

生物共生型防波堤における サンゴ生育環境の改良と費用対効果

棚谷 灯子¹・金城 信之²・岡田 亘³・安田 将人⁴・桑江 朝比呂¹

¹港湾空港技術研究所 沿岸環境研究グループ (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

² (元) 沖縄総合事務局 那覇港湾・空港整備事務所 (〒900-0001 沖縄県那覇市港町2-6-11),

(現) いであ株式会社 沖縄支社 (〒900-0003 沖縄県那覇市安謝2-6-19)

³ (元) 株式会社エコー 沖縄環境部 (〒902-0068 沖縄県那覇市真嘉比3-2-18),

(現) 一般財団法人沖縄県環境科学センター 環境科学部 (〒901-2111 沖縄県経塚720)

⁴株式会社エコー 構造系事業部 (〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

従来型の社会基盤であるグレーインフラにグリーンインフラを組み合わせたハイブリッド型インフラ (IGGI) は、観光や漁業、生物生息場の創出などの機能が向上し、インフラの費用対効果が高まると期待される。しかし、IGGIの費用対効果や、費用対効果の高い手法は明らかでない。本研究は沖縄県那覇港のサンゴの着生に配慮した生物共生型防波堤をモデルとして、IGGIの費用対効果を試算し、費用対効果の高い手法を検討した。生物共生型防波堤では通常の防波堤よりも費用対サンゴ着生効果が約10%増加した。特に浅場創出と表面加工を組み合わせた人工タイドプールは、サンゴ生息場創出手法として費用対効果が高いことが示された。

キーワード グリーンインフラ、生物共生型防波堤、人工タイドプール、サンゴ生息場の創出

1. はじめに

グリーンインフラは、防災減災のみならず水質改善や水産・観光資源、炭素貯留といった多様な機能が相乗する便益 (コベネフィット) を提供できる¹⁾。既存のグレーインフラとグリーンインフラを組み合わせたハイブリッド型インフラ (Integrated green-grey infrastructure, IGGI) は、両者の特性を活かし、信頼性の高い防災減災機能を発揮しつつグレーインフラ単体では実現できないコベネフィットを提供しうるが、その効果に関する実証的な研究はほとんどない²⁾。生物共生型防波堤は、港内静穏度の確保など港湾構造物の基本的な機能を有しながら、干潟や磯場などの生物生息場の機能を併せ持つ港湾構造物であり、グレーインフラとグリーンインフラを組み合わせたハイブリッド型インフラと捉えられる。平成30年の港湾の施設の技術上の基準 (技術基準) の改正により、防波堤、護岸、岸壁及び棧橋の省令・告示に「環境の保全を図ること」が追加され、生物共生型港湾構造物の重要性が増している³⁾。IGGIは防災減災機能と経済性がグレーインフラとグリーンインフラの中間に位置し、食糧生産、生物多様性などの二次的な効果が付加されるため、イン

フラの費用対効果が高まることが期待されるが⁴⁾、その費用対効果についての定量的な研究は限られている^{5) 6)}。

沖縄県那覇港にはサンゴの着生に配慮した生物共生型防波堤が設置されている。サンゴは熱帯・亜熱帯の海洋生態系の基盤生物であり、サンゴの着生によって観光や漁業などの地域振興、生物生息場の創出などの機能が向上することが期待できる。

本研究では、那覇港の生物共生型防波堤をモデルとして、IGGIの費用対効果 (サンゴの被覆面積÷建設コスト) を試算した。さらに、複数の防波堤の費用対効果を比較し、防波堤の生物生息機能を向上させるための費用対効果の高い手法を検討した。本文及び図表はTanaya et al., 2021⁷⁾に基づく。

2. 方法

(1) 調査地域

調査地域は沖縄本島南部の西海岸に位置する那覇港 (沖縄県那覇市・浦添市) である (図-1)。那覇港の浦添第一防波堤の東端の延長120m区間にサンゴの生育に配慮した生物共生型防波堤 (Pro-environment

breakwater) が整備されている。

(2) 生物共生型防波堤の構造

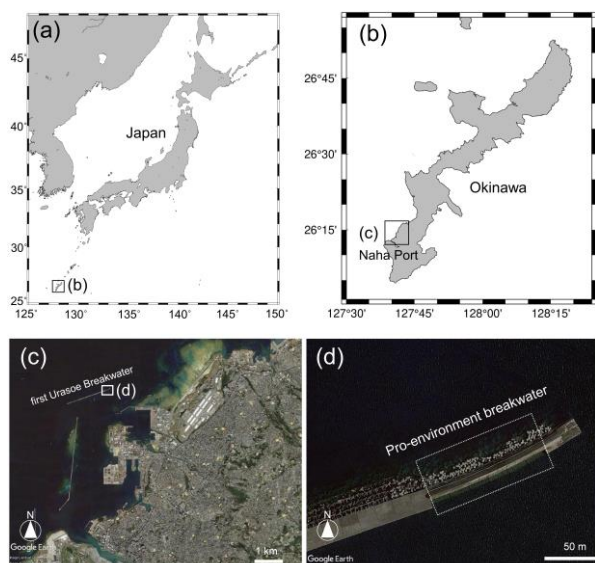


図-1 調査地域

(a,b) 那覇港, (c) 浦添第一防波堤, (d) 浦添第一防波堤の生物共生型防波堤の整備区間の位置を示す。

図-2に通常の防波堤（上部斜面堤）と生物共生型防波堤のアイソメトリック図を示す。通常の防波堤に対して、生物共生型防波堤では（1）人工タイドプール（Artificial tide pool (ATP) ）、（2）マウンド（石を積み上げて作る防波堤の土台）の嵩上げ、（3）通水型ケーソン、（4）消波ブロック、ケーソン、被覆ブロック、根固めブロック表面の凹凸加工が施されている。

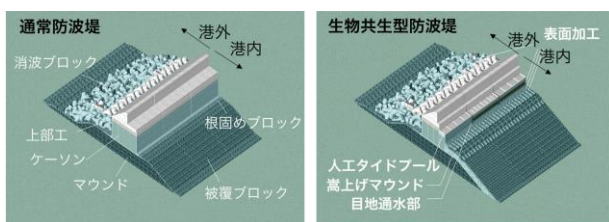


図-2 通常防波堤と生物共生型防波堤のアイソメトリック図
延長方向長さ20mのケーソン3函分, LWL+12.30~21.80mの区間を示す。立体の高さ、幅及び奥行きが同じ寸法で描かれた等角投影図になっている。

人工タイドプールは、サンゴ等の生息に適した浅場を広く確保し、サンゴの加入生育を促進する効果を期待してケーソンの港内側の小段に設けられた柵状の構造物である（図-3）。平時は水没しているが、低潮位時には縁が干出し、タイドプール（潮溜まり）となる（図-3 (a)）。ATPは、サンゴが多く着生するタカセガイ養殖礁⁹を模した構造物である。ATPの縁の上面の高さ（ATPの天端高）は朔望平均干潮面（Low Water Level

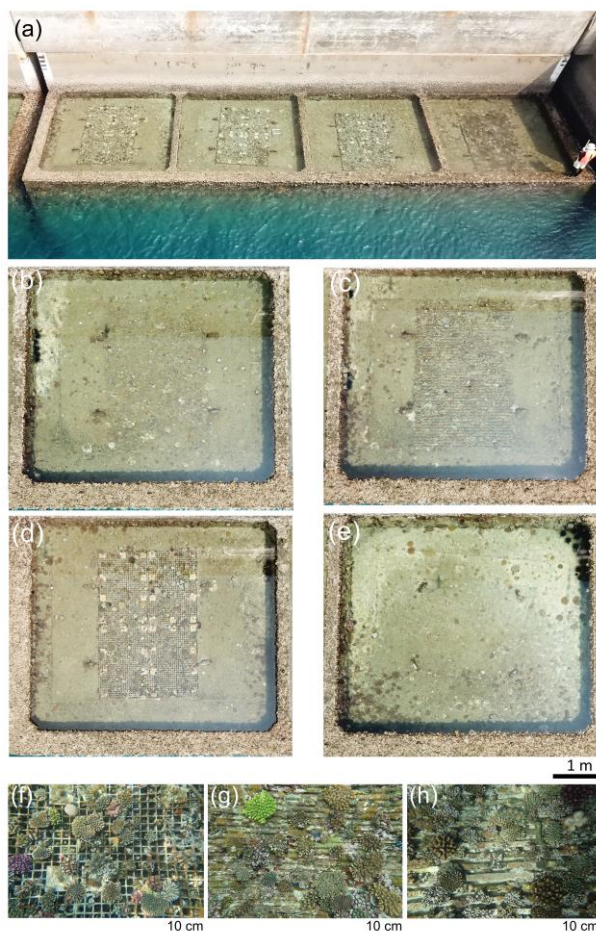


図-3 人工タイドプール (ATP) の写真

(a) ATPの天端高LWL+1.0mのFRPグレーチング加工区。干潮時にはATPの縁が干出してタイドプールとなる。(b) ~ (e) ATP底面の写真。それぞれ (b) 10mm凹凸加工区, (c) 30mm凹凸加工区, (d) FRPグレーチング加工区, (e) 無加工区を示す。(f) ~ (h) ATP底面の加工の拡大写真。それぞれ (f) FRPグレーチング, (g) 10mm凹凸加工, (h) 30mm凹凸加工を示す。

(LWL)) を基準として, LWL+1.0m またはLWL+0.7m で, 大潮の干潮時に数時間潮溜まりとなるように設計されている。柵の底面中央部の蓋コンクリートの上面には加工が施されており, (1) 幅10mmもしくは30mmの凹凸加工を施したもの（図-3 (b), (c), (g), (h)), (2) FRP (Fiber Reinforced Plastic, 繊維強化プラスチック) 製の格子サイズ40mmのグレーチング（格子状の構造物）（図-3 (d), (f) ）が設置されているもの, (3) 無加工のもの（図-3 (e) ）の3種類がある。

嵩上げマウンドは、サンゴの生息に適した浅場の面積を拡大することを目的として、防波堤港内側のマウンドを嵩上げたものである。浦添第一防波堤では通常の防波堤の港内側のマウンドの天端高がLWL-11.62mであるが、生物共生型防波堤ではマウンドを5~7m程度嵩上げし、マウンドの天端高がLWL-7mもしくはLWL-5mとなっている。

通水型ケーソンは、港内の海水交換の促進に配慮し、隣り合うケーソンの隙間（目地）の切り欠き幅を広げたケーソンである。ケーソンとケーソンの間の隙間（目地）は通常10 cm程度であるが、通水型ケーソンでは、目地部の切り欠き幅が1 m前後まで広がっており、目地部の流れによってサンゴの着生が促進される⁹⁾。

さらに生物共生型防波堤の消波ブロック、ケーソン、被覆ブロック、根固方塊の表面の一部には10 mmもしくは30 mm 幅の凹凸加工が施されている。

(3) 防波堤の費用対サンゴ着生効果の試算

a) 試算対象とした防波堤断面とサンゴ面積の試算範囲

浦添第一防波堤におけるサンゴ分布調査結果に基づき、生物共生型断面（Pro-environment breakwater (PB)）とその比較対象区間として通常断面（Control）の延長1 mあたりのサンゴ着生面積を試算した。ATPの設置水深が浅い生物共生型断面をPB_{shallow}、ATPの設置水深が深い生物共生型断面をPB_{deep}とする。Control, PB_{shallow}, PB_{deep}の断面図とサンゴ面積の試算対象とした防波堤上の範囲を図-4に示す。試算の対象とした高さの範囲は、一般にサンゴの生息可能高さの上端である大潮の平均的な干潮面にほぼ等しいLWL 0 mとし、下端は防波堤表面の下端であるLWL -20 mとした。PB_{shallow}, PB_{deep}ではこれらの範囲に加えて、ATPの底面、側面、上面も試算対象に含めた。以下に防波堤の各部位のサンゴ面積試算方法の詳細を示す。

b) ATPのサンゴ面積の試算方法

底面の中央部にFRPグレーチング加工を施したATPをサンゴ面積の試算対象とした。ATPの壁面（底面、側面、上面）に分布するサンゴの面積を合計し、ATPの各柵のサンゴ面積を求めた。ケーソン1函あたり4柵のATPのサンゴ面積の合計値をケーソン1函の長さ20 mで除して延長1 mあたりのサンゴ面積を求めた。

c) 港内側直立壁面、ケーソン本体、根固方塊、被覆ブロックのサンゴ面積の試算方法

浦添第一防波堤の直立壁面における水深とサンゴ被度の関係に基づいてサンゴ面積を推定した。通常断面については、通常断面の無加工の直立壁面の各水深のサンゴ被度の平均値を用いて水深区間1 mごとのサンゴ面積を求めた。生物共生型断面においては、生物共生型断面の各水深のサンゴ被度の平均値を用いて水深区間1 mごとのサンゴ面積を求めた。凹凸加工区においては、各水深帯の10 mm凹凸加工区のサンゴ被度の平均値を用いた。根固方塊、被覆ブロックのサンゴ被度は、通常断面の無加工の直立壁面のサンゴ被度の平均値と同じとして試算した。通常断面、生物共生断面ともにLWL -7 mより深い直立壁面、ケーソン本体、根固方塊、被覆ブロックのサンゴ被度は、LWL -7 mの無加工の直立壁面のサンゴ被度の平均値と同じとして試算した。直立壁面、被覆ブロック、根固方塊の表面積は断面図の勾配と延長方向、直交方向の長さから防波堤の上面面積として求めた。

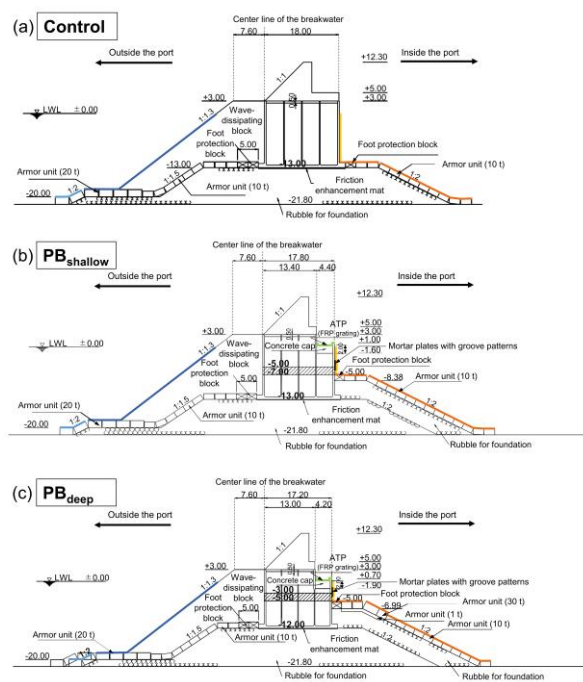


図-4 通常防波堤（Control）と生物共生型防波堤（PB_{shallow}, PB_{deep}）の断面図とサンゴ面積の試算対象範囲

寸法と水深の単位は m、カッコ内の数値は重量（トン）を表す。PB_{shallow}はPB_{deep}よりもATPの設置水深が浅い。PB_{shallow}は、ATPの天端高がLWL +1.0m、嵩上げマウンドの天端高がLWL -7m、直立部の凹凸加工パネルの設置水深はLWL -3.5～-6.0 mである。PB_{deep}は、ATPの天端高がLWL +0.7 m、嵩上げマウンドの天端高がLWL -5m、直立部の凹凸加工パネルの設置水深はLWL -1.6～-3.9 mである。色のついた線はサンゴ面積の算出対象とした防波堤表面を表す。青色は消波ブロック、水色は港外側の被覆ブロック、オレンジ色は港内側の被覆ブロック等（被覆ブロック、根固方塊、直立壁面以外のケーソン本体）、黄色はケーソンの直立壁面、黄緑色はATPの対象範囲をそれぞれ表す。

d) 港外側消波ブロック・被覆ブロックのサンゴ面積の試算方法

浦添第一防波堤港外側の消波ブロックの水深とサンゴ被度の関係を用いて、各水深のサンゴ被度の平均値から水深区間1 mごとのサンゴ面積を求めた。

通常断面については、消波ブロックは全て無加工とし、無加工の消波ブロックのLWL-1～-12 mの水深とサンゴ被度の関係を用いてサンゴ面積を試算した。サンゴ被度のデータが無い水深においては、対象水深の上下の水深の平均値を内挿して求めた。LWL0～-1 mのサンゴ被度は、LWL-1 mのサンゴ被度の平均値を用いた。LWL-12 mより深くに位置する消波ブロックおよび被覆ブロックのサンゴ被度は、LWL -12 mの消波ブロックのサンゴ被度と同じ値を用いて試算した。

生物共生型断面ではLWL0～12 mの表層第1層に凹凸加工消波ブロックが分布するものとして試算した。LWL0～12 mの凹凸加工消波ブロックのサンゴ面積(A)は、通常断面の無加工の消波ブロックの水深とサンゴ被度の関係をベースに、加工区による被度の上昇分を上積みしてサンゴ面積を求めた。

$$A_{coral} = A_{block\ processed} \times \%C_{processed} + (A_{block\ total} - A_{block\ processed}) \times \%C_{unprocessed} \quad (1)$$

A_{coral} は水深区間1 m、延長1 mあたりの凹凸加工ブロックのサンゴ面積、 $A_{block\ processed}$ は水深区間1 m、延長1mあたりの消波ブロックの加工区の面積、 $\%C_{processed}$ は生物共生型防波堤の消波ブロック加工区の各水深のサンゴ被度の平均値、 $A_{block\ total}$ は水深区間1 m、延長1mあたりの消波ブロックの表面積、 $\%C_{unprocessed}$ は通常断面の無加工消波ブロックの各水深のサンゴ被度の平均値である。 $A_{block\ total}$ は、断面図の勾配と延長方向、直交方向の長さから求めた上面面積に、消波ブロックの凹凸を考慮するため、天然のサンゴ礁地形の地盤の凹凸度（インド太平洋地域のサンゴ礁の平均値 1.40^{10} ）をかけて求めた。 $A_{block\ processed}$ は、簡易的な防波堤断面模型を用いたブロック模型の据付により延長1m水深区間1mあたり表面に露出するブロック個数（0.0729個）を求め、消波ブロック1個あたりの加工区面積（1.256 m²）を掛け合わせて求めた。 $\%C_{processed}$ は、 $\%C_{unprocessed}$ にLWL0～6 mに存在する10 mm凹凸加工消波ブロックの無加工区のサンゴ被度の平均値に対するの加工区のサンゴ被度の平均値の比（2.40）を掛け合わせて求めた。

e) コスト、費用対効果の算出

3つの防波堤断面Control、PB_{shallow}、PB_{deep}について、防波堤の延長方向1 mあたりの概算工事費を試算した。概算工事費は防波堤の主要な工種ごとに必要な石材やブロックなどのコストと、それらの製作、積み込み、据付など一連の工事にかかる費用を算出・計上した。生物共生型断面PB_{shallow}、PB_{deep}では凹凸加工などの生物共生部材の費用も計上した。概算工事費を防波堤の造成にかかるコストとし、延長方向1 mあたりに着生するサンゴ面積を延長方向1 mあたりのコストで割って各断面の費用対効果を求めた。基礎捨石は2019年度単価を用いた。

3. 結果

表-1に通常防波堤と生物共生型防波堤の延長1 mあたりの表面積、サンゴ総被度、サンゴ面積、整備費用、費用対サンゴ着生効果（サンゴ面積/整備費用）の試算結果を示す。防波堤の延長1 mあたりのサンゴ面積は、

PB_{shallow}、PB_{deep}ではControlと比べてそれぞれ1.14、1.22倍増加した。これはPB_{shallow}とPB_{deep}がControlと比較して、防波堤の表面積がそれぞれ1.11、1.13倍、防波堤全体のサンゴ総被度がそれぞれ1.02倍、1.08倍となったことによるものである。

防波堤の整備費用は、Controlと比較してPB_{shallow}、PB_{deep}はそれぞれ1.09倍、1.10倍となった。

防波堤の費用対サンゴ着生効果（サンゴ面積/整備費用）は、Controlと比較してPB_{shallow}、PB_{deep}はそれぞれ1.04倍、1.11倍となり、PB_{deep}の費用対サンゴ着生効果が最も高くなった。

表-1 通常防波堤と生物共生型防波堤の延長1 mあたりの表面積、サンゴ総被度、サンゴ面積、整備費用、費用対サンゴ着生効果（サンゴ面積/整備費用）。カッコ内の数値は通常防波堤（Control）に対する比率（/Control）を表す。

防波堤の種類 ^a	表面積 (m ²)	サンゴ総被度 (%)	サンゴ面積 (m ²)	整備費用 (千円)	費用対サンゴ着生効果 (m ² /千円)
Control	93.68 (1.00)	10.83 (1.00)	10.15 (1.00)	25,406 (1.00)	4.00 (1.00)
PB _{shallow}	104.05 (1.11)	11.08 (1.02)	11.53 (1.14)	27,632 (1.09)	4.17 (1.04)
PB _{deep}	106.30 (1.13)	11.67 (1.08)	12.41 (1.22)	28,016 (1.10)	4.43 (1.11)

^a Control, 通常防波堤; PB_{shallow}, ATP 設置水深が浅い生物共生型防波堤; PB_{deep}, ATP 設置水深が深い生物共生型防波堤

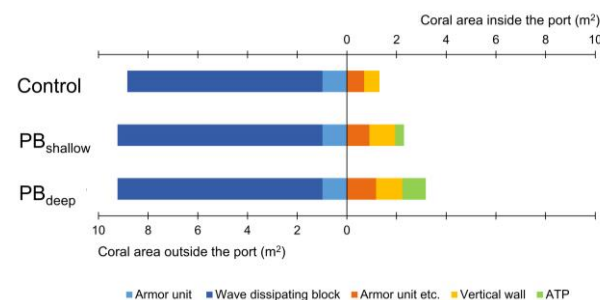


図-5 通常断面（Control）と生物共生型防波堤（PB_{shallow}、PB_{deep}）のサンゴ面積の内訳

青は消波ブロック、水色は港外側被覆ブロック、オレンジ色は港内側被覆ブロック等（被覆ブロック、根固方塊、直立壁面ではないケーソン本体）、黄色は直立壁面、黄緑色はATPのサンゴ面積をそれぞれ表す。各断面における防波堤部位の位置は図-4に示す（各防波堤部位の色分けは図-4と対応）。

生物共生型防波堤では防波堤延長1 mあたり港外側で0.39 m²、港内側で0.99～1.87 m²サンゴ面積が増加した（図-5）。PB_{deep}はControlと比べて港外側消波ブロックで0.39 m²、ATPで0.95 m²、直立壁面で0.44 m²、港内側被覆ブロック他で0.48 m²サンゴ面積が増加した。PB_{deep}ではControl

と比べてATPによるサンゴ面積の増加が最も大きく、ATPによるサンゴ面積の増加がサンゴ面積増分の42%を占めた。PB_{deep}ではPB_{shallow}に比べて港内側のATPと被覆ブロック他の効果が大きかった。

各防波堤の整備費用の内訳を見ると、PB_{shallow}、PB_{deep}では、Controlと比べて防波堤の整備コストがそれぞれ2,226千円、2,610千円高くなった（表-2）。その内訳を見ると、港内側の整備費用の増加がPB_{shallow}で2,012千円、PB_{deep}で2,563千円となっており、マウンドの嵩上げに伴うマウンドと被覆工の増加が多くを占めていた。一方で、ATPの設置にかかる費用は383千円とマウンドの嵩上げ費用に比べて低かった。ATPの設置に伴い、ケーソン上端の幅が狭まり結果的に上部工の体積が減少することや、生物共生型防波堤では通常防波堤よりもケーソン幅が狭く基礎工も減少することから、上部工、ケーソン本体及び堤体下の基礎工の整備コストの増加は、PB_{shallow}で86千円であった。PB_{deep}ではケーソンの据え付け水深がControlとPB_{shallow}に比べて1 m浅いことからケーソンのコストがさらに下がり、Controlと比較して上部工、ケーソン本体及び堤体下の基礎工の整備コストは70千円低下した。港外側の消波ブロックの凹凸加工に伴うコストの増加は67千円、港内側のケーソン直立壁面への凹凸加工パネルの整備費用は61千円であった。

表-2 各防波堤の延長1 mあたりの整備費用の内訳。カッコ内の数値は通常防波堤（Control）からの差分を表す。生物共生部材を緑の網掛けで示す。

		Control (千円 m ⁻¹)	PB _{shallow} (千円 m ⁻¹)	PB _{deep} (千円 m ⁻¹)
港内側	基礎/根固工	2,147	1,952 (-195)	2,237 (+90)
	被覆工	944	1,287 (+343)	1,516 (+572)
	マウンド	0	1,864 (+1,864)	1,901 (+1,901)
	嵩上げ	0	1,864 (+1,864)	1,901 (+1,901)
	小計	3,091	5,103 (+2,012)	5,654 (+2,563)
港外側	基礎/被覆/根固/消波工	8,019	8,019 (0)	8,008 (-11)
	消波凹凸加工	0	67 (+67)	67 (+67)
	小計	8,019	8,086 (+67)	8,075 (+56)
その他	基礎/ケーソン	12,073	12,001 (-72)	11,864 (-209)
	本体内	2,223	1,998 (-225)	1,979 (-244)
	上部工	2,223	1,998 (-225)	1,979 (-244)
	直立壁面	0	61 (+61)	61 (+61)
	凹凸加工	0	61 (+61)	61 (+61)
	ATP設置 (グレーチング)	0	383 (+383)	383 (+383)
	小計	14,296	14,443 (+147)	14,287 (-9)
	合計	25,406	27,632 (+2,226)	28,016 (+2,610)

4. 考察

(1) 生物共生型防波堤の費用対サンゴ着生効果

生物共生型防波堤PB_{deep}ではControlと比べて費用対サンゴ着生効果が1割増加した（表-1）。PB_{deep}においては、通常断面と比較してサンゴ面積が2割増加し、ATPの設置によるサンゴ面積の増加がそのうちの4割を占めており最も大きかった（図-5）。生物共生型防波堤における整備費用の内訳を見ると、港内側のマウンドの嵩上げ費用が生物共生型防波堤の費用増加の大半を占めており、ATP設置に伴う整備費用の増加は小さかった（表-2）。したがって、ATPの設置は防波堤のサンゴ着生効果を高める上で費用対効果の高い手法であると言える。ここで仮想的な断面として、天端高LWL +0.7 mのATPのみを設けたControl+ATP（図-6）を考える。Control+ATPの延長1 mあたりの整備コストは、港内側、港外側はControlと同一とし、ケーソン本体、上部工、堤体下の基礎工、ATP（FRPグレーチング加工）の設置費用についてはATPの天端高が若干異なるもののPB_{shallow}とほぼ同一と考ええると、断面全体の合計金額は25,492千円と推定される。PB_{shallow}において嵩上げマウンドは防波堤の安定性には寄与していないため、Control+ATPは構造的に安定である。Control+ATPの延長1 mあたりのサンゴ面積は、Controlのサンゴ面積（10.15 m²）にPB_{deep}のATPのサンゴ面積（0.95 m²）を加えた11.10 m²と推定される。ここで各断面の生物共生手法の費用対サンゴ着生効果を生物共生型防波堤のサンゴ面積の増分を生物共生型防波堤の整備コストの増分で除したものとして考えると、PB_{shallow}、PB_{deep}、Control+ATPでそれぞれ6.2, 8.7, 110.5 cm²/千円となり、Control+ATPにおいて最も費用対効果が高くなった。天端高LWL +0.7 mのATPの表面積（延長1 mあたり6.01 m²）を考慮すると、ATPの設置によりサンゴ被度16%の基盤増加が698.8 cm²/千円で実現できることになる。この費用対効果は移植等によるサンゴ生息場の再生の費用対効果（中央値165,697 2010 US\$ per ha、日本円換算で608.3 cm²/千円¹¹⁾）に匹敵する。サンゴ生息場再生のためのサンゴ群体の移植密度が1 m²あたり4-5群体程度が想

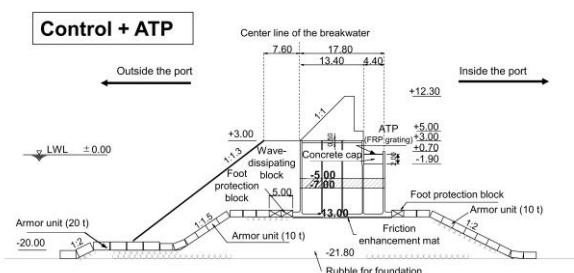


図-6 ATPのみを設置した生物共生型防波堤（Control+ATP）の断面図

定されており¹¹⁾，ATPでのサンゴ群体の密度が同等以上であること（天端高LWL+0.7 m，FRPグレーチング加工区ではATPの底面と側面に分布する全てのサンゴ群体の密度が1 m²あたり25.6±0.7 群体）を考慮すると，ATPの設置はサンゴ生息場の再生手法としても費用対効果が高いと言える。

(2) 費用対サンゴ着生効果の高い防波堤断面の決定方法

試算対象とした3つの防波堤断面の中で，最も費用対サンゴ着生効果が高いのはPB_{deep}となった（表-1）．予算の上限が無い場合は，防波堤の全整備区間にわたって費用対効果が最も大きいPB_{deep}を整備することで最大のサンゴ面積を実現できる．しかしながら，実際のインフラ整備にあたっては予算額が決まっていることも多いと考えられる．その場合には，決められた予算においてサンゴ面積が最大化する断面の組み合わせを検討することが重要である（図-7）．ここでは既設のControl, PB_{shallow}, PB_{deep}に，仮想的な断面として，天端高LWL +0.7 mのATPのみを設けたControl + ATPを加えた組み合わせを考える．Control + ATPの費用対効果は4.35 cm²/千円となり，Control, PB_{shallow}に比べて高く，PB_{deep}に比べて低い値となった．この4つの断面を想定すると，予算25,406千円～25,492千円ではControlとControl + ATPの組み合わせでサンゴ面積が最大化し，予算25,492千円～28,016千円ではControl + ATPとPB_{deep}の組み合わせでサンゴ面積が最大化する．実際にかかるコストに応じて，生物共生型断面を採用する割合を調整することで，予算内に収まるような計画が立案できる．

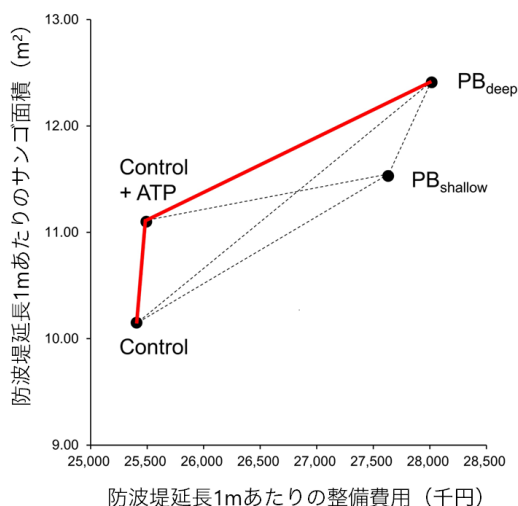


図-7 防波堤延長1mあたりの整備コストとサンゴ面積の関係
点線はとりうる断面の組み合わせ，赤線は決まった予算に対し最もサンゴ面積が大きくなる断面の組み合わせを示す．予算25,406千円～25,492千円ではControlとControl + ATPの組み合わせでサンゴ面積が最大化し，予算25,492千円～28,016千円ではControl + ATPとPB_{deep}の組み合わせでサンゴ面積が最大化する．

5. 結論

本研究では，グレーインフラとグリーンインフラを融合したハイブリッド型インフラのモデルとして，那覇港の生物共生型防波堤の費用対効果（サンゴ面積/建設費）を試算した．また，複数の防波堤の費用対効果を比較し，防波堤の生物共生機能を向上させる上で費用対効果の高い手法を検討した．サンゴ面積は通常防波堤（Control）と比較して，人工タイドプール（ATP）設置水深が浅い生物共生型防波堤（PB_{shallow}）では約10%，ATP設置水深が深い生物共生型防波堤（PB_{deep}）では約20%増加した．PB_{shallow}とPB_{deep}の防波堤の建設費はControlより約10%高かったが，表面積が大きく，サンゴの生育に適した水深を考慮したPB_{deep}は，ATPの設置によるサンゴ面積の増加が最も大きく，費用対サンゴ着生効果がControlより約10%増加した．ATPのサンゴ生息場再生の費用対効果は，サンゴ移植によるそれと同程度であり，ATPはサンゴ生息場の創出・復元に適した費用対効果の高い方法であることが示された．実際のコストに応じて生物共生型防波堤の割合を調整することで，予算内で最大のサンゴ生息面積を実現する計画を策定できる．

謝辞：サンゴ面積計算にご協力いただいた牧野涼子氏，本研究に有意義なご助言をいただいた鈴木高二朗博士，鶴田修己博士にこの場を借りて厚くお礼申し上げる．

参考文献

- 1) Sutton-Grier, A. E. et al.: Future of our coasts: The potential for natural and hybrid infrastructure to enhance the resilience of our coastal communities, economies and ecosystems. *Environmental Science & Policy*, 51, 137–148, 2015.
- 2) Kuwae, T. and Crooks, S.: Linking climate change mitigation and adaptation through coastal green-gray infrastructure: a perspective. *Coastal Engineering Journal*, 63, 188–199, 2021.
- 3) 国土交通省港湾局: 「港湾の施設の技術上の基準」を改訂，平成30年2月2日報道発表資料，2018.
- 4) Royal Society: Resilience to Extreme Weather, The Royal Society Science Policy Centre Report. 2014.
- 5) Ferrario F, M. et al.: The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. *Nature Communications*, 5, 3794, 2014.
- 6) Narayan, S. et al.: The effectiveness, costs and coastal protection benefits of natural and nature-based defences. *PloS one*, 11(5): e0154735, 2016.
- 7) Tanaya, T. et al.: Improvement of the coral growth and cost-effectiveness of hybrid infrastructure by an innovative breakwater design in Naha Port, Okinawa, Japan. *Coastal Engineering Journal*, 63(3), 248–262, 2021.
- 8) Omori, M. et al.: Why corals recruit successfully in top-shell snail aquaculture structures? *Galaxea*, 8: 83–90, 2007.
- 9) 棚谷灯子ほか: 防波堤におけるサンゴの着生に対するケーソン目地部の効果. 土木学会論文集 B2, 75(2), I_1147-I_1152, 2019.
- 10) Graham, N. A. J., and K. L. Nash: The importance of structural complexity in coral reef ecosystems. *Coral reefs*, 32(2), 315–326, 2013.
- 11) Bayraktarov, E. et al.: The cost and feasibility of marine coastal restoration. *Ecological Applications*, 26(4): 1055–1074, 2016.

河道の二極化進行の判断に資する 河道管理指標の検討

武川 晋也¹・田端 幸輔¹・福島 雅紀¹

¹国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

近年、全国の多くの河川において、樹林化・発達した砂州の対岸で滞筋の河床低下が進行する二極化が問題視されている。本研究では、二極化が進行し、中小出水により橋脚被害が発生した木曽川を対象に、観測水位や定期横断測量データから算出可能な砂州冠水率と通過土砂量に関する簡易指標を提示し、二極化進行の要因分析、二極化進行抑制のための河道掘削高の設定と有用性の考察を行った。その結果、提示した簡易指標を用いることで、対象区間における河道の二極化進行の要因を概略推定できた。また、砂州冠水率が10%となる高さを目安に河道掘削を予防保全的に実施すれば、二極化進行を抑制できる可能性のあることが示唆された。

キーワード 二極化、河道掘削、維持管理、砂州冠水率、通過土砂量

1. はじめに

河道の適切な維持管理のためには、流下能力および施設の機能・構造安定性への影響が懸念される二極化の進行を見極めることが重要となる。近年、豊平川¹⁾、阿武隈川²⁾、多摩川³⁾をはじめとした全国の河川で二極化が進行しており、流下能力の低下や生物の多様性の低下等が問題視されている。平成23年には、石狩川水系辺別川において、H.W.L.以下の洪水にも関わらず、砂州が形成されている箇所に対岸側で河岸侵食による被災が発生した⁴⁾。これは、二極化した河道区間では、深い滞筋に流れが集中して河床が洗掘されやすくなることで、H.W.L.以下の洪水であっても、安全に流下できない場合があることを意味している。

これまで、河道管理基本シートや、河床低下や土砂堆積・樹木繁茂に対する要注意箇所の設定フロー⁵⁾等を基に河道の維持管理が実施されてきたが、二極化進行の要因分析には至っていない。傳甫ら⁶⁾は、砂州の横断形状に着目し、横断測量および平均年最大流量に対する水位を基に砂州波高と平均水深の関係を整理し、これを二極化指標として提案している。ただし、年間の位況変化や経年的な砂州の発達状況、土砂の攪乱強度等、二極化を予測する上で重要と考えられる要素が考慮されていない。

二極化対策としては河道整正や掘削が有効であり、掘削高の設定に関しては、河道安定性の観点から現況河道との摩擦速度変化率を15%以内に収めること、利水や水際部の自然環境保全の観点から掘削高を平水位よりも下

げないこと等が目安とされているが⁷⁾、実際には、施工性の観点から掘削高を平水位+1m程度に設定される例が多くみられる。ただし、掘削高を高め設定してしまうと十分な冠水頻度が得られないため、再堆積や再繁茂を生じさせ、二極化に至る可能性が指摘されている⁸⁾。このような知見は得られているものの、二極化抑制の観点から掘削断面を設定するための具体的な管理指標は存在しない。

本報告では、二極化に対する維持管理技術に資するため、砂州の固定化により二極化が進行し、中小出水により橋脚被害が発生した木曽川セグメント1区間を対象に、河道横断形状の経年変化と位況データに基づいて、砂州の冠水率と通過土砂量に関する簡易指標を提示する。そして、これらを用いて実際の二極化進行の要因分析を行うとともに、指標に基づいて二極化抑制のための掘削高の設定を試み、その有用性について考察する。

なお、本論文は河川技術論文集第28巻に掲載した「セグメント1区間における河道の二極化進行の要因分析」⁹⁾に対して、国土技術研究会用に修正を加えたものである。

2. 木曽川セグメント1区間の河道特性の整理

図-1に示す木曽川セグメント1区間(40.2k~56.8k)の河道特性等を把握するため、横断測量データの存在する昭和38年以降における河道へのインパクトとレスポンスの関係を概観した。図-2に平均河床高・最深河床高縦

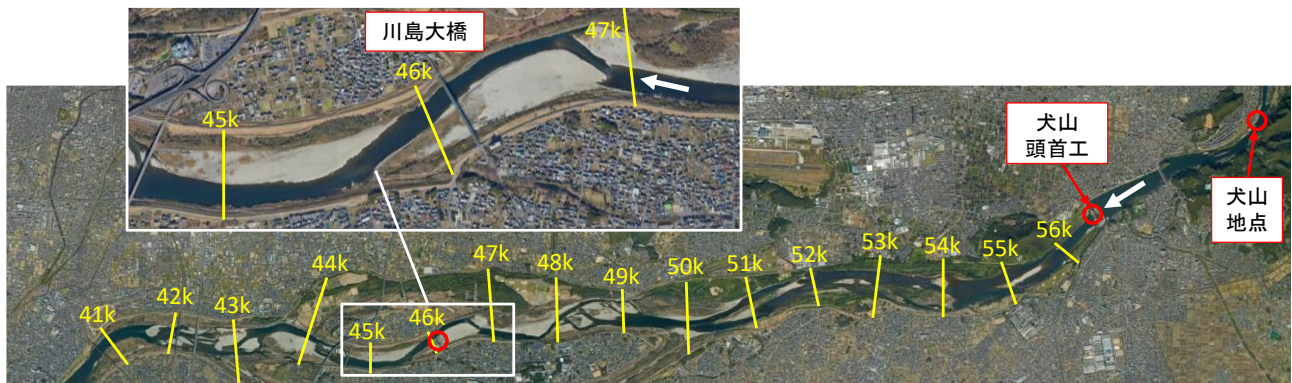


図-1 木曽川セグメント1区間

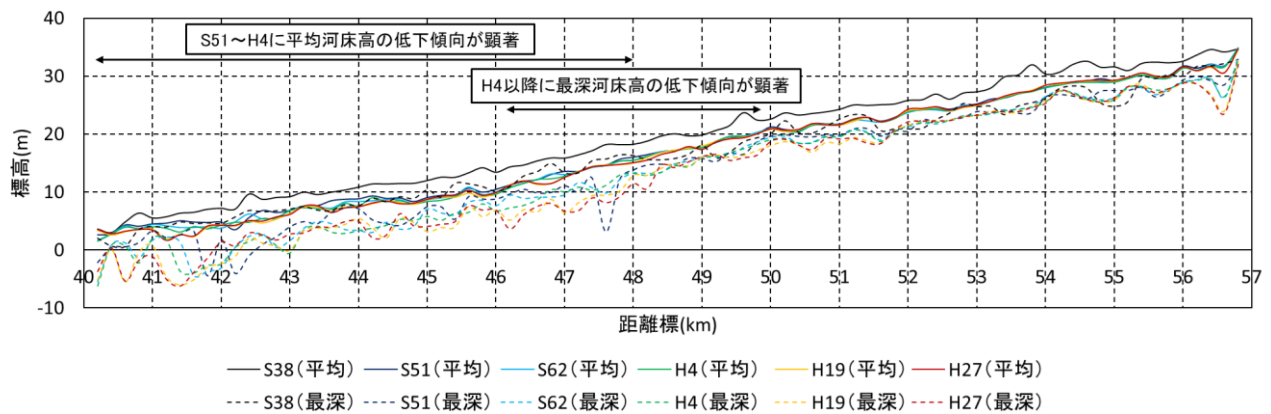


図-2 木曽川セグメント1区間の平均河床高・最深河床高縦断面図

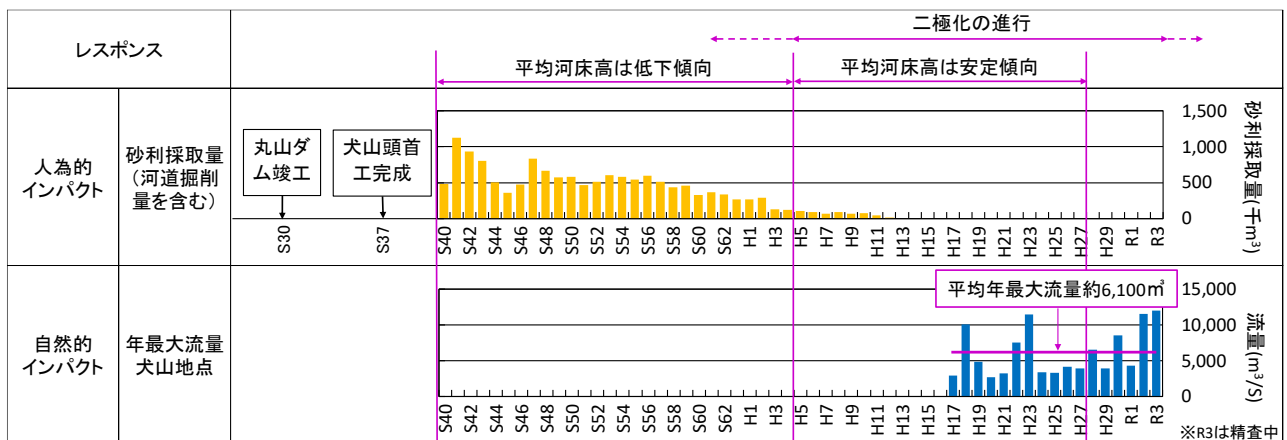


図-3 木曽川セグメント1区間のインパクト～レスポンスの整理

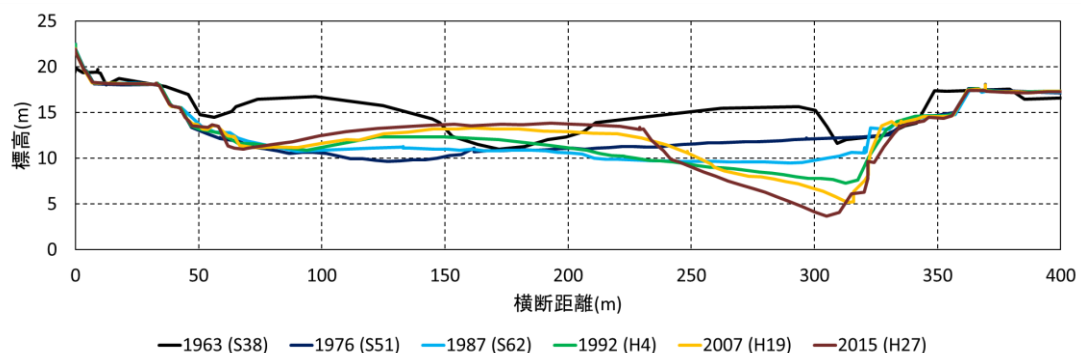


図-4 46.2kの横断データの経年変化

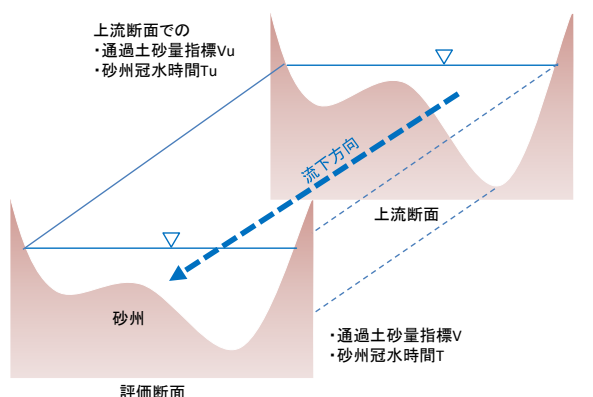
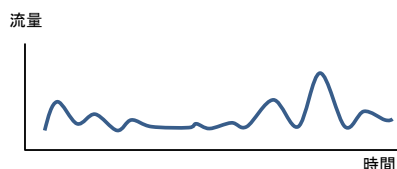
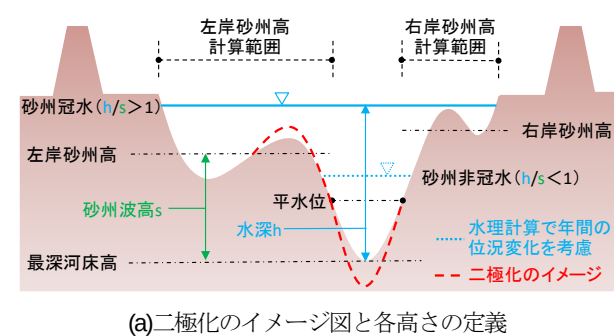


図-5 二極化のイメージと各指標の説明

断図を、図-3 にインパクトとレスポンスの整理結果を、図-4 に代表断面として 46.2k の横断データの経年変化を示す。なお、図-3 中の砂利採取量は大臣管理区間(河口～70.4k)全体の範囲でのデータである。

図-2 および図-3 によると、48.0k より下流の区間では、昭和 51～平成 4 年に平均河床高の低下傾向が顕著である。これは昭和 30 年に丸山ダム、昭和 37 年に犬山頭首工が竣工されたことで、以降は上流からの土砂供給量が減少傾向となったことや、平成 12 年まで実施されていた砂利採取が要因である可能性がある。

図-4 の横断図によると、昭和 38～62 年は滞筋位置が横断方向に変化していることから、この期間は砂州が活発に移動しており、顕著な二極化に至っていないと判断できる。一方、昭和 62 年以降は滞筋位置が概ね固定化され、最深河床高が低下傾向にあることから、この期間で二極化が進行し、概ね現在の河道断面が形成されたものと推察される。平成 4～19 年は大きな出水が少なかったが、近年になって平均年最大流量の 2 倍に及ぶ大出水が頻発しており、滞筋の更なる河床低下が進行していたと推察される。この結果、令和 3 年 5 月の平均年最大規模の出水を受けて川島大橋の橋脚が被災したものと推察される。

表-1 一次元不等流計算の計算条件

項目	条件
計算区間	34.4k～56.8k(犬山頭首工) (200mピッチ)
断面設定	S38, S51, S62, H4, H19, H27の6年代の定期横断
計算期間	H17.1.1～R1.12.31 (15年間)
上流端流量	犬山地点 (59.7k)
下流端水位	起水位観測所(34.3k) より算出
粗度係数	計画粗度

3. 二極化進行の要因分析手法

(1) 考え方

二極化の根本的な要因である砂州の攪乱ポテンシャルの軽減に係る指標として、砂州冠水率、通過土砂量および砂州冠水時間の縦断差分に着目する。そして、河道安定局面にある箇所や二極化進行箇所においてそれぞれの指標がどのような特徴を示すのかを把握し、二極化進行の要因分析を行う。以下に、各指標の算定法を示す。

(2) 砂州冠水率

砂州冠水率は、以下の手順により算定する。

- ① 各断面の定期横断測量データを重ね合わせ、河床変動が生じている範囲をすべて包含するように、広義の低水路幅を設定する。つまり、この範囲内に、着目すべき砂州が存在するように設定する。
- ② 各測量年の横断データを基に、一次元不等流計算を実施し、各測量断面の時間毎の水位と各測量年の平水位を算出する。
- ③ 各測量年の最深河床高を基準として、平水位に対する河岸水際位置から低水路端までの標高の平均値を砂州波高とし、各測量断面で左右岸それぞれ算出する。また、時間毎の水深 h も算出する。水深 h は、図-5に示すように最大洗掘深箇所における水深とする。
- ④ 各測量断面で左右岸の砂州波高のうち低い方を砂州波高 s として、水深砂州波高比 h/s を時間毎に算出する。
- ⑤ 各測量年の各測量断面で $h/s > 1$ となる時間を砂州冠水時間 T として算出し、全体の計算期間に対して $h/s > 1$ となる割合を砂州冠水率として算出する。

(3) 通過土砂量指標の縦断差分

(2) で実施する一次元不等流計算結果から、各断面、各時間の摩擦速度 u^* を算定し、木曾川セグメント1区間の代表粒径を対象として岩垣の式¹⁰⁾から得られる移動限界摩擦速度 u^*c を超過する場合に対し、以下の式で定義する通過土砂量指標 V を算定する。

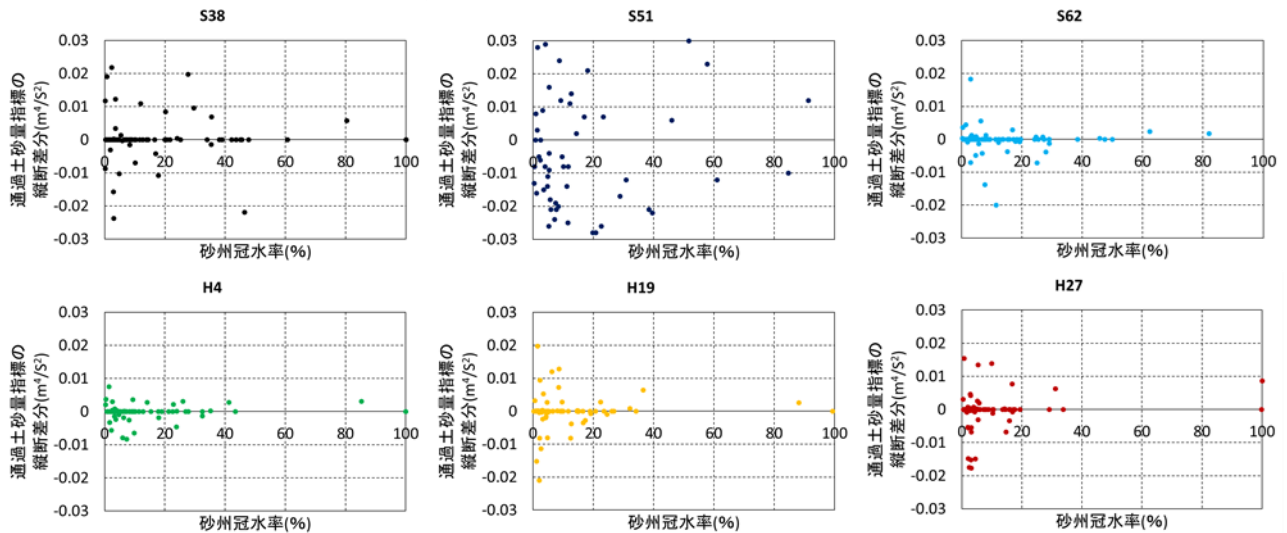


図-6 砂州冠水率と通過土砂量指標の縦断差分との関係

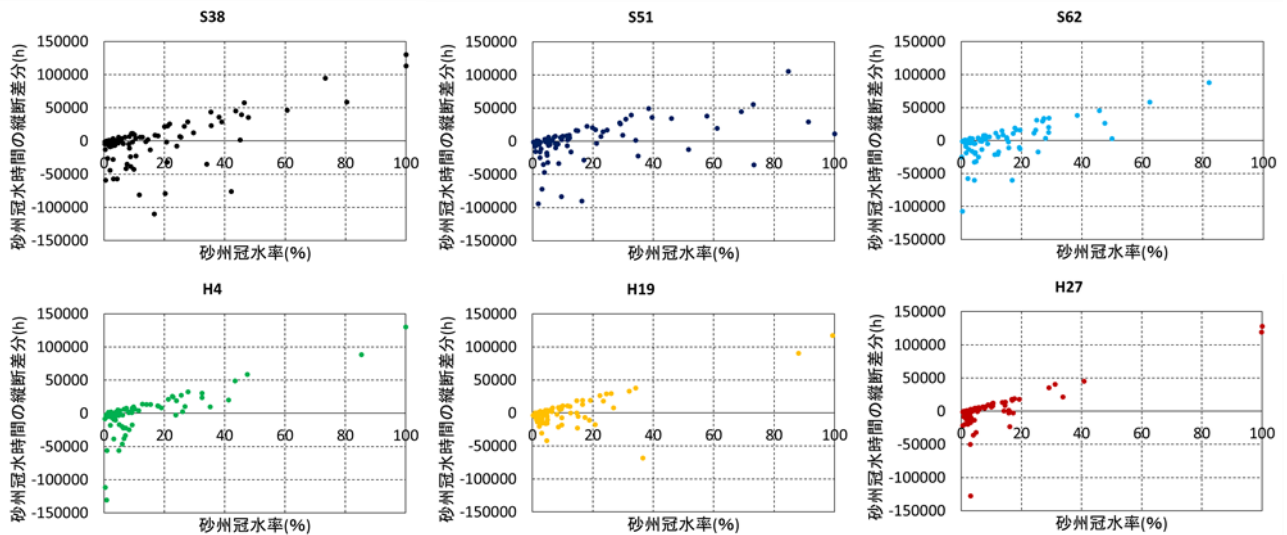


図-7 砂州冠水率と砂州冠水時間の縦断差分との関係

表-2 砂州冠水率に対するプロット数の集計結果

	0~10%	10~20%	20~30%	30~40%	40~50%	50~60%	60~70%	70~80%	80~90%	90~100%	20%以下
S38	52.4	15.5	13.1	6.0	7.1	0.0	1.2	1.2	1.2	2.4	67.9
S51	56.0	15.5	9.5	7.1	1.2	2.4	2.4	2.4	1.2	2.4	71.4
S62	58.3	21.4	13.1	1.2	3.6	0.0	1.2	0.0	1.2	0.0	79.8
H4	70.2	9.5	10.7	3.6	3.6	0.0	0.0	0.0	1.2	1.2	79.8
H19	72.6	14.3	7.1	3.6	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	1.2	86.9
H27	72.6	20.2	1.2	2.4	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	92.9
H27(平水位)	58.3	1.2	2.4	7.1	8.3	4.8	1.2	3.6	6.0	7.1	59.5
H27(平水位+1m)	23.8	35.7	22.6	9.5	3.6	1.2	1.2	0.0	0.0	2.4	59.5

$$V = \int_{T'(u^* > u_c^*)} u^{*3} B dt \quad (1)$$

ここに、 B ：低水路幅、 t ：時間、 T' ：摩擦速度が移動限界摩擦速度を超える時間である。

上記指標は、摩擦速度の3乗と比例関係にある掃流砂量を、移動限界摩擦速度を超える時間について積分することで通過土砂量と見なしたものであり、上流側の値 V_0 との差が、その地点の河床上昇または低下の傾向を概略で表すことができると考えられる。

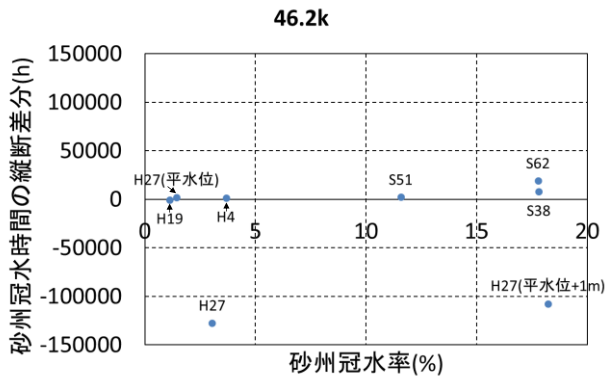


図-8 砂州冠水率と砂州冠水時間の縦断差分の経年変化

(4) 砂州冠水時間の縦断差分

(2)で実施する一次元不等流計算結果から、砂州冠水時間 T を縦断的に算定する。そして、上流側の断面の砂州冠水時間 T_0 との差を砂州冠水時間の縦断差分($T-T_0$)として、各測量年の各測量断面に対して算出する。

4. 木曽川セグメント1区間の二極化進行要因分析

(1) 検討条件

二極化が進行している木曽川セグメント1区間を対象に、昭和38, 51, 62, 平成4, 19, 27の6年代の河道について、3.に示した手法を用いて、二極化進行要因を分析した。表-1に、砂州冠水率等の算出に用いる各断面の水位時系列データを取得するために実施した一次元不等流計算の計算条件を示す。洪水外力には、観測流量時系列データが存在する平成17年から令和元年までの15年間の流量データを与えた。各年代の横断データに対して水位縦断を計算し、各断面の砂州冠水率 h/s 、通過土砂量指標 V 、砂州冠水時間 T を算定した。

(2) 結果

砂州冠水率と通過土砂量指標の縦断差分との関係を図-6に示す。昭和38年を除き、砂州冠水率が高まると通過土砂量指標の差分の絶対値が小さくなる傾向にあることが確認できる。このことは、砂州冠水率が高い箇所では通過土砂量の縦断差分が小さく、顕著な河床変動が生じないが、冠水率が低下すると砂州の攪乱ポテンシャルが減少し、二極化を生じさせる可能性があることを意味している。

砂州冠水率と砂州冠水時間の縦断差分との関係を図-7に示す。あわせて、表-2には砂州冠水率に対するプロット数の集計結果を示している。経年的に砂州冠水率が10%以下もしくは20%以下で低い値となる断面の割合が増加しており、図-7のプロットが左側に寄ることが確認できた。また、砂州冠水率10~20%を境に、砂州冠水率が低くなると砂州冠水時間の縦断差分が極端に小さい

値となる場所が出現している。

各断面で砂州冠水率と砂州冠水時間の縦断差分のプロットの経年変化(図-8)を確認したところ、例えば46.2kでは、砂州が活発に移動していたと推定される昭和62年までは砂州冠水率が10%を超える値をとる。一方、平成4年以降は砂州冠水率がいずれも4%以下で低い値をとる。また、平成27年は砂州冠水時間の縦断差分は極端に小さな値となっている。

上記結果を、実測の横断測量結果(図-4)から判断される二極化の実態と比較する。図-4によると、昭和62年を最後に左岸側の砂州高の上昇と右岸寄りの最深河床高の低下により二極化が急速に進行していることが確認できる。以上より、砂州冠水率と通過土砂指標、冠水時間の縦断差分の経年変化から、二極化進行の特徴を概ね把握できることが確認された。

5. 各指標を用いた二極化抑制のための掘削高の評価

時間毎の観測水位と、5年に1度程度実施される定期横断測量データ、あるいは三次元点群データから算出可能な砂州波高を用いて測量年毎に砂州の冠水率を求め、冠水率10%を目安として砂州高を管理すれば、河道掘削後の土砂の再堆積を抑制できる可能性がある。

つまり、砂州の冠水率が10%を下回るもしくは経年的に10%付近に低下する傾向にある箇所は、二極化が進行中の危険箇所であると判断することができる。さらなる二極化の進行を防ぐためには、砂州の冠水率が10%をなるべく下回らないような河道掘削を予防保全的に実施する必要がある。

ここでは、平水位あるいは、平水位+1mの高さよりも高い砂州を、それぞれの高さまで切り下げた場合を想定し、不等流計算を実施し得られた水位を基に、砂州冠水率と通過土砂量指標の縦断差分、砂州冠水率と砂州冠水時間の縦断差分をそれぞれ作図し、掘削高の妥当性を評価した。

図-9, 10に砂州冠水率と通過土砂量指標の縦断差分、砂州冠水率と砂州冠水時間の縦断差分を示す。砂州の冠水率が10%を下回る頻度は、掘削により明らかに軽減しており、平水位+1mよりも平水位まで掘削した方がその効果はより顕著である。また、平水位まで掘削すると、砂州冠水率が全体的に大きくなることから、河道が安定傾向になり、二極化を抑制する方向に働くものと予想される(表-2)。ただし、冠水率がごく小さい範囲で、冠水時間縦断差分が極端に小さくなっている箇所が確認できる(図-10の左図)。これは、掘削によって水位が低下したことで、掘削対象としなかった砂州の冠水率が極端に低下したためである。このような箇所では、改めて掘削高を設定する等、きめ細かな設定が必要となる。

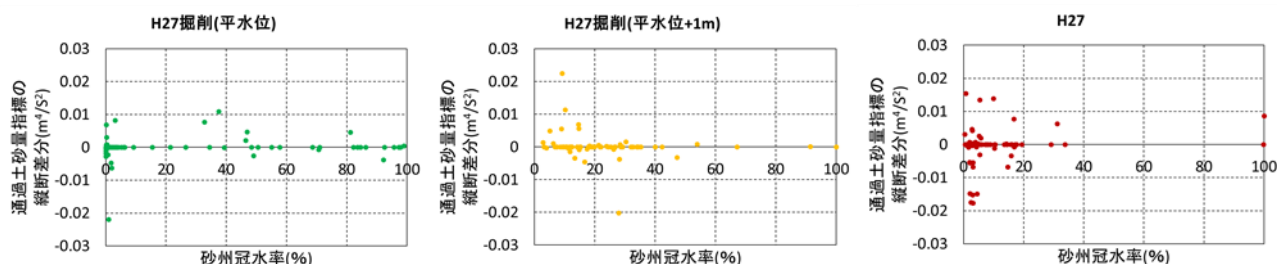


図-9 掘削を想定した場合の砂州冠水率と通過土砂量指標の縦断差分との関係

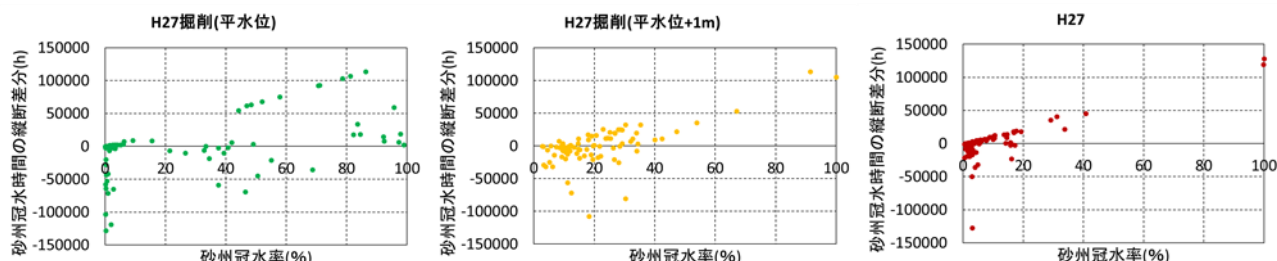


図-10 掘削を想定した場合の砂州冠水率と砂州冠水時間の縦断差分との関係

6. おわりに

砂州冠水率と通過土砂量指標を指標に用いることで、木曽川セグメント1区間における河道の二極化進行の要因を概略推定できた。また、木曽川セグメント1では、砂州冠水率10%を目安とした高さで砂州高の掘削を実施すれば、極端な再堆積を生じさせず、二極化進行をなるべく抑制できる可能性があることを示した。ただし、砂州冠水率の閾値は河川毎に異なると考えられ、個々の河川での分析が必要である。

木曽川セグメント1区間には、川島大橋以外にも7つの橋梁があり、このまま二極化が進行すると、他の橋脚や護岸等が被災する危険性がある。このため、砂州高を切り下げて冠水頻度を高め、土砂が攪乱しやすくしていくことが肝要であり、本報告で示した手法が砂州掘削高設定の一つの目安として活用されることが期待される。

現況の砂州高は、航空レーザー測量等により取得される三次元点群データを用いることで、より高精度かつ高解像度に把握が可能となる。また、本報告では、冠水頻度を算定するために不等流計算を用いたが、水位が縦断的に観測されれば、それらの値を包絡し水面形を把握することで、不等流計算を実施せずとも、砂州冠水率や通過土砂量指標を評価することができる。大規模出水の流下特性把握だけでなく、砂州冠水率の把握にも活用できることから、縦断的な水位観測実施のモチベーションにも繋がるものと期待できる。

今後は、実際に河道掘削がなされ、その後再堆積により二極化してしまった事例や、再堆積を生じさせず維持できている事例等を収集し、提示した指標の妥当性を検

証していく予定である。また、本報告では、冠水頻度と土砂の攪乱の観点から二極化の要因について分析したが、今後は、流れと流砂・河床変動だけでなく、植生遷移や成長との相互作用として捉え、二極化進行の推定精度を高めるための検討に繋げていきたい。

参考文献

- 1) 井上卓也, 矢部浩規: 河床地形の二極化が河岸侵食に及ぼす影響, 寒地土木研究所月報, No.802, pp.2-8, 2020.
- 2) 東北地方整備局: 阿武隈川水系河川整備計画, 2012.
- 3) 京浜河川事務所: 多摩川河川維持管理計画, 2017.
- 4) 天野直哉, 米元光明, 石井克英: 辺別川における平成23年9月出水での被災について, 第55回北海道開発技術研究発表会, 2012.
- 5) 藤田光一, 田上敏博, 天野邦彦, 服部 敦, 浦山洋一, 大沼克弘, 武内慶了: 現場での実践を通して河道管理技術を向上させる先駆的取り組み, 河川技術論文集, 第17巻, pp.539-544, 2011.
- 6) 傳甫潤也, 井上卓也, 橋本慎一, 千葉 学, 戸村 翔, 川上北斗, 佐々木博文: 河道の二極化の形状指標と河岸侵食リスクの関係, 水工学論文集, 第77巻, pp.373-378, 2021.
- 7) 一般財団法人国土技術研究センター: 河道計画検討の手引き, 2002.
- 8) 大坪摩耶, 瀬崎智之, 福島雅紀: 自然堤防帯区間の河川における植生の消失に関する研究, 河川技術論文集, 第27巻, pp.421-426, 2021.
- 9) 武川晋也, 田端幸輔, 福島雅紀: セグメント1区間における河道の二極化進行の要因分析, 河川技術論文集, 第28巻, pp.259-264, 2022.
- 10) 土木学会水理委員会: 水理公式集2018年版, 2019

福島河川国道事務所における 三次元河川管内図の取り組みについて

松葉 俊哉¹・若生 優紀¹・岩澤 直也¹

¹東北地方整備局 福島河川国道事務所 調査第一課 (〒960-8584 福島県福島市黒岩字榎平36)

国土交通省では、データとデジタル技術を活用して、非接触・リモート型の働き方への転換と抜本的な生産性や安全性向上を図るため、「インフラ分野のDX（デジタル・トランスフォーメーション）」を令和2年度から推進している。また、「防災・減災、国土強靱化のための5か年加速化対策」の中長期計画では、国管理の109水系全てにおいて令和7年度までに、三次元河川管内図を整備することとしている。本稿は、河川の維持管理業務の高度化・効率化を推進するため、当事務所で整備したDXの取り組みの基盤となる三次元河川管内図の概要及び活用事例について報告するものである。

キーワード インフラDX, 三次元管内図, 河川管理

1. はじめに

福島河川国道事務所が管理する河川の阿武隈川は、福島県の中通りを流れる幹川流域延長239kmの1級河川で、全国6位の延長をもつ。また阿武隈川は洪水の発生しやすい流域特性がある。盆地と狭窄部が交互に存在する地形、南北方向の流路と台風の進路が重なることで洪水の流出量が増加し、浸水被害が度々発生している。（図-1,2）直近では東日本台風により、広範囲で浸水被害が発生した。以上の点から、河川監視カメラや水位計などの管理用機器や樋門、樋管等の河川管理施設の数が多。

三次元管内図を活用することで、状態把握、維持補修のためのデータの取得を効率的に行うことができ、河川管理延長が長いほど、活用のメリットは大きくなる。

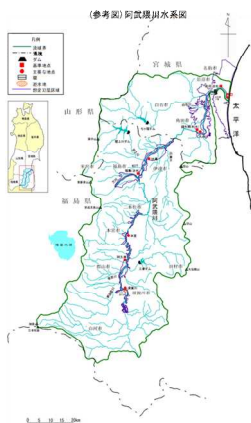


図-1 阿武隈川水系図

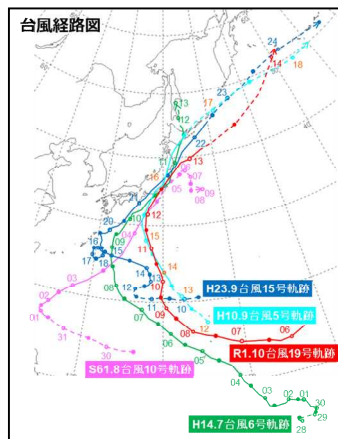


図-2 台風経路図

2. 三次元管内図の構築に至った背景と課題

構築にあたっての背景としては大きく2点ある。

第一に「阿武隈川緊急治水対策プロジェクト」の効率化が挙げられる。令和元年10月東日本台風により、阿武隈川では、堤防決壊、越水、溢水により事業所、家屋等の浸水等、甚大な被害が発生した。この災害に対して、「阿武隈川緊急治水対策プロジェクト」では関係機関が連携し、築堤、河道掘削、遊水地整備等の治水対策を10年間（令和元年～令和10年）で実施予定である。特にプロジェクトの中の遊水地整備は大規模なものであり、遊水地全体の面積は約350ha、洪水調節容量は約1,500万～2,000万³m程度になる。他にも用地買収や家屋移転、橋梁の架け替えなど、検討内容が多岐に渡る。これらの内容を住民に説明する際に図面ではわかりにくい部分も、三次元管内図を用いて説明することで普段図面を見ていない人でも理解が得られやすいと考える。限られた人員と期間の中で緊急治水対策を推進するには効率よく業務を進めていかなければならない。

第二に「若手職員からの声」が挙げられる。「事務所に納められた成果品が整理されておらず、書庫や棚に保管されている資料を今後の工事や業務に活かす姿が想像できない。」「入省年数が浅い若手職員にとっては従来の図面を読み解くのが難しく、紙の図面だけでは完成図がはっきりしない。」などの意見があった。

実際に護岸ブロックを敷設する工事の際に工事区間に護岸ブロックが既に埋め込まれており、工事額が減にな

った事例がある。また、完成予想図が3Dモデルで画面上に表示されることで完成後のイメージが分かりやすく確認でき、曖昧な想像だけで回っていた決裁が、はっきりとしたイメージを持って説明が可能になる。

上記に整理したこれら課題及び対応方策について、下記に述べる。

(1) 工事・業務成果の管理

工事・業務ともに、相当な件数になっており、令和3年度、4年度発注の工事・業務合わせて約250件になる。遊水地関係の工事・業務だけでなく、それ以外についても三次元管内図で管理することで受注者の依頼、業務の参考等で過去の成果品を提出、使用する際は容易に探し出すことが可能になる。書庫や執務室内の棚に保管されている成果品は、年度や種類が整理されずに保管されており、瞬時に探し出すことが困難である。(図-3)



図-3 成果品保管状況

(2) 解決すべきタスクの全体像の把握

堤防設計、道路設計、用地協議等、日々目まぐるしく情報が更新されるなか、各検討内容の関係性を把握するために一元管理する必要がある。三次元管内図では情報の更新作業や関係者間での情報の共有を容易に行うことが可能であり、解決すべきタスクの共有に役立てることが期待できる。

(3) 住民への遊水地事業の説明

遊水地事業の進捗については、スムーズに地元住民の理解や同意を得ることがポイントのため、事業計画をできるだけ分かりやすく伝えることが求められている。任意の視点から図や構造物を見せる、動画を作成するなどの新たな見せ方をすることで、完成後のイメージが掴みやすくなり、住民の方の理解を得られやすくなるであろう。

(4) 図面の読み解きが困難

若手職員にとっては従来の図面を読み解くのが難しく、紙の図面だけでは完成図がはっきりせず、曖昧な想像のみで決裁を回ることがある。3次元設計を画面上に表示

することで、構造物に使用されている材料や数などを把握でき、工事の内容について理解を深めることが期待できる。タブレットで表示することで持ち出しでの説明も可能である。

3. 三次元管内図の利点

三次元管内図は、三次元地形データの表示を基本機能とし、各種データの閲覧機能、地理空間情報を扱うGIS機能、今後蓄積されるデータの検索機能を備えている。

基本的に地形モデルのデータを基盤とし、その上に航空写真や河川許可工作物等のさまざまなデータを重ね合わせて表示することが可能である。これまで目的に応じた複数の成果図を見比べる必要があった。しかし三次元管内図を用いる事で複数のデータを重ね合わせ、シームレスに表示することができる。重ね合わせることで様々な情報の関連性を一目で把握することができる。

例えば重要水防図、浸水想定区域図、カメラ・水位計の位置情報を重ね合わせることで、浸水が起こった場合の状況をより詳細に把握することができる。さらに指定避難所も重ね合わせることで安全な避難場所を把握することが可能になる。取り込むデータ量が多ければ多いほど関連する情報が増加し、活用の幅を広げることが期待できる。(図-4)

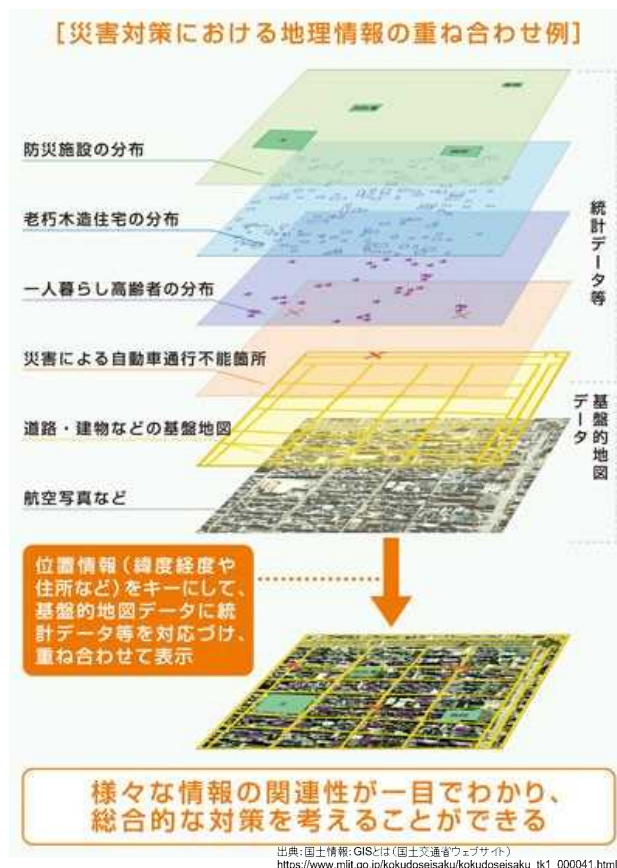


図-4 地理情報の重ね合わせ例

4. 三次元管内図システム「TeraExplorer」について

当事務所では、三次元管内図構築のビューアソフトとして「TeraExplorer」を採用した。本システムは令和2年2月に策定された「河川管理用三次元データ活用マニュアル（案）」にて、システムに備えていることが望ましいとされる11の機能を網羅しており、さらにはタブレットで表示も可能である。

特徴として、大容量の三次元データ等を高速かつシームレスに表示、広域で大容量な写真や点群、三次元地形モデル、CADデータなど、さまざまな分野の空間情報の重ね合わせが可能である。基本機能の他に多彩な三次元機能を備えており、当事務所の特徴である管理延長の広域さや、砂防などの総合管理に適している。

5. TeraExplorerの機能例

上記で述べたシステムの表示機能について例を紹介する。基礎情報として、三次元管内図のシステムに取り込んだデータはレイヤー別に分かれている。データによっては属性情報として入れ込み、詳細情報の紐づけも可能となっている。図-6はベクトルデータとして入れ込んである距離標と、その地点の横断図を紐づけしている。距離標だけでなく管理施設と施設台帳など、それぞれに合わせた情報を紐づけて表示することが可能である。さらに詳細情報を作成することも可能である。図-7は重ね合わせた際に2つのレイヤーを確認できるよう透過して表示することができる。



図-5 表示画面

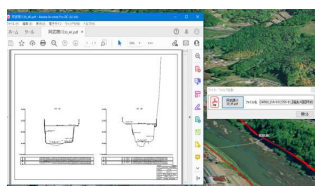


図-6 情報の紐づけ



図-7 透過表示

6. 三次元管内図の活用例

(1) 内部協議での活用

内部協議においては、堤防設計や道路設計、用地協議等の情報を重ね合わせる他、任意の箇所断面図作成等、その場で現地状況を解析し、課題を抽出した。遊水地の現場と事務所は約70km離れており、移動にも時間を要す。三次元管内図を活用することで本局・出張所とも、WEB会議上で現地の様子や設計を確認しながら協議をすることが可能となった。



図-8 事務所での検討の様子

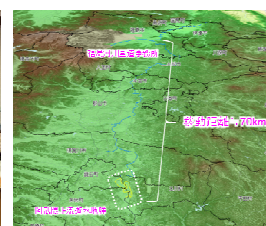


図-9 位置関係図

(2) 地元説明での活用

地元説明においては、事業計画について各自治体の首長、住民等への説明に活用している。

これまで鏡石町、玉川村、矢吹町の住民に対して用地説明を含む事業説明を5回実施し、延べ1,600名（地権者数約800名）に出席いただいた。そのうち、特に令和4年3月28日～令和4年4月14日の計10日間で実施した図面確認会では、計300名以上の住民が参加した。三次元管内図で任意の場所から堤防の高さの確認や横断図、標高段彩図の機能を使用し説明した。周辺の現場状況を双方向に共通認識を図りながら理解でき、直感的に分かりやすく、住民の方から理解を得やすいと評価をいただいた。個別説明の必要もあったことから、事務所からは計130名で対応した。

対応にあたり、事前に事務所内で簡易的な操作方法習得のため、勉強会を開催した。説明会を通して職員のスキルも格段に向上し、三次元管内図について積極的な提案もあり、その後の機能向上に繋がっている。また事務所職員が異動になった場合でも継続的に活用できるよう、事務所在中の委託職員にも、三次元管内図のシステムの操作やデータの取り込み方法等を習得してもらった。



図-10 図面確認会の様子

a) 使用した三次元管内図のデータ

主に使用したデータは基盤となる地形モデルに加え、航空写真、周囲堤・囲繞堤・家屋の3Dモデルである。三次元地形図と設計施設、周辺の建物情報を集約することで、周囲堤と地盤高、家屋との高さ関係のイメージがしやすくなる。(図-11)



図-11 表示画面

b) 使用した三次元管内図の機能

主に使用した機能は断面図と段彩図の作成機能である。任意の断面や段彩図を瞬時に作成可能であり、周辺の建物と堤防高さの関係を確認した。(図-12,13)

レイヤーの透過が可能であるため、入れ込んだ周囲堤と家屋や道路の干渉箇所が把握しやすい。(図-14)

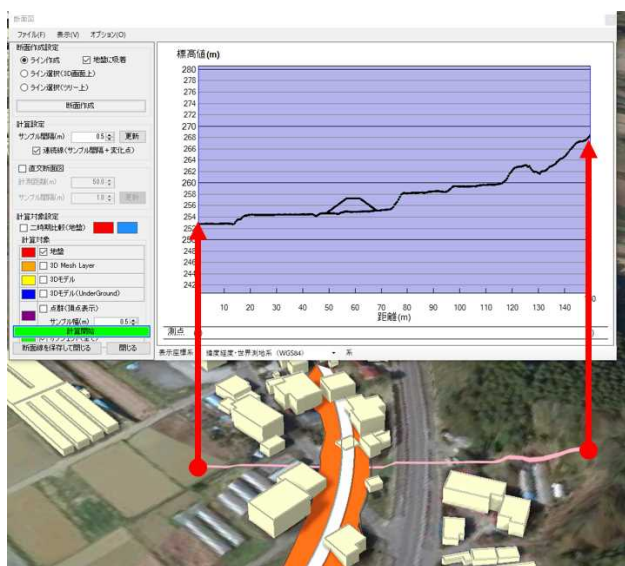


図-12 断面図作成



図-13 段彩図作成

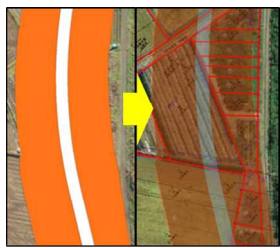


図-14 透過表示

(3) TEC-FORCEでの活用

令和4年8月3日からの山形県でのTEC-FORCE活動の際は、PCと三次元管内図システムデータを持参し、山形県庁より土砂災害警戒区域のデータをいただき、その場で三次元管内図に取り込み、調査に活用した。航空写真に警戒区域を重ねることで現場での被災箇所把握の調査を効率的に進めることが期待できる。(図-15)



図-15 TEC-FORCE調査の様子

7. 結論・考察

以上のことから三次元管内図の構築により、2.で述べた課題の業務効率化に有効であることが分かった。

工事・業務成果を三次元管内図に取り込むことで、必要なデータがある場合はすぐに対応することができた。

日々更新されるタスクについては課の連携が必須であり、互いに情報共有をすることが重要である。

遊水地事業への活用には、さまざまな角度から大きく貢献できた。今後の活用に大いに期待できる。

図面の読み解きが困難なことについては、3Dモデルを用いることで理解はしやすくなったが、取り込むモデルの詳細度を上げていく必要がある。

8. 今後の課題・展望

一方で今後の管理について、課題があることも明らかになった。今後も継続して活用されるシステムにするため、システムの機能・操作に長けた職員の確保、データの継続的な更新について検討が必要である。

今後は三次元管内図システムへの搭載を前提とした成果作成など、活用の幅を広げることが出来るよう検討を進め、DXの取り組みの基盤として、三次元管内図を有効に活用していきたいと考える。

河川管理用点群データの活用法の開発

富田 紀子¹・武内 慎太郎²

¹中国地方整備局 河川部 水災害対策センター (〒730-8530 広島市中区上八丁堀6番30号)

²中国地方整備局 岡山河川事務所 管理課 (〒700-0914 岡山市鹿田町2丁目4番36号)

水陸両用ドローン測量システムが中国地方整備局にも配備され、その活用による河川管理の効率化・高度化が期待されている。そこで岡山県内の1級河川である旭川において3年間同一個所を計測したデータを基にして、ALBの特徴と比較しながら、グリーンレーザドローン計測の利点を発揮する活用法をとりまとめた。特に水害による被災地での「被災箇所調査」あるいは「災害復旧」への適用に着目し、必要精度のデータを迅速かつ簡便に取得する計測手法の有用性を実証した。さらにビッグデータから変状個所を特定する簡便なデータ処理法の効果を検証した。これらの成果から河川管理のDX化を推進する三次元データの効果的な活用法を提案する。

キーワード 水陸両用ドローン、グリーンレーザ、ALB、河川管理の効率化・高度化

1. はじめに

計測技術の発展を踏まえて、LP (Laser Profiler) の活用を普及、拡大させると共に、更なる三次元地形データを活用することによって、河川管理の充実と効率化・高度化を図るため、「河川管理用三次元データ活用マニュアル(案)」(国土交通省水管理・国土保全局 令和2年2月)が作成された。このマニュアルでは、河川管理のための適切な三次元データの必要性および特性がとりまとめられており、特に河川定期縦横断測量業務等における航空レーザ測深(Airborne Laser Bathymetry: 以下ALBとする)による点群測量の標準的な作業方法や考え方や活用する上でのポイント等がまとめられている。点群測量とは、レーザ測量機器等を用いて地表面や河床等の高密度な三次元地形データを取得する測量方法であり、ALBは陸部の地形を近赤外レーザで計測すると同時に、水部の地形をグリーンレーザにより計測する手法である。従来の手法と比較して、点群測量による三次元データを活用することは、次の利点があると考えられる。

- ① データ取得の効率化
- ② 高密度データによる面的な地形状況の把握が可能
- ③ 現地測量を最小限とすることができ安全性が高い

しかしながら、ALBは固定翼や回転翼の航空機を使用するため、専門的な飛行技術をもつパイロットによる計測が必要とされ、迅速かつ簡便な計測にはなり得ない。このような背景から、「革新的河川管理プロジェクト(国土交通省水管理・国土保全局)」³が提案され、グリーンレーザ搭載の水陸両用ドローンが開発された。この水陸両用ドローンは、ALBと同じ水中を透過する波長532nmのグリーンレーザスキャナを搭載したもので、航空機を用いる手法と異なり、河川事務所の職員自身による飛行が可能であり、低コストの計測を実現できる。



図-1 グリーンレーザスキャナとドローン全体の概観

表-1 グリーンレーザスキャナの性能

最長測定距離	> $\geq 10\%$ 158m	$\geq 60\%$ 300m over
精度	> $\geq 10\%$ $\pm 15\text{mm}$	$\geq 60\%$ $\pm 5\text{mm}$
レーザーパルスレート	> 60,000Hz/秒	
エコー切り替え	> 1st / Last / 1st&Last / 4echo	
スキャン速度	> 30走査/秒	
レーザー波長	> 532 $\pm$ 1nm	
ビーム拡がり角	> 0.3mrad	
作動温度範囲	> 0 $\sim$ +40 $^{\circ}\text{C}$	
寿命	> 10,000時間	
重量	> 2.8kg(本体のみ/アンテナ除く)	

図-1にグリーンレーザスキャナを搭載した水陸両用ドローンの概観を、表-1にグリーンレーザスキャナの性能を示す。ドローンは、バッテリーで複数のプロペラを駆動して飛行するマルチコプター型である。ドローンを用

いたレーザ測量においては、ナビゲーションシステム（INS：Inertial Navigation System）を構成するGNSSとIMU（Inertial Measurement Unit：慣性計測装置）によって位置や姿勢を計測しながらレーザ光を発射し、対象物に当たって反射されて戻ってくる時間から距離を決定して、当対象物の三次元座標を取得する。ドローンに搭載する機器の重量が大きくなるほど、計測作業に費やす飛行時間が短くなる。そこで本レーザスキャナは、機器の一部に光ファイバーを使用するなどの工夫により、総重量が2.8kgという小型軽量化を実現させている。また多くのドローンレーザは、数万パルス/秒以上のレートで360°の範囲をスキャンする地上設置型のレーザスキャナを搭載するが多い。必要な計測範囲は機体の直下であり、少しでも搭載機器の重量を軽くして飛行時間を長くする工夫が必要である。360°の範囲を24万パルス/秒のレートでレーザを照射するスキャナと、機体の直下から90°の範囲を6万パルス/秒でレーザ照射するスキャナでは、機体直下のレーザ点群密度は同じながらも、後者の方が機器の総重量が軽くなる。また計測精度は、スキャン角度が機体の真下である鉛直方向から離れるほど、レーザ照射時のドローンの姿勢が測量精度に影響する。この姿勢を計測するのがIMUであるが、高精度のものほどレーザスキャナ機器全体の価格を高価なものにしてしまう。そこで、レーザを照射する範囲を機体の直下に制限するようにスキャナを改良することで、高価なIMUを使用することなく高精度の計測が実施できる工夫を取り入れている。これらの技術により、中国地方整備局が導入した水陸両用ドローンは、約30分の飛行時間を確保する飛行を可能にした。

本報告では、水陸両用ドローンの活用法を考察するための実験結果を基にして、ALBとの性能を比較しながらドローンの活用法をとりまとめる。前記マニュアルにおいては、ALBは「危機管理」対応として、「堤外」の「被災箇所調査」あるいは「災害復旧」のための計測への活用されているが、前述のように迅速・簡便な対応が不可能なため、この役割は水陸両用ドローンが担うことになる。このためには、次の項目を明確にしておくことが重要になると考える。

① 「被災箇所調査」活用のための適用範囲

水陸両用ドローンの三次元データが活用できる河川管理項目および三次元データが取得できる精度を計測方法と共に整理する。

② 「災害復旧」活用のためのデータ整理法

連続的な河道形状データが取得できるので、出水前後のデータ比較により、効率的に変状を把握することが期待される。そこで2時期のデータから変状を検出する手法を具体的に構築する必要がある。

これらの考察により、水陸両用ドローンの有効な活用法が汎用化され、ALBとの使い分けによる効率的な河川管理が進展していくことが期待される。

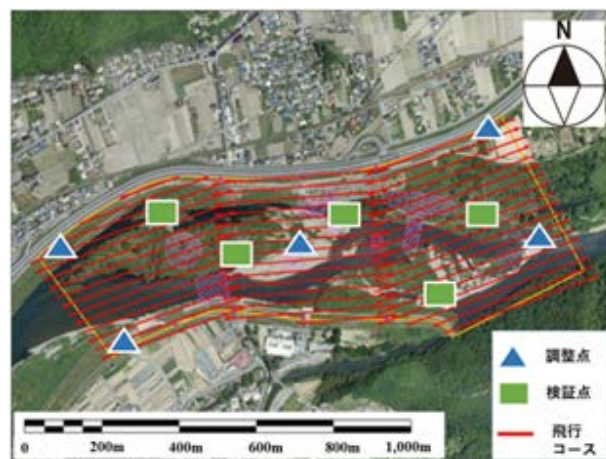


図-2 計測実験を実施した現場の概況

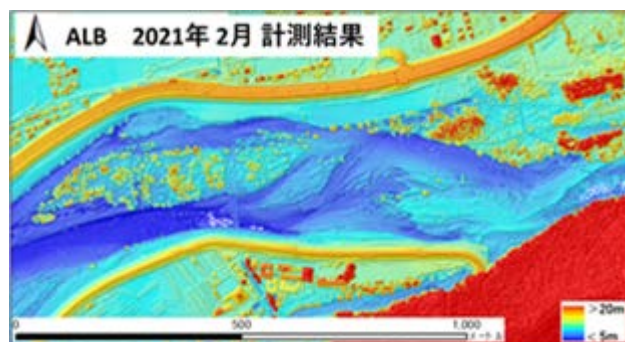


図-3 ALBによる河道の標高分布計測結果

2. ドローン測量システムと検証現場の概要

本研究では、整備局に配備されたものと同じ性能のグリーンレーザスキャナを搭載した水陸両用ドローンを用いて、前章で述べた①と②に関する項目を考察する。

(1) 「被災箇所調査」活用のための適用範囲

ALB 計測でまだ明らかにされていない項目の一つに「災害直後の水中計測は透明度により計測できない場合」の明確化がある。ドローンの使用においては、スキャナを軽量化する結果としてレーザ出力が抑えられるため、ALB 以上に水中の透明度が測深能力により大きく影響すると予想される。前報²⁾では、岡山市内を流れる1級河川旭川の14.6-15.8kmの約1.2km区間を対象として、計測する時期による測深性能の違いを比較し、濁度を客観的に指標化するFTUという値によって測深能力を推定することができると報告した。ここでは、同一個所で新たに計測を実施し、水陸両用ドローンで計測できる範囲をとりまとめる。図-2は計測現場の概況であり、前報²⁾と同じ旭川の区間である。図中の赤色の実線は飛行コースであり、対地高度は50m、サイドラップを75%、そして飛行速度は2.5m/sとした。現場には、対空標識を用いて、データを補正する調整点を5点、さらに計測精度を検証する検証点を5点設置している。

図-3は、ALBで計測した標高値を標高段彩陰影図で

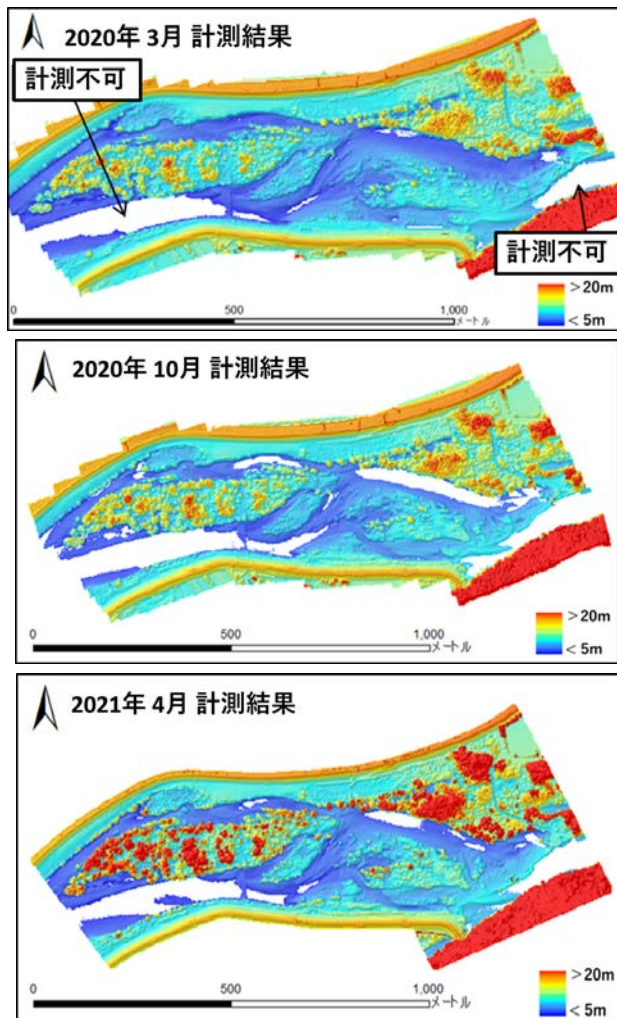


図-4 ドローンによる河道の標高分布計測結果

表したものである。標高段彩陰影図とは、等高線や等深線による地形表現を見やすくするため、段彩（グラデーション）をつけ、さらに一定の方向から光を当てた影をつけて、立体的に標高値を表現したものである。河道全体の標高値が計測されている。一方、図-4 はドローンによる河道の標高計測結果であり、異なる時期に実施したものである。いずれも水深が深い部分でレーザ反射光を受信することができず、計測できない箇所が存在している。ALB は、2 月に計測した結果であるが、ドローンを使って計測できなかった箇所の標高値も得られていることが分かる。この状態を詳しく調べたのが図-5 である。この図は、図-4 において、すべての時期において、計測可能できた水深 1.8m の箇所と計測できなかった水深 3.0m の河道の横断面図を示す。水深 3.0m の計測値の状況を見ると、ALB のレーザ点群は水中で反射されながらも一部が河床に届いているが、ドローンのレーザ点群は ALB より高密度ながらも水中部での反射も見られない。このように、同じ波長のレーザで測深能力が異なるのは、レーザ出力の相違であると考えられる。また図-6 は、各標高段彩陰影図を計測した時の濁度（FTU）を示したものである。図-4 で計測不可の箇所は、濁度

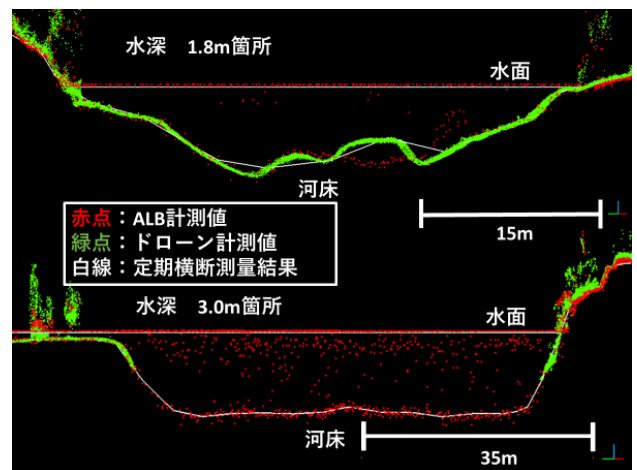


図-5 ALBおよびドローンによる河道の横断面計測例

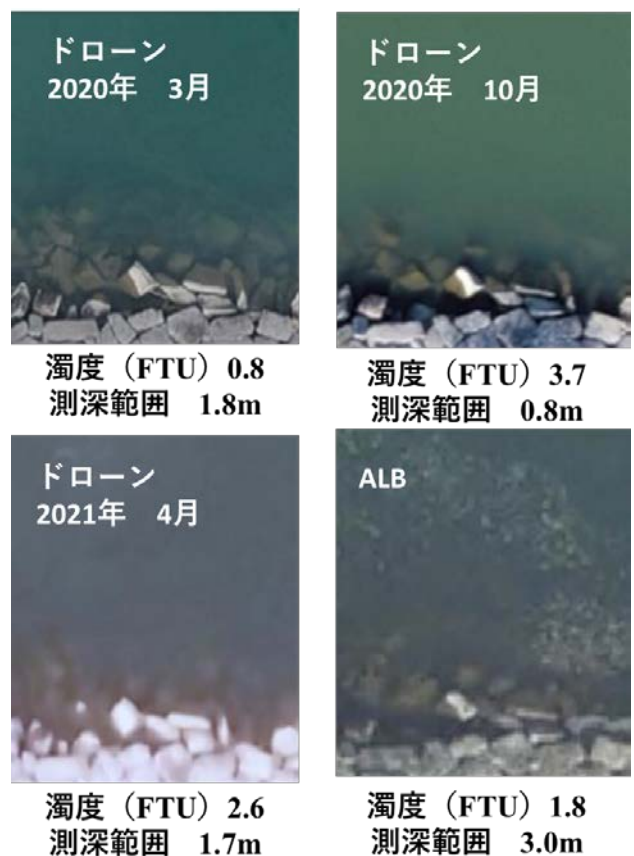


図-6 各計測時の河川の濁度

と共に拡大する傾向にあることが分かる。一方、ALB はドローンで計測できなかった水深 3.0m の箇所が濁度 1.8 でも計測できている。災害直後の河川の濁度は今回の値よりも大きくなることを考慮すると、ドローンを被災地での河道計測に適用する利点は少ないと考える。

次に陸部の計測について考察する。水害発災後の陸部は湿潤状態であり、また数多くの調整点を設置する必要のある写真測量よりも、自己の位置を精密に計測し、調整点の数が少なく済むドローン測量を実施する方が、迅速・簡便な計測が実施できると考える。ここでは、あ



図-7 河川堤防を散水している状況と散水後の状態

らためてそれらの利点が発揮できるのかを検証した。図-7に、現場を散水車を使って湿潤状態にした作業状況を示す。そして図-8は、湿潤状態の堤防を近赤外線のレーザー光とグリーンレーザー光を使って計測した結果である。図はレーザーの反射強度の分布を相対的に示したもので、強く反射された赤色から、赤色に比べて弱く反射された緑色の箇所が計測可能な箇所、黒色部はレーザー光が反射しなかった箇所である。計測時は晴天であり、植生が繁茂した法面の土堤では水が多く吸収されたため、点群データが取得できた箇所が多く見られたが、堤防天端の舗装面や階段部などのコンクリート部は近赤外レーザーでは計測できなかった。これらの結果は、グリーンレーザーを被災地の計測に適用する利点を示すと考える。

次に前報²⁾では、ドローン計測では調整点を使うことで、平面で50mm以下、標高で30mm以下の計測精度を確保する手法を紹介した。調整点は図-9に示すように、対空標識を設置し、既設の2級基準点を既知点としたトータルステーションによる放射法による測量によって、計測データの座標値を補正するための調整点が設置される。しかしながら被災地での計測では、この調整点の設置に労力を費やすことは困難である。そこで調整点無しでの高精度計測の実施法をここでは検討する。

一般にドローンを使ったレーザー測量では、GNSSおよびIMUデータを用いて推定した誤差モデルから、ド

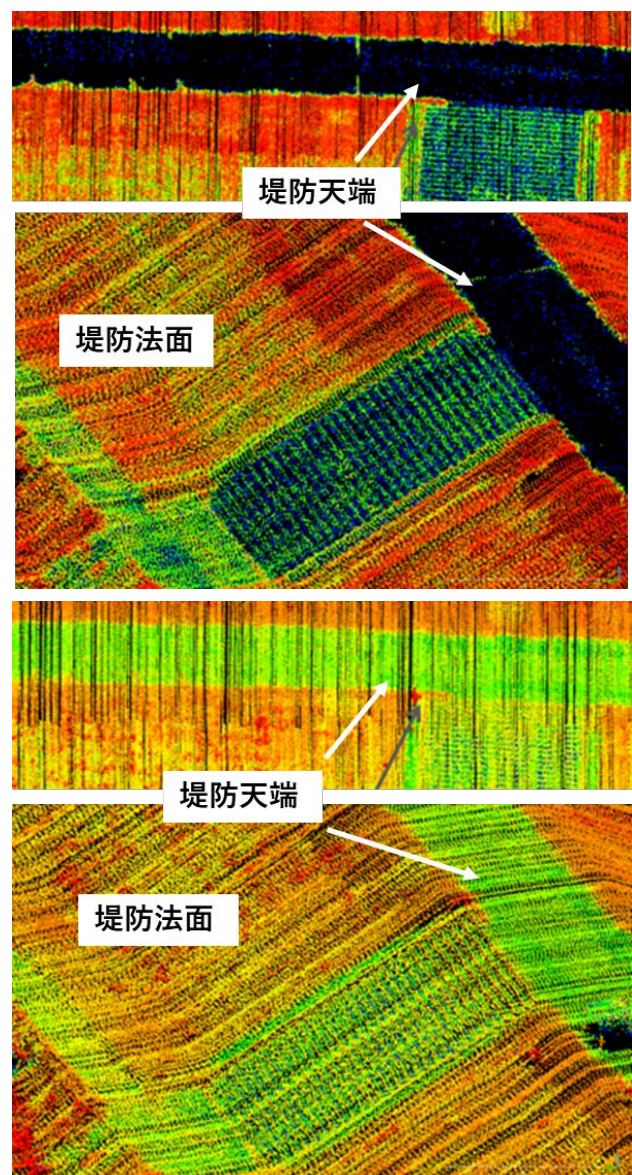


図-8 散水した堤防の近赤外およびグリーンレーザー計測結果

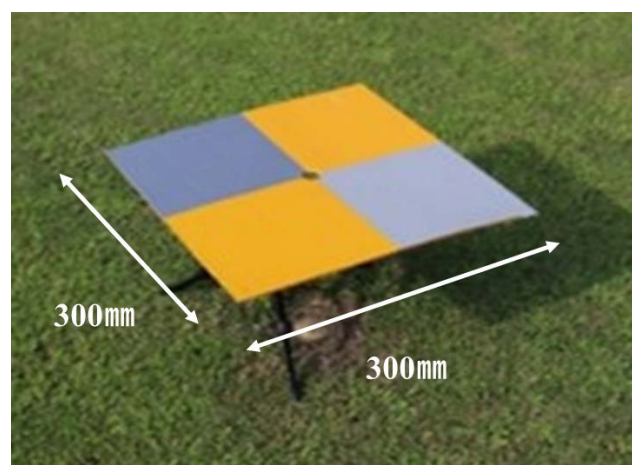


図-9 調整点の概観

ローンの軌跡を再計算することで、誤差の少ないデータとする最適軌跡解析と称される処理が必要になる。この

表-2 計測精度の検証結果

(単位 : mm)		水平方向		標高
調整点 不使用	平均較差	38	28	70
	RMSE	6	38	75
調整点 使用	平均較差	8	6	8
	RMSE	29	14	29

最適軌跡解析は、国土交通省による「UAV 搭載型 レーザースキャナを用いた公共測量マニュアル（案）」（平成 30 年 3 月）において、「最適軌跡解析におけるキネマティック解析結果については、最少衛星数、DOP (Dilution Of Precision) 値等に関する確認を行い、必要に応じて再解析又は再計測を行うものとする」と定められている。しかしながらドローン測量に精通した技術者でなければ取り扱いが難しく、またドローン飛行時に IMU の誤差を初期化しておかなければならないなど、高精度を得るための最適軌跡解析の実施は簡単ではない。その課題を解決するのが、調整点を用いた計測データの補正処理であった。本研究は、これらの背景を鑑み、次の技術をプログラミングしてスキャナに導入することにより調整点を使用しない場合でも、専門的な知識を不要にするドローンによるレーザ計測の実現を試みた。

・あらかじめ設定した飛行ルートに従って自動飛行するが、当ルートの入力作業と同時に、飛行時の自己位置を補正するためのアライメント飛行を自動的に設定されるようにした。

・国土地理院が全国に配置している電子基準点の中から計測地点近傍のものを自動で探索し、そこから配信されるデータとドローンの INS データとをみ合わせて自己位置補正を自動的に行う処理を組み込んだ。

・GNSS 受信数に関する DOP の情報から、DOP が 3 以上の評価に適さない不良計測箇所を自動的に除去する。

これらのことより、図-2 の現場における検証点において、トータルステーション (TS) を使って測量した結果とドローン計測による計測値を比較したものが表-2 である。表には調整点を使用の有無による精度を示す。表における平均較差は、5 点の検証点におけるドローン計測値と TS の値の差の絶対値を表し、RMSE(二乗平均平方根誤差)は、その差の二乗平均の正の平方根の値を表す。前述の「河川管理用三次元データ活用マニュアル（案）」において、「危機管理」のための「被災状況把握」には 300mm, 「被災箇所形状把握」には 100mm の計測精度が必要とされている。これらの結果より、開発したグリーンレーザを使ったドローン計測は、調整点の設置が無くても、被災地での計測の要求に応える精度が得られることが実証された。

(2) 「災害復旧」活用のためのデータ整理法

前報²⁾ で 2 時期のレーザ一点群から変状発生箇所を

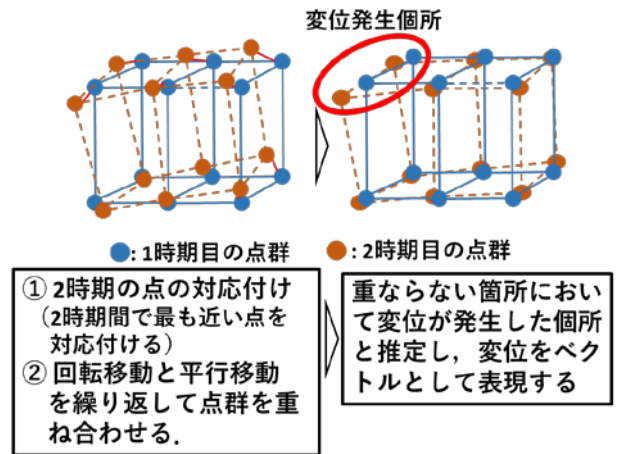


図-10 ICP 解析の概要

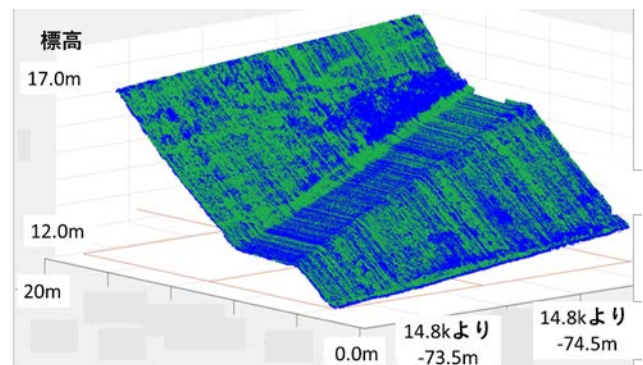


図-11 堤防法面の 2 時期のレーザ一点群の解析結果

抽出する技術の開発成果を報告した。ドローンによるレーザ計測では、本計測の対象区間である 1.2km においても約 12,000 点のレーザ点群が取得されたので、延長の長い河川管理区間全体では、数 10 万点以上の点群が得られる。このようなビッグデータを効率的に処理し、どこに変状が発生しているのかを把握できる解析技術を開発しなければ、ドローンで詳細な地形を再現しても有効に活用することができない。そこで ICP (Iterative Closest Points) と称される汎用的なアルゴリズムを使って、2 時期のレーザ一点群を自動的に重ね合わせる解析処理を開発した。この解析では、重ね合わせができなかった箇所が存在すると、それは変状が発生したことによると推定して変状箇所を特定する。図-10 に ICP 処理の概念を示す。

図-11 は 2 時期のレーザ一点群を重ねて可視化したもので、散水前後の点群データを青色と緑色を重ね合わせている。この図だけでは、断面の形状を比較しないと点群の座標値が変化したのかどうか分からないが、その場合は面的に変状を捉えることができない。そこで、この結果に ICP 解析を適用したものが図-12 である。被災後の計測時には調整点を使用しない場合の精度のデータが取得されることを考慮し、「被災箇所形状把握」として要求される 100mm の変状が発生した箇所を可視化するようにした。ICP 解析では、変状の大きさに応じたベクトル（矢印）で変位が表示されるが、図において、当

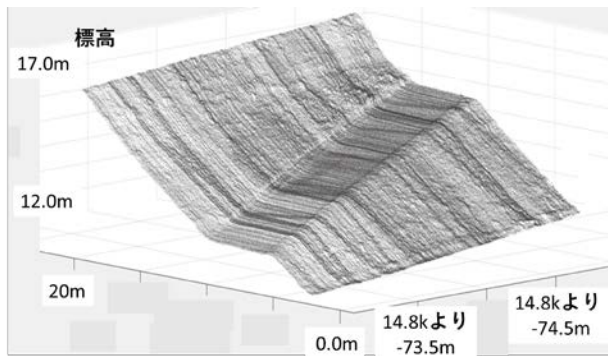


図-12 堤防法面の2時期のレーザー点群のICP解析結果

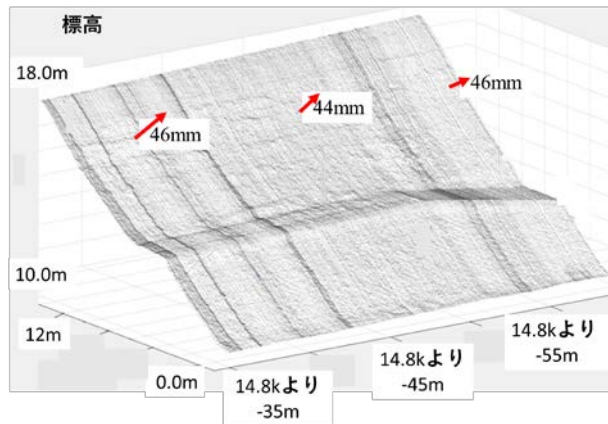


図-13 植生繁茂状態の異なるレーザー点群のICP解析結果



図-14 図-13の結果に示す法面の極性繁茂状況

のベクトルが表示されていない。実際に、解析処理の対象区間では、目視点検によって変位が発生していないことが確認されており、現地の調査結果と一致する結果が得られた。一方、図-13に植生の繁茂状態が異なる4月と10月の2時期の堤防法面の計測データにICP解析を行った結果を示す。図中の赤色の実線のベクトル(矢印)は、法面を10mメッシュごとに区分けして、各メッシュ内に現れた標高値の変化の平均値を表している。この矢印は、図-14に示すように植生の状況の相違を反映したもので、これより法面自体の変位ではなく、繁

茂している植生の丈の変化を示すものであることが分かった。この図では、調整点を使った平均較差10mm以下の高精度データを使用したが、ICP解析が堤防の微小な変化を明確に可視化できることを実証することができた。

3. 結 言

本報告では実験結果を基にして、グリーンレーザドローンの活用法をとりまとめた次の結果を示した。

(1) 「被災箇所調査」活用のための適用範囲

岡山河川事務所管内の旭川を事例に、水中および陸部の計測能力を検証した。その結果、濁度によらず水深2.0m以上になると計測不可の箇所が存在したため、水害後の被災地では水中部での計測に適用するのは好ましくない一方で、湿潤状態の陸部に対しては、一般に利用されている近赤外線レーザのような欠測箇所は存在せず、被災地の適用には有効である結果が得られた。さらに本研究では、自己位置を取得する技術を導入することにより、調整点無しでも「被災状況把握」および「被災箇所形状把握」に必要な300mmと100mmの計測精度を得ることを可能にした。

(2) 「災害復旧」活用のためのデータ整理法

複数の時期のデータから変状発生箇所を特定する処理に人的労力を要し、ドローン計測の利点が発揮できない課題があった。そこで本研究は、2時期のレーザー点群から変状発生箇所を抽出する解析手法の開発に取り組んだ。その結果、汎用化されたアルゴリズムにより、発生した変状箇所を高精度で抽出できる処理を実現させた。

以上、「堤外」の「被災箇所調査」あるいは「災害復旧」のための計測への活用するための水陸両用ドローンの使用法および解析手法の研究成果を成果をとりまとめ、ドローン計測の長所を生かした活用方を考察した。今後実践することで、河川管理のDXを進める予定である。

謝辞：本論文は、国土交通省中国地方整備局岡山河川事務所と岡山大学との連携包括協定により実施された研究成果に基づいたものです。ここに関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課 河川保全企画室：河川管理用三次元データ活用マニュアル(案)，pp.430-463，2020..
- 2) 森元こより，富田紀子：河川管理用3次元レーザー点群データの活用法の開発，第72回中国地方技術発表会，新技術部門，No.6，2021.

衛星画像を用いた地盤沈下の精密監視 ～国家座標管理への衛星画像活用に向けて～

古居 晴菜¹・三木原 香乃¹・市村 美沙¹・雨貝 知美¹
石本 正芳¹・佐藤 雄大¹・小林 知勝²

¹国土地理院 測地部 宇宙測地課 (〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番)

²国土地理院 地理地殻活動研究センター 宇宙測地研究室 (〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番) .

国土地理院では、公共測量をはじめi-Constructionや位置情報サービス等の様々な分野で高精度な位置情報が利活用できるよう、国の位置の基準である「国家座標」を管理している。地殻変動が活発な我が国で「国家座標」を維持するためには、地表の動きを常に把握する必要がある。このため、衛星画像を用いて従来より高い計測精度で地殻変動を把握できる干渉SAR 時系列解析の導入を進めている。全国を対象とした解析に先立って干渉SAR時系列解析を火山監視に導入し、その有効性を確認した。本発表では、全国解析に向けた精度評価として、地盤沈下地域において水準測量と干渉SAR時系列解析の結果を比較したので、その概要と結果を報告する。

キーワード だいち2号, ALOS-2, 干渉SAR, 干渉SAR時系列解析, 地盤変動

1. はじめに

国土地理院では、公共測量等の測量分野のみならず、i-Construction, ドローン, 位置情報サービス等の様々な分野において安心して位置情報を利活用できるよう、国の位置の基準である「国家座標」を管理している。地殻変動が活発な我が国で、いつでも・どこでも・誰でも高精度で使いやすい「国家座標」が得られるようにするためには、地表の動きを常に把握し、「国家座標」の基準日に合わせて位置を補正する必要がある。国土地理院では、GPSや準天頂衛星システム等のGNSSの連続観測点である電子基準点により高精度に地表の動きを監視してきた。加えて、限られた数の電子基準点では捉えきれない局所的で複雑な地表の動きを広域で監視するため、宇宙航空研究開発機構(JAXA)が運用している陸域観測技術衛星2号「だいち2号」(ALOS-2)に搭載された合成開口レーダー(SAR)のデータを用いたSAR干渉解析によって、日本全国の地殻変動の定常的な監視も行っている。

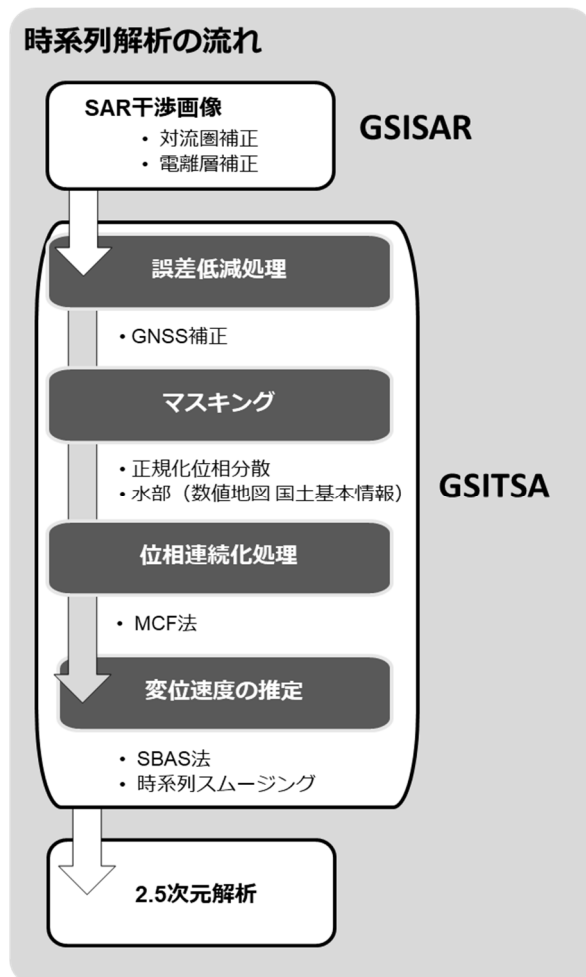
SAR干渉解析は、異なる2時期に観測されたSARデータに含まれる電波の位相差を計算することにより、2回の観測間に発生した地表変位を計測できる技術である。SAR干渉解析では数cmの地表の変位を面的に高い空間分解能で把握することができるため、地震や火山噴火等の時間スケールが短く変動量が大きな地殻変動を把握するのに有効な手法として、1990年代後半から広く使用さ

れるようになった。しかし、SAR干渉解析により得られる結果(SAR干渉画像)には、地表の散乱状態の変化(植生等)に伴う誤差や対流圏擾乱(主に水蒸気)に伴う誤差、電離層擾乱に伴う誤差等の様々な誤差が含まれるため、平時の火山活動や地盤沈下等の時間スケールが長く微小な変動の検出が困難であった。

一方、多数のSAR干渉画像を統計的に処理しSAR干渉画像に含まれる誤差を低減することで計測精度を向上させる干渉SAR時系列解析(以下「時系列解析」という。)は、年間数mm程度の速度で進行する微小な定常変動も検出可能であるため、SAR干渉解析では検出が困難であった平時の火山活動や地盤沈下等の監視への利用も期待される。この時系列解析を行うためには多くの観測データを必要とするが、2014年5月の打上げから現在に至るまでのALOS-2による観測データの蓄積により、時系列解析を実行することが可能となっている。さらに、ALOS-2の後継機である先進レーダ衛星「だいち4号」(ALOS-4)ではALOS-2に比べ約5倍の観測頻度となり、より短期間で時系列解析を行うのに十分なデータが取得可能となることから、時系列解析の有効性が高まることが期待されている。

そこで国土地理院では、全国の地殻・地盤変動の監視、さらには測量の基準の維持・管理に活用することを目的として、定常的な時系列解析の実施に向けた取組を進めている。全国解析に向けた取組の前段階として、時系列解析を用いた国内の火山地域の地殻変動監視を2021年から開始し、従来のSAR干渉解析では検出が困難であった微小

な変動を検出するなど、火山監視における時系列解析の有効性を確認した。さらに、対象を国内全域に広げるに当たり、地盤沈下地域で時系列解析の精度検証を行った。対象地域として、地盤沈下が発生していることが知られている千葉県房総半島地域を選定した。この地域における地盤沈下は、地下水のくみ上げ及び水溶性天然ガスの採取を主原因とし、他に地震や圧密などの自然的要因が組み合わさって生じていると考えられている。この地域では千葉県により毎年水準測量が行われており、時系列解析結果と比較可能な十分な水準測量成果の蓄積があることから、精度検証の場に適している。本報告では、時系列解析結果と水準測量の結果との比較による精度検証結果について報告する。



2. 解析手法と観測データ

時系列解析処理の流れを図-1に示す。時系列解析の入力データとなるSAR干渉画像は、国土地理院が開発した干渉解析ソフトウェア「GSISAR」を用いて生成した。干渉画像を生成するために用いた観測は北行軌道で32回、南行軌道で34回であり、垂直基線長200m以内、観測間隔730日以内の干渉ペアについて干渉解析を行った（表-1）。各干渉画像には、数値気象モデルを用いた対流圏遅延誤差低減処理¹⁾、Range Split-Spectrum 法²⁾による電離層遅延誤差低減処理を適用した。次にこの入力データに対して、国土地理院で開発した干渉SAR時系列解析システム「GSITSA : GSI InSAR Time Series Analysis」³⁾を用いて、誤差低減処理としてGNSSを使用した長波長補正⁴⁾を適用した。続いて正規化位相分散（隣接する領域内の位相のばらつきを示す指標）に基づくマスクによって干渉画像内の品質の悪いデータを除外し、さらに水部マスクを適用することで水域のデータも除外した。これらの処理を行い得られた干渉画像についてMCF法⁵⁾によって位相連続化処理を施すことで干渉画像の位相データを変位量に変換し、最後に森林地域の多い日本の国土の変動を詳細に把握するのに適した位相最適化処理（SBAS法⁷⁾）を行うことで、各観測日の変位量と観測期間における変位速度を推定した。また、SBAS法に時間方向のスムージング処理を組み込むことで、SAR干渉画像に対する誤差低減処理では十分に低減できなかった誤差の影響を抑えている。

続いて、干渉SAR時系列解析で得られた衛星-地表視線方向の変位速度を用いて2.5次元解析⁹⁾を行った。2.5次元解析は、北行軌道による西側上空からの変位速度と南行軌道による東側上空からの変位速度を用いて、準東西方向と準上下方向の変位速度を算出する手法である。本解析により、準上下方向の変位速度を求めた。

表-1 解析に使用した観測データ

衛星進行方向	北行	南行
観測期間	2014-09-09 /2022-03-15	2015-01-15 /2021-03-03
電波照射方向	右	右
電波照射方位	東	西
観測モード	U*	U*
偏波	HH	HH
データ数	32	34
干渉ペア数	170	158
ルック数	16	16
垂直基線長の上限	200 m	200 m
観測間隔の上限	730 日	730 日
冬季データ	含む	含む

*U：高分解能（3m）モード

比較に用いた水準測量成果は、千葉県が地盤変動状況を把握するために毎年実施し、千葉県のホームページで公開している成果を使用した¹⁰⁾。使用したのは時系列解析の解析範囲内にある458点の水準点における2015年から2021年までのデータである。このデータを用いて変位速度を求めた。

3. 結果

(1) 時系列解析

時系列解析によって得られた衛星-地表視線方向の変位速度を図-2に示す。ほとんどの地域が変位速度が0に近いことを示す緑色で表されているが、地盤沈下地域として知られる八街市周辺、茂原市周辺及び睦沢町周辺において、北行軌道・南行軌道の両方で、衛星から遠ざかる変動が検出された。八街市周辺において検出された平均変位速度は北行軌道で最大約2.1 cm/年、南行軌道で最大約1.8 cm/年であった。茂原市周辺においては北行軌道で最大約1.7 cm/年、南行軌道で最大約1.2 cm/年、睦沢町周辺では北行軌道で最大約1.7 cm/年、南行軌道で最大約1.1 cm/年の変位速度がそれぞれ検出された。

(2) 2.5次元解析

2.5次元解析によって得られた準上下方向の変位速度を図-3に示す。八街市周辺、茂原市周辺及び睦沢町周辺において見られた衛星から遠ざかる変動は、地表が沈降したことによるものであることが分かった。八街市周辺における沈降速度は最大約2.1 cm/年であり、変動域は長径約17 km、短径約8 kmで東北東-西南西方向に伸張する分布をしている。茂原市周辺における沈降速度は最大約1.5 cm/年であり、八街市周辺における沈降速度は最大約1.5 cm/年であった。

(3) 2.5次元解析結果と水準測量成果の比較

2.5次元解析によって得られた準上下方向の変位速度を横軸に、水準測量から算出した鉛直方向の変位速度を縦軸にとった散布図を図-4aに示す。相関係数は0.96で正の相関を示し、回帰直線の傾きは1.05であった。また、水準測量から算出した変位速度から準上下方向の変位速度を引いた差の分布(図-4b)は、平均較差は0.19 cm/年、標準偏差は0.13 cm/年でほぼ正規分布をしていた。

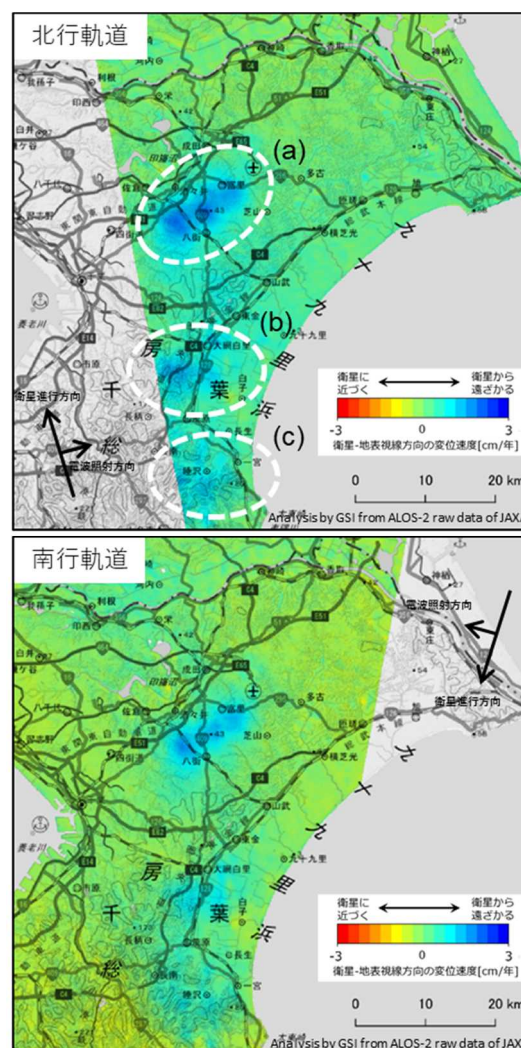


図-2 干渉 SAR 時系列解析結果。上図は北行軌道による衛星-地表視線方向の変位速度、下図は南行軌道による衛星-地表視線方向の変位速度。(a)は八街市周辺、(b)は茂原市周辺、(c)は睦沢町周辺。

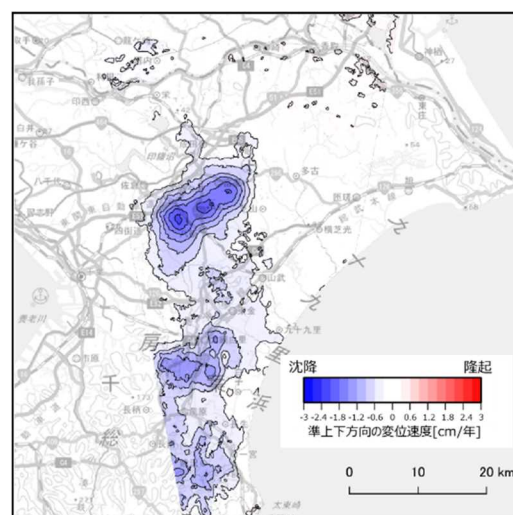


図-3 2.5次元解析の結果(準上下方向の変位速度)

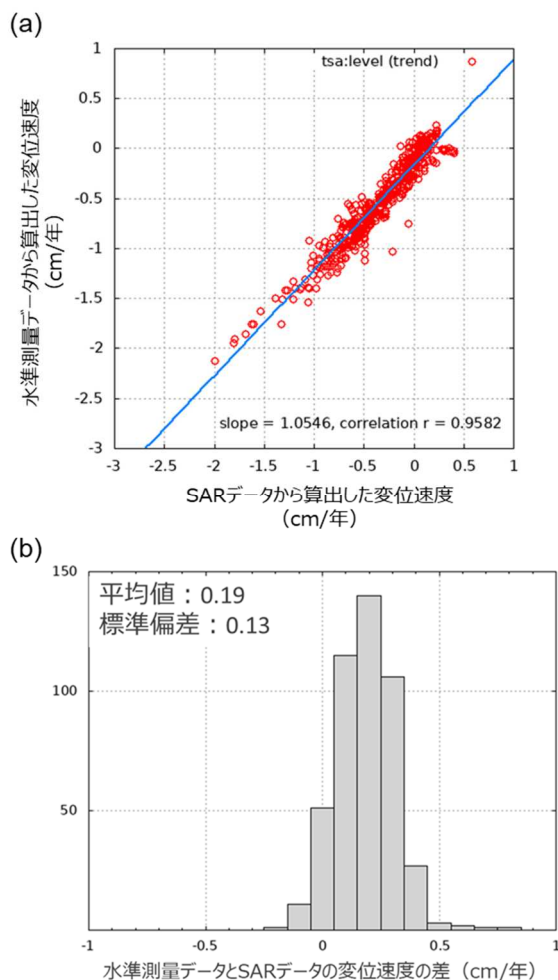


図-4 水準測量成果と時系列解析の比較。(a)は各水準点における変位速度と同地点における準上下方向の変位速度の散布図、(b)は各水準点における変位速度と同地点における準上下方向の変位速度の差のヒストグラム。

4. 考察

2.5次元解析から算出された準上下方向の変位速度と水準測量成果から算出された変位速度の比較から、相関係数が0.96、回帰直線の傾きが1.05であり、両者の結果は整合的であることが分かった。本解析によって、時系列解析の精度が国家座標などの測定の基準の維持管理や、地盤沈下調査などの空間分解能の向上に活用できる水準であるということが示された。時系列解析と水準測量の結果に見られる較差については、較差の分布がほぼ正規分布でありかつ標準偏差が0.13とばらつきが小さいことから、系統的なものであると予想される。この系統差を補正する方法あるいは考慮した活用方法の検討が必要である。

5. まとめ

国土地理院では、「国家座標」の維持管理の高度化に向け、多数のSAR干渉画像を統計的に処理する時系列解析の検討を進めている。この解析手法の精度を検証するため、地盤沈下が生じていることが分かっている千葉県房総半島において、水準測量との比較を行った。その結果、時系列解析の結果は水準測量成果と非常に整合的であり、時系列解析が十分な精度を有することが確認された。これを受けて現在国土地理院では全国を対象とした時系列解析を開始しており、解析が完了した北海道地域の結果を先行して2022年6月27日に地理院地図において公開した。他の地域についても順次公開予定である。

さらに、ALOS-2の後継機であるALOS-4の高頻度観測データを活用した「国家座標」の維持管理について検討を進めていく。

謝辞：本研究で用いたALOS-2データは、「陸域観測技術衛星2号観測データ等の高度利用に関する協定」を通じて宇宙航空研究開発機構（JAXA）から提供を受けた。原初データの所有権はJAXAにある。数値気象モデルは「電子基準点等観測データ及び数値予報格子点データの交換に関する細部取り決め協議書」に基づき、気象庁から提供を受けた。

参考文献

- 1) 小林知勝, 石本正芳, 飛田幹男, 矢来博司 (2014) : SAR 干渉解析のための数値気象モデルを用いた大気遅延誤差の低減処理ツールの開発. 国土地理院時報, 125, 31-38.
- 2) Gomba, G., A. Parizzi, F.D. Zan, M. Eineder and R. Bamler (2016): Toward operational compensation of ionospheric effects in SAR interferograms: The split-spectrum method, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 54, 1446-1461.
- 3) 小林知勝, 森下遊, 山田晋也 (2018) : 干渉 SAR 時系列解析プロトタイプシステムの開発. 国土地理院時報, 130, 123-133.
- 4) Kobayashi, T., Tobita, M., Nishimura, T., Suzuki, A., Noguchi, Y., and Yamanaka, M. (2011): Crustal deformation map for the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, detected by InSAR analysis combined with GEONET data, Earth Planets Space, 63, 621-625.
- 5) 飛田幹男, 宗包浩志, 松坂茂, 加藤敏, 矢来博司, 村上亮, 藤原智, 中川弘之, 小澤拓 (2005) : 干渉合成開口レーダの解析技術に関する研究. 国土地理院時報, 106, 37-49.
- 6) Costantini, M. (1998): A novel phase unwrapping method based on network programming, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 36, 813-821.
- 7) Berardino, P., G. Fornaro, R. Lanari and E. Sansosti (2002): A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 40, 2375-2383.
- 8) 林京之介, 山下達也, 桑原将旗, 本田昌樹, 酒井和紀, 宗包浩志, 小林知勝 (2019) : 干渉 SAR 時系列解析による日本全国の地盤変動監視に向けた取り組み. 日本地球惑星科学連合 2019 年大会, STT45-P10.

- 9) Fujiwara, S., Nishimura, T., Murakami, M., Nakagawa, H., Tobita, M., and Rosen, A. P. (2000): 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry, *Geophysical Research Letters* 27, 2049-2052
- 10) 千葉県水準測量成果表, (更新日 2021 年 11 月 29 日), <https://www.pref.chiba.lg.jp/suiho/jibanchinka/torikumi/seikaomote.html>.

令和2年7月豪雨災害復旧工事におけるDX

樺嶋 恭平

九州地方整備局 八代復興事務所 工務第一課 (〒866-0824 熊本県八代市上日置町4478-1)

令和2年7月豪雨災害により甚大な被害が発生した球磨川とその支川を対象に、九州地方整備局では現在も掘削工事、護岸復旧工事を急務として進めている。しかしながら、広範囲に点在する工事現場の監督業務においては、職員の人出不足、工事現場への長距離移動に伴う多大な移動時間、工事車両における交通事故等の安全管理が大きな課題となっている。

本稿は、その課題に対し、国土交通省が推進している遠隔臨場と、新技術としてNETIS登録されている動態管理システム、この2つのDXを活用することで、課題解決とその先にある働き方改革、子育て参加に取り組んだ内容について報告するものである。

キーワード 令和2年7月豪雨、DX、子育て参加、遠隔臨場、動態管理システム

1. はじめに

令和2年7月豪雨災害では、球磨川やその支流の氾濫により、人命、家屋、堤防に甚大な被害が発生した。

国土交通省九州地方整備局では、八代復興事務所を立ち上げ、県管理施設で被災を受けた橋梁10橋、球磨川沿いの両岸道路約100km、球磨川支川9河川（以下「権限代行支川」という。）にて被災した140箇所について熊本県知事より要請を受けて権限代行工事を実施している。

また、球磨川水系の復旧・治水対策として国、県、市町村等が連携し、「球磨川水系緊急治水対策プロジェクト」として、河道掘削、堤防整備、輪中堤・宅地かさ上げ、護岸復旧等の取り組みが実施される中で、八代復興事務所工務第一課（以下「工務第一課」という。）では

球磨川本川の掘削工事と権限代行支川の復旧工事を中心に取り組んでいる。

被災箇所は広範囲に点在し（図-1）、橋梁や道路の復旧工事も同時に輻輳する中、職員は限られており、さらには新型コロナウイルス感染症対策も求められている。このような環境下で工事現場を監督する立場として、事故なく円滑に工事を進めるためにDXの活用を考えた。

本稿は、遠隔臨場と動態管理システムという2つのDXに特化したシステムを活用することで、災害復旧工事における現場監督業務の効率化と、子育て1年目となる筆者が、仕事と子育て参加の両立を実現した内容となっている。

また、2つのDXの活用についてアンケート調査を実施することで、発注者からの視点だけでなく施工業者の視点についてもその評価を検証した。

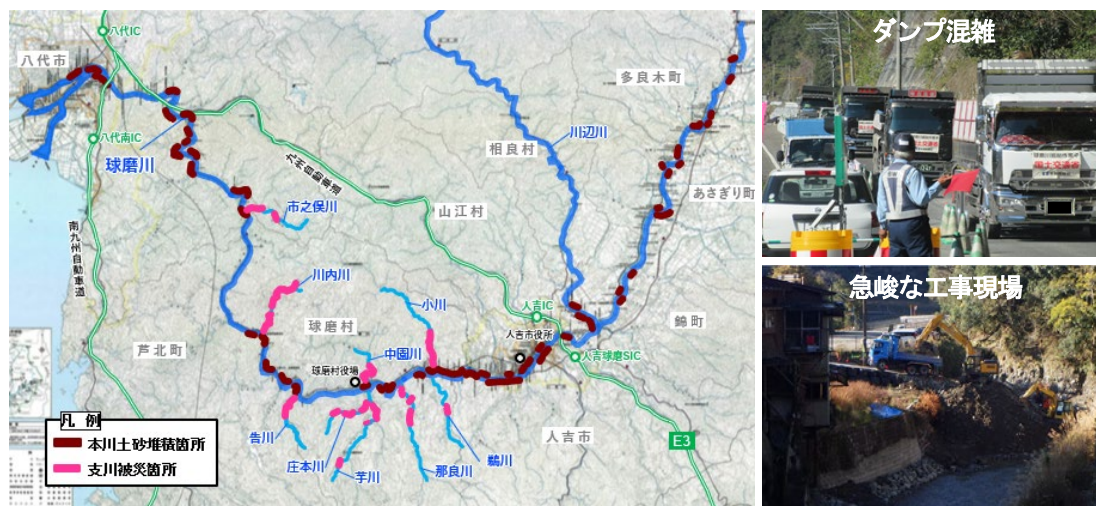


図-1 球磨川流域の被災状況

2. 工事現場での課題

工務第一課の工事現場を監督する職員（以下「監督職員」という。）は、主任監督員1名、監督員1名で八代、芦北、球磨、人吉地区の球磨川本川の掘削工事と権限代行支川9支川のうち8支川の復旧工事の監督を担っている。

最寄りの工事現場まで移動距離が片道26km、移動時間45分、最も遠い工事現場まで片道61km、高速道路を利用して1時間10分を要し、赴任当初は朝8時30分に工事現場へ出発し、戻りは17時、それ以降にデスクワークを行うというスケジュールであった。

また、工事現場で大きく危機感を持ったのは、土砂を運搬するダンプの数であった。ダンプについては、多い日には工務第一課が監督する工事だけで、1日に114台のダンプが平均6往復で行き交っており、通算運行台数は616台に達していた。他にも県や市町村などの工事車両も運行しており、安全管理の徹底が急務であった。

に行くことなく段階確認等が可能となった（写真-1）。



図-2 遠隔臨場の概要¹⁾



写真-1 遠隔臨場の活用状況（その1）

3. 遠隔臨場の活用

広範囲に点在する工事の現場監督を担うにあたって、まず活用したのが遠隔臨場であった。

遠隔臨場とは、動画撮影用のカメラを利用し、遠隔地からWEB会議システム等を介して段階確認、材料確認と立会を行うものである。国土交通省においても2022年3月に実施要領を発表しており、費用について全額国が負担する取り組みを行っている（図-2）。

これを工務第一課が監督する球磨川本川、支川の復旧工事の施工業者とともに組織する「球磨川掘削及び支川災害復旧工事安全協議会」（以下「球磨川安全協議会」という。）において協議し、電波状況が劣悪で使用を断念せざるを得なかった工事現場を除き、12工事のうち10工事で用いることとした。

これによりほとんどの工事において、事務所から現場

また、遠隔臨場の採用事例はそのほとんどが、映像を確認する監督職員側では固定のパソコン、モニターを使用するなかで、今回はタブレットの採用を決定した。

それにより、事務所でしか行うことができなかった遠隔臨場が、移動中や他の工事現場からの実施が可能となり、どこにいても段階確認等が可能となった（図-3）。

さらなるメリットとして、テレワークのためのリモート接続からの閲覧を可能にしたことで、自宅にいながら遠隔臨場が可能となった。

これにより、新型コロナウイルス感染症対策が求められるなかで、そのリスクを最大限に抑えつつ段階確認等の作業が実施できたのである。事実、まん延防止等重点措置の発令により九州地方整備局では職員の7割が出勤回避を求められる事態となったが、その際においても、滞りなく段階確認を実施している。

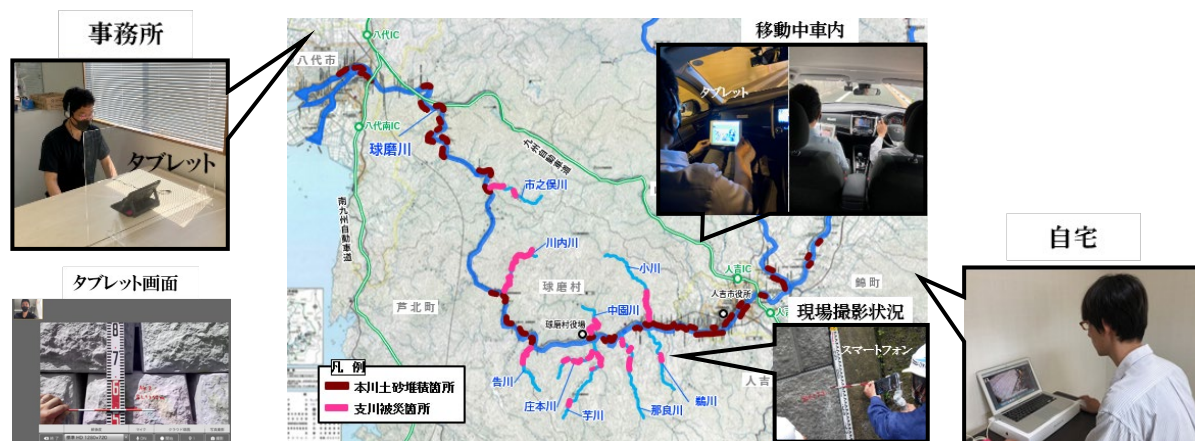


図-3 遠隔臨場の活用状況（その2）

4. 動態管理システムの活用

次に活用したのは、動態管理システムである。このシステムは、支給したスマートフォンをバックホウやダンプといった工事車両の運転手が常備することで工事車両の動態管理を行うNETIS登録された新技術のシステムである（NETIS登録番号：KT-190101-VE）（図-4）。

従来は、施工業者の作業員が自社のバックホウやダンプの運転時に支給されたスマートフォンを常備することでその位置情報を監視し、掘削・積み込みなどの施工性向上に役立てられていた。

筆者らはこのシステムの下記3点の機能に着目し、ダンプの安全管理に最適であると判断した。

- (1) 最大数百台のダンプの位置情報を把握できる
- (2) 走行ルートや速度の履歴を即時確認できる
- (3) スクールゾーンなどの危険箇所を予め設定して運転手に対し自動警報を発報できる

このシステムについても球磨川安全協議会で協議を行い、全社のダンプを登録して動態管理を行うことにした（写真-2）。これにより、工務第一課と各施工業者の現場事務所のパソコンもしくはモニター画面で、全ての施工業者のダンプについてリアルタイムで位置情報を監視できるようになった（写真-3）。施工業者1社の単独使用では把握し得なかった互いの工事車両の接近や混雑状況、車間距離等が、全社登録することにより即座に把握できるようになったのである。

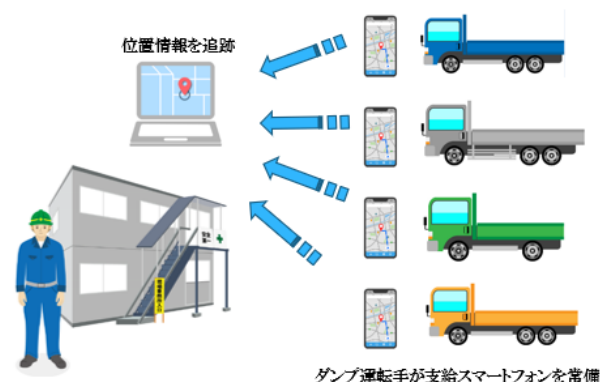


図-4 動態管理システムの概要



写真-2 安全協議会の実施状況

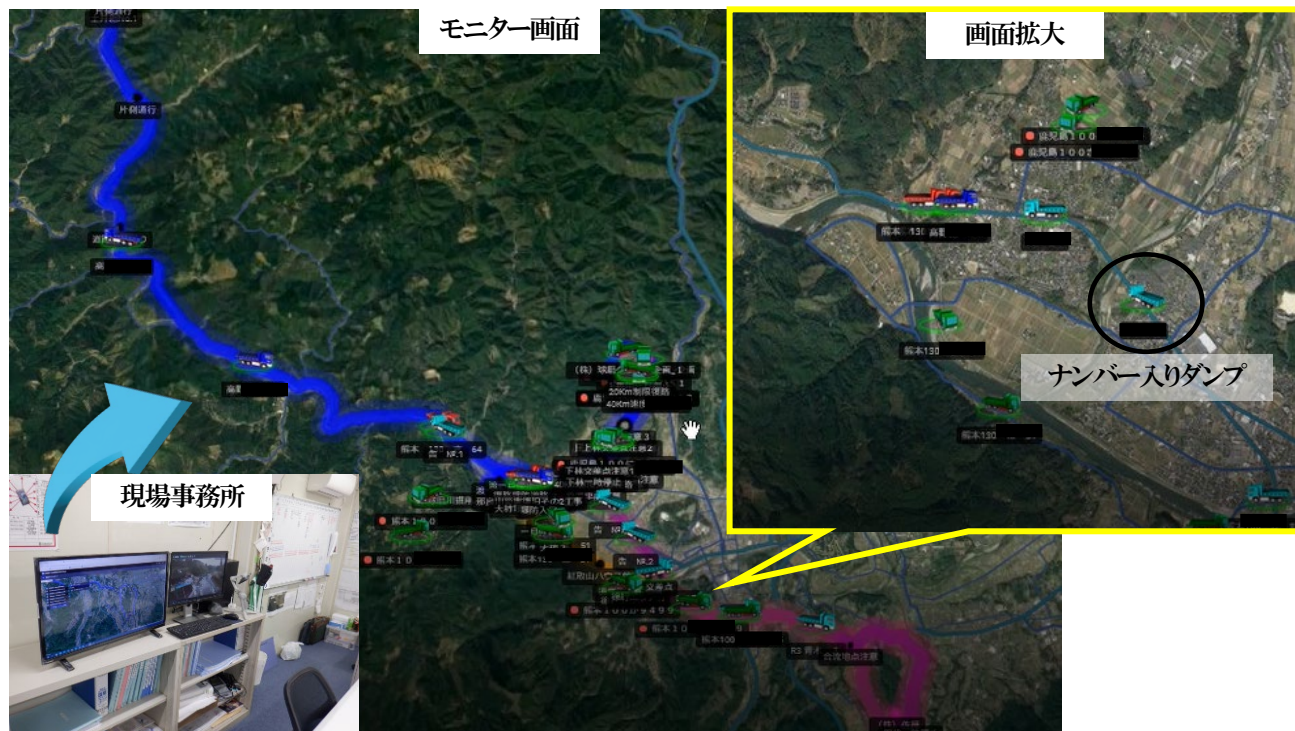


写真-3 動態管理システムのモニター画面

また、予め地図上で危険箇所を設定することにより、ダンプが接近した際に自動警報が鳴って注意喚起を行うことができる。これにより安全性の向上を図ることができた（写真-4）。



写真-4 自動警報のイメージ

5. 活用効果

(1) 施工業者へのアンケート調査

施工業者の視点からどのような評価を受けているのか、アンケート調査を行った。動態管理システムについては、元請け業者だけでなく、実際に運転を行っているダンプ運転手の皆様にもアンケート調査を実施している。調査には遠隔臨場について現場代理人、監理技術者を含む施工業者の元請け18名、動態管理システムについては元請け20名、ダンプの運転手61名にご協力頂いた。

図-5～7にこの結果を示す。これによると、遠隔臨場は、工程短縮と労力削減に大きく貢献していることが分かる。工程短縮と労力削減についてメリットが「あった」「ややあった」と回答した方の意見としては、「予定を立てやすく、工事現場での待ち時間を無くすことができた」「急ぎで確認してもらいたいときに助かった」などがあった。反対に「あまりなかった」「なかった」と評価した方の意見としては、「通信電波の不通により通信できない箇所がある」など、電波状況に関する指摘が多かった。

また、動態管理システムでは、安全管理に大きく貢献していることが分かる。元請けでメリットが「あった」「ややあった」を回答した方の意見としては「スクールゾーン等の危険箇所を事前に把握できるのがよかった」「ダンプの位置情報が分かることで施工管理の計画が立てやすかった」などがあった。反対に「あまりなかった」「なかった」と評価した方の意見としては、「費用が高い」という意見が挙げられていた。

動態管理システムの運転手の評価については、安全面の評価が非常に高かったが、工程短縮と労力削減の面においても「お互いの位置情報がわかることで、狭い場所での離合を回避することができた」「休憩場所の混雑状

況が把握できることで、休憩の場所や時間を調整しやすかった」など、運行業務が効率化していると評価する意見が多く挙げられていた。反対に「あまりなかった」「なかった」と評価した方の意見としては、「見張られている感じがする」「無線に慣れている」「スマートフォンの返却が面倒」などが挙げられていた。

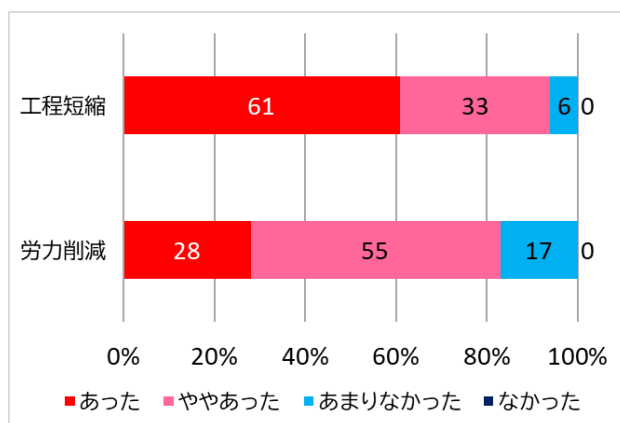


図-5 遠隔臨場の導入メリット

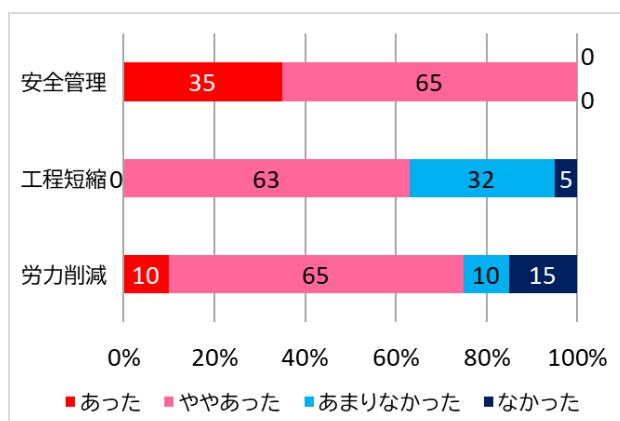


図-6 動態管理システム導入メリット
元請け

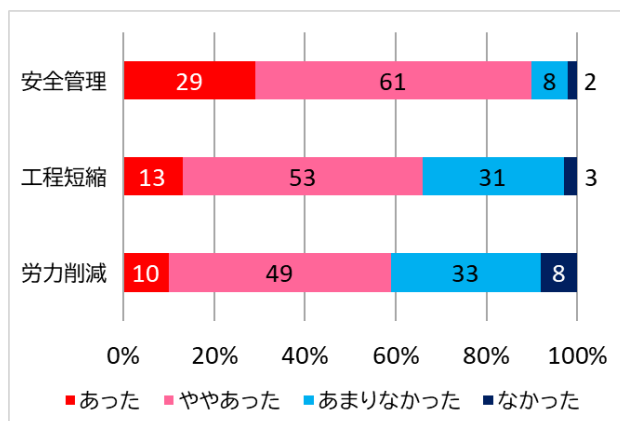


図-7 動態管理システム導入メリット
運転手

(2) 監督職員における時短効果

遠隔臨場について、具体的にどの程度の移動時間を削減できているのか、その時短効果について各工事現場への往復の移動時間と遠隔臨場を実施した回数を基に算出を行った。

その結果、遠隔臨場を採用した2021年6月から2022年6月の約1年間で、合計7920分、時間に直すと132時間、1日当たり8時間の労働時間で換算すると、16.5日の移動時間を削減できていることがわかった。これを子育て参加の観点から考えると、九州地方整備局で男性職員が取得できる育児のための特別休暇は、配偶者出産休暇が2日、育児参加休暇が5日の合計7日であるので、2人以上の休暇取得に値する時間について、時短を図れていることがわかった。

動態管理システムにおいても、今まではダンプの運行状況を確認するには施工業者へ聞き取りするしか方法がなく、地元からの通報や苦情が入った際も該当車両の特定は困難であり、迅速な対応が取れないことが多かった。また、渋滞しそうな場所でダンプが連なっていないか、指定外の待機場所にダンプが待機していないかなどを確認する際も、これまでは直接現地に出向くしか方法がなく、現場が遠隔地の場合は大きな負担となっていた。

しかし、走行ルートや速度の履歴を即座に確認できるこのシステムにより、地元からの通報や苦情が入った際にすぐに特定、対応可能な体制を構築できた。また、事務所のパソコンでダンプの運行状況が確認可能となったことで直接現地に出向いて確認する必要もなくなり、監督職員の大きな負担軽減となった。

(3) 労働災害発生状況

熊本労働局人吉労働基準監督署の調査によれば、2020年、2021年の土木工事業にける労働災害の発生件数は前年度と比較して増加しており、例年より高い水準にある

(図-8)。また、前述したように球磨川安全協議会の工事現場は災害復旧のために工事が輻輳している。それに関わらず、DXを活用した球磨川安全協議会の工事では、労働災害の発生件数はゼロとなっている。これについても、DXを活用した大きな効果の表れと考えている。

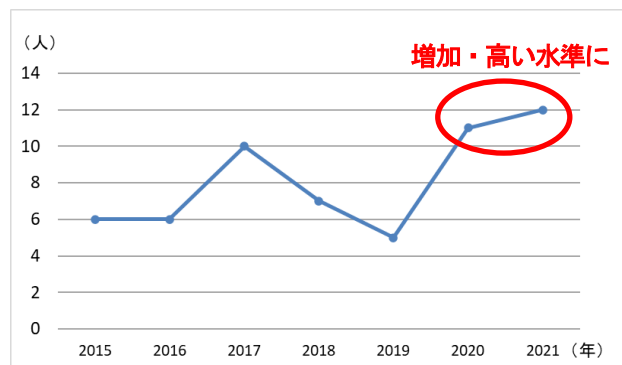


図-8 人吉球磨管内の労働災害発生状況（土木工事業）²⁾

6. 今後の課題

遠隔臨場の課題としては「通信電波の不通により通信できない箇所がある」など、電波状況に関する指摘が多かったが、その改善策としては、衛星通信などを活用した電波環境の改善が考えられる。

動態管理システムの課題として挙げられていた「スマートフォンの返却が面倒」については、システムをアプリ化することで、私物の携帯を活用できるようにするなどの改善策が考えられる。

いずれもシステム改善に係る内容なので、メーカーにこのアンケート結果とそれで明確になった課題について共有を行った（写真-5）。

動態管理システムについて「費用が高い」という指摘があったが、このシステムは遠隔臨場と違い費用は施工業者の負担となる。施工業者1社当たりの費用負担は、初期費用が16万円、スマートフォンに使用料やデータ管理料などの月々の費用が20万円/月である。これは難しい課題ではあるが、前述した通り今回の現場環境下では交通事故発生リスクが非常に高かったと考えられることから、ダンプ事故による第3者被害を未然に防いだと考ええると決して高い金額ではない。また、本書のように公開される実績を残すことで、多くの方の目に触れてシェアが広がり、メーカーの利益率が上がることで、多くの施工業者の手の届きやすい価格になることを期待する。



写真-5 メーカーとの打ち合わせ状況

7. DXによる働き方改革と子育て参加の成果

冒頭で述べたように、筆者は子育て1年目の1児の父親である。家庭は共働きであり、妻の育児休業が完了するまでに働き方改革を実施し、子育て参加と仕事の両立を図ることが急務であった。前述2つのシステムを活用したDXの取り組みにより、業務の効率化を実施したことで、新たな業務に取り組めるようになっただけでなく、

週1回のテレワークとフレックスタイム勤務による遅出勤が可能となり、子供を週3回保育園へ送ることができるようになった（図-9）。もちろん、これは職場の方々の協力の下で実現できていることだが、これを可能にしたのは前述2つのシステム活用である。これについても、1つの家庭にもたらしたDXの成果といえる。

この成果は、忙しいと敬遠されがちな災害復旧の職場について、DXを活用することで仕事と家庭を両立させられるというイメージアップにも繋がる。

月曜	テレワーク	保育園送り
火曜	9:30～	保育園送り
水曜	9:00～	
木曜	9:00～	
金曜	9:30～	保育園送り



図-9 保育園の送り

8. 今後の予定

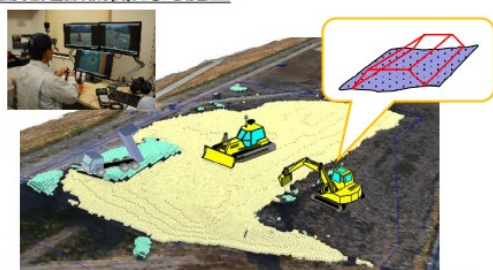
まだ工事は継続中であり、権限代行支川の工事については2022年度完了を目指して鋭意復旧工事に取り組んでいる。

球磨川本川の河道掘削については、被災直後より緊急的に河川内の堆積土砂を掘削しているが、今後も「球磨川水系緊急治水対策プロジェクト」に基づき流下能力向上を図るために工事を継続していく予定である。

国土交通省では2022年3月に「インフラ分野のDXアクションプラン」を発表しており、建設機械の自動化・遠隔化など今後の工事の中でも活用が期待できる様々なDXを推進している（図-10）。

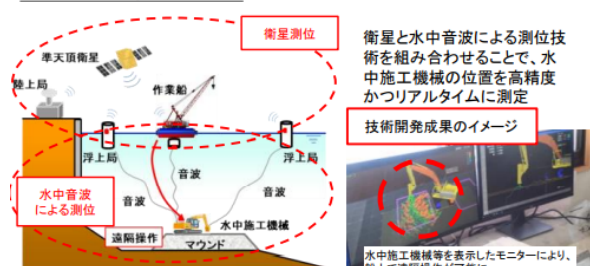
今後も工事を継続していくことから、前述2つのDXの活用はもちろん、施工業者と連携を図り、工事現場の状況に応じて前述の「インフラ分野のDXアクションプラン」にあるようなシステムの活用を積極的に検討し、創意工夫を重ねながら事業を進めていく。

自動化建設機械による施工



自動化建機と遠隔化建機の組合せで1人で複数の建機を稼働
3次元設計データを活用することで丁張りも不要

水中施工の遠隔化・無人化



▶ 水中施工機械の遠隔化・無人化により海象条件に左右されない水中施工を実現
▶ 遠隔化・無人化による潜水士の負担軽減、安全性の向上

図-10 「インフラ分野のDXアクションプラン」抜粋³⁾

9. 終わりに

災害復旧事業は、早期復旧が求められることから時間も人も限られているなか常に多くの課題を解決する必要がある。だからこそ、切迫した災害の工事現場では効率的な業務遂行に向けたDXが必要とされ、新たな方法やその価値が見いだされるチャンスも多く存在する。新しいシステムを製作する時間はないことから、既存のシステムをいかに活用するかが重要であり、どんなシステムも使い方次第でメリットは大きくなる。

また、どのようなシステムを活用するにしても施工業者との連携は不可欠である。今回は、複数の施工業者と共に労働災害防止の理念のもとに球磨川安全協議会を組織し、2つのDXを用いて互いに協力、監視を行いながら安全管理に努めてきた。これらのシステムの効果を発揮できたのは、球磨川安全協議会の施工業者の皆様がシステム採用の提案に賛同していただいたからであり、感謝している。

また、今回のような大規模災害での活用事例は得られる機会が非常に限られていることから、実績はしっかりとした形で残す必要がある。そして、その実績をもとに新たな災害が発生した際に活用が図られて次のDXへと繋げることができる。それが私たちだけでなく、必ず後世の「働き方」に影響すると考えられる。

謝辞：今回の取り組みにあたりご助言をいただいた上司の方々、並びにアンケート調査にご協力いただいた皆様に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省：
建設現場における遠隔臨場に関する実施要領（案）
- 2) 熊本労働局人吉労働基準監督署：
管内（人吉球磨）の労働災害状況
- 3) 国土交通省：
インフラ分野のDXアクションプラン（別冊）アクションプランに位置付ける個別施策集

AI 解析を活用したトンネル肌落ち予測システムの開発と水資源機構事業への技術展望について

池内 晃¹ ・ 桜井 剣² ・ 秋山 健³

¹(独)水資源機構 香川用水管理所 施設管理グループ (〒766-0004 香川県仲多度郡琴平町榎内 891-2)

²(独)水資源機構 豊川用水総合事業部 新城支所長 (〒441-1338 愛知県新城市一鉄田字西浦 7-2)

³(独)水資源機構 豊川用水総合事業部 新城支所 第一工事課長 (〒441-1338 愛知県新城市一鉄田字西浦 7-2)

豊川用水二期大野導水併設水路工事は、施工延長約 6km の 長大な水路トンネル工事で、切羽付近での支保工作等々に有利な「改良オープン型 TBM」を採用したが、地山条件から掘削直後の肌落ちが想定され、工事工程への影響の最小化および岩塊崩落に対する安全対策が喫緊の課題であった。そこで、既往掘進データ等を AI により分析、肌落ちが発生しやすい特徴を抽出するとともに、「肌落ち予測システム」として構築した結果、肌落ち予測正答率は 73%に及び、工事進捗と安全管理に大きく貢献した。

本稿では、肌落ち予測システムの作成過程とトンネル現場における実用効果の報告並びに今後の展望について提言するものである。

キーワード TBM 工法、AI、肌落ち、リスク管理、切羽

1. はじめに

豊川用水は、愛知県東三河地域及び静岡県湖西地域の生命線と呼ばれ、約 17,500ha の優良農業地帯、総額 6 兆円を超える工業生産、約 73 万人の市民生活を支えており、万が一通水停止した場合の影響は計り知れない。

現在、豊川用水二期事業の一環として、幹線水路の複線化・強靱化、耐震性を有する併設水路の新設を進めており、大野頭首工から東西分水工までの間を大野導水併設水路工事(以下、「本工事」という)として施工している(図-1)。

本工事区間は、豊川用水幹線水路の最上流部に位置し、施設規模は最大、全線山岳部で全長約 6km に及ぶ長大トンネルとなることから、コスト面、工事難易度等から二期事業の成否を握るものとされ、詳細検討の結果、機構水路系事業初となる TBM 工法を採用した。

TBM 工法は、長大トンネルにおいて施工性、経済

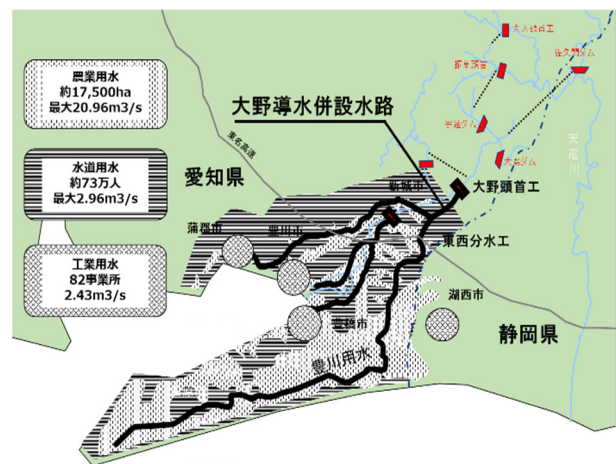


図-1 大野導水併設水路工事位置図

性に優れるが、切羽から想定以上の岩塊崩落(以下、「肌落ち」という)が発生した場合には坑内作業員への危害、処理作業中の掘進停止等のリスクに留意する必要がある。更に本工事区間は、緑色片岩と泥質片岩の互層を成し、片理が発達する地山では肌落ちの危険性が十分想定されるものであった。

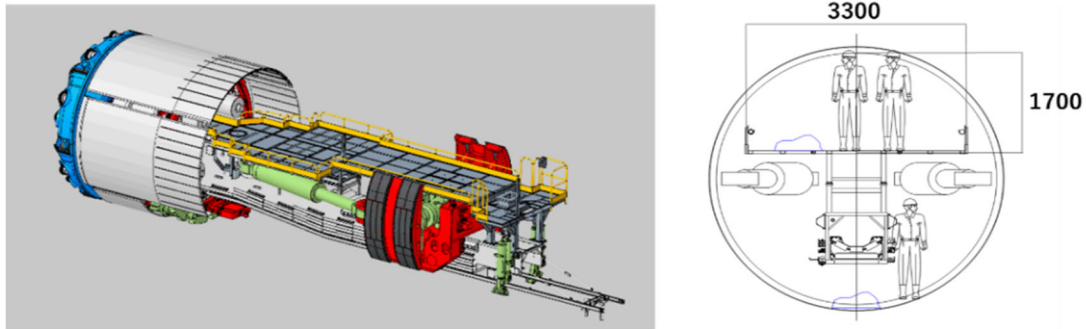


図-2 改良オープン型 TBM イメージ

以上より、本工事を安全かつ着実に施工するためのポイントは、まず第一に肌落ちの発生を正確に予測することであり、次に予測を前提とした対策を綿密に実践することであった。肌落ちの発生予測に関する研究事例は、NATM 工法において高速カメラを用いた落石検知の試み^{*1}があるが、TBM 工法では希有であり、未知の領域といえる。本稿では、掘進データ等を AI により分析、「肌落ち予測システム」として構築した過程と当該システムの実用効果を報告するものである。

2. 本工事の特徴と課題

事前の地質調査結果によると、本工事区間の地盤強度は比較的硬質であるが、全路線(6km)の地質は一様でなく、河川との交差箇所等の不良地山区間が1%存在すると想定されていた。このため、地質状況に応じて TBM 先端部の掘削面(以下、切羽という)近傍で支保工や補助工法を施工する必要があり、切羽から 5m 後方の支保作業スペースを確保しこれらの作業を可能とする「改良オープン型 TBM」を採用している(図-2)。

また、概ね全路線で緑色片岩および泥質片岩の互層を成していること、いずれも片理が発達していると推定され、岩同士の付着力が弱い区間において肌落ち(写真-1)が発生することが予見された。肌落ちにより、支保作業スペースに岩塊が堆積すると、その処理作業が必要となる。更に肌落ちが拡大する場合は TBM の掘進停止を余儀なくされ、今後の工事



写真-1 肌落ち状況

工程に多大な影響を及ぼすこととなる。なお、切羽を直接視認できない TBM 工法において、オープン区間の小規模な崩落や肌落ちを完全に予測することは困難であり、一方で、肌落ちを未然に防止する補助工法(全面的な地盤改良)の施工は費用と時間を要する。このため、掘進にあたっては、肌落ちのリスク管理として、岩強度や地質分布等のデータを一元管理し将来起こりうる地質変化を予測する手法が一般的である。

あわせて、肌落ちによる坑内作業員への危害防止の観点からは、支保作業時は切羽監視員が肌落ちや崩落の兆候を常に監視し、危険が予見された場合は直ちに作業員に避難を促す手法を執ってきた。

しかし、本工事の断面規模からオープン区間は狭く、かつ機械音が大きいため、肌落ちの危険性をわかりやすく、確実に周知する方法を見いだす必要があった。不良地山、小断面掘削、支保作業等の制約があるなかで、本工事を安全かつ着実に進捗させるには、肌落ちリスクの回避、最小化が最重要課題であった。

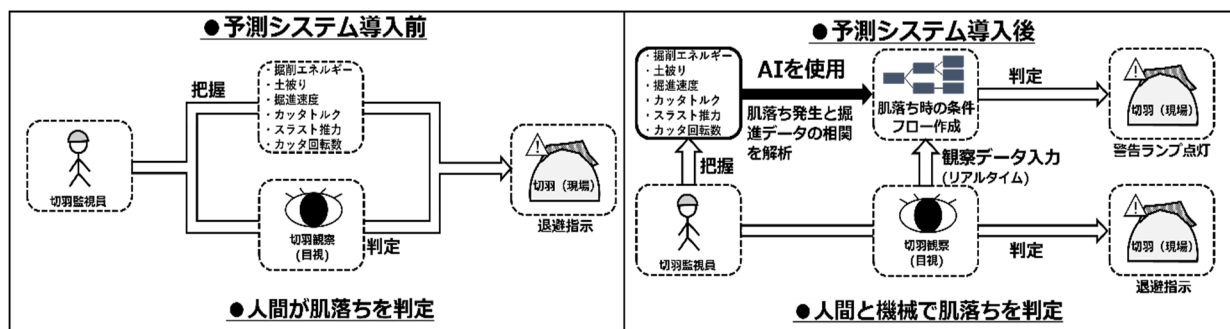


図-3 肌落ち予測システム概要図

本検証では、これまでの肌落ちを予測する手法を進化させ、肌落ちの指標抽出に AI を活用した予測システムとして構築するとともに、肌落ち予測に連動した警告ランプを試行的に設置し、その効果を実証した。

3. AI を駆使した肌落ち予測システムの構築

(1)「肌落ち予測システム」の構築手順

従前(AI 導入まで)は、以下の手法で肌落ちの予測をしていた(図-3)。

- ① 事前地質調査等の初期設計の一元化
- ② 掘削体積比エネルギー等の掘進データ追加による地質情報の更新
- ③ ①および②のデータを参考に、切羽監視員が現場状況を判断し、坑内作業員の退避指示、追加資材の準備を指示

更に、AI の導入により以下の手順を追加した。

- ④ AI による肌落ち時の指標の抽出と判定フローチャート(以下、「肌落ちフロー」という。)の作成
- ⑤ 肌落ちフローに施工時のズリ形状等をリアルタイムで反映させ、肌落ちが予測された場合は自動的に坑内の警告ランプが点灯(写真-2)

(2)機械学習方法と肌落ち判定方法について

今回の AI 導入に当たっては、重回帰分析による機械学習を採用した。重回帰分析は、過去のデータの傾向から将来の事象を予測するものであり、特徴として予測結果は一次方程式で表わされること、各



写真-2 警告ランプ設置状況

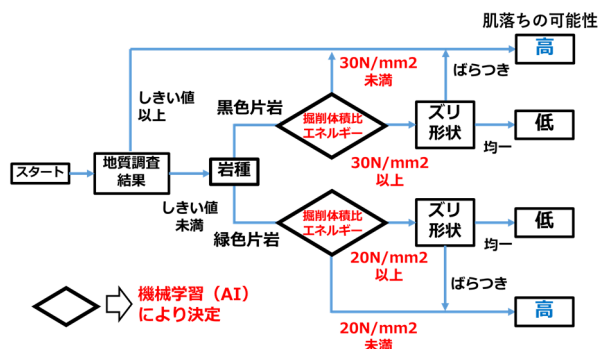


図-4 肌落ちフロー

変数の予測結果への影響度が確認可能であることが挙げられる。

また、機械学習により肌落ちの発生が予測される指標を抽出し、この指標を参考に、人間が肌落ちフロー(図-4)を作成した。

肌落ちフローによる判定方法は、近年建設業界にも導入されている深層学習と比較して判断の過程を確認しやすく、リスク管理においては判定過程が見えない深層学習より分かりやすい。また、予測結果の妥当性を分析することにより今後の予測精度の向

上にも繋がるため、フローでの判定により予測を行うこととした。

(3) 肌落ち予測指標の設定

本検証では肌落ちの予測指標を以下の4点とした。この内、機械学習を実施した③については、トンネル全長約 6000m の内、3000m までに蓄積した掘進データ(n=3000)を用いた。

① 地質調査結果

地質調査結果から地質境界や帯水層など局所的な地質変化点を推定している。地山が破碎されている可能性が高く、肌落ちの発生が懸念される。

② 泥質片岩 or 緑色片岩

緑色片岩は比較的硬質で塊状を呈するが、泥質片岩は一軸圧縮強度が小さく、薄く剥離しやすい。特に泥質片岩優勢かつ傾斜角が小さい区間では、片理面に沿って肌落ちが発生することが想定される。

③ 掘削体積比エネルギーが一定値以下

②より、岩種により性質が異なるため、岩種に分けて肌落ち箇所のマシントルクや掘削体積比エネルギー等、掘進データを機械学習により解析した。その結果、各岩種で掘削体積比エネルギーが一定値以下の場合に肌落ちしやすいという特徴が抽出された。

④ ズリ形状のばらつき

地山が硬質であれば、掘削により均一な形状のズリが得られるが、地層の褶曲等により岩が破碎されている場合はズリの形状のばらつきが大きくなり、肌落ちしやすい区間であることが想定される。

(4) 肌落ち予測システムの効果検証について

検証では肌落ち予測システムの精度、それによる作業の効率化として、システム導入後の 2,504m を対象とした肌落ちフローによる判定結果の妥当性(図-5)と、導入前後 6 ヶ月における平均日掘進速度の変化について確認した。なお、B1 タイプは導入前後ともに構成比率(図-6 上段)が小さいため比較対象外としている。

図-5 より、肌落ちが起きた区間の内、肌落ちを予測し警告ランプが点灯した延長は 73%となり、肌落

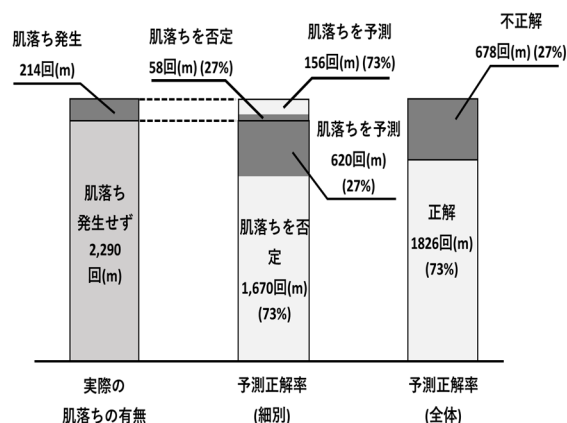


図-5 肌落ち予測結果

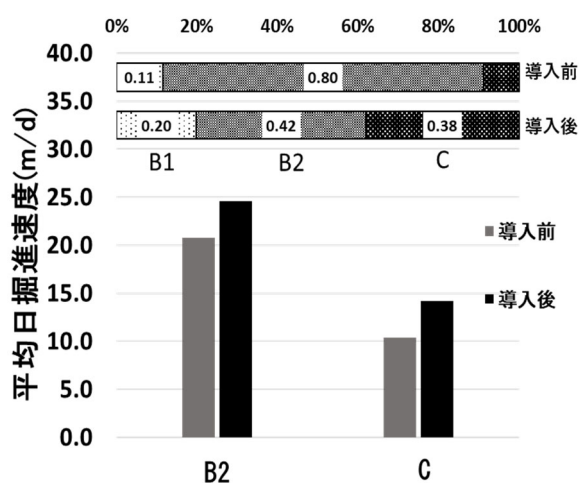


図-6 肌落ち予測システム導入前後の平均日掘進速度

度が起きなかった区間で肌落ちが起きないと予測した正答率も 73%となった。また平均日掘進速度の比較では、AI 導入後に肌落ちしやすい C タイプにおいてより掘進速度が向上した(図-6 下段)。肌落ち予測システムの活用により、肌落ちリスクの速やかな把握が可能となり、支保工等資材の準備が容易となったためと考えられる。

4. まとめと今後の展望

今回、AI による解析を活用した肌落ちフローの作成及びその判定結果に基づく視覚的な現場周知を行った。その結果、肌落ちした箇所、肌落ちしなかった箇所における予測正解率は 73%となった。また、

警告ランプを設置したことにより、機械音が大きく声が通りづらい坑内において肌落ちの危険性を視覚的に周知することができ、検証開始以来無災害を継続している。このことから、システム導入前の掘進速度を確保・向上させながら、現場の安全性向上を図ることができたと評価している。今回の検証に用いた地質等データは、トンネル掘削に使用されるものが多いため、掘削作業と並行してデータ採取が可能となれば、同様の坑内作業である NATM 工法にも応用可能と考えられる。

また、機械学習を用いた予測分析の活用事例として、老朽化等のリスクが高まっている管理施設の障害発生予測が挙げられる。回帰分析による学習であれば、施設障害の要因の影響度を把握しやすく、

フロー化することにより経験年数の少ない技術者であっても判定の過程がわかりやすい。

なお、今回試行した内容は、新たな判断手法への変更ではなく、判断の補完として予測システムを採用したものである。機構は多様な管理データを保存していることから、これらを教師データとして機械学習させ、予測システムの判断を人間が補完することにより、効率的なリスクマネジメントの一つの手法として、機構の管理業務への活用も期待される。

参考文献

*1 『ICT 等を活用したトンネル掘削時における安全監視の効率化について』. 2020. 九州地方整備局

覆工への新技術導入に向けた 耐荷性能の評価手法に関する研究

菊地 浩貴¹・日下 敦¹・砂金 伸治²

¹国立研究開発法人 土木研究所 道路技術研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²東京都立大学 都市環境学部 都市基盤環境学科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

山岳トンネル工法により施工される道路トンネルの標準区間の覆工では、これまでの実績や経験をもとに、設計巻厚30cm、一軸圧縮強度18N/mm²の無筋コンクリートが見なし仕様として採用されているが、覆工の耐荷性能およびその評価手法は体系化されておらず、覆工に新技術や新構造を導入する際の課題となっている。本論文では、構造安定性に直結する耐荷力に着目し、標準区間で新技術を導入するための耐荷力の評価フローを提案した。新技術の一例として薄肉高強度覆工を対象に耐荷力の評価を行うことで本フローの適用性を確認した。

キーワード 山岳トンネル工法, 覆工, 耐荷性能, 性能評価

1. はじめに

山岳トンネル工法（いわゆるNATM）により施工される通常断面の道路トンネル一般部の覆工では、設計巻厚30 cm、一軸圧縮強度18 N/mm²の無筋コンクリート（以下、「従来覆工」と称する。）が標準的に採用されている¹⁾。道路トンネル以外でも、自重以外の常時の外力等が想定されない場合は、同様の仕様が標準とされている²⁾。これらの仕様は、性能照査により決定されたものではなく、過去の経験や施工実績をもとに定められたものであり、標準区間におけるみなし仕様となっている。標準区間で上述の仕様の満足する施工がなされたトンネルにおいては、供用期間中に著しい構造安定性の低下を引き起こす事例は極めて少なく、適切な維持管理を実施することで利用者被害の発生を低減できる³⁾。このことから、本仕様は、耐荷性能、耐久性能等が担保されている仕様であると考えることができる。

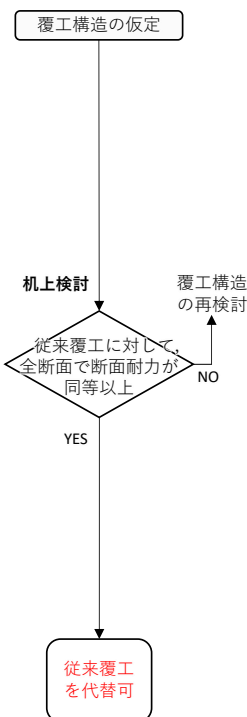
これまで、覆工（無筋、有筋、繊維補強）の力学的挙動や破壊メカニズム等の耐荷性能を解明することを目的に、実大規模の供試体や縮小模型を用いた実験が行われている⁴⁻¹⁰⁾。これらに共通する知見として、荷重条件や支持条件によっては、覆工はある1箇所の断面破壊によって直ちに構造が不安定化せず、段階的に複数箇所断面破壊が生じることで不安定化することが挙げられる。これは、覆工は周囲を地山に支持されていることから、高次の不静定構造であることに起因すると考えられる。

これらの力学的挙動を数値解析で再現する手法はいく

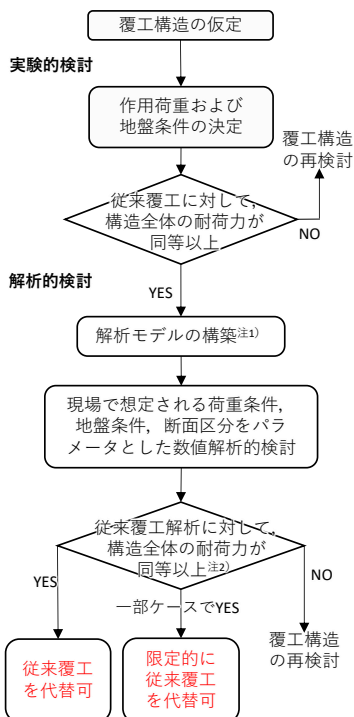
つか提案⁶⁻¹¹⁾されており、これらの知見を踏まえ、覆工が有する耐荷力の評価手法や断面破壊に関する照査方法がいくつか提案されている。たとえば、覆工の圧縮ひずみが3,500 μ や10,000 μ に達した時点を圧ざと評価するとともに、1か所で圧ざが確認された段階を覆工の限界状態と考え、このときの地圧を覆工の構造耐力と判断する手法^{12,13)}、覆工に生じる断面力が部材の断面耐力に達した時点を限界状態として断面照査を行う方法¹⁴⁾等がある。これらの評価手法は、部材のいずれか1箇所の断面が破壊に至る状態を限界状態と仮定し、その段階までを対象としたものであり、覆工構造全体が不安定化する段階を取り扱っているものはない。

トンネル掘削時に過大な変形等により所定の覆工巻厚が確保できない場合、地山の不安定化や安全性に対するリスクを冒しても縫い返しを実施する事例が多い。また、供用中のトンネルにおいて、老朽化の進行や地山状態の変化等により、覆工の撤去・再構築等の更新工事が必要となる事例が増加しているが、内空断面積が小さい道路トンネルでは所定の覆工巻厚を確保するため、交通への影響等に対応しながら狭隘な断面を拡幅する必要がある。このような事例においては、覆工の薄肉化および高強度化により内空を確保することやプレキャスト化、部材の分割化により施工速度や施工性を向上させるなど、新技術を導入した覆工構造（以下、「新技術覆工」と称する。）の採用等が考えられる。標準区間にて新技術覆工を導入する場合、覆工の要求性能等を明確に定めることは難しいことから、構造安定性に直結する耐荷性能に関

方法1： 断面耐力による評価



方法2： 構造全体の耐力による評価



注1) 原則として全断面圧縮破壊、曲げ圧縮破壊、曲げ引張破壊に対する再現性を有する解析モデルである必要がある。

注2) 数値解析結果が材料構成則の適用範囲内であることを確認する必要がある。適用範囲外の場合は、必要に応じて追加の要素実験等を実施し、構成則の見直しまたは適用範囲の再検討を行う。

図-1 耐力の評価フロー

しては、それが担保されているとみなせる従来覆工と同等以上の耐力性能であることが必要と考えられる。しかし、現状では比較対象となる従来覆工が有している耐力力の性能水準やその評価方法が確立されていない。

そこで本論文では、従来覆工と同等以上の耐力性能を確認する手法として、断面耐力による評価手法（方法1）と構造全体の耐力力による評価手法（方法2）から構成される耐力力の評価フローを検討した。また、新技術覆工の1つとして想定される、従来覆工に対して高強度化したコンクリートを用いて薄肉化を図った覆工（以下、「薄肉高強度覆工」と称する。）を取り上げ、それぞれの方法に基づき検討を行うことで、その適用性の確認および評価手法の利点や課題等の抽出を行った。

2. 覆工の耐力力の評価フローの提案

従来覆工が有する耐力力と同等以上の耐力力を有することで、耐力性能を満足するとみなし、これを確認するための評価フローを図-1のとおり提案する。ただし、標準区間において、主にコンクリート材料を想定した新技術覆工を導入する場合を対象としたものである。

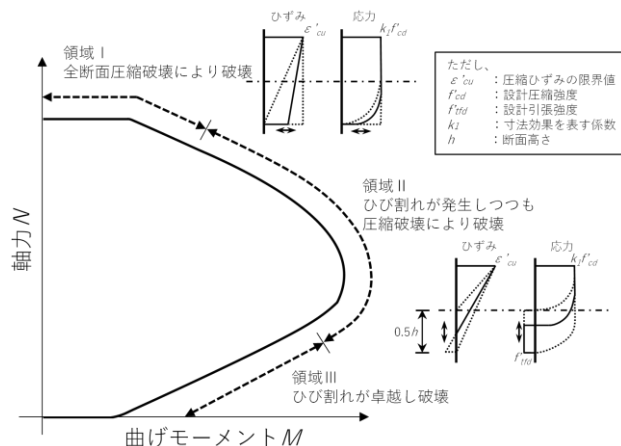


図-2 MN耐力曲線の概略図 9)を加筆修正

(1) 断面耐力による評価（方法1）

本評価方法は、覆工の耐力性能を部材の断面耐力で評価するものである。新技術覆工のMN耐力曲線が従来覆工のMN耐力曲線を原則として包含するとともに、同等以上のせん断耐力を有することを確認することで、耐力性能を満足すると評価するものである。

曲げモーメントおよび軸方向力を受ける部材は、限界曲げモーメント M_{ud} と限界軸力 N_{ud} の関係から表されるMN耐力曲線として、部材断面耐力を算定することができる^{15,16)}。図-2に示すとおり、圧縮側は材料の圧縮ひずみの限界値、引張側は部材厚に対するひび割れが一定の深さ以下になるようひずみ分布を仮定し、その時の応力状態から次式に従って限界曲げモーメント M_{ud} と限界軸力 N_{ud} を算定する。算定された M_{ud} 、 N_{ud} は図-2に示すような曲線として求められ、部材断面の応力状態から、全断面圧縮破壊、曲げ圧縮破壊、曲げ引張破壊の破壊モードを評価することができる。なお、MN耐力曲線の算出にあたっては、材料特性が明らかである必要があり、既知でない場合には、予め実験等により明らかにする必要がある。

$$M_{ud} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma(y) \cdot y \cdot b dy / \gamma_b$$

$$N_{ud} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma(y) \cdot b dy / \gamma_b$$

ここに、 h : 覆工厚 b : 単位幅 γ_b : 部材係数
 y : 厚さ方向に対する断面中心からの距離
 $\sigma(y)$: 位置 y における応力

せん断耐力は、トンネルにおいては、主に鉄筋コンクリート構造を有するシールドトンネルのセグメント等を対象に、許容応力度設計法および限界状態設計法による評価手法が確立されている¹⁷⁾。一方で、無筋コンクリート覆工を対象としたせん断耐力の照査手法は確立されていない。そのため、本論文では文献¹⁸⁾を参考に、次式により許容せん断応力度 f_s を算定し、無筋コンクリート覆工のせん断耐力の照査に準用することとした。

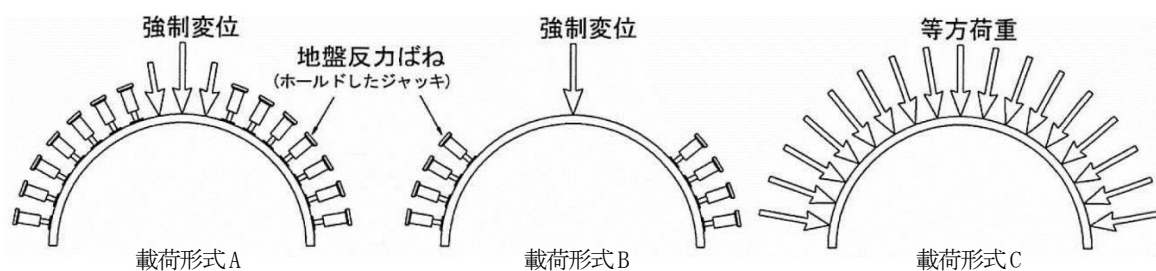


図-3 載荷形式⁹⁾より引用

$$f_s = \frac{1}{30} \cdot F_c \text{ かつ } \left(0.49 + \frac{1}{100} F_c\right) \text{ 以下}$$

ここに、 F_c ：コンクリートの設計基準強度

MN 耐力曲線は、軸力と曲げモーメントの両方が作用する場合に、一定の仮定のもと比較的容易に部材の断面耐力を評価することが出来る。一方で、この方法は上述した全ての破壊モードにおいて、従来覆工に対して同等以上の MN 耐力曲線を有するよう断面設計を行うことが一般的であるため、場合によっては、実際には覆工構造の耐荷性能を決定付けるわけではない破壊モードに対しても断面耐力を確保する必要がある、力学的・経済的に不合理な設計になることがある。たとえば、軸圧縮部材として機能する覆工において薄肉化を検討した場合、覆工厚の減少により曲げ引張破壊域における断面耐力が大幅に減少するため、覆工厚の低減が図りにくい。また、覆工は周囲を地山に支持されていることから、高次の不静定構造であると考えることができ、荷重条件や支持条件によっては、1 箇所の断面破壊により直ちに構造全体が不安定化するわけではないが、1 箇所の断面破壊により耐荷力が規定される MN 耐力曲線による評価では、構造全体の耐荷力を十分に評価できない場合がある。このほか、継手等の特殊な構造に対しては、MN 耐力曲線による評価方法が十分に確立されていない場合があり、評価手法の適用が困難であることにも留意が必要である。

(2) 構造全体の耐荷力による評価（方法2）

本評価方法は、覆工構造が不安定化する段階を覆工の限界状態と仮定し、そのとき覆工に作用する荷重値を、覆工が有する構造全体の耐荷力と評価するものである。新技術覆工の構造全体の耐荷力が従来覆工と同等以上であることを確認することで、耐荷性能を満足すると評価するものである。

本手法は、実験的検討および数値解析的検討から構成される。実験的検討は、覆工全体の挙動を把握することやスケール効果等による影響を考慮し、原則として実大規模の載荷実験が望ましいと考える。実験は限られた条件でしか実施できないことから、構造全体の耐荷力等の再現性が確認された数値解析によりパラメトリックスタディを実施することで種々の条件における覆工の耐荷力を検証し、その適用範囲を明らかにする。

a) 実験的検討

実験的検討は、標準的な作用荷重および地盤条件のも

と、原則として実大規模の載荷実験により、新技術覆工と従来覆工の耐荷力の比較検討および破壊モード等の力学的挙動の差異を把握するものである。

実験における荷重条件は、図-3の載荷形式Aとした。NATMで施工されたトンネルに作用する主な外力として、緩み土圧や偏土圧、膨張性土圧等が示されている¹⁹⁾。これまで土木研究所で実施した実大実験や解析的検討²⁰⁾によると、それぞれの外力作用により覆工は主に曲げ圧縮破壊により覆工構造全体の耐荷力が決定されることが分かっており、これを標準的な荷重形式としたものである。なお、全断面圧縮破壊（載荷形式C）は、作用荷重と材料の圧縮強度、断面諸元から概ね構造耐力を算出できるため、標準的な作用荷重に含めないものとした。また、曲げ引張破壊（載荷形式B）は、天端から肩部にかけ大規模な背面空洞を想定したものであるが、NATMで施工されたトンネルでは生じにくいと考えられ、曲げ引張破壊で構造耐力が決定されるような荷重条件は少ないと考えられることから、同様に標準的な作用荷重に含めないものとした。ただし、数値解析的検討にて、個別の現場条件を踏まえた解析結果によっては、他の載荷形式による実験を実施するなど、別途検討が必要になる。

地盤条件の設定にあたっては、本検討の前提が標準区間として従来覆工が施工される地山等級を対象としており、このうち比較的不利な条件である DI 相当の地山を想定するものとした。

b) 数値解析的検討

前項で同等以上の耐荷力が確認された覆工構造に対して、現場で想定される荷重条件、地盤条件、断面区分等の種々のパラメータにより解析を行い、従来覆工と同等以上の耐荷性能を有することを確認することで、新技術覆工の適用範囲の評価を行う。

新技術覆工の耐荷力を解析的に評価する場合は、原則として、既往の覆工載荷実験の再現解析等により、全断面圧縮破壊、曲げ圧縮破壊、曲げ引張破壊それぞれの破壊モードおよび構造全体の耐荷力の再現性を有する解析モデルを用いる。解析モデルの構築にあたっては、要素実験や載荷実験等により覆工材料の材料特性、継手等を有する場合は構造特性を明らかにし、構成則のモデル化およびその適用範囲を明確にする必要がある。また、数値解析で得られた解析モデルの力学的挙動が、解析モデルの構築にあたって確認された材料特性や構造特性の適用範囲を超過していないことを確認する必要がある。

表-1 設計物性値

		従来覆工	薄肉高強度覆工
覆工厚	mm	300	200
断面積	mm ²	300,000	200,000
圧縮強度	N/mm ²	18.0	40.0
引張強度	N/mm ²	1.58	2.69
ヤング係数	kN/mm ²	22.0	31.0

表-2 セン断耐力の算定結果

覆工仕様	圧縮強度 f_{ck} (N/mm ²)	断面積 (mm ²)	許容せん断応力度 f_s (N/mm ²)	せん断耐力 (kN)
18N30cm	18.0	300,000	0.60	180
40N20cm	40.0	200,000	0.89	178
40N26cm	40.0	260,000	0.89	231
40N30cm	40.0	300,000	0.89	267

3. 方法1による薄肉高強度覆工の検討

(1) 薄肉高強度覆工および従来覆工の概要

検討対象とした従来覆工および薄肉高強度覆工の設計物性値を表-1に示す。いずれも継手や部分的な覆工厚の増減等の無い一様な断面とした。

(2) 評価結果

引張応力については、コンクリート標準示方書に準じて無視した場合（実線）と考慮した場合（破線）でそれぞれ比較を行った。引張応力を考慮する場合は、文献¹⁶⁾を参考に、中立軸より引張側は引張強度 f_{tk} で一定と仮定し、MN 耐力曲線を算定した。なお、 M_{ud} および N_{ud} の算定にかかる部材係数 γ_b は 1.15、 N_{ud} の算定にかかる部材係数 γ_b は 1.3、コンクリートの材料係数 γ_c は 1.0、寸法効果を表す係数 k_f は 0.85 とし、限界ひび割れ深さは断面高さの 50% とした。

従来覆工、薄肉高強度覆工（40N/mm²、20cm）、従来覆工の耐力と同等以上になるよう設計した場合の薄肉高強度覆工の 3 ケースについて、MN 耐力曲線を図-4に、せん断耐力の算定結果を表-2に示す。引張応力を考慮した場合の必要覆工厚は 26cm、無視した場合は 30cm であり薄肉化による有為性は小さい結果になった。また、引張応力の有無に関わらず、薄肉高強度覆工（40N/mm²、20cm）は、曲げ引張破壊域で従来覆工を下回る結果となった。いずれのケースも、曲げ引張破壊域での限界断面耐力が支配的であることが分かる。これは、曲げ引張破壊域の限界断面耐力は、引張応力に加え覆工厚に依存するためである。特に、引張応力を無視した場合、ある限界軸力 N_{ud} における限界曲げモーメント M_{ud} は、軸力作用位置と図心との距離、すなわち覆工厚のみで決定されることから、同等の覆工厚が必要になったものと考えられる。なお、せん断耐力は、薄肉高強度覆工（40N/mm²、20cm）を除き、いずれも従来覆工と同等以上となった。

これらの結果から、断面耐力による評価は比較的容易に断面耐力の評価が可能だが、場合によっては実際に覆工

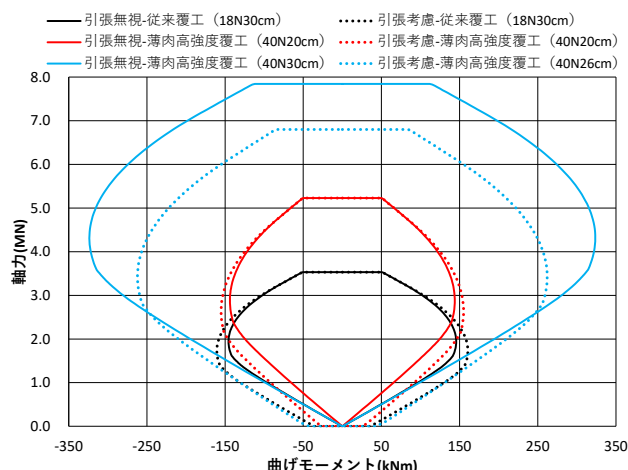


図-4 MN 耐力曲線図

の不安定化として構造の耐荷性能を決定付けるわけではない破壊モードに対しても同等以上の耐荷力を有するように断面設計をする必要があり、力学的・経済的に不合理な設計となる。引張応力を考慮せずに評価する場合、覆工厚の低減を図るには、鉄筋コンクリートの採用等により引張強度を増加させる必要がある。ただし、無筋コンクリートと比較しコストの増加や施工性の低下等の課題が残る。引張応力を考慮した場合、低軸力下での断面耐力が若干向上するなど、応力状態によっては引張応力の評価が構造設計に一定の影響を与える。このことから、より合理的な評価には、覆工の力学特性や材料特性を踏まえて、引張応力の設計上の評価方法を確立していく必要がある。

4. 方法2による薄肉高強度覆工の検討

(1) 実験的検討

a) 供試体の概要

薄肉高強度覆工は覆工厚20cm、呼び強度40N/mm²、従来覆工は覆工厚30cm、呼び強度18N/mm²の無筋コンクリートからなる供試体による載荷実験^{21, 22)}を対象とした。現場条件や過去の実績を基に決定した両実験の配合を表-3に示す。実験当日の円柱供試体による強度試験結果を表-4に示す。

b) 載荷実験の概要

実験装置および薄肉高強度覆工供試体の概要を図-5に示す。従来覆工、薄肉高強度覆工とも供試体の内径は9.1mとした。実験装置は、載荷能力2,000kNの油圧ジャッキが10°ピッチで17台反力壁に設置されており、二車線道路トンネルと同規模の供試体に対して載荷ができる実大規模の装置である。

実験は、まず予備載荷として荷重制御にて40kV/本まで載荷を行うことで、ジャッキと供試体を密着させるとともに供試体に自重相当の軸力を導入した。その後、本載荷として80°、90°、100°のジャッキを1stepあたり1~2

表-3 配合表

	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	粗骨材 最大寸法	スランプ	空気量
	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	mm	cm	%
従来覆工	164	250	826	1047	2.5	40	12±2.5	4.5±1.5
薄肉高強度覆工	160	426	702	1040	4.3	20	12±2.5	4.5±1.5

表-4 供試体物性値

ケース	従来覆工	薄肉高強度覆工
覆工厚	300	200
圧縮強度	f'_c	f'_c
引張強度	f_t	f_t
ヤング係数	E	E
曲げ剛性	EI	EI
ポアソン比	ν	ν

※割裂引張強度試験を未実施のため、引張強度は未取得

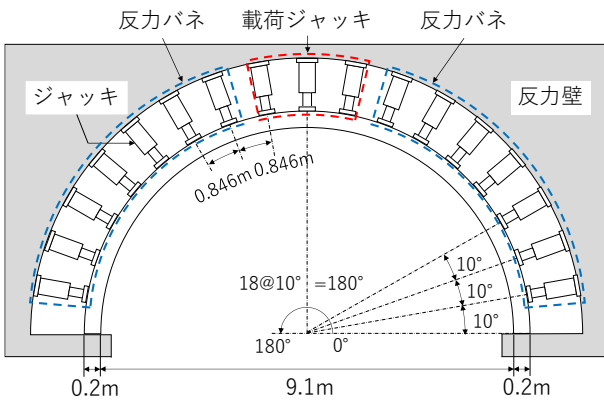


図-5 実験装置および供試体の概略図

mm/minの荷重速度で、0.5mm : 0.8mm : 0.5mmの比で内空側へ強制変位させた。このとき荷重ジャッキ以外のジャッキは地盤反力係数が約500 MN/m³相当のバネで地山側への変形のみ拘束することで地山を模擬した。これは、道路橋示方書²³⁾に示される地盤反力係数の算定方法にて、換算係数 $\alpha=4$ 、換算荷重幅 $B=10$ mと仮定したとき、地盤変形係数が約500MN/m²となり、地山等級D Iに相当する。

実験時は、各ジャッキの反力、ストローク、供試体内面および外面の周方向ひずみ量等の計測を実施した。また、荷重ステップの合間に、目視で供試体表面のひび割れ状況等の観察・記録を行った。

c) 実験結果

図-6に荷重（3本の荷重ジャッキの合計値）と天端の鉛直変位の関係を示す。両実験とも、直線的に荷重が増加し、比較的低い荷重レベルで天端内面、肩部外面の順に引張ひび割れが発生する。その後、天端外面、肩部内面の順に圧縮破壊が生じ、従来覆工では約2,400kN、薄肉高強度覆工では約2,300kNで構造全体の耐力に達した（従来覆工は荷重の低下が確認された時点で除荷）。荷重変位の傾きは、薄肉高強度覆工の方が小さく、構造全体の耐力に達したときの変位は約7mm大きい結果となった。これは、従来覆工に対して、曲げ剛性が約1/3であり、曲げ変形しやすいことに起因すると考えられる。

図-7に構造全体の耐力に達したときの内外面における周方向ひずみ分布を示す。両実験とも、天端外面、肩

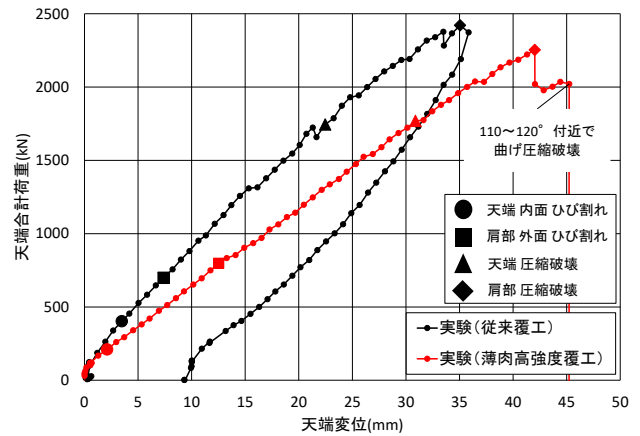


図-6 荷重変位関係

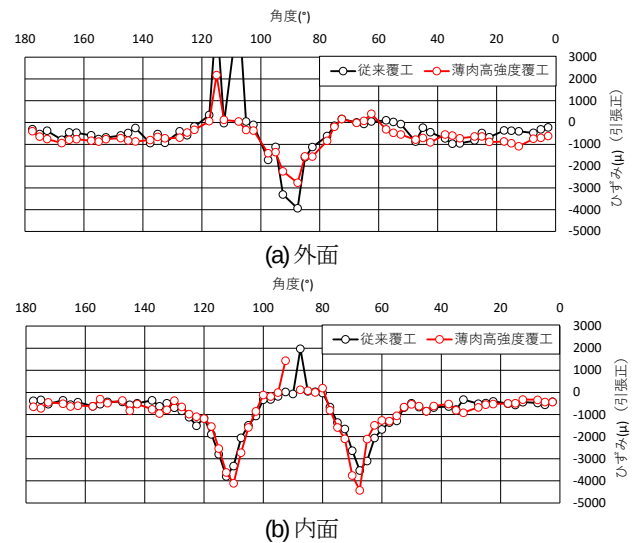


図-7 ひずみ分布

部内面で-3,000~-4,000 μ 程度の圧縮ひずみ、内外反対側では引張ひずみ、その他の断面では全圧縮状態であり、ひずみの傾向に大きな差は確認されなかった。

以上より、薄肉高強度覆工は曲げ変形しやすい構造ではあるものの、本実験条件においては、従来覆工と同様に曲げ圧縮破壊で構造全体の耐力力が決定されるとともに、その破壊メカニズムに有意な差は確認されなかった。得られた構造全体の耐力力は概ね同等であり、従来覆工と同等の耐力性能を有していることが確認された。

(2) 解析的検討

実現場への適用を検討する場合は、再現解析により前節で得られた覆工の破壊メカニズムおよび構造全体の耐力力を検討可能な解析モデルを構築し、地山等級や断面寸法等の現場条件に応じたパラメトリックスタディを実施することで、従来覆工と同等以上の耐力性能を有することを確認する必要がある。下半を考慮し、地山等級をパラメータとして薄肉高強度覆工の適用範囲を検討した事例については、文献²⁴⁾を参考にされたい。文献によれば、標準区間の地山等級の範囲では、薄肉高強度覆工は従来覆工と同等以上の耐力力を有することが確認された。

5. まとめ

本論文では、標準区間の覆工に新技術を導入することを目的に、従来覆工と同等以上の耐荷力を確認する方法として、断面耐力による評価手法および構造全体の耐荷力による評価手法からなる耐荷性能の評価フローを提案した。さらに、新技術覆工の一例として、薄肉高強度覆工を取り上げ、耐荷性能の評価および必要覆工厚の検討を行うことで、それぞれの評価手法の適用性および特性の検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 断面耐力による評価は、一定の仮定のもと比較的容易に覆工の耐荷性能を評価することが可能である。しかしながら、場合によっては実際に構造耐力を決定付けるわけではない破壊モードに対しても、従来覆工と同等以上の断面耐力を有するよう断面設計を行う必要があり、力学的・経済的に不合理な設計になることがある。
- 2) 構造全体の耐荷力による評価は、覆工の不安定化に至るまでの段階的な断面破壊に加え、構造全体の耐荷力に着目した評価が可能であるため、より合理的に耐荷性能を評価することが可能である。ただし、数値解析的検討においては、材料特性や構造特性を予め実験等により明確化しモデルを構築するとともに、応答値がその適用範囲内にあることを確認する必要がある。

なお、脆弱な地山や覆工に外力の作用が懸念されるなど、標準的な地山等級が適用できない特殊区間については、これまでと同様に、個別の現場条件に基づく作用荷重の組み合わせに応じ、許容応力度設計法や限界状態設計法を用いた耐荷性能に関する照査を行う必要がある。また、本論文における評価フローは、覆工の耐荷力に着目したものであり、新技術覆工の検討にあたっては、覆工の破壊に伴う覆工コンクリートのはく落等に起因する利用者被害や、乾燥収縮や温度応力、中性化等、長期的な安全性や耐久性、また、火災に対する安全性に関する検討は別途行う必要があることに留意が必要である。また、本論文で取り上げた薄肉高強度覆工は、一定の仮定のもとで検討を行ったものであり、その施工性等についてはより詳細な検討が必要である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路トンネル技術基準（構造編）・同解説，pp125-128，2003。
- 2) 土木学会：2016年制定トンネル標準示方書，pp. 76, 103-108，2016。
- 3) 国土交通省鉄道局，鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 トンネル・山岳編，pp. 119-146，2022。
- 4) 日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧【本体工編】令和2年版，pp. 1-38，2020。

- 5) 今田徹：コンクリート覆工の強度，トンネルと地下，Vol. 8，No. 9，1977。
- 6) 朝倉俊弘，小島芳之，安東豊弘，佐藤豊，松浦章夫：トンネル覆工の力学挙動に関する基礎的研究，土木学会論文集，No. 493/Ⅲ-27，pp. 79-88，1994。
- 7) 岡野法之，小島芳之，植村義幸：大型覆工模型実験によるトンネル覆工の変形特性の再現，第12回岩の力学国内シンポジウム講演概要集，pp. 909-914，2008。
- 8) 野城一栄，平田亮，岡野法之，小島芳之：種々の材料からなる山岳トンネル覆工の変形破壊挙動に関する研究，土木学会論文集 F1，Vol. 71，No. 2，pp. 78-94，2015。
- 9) 真下英人，日下敦，砂金伸治，木谷努，海瀬忍：トンネル覆工の破壊メカニズムと補強材の効果に関する実験的研究，土木学会論文集 F1，Vol. 64，No. 3，pp. 311-326，2008。
- 10) 真下英人，砂金伸治，城間博通，馬場弘二：トンネル覆工の薄肉化に関する共同研究報告書，共同研究報告書，第275号，2001。
- 11) 松岡茂，増田彰久，松尾庄二，柳博文：ひび割れを考慮したトンネル覆工解析に関する研究，土木学会論文集，No554/Ⅲ-37，pp. 147-155，1996。
- 12) 小島芳之，朝倉俊弘，野城一栄，三谷浩二，松長剛：変状トンネル対策工の骨組解析によるシミュレーション，トンネル工学研究論文・報告集，第7巻，pp. 39-46，1997。
- 13) 野城一栄，小島芳之，新井泰，岡野法之，竹村次郎：圧縮破壊後の軟化を考慮した無筋コンクリート山岳トンネル覆工の数値解析手法に関する研究，土木学会論文集 C，Vol. 65，No. 4，pp. 1024-1038，2009。
- 14) 峰本守，鬼頭誠，梶原雄三，松岡茂：トンネル覆工の限界状態設計に関する研究，土木学会論文集，No. 523/Ⅲ-32，pp. 141-149，1995。
- 15) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書[設計編]，pp. 180-185，2018。
- 16) 併進工法設計施工研究委員会：併進工法設計施工法（都市トンネル編），pp. 68-77，1992。
- 17) 土木学会：2016年制定トンネル標準示方書 [共通編]・同解説/[シールド工法編]・同解説，2016。
- 18) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説 2018，pp. 58-61，2018。
- 19) 日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧【本体工編】令和2年版，pp42-47，2020。
- 20) 真下英人，砂金伸治，石村利明，坂本昇，笹田俊之：道路トンネルの変状に関する研究報告書-判定・診断の考え方と変状事例-，土木研究所資料，第4360号，pp. 31-36，2017。
- 21) 菊地浩貴，日下敦，佐々木亨，田村賢人：薄肉高強度覆工の耐荷力に関する実験的検討，第77回年次学術講演会，2022。
- 22) 石村利明，砂金伸治，日下敦：炭素繊維シートを鋼材により固定した場合のトンネル補強効果に関する実験的検討，第72回年次学術講演会，2017。
- 23) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編，pp. 187-190，2017。
- 24) 菊地浩貴，日下敦，砂金伸治，佐々木亨，巽義知：山岳トンネルにおける覆工の耐荷性能の評価手法の提案，土木学会論文集 F1（投稿中）

民間提案によるICT施工の技術基準類作成に関する2021年度の実践

鈴木 達規¹

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 社会資本施工高度化研究室

(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

国土交通省ではi-Constructionのトップランナ施策として「ICTの全面的な活用」を打ち出し、2016年度よりICT土工を皮切りにICT舗装工、ICT法面工、ICT路面切削工等へと年々その適用工種を広げている。2019年度からは新たな技術をICT施工の技術基準類に速やかに適用するために「産学官連携による基準類策定にかかわる取組み」（以下、民間提案）の取組を開始した。2021年度の民間提案の取組みでは、過年度まで確立されていなかった民間提案の審査方法の標準化を図るため、過年度までの審査基準を精査し審査基準改善案としてとりまとめたものを新たな審査基準として審査を試行した。2021年度の民間提案の取組みで検証を行った2提案を事例として示しながら試行した結果を報告する。

キーワード i-Construction、ICT施工、技術基準類、民間提案

1. はじめに

国土交通省ではi-Constructionのトップランナ施策として「ICTの全面的な活用」を打ち出し、2016年度よりICT土工を皮切りにICT舗装工、ICT法面工、ICT路面切削工等へと年々その適用工種を広げている。この取組みは、現場の生産性向上効果だけでなく、国内に広くICTを普及させることで災害等の非常時における迅速な復旧復興作業での活用も期待されている。また、2019年度から「産学官連携による基準類策定にかかわる取組み」（以下、民間提案）の取組を開始した。社会資本施工高度化研究室では、上記の提案に基づき、実現場での検証実験を通じて、出来形管理等の基準類の作成を進めている。

2. 民間提案の取組みの流れ

民間提案によるICT施工の基準類の策定・改定までの取組みの流れを図-1に示す。技術基準類作成を所掌する国土交通本省と連携し、例年4月に募集要領作成、5月から6月下旬まで提案を募集する。募集要領を見た提案者より技術基準類の提案概要書が提出されたら内容について一次審査（ヒアリング、評価等）を行い、策定・改定対象として選定を行う。7月頃開催されているICT導入協議会にて策定・改定対象について確認を取り、了承が得られた提案内容について二次審査（内容検証）を行っていく。十分な検証結果を得られた提案内容について策定・改定案を作成、再度ICT導入協議会にて確認を行う。了承を得られた策定・改定案について3月末に国土交通本省より通知を行う。

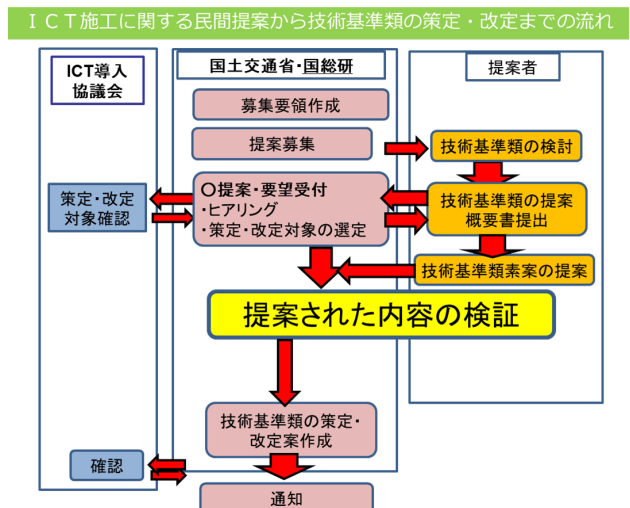


図-1 民間提案による基準類の策定・改定までの流れ

3. 研究目的

(1) 審査方法の標準化の検討

過年度までの審査では標準的な検証方法が確立されておらず、技術内容の確認や精度確認等の検証方法については提案された技術毎に対応しており、例年多数の提案を頂いている中、検証に大きな手間、期間を要していた。その為、過年度までの審査過程での課題整理を行い、一次審査基準改善案及び二次審査での要確認内容の改善案を作成、2021年度の民間提案の取組の中で改善案を用いた試行を通じて妥当性の確認を行い、審査方法の標準化を行う。審査方法の標準化により、提案された新たな計測技術、施工技术を適正、迅速に評価することが期待できる。



図-2 等対地高度撮

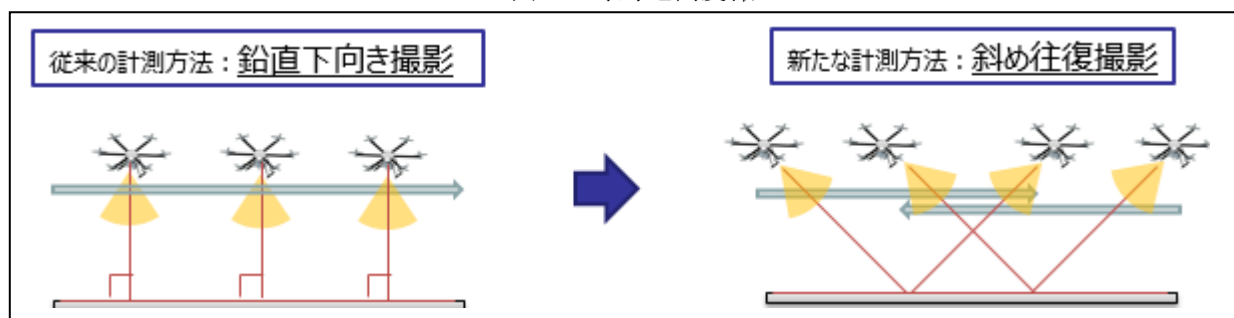


図-3 斜め往復撮影

(2) 空中写真測量(UAV)を用いた新たな撮影手法の検証

審査方法の標準化の試行の事例として、2021年度の民間提案として応募された中からICT土工における空中写真測量(UAV)を用いた新たな撮影手法に関する2提案について検証の概要を以下に示す。

a) 対地高度を一定とした撮影手法（等対地高度撮影）

現行規定では、同一コースは、直線かつ等高度と定められており、高低差の大きい現場においては、地上標高に併せて複数回の飛行における計測を強いられているが、地上標高に応じて連続的に飛行高度を変更して対地高度を一定に保つことが出来れば、オーバーラップ率、地上画素寸法の変化を最小限にすることとなり、計測精度のばらつきが低減されるため1回の飛行で計測が完了できる。さらに飛行回数を減らすことで複数回の飛行による重複撮影箇所がなくなるため、撮影枚数を削減できることになり、計測や解析に要する時間の短縮も期待できる（図-2）。

b) カメラを斜めに向けた撮影手法（斜め往復撮影）

従来のカメラを鉛直下方に向けた撮影手法では、すべての画像が同一高さ、同一方向からの撮影になるため、画像解析時に投影中心から撮像面までの距離推定に複数の解が発生する場合があります。水平方向を確定できても高さ方向に系統誤差が生じることとなり、この場合は後処理工程で標定点を用いた座標補正を行うことで対応していた。カメラを斜め向きに置き換えて逆方向からのサイドラップを重ねる撮影手法を採用することにより、高さや方向の異なる別の視点からの画像を追加して画像解析が行えるため高さ方向のスケールが安定して推定されることとなり、計測精度の向上が期待できる（図-3）。

4. 研究方法

(1) 審査方法の標準化の検討

a) 一次審査基準の改善案

過年度までの民間提案一次審査において生じた課題を以下に示す。

- ・募集要領に記載された一次審査基準が不十分かつ曖昧となっているため、申請者自らの提案の良否の判断が困難。
- ・審査機関に提案の採否を判定するための標準的な審査基準がないため、提案毎に根拠を用意する必要があり手間と期間を要している。
- ・一次審査結果通知の際、採否とともに不採用となった理由を審査基準に基づいて説明することが望ましいが、そのためには募集段階であらかじめ審査基準を明示することが有効である。

以上の課題より、改善案として過年度までに使用していた審査基準を精査して標準的な一次審査基準案としてとりまとめを行った（表-1）。一次審査基準案が適切か否かを確認するため、新たな審査基準案に基づく審査を試行する。

b) 二次審査での要確認内容の改善案

過年度までの民間提案二次審査の募集要領での記載内容が『提案された内容を精査し、要領化を実施する提案を選定します。』となっており具体的な方法が明確でなかったため、過年度までの二次審査において確認する必要があると判断されていた点を二次審査での要確認内容の改善案としてとりまとめを行った（表-2）。一次審査基準改善案と同様に二次審査での要確認内容の改善案も適切か否かを確認するため、二次審査において試行する。

表-1 一次審査基準改善案

過年度基準	課題	一次審査基準改善案	
—	提案された改善要望が、既存基準のどの箇所についての改善を求めるものか、そもそも提案者が理解していない場合、提案の意図が不明確となる。	(1) 現行の要領での対応範囲	・提案の対象となる既存技術基準類の改訂箇所・範囲をあらかじめ提案書に明記することを求めた ・技術基準類の改訂に向け具体的な提案が可能になるとともに、提案の意図を審査機関が正しく理解できるようにした。
技術的完成度	—	(2) 技術的完成度	
期待できる効果の程度	期待できる効果として求める内容が不明確	(3) 経済性 (4) 作業性	・ICT活用の主目的は現場における生産性向上である。生産性向上は作業性の改善とそのためになる必要となるコストの低減の両方で達成される。 ・効果として求めるのは経済性・作業性であることを明記
	過年度提案の「法枠工の出来形管理」では、危険を伴う高所作業をTLS計測で代替し、安全性が飛躍的に向上した。生産性向上の観点だけでは評価できない安全性向上効果についても評価すべき。	(5) 安全性	安全性の向上は生産性向上以上に評価すべき項目であるから、経済性・作業性の評価とは別に安全性向上効果についても明記
計測精度	—	(6) 計測精度	
現場のニーズ	過年度の提案で、ICTを開発したメーカーの想定で、現場のニーズが記載される例が見られたが、これは現場のニーズとは一致しているとは限らない。	(7) 施工者のニーズ	・ICT施工の主な目的が建機周り作業の減少や若いオペレーターの活躍など、施工者の施工効率化が中心であることに鑑み、現場のニーズを「施工者のニーズ」に改め、実際に現場で出来形管理に従事する施工者の視点からのニーズを確認
—	過年度の提案で、特許が設定されている提案があったが、基準化にあたっては、特許権者が独占使用せず一般利用が可能なものである必要がある。	(8) 特許等の権利関係	特許が設定されている提案については、独占利用され一般化にそぐわないものもあることから、提案時点で特許等の権利関係を明記

表-2 二次審査要確認内容の改善案

二次審査での要確認内容の改善案	
出来形計測精度	出来形管理に必要な精度を満足するか実験により確認する。特に、様々な誤差要因の存在する実現場においても、あらかじめ提出されたバックデータと同等の精度が得られるかを、実測により確認する。
現場で生じる誤差要因	ICTの出来形計測精度についてメーカーの保証や公的機関の認証が与えられないものについては、実現場において精度を確認する必要がある。この精度確認は、実現場で生じる誤差要因をすべて網羅した、最も厳しい条件にて実施する必要がある。生じる誤差要因は、実現場における実験において確認する。
作業性	ICTを用いた新たな出来形計測手法は従来手法よりも計測の労力が増大しないか実際の計測作業を行って確認する(現行の出来形計測方法よりも労力が増大する手法は基準化に不適)
計測上の留意点	所要の出来形計測精度を担保するために必要となる出来形計測時の留意点を、実現場における計測作業を確認したうえで見出し、要領に記載する。

(2) 空中写真測量(UAV)を用いた新たな撮影手法の検証

事例としている空中写真測量(UAV)を用いた新たな撮影手法の検証について、二次審査の際、要確認内容の改善案に基づく具体的な検証方法を以下に示す。既存の「3次元計測技術を用いた出来形管理要領(案)」で規定されているICT土工におけるUAVによる空中写真測量を用いた3次元出来形計測の精度確認試験実施手順に準拠した条件の下で、提案された2つの撮影手法が現行要領の規格値を満足することを検証、さらに従来手法との比較も行う。ICT土工におけるUAVによる空中写真測量の測定精度の確認方法は、設置した検証点における既知点の座標値(基準点あるいは、工事基準上などの既知点の座標値や、基準点及び工事基準点を用いてTSを用いて計測した座標値)と、UAVによる空中写真測量を用い

て計測した結果から得られる検証点の各座標値の較差 x , y , z それぞれ $\pm 50\text{mm}$ 以内であることを確認する。

a) 等対地高度撮影による出来形計測

高低差があり等高度での飛行では地上画素寸法に大きな変化が生じる試験場にて、オーバーラップ率や地上画素寸法が同一になるように2回に分けた従来の撮影手法と、地上標高に合わせて対地高度を一定に保ちながら飛行する撮影手法による計測を行う。また撮影条件として既存の「3次元計測技術を用いた出来形管理要領(案)」で規定されている、ICT土工におけるUAVによる空中写真測量を用いた3次元出来形計測の測定精度に準拠し、地上画素寸法を 10mm/Pixel 、進行方向のラップ率は 90% 、隣接コースとのラップ率は 60% に設定する。検証点を14点設置し、画像解析により生成した点群上の

検証点座標と、現場内に設置された基準点を用いてTSで測量した検証点座標とを比較する。(図-3～図-5)

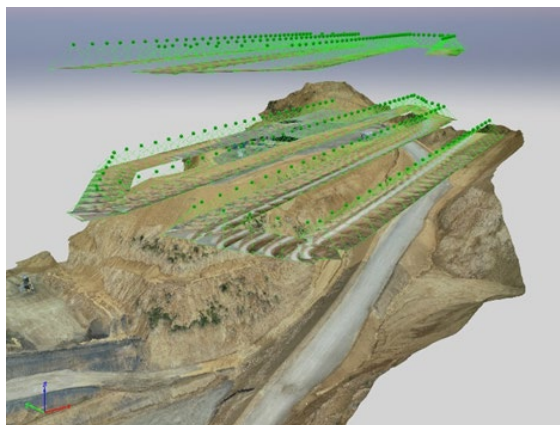


図-3 等高撮影の飛行ルート

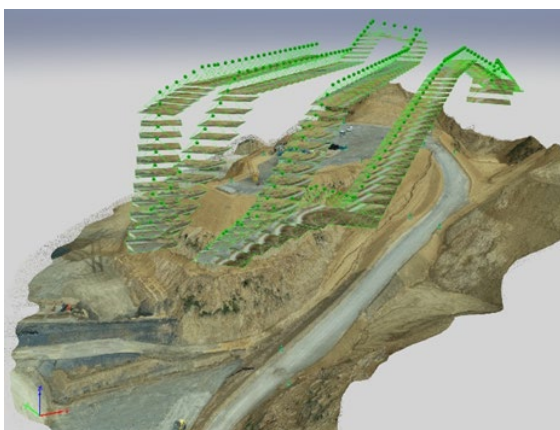


図-4 等対地高度撮影の飛行ルート

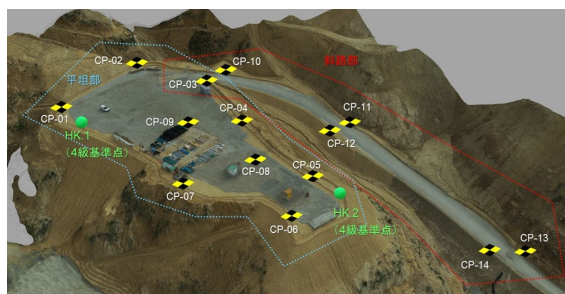


図-5 等対地高度撮影の検証点

b) 斜め往復撮影による出来形計測

鉛直方向の誤差が生じやすい平坦な地形の試験場にて、カメラを鉛直下方に向けた従来の撮影手法と、同一コースでカメラの向きを進行方向に一定角に傾けた撮影手法による計測を行う。カメラの傾き（天底角）は 10° 、 20° 、 30° の3パターンの計測を行う。また撮影条件として既存の「3次元計測技術を用いた出来形管理要領（案）」で規定されている、ICT土工におけるUAVによる空中写真測量を用いた3次元出来形計測の測定精度に準拠し、地上画素寸法を $10\text{mm}/\text{Pixel}$ 、進行方向のラップ率は90%、隣接コースとのラップ率は60%に設定する。

検証点を12点設置し、画像解析により生成した点群上の検証点座標と、現場内に設置された基準点を用いてTSで測量した検証点座標とを比較する。鉛直精度を確認するために、後処理工程の標定点を用いた座標補正を行う前の状態で計測精度を検証する。(図-6～図-8)

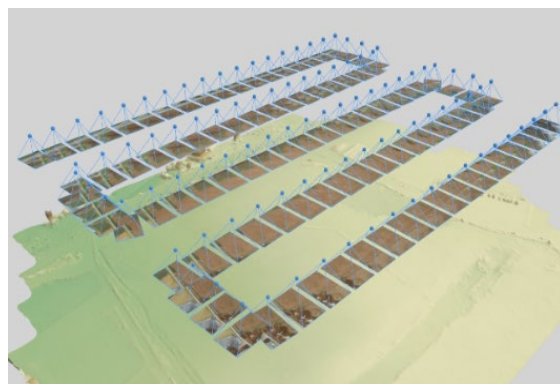


図-6 鉛直下向き撮影の飛行ルート

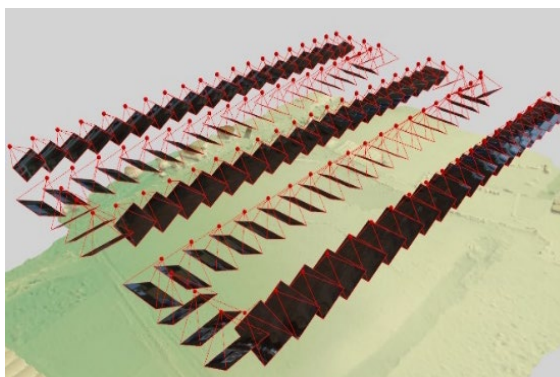


図-7 斜め往復撮影の飛行ルート

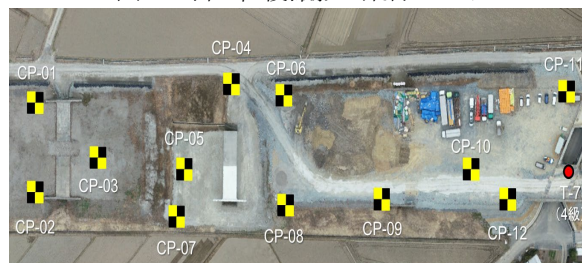


図-8 斜め往復撮影の検証点

5. 研究結果

(1) 審査方法の標準化の検討

a) 一次審査基準改善案に基づく審査試行結果

一次審査基準改善案に基づいた一次審査の事例として、空中写真測量(UAV)を用いた新たな撮影手法の検証の等対地高度撮影において確認した一次審査基準改善案(表-1)に基づく評価結果を以下に示す。

- ・ (1) 現行の要領での対応範囲→現行要領に提案手法の実施を妨げる記載があり要改定
- ・ (2) 技術的完成度→高 (市販技術)
- ・ (3) 経済性→優 (普及が進み低価格化)
- ・ (4) 作業性→改善

(高低差のある現場での飛行回数を減少)

- ・(5)安全性→改善
(飛行回数の減少による飛行リスク回避)
- ・(6)計測精度→可(既存UAVと同等)
- ・(7)施工者のニーズ→大(計測作業の効率化)
- ・(8)特許等の権利関係→既存特許権を侵害しない

以上の評価結果から、一次審査基準として「技術的完成度」「経済性」「作業性」「安全性」「計測精度」を予め示すことが、円滑な審査、提案者の提案の判断へ適切に寄与すると評価できる。2021年度提案15提案の一次審査を試行した結果、技術基準類の策定・改訂の検討対象として9提案を選定した。残りの審査項目も他の8提案の審査の中で、予め示すことが円滑な審査、提案者の提案の判断に適切に寄与すると評価できたため、一次審査基準改善案は標準的な審査方法として適切と判断できる。

b) 二次審査要確認内容の改善案に基づく審査試行結果

二次審査要確認内容の改善案に基づいた二次審査の事例として、5章2節に示す空中写真測量(UAV)を用いた新たな撮影手法の二次審査における検証結果から、表-2の「出来形計測精度」「現場で生じる誤差要因の確認」「作業性の確認」を予め示すことが、技術基準類策定・改訂に盛り込むべき要素等を円滑かつ漏れなく確認することに寄与すると評価できる。残りの要確認内容も他の8提案の二次審査の中で、予め示すことが技術基準類策定・改訂に盛り込むべき要素等を円滑かつ漏れなく確認することに寄与すると評価できたため、二次審査での要確認内容の改定案は標準的な審査方法として適切と判断できる。

(2) 空中写真測量(UAV)を用いた新たな撮影手法の検証

事例としている空中写真測量(UAV)を用いた新たな撮影手法の検証について、二次審査における検証結果を以下に示す。

a) 等対地高度撮影の撮影検証結果

表-3はTSで測量した検証点座標を真値とし、空中写真測量の点群データから得られた検証点の位置座標との較差の最大値、最小値及び平均値と標準偏差を、従来の撮影手法と等対地高度での撮影手法での計測についてそれぞれ記したものである。どちらの撮影手法も14点の検証点すべてにおいて前述の要求精度 $\pm 50\text{mm}$ 以内を満足した。さらに従来の撮影手法での2回の計測を合わせた写真枚数257枚、撮影時間11分に対して、等対地高度による撮影手法では複数回の飛行による重複撮影箇所がなくなるため写真枚数186枚、撮影時間8分となり、それぞれ1/4程度の削減効果があった。さらに画像解析時間の短縮も図れるため、効率化に寄与する撮影手法と考察する。

b) 斜め往復撮影による出来形計測

表-4はTSで測量した検証点座標を真値とし、空中写真測量の点群データから得られた検証点の位置座標との較差の最大値、最小値及び平均値と標準偏差を、従来の鉛直下向き撮影と斜め往復撮影での計測についてそれぞれ記したものである。平面(XY)精度に関しては、すべての計測において大きな差は見られなかった。鉛直(Z)精度に注目すると従来の撮影手法では大きな誤差が確認されたが、斜め往復撮影の場合、いずれの天底角においても前述の要求精度を満足する $\pm 50\text{mm}$ 以内での計測が行えており、別方向からの画像を追加して画像解析を行うことで高さ方向の誤差が低減できていることを確

表-3 等対地高度撮影の精度検証結果

	等高度撮影			等対地高度撮影		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
最大値(差)	50	29	23	45	34	33
最小値(差)	21	6	-1	14	14	-9
平均値	30	20	10	25	26	12
ばらつき	9	7	7	8	6	12

単位(mm) N=14

表-4 斜め往復撮影の精度検証結果

	従来(鉛直下向き)			天底角10°			天底角20°			天底角30°		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
最大値(差)	29	15	-310	27	16	6	33	16	23	32	12	20
最小値(差)	4	-3	-402	5	-2	-49	2	-5	-6	8	-6	-8
平均値	15	5	-350	15	5	-21	17	6	12	18	4	6
ばらつき	6	5	28	6	5	16	8	7	10	6	5	8

単位(mm) N=12

認できた。この場合、後処理工程の標定点を用いた座標補正が不要となるため、省力化に寄与する撮影手法と考察する。

6. 結論

民間提案の審査方法の標準化について、一次審査基準改善案及び二次審査での要確認内容の改善案が審査方法として適切とあることを確認した。成果は2022年度以降の民間提案の募集要領へ反映された。また、2021年度の民間提案の事例の一つとして空中写真測量(UAV)を用いた新たな撮影手法について、既存要領への適用が可能なことを確認した。他に確認された8提案と合わせて、成果は「3次元計測技術を用いた出来形管理要領

(案)」へ反映され、2022年3月に改正要領が通知された。今後も各工種において新たな民間提案の技術を取り入れるための検証を進め、技術基準類の改善に努めたい。

謝辞：本稿に記載の検証にご協力下さいました株式会社フジタ及び施工技術総合研究所の皆様、その他の提案にご協力下さいました提案者の皆様に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省：ICT導入協議会（第15回），2022
- 2) 国土交通省：3次元計測技術を用いた出来形管理要領（案），2022.3

神戸三宮におけるICTを活用した 新バスターミナル設計の進め方

安藤 翔¹・田畑 至啓²

¹近畿地方整備局 兵庫国道事務所 計画課 (〒650-0042兵庫県神戸市中央区波止場町3-11)

²近畿地方整備局 道路部 道路管理課 (〒540-8586大阪府大阪市中央区大手前1-5-44)

全国のバスタプロジェクトに先駆けて、市街地再開発事業においてバスターミナル施設整備等を行う「一般国道2号 神戸三宮駅交通ターミナル整備」が、2020年に直轄道路事業として事業化された。バス走行の円滑性や安全性を確保したバスターミナルの実現に向けては、バスターミナル設計に対するバス事業者や再開発会社との合意形成を図る必要がある。

本稿では、本事業における仮想現実（VR）、ドローンといったICTを活用したバスターミナル設計の進め方の紹介を通して、バス事業者や再開発会社等の関係者とイメージ共有を図りつつ、バスターミナルの設計を効果的かつ効率的に進めていくための方法について提案する。

キーワード バスタプロジェクト、バスターミナル設計、VR、ドローン

1. はじめに

神戸三宮駅周辺は、6つの鉄道駅が立地し、さらに1日約1,700便（2020年4月時点）の中・長距離バスが発着する市内最大の交通ターミナルである。このうち、中・長距離バスにおいては、兵庫県内だけでなく東京などの主要都市と神戸を結ぶ路線のほか、四国地方や淡路島方面を中心とする西日本へ向かう高速バスのゲートウェイとして機能している。しかし、鉄道駅と中・長距離バス停が分散しているため、乗換の利便性が低い、バス待合空間が不十分である、路上のバス停に起因する後続車の走行阻害が発生しているなどの課題を抱えている。

これらの課題を解消するため、国土交通省と神戸市は、2020年3月に新たな中・長距離バスターミナル等の整備を位置付けた「国道2号等 神戸三宮駅前空間の事業計画」を策定し、2020年4月には、新たな中・長距離バスターミナル（Ⅰ期）の整備と国道2号空間整備を行う「一般国道2号 神戸三宮駅交通ターミナル整備」が直轄道路事業として事業化された。これは、道路事業として整備するバスターミナルが、市街地再開発事業と一体で計画される全国初のケースとなるものである。

本稿では、本事業の概要とともに、仮想現実（以下、「VR」）を用いた意見交換と、ドローンを活用したバス実走実験といった、ICTを活用したバスターミナル設計の進め方を紹介する。そして、事業化から現在までの市街地再開発事業との相互調整や道路法改正等を踏まえ

たバスターミナル設計検討で得られた知見から、バス事業者や再開発会社等の関係者とイメージ共有を図りながら、効果的かつ効率的なバスターミナル設計の進め方について提案する。

2. 事業の概要

(1) 施設配置及びバスターミナル計画

本事業は、図-1に示すとおり、中・長距離バスを対象とした新バスターミナル（Ⅰ期）の整備と、バスターミナルの前面に位置する国道2号の車線運用の見直し等の空間整備を対象とするものである。また、これらと並行して、神戸市において、駅前道路を人と公共交通優先の空間に転換する「三宮クロススクエア」の段階的な整備、及び鉄道駅と新バスターミナルをつなぐ歩行者デッキの整備が予定されている。さらに、新バスターミナル（Ⅱ期）についても検討を進めつつあり、Ⅰ期完成時には5バース、Ⅱ期完成時には12バースを確保するとともに、複合ビル（ミント神戸）の1階に位置する既存の三宮バスターミナルとの一体的な運用を行うことで、神戸三宮駅周辺に分散しているすべての中・長距離バス停を段階的に集約する計画である。

新バスターミナル（Ⅰ期）は、雲井通5丁目再開発株

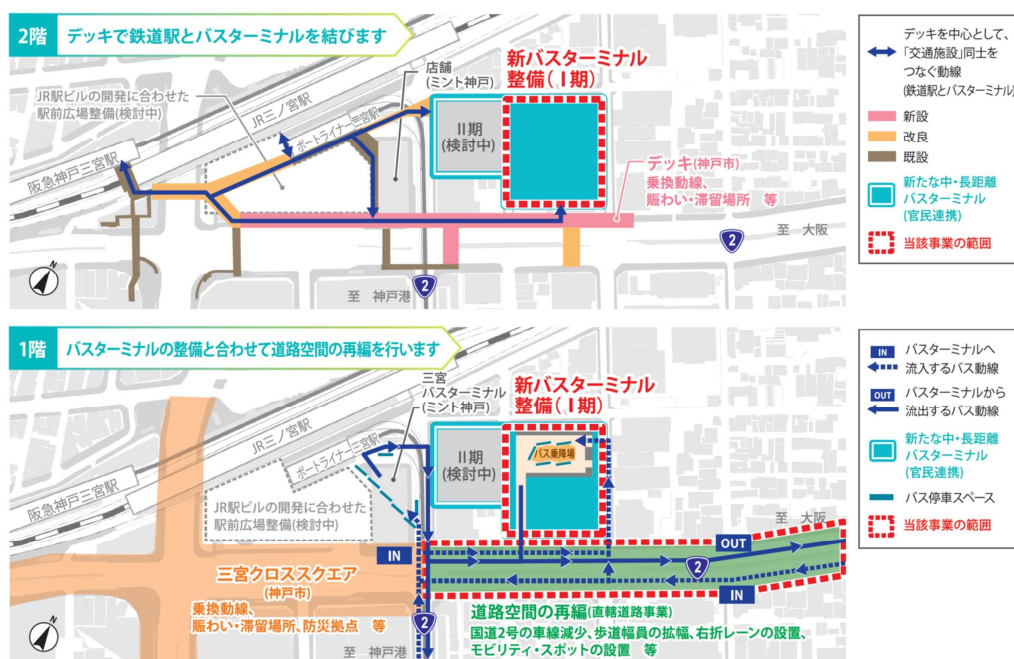


図-1 神戸三宮駅前空間の施設配置計画

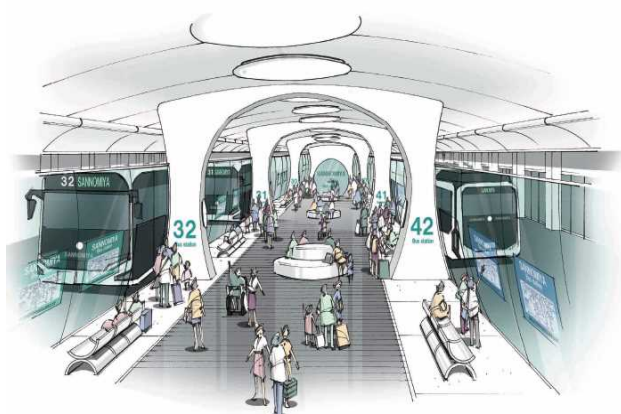


図-2 バス乗降空間のイメージ

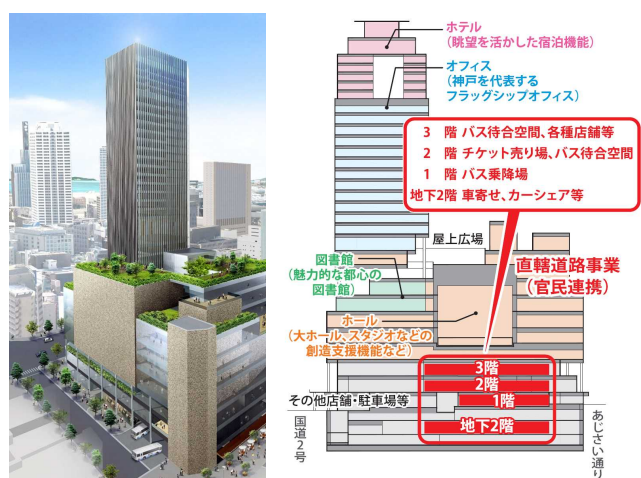


図-3 雲井通5丁目再開発ビルイメージ図

式会社（以下、「再開発会社」）が実施する「神戸三宮雲井通5丁目地区第一種市街地再開発事業」（以下、「再開発事業」）により整備される再開発ビル内に設けられる。具体的には、必要面積分の床を国が区分所有として取得し、道路区域を立体的に設定した上で、1階にバス乗降場、2階及び3階に待合空間を整備する（図-2、図-3参照）。

(2) 再開発事業

よりスピード感をもって事業進捗を図るため、再開発事業は民間のノウハウを採り入れながら進められている。2018年5月に地元地権者の出資により再開発会社が設立され、その後、再開発会社により選定された事業協力者グループの協力のもと、2019年9月に都市計画提案を行い、2020年3月には都市再生特別地区と第一種市街地再開発事業の都市計画が決定された。そして、その後に選定された再開発ビルの保留床を取得する「特定事業参加者」と再開発ビルの工事等を行う「特定業務代行者」の協力のもとで再開発事業を対象とした事業計画を策定し、2021年2月に施工認可申請を提出、同年3月に神戸市から施行認可を取得した。再開発ビルには、従前の地権者らの権利床として商業施設や図書館が整備され、新たに生み出される保留床にはバスターミナルをはじめオフィスやホテル、大規模ホール等が導入される予定である（図-3参照）。

(3) 待合空間整備

待合空間は、吹き抜けを持つ開放的な空間として、再開発ビルの2階・3階に設置する計画としている。ここでは、“神戸らしさが演出された充実した待合空間”



図4 待合空間イメージ（2階・3階の吹き抜け）

というコンセプトのもと、再開発ビル全体と交通ターミナルとの内装意匠の調和や、飲食・物販をはじめとした導入するサービス機能の収益性に留意しながら、魅力的で附帯施設の充実した空間を整備する（図4参照）。

(4) 国道2号空間整備

神戸三宮駅前の国道2号では、隣接する三宮クロススクエアによる車線減少によって交通量の若干の減少が見込まれる一方で、新たな中・長距離バスターミナルや再開発ビルに関連した交通が新たに発生・集中することが予想されている。そこで、交通負荷のかかる国道2号中央区役所前交差点における右折レーンの改良を行う等、適切にバス交通の処理ができるように検討を行う。また、隣接する三宮クロススクエア整備により余裕が生まれる道路空間の有効活用に向けた検討を行うこととしている。

3. ICTを活用したバスターミナルの設計

(1) バス実走実験

市街地再開発事業において施設整備を行う本事業においては、再開発会社が行う再開発ビルの実施設設計に対して道路法改正等を踏まえた交通ターミナルの基準等の諸



図5 新バスターミナル設計検討の経緯

条件を的確に反映できるよう、再開発ビルの検討進捗とあわせて相互に調整を行う必要がある。

現在、特定業務代行者において、再開発ビルの実施設設計（工事施工に必要な詳細設計）が進められているが、駅前広場などのオープンスペースに整備されるバスターミナルとは異なり、建築物内に整備されるバスターミナルでは限られた空間内で建築物を支える柱や壁面、権利床や共用スペースとの調整が求められる。これらはバスの走行に影響を与えることから、特に車路が整備される1階バス乗降場の設計にあたっては、交通ターミナルの設計基準を満足するだけでなく、バスが円滑に走行できるかどうかをバス運転手によって実際に確認してもらい、バス事業者と合意形成を図った上で実施設計を確定する必要がある。

そこで、バス事業者及び各機関に協力いただき、暫定の設計図面を基に空き地に仮設で車路を再現した上で、バスの実走実験を行った。実走実験の実施に際しては、バス事業者との協議を踏まえて設定したパターンに従って、出発・到着・走行に関する検証を実施した。なお、限られた建築物の空間でバス事業者の意見を十分に許容するバス車路の空間を確保することは容易ではなく、課題の優先度を踏まえたバス事業者及び各機関との調整が必要である。そこで、走行実験のとりまとめ結果を用いてバス事業者及び各機関との意見交換会を実施し、設計面の課題と対応の方向性について協議を行った。

本事業では、図5に示すとおり事業化前より実走実験を行い、再開発会社が行う基本設計、実施設計の進捗に合わせ合計3回の実走実験を行ってきた。

(2) 実走実験（第1回）で得られた課題

1回目の実走実験は、基本設計の妥当性を検証することを目的として、事業化前に神戸市が主体となって実施した。そこでは、単管パイプで柱を再現するとともに、カラーコーンで壁面位置を明示した。また、実験後における検証結果の振り返りや、バス事業者との意見交換での活用を目的として、走行風景を地上部からの動画で記録した。

実走実験の結果、バス事業者も一緒になって事業化の機運が高まったものの、特に転回部付近を中心として、机上による車両軌跡の検証では走行可能とされていた箇所が、実走では走行困難であることが少なからず判明した。車両軌跡が机上と実走で異なった理由としては、バス運転手の運転方法の多様性やバスのスペックの違い等が挙げられ、実際の車両軌跡を考慮した上での設計の必要性が明らかとなった。

また、壁面がないことで、バス運転手にとっては圧迫感や視界の遮断を伴わない走行が可能となっていた。これによって、実際よりも壁面ギリギリまで幅寄せを行っての走行が可能となっていたことなどから、四方を壁面で囲まれた新バスターミナル設計の走行性を検証する上



写真-1 バス実走実験の様子（第3回）



写真-2 ドローンによる走行軌跡撮影



写真-3 VRを用いた走行体験の様子



写真-4 VR映像のキャプチャ（一例）

では、壁面の圧迫感の再現が必要であることが明らかとなった。

(3) ICTを活用したバスターミナル設計

a) ドローンを活用したバスターミナル設計

1回目の実走実験で明らかとなった設計課題を踏まえて修正した設計を基に、2回目の走行実験では、地上での撮影に加えてドローンによる空撮を実施し、モーションキャプチャを用いてバスの実際の走行軌跡を視覚化した（写真-2参照）。結果的に、依然として転回部では円滑な走行に課題が残されていること、また新たに設置した待機バースへの正着が困難であることなどが判明したもの、ドローンによる空撮映像からのモーションキャプチャを用いることで、車両軌跡と重ねてバスターミナル設計の課題を明らかにすることが可能となった。また、車両軌跡を用いた検証では、実際の車両軌跡と言えるモーションキャプチャを参照しながら机上での車両軌跡を当てることで、これまでよりも実態に即した条件での設計の見直し、机上検証が可能となった。

なお、2回目の実走実験では、前回の実走実験で特に課題が大きかった転回部において、メッシュシートを用いた壁面の圧迫感の再現を試みたが、実験当日は強風によりメッシュシートを設置できず、壁面は単管パイプで組んだ骨組みのみでの再現となったため、視覚的な制約や圧迫感を十分には再現できなかった。

b) VRを活用したバスターミナル設計検証

第1回及び第2回のバス実走実験では、バス事業者及び各機関で課題を共有し、今後のバスターミナル設計の精度を高めるための有用な情報を得ることができた。し

かしながら、実走実験の仮設車路では、天井や硬質な壁を再現することができないため、建築物内に設置される乗降場でバスを運転する際の空間的な圧迫感を十分に感じ取ることができないとの懸念が、バス事業者から少なからず挙げられた。

一方、バス実走実験は非常に有用な方法であるが、多くのコストと労力を要するため、繰り返すことは現実的ではない。そのため、できるだけ実走実験の実施前に設計の精度を高めておく必要がある。

そこで、第3回目のバス走行実験に先立ち、第2回バス実走実験で指摘のあった課題を踏まえて修正した設計図面を基にVRに車路を再現し、ヘッドマウントディスプレイを用いて、バス事業者の運転手目線からの走行を体験してもらった。ここでは、柱・壁面・天井といった構造物とあわせて、バス運転状況の再現性をできるだけ高めるべく、バス実走実験で収集したドローンによる車両軌跡を参考にバスターミナル内の机上での車両軌跡を再現するとともに、サイドミラーからの見え方についても再現した。なお、バスはあらかじめ設定されたとおり走行し、ハンドル操作はできないが、体験者が頭を動かすことで360度全ての範囲を立体的に見渡すことが可能である。

因みに、筆者らもヘッドマウントディスプレイを装着してVRを体験したが、実際に自分がハンドルを握って運転しているかのような錯覚を伴いながら、設計中のバスターミナル車路での運転を疑似体験することができた。

バス運転手にVRを体験いただいた結果、バス事業者と天井と壁面で囲まれたバス乗降場の車路を走行するイメージを共有することができ、バス事業者からの圧迫感についての懸念も払拭することができた。その上で、改

めて意見交換を実施して、3回目の実走実験に向けたバスターミナル設計の課題及びチェックポイントを確認した。

ここで、VRでのバスターミナル車路の走行再現性について確認するため、実際に走行体験したバス運転手3名にアンケートを実施した。本来であれば、設計を基に再現したVRと実際の建物を比較することで再現性について評価できるが、未施工のため、バス運転手にはバス実走実験や類似のバスターミナルでの走行経験を踏まえて回答いただいた。結果として、VRの運転風景は概ね再現できており、車路の壁面や停車バスとの距離感等もあり、VRは設計のイメージをつかむためのツールとして有効であるとの肯定的な意見を得ることができている。

2回の実走実験結果を受けてバスターミナル設計を大きく見直すこととなったが、ドローンを活用したバスターミナル設計及びVRを活用したバスターミナル設計検証を経た3回目の実走実験では、概ね設計が問題ないことを関係者間で確認し、バス事業者及び再開発会社との合意形成を図ることができた。

e) ICTを活用したバスターミナル設計の進め方の提案

これまでの検討で得られた知見から、バスターミナルの設計を効果的かつ効率的に進めていく方法として、図-6を提案する。バス実走実験は、非常に有用な方法である一方、多くのコストと労力を要するため繰り返し行うことは現実的ではない。

そこで類似事例で得られた実際の走行軌跡を踏まえた設計やVRを用いた事前検証を行うことで、バス実走実験の回数を減らしつつ、多くの関係者との円滑なイメージ共有や合意形成の実現が期待できる。

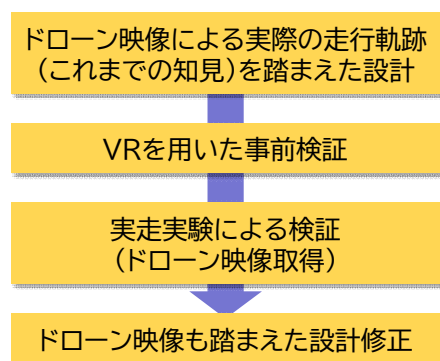


図-6 ICTを活用したバスターミナル設計の進め方

9. おわりに

これまでの検討で得られた知見から、本事業のような建築物内に整備されるバスターミナルでは、机上による車両軌跡の検証だけでは、バス運転手の運転方法の多様性やバスのスペックの違いを反映することができず、不十分であることが明らかとなり、実際の車両軌跡を考慮した上での設計が必要であることが判明した。そこで、VRやドローンなどのICTを活用することで、関係者とイメージ共有を図りながら、バスターミナルの設計を効果的かつ効率的に進めていくことが可能であることが分かった。

一方、本事業で得られた知見や蓄積されたデータは、本事業の制約条件のもとでの結果に過ぎない。今後は、ドローン映像等を用いたバス走行軌跡に関する情報をより蓄積し、それを軌跡図の作成条件として整理していくことが求められる。

また、バスターミナル設計におけるVRの有効性についても、設計を基に再現したVRと施工後の車路を複数のバス運転手に走行してもらい比較することで、より詳細かつ定量的に有効性を検証することが可能となり、バスターミナル設計での活用の幅も広がると考えられる。

本事業は全国のバスタプロジェクトに先駆けて検討を進めているものであり、試行錯誤しながらバス事業者や再開発会社、神戸市等の多くの関係者と一緒に検討を進めている。今後は、バスターミナルの設計だけでなく、効果的かつ効率的なバスターミナルの管理運営についても、さらに多くの関係者と連携して、地域の顔となる賑わいのある交通拠点として質の高い空間づくりを進めていきたい。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局「交通拠点の機能強化に関する計画ガイドライン」2021年
- 2) 雲井通5丁目再開発株式会社 HP : <https://kumoi-redevelopment.jp/>
- 3) 「神戸三宮駅における交通ターミナル整備の進捗と今後の展開」月刊誌 道路 2021.9

交通量の多い現道上の舗装修繕工事における ICT建設機械による施工の実施検討について

田島 卓昌

元 関東地方整備局 横浜国道事務所 神奈川出張所 (〒221-0012 神奈川県横浜市神奈川区子安台1-7-10)

現 関東地方整備局 道路部 計画調整課 (〒330-9724 埼玉県さいたま市中央区新都心2-1)

国土交通省は建設現場の担い手不足を背景に生産性向上を目的としてICT活用導入を促進しているが、実施した調査で交通量の多い現道上の舗装修繕工事においてはICT活用の施工と出来形管理を実施した事例が少ないことが判明した。現状多くの実施事例があるICT活用の起工測量と元設計データ作成で得られる生産性向上効果と比較し、施工と出来形管理もICT活用で実施することで得られる生産性向上効果は飛躍的に高くなると考えられるため、交通量の多い現道上の舗装修繕工事でICT施工と施工管理の導入を促進するにあたっての課題の抽出と解決策を提案し、適用及び実用性の検討について報告する。

キーワード ICT活用工事, i-Construction, 舗装修繕工事

1. 背景（なぜICT活用促進を進めるのか）

日本社会は2055年には人口の半数が60才以上になる程高齢化が進み生産年齢人口率が低下していくと予測される中、国土交通省は建設現場の担い手不足を背景に生産性向上に向け現場へのICT活用導入を促進している。

建設現場の担い手不足は実施中の工事においても同様の状況であり、下表-1に概要を記した「R3国道1号川崎市幸区舗装工事」（以下、本工事と記す）では熟練技術者の不足や建設業全体の人手不足、さらにはコロナ過での労働者数減少で人手が集まらず労働者1人あたりの負担増に悩まされていたため、現場にICTを導入して労働力不足を補うとともに、施工精度向上やデータ活用等による品質向上でよりよいものづくりをしたいと考えた。

表-1 「R3国道1号川崎市幸区舗装工事」の概要

工事名	R3国道1号川崎市幸区舗装工事
路線名	一般国道1号
工事場所	神奈川県川崎市幸区紺屋町～南幸町
工事概要	川崎市内の国道1号において、車道整流化及び歩道拡幅を実施する工事。
交通量	12h 26,363台、24h 38,291台、大混率16.2%、非混雑時速度20.7km/h
現場の特徴	都市部現道上の工事のため施工時間が夜間に制限されている

2. 現状調査（ICT導入はどこまで進んでいるか）

(1) ICT活用導入の変遷

国土交通省関東地方整備局が示すICT活用工事実施

要領によると、舗装工においては平成29年より、舗装修繕工においては令和2年より活用促進が図られている。この要領では現在、舗装修繕工事でのICT活用時、3次元起工測量、3次元元設計データ作成及び3次元データの納品は必須実施項目として定められているが、ICT建設機械による施工及び3次元出来形管理等の施工管理については選択実施項目として定められている。

表-2 ICT活用導入の変遷

建設生産プロセスの段階	舗装工(H29～)	舗装修繕工(R2～)
① 3次元起工測量	△→○(H30～)	○
② 3次元元設計データ作成	△→○(H30～)	○
③ ICT建設機械による施工	○	△
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	△→○(H30～)	○

※ ICT活用施工実施時、○は導入必須項目、△は選択項目。

(2) 舗装修繕工事でのICT活用導入状況

現在ICT活用を検討している本工事では、起工測量と元設計データ作成では測量時の交通規制や路面マーキングの手間が不要なことなどから、交通量の多い現道上で実施中の本工事で生産性を十分に向上させられると判断しICT活用にて実施したところであるが、施工と施工管理ではより施工時間、施工精度に気を配る必要があり、ICT活用にあたりより慎重に検討を進めている。

工事でICT活用を検討するにあたり類似現場条件の舗装修繕工事のICT活用実績を調査したところ、下表のとおり、類似の舗装修繕工事52件中、施工と出来形

管理をICT活用で実施した工事は3件に留まっていることがわかった。

表-3 類似現場条件の舗装修繕工事でのICT活用導入状況

調査対象：実施要領が示された12～現在(仮)までに機設国道事務所及び県道事務所等で実施された舗装修繕工事

事務所名	出張所名	H27交通量 24h、大混雑 (代表地点)	対象工事数 (件)	①	②	③	④	⑤	
東京国道事務所	品川出張所	59,158台、19.2%(国道1号)	6	○	○	○	○	○	ICT1件
	亀有出張所	56,657台、19.0%(国道6号)	6	○	○	×	×	○	
	代々木出張所	63,732台、13.8%(国道20号)	6	○	○	○	○	○	ICT1件
	万世橋出張所	66,624台、28.7%(国道17号)	6	○	○	×	×	○	
相模国道事務所	八王子出張所	39,927台、17.1%(国道16号)	7	○	○	×	×	○	
	日野出張所	54,357台、11.1%(国道20号)	3	○	○	×	×	○	
川崎国道事務所	川崎建設監督官事務所	59,158台、19.2%(国道357号)	—	○	○	○	×	○	ICT1件
横浜国道事務所	神奈川出張所	88,367台、17.1%(国道1号)	5	○	○	×	×	○	(1但し施工管理は不実施)
	金沢町出張所	44,266台、31.5%(国道357号)	3	○	○	×	×	○	
	小田原出張所	24,203台、7.9%(国道1号)	1	○	○	×	×	○	
	保土ヶ谷出張所	156,729台、32.1%(国道16号)	2	○	○	×	×	○	
	厚木出張所	59,158台、19.2%(国道1号)	4	○	○	×	×	○	
	相模山出張所	62,650台、16.8%(国道1号)	3	○	○	×	×	○	
合計			52	52	52	3	2	52	

3. 課題整理等 (なぜICT導入が進まないか)

2. (2)で実施した調査で類似現場条件の舗装修繕工事ではICT活用の施工と出来形管理を実施した事例が少ないことが判明したが、施工と施工管理をICT活用で実施することで、測量と元設計データ作成のICT活用のみの実施と比べその効果は飛躍的に高まることが期待されるため、現道における舗装修繕工事でICT施工・施工管理導入を促進するにあたっての課題の抽出と解決策を提案し、適用及び実用性の検討について報告する。

(1) ヒアリングによる課題の抽出

2. (2)の調査で判明した施工と施工管理のICT活用を選択しなかった49件の工事に対して追加でヒアリング調査を実施し、ICT活用による施工と施工管理の選択に際してどのような懸念(課題)があるのかを抽出した。

実施した追加調査の結果、舗装修繕工事を現道上で実施する上で課される様々な制限とICT機器の繊細さが相反するという特性から、主に4点の懸念事項がICT活用促進の足枷となっていることがわかった。

a) 初期コスト

ヒアリングの中で最も多く挙げられた課題はICT活用にあたっての初期コストであった。

ICT活用にあたっては初期コストが莫大にかかる。例えばICT切削機は未だ日本全国にわずか3台しかなく、この希少なICT切削機のレンタルには1日150万ほどと、通常の7倍ほどの費用を要する。加えてICT切削機に付随する機器の用意にも費用が多くかかる。ICT機器を自社保有していれば費用は抑えられるが、現状自社保有の企業は希少であり、殆どの企業はICT活用にあたり莫大な初期費用を支払うことが難しいため、本来は省人化省力化に繋がるはずのICT活用が初期費用がネックとなりできていない現状となっている。

b) 規制時間(作業時間確保)

現道上で実施する舗装修繕工事では警察協議により規制時間が夜間に限られており、近年更にその規制が厳しくなる傾向にあるため作業時間の確保が難しい。この作業時間の確保がICT施工導入時にはICT機器の特性によりさらに難しくなる。例えばICT切削機の始動時には、マシンコントロールの基礎となる位置情報の初期設定に1.5h程度を要するため、本来確保できる作業時間が削られてしまう等の懸念がある。またその他にもICT活用での施工実施時には様々なICT関連機器の持ち込み及び設定が必要となっており、それらの設定にかかる作業時間や人手をいかに減らすかが課題となっている。

c) 交通の振動

現道上で実施する舗装修繕工事現場では、常に一般交通と隣り合わせになっているため、交通の振動がある。

ICT切削機はマシンコントロールの際、衛星と地上に設置したトータルステーション(TS)と相互に常時通信し自らの位置を割り出して制御しているが、交通の振動があると、GNSS通信による自位置割り出しに誤差を生じさせ、マシンコントロール精度が下がり、施工精度に影響する懸念がある。

d) 架空物

現道上で実施する舗装修繕工事では架空物の損傷に注意が必要だが、ICT切削機にはマシンコントロールに必要な衛星等通信用アンテナが必ず設置されており、巨大な切削機自身による電波死角をクリアするのにアンテナ高が5mあるため、場所により架空物等とアンテナが支障し作業が実施出来ないという懸念がある。



図-1 ICT切削機に付属する高さ5mのアンテナ

(2) 解決策の提案

3.(1)で抽出した課題について、3件のICT施工・施工管理の導入工事でも同様の課題はあったものの、現場での工夫を重ねてICT活用をおこなうことができていたため、この実績事例を参考に解決策を示す。

a) 初期コスト

舗装修繕工事のICT機器の損料が高い原因は、現在需要が少なすぎるためと考えられる。これは今後国土交通省の取組により舗装修繕工事でのICT活用が促進されることで徐々に費用が下がっていくものと考えられるが、導入初期段階の今は国土交通省として継続的かつ積極的に導入を促進していくしかないものと考えられる。

b) 規制時間(作業時間確保)

3.(1)b)で作業時間の確保が課題として抽出されたが、3件の実績事例から、作業計画作成の工夫により解決できることが判明している。下のタイムテーブル図のようにICT初期設定にかかる1.5時間については、規制設置との並行準備実施で30分、路面マーキング不要で30分、さらに3次元施工での舗装後の出来形計測不要で規制替え時間30分を短縮することが可能となるため、結果的に当初想定作業時間より計1.5時間分ICT施工導入で工程を短縮することが可能となり、従来工法と同等の作業時間を確保することが可能と判明している。

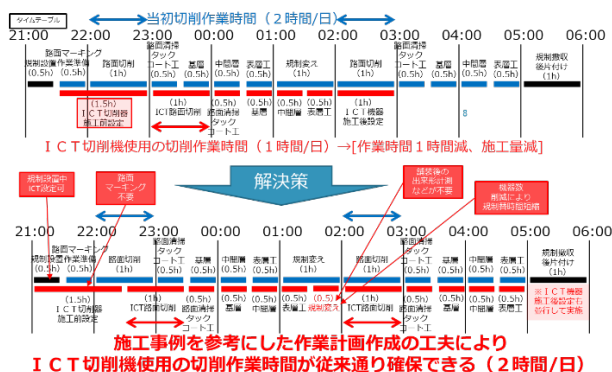


図2 タイムテーブル図

c) 交通の振動

現道の交通による振動がマシンコントロールに誤差を生じさせ精度に影響が出るのではないかと懸念については、地上側で設置するTSの数を増やすことで位置情報の補正を強化して精度を保つことが可能と既往事例で判明している。



図3 現道の交通による振動のイメージ図

TSの設置数を増やし機械誤差を抑える



図4 TS設置数増による電波強度確保の概念図

d) 架空物

ICT切削機の高さ5mのアンテナが現道上の架空物に支障するという懸念については、架空物位置の事前調査実施でアンテナ支障箇所を特定した上で施工区割りを検討することで、支障しない箇所はICTで実施し、

支障する箇所は従来の切削機を使用するなどの使い分けの計画を立てて部分的にICT活用で実施することができると既往事例から判明している。

(3) 適用の検討

3.(1)および3.(2)で整理した課題と解決策が実際、今回ICT活用を検討している本工事でも適用できるのか、確認および検討を実施した結果を下に記載する。

a) 初期コスト

本工事の施工業者はICT切削機は自社で保有していなかったものの、3Dスキャナー(TS)等の付随機器は保有していたため、初期コスト等について検討の結果ICT施工・施工管理の実施が可能と判断した。

b) 規制時間(作業時間確保)

本工事でも規制時間を夜間9時間に制限されているなかで作業時間を最大限確保し日施工量確保の計画をする必要があるが、(2)b)で示した既往事例のタイムテーブル図と同様の作業計画を立てることで従来と同等の作業時間を確保できるため、本工事でもタイムテーブル上はICT施工・施工管理の実施が可能であると判断できる。

c) 交通の振動

本工事の工事区間は交通量が夜間12h 11,928台と多く、大混率や旅行速度も高い。また工事では常に規制帯横を一般車両が通行する。これらの条件より本工事の工事区間においてもICT切削機の施工精度への交通の振動の影響はあるものと考えられるが、(2)c)で示した作業箇所へのTSの設置数増で施工精度はある程度補うことができるものと考えられる。2.(2)の調査で判明した3件のICT活用工事でも本工事の夜間交通量と大差ない数値であったため、本工事でも同様の対策でマシンコントロールの面ではICT施工・施工管理実施が可能と判断できる。

d) 架空物

本工事の工事区間においても多くの架空物が存在し、これらはICT切削機の高さ5mのアンテナと支障する。支障する箇所については作業実施不可となるため本工事でも架空物位置の事前調査と施工区割れ検討で架空物のない場所のみICT活用で実施することとなる。なお調査の結果工事区間内8区割りのうち6区割りでは架空物がなくICT切削機での実施が可能であり、残り2区割りについてはICT切削機の使用不可と判明している。

(4) 実用性の検討(残る課題)

3.(3)の適用の検討により本工事でのICT施工・施工管理実施が物理的には可能であることが判明したが、実際にICT活用の実施を検討する際には、生産性向上や品質向上等のICT導入効果が導入コストを上回ること、つまりは実用性の確認を実施する必要がある。実際、ICT導入には多くの初期コストを要するため、導入には

慎重な検討が必要となっている。そこで、以下に改めて I C T 施工・施工管理の実施効果を整理し実用性の検討を実施するとともに、残る課題の洗い出しをおこなう。

a) 実用性の検討（実施効果整理）

本工事のような交通量の多い現道上の舗装修繕工事で I C T 施工・施工管理を実施することで、以下のような生産性向上・品質向上の効果が見込めると考えられる。

- ・従来より安定した切削作業進行による作業効率向上
- ・路面マーキング不要による省力化、安全性向上
- ・マシンコントロール自動化による熟練オペ不足解消
- ・3D舗装データ管理による省力化と品質向上

さらには、実施済の3次元起工測量・3次元元設計データ作成と併せて実施することで、これまでの I C T 施工・施工管理を不選択で実施しなかった工事では有効活用できていなかった3次元元設計データを、施工や施工管理に生かすことができ、工事内で一貫して3次元元設計データで施工管理を実施することでさらなる生産性向上・品質向上につながるものと考えられる。

b) 残る課題

前項の実施効果の反面、今後解決しなければならない残課題もある。

まずは3. (2)a)に記載した初期コスト等の課題であるが、これについては記載のとおり継続的かつ積極的に I C T 導入促進を進めていくしかないものと考えている。

次に3. (1)d)で挙げていた I C T 切削機のアンテナと架空物との支障の課題であるが、架空物がある場所の I C T 切削機での施工は現状不可能である。この課題については I C T 切削機の改良でアンテナ高を抑えることができれば簡単に解決できるため、メーカーにヒアリング（開発要望）等を今後実施し解決させたいと考えている。

最後に3. (1)c)で挙げていた切削誤差の懸念について、T S の設置数を増やすことで機械誤差を抑える解決策を提案したが、それでも何らかの理由で切削誤差が生じる可能性は否定し切ることができない。この際、現状の技術では切削誤差の解析に半日程度の時間を要するため、切削後すぐに I C T 切削機から切削誤差を読み取ることができず、実際のところは日々交通開放の必要性から舗設前に従来の測量も実施して誤差無しを確認しており、生産性・作業効率が上がっているとは言えない

4. 「R3国道1号川崎市幸区舗装工事」での取組

3. の課題整理で判明した残る課題等について、本工事では2022年7月頃に予定する I C T 活用による舗装修繕工の施工と施工管理の実施に向けて、下記のような課題解決につながる取組の実施を計画している。

(1) I C T 試験施工による通信性能等事前確認の実施

これまでの課題整理で、 I C T 切削機の初期設定にか

かる時間や I C T 切削機の通信環境不良による誤差発生が課題として挙げられていたが、今回本工事では事前に試験施工を実施し、初期設定作業の事前練習や通信環境確認を実施することで、本番の作業を円滑に進めるよう備える取組を実施することとした。

(2) メーカーへのヒアリング（マシン改良）

I C T 切削機のアンテナと架空物が支障するという課題については、アンテナ高を抑えることができれば解決すると考えられるため、本工事の工事機械選定時に併せてメーカーへアンテナ高を抑える案を提示し、機械改良の可能性についてヒアリングをおこなう。なお改良案については、1本アンテナの四方への分散設置や伸縮可能アンテナへの変更等を検討している。

(3) 施工日程の工夫

今回、3.(3)d)で8区割り中2区割りは従来工法で切削することを計画しているが、 I C T 施工実施日の間に従来工法実施日を配置することで、工事期間内にデータ収集と改善を実施する。これにより、工事で新たな課題が発生しても、本工事内で克服できることが期待できる。

(4) 現場の整備（基準点の追加設置）

課題整理の中で I C T 切削機の自位置特定のための初期設定に時間を要する課題が挙げられたが、提案したタイムテーブル作成の工夫の他に、基準点の追加設置を実施することを検討している。この基準点の追加設置で予め機器の始動位置情報を把握しておくことができ、初期設定時間を大幅に短縮する効果が期待される。

5. まとめと今後の展開（展望）

(1) まとめ

今回の調査で現道における舗装修繕工事で I C T 施工・施工管理導入を促進するにあたって課題抽出と解決策提案を実施し、その適用及び実用性の検討を実施したことで、本工事のような交通量の多い現道上の舗装修繕工事でも精度の高い I C T 施工・施工管理を実施することが可能であり、さらにその I C T 活用により工事の生産性と品質を高めることができると判明した。

(2) 今後の展開（展望）

今後、今回整理した内容をもとに本工事での I C T 施工・施工管理を含めた I C T 活用を実際に実施していく。

I C T 施工・施工管理の実施時には、残課題である切削機誤差等についてデータを収集し、とりまとめる。

実施でとりまとめたデータについては今後の舗装修繕工事で解析等に役立つように整理することで、舗装修繕工事での I C T 施工のさらなる導入につなげていく。

除雪現場の省力化による 生産性・安全性の向上に関する取組 —除雪現場省力化技術の概要と 実働配備に向けた検討—

伊藤 駿¹・谷津 臣則¹・在田 尚宏¹

¹北海道開発局 建設部 道路維持課 (〒060-8511 北海道札幌市北区北8条西2丁目)

2017年3月、北海道開発局や北海道、札幌市、NEXCO東日本では、「除雪現場の省力化による生産性・安全性の向上に関する取組プラットフォーム(i-Snow)」を設立。今日までに除雪機械操作の自動化を目的とした「ロータリ除雪車の自動制御システムの開発」や「除雪機械の運転支援技術(映像鮮明化技術)」、「除雪機械のワンマンオペレータ化」の試行などに取り組んできた。本稿は、これら取り組みの概要および今後の実働配備に向けた検討状況について報告するものである。

キーワード 除雪、i-Construction、i-Snow、働き方改革

1. はじめに

北海道開発局(以下、当局)は、北海道内の直轄国道46路線、約6,900kmの除排雪作業を行い、安心・安全な冬期道路交通の確保を担っている。

北海道における直轄国道では、通行止め要因のうち、約4割が地吹雪などの冬期気象によるものとなっている(図-1)。また、気象の影響範囲の広さ等から、広域的に複数路線が同時に通行止めに至る場合が多い。

なお、北海道は都市間距離が長い広域分散型の社会を形成しているため、冬期交通障害が発生した場合、住民生活、地域産業、経済活動への影響が非常に大きい。

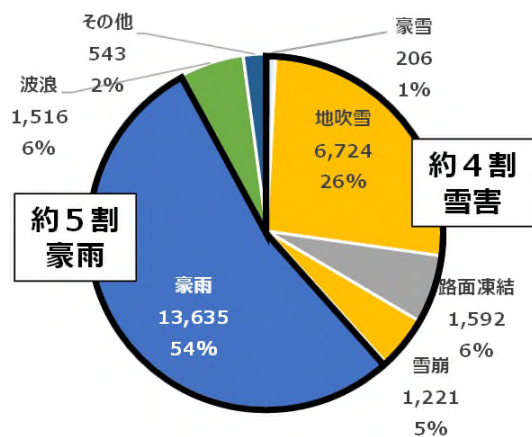


図-1 北海道の直轄国道の通行止め総時間内訳 (2012-2016)

一方、近年、除雪機械オペレータの担い手の減少、かつ高齢化が懸念されている。除雪サービス水準を維持するため、除雪作業のさらなる効率化が喫緊の課題である。このような積雪寒冷地域特有の課題を踏まえ、2017年3月に当局や北海道、札幌市、NEXCO東日本では、持続可能な道路除雪に向けた取り組みとして、産学官民が幅広く連携して取り組む「除雪現場の省力化による生産性・安全性の向上に関する取組プラットフォーム(i-Snow)」を設立した(図-2)。

本プラットフォームにおいて、当局では除雪作業の省力化(図-3)としてロータリ除雪車における「除雪機械操作の自動化」をはじめとした除雪機械の運転支援技術の開発に取り組んできた。

プラットフォーム設立から6年目を迎え、これまで試行してきた技術が確立されつつあるため、各技術の概要と、それらの実働配備に向けた検討について報告する。

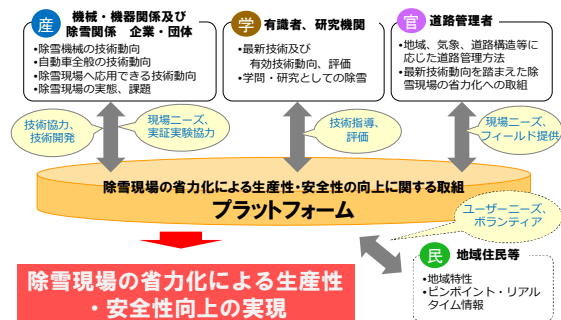


図-2 プラットフォームの概念



図-3 除雪作業の省力化イメージ

2. 「i-snow」におけるこれまでの取組

「i-snow」における取組みは、「1名乗車（ワンマンオペレータ化：以下、ワンオペ化）の実現」と「熟練のオペレータの技術・経験に左右されることなく、誰でも一定の安全性・精度で除雪機械の操作を可能とすること」を目的としている。本章では、これまでの取り組みについて概要を紹介する。

(1) 除雪機械操作の自動化技術

a) ロータリ除雪車

準天頂衛星みちびき（以下、みちびき）と高精度3Dマップデータによる情報通信技術を活用した「運転支援ガイダンス」と「投雪作業の自動化」を併せたシステム（図-4）など、各種省力化技術を搭載した「i-Snowロータリ除雪車」を開発した（図-5）。

2018年度に国道334号知床峠の一部区間において「i-Snowロータリ除雪車」による実証実験を開始した。

冬期通行止により一般交通の影響を受けない条件のもと、作業装置操作の自動化について2019年度までに一定の成果が得られた。2020年度からは一般交通の影響がある国道38号狩勝峠に場所を移し実験を継続した。2021年度においては、これまでに確認した機械動作の改善や、オペレータの運転操作の動きを学習させる「習い制御」の自動化を完成させ、実働配備への準備を整えた。

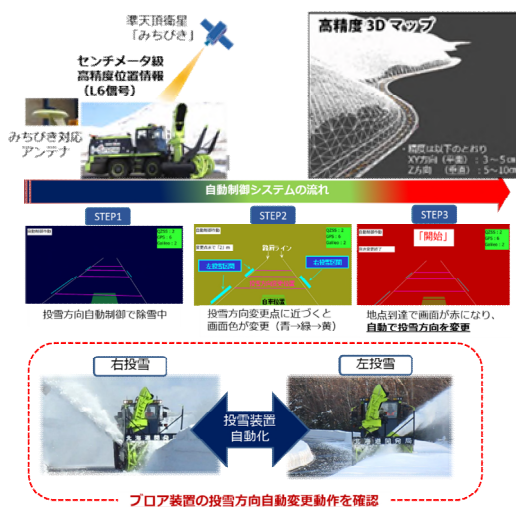


図-4 運転支援ガイダンスと投雪作業自動化の概要



図-5 i-Snowロータリ除雪車の概要

b) 凍結防止剤散布車

凍結防止剤・防滑材の散布操作を自動化する支援技術として「凍結防止剤散布支援システム（AIS3：Anti-icer Spreading Support System）」（以下、AIS3）を開発。AIS3は、i-Snowプラットフォーム構成員である（国研）土木研究所寒地土木研究所において研究開発が進められた技術である。

凍結防止剤の散布条件が異なる複数の散布パターン（散布区間、散布幅、散布方向、散布量、溶液の割合等）をWebGIS上に作成することで、予め定めた散布区間での「自動散布」が可能となる。また、日々変化する路面状況にも対応するため、従前どおりの「手動操作」のほか「音声による」散布操作への切り替えが可能である。

特に熟練の技術が必要な散布作業において、本システムによりオペレータの心理的負担の軽減と、経験に左右されることのない一定の精度で散布を可能とするものである（図-6）。



図-6 凍結防止剤散布支援システム（AIS3）の概要

寒地土木研究所は、2016年度から2018年度までの3年間、苫小牧寒地試験道路において、主にオペレータの散布作業操作時の挙動について以下の4項目について検証を行った。

1. 散布地点の認知距離
2. オペレータの注視点
3. 路面状態に応じた散布内容の的中率
4. 散布の的確性

2019年度からは国道235号において試験車両（凍結防止剤散布装置を搭載したトラック）での自動散布の精度検証を行った。2020年度までの検証結果から、本システムの安全性・確実性が確認できた。2021年度は凍結防止剤散布車でのワンオペ化の希望が高かった8つの開発建設部において、凍結防止剤散布車による試行を開始した。

(2) 運転支援技術

a) 周辺探知技術

国道での除雪作業は、一般交通に加え人の往来がある中での作業となる。ワンオペによる運用を行う際には、これまで助手が行ってきた安全確認を補完する技術が必要となる。

2018年度から前述の「i-Snowロータリ除雪車」に「ミリ波レーダによる車両探知」及び「3Dカメラ」、「AI物体認証機能を有した人との接触防止システム」を搭載し、その有用性を確認している（図-7,8）。

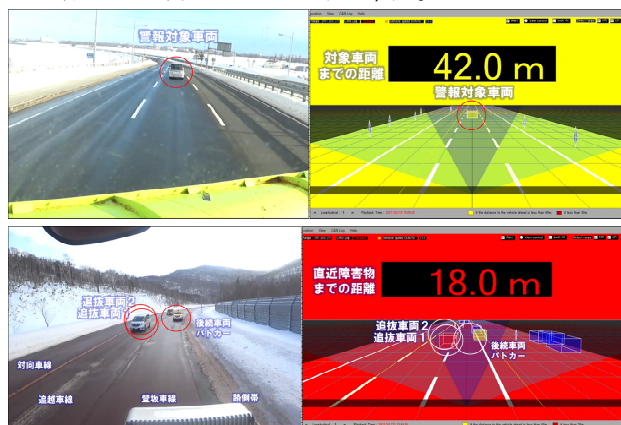


図-7 ミリ波レーダによる車両探知



図-8 3DカメラとAI物体認証を有した接触防止システム

b) 映像鮮明化技術

本技術は、視程障害により前方視界が妨げられた際の、作業の安全性確保を目的としている。運転席前方に取り付けたカメラ映像を映像鮮明化装置により鮮明化処理を行うものである。鮮明化された映像は、運転席に設置したモニタによりリアルタイムに確認できる。

鮮明化処理とは、映像の中の雪の濃さに応じて明るさとコントラストを補正し、映像から雪を除去することで前方視界の確認を補完する技術である（図-9）。

2018年度に国道231号において実証実験を開始し、2020年度には実際に使用している除雪トラック、凍結防止剤散布車、パトロール車に試験搭載し、耐久性や鮮明度、モニタ出力の際の遅延の有無などについて確認を行った。

これらの実証実験にて有用性が確認できたことから、2021度は現場からの設置要望が高い除雪トラックを対象として、各開発建設部に1台ずつ実働配備を開始した。



図-9 映像鮮明化処理

同時に、映像鮮明化装置の高度化（AI搭載型）の検討を行っている。AI搭載型では、鮮明化処理に加え、AIを活用して接近する車両や人、信号機等を自動で検知する。また、必要に応じてモニタや音声で警告を行うことも可能である。2021年度に9つの開発建設部に各1台（除雪トラック）試行配備し、その有用性を確認した。

c) 安全確認用カメラ設置

従来、助手による安全確認を、運転手がワンマンでも確認できるように、除雪機械の運転席からの死角に「安全確認用カメラ」を設置し、視覚を補完する試行を実施。（図-10,11）。2020年度より、試行を希望した当局の維持除雪工事受注者において、助手を同乗させた状態で、カメラやモニタ位置、カメラへの着雪対策の検証を行い、有用性を確認した。

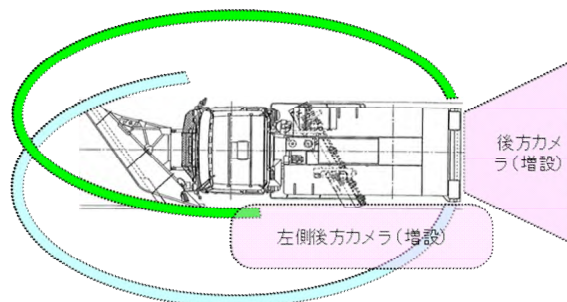


図-10 オペレータの視界（緑）と助手の視界（水色）範囲

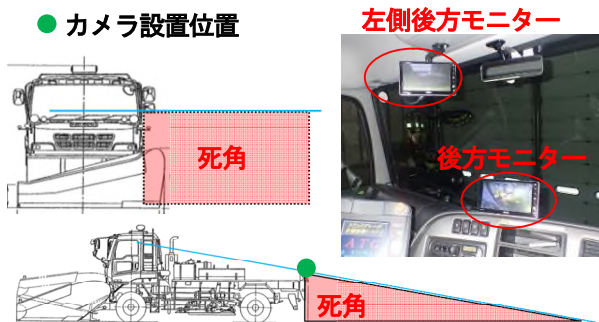


図-11 除雪トラックの安全確認用カメラの設置例

(2) 衛星電波不感地帯対策

除雪機械操作の自動化を行う上で、みちびきの電波不感地帯解消は重要な課題の一つである。

道路には、みちびきの電波が受信できない不感地帯（山間部、ビル、高架、トンネル等）が多数ある。

2021度は、不感地帯において自動制御を補完とする技術の試行を行った。具体的には「加速度センサー等を用いた車両慣性航法システム（INS）」及び「磁気マーカシステム」、「3D-LiDARによる自己位置推定」の3つの技術の有用性の確認を実施した。



図-12 「i-Snowロータリ除雪車」への不感地帯対策技術の設置状況

3つの技術のうち、「磁気マーカシステム（図-13）」は、φ30×20の磁気マーカを除雪車の走行ラインに埋め込み、車両に設置されたセンサモジュールで磁気マーカを読み取り、自車位置を特定するシステムであり、誤差も少ない技術である。

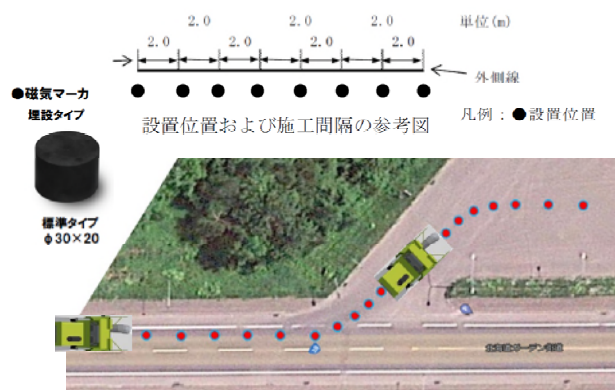


図-13 磁気マーカシステム

「加速度センサー等を用いた車両慣性航法システム（INS）」はその構造上、不感地帯の距離が長くなると誤差が蓄積されて精度が劣化することから、今後他の技術と組み合わせた不感地帯対策の検討を行うこととした。

「3D-LiDARによる自己位置推定」は、3D-LiDAR計測による点群データの取得は問題なかったが、取得した点群データから地図を生成して自己位置を推定するまで至らなかった。要因としては、走行中の計測結果から、地図生成を行うまでに時間を要していることが挙げられる。現時点では3D-LiDAR単独での高精度な位置を補完することは難しい。

3. 実働配備に向けた検討

これらの技術について、全ての除雪機械に配備されることが望ましいが、当局は現時点（2022年度）においてロータリ除雪車150台、凍結防止剤散布車89台を保有している。その他の除雪機械を含めると総数1,070台（表-1）となる。初期整備費用や機械更新費用の観点から、全ての除雪機械への配備には多大な費用と期間を要するため、今後の優先配備の進め方について検討を行った。

表-1 全道除雪機械配置台数

部局名	主 力 機 械					補助機械			計	その他機械		合 計
	除雪 トラ ック	除雪 グレ ーダ	ロー タリ ー除 雪車	除雪 ドー ザ	小 計	小型 除雪 車	凍結 防止 散布 剤車	小 計		パト ロー カー ル	小 計	
札幌	80	53	31	26	190	30	20	50	240	20	20	260
函館	51	3	10	10	74	13	8	21	95	13	13	108
小樽	51	4	19	5	79	15	6	21	100	10	10	110
旭川	69	11	21	12	113	13	13	26	139	18	18	157
室蘭	45	5	7	7	64	10	10	20	84	13	13	97
釧路	60	3	15	8	86	7	4	11	97	19	19	116
帯広	47	4	12	6	69	8	11	19	88	11	11	99
網走	71	3	16	10	100	11	14	25	125	22	22	147
留萌	31	1	10	4	46	6	2	8	54	6	6	60
稚内	28	1	9	3	41	6	1	7	48	6	6	54
計	533	88	150	91	862	119	89	208	1,070	138	138	1,208

(1) 配備「路線」の検討

「除雪現場の省力化技術（以下、省力化技術）」は、除雪機械オペレータの担い手減少、高齢化が懸念されるなか、以下を目的としている。

1. 省力化技術によりこれまでどおりの除雪サービス水準を維持すること。
2. 冬期交通障害発生時の悪天候の状況下でも除雪作業を可能とすること。

これらの目的を果たすための配備を進める上で優先すべき路線について検討を行った。

a) 国道334号 知床峠

国道334号知床峠は北海道の国道で唯一の「冬期通行止区間」であり、春先の通行止解除に向けて道路が見えない状態までに堆積した雪の除排雪を行う路線である。冬期通行止により一般車両の交通の影響を受けず、また、道路附属物や構造物が少ないため、除雪機械操作の自動化を取り組む上で良好な条件が整っている。

また、i-Snowの取り組みにおいても、最初の実証実験の場を選定した路線であり、優先的な配備は大きな効果が期待できることから、2022年、今冬からの実働配備を決定した。

b) 予防的通行規制区間

当局では早期の交通確保を行う区間として「予防的通行規制区間（26区間）」を設定している（図-14）。この区間では数年に一度の猛ふぶき等が予想される場合、大規模な立ち往生の発生により、住民生活や社会経済活動に影響を及ぼす通行止めの長期化を防ぐため、早い段階で躊躇無く通行止めをし、集中的に除雪を行うものとしている。

当該区間の中でも例年、通行止発生頻度が多い路線、通行止に至らないが冬期通行障害の発生頻度が高い路線があり、それら路線への優先配備を進めることで、省力化技術の効果が大きく発揮できる。

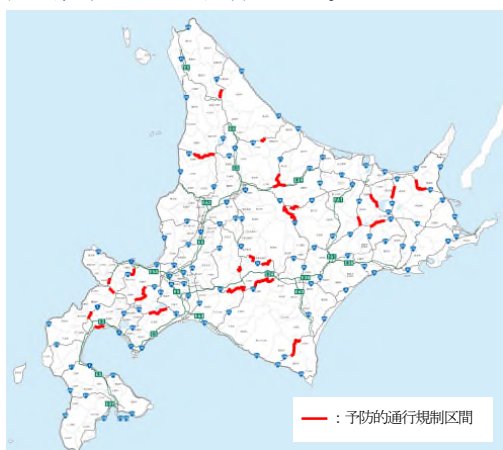


図-14 北海道の予防的通行規制区間（直轄国道）

c) 高規格道路

高規格道路（図-15）は、冬期通行障害による通行止が発生した場合、道路利用者の利便性が著しく損なわれることから、速やかな交通の確保が必要である。一般広域道路（国道）に比べ道路形状の大きな変化が少なく、自動車専用道路区間では除排雪時の歩行者等への配慮の心配が無いことなど、除雪作業時の制約が少ないことから優先的な配備は大きな効果が期待できる。



図-15 北海道の高規格道路

d) 一般広域道路（国道）

一般広域道路では、都市部、市街地、郊外地など同一路線、区間内での道路形状の変化が多い。また、都市部での衛星不感地帯の存在など制約が多く、区間ごとに異なる諸条件への対応が必要となる。

そのため、まずはa)～c)の路線に対して省力化技術を優先的に導入し、そこで生じた実運用面での課題をフィードバック・改善を図った後に導入することが望ましいと考える。

(2) 配備「技術」の検討

a) 除雪機械操作の自動化技術

ロータリ除雪車の機械操作の自動化技術については、前述のとおり、実働配備の効果が大きく期待できる路線・区間から順次配備を進めることが望ましい。また、ロータリ除雪車以外にも、東北地方整備局では除雪グレーダ、北陸地方整備局では除雪トラックと小形除雪車について機械操作の自動化に取り組んでいる。お互いの技術は速やかな共有・導入を行うことが必要であり、北海道における機械仕様を確立させることが重要である。また、これら機械の実証実験においては、除雪作業時の制約が少ない高規格道路などで集中的に実施することで早期の技術確立に繋がり、実働配備においても実現しやすいものとする。

凍結防止剤散布車では、凍結防止剤散布支援システム（AIS3）を車両に搭載するだけで機械操作の自動化が可能であるため、他の除雪機械に比べて汎用性が高い。しかし保有する車両が多いため、凍結防止剤・防滑材の散布作業の頻度の高さや、交通量の多さなど散布作業の負担が大きい路線・区間を優先して配備を検討することが望ましい。

また今後、機械操作の自動化の展開が進むにつれて、準天頂衛星みちびきの受信電波不感地帯対策が必要不可欠となるが、現在、有効性を確認する不感地帯技術の中でも磁気マーカーシステムについては、不感地帯が非常に長い区間における対策として期待ができるものであり、道路インフラとして整備が進むことで、将来の自動車の自動運転にも寄与できるものと考えられる。

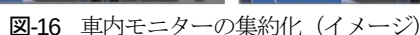
b) 運転支援技術

運転支援技術として、周辺探査技術のミリ波レーダによる車両探知および3DカメラとAI物体認証機能を有した人との接触防止システムは、除雪機械操作の自動化を補完するために必要な技術である。また、当該技術を単体で使用することも可能である。現在、取り組んでいるワンオペ化を試行する除雪機械へ配備することで、安全性の大きな向上が期待できる。

映像鮮明化技術については2021年度、全道10台の除雪トラックへ実働配備を行い、現場での配備ニーズも非常に高く、順次台数を増やしていく予定である。配備にあたり、吹雪時の視程障害発生頻度の高い除雪工区を優先

その他、除雪機械操作の自動化技術としての、3Dマップガイダンスシステムがあるが、自車位置を特定し、3Dマップ上で走行位置や周辺障害物の確認が可能であり、若手オペレータへの運転支援技術として配備することも有効と考える。

現在、各技術毎に独立した確認モニターの設置が必要となっており、複数技術の搭載により、オペレータの車内での確認が煩雑になり、かえって危険な状況が生じることも考えられる。今後は確認モニターの集約が必要であり、各技術の統合化も必要である（図-16）。

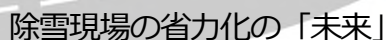


現在、除雪作業の効率化に限らず、あらゆる分野での新たな技術開発・競争化が次々と進んでいる。その中で有用な技術を速やかに現場へ反映・利用し、新たな技術改善を進めることが土木現場の更なる効率化や課題の解消につながっていくものと考える。

また、これら技術が世の中に広がることで、社会のインフラが大きく変わり、様々な効率化に繋がることを想像しながら、取り組みを進めて行きたい。

- 1) 北海道開発局道路計画課：新広域道路交通ビジョン
- 2) 北海道開発局道路維持課：除雪現場の省力化による生産性・安全性の向上に関する取組プラットフォーム
(i-Snow) 会議資料（第1～11回）

「i-Snow」商標（ロゴマーク）



ICT活用により作業装置を自動化した 除雪トラックの試行運用について

福島 徹¹・前原 正之¹

¹北陸技術事務所 施工調査・技術活用課 (〒950-1101 新潟県新潟市西区山田2310番地5号)

除雪機械の操作に求められる熟練の技能を持つオペレータの不足に対応すべく、作業装置の自動制御機構を装備した除雪トラックを開発し、実際の除雪作業で試行的に運用した概要を報告する。

キーワード ICT, 除雪機械, 除雪トラック, 作業装置自動化 (マシンコントロール)

1. はじめに

北陸地方整備局では、管内3県（新潟県・富山県・石川県）の直轄国道14路線、管理区間延長約1,073kmの冬期道路交通を確保するため、約500台の除雪機械を配備し、除雪作業を実施している。

除雪機械の運転は路面状況、道路構造、沿道状況等の変化に適応した操作が必要であり、経験と熟練した技能を必要とするが、昨今は、熟練技能を持つオペレータの高齢化に伴う引退や、新規入職者の減少により、担い手の確保及び技能の維持が課題となっている。

このような背景のもと、北陸技術事務所では、オペレータの負担軽減、経験の浅いオペレータの作業支援を目的として、ICT（情報通信技術）を活用し、作業装置を自動化した除雪機械の開発に取り組んでいる。

本稿では、作業装置の自動制御機能を装備した除雪トラックを実際の除雪作業で試行的に運用した概要を報告するものである。

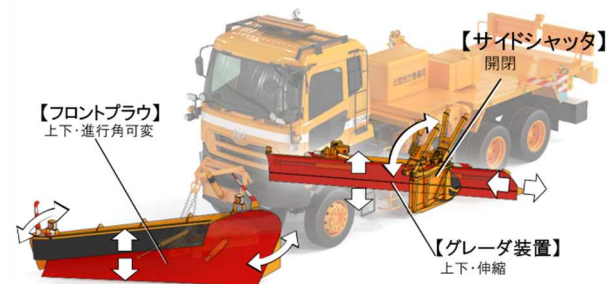


図-1 除雪トラック作業装置の概要

2. 作業装置の自動制御

2-1) 除雪トラック作業装置の概要

除雪トラックによる新雪除雪は、路面に降り積もった雪を路側にかき寄せるもので、作業装置としては、新雪などを除雪する「フロントプラウ」、圧雪などの路面を整正する「グレーダ装置」、交差点や沿道施設の出入り口といった、雪を置いてはいけない区間において一時的に雪を抱え込む「サイドシャッタ」で構成されている。

(図-1)

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

このため、除雪トラックの作業装置（フロントプラウ、グレーダ装置、サイドシャッタ）の操作を自動化することにより、オペレータは車両の運転に専念できるため、作業の安全性が向上する。また、オペレータの負担軽減が図られることにより、担い手の確保にも寄与するものと考えている。



写真-1 作業装置の手動操作パネル

2-2) 自動制御機能の概要

作業装置を自動化するための制御は、オペレータが各装置を操作した操作位置情報を反映させた“除雪作業用地図データ”を作成し、GNSS受信機（準天頂衛星システムみちびき対応型）で取得した自車位置情報とを照合し、地図データに設定した箇所、作業装置に所定の動作を行わせる仕組みとした。(図-2) (写真-2)

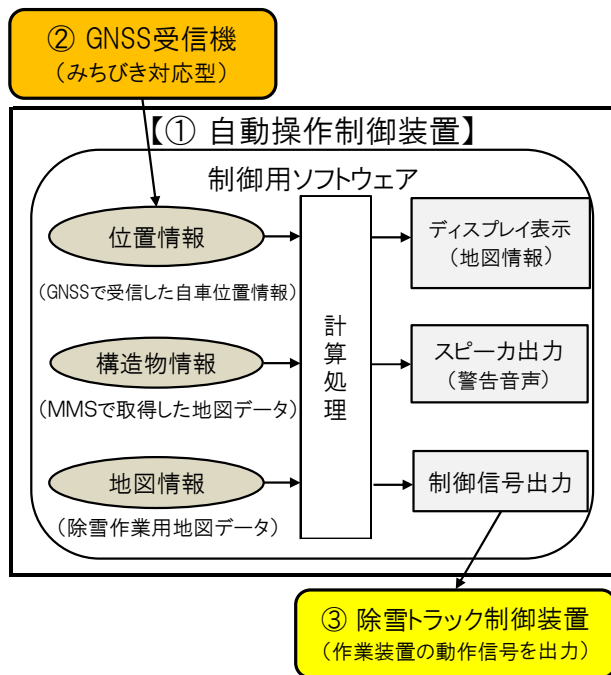


図-2 制御ユニット概念図

3-2) グレーダ装置

グレーダ装置は、装置幅の変更や上下の操作を行う。
装置幅の変更は、駐車帯などで一時的に道路の幅が変化する箇所で、装置を伸縮させて装置の幅を変更する。また、フロントプラウと同様に、橋梁ジョイント等との接触を避けるため、一時的な上下の操作を行う。(図-3)

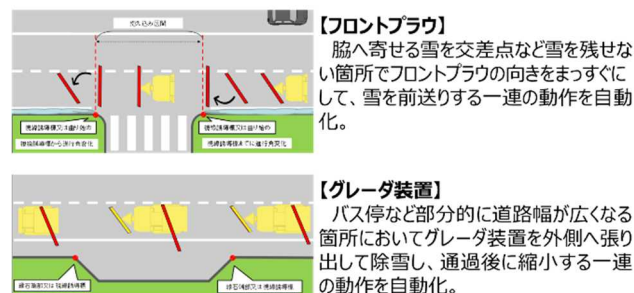


図-3 作業装置の動作イメージ

3-3) サイドシャッター

サイドシャッターは、グレーダ装置に付随し、交差点部や道路の接続部などの雪を置いてはいけない箇所において、グレーダ装置から左側に押し出される雪の流れを止めるため閉操作を行い、通過後に開操作を行う。



写真-2 自動制御装置



写真-3 サイドシャッターの動作

3. 各作業装置の自動制御

3-1) フロントプラウ

フロントプラウは、交差点等の道路構造が変化する箇所で、進行角の変更や上下の操作を行う必要がある。

進行角の操作は、交差点部や道路の接続部などの雪を置いてはいけない箇所では、除雪車の前方にまっすぐ前送りするために行う。また、上下の操作は、橋梁ジョイント等にフロントプラウが接触するのを防ぐため、当該箇所を除雪作業を実施しながら通過する際、一時的に上下の操作を行う。(図-3)

4. 自動制御機能の精度確認

自動制御機能を装備した除雪トラックの作業装置の動作精度（縦断方向）の確認を行った。自動制御システムで設定された動作完了位置に対し、実際の動作完了位置は様々な外的要因により動作遅れが発生することから、許容できる精度と安定性を評価する必要がある。

過去の試験結果から、除雪トラックの走行速度やエンジン回転数の変動が自動制御の精度・安定性に大きな影響があることが判明している。除雪トラックの作業時の走行速度が 25km/h 程度のため、前提速度を 30km/h とし、10km/h～30km/h で評価した

手動操作の場合と同等以上の動作を目指すものとして、人間の単純なボタン操作等の単純反応時間は 0.15s が下限とされているため※その時間を指標とし、その時間に対する 30km/h の場合の移動距離が 1.25m なので、目標値を±1.25m未満と定めて、改良した自動制御装置の精度・安定性を検証した。

動作精度の確認は、試験コース上での作業データを作成し、作業装置の実際の動作地点を計測し、動作完了目標地点との差を比較した。（写真-4）

動作精度の試験結果からは、装置毎に動作完了目標地点に対するずれ量にばらつきは見られるものの、±0.8m 以下で制御ができていることが確認され、目標値を満足している。（表-1）



写真-4 自動制御動作精度の確認状況

表-1 自動制御動作精度の確認結果

	フロントブラウ		グレーダ装置		サイドシャッタ	
	進行角		伸	縮	閉	開
	32°→0°	0°→32°	0cm→50cm	50cm→0cm		
目標値	±1.25m未満					
平 均	0.2m	0.5m	-0.8m	-0.4m	-0.2m	-0.2m
誤差幅	0.3m	0.4m	0.2m	0.7m	0.5m	0.7m

5. 試験車両での試行運用状況

5-1) 試行運用の概要

自動制御機能について所定の精度が確認できたことから、試験車両を実際の除雪作業に使用し、除雪の負荷を受けても、動作試験と同様の精度で各作業装置が所定の動作を行うか確認を行った。

確認方法は、試験車両に搭載したカメラの記録映像、作業装置の動作状況を記録したロガーデータの解析と、試験車両に搭乗し除雪作業に従事した除雪機械オペレータへの意見聴取により行った。

試行運用では、安全に作業を実施する観点から、オペレータが安全に実施できると判断した場合に自動制御機能を使用して除雪作業を行うこととした。また自動制御中であってもすぐに手動に切り替えることも可能となっている。

試行運用は、国道 17 号湯沢除雪工区（長岡国道事務所湯沢維持・雪害対策出張所）内の約 13km 及び国道 49 号安田除雪工区（新潟国道事務所水原維持出張所）内の約 20km で、各除雪工区の協力のもと実施した。

5-2) 降雪期前の現道試験

降雪期前に試行運用を行う除雪担当区間において、試験車両を使用して現道試験を実施した。

現道試験では、試行運用区間の除雪作業を実際に行うオペレータの協力を得て、作業装置動作位置の設定及び確認、試行運用区間内での自動制御による無負荷の動作試験を行った。作業装置動作の位置設定では、オペレータの意見を取り入れながら、動作試験を繰り返して調整した。



写真-5 降雪期前の現道試験実施状況（湯沢工区）

5-3) 試行運用時の自動制御実施状況

作業装置の自動化で自動制御による除雪作業の実施状況は表-2のとおりである。自動制御の使用頻度は、湯沢工区で14.5%、安田工区で41.0%であった。（表-2）

表-2 自動制御による除雪作業の実施状況①

工区名	全除雪 出動回数	うち自動制御を 使用した出動回数	自動制御を 使用した割合
湯沢工区	138	20	14.5%
安田工区	61	25	41.0%

また、各作業装置の出動1回あたりの平均操作回数の比較では、自動制御を使用した場合は、フロントプラウの操作が30%程度低減し、サイドシャッタの操作は85%以上の低減となった。（表-3）

表-3 自動制御による除雪作業の実施状況②

工区名	フロントプラウ 出動1回あたりの平均操作回数		操作低減率
	自動操作なし	自動操作あり	
湯沢工区	100回	70回	30.0%
安田工区	20回	13回	35.0%

工区名	サイドシャッタ 出動1回あたりの平均操作回数		操作低減率
	自動操作なし	自動操作あり	
湯沢工区	44回	6回	86.4%
安田工区	74回	9回	87.8%

5-4) 試行運用で確認された課題

試行運用では、自動制御により作業装置が所定の位置で所定の動作を行うことができるかの確認を目的に実施したところであるが、一部作業装置が所定の動作とならなかったなどの課題が確認された。（表-4）

表-4 試行運用で確認された課題

対象箇所	確認した課題
制御装置の構成 制御プログラム	低速走行時に進行方向の判別が不能となる
	連続動作区間で動作の遅れ又は停止する
制御装置操作	手動から自動への復帰するための操作手順が多い
その他	積雪量に応じた調整が容易にはできない

確認された課題のうち、制御装置の機器構成や制御プログラムに要因があるものについては、構成機器の見直しやプログラムの改良を行い、課題の解消を図っていく。また、所定の動作とならない場合にも確実に除雪作業を行うために、オペレータの操作により手動へ切り替えることが出来るようになっているが、その後に自動制御に復帰させる操作についても操作手順が多く、自動制御に復帰しにくいことが課題として挙げられており、あらためてオペレータの要望をヒアリングし、操作手順をより安全かつ簡便なものとするための検討を進めていく。さらに、手動操作では、降積雪量が多い場合に作業装置の動作角度や範囲を細かく調整して雪の量に対応しており、同じ対応が自動制御でも可能か、適用条件を整理し必要性も含め検討する必要がある。

6. まとめ

当初の目標としていた、フロントプラウの進行角可変及び上下動作、グレーダ装置の伸縮及び上下動作、サイドシャッタの開閉動作について自動化を図ることができた。ただし、実際の除雪作業の中で使用する試行運用では初めての試みであったことや、当該年度は過去5ヶ年平均の約1.5倍もの降雪量があったことも要因となり、自動制御の使用頻度が少ない結果となった。

自動制御の使用頻度を上げるために、令和3年度の試行運用で確認された課題解消のほか、降積雪量が多い場合に作業装置の動作を調整する機能や、オペレータに装置の作動状況をよりわかりやすく伝える機能など、自動制御機能を搭載した除雪トラックを安心して使用してもらうための検討が必要と考えている。



写真-6 運用状況

7. 令和4年度の計画

令和3年度で、当初の目標としていた、3つの装置・5つの動作（フロントプラウの進行角可変及び上下動作、グレーダ装置の伸縮及び上下動作、サイドシャッタの開閉動作）の自動化を図ることができた。同時に自動制御機能の問題点や、降積雪量に応じた対応など、あらたな課題が確認された。

今回、確認された課題についてさらに検討および改良を行い、オペレータの負担が小さくなるように、また経験の浅いオペレータであっても、安心して安全な除雪作業を行えるように、引き続き除雪作業装置自動化の取り組みを進めていく計画である。

※参考文献

新美 亮輔、横澤 一彦 反応時間 脳科学辞典
<https://bsd.neuroinf.jp/wiki/反応時間> (2013)

凍結防止剤散布支援システムの開発と実用化

大廣 智則¹・金子 雅之²・齊田 光¹

¹国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 寒地交通チーム（〒062-8602 札幌市豊平区平岸1-3-1-34）

²北海道開発局 室蘭開発建設部 道路整備保全課（〒051-8524 北海道室蘭市入江町1-14）。

筆者らは、凍結防止剤散布において、ワンマン化でも安全で確実な散布作業を可能とするシステム開発を目指している。本研究では、苫小牧寒地試験道路で凍結防止剤散布に係る支援情報の有効性を検証した。その結果、支援情報だけではなく凍結防止剤散布の自動化まで組み合わせることが有効であることを明らかにした。そこで、これら機能を完備し、実際の作業に使用している散布車に搭載可能な凍結防止剤散布支援システムを開発した。北海道開発局の散布車に開発したシステムを搭載し有効性を確認した。その結果、凍結防止剤散布支援システムは機能・散布精度ともに実用レベルで、現場からはワンマン化に資するシステムとして評価された。

キーワード 自動散布，冬期道路管理，ワンマン化，作業の省力化，作業の担い手不足解消

1. はじめに

冬期間、積雪寒冷地域にとっては、凍結防止剤や防滑材の散布は、凍結路面発生の抑制や雪氷路面でのスリップ防止のために重要であり、冬期道路管理において必要不可欠な作業である。凍結防止剤散布作業は多くの場合、運転手と助手席に乗車したオペレータの2人体制で作業が行われている¹⁾。現在、これら作業に従事している作業員の確保は、近年の生産年齢人口の減少や公共事業費の減少に伴う人員の削減、新規入職者の減少等から困難になってきている²⁾。

これらの課題に対応するため、札幌市ではICTなどの先進技術を活用した取組を推進し、凍結防止剤散布車における既存機械の1人乗り化(以降、ワンマン化)の検討がされている³⁾。北海道の高速道路では、凍結防止剤散布量の削減を目的に路面状態を自動判別し、散布が必要な区間の100m手前から凍結防止剤を自動散布する仕組みを開発し運用されている⁴⁾。しかし、これまで凍結防止剤散布作業のワンマン化について実用化に至った新たな技術はほとんどなく、散布精度についても課題がある。

上述した背景に鑑みて、寒地土木研究所の寒地交通チームでは、凍結防止剤散布において経験の浅いオペレータでも作業可能で、かつワンマン化でも安全で確実な散布作業を可能とする支援技術の開発を目指している。

本研究では、凍結防止剤散布作業のワンマン化を視野に、苫小牧寒地試験道路において実施した凍結防止剤散布に係る支援情報提供による効果と課題を示す。また、

情報提供のみによる課題の解決策として、散布の自動化など散布支援の効果について、主観的方法および客観的方法の二つの方法によって評価した結果を明らかにする。さらに、北海道開発局の散布作業に用いられている全ての凍結防止剤散布機械に対応して凍結防止剤を自動散布するための方法として、凍結防止剤散布支援システムを新たに開発した。このシステムの開発状況を詳細に示す。また、路面状況は日々変化し、事前に設定した以外の箇所でも散布するため、このシステムでは音声散布機能を開発した。自動散布中に音声散布機能を併用した作業の安全性を示し、アンケートによる検証結果からその実用性を明らかにする。また、助手席のオペレータが目視で判定した結果から、このシステムの自動散布による散布精度を明らかにする。

2. 苫小牧寒地試験道路での検証

苫小牧寒地試験道路において、各種検証を実施した。苫小牧寒地試験道路は、土木研究所寒地土木研究所が所有する積雪寒冷地域での走行試験を行う試験道路である。全長2,720mで2-4車線を有し、直線区間が2,400m、曲線区間320mである。設計速度は、4車線区間が120km/h、2車線区間が80km/hである。

(1) 検証方法：メンタルワークロード

人間が行う仕事において身体的活動が主となる活動で

あってもその活動は全て精神的負荷（メンタルワークロード（以降、MW））であるとされている⁵⁾。検証方法は、凍結防止剤散布作業におけるオペレータの課題処理能力をMWによって定量化および評価した。

オペレータのMWは、主観的方法および客観的方法の二つ方法によって評価した。主観的評価法には、NASA-TLX⁶⁾を用いた。NASA-TLXは宇宙飛行士の主観的MWを測定するために開発されたものである。大きい小さいなどの両極を持つ6つの評価尺度の平均値を、主観的MWの値として評価した。客観的評価法は、注視率を求めた。

(2) 凍結防止剤散布に係る支援情報提供の効果

a) 検証方法

被験者は未経験のオペレータ7名と熟練のオペレータ12名の計19名である。路面条件は、図-1に示すように乾燥を主にして湿潤100mと凍結100mを各2区間敷設した。凍結防止剤は固形の塩化ナトリウムを使用した。散布条件は、乾燥は散布なし、湿潤は20g/m²の散布、凍結は30g/m²の散布である。検証は、支援情報提供がない場合、図-2(a)に示すように画像により散布を促す支援情報提供、図-2(b)に示すように音声により散布を促す支援情報提供、画像と音声を組合せた散布を促す支援情報提供を行い、散布作業を実施した。検証方法を以下に要約する。

- ・被験者：未経験オペレータ7名、熟練オペレータ12名
- ・路面条件：乾燥を主として100mの湿潤と凍結を各2区間敷設
- ・散布条件：乾燥；情報なし、湿潤；20g/m²、凍結；30g/m²
- ・検証条件（支援情報の提供方法）：
 - (a) 情報なし、(b) 音声のみ、(c) 画像のみ、(d) 音声+画像

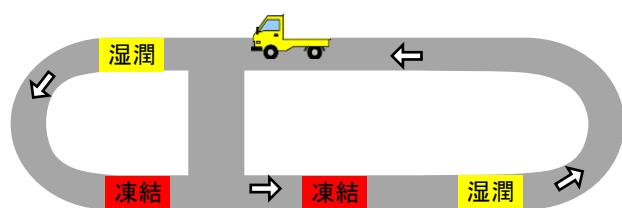
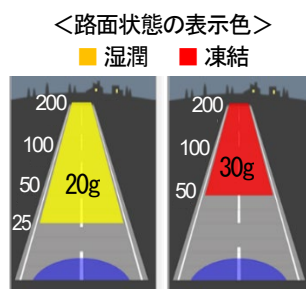


図-1 路面条件



(a) 画像による支援情報提供

＜路面状態の表示色＞
 湿潤：200m 手前；プ・プ・
 100m 手前；プ・プ・
 50m 手前；プ・プ・
 0m；プー
 凍結：200m 手前；ピ・ピ・
 100m 手前；ピ・ピ・
 50m 手前；ピ・ピ・
 0m；ピー

(b) 音声による支援情報提供

図-2 支援情報提供方法

b) 主観的MWの結果

図-3に主観的MWの結果を示す。縦軸の値は値が小さい程、精神的負荷が小さいことを示している。図-3より経験の有無に関わらず情報提供の方が精神的負荷が小さく、音声と画像を組合せて情報提供するのが最も精神的負荷が小さい結果が得られた。

c) 支援情報提供のみによる課題

2.(2)a)の検証時に、図-4(a)に示すアイトラッキングで凍結防止剤散布作業中のオペレータの注視状況を調べた。図-4(b)に示す、道路&背景、散布車制御装置、情報端末の3つの注視エリアに分け注視率を算出した。

図-5に注視率の結果を示す。図の上が未経験オペレータ、下が熟練オペレータを示している。図-5より経験の有無に関わらず支援情報提供によって、道路&背景の注視率が低下している。この結果から、散布を促す支援情報の提供のみでは安全面に課題があると考えられる。

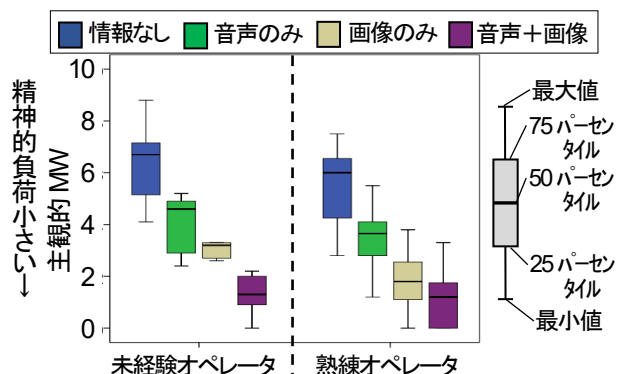
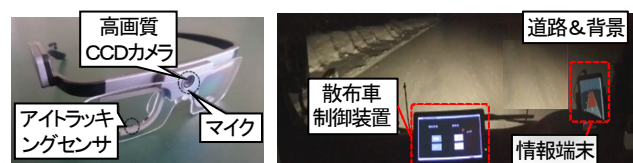


図-3 散布支援情報の効果についての主観的MWの結果



(a) アイトラッキング

(b) 注視エリア

図-4 注視率の検証方法

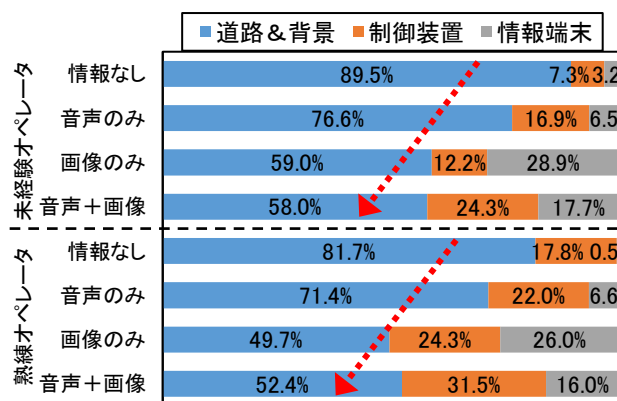


図-5 散布支援情報の効果についての注視率の結果

(3) 凍結防止剤散布支援の効果

a) 検証方法

前節の検証にて熟練度の違いによる効果の差がみられなかったため、被験者は未経験のオペレータ8名とした。路面条件は、苫小牧寒地試験道路内で乾燥を主にして湿潤100mと凍結100mを各3区間敷設した。凍結防止剤の散布条件は、乾燥は散布なし、湿潤は20g/m²の散布、凍結は30g/m²の散布である。検証方法は、支援なしの場合、画像と音声を組み合わせた散布を促す支援情報のみ、音声散布（支援情報有り）、自動散布（支援情報有り）で凍結防止剤散布作業を実施した。検証方法を以下に要約する。

- ・被験者：未経験オペレータ8名
- ・路面条件：乾燥を主として100mの湿潤と凍結を各3区間敷設
- ・散布条件：乾燥；散布なし、湿潤；20g/m²、凍結；30g/m²
- ・検証条件：(a) 支援なし、(b) 支援情報のみ、(c) 音声散布（支援情報）、(d) 自動散布（支援情報）

b) 主観的MWの結果

図-6に凍結防止剤散布支援の効果についての主観的MWの結果を示す。支援なしは4つの検証条件の中で最も精神的負荷が大きかった。音声散布は、支援情報のみよりも精神的負荷が小さく、自動散布が最も精神的負荷が小さいという結果が得られた。

c) 注視率

図-7に注視率の結果を示す。音声散布は道路&背景の注視率が支援なしと同程度となった。自動散布は、オペレータが散布車の運転に専念することができるため、道路&背景の注視率を支援なしよりも高めることができた。

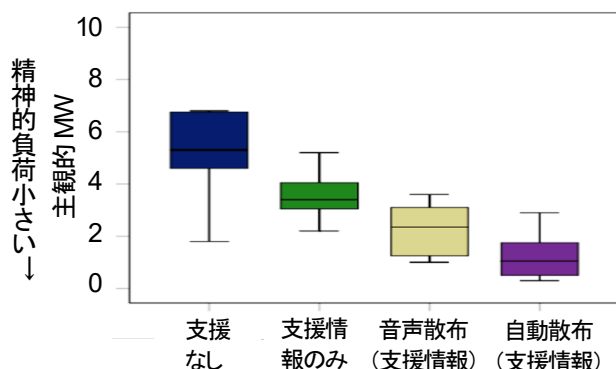


図-6 凍結防止剤散布支援の効果についての主観的MWの結果

	道路&背景	制御装置	情報端末	車内	速度メーター
支援なし	83.5%	7.0	8.6	0.0	3.6
支援情報のみ	77.9%	9.0	8.5	4.1	2.8
音声散布(支援情報)	82.3%	4.3	8.4	3.1	8.3
自動散布(支援情報)	84.9%	3.1	8.3	2.8	2.8

図-7 凍結防止剤散布支援の効果についての注視率の結果

3. 凍結防止剤散布支援システムの開発

(1) 従来からの凍結路面对策における散布方法

北海道の国道では、凍結防止剤を路線全線に散布するのではなく、急勾配、急カーブ、交差点、橋梁、日陰、トンネル出口等を重点散布区間として設定し、散布を行っている⁷⁾。固形剤と溶液を散布直前に混合して散布する湿式散布は、路面への付着効果が高く速効性・持続性があり、固形剤が飛散しない効果を期待して通常の凍結防止剤散布方法として用いられている。

(2) 自動散布制御装置の設計

北海道開発局の凍結防止剤散布作業に用いられている全ての散布車規格で自動散布を実施するため、自動散布制御装置を新たに設計し、制御PC・GNSS・IoTルータ・継電器モジュール・電源装置等を収納した。自動散布制御装置と他の機器は、自動散布制御装置に電源を供給し、凍結防止剤散布車・タッチパネル液晶ディスプレイ・マイク・GNSSレシーバー・IoTルータアンテナに接続した。

(3) 自動散布ソフトの開発

CANプロトコルは、ISO-11898仕様に準拠したBosch2.0B active対応、データフォーマットは、CAN ID：11bitの標準フォーマットとして凍結防止剤散布車のCAN通信仕様を取り決めた。そして、自動散布制御装置からの散布量、散布幅、溶液の割合、散布方向、散布ON/OFFの信号を受信し、制御できるように散布車ソフトを新たに開発した。自動散布の実施は、散布車のエンジンをONにするとモニターの電源が入り自動散布ソフトが自動で起動し、30秒程度待つと接続チェックを行う。散布車のオペレータが、図-8に示す散布パターンボタンを選択すると、自動散布ボタンは連動され自動散布が実行される。自動散布終了後、エンジンをOFFにすると自動散布ソフトは自動で終了する。このように、自動散布ソフトは、散布車の運転手やオペレータが散布車操作卓を操作することなく、自動散布ソフトの画面を作業前に1回タッチするだけで自動散布を実行可能とした。

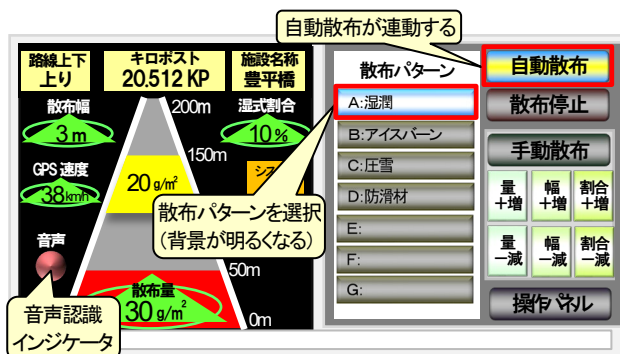


図-8 自動散布ソフト

(4) 凍結防止剤散布支援システムを構成する 3 つの散布支援ツール

図-9 に、凍結防止剤散布支援システムを構成する 3 つの散布支援ツール「散布指示支援ツール」、「散布判断支援ツール」、「散布操作支援ツール」とそれらをつなぐ凍結防止剤散布フローを示す。これらの散布支援ツールは、インターネットを介した WEB サーバで連携している。

散布指示支援ツールは、各道路事務所で道路管理者等が、WebGIS 上に散布が必要な区間（KP（キロポスト））を指定し、散布量・散布幅・溶液の割合・散布方向の情報を入力する。また、Excel 等を使用し帳票形式で入力して、WEB サーバにアップロードすることも可能である。

散布判断支援ツールは、散布車の作業員に散布が必要な箇所 200m 手前から、散布の開始および終了、散布量等の情報を画像と音声とで提供し凍結防止剤散布作業を促す。また、散布幅・溶液の割合・車両速度・上下線・KP や施設名称等の情報を画像で作業員に提供する。

散布操作支援ツールは、散布指示支援ツールで設定した散布パターンに従って散布条件を凍結防止剤散布車へ送信し、凍結防止剤を自動散布する。手動モードに切り替えた場合は、タッチパネルの量・幅・割合の増減ボタンで散布条件を変更でき、作業員の発声に従って音声での散布が可能である。

(5) 凍結防止剤散布支援システムの試行導入

これまで北海道開発局では、運転手の死角にカメラを配置するなど、ワンマン化を支援する技術の試行が実施されている⁸⁾。令和 3 年度は、表-1 に示す 8 開発建設部（札幌、小樽、旭川、室蘭、釧路、帯広、網走、留萌）で各 1 台、凍結防止剤散布車もしくは散布装置付き除雪トラックに凍結防止剤散布支援システムが試行導入された。図-10 に示すように、自動散布制御装置とタッチパネルとマイクを散布車に搭載し、電源を車両から自動散布制御装置に供給し、そこからタッチパネルとマイクへ

表-1 試行導入状況

開発建設部	事務所	基地・ST	機械	規格
札幌	札幌道路	札幌 ST	散布車	4.0m ³
小樽	小樽道路	小樽基地	除トラ	10t.G.散布
旭川	旭川道路	末広基地	散布車	4.0m ³
室蘭	苫小牧道路	苫東中央 ST	除トラ	10t.G.散布
釧路	釧路道路	恋問 ST	除トラ	10t.G.散布
帯広	足寄道路	足寄基地	除トラ	10t.G.散布
網走	網走道路	網走基地	除トラ	10t.G.散布
留萌	留萌開発	大別刈 ST	除トラ	10t.G.散布

※10t.G.散布：I は一方向スノープラウの略称、G は路面整正装置の略称、散布は散布装置の略称



図-10 凍結防止剤散布車への凍結防止剤散布支援システムの搭載状況

電源・通信ケーブルで接続した。凍結防止剤散布車とは、CAN 通信ケーブルで接続し、3.(3)で開発した散布車ソフトをインストールした。

(6) 凍結防止剤散布支援システムの機能性の検証

凍結防止剤散布支援システムを 1 冬期間運用し、散布が必要な箇所ですべて設定した散布（量・幅・方向）ができていないか検証を行った。凍結防止剤散布支援システムの自動散布機能により散布したときの散布ログデータを集計し、有効データ数と散布正答数から正答率を算出した。なお、散布正答は、予め設定した散布開始位置と実際の散布開始位置が前後 50m 以内の場合とした。散布終了も同様である。有効データ数 219,539 に対し、正答数は 219,349 であり、正答率はほぼ 100%であった。凍結防止剤散布支援システムは、想定した機能を果たした。

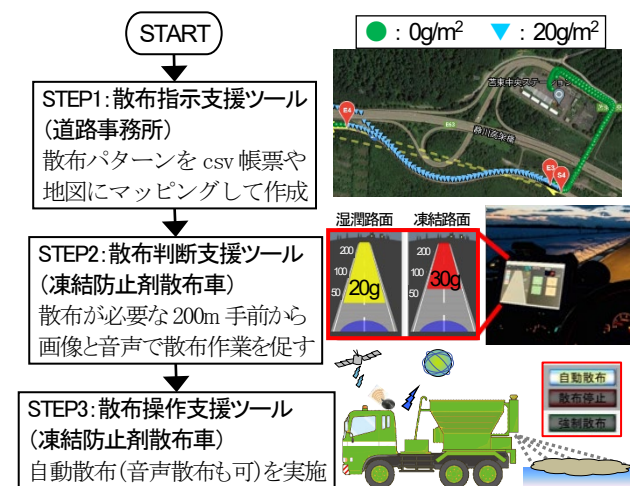


図-9 凍結防止剤散布支援システムによる散布フロー

4. 音声散布機能の開発と実用性の検証

(1) 音声散布機能の開発

これまで開発してきた凍結防止剤散布支援システムは、事前に設定した要散布箇所手前で情報提供とともに自動散布が可能であるが、日々変化する路面状況へ対応できていない。そこで、ワンマン化でも道路やその背景を視認しながら設定変更を可能とするため、音声散布機能を開発した。音声散布機能の起動時は、待機状態となっている。この状態では音声認識は受け付けない。これは、図-8 左下と表-2 に示す音声認識インジケータの赤丸表示

で確認することができる。「ヘイサンプ」とのコマンド用語彙を発声すると図-8左下の赤丸表示が表-2に示す青丸表示となり音声認識受付状態に移り、最大で10秒間待機する。この間に表-3に示す予め登録した作動用語彙リストにある「サンプ」、「テイシ」、「キョウセイ」、「パネル」等と発声すると、図-8左下の赤丸表示が表-2に示す緑丸表示となり自動散布の操作を実行する。10秒経過するか、語彙リストにない音声認識を受け付けると待機状態に戻る。図-8に示す散布パターンの変更は、上記方法と同様に散布パターン名を読み上げることによって、対象の散布パターンに切り替えることが可能である。このように、コマンド用語彙と作動用語彙を組み合わせることで、精度良く音声認識して凍結防止剤を散布することを可能とした。

(2) 安全対策

図-3、図-5の結果より、支援情報提供は心理的負担の軽減となるが、支援情報提供によって道路&背景の注視率が低下するため、支援情報提供のみには安全面に課題がある。そこで、図-10に示すようにタッチパネルを散布車操作卓の横に配置し、運転視野の妨げにならないようにした。また、散布中に散布停止や強制散布等、散布条件を変更するときや散布パターンを変更するときは、図-10に示すように無指向性のマイクを運転手の声を集音する位置に配置し、道路&背景を視認しながらの設定変更を可能とした。

(3) 音声散布機能の実用性の検証方法

本研究では、凍結防止剤散布支援システムを使用して冬期道路維持作業に従事した作業員に対し、音声散布機能の実用性についてアンケート形式で検証を行った。検証時期は2022年3月中旬である。アンケート項目は、年齢や主に担当している作業内容についてと、「音声による散布切り替えはワンマン化に必要な機能だと思いますか?」と「回答理由」である。アンケートの評価尺度は7段階とした。作業員はアンケート用紙の各設問に対し、評価尺度の「大いに思う・全く思わない」の両極を

表-2 音声認識インジケータ

画面表示	表示内容	状態
	赤丸表示	音声認識待機状態
	青丸表示	音声認識受付状態
	緑丸表示	音声認識操作実行状態

表-3 作動用語彙リストの一覧

作動用語彙	読み	実行内容
自動散布	サンプ	自動散布を開始する
散布停止	テイシ	散布を停止する
強制散布	キョウセイ	強制散布を開始する
操作パネル	パネル	操作パネルに制御を切り替える

持つ7段階の線分上に、○印で記入した。

(4) 音声散布機能の実用性の検証結果

a) 年齢や主に担当している冬期道路維持作業内容の基礎情報

アンケートは、40歳台・50歳台を中心に18名から回答を得た。アンケートの回答者は全て男性である。作業内容は、散布作業が11名と最多で、除雪作業が5名、主任技術者と現場代理人が4名ずつであった。ただし、散布作業と除雪作業または、主任技術者と現場代理人の重複回答があった。

b) 音声散布機能のワンマン化への必要性

凍結防止剤散布支援システムの音声散布機能は、図-11に示すようにワンマン化に必要な機能として肯定的な意見が大勢を占める結果となった。その理由として、一人で散布できる、作業が楽、安全だから、効率的との回答が多くあった。つまり、この検証結果から音声散布機能は、想定していた安全性と効率性を備えており、ワンマン化に必要な機能として評価された。

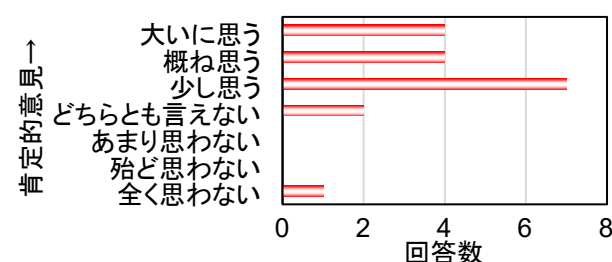
5. 凍結防止剤散布支援システムの散布精度の検証

(1) 検証方法

a) 検証期間

凍結防止剤散布支援システムの自動散布機能による散布精度の検証は、2022年2月14日～4月1日の47日間に行った。期間の中で凍結防止剤散布支援システムの自

(a) 音声による散布切り替えはワンマン化に必要な機能かどうか



(b) 回答理由

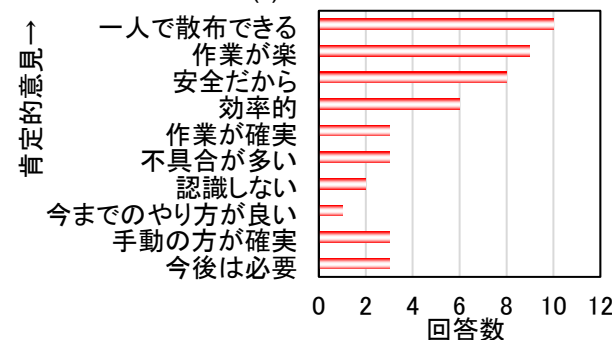


図-11 音声散布機能のワンマン化への必要性の回答結果

動散布機能を使用して 60 回の散布が行われた。

b) 検証箇所

検証箇所は、表-1 に示す試行導入の中で凍結防止剤や防滑材の散布頻度の多い旭川道路事務所とした。旭川道路事務所の凍結防止剤散布支援システムを搭載した散布車が凍結防止剤を散布する区間は、国道 40 号 KP0～8.5 と国道 12 号 KP142.52～144.68 である。

c) 検証方法

旭川道路事務所の凍結防止剤散布支援システムを搭載した散布車が担当している散布区間の中で、散布が必要な箇所は 94 ある。2022 年 2 月 14 日～4 月 1 日の期間の中で 60 回の散布が行われたため、全 5640 データについて、助手席のオペレータが目視で 10m 単位で散布精度を判定した。

(2) 検証結果

凍結防止剤散布支援システムの散布精度の検証結果を図-12 に示す。縦軸は散布回数、横軸は 0m が散布地点、マイナスは手前から散布した、プラスは散布地点を過ぎて散布したということを示している。全 5640 データの中で 8 データは散布精度の判定ができなかったため、図-12 は 5632 データの散布精度をとりまとめた。凍結防止剤散布支援システムの自動散布機能による散布精度は、全体のうち 82%は事前に設定した散布位置と一致した。

6. まとめと今後の課題

苫小牧寒地試験道路で凍結防止剤散布作業の支援情報提供の効果および散布の自動化など散布支援の効果を検証した。また、凍結防止剤散布支援システムを開発し、音声散布機能の実用性の検証および散布精度の検証を行った。本研究で得られた成果を以下にまとめる。

(1) 苫小牧寒地試験道路において、オペレータの熟練度と支援情報提供による散布作業時の精神状態と視線挙動の変化について検証し、オペレータの熟練度にかかわらず、支援情報提供により主観的 MW は減少し、音声と画像を組み合わせた支援情報の提供が最も MW が減少することを示した。しかし、支援情報提供によって前方の道路を注視する割合が減少するため、安全性確保が課題となることを示唆した。

そこで、凍結防止剤散布支援による散布作業時の心理状態および視線挙動の変化について検証し、自動散布（支援情報）により、オペレータの主観的 MW が減少し、前方の道路を注視しながら安全に散布作業を行うことが可能なことを明らかにした。

(2) 凍結防止剤散布支援システムの開発状況を詳細に示すとともに、8 開発建設部で各 1 台試行導入し、1 冬期間運用して機能性の検証を行った結果、散布が必要な箇所で予め設定した散布（量・幅・方向）がで

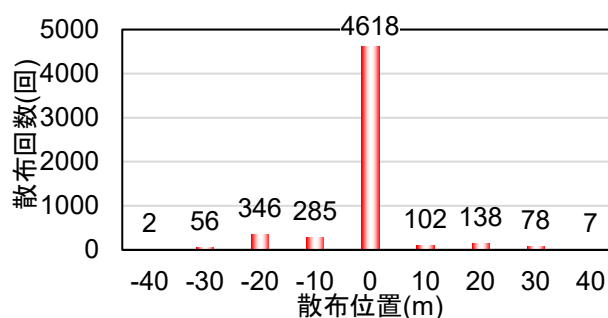


図-12 凍結防止剤散布支援システムの散布精度の検証結果

きていることを示した。

- (3) 音声散布機能の開発状況を詳細に示すとともに、音声散布機能の実用性についてアンケートにより検証を行った。凍結防止剤散布支援システムの音声散布機能は実用レベルで安全性に資するワンマン化に必要な機能として評価された。
- (4) 凍結防止剤散布支援システムの散布精度について検証を行った結果、事前に設定した散布位置と概ね（82%）一致した。

今後、現在のサービスレベルを維持しつつ、人手不足等の課題を解決するため、現場の感覚に合せて改良し普及を図り、ワンマン化でも安全で確実な散布作業を可能とし、担い手不足解消への貢献を目指す所存である。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所：IT を用いた凍結防止剤散布作業の効率化に関する技術資料，国土技術政策総合研究所資料，No.342，106p，2006 年 10 月
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoutnn/tnn0342pdf/ks0342.pdf>（2022 年 10 月確認）
- 2) 札幌市建設局雪対策室計画課：札幌市冬のみちづくりプラン 2018，pp.21-36，2018 年 12 月
<https://www.city.sapporo.jp/kensetsu/yuki/keikaku/documents/03genjoutokada.pdf>（2022 年 10 月確認）
- 3) 松井聖浩：除雪機械の 1 人乗り化について，一般社団法人日本建設機械施工協会北海道支部だより，No.121，pp.6-8，2021 年 4 月
https://www.jcmahs.jp/files/news/news_121.pdf（2022 年 10 月確認）
- 4) 大廣智則，高倉清，桜庭拓也，花塚泰史，萩原亨：自動路面状態判別システムを活用したスマート凍結防止剤散布システムの開発，交通工学論文集，第 5 巻，第 4 号（特集号 B），pp.B_7-B_15，2019 年 4 月。
- 5) Schlegel Robert E.：Driver Mental Workload, Automotive Ergonomics, pp.359-382, London & Washington D.C. 1993.
- 6) Hart, S. G. and Staveland L.E.：Development of NASA - TLX (Task Load Index): Results and theoretical research, Human Mental Workload, Elsevier Science Publishers B.V. (North Holland, Amsterdam), pp.139-183, 1988.
- 7) 国土交通省北海道開発局札幌開発建設部：“凍結路面对策”
https://www.hkd.mlit.go.jp/sp/douro_keikaku/kluhh4000000adla.html（2022 年 10 月確認）
- 8) 梅木弥弥，谷津臣則，在田尚宏：除雪現場の省力化による生産性・安全性の向上に関する取組，第 65 回(2021 年度)北海道開発技術研究発表会論文集，防 22（道），2022 年 2 月。