

ホイールローダ遠隔操作システム（Tunnel RemOS-WL）の現場試行

Field trials of the Wheel Loader Remote and automated Operation System (Tunnel RemOS-WL)

本山 昇*

Shou Motoyama

山下 雅之**

Masayuki Yamashita

田口 毅*

Takeshi Taguchi

原 圭太***

Keita Hara

要 約

山岳トンネル工事における安全性向上や省人化・省力化を目的として、施工に使用する建設機械の遠隔操作技術および自動運転技術を用いた、山岳トンネルの無人化・自動化施工システムの開発を進めている。その中で、掘削サイクルの多くを占めるずり出し作業に使用するホイールローダ遠隔操作システムがある。本システムは過年度に試作機（1号機）を開発し、この度、システムの操作性や耐久性を改良した実用機（2号機）を開発した。実用機（2号機）を実際の山岳トンネル施工のずり出し作業に試験的に導入・運用を実施した。本稿では、開発した実用機（2号機）の概要と、現場試行の取り組みについて述べる。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. システムの概要
- § 3. システムの現場試行
- § 4. まとめ

§ 1. はじめに

山岳トンネル施工において、掘削の最先端部である切羽は、騒音・粉じん・振動が多く発生する過酷な労働環境であり、特殊技能を要する作業が未だ多く、従事する労働者の安全性向上や、省人化・省力化による生産性向上が課題とされている。これらの課題に対して当社では、山岳トンネル施工で使用される各種建設機械の遠隔操作技術・自動運転技術を基幹とした、山岳トンネルの無人化・自動化施工システムの開発を進めている。システムの構想を図-1に示す。

山岳トンネル掘削時の施工サイクルの一つとして、ずり出し作業がある。当作業（ベルトコンベヤ方式）では、ホイールローダによってすくい取ったずりをクラッシャー（破碎機）まで運搬・投入し、ベルトコンベヤによ

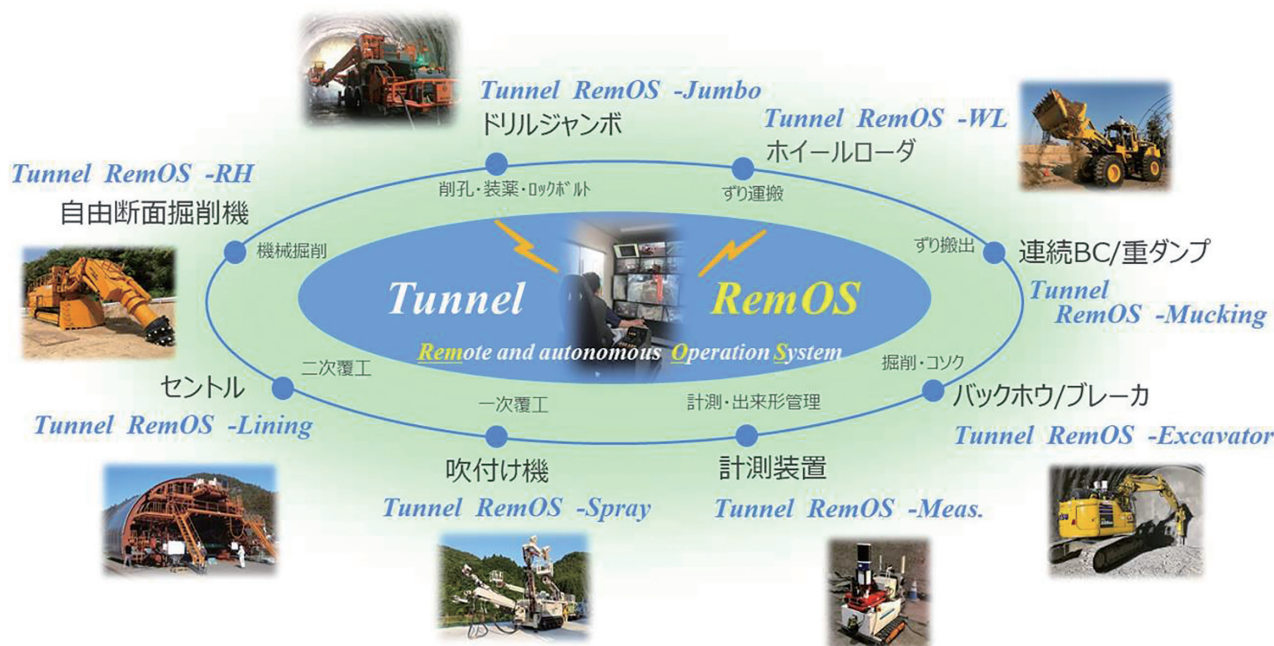
てずりを坑外へ搬出する。山岳トンネルの掘削作業では1度の発破につき、この一連のずり出し作業を数十回にわたって実施しており、施工サイクルの約30%を占めている。そのため、1回のずり運搬・投入に要する作業時間の短縮は、施工サイクルの短縮に直結し、ホイールローダの操作には、可能な限り高速な操作が要求される。また、ずりを確実にクラッシャーへ投入するためには、ホイールローダをクラッシャーの側部へ接近させる必要がある（写真-1）。さらに、ずり出し作業では、ホイールローダに加えてブレイカ・油圧ショベルが同時に稼働する場面（写真-2）もあり、これら設備や建設機械との接触を避けるため、ホイールローダの操作には、正確な操作も要求される。これらのことから、ずり出し作業に使用するホイールローダの操作には、高速かつ繊細な操作が要求され、遠隔化するにあたって難度の高い建設機械であると言える。しかしながら、難度の高いホイールローダの遠隔操作システムを構築することで、実機搭乗を不要とし、施工の安全性向上や、その他作業で使用する建設機械への応用も期待できる。

ホイールローダ遠隔操作システムの開発は、2019年度より着手し、これまで試作機（1号機）による現場試行¹⁾によってノウハウを蓄積した。この度開発した実用機（2号機）は、これまでの試作機の開発を通して得られた知見を活かし、実施工での実用化を目指したシステムである。

* 技術研究所先端技術グループ

** 技術研究所

*** 西日本（支）不破原トンネル（出）
（現：関東土木（支）府屋（出））



図ー1 山岳トンネル無人化・自動化施工システムの構想図



写真ー1 ホイールローダによるずり出し作業状況



写真ー2 複数重機によるずり出し作業状況

§ 2. システムの概要

ホイールローダ遠隔操作システムは、通常のホイールローダを改造し、『遠隔操作システム』・『映像・操作信号通信システム』・『安全走行管理システム』の3つの要素技術を搭載し、遠隔仕様としたシステムである。これらによって、実機より離れた安全な場所に位置するコクピットから、ホイールローダの遠隔操作を可能とした。システムの概要を図ー2に示す。

実用機（2号機）の開発では、試作機（1号機）による現場試行で明らかとなった、システムの操作性や耐久性の改良を図った。また、これらの改良にあたっては、実施工での検証を繰り返し行い、実際にシステムを操作するオペレータからの意見を取り入れ、実施工でのずり出し作業において、より実用的なシステムとした。

遠隔仕様ホイールローダとコクピットを写真ー3に示す。

2ー1 遠隔操作システム

ホイールローダのステアリング、ブレーキ・アクセルペダル、アーム・バケットレバーには、各種遠隔操作制御装置を取り付けており、これらの装置を作動させることによって、遠隔操作を可能とした。また、これらの装置は、設置した状態においても通常の搭乗操作が可能な構造とした。これによって、遠隔操作と搭乗操作の切り替えを容易に行うことが可能である。

過年度に開発した試作機（1号機）では、アーム・バケットレバーの操作において、操作ロッド等をレバーに外付けした装置によって、レバーを直接的に動かす機械的な制御としていた。これに対して実用機（2号機）では、ホイールローダ内部の電子回路へ信号を伝送してレバーを動かす、電氣的な制御とした（写真ー4）。また、実用機（2号機）ではバケットの自動上昇機能や水平保持機能といった、遠隔操作によるずり出し作業を部分的にサポートする機能も搭載した。これらによって、より実

機に近い操作を実現し、操作性の向上と、装置の構成部品数の削減による機械的な故障リスクの低減による耐久性の向上を図っている。

遠隔操作室内にはコクピットおよび複数のモニタを設置した。モニタには機体に搭載したカメラの映像や、バ

ケット角度等の情報が表示され、コクピットに搭乗したオペレータは、これらを見ながらホイールローダを遠隔操作する。また、コクピットには実機の振動や、作動音を伝える装置を搭載した。これによって、実機のキャビン内での操作に近い環境を再現している。

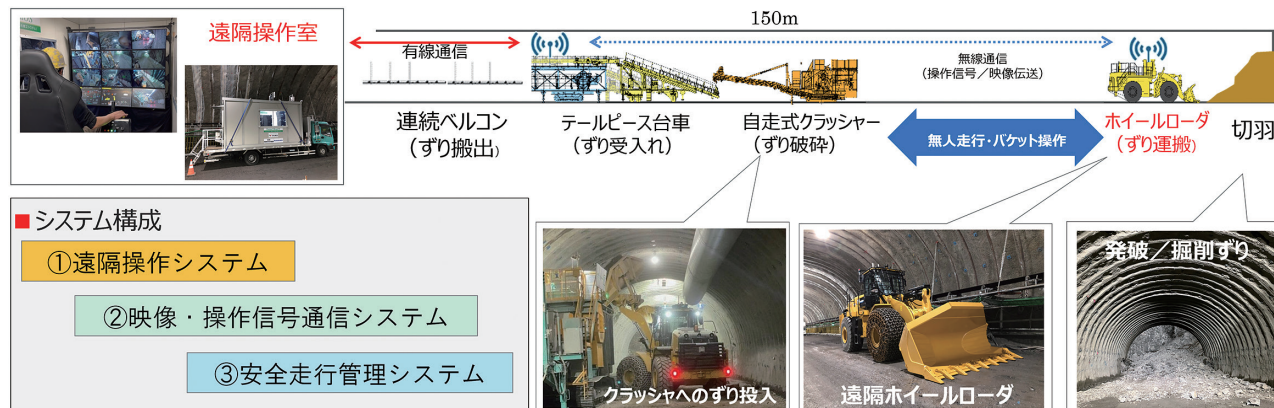


図-2 ホイールローダ遠隔操作システム（実用機）概要図



写真-3 左：遠隔仕様ホイールローダ（実用機）・右：コクピット

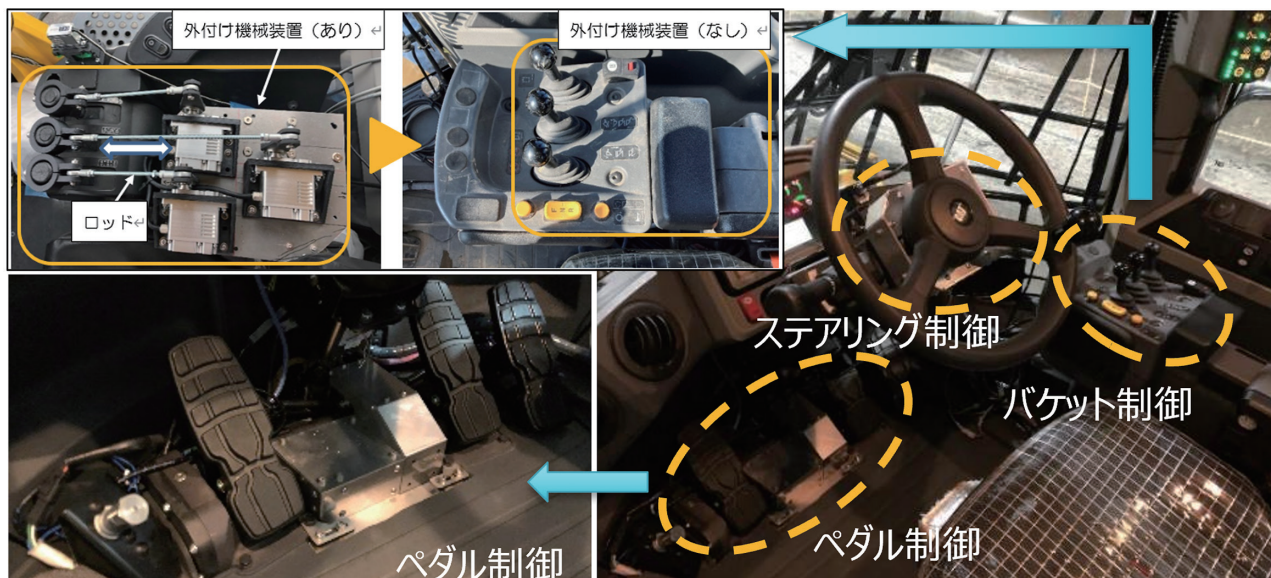


写真-4 遠隔操作制御装置（実機キャビン内）

2-2 映像・操作信号通信システム

ホイールローダの上部には、複数のカメラや、映像無線機および操作信号無線機等を設置した（写真-5）。これにより、車載のカメラ映像を操作室内のモニタへ表示させることや、コクピットからの遠隔操作信号を、実機内の遠隔操作制御装置へ通信可能としている。

ホイールローダに搭載したカメラの映像は、車載の無線機（送信機）から、テールピース台車に設置した無線機（受信機）を介し、そこから有線接続で操作室のモニタへ伝送する。また、ホイールローダの操作信号は、コクピットからテールピース台車に設置した無線機（送信機）へ有線接続し、そこからホイールローダに設置した無線機（受信機）へ伝送する。

映像伝送には小電力無線、操作信号伝送には 4.9 GHz 帯の無線を使用した。これらによって、映像信号・操作信号それぞれの通信を低遅延で確立しており、高速かつ繊細な操作が要求される、ホイールローダのずり出し作業を安定して実施することが可能である。

また、実用機（2号機）におけるこれらの装置の搭載には、ずり出し作業時に生じる機体の激しい衝撃や、振動の影響の低減を図っている。ホイールローダによるずり出し作業は、掘削で発生したずりを切羽から 100 m 程度離れたずりクラッシャー（破碎機）まで運搬・投入を

数十回繰り返す。その際、機体には激しい衝撃・振動が加わる。過去に実施した試作機での現場試行では、作業時の衝撃・振動によるカメラや制御盤内の電子部品の破損が確認された。そのため、実用機（2号機）では、より小型かつ軽量のカメラや、衝撃に強い制御盤へと改良し、実機への固定もより堅固にすることで、作業時に繰り返し受ける激しい衝撃・振動の影響を低減させ、耐久性の向上を図った。

2-3 安全走行管理システム

ホイールローダの遠隔操作時の安全を確保するため、稼働を自動的に緊急停止させるシステムを機体後方に搭載した。これにより、万が一、ホイールローダの後方に人が接近した場合は、それをシステムで検知（カメラ画像認識による AI 機能）し、機体の動作を自動的に停止させる仕様とした（写真-6）。また、操作信号の無線通信に不具合が発生し、遠隔操作が不能となった場合も同様に、緊急停止させる仕様とした。さらに、コクピットの操作ボタンや携帯式のスイッチから、緊急停止させることも可能とした。これにより、遠隔操作中の操作ミスが発生した場合に、操作者もしくは作業監視者は即座に重機の動作を停止させることができ、坑内設備等への衝突を未然に防ぐことが可能である。

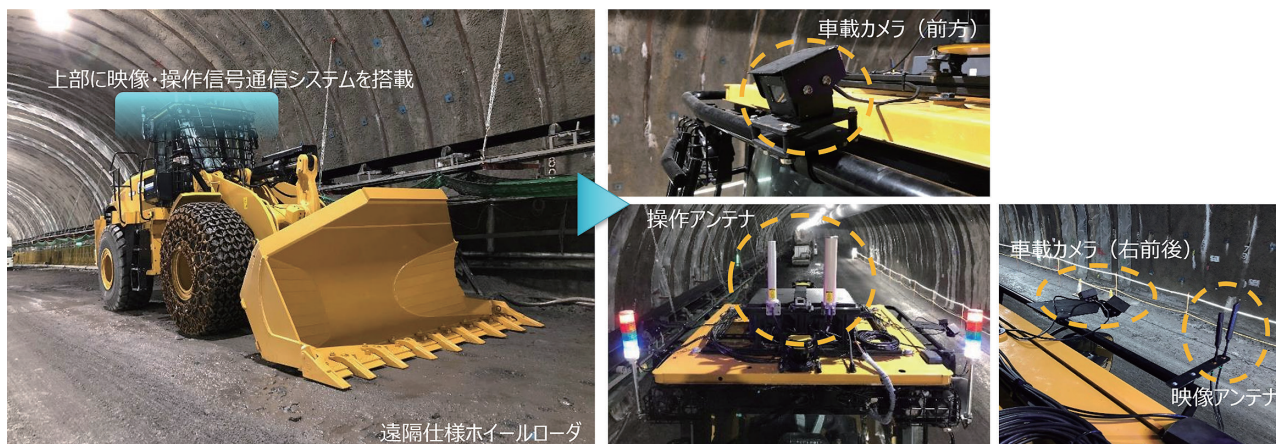


写真-5 ホイールローダ上部の装置設置状況

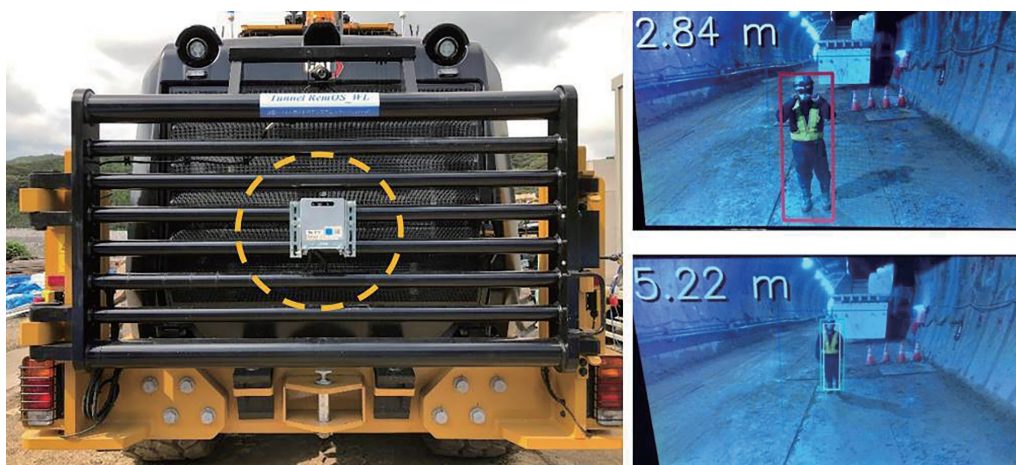


写真-6 自動停止システム（機体後方）

§ 3. システムの現場試行

本システムを、国土交通省四国地方整備局発注の「令和2-5年度窪川佐賀道路不破原トンネル工事」に、試験的に導入し、本システムによる現場試行を実施した²⁾³⁾⁴⁾。現場試行では、ホイールローダによるずり出し作業を遠隔操作にしたことで得られる、作業の安全性向上や、労働環境改善の効果等を確認した。また、本システムによる、ずり出し作業の施工効率の評価および改善に向けた取り組みも合わせて実施した。本システムによるずり出し作業状況を写真一7に示す。

(1) 安全性の向上と労働環境の改善効果

現場試行の結果、切羽から150 m程度離れた遠隔操作室からホイールローダを遠隔操作し、一連のずり出し作業を安定して実施することができた。遠隔操作によって、当該作業における切羽は無人となり、必然的に事故・災害のリスクが無くなることで、作業の大幅な安全性の向上が確認された。また、実機への搭乗が不要となったことで、オペレータの身体的負担の低減も確認された。

遠隔操作室は、騒音や粉じんの影響が及ばない屋内環境であると共に、同室内に設置した空調設備によって、快適な空間で作業することが可能である。これによって、本システムは労働環境の改善にも寄与することが確認された。また、遠隔操作室は静かな環境であるため、これまでの重機の搭乗操作時では困難であった、オペレータとの会話によるコミュニケーションが容易である。これによって、例えば、作業中におけるオペレータと監督者による会話、あるいは熟練オペレータによる直接的な操作指導が可能となり、円滑な作業の実施や、オペレータの育成環境においても、改善の効果が期待できる。

(2) 施工効率の検証

本システムによる、ずり出し作業時の施工効率の検証を実施した。検証では、有人搭乗によるホイールローダのずり出し作業（従来工法）のサイクルタイムと、本システムによるオペレータ2名（A：ホイールローダの遠

表一1 現場試行における施工効率の計測と比較表

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

隔操作経験が浅い、B：遠隔操作経験が豊富）のサイクルタイムの比較を実施した。比較結果を表一1に示す。検証の結果、2名のサイクルタイムは平均75秒～95秒であり、搭乗操作のサイクルタイムの平均54秒を基準とした場合、施工効率は約60%～70%前後であった。また、経験豊富なオペレータによる最短時間としては59秒、施工効率は約92%となり、一時的ではあるが、遠隔操作でも搭乗操作に近い施工効率で稼働できることが確認された。

また、複数回にわたって実施した現場試行において、システムに大きな動作不良や故障は発生しなかったことから、システムの耐久性向上も確認された。

(3) 施工効率改善に向けた取り組み

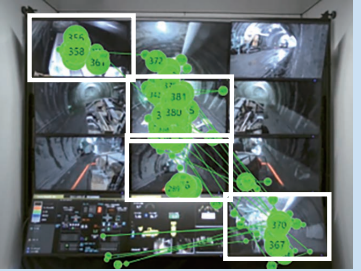
現場試行による施工効率の検証結果から、遠隔操作経験が浅いオペレータ A と、遠隔操作経験が豊富なオペレータ B とでは、10%前後の施工効率の差が確認された。この結果から、本システムでの施工効率は、オペレータの遠隔操作の習熟度により左右されることがわかった。そこで、オペレータ A の習熟度向上を効率的に図るため、遠隔操作時のオペレータの視線情報に着目した取り組みを実施した。本システムでの遠隔操作においては、主としてコクピット正面に設置した12画面のモニタ映像を頼りとして操作している。このことから、オペレータの操作習熟度の差が生じる要因として、操作中のモニタ視認方法に違いがあると考え、オペレータ毎の視線情報の取得および比較を実施した。

視線情報の取得には、アイトラッキングによる測定技術を用いた。アイトラッキングは、専用の計測グラスを装着することによって、装着者の瞳孔を検出し、視線が



写真一7 ホイールローダ遠隔操作システム（実用機）によるずり出し作業状況

表一2 視線情報の比較表

	オペレータ A	オペレータ B	オペレータ C
視線情報 (着色丸)			
白枠 4 画面 の注視率	96%	91%	89%

どこに向けられているかの計測や、その視線が固定されていた時間等を定量的に計測できるものである。この計測グラスをオペレータ A および B と、両者の中間程度の操作習熟度とされるオペレータ C を加えた 3 名に装着し、各人における遠隔操作ずり出し作業時の視線情報を収集・比較した（表一2）。この結果、3 名のオペレータでは、操作中に視認しているモニタに違いはほとんど確認されず、12 画面の内 4 画面（表一2 内における白線枠のモニタ）を、約 90% 前後で共通して、視認していることがわかった。また、ホイールローダによるずり出し作業の一連の動作を、①前進・②ずり回収・③後進・④ずり投入の 4 つに区分し、各動作区分において視認しているモニタについても、3 名とも同じ画面を視認していることがわかった。

これらのことから、本システムにおけるずり出し作業において、オペレータの習熟度によって、モニタ映像の視認方法に違いはなく、それが施工効率の向上・低下の要因ではないことが確認された。また、習熟度によらず、オペレータのモニタの視認方法が同様であることから、本システムの標準的な操作手法を決定する際に、共通して視認すべきモニタ映像としてこの 4 画面を導入することが、新規オペレータの育成やトレーニング方法の確立に効果的であるという知見が得られた。

§4. まとめ

トンネル掘削サイクルの多くを占めるずり出し作業に使用するホイールローダ遠隔操作システムの 2 号機として、操作性や耐久性の向上を図った実用機を開発した。本システムの実用化に向けて、高い施工性を安定的に確保するため、今後もシステム改良やオペレータの習熟度

向上に取り組む。また、ずり出し作業ではホイールローダに加え、油圧ショベルやブレーカとの協調作業が必要となる。本システムと並行して開発している油圧ショベル／ブレーカの遠隔操作システム『Tunnel RemOS-Excavator』との連携により、切羽の完全無人化および施工の自動化を目指し、山岳トンネル技術開発拠点『N-フィールド』で各種試験やシステム改良を進めている。

謝辞. 本システムの開発にあたり、ジオマシンエンジニアリング(株)、(株)カナモトの皆様にご多大なご協力を頂いた。また、システムの現場試行においては、四国支店不破原トンネル出張所に多大なご支援を頂いた。深く感謝するとともに、ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 山下雅之、田口毅、山本悟、原圭太、清水亮、吉田道信、石井孝佳、塚田純一：山岳トンネルにおけるホイールローダ遠隔操作システムの開発と現場試行、第 76 回土木学会年次講演会、VI-916, 2021
- 2) 田口毅、本山昇、原圭太、角和樹、清水亮、塚田純一：山岳トンネルにおけるホイールローダ遠隔操作システムの実施工への試験導入、第 78 回土木学会年次講演会、VI-764, 2023
- 3) 本山昇：山岳トンネルにおけるホイールローダ遠隔操作システムの実用化への取り組み、2023 年度「新技術・新工法に関する講習会」
- 4) 本山昇：山岳トンネルにおけるホイールローダ遠隔操作システム（実用システム）の適用による安全性の向上・労働環境の改善、令和 5 年度全建技術研究発表会