<https://tools.ietf.org/html/rfc7946>）のベクトルタイルの提供実験を行ってきた。GeoJSONはシ

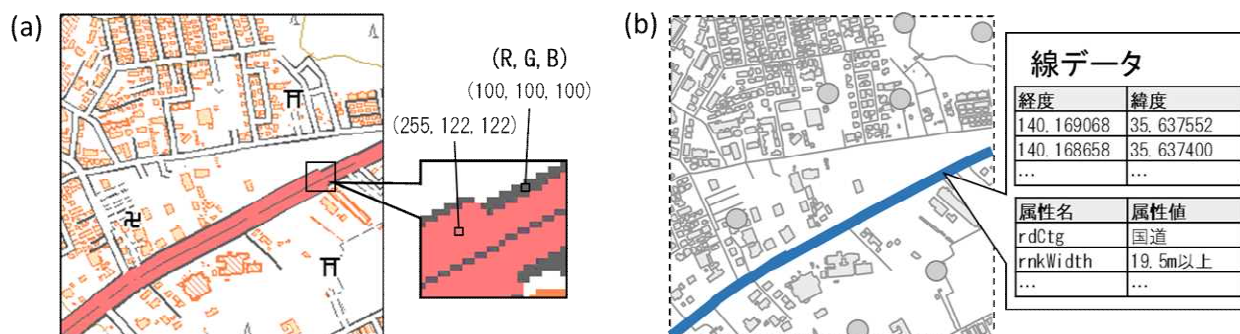


図-1 画像タイル (a) とベクトルタイル (b) のイメージ



図-2 ベクトルタイルを用いて、目的に応じて地図デザインを変更した例

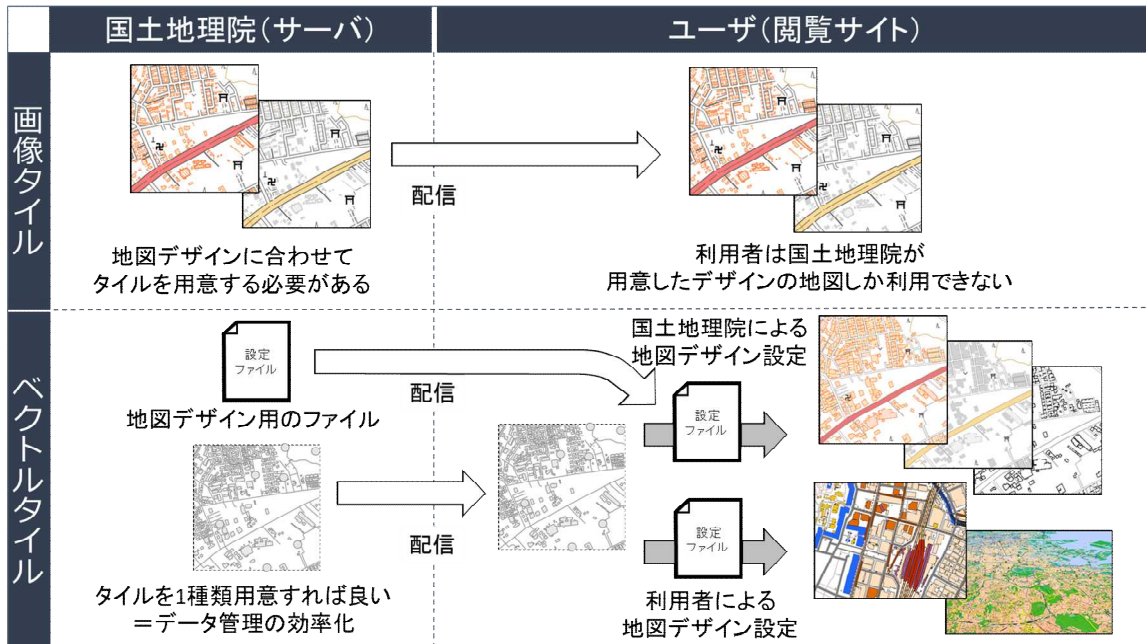


図3 閲覧サイトでの地図表示プロセスにおける画像タイルとベクトルタイルデータの違い

ンプルなテキスト形式で記述されるため扱いやすいデータ形式ではあるが、ファイルサイズが大きいという欠点がある。また、現状では、GeoJSONベクトルタイルを扱うことのできるウェブ地図ライブラリ（ウェブ地図サイトを構成するプログラム群）が、国土地理院の地図データのようなファイルサイズの大きいGeoJSONベクトルタイルを軽快に表示することができないため、国土地理院としては、GeoJSONによるベクトルタイルを提供しても広く活用されないのではないかという懸念があった。

このような状況を踏まえ、国土地理院では、2018年度、新たなベクトルタイルのデータ形式として、バイナリ形式の「Mapbox Vector Tile」（<https://github.com/mapbox/vector-tile-spec>）を導入することを検討し、データの試作を行った。バイナリ化（コンピュータ用に最適化）されているMapbox Vector Tileは、GeoJSONベクトルタイルと比較してひとつひとつのタイルのファイルサイズが小さく、ウェブやスマホアプリ等での利用により適している。

また、地図表示用のオープンソースライブラリであるMapbox GL JS（<https://github.com/mapbox/mapbox-gl-js>）を利用し、Mapbox Vector Tileを地図表示する地図閲覧サイト「地理院地図Vector（仮称）」を開発し、試験公開中（<https://maps.gsi.go.jp/vector/>）である（図-4）。地理院地図Vector（仮称）では、ベクトルタイルの利点を生かし、サイトの利用者が目的に応じて地図をデザインすることができるようになっている。例えば、図-2で示したような白地図や、写真に地名等のみを重ねた地図を簡単に作成できることから、特に学校の授業や夏休みの自由研究等の教育分野や、地域の地形を知る等の防災分野での活

用が期待される。現在の試験公開の範囲は関東の約3万km²（20万分1地勢図「宇都宮」「水戸」「甲府」「東京」「千葉」の範囲。縮尺によっては、その周辺も提供。）であるが、今後、全国に順次範囲の拡大を予定している。

Mapbox GL JSは活発に開発が進められており、Mapbox Vector Tileの利用環境も整っている。Mapbox Vector TileとMapbox GL JSは、イギリス陸地測量部（日本の国土地理院に相当する機関）のウェブ地図サービス（<https://www.ordnancesurvey.co.uk/business-government/products/open-zoomstack>）にも採用される等、ベクトルタイル及びその閲覧サイトの世界的なデファクトスタンダードになりつつある。また、Mapbox Vector Tileはオープンなデータ形式であるため、Mapbox Vector Tileは様々なウェブサイトやアプリケーション等で利用することができる。今後、Mapbox Vector Tile形式の地理院タイルが、地理院地図Vector（仮称）のみならず、様々な分野のウェブサイトやアプリケーション等において、ニーズに応じた利用が広がることが期待される。

4. 課題と今後の対応

現状の課題として、閲覧サイト「地理院地図Vector（仮称）」で現行の地理院地図の「標準地図」のような複雑なデザインでベクトルタイルを地図表示しようとすると、デザインが複雑であるため、サイト起動時の地図

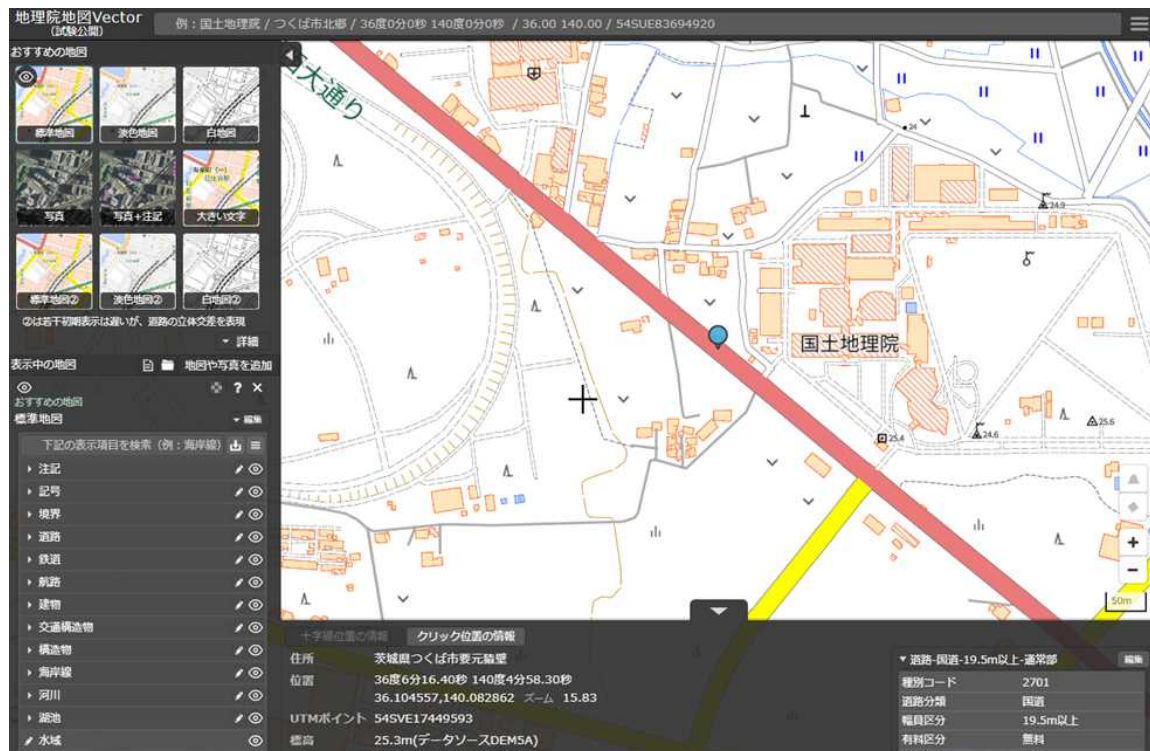


図4 Mapbox GLJS ベースの閲覧サイト「地理院地図 Vector（仮称）」の表示イメージ

描画が遅いという点が挙げられる。画像タイルの場合は、あらかじめデザインを適用したものを画像タイルとして提供しており、データ利用者側のパソコンやスマートフォン、タブレットでは描画処理を行わないため、デザインが複雑であっても利用者側で負担を感じることがなかったが、一方でベクトルタイルでは、データ利用者側の端末で描画処理を行うため、地図のデザインが複雑であるほどその処理に時間がかかることとなり、データ利用者は快適に地図を閲覧することができない。

また、地図上の文字の描画に利用される日本語用フォントファイルのファイルサイズが大きく、それも閲覧サイト起動時の描画遅延の一因となっている。既に利用者のコンピュータに搭載されているフォントを利用して文字を描画すれば、データ転送量が削減でき、起動が若干速くなるが、現状では字体の崩れが発生してしまうという問題がある。

これまで「地理院地図 Vector（仮称）」を使っていた利用者からは、高評価の意見も多く伺っている一方で、「デザイン設定が複雑なため利用者が表現を変更するには根気が必要」「サイトが多機能すぎて使いこなせない」という感想も頂いている。ベクトルタイルをより活用いただくためにも、更なるサイトの操作性の向上

が必要である。

今後、これら課題の解決方法を検討し、2019年度中の全国のベクトルタイル提供に向けてベクトルタイルのデータ及び閲覧サイトの改良を行っていく予定である。より使いやすい形でベクトルタイルを提供するとともに、これらの取組を周知していくことにより、様々な分野において、ベクトルタイルをより高度に活用した、創意工夫のなされた多様なサービスの創出を目指していく。

参考文献

- 1) 国土交通省：国土交通フォーカス 2018，2018（https://www.mlit.go.jp/report/press/sogo08_hh_000132.html，2019年9月7日閲覧）。
- 2) 国土交通省：国土交通省生産性革命プロジェクト [第4版]，2018（<https://www.mlit.go.jp/common/001245545.pdf>，2019年9月7日閲覧）。
- 3) 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民データ活用推進戦略会議：オープンデータ基本指針，2017（<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20170530/kihonsisin.pdf>，2019年9月7日閲覧）。

下水道施設における 送風機の気象データ補正制御の導入と運用

亀村 裕之¹・浅木 麻衣子²

¹横浜市 環境創造局 栄水再生センター（〒247-0007 横浜市栄区小菅ケ谷2-5-1 栄第一水再生センター）

²横浜市 環境創造局 環境科学研究所（〒221-0024 横浜市神奈川区恵比須町1
澁澤ABCビルディング1号館5階）

下水処理では、好気性微生物により汚れを除去するため、多量の空気を必要としている。この空気は送風機により供給されている。送風機の特性として、外気温など気象状況が変化すると、吐出風量が増減することが分かっていたが、自動での制御対象とされてこなかった。横浜市栄第一水再生センターでは、気象状況を元に、吸込空気の温度により送風機の能力が変化することを考慮した制御を行うことにより、送風機の運転の安定化と省エネにつながる可能性に着目し、送風機の制御数値を随時変更できる「気象データ補正制御」を導入した。本報告では、導入の経緯と、省エネの検証などの途中経過について報告する。

キーワード 下水処理、送風機、気象データ、省エネ、自動制御

1. 序論

(1) 水再生センターが取り組む温室効果ガスの削減

横浜市には、水再生センターが11箇所あり、ポンプ場が26箇所、汚泥を集約処理する汚泥資源化センターが2箇所ある。2017年度の実績では、全水再生センターで約1,497,700 m³/日の汚水を標準活性汚泥法により処理している。

近年、世界中で地球温暖化対策の加速が求められている。横浜市は下水道事業において「2030年度までに2013年度比で26%以上の温室効果ガス削減」という目標を掲げている。それを受けて水再生センターでは従来の省エネ化の推進とともに、「5大プロジェクト」と呼ばれる取り組みを行い、さらなる温室効果ガスの削減にチャレンジしている。以下に概要を記載する。

なお、「5大プロジェクト」以外にも各センターが独自の省エネ化に取り組んでいる。

(a) 照明器具のLED化

1日の間で使用時間が長い照明にLED型照明器具を導入し、2020年度までに高効率型と合わせて導入率100%を実現する。

(b) デマンドレスポンスの推進

契約した電力会社から電力使用量を抑制するよう依頼されたとき、我々利用者が指定された使用量に調整する取り組みをデマンドレスポンスと言う。デマンドレスポンスを導入する水再生センターを順次拡大させ、今後も継続していく。

(c) 気象データを活用した送風機の制御の検証

水再生センターの中で最も多くの電力を消費するのは反応タンクの送風機である。気象データを活用した自動制御により、電力使用量を削減する取り組みの検証を行っている。詳細を次章以降で報告する。

(d) アンモニア計を活用した反応タンク制御の検証

アンモニア性窒素の流入負荷変動を管理し、電力の削減を促進すると共に処理水質の向上を図る。

(e) 処理水質に加え省エネルギーにも着目した新たな水処理方法の導入の検証

処理水質と電力使用量の関係を調査し、処理水質の排出基準を上限値として電力使用量の削減と安定した運転管理を検証する。

(2) 送風機の効率的な運用

栄第一水再生センターは栄区小菅ケ谷二丁目にある下水処理場である。栄区の大部分と隣接する戸塚区の一部及び港南区の一部が処理区域であり約39,700 m³/日の汚水を処理する市内では比較的小規模な分流式の水再生センターである。下水処理後の再生水は境川水系の2級河川である「いたち川」へ放流され、水環境の保全及び創造に大きく寄与している。図-1に栄第一水再生センターの位置を示す。

当センターではセンター全体の電力使用量の内訳のうち最大の約4割が送風機設備によるものとなっている。この使用量から温室効果ガスである二酸化炭素の排出量に換算すると年間で約1,246 tになる。省エネや地球温暖化対策の観点から、水再生センターには送風機の効率的な運用が求められている。



一般的に多くの送風機は、季節の移り変わりの様な気候の変化によって送風機の運転性能が変化していることがわかっていました。我々は今回、その経験を踏まえ、送風機の台数制御の効率化を目指し「気象データ補正制御」を提案した。

このような制御を実際に運用することは、横浜市独自の取組みで全国初である。今回はそれら制御の概要と、導入後からこれまでの検証結果を報告する。

2. 従来の制御

多くの水再生センターでは送風機を台数制御と呼ばれる自動制御により運用している。水処理系からの要求風

量を賄えるように、多数の送風機の追加起動や停止を行っていくものである。要求風量が運転中の送風機の「上限風量」を超える場合は、運転台数を増加させる。逆に要求風量が「下限風量」を下回る場合は、運転台数を減少させる。この「上限風量」及び「下限風量」は、台数制御に大きく関わっている。

なお、送風機と水処理系をつなぐ送気管の内部圧力は一定となるようにしており、各送風機1台でどれだけの風量を吸込めているかは風量計により計測する。風量計では温度・圧力補正が行われ、その時々の大気状態によらない体積量を示す。吸込風量の調節はインレットベーンの開閉によって行われる。表-1に当センターの送風機の仕様を、図-2に外観の写真を示す。

送風機の吸込み風量は、同じインレットベーンの開度でも季節によって変化している。傾向としては夏の様な

大気温度が高い時期には風量が小さくなり、冬には逆に風量が大きくなっていた。当センターでは、この変化をベテラン職員が見極めて、「上限風量」や「下限風量」の設定値を変更していた。

表-1 送風機の仕様

	1・2号送風機	3・4号送風機
形式	歯車増速式単段ターボ	
風量制御	インレットバーン	
定格風量	140 [m ³ /min]	70 [m ³ /min]
電動機	190 [kW]	110 [kW]
制御圧力	57 [kPa]	



図-2 送風機の外観

3. 気象データ補正制御

(1) 気象データ補正制御の概要

当然であるが、大気温度は季節の移り変わりの他、一日の間でも変動している。我々はこの点に着目し、風量の設定値を気象状況によって自動的に変動させ、効率的な運用が可能となる「気象データ補正制御」を立案した。従来の制御と気象データ補正制御の簡略化した概要を図-3に示す。

当センターでは、大風量の送風機1台のみが運転しているのが基本で、要求に応じて小風量の送風機1台が追加起動や停止を繰り返している。この2台が同時に運転している時間をできるだけ少なくすることで、省エネが達成できる。

(2) 吸込空気温度と風量の関係

我々はまず、吸込空気温度のみに着目し「吸込温度－最大吸込風量」及び「吸込温度－最小吸込風量」の関係を確認した。

確認するにあたり、実際の送風機の運転データを使用した。ここで対象とした運転データとは、運転中の送風機のインレットバーンの最大開度及び最小開度での吸込空気温度及び吸込風量である。

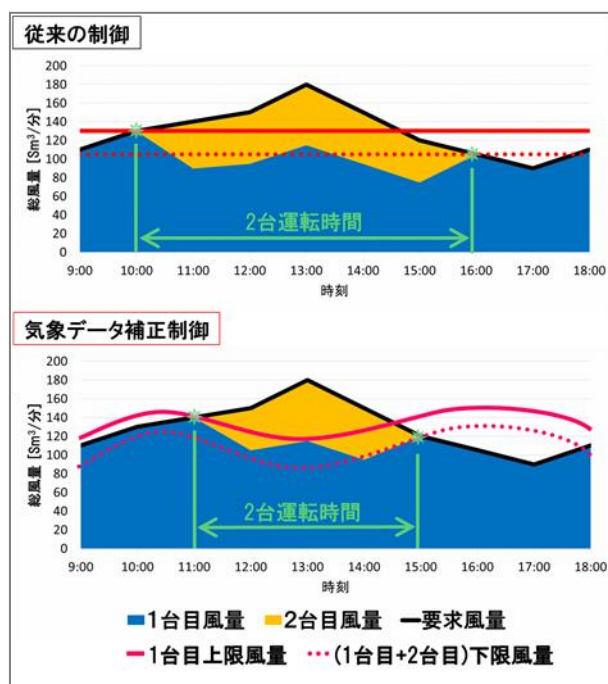


図-3 従来の制御と気象データ補正制御の概要

運転データに加え、気象データの計測作業は、温度だけでなく湿度も含めて現在も続けており、これまでで1年間を超すデータを蓄積できた。

なお、この調査では事前に共同研究として横浜市環境科学研究所にて吸込空気温度を測るセンター既存の温度計の信頼性を検証している。さらに、計測後に「吸込空気温度と吸込風量の関係」を確認するため、膨大な温度等の観測データと運転データの解析も実施した。

代表的な結果として最大吸込風量の結果を1号送風機を図-4に、2号送風機を図-5に示す。

図-4と図-5を比べると、1号送風機は2号送風機に比べ、全ての温度において、約5 Sm³/min程度、風量が出にくいことがわかる。このように同じ仕様でも実際は号機ごとに差異がある。他の号機でも同様であった。

また、図-5によると、2号送風機は大気温度が約30℃では約120 Sm³/minであるが、約5℃になると約140 Sm³/minまで風量が大きくなる。他の号機でも大気温度が高くなると吸込風量が小さくなる同様の関係となった。

(3) 気象データ補正制御の導入

2018年7月に送風機の自動制御にかかわるソフトウェアの改良を済ませ、この「吸込空気温度と吸込風量の関係」に基づいた気象データ補正制御を導入した。導入後も既存の制御と切替え可能な状態にして、気象データ補正制御の実運用を始めた。

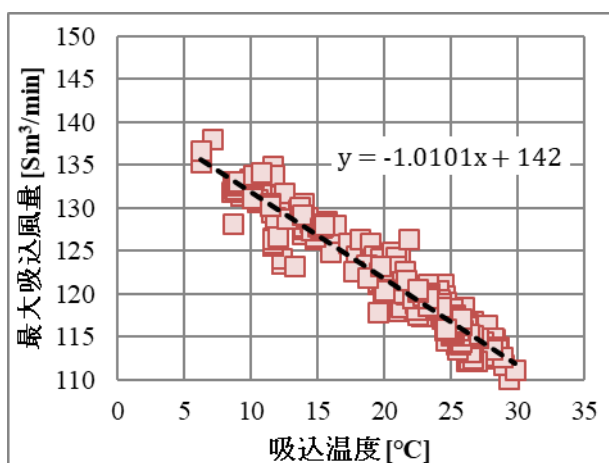


図4 1号送風機の大気温度と最大吸込風量との関係

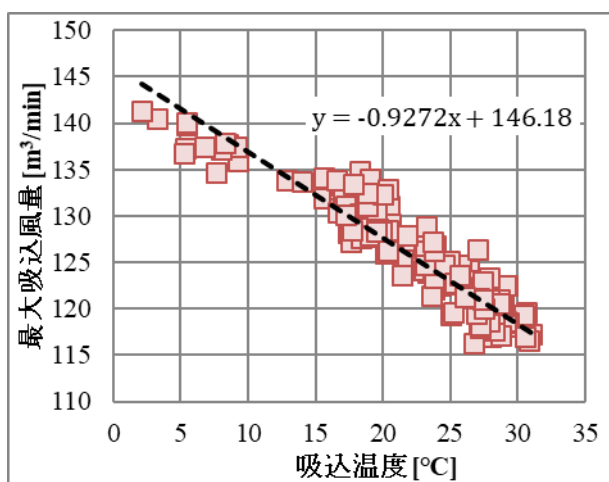


図5 2号送風機の大気温度と最大吸込風量との関係

4. 気象データ補正制御の運用経過

(1) 運用中の成果

導入から約3箇月間、問題なく運用できた。ベテラン職員による設定値の変更の手間がなくなり、省人化が可能となった。

導入後の運転記録から検証した8月から10月までの省エネ効果の結果を表-2に示す。表-2により、気象データ補正制御の導入によって約4%～約29%程度の省エネの効果が出ていることが確認できる。特に、平均気温の比較からもわかるように、風量の出にくい猛暑にもかかわらず、電力量が減っていることは大きな成果である。

(2) 小風量運転での課題

2018年12月に反応タンクの運用状況を変えた影響で、要求風量が導入当初に比べて大幅に少なくなり、大風量の送風機が停止し、小風量の1台だけで要求を満たす時間が発生した。これは導入当初の想定を外れた運転状態であり、大風量と小風量の送風機が互いに停止と起動を繰り返し、安定的な送風機の運用が出来なくなった。すぐに気象データ補正制御を中止し、既存の制御に切替え、下水処理を継続した。

今後、小風量の送風機1台だけの運転にも対応できるように制御を見直し、冬季（12月～2月）での省エネ効果を確認する。

5. 結論

現時点では、大気温度のみを入力値として扱う「気象データ補正制御」となっている。しかし、湿度や気圧も風量に影響を与える因子であり、今後は湿度と気圧がそれぞれどのように送風機の運転性能に影響するのか検証を行う。

気象データ補正制御は、ソフトウェアの改良のみで効果を発揮する省エネ化の手法である。横浜市では他の水再生センターへ導入を拡大する予定である。

横浜市の水再生センターは「気象データ補正制御」を含め「5大プロジェクト」に取り組むことで、電力消費によって発生する二酸化炭素の削減に寄与し、地球温暖化防止の一助となるように、今後とも努力していく。

表-2 2号送風機の大気温度と最大吸込風量との関係

	2018年8月	2017年8月	2018年9月	2017年9月	2018年10月	2017年10月
平均気温 [°C]	27.0	25.7	22.2	22.4	18.7	16.5
反応タンク風量 [Sm³]	4,304,550	4,162,800	4,358,050	4,737,200	4,295,700	4,306,050
送風機電力量 [kWh]	126,820	127,550	125,120	138,690	119,050	124,890
送風機が1 [Sm³] 作り出すのに必要な電力量 [kWh/Sm³]	0.02946	0.03064	0.02871	0.02928	0.02771	0.02900
上記の2017年同月比 [kWh/Sm³]	-0.0012	(-3.85%)	-0.0006	(-1.94%)	-0.0013	(-4.45%)