

油圧ショベル遠隔操作システムの開発

Development of a Remote Control System for Hydraulic Excavators

山本 悟*	岡村 貴彦**
Satoru Yamamoto	Takahiko Okamura
種田 智憲**	平塚 流聖**
Tomonori Taneda	Ryusei Hiratsuka

要 約

山岳トンネルの建設工事におけるトンネル切羽は地山の崩落や肌落ちなどの災害が発生する恐れがあり、作業員は粉じん、振動・騒音などに晒される過酷な環境下となる場合が多い。トンネル建設に従事する作業員の安全性の向上、作業環境の改善のために、バックホウやブレーカ等の油圧ショベルの遠隔操作システム「Tunnel RemOS-Excavator（トンネルリモス-エクスカベータ）」を開発し、ブレーカの遠隔操作を現場適用した。本稿では、当該システムの概要と実施工における適用状況および課題解決のための工夫について報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 山岳トンネル無人化・自動化施工システム
- § 3. 油圧ショベル遠隔操作システム
- § 4. 現場試行結果
- § 5. システム導入効果
- § 6. おわりに

§ 1. はじめに

山岳トンネルの建設工事においては、坑内の過酷な環境下にて特殊技能を要する作業が多く、これに従事する技能労働者の安全確保や高齢化対策が喫緊の課題となっている。また、山岳トンネル工事の最先端部である切羽は地山の崩落や肌落ち災害がたびたび発生しており、労働者の生命を脅かす恐れもあり、切羽への立入りを削減することが求められている（切羽作業の無人化）。

このような課題の解決には労働環境の大幅な改善や労働生産性の向上が不可欠であり、その方策の1つとしてICT技術を駆使した無人化（遠隔操作）施工技術の導入が望まれている。しかしながら、山岳トンネルの施工では狭隘な坑内において多種にわたる特殊機械を使用する複雑な作業が必要とされるため、無人化技術の導入が進んでいないのが現状である。

このような背景から、トンネル工事に使用する個別の

施工機械に対する遠隔操作技術を開発し、それらを効果的に組み合わせて施工全体の無人化を実現するための山岳トンネル無人化・自動化施工システム「Tunnel RemOS（Tunnel Remote and automated Operation System）」^{1,2)}の構築を現在進めている（図ー1）。

§ 2. 山岳トンネル無人化・自動化施工システム

山岳トンネル無人化・自動化施工システムの構成を図ー1に示す。本システムは掘削作業に使用する自由断面掘削機やドリルジャンボおよび油圧ショベル、ずり出し作業に使用されるホイールローダ、一次支保作業に使用される吹付機等、各作業に使用される施工機械の遠隔施工システムで構成されている。また、これらのシステムは以下の3分野の技術が備わることを基本とした。

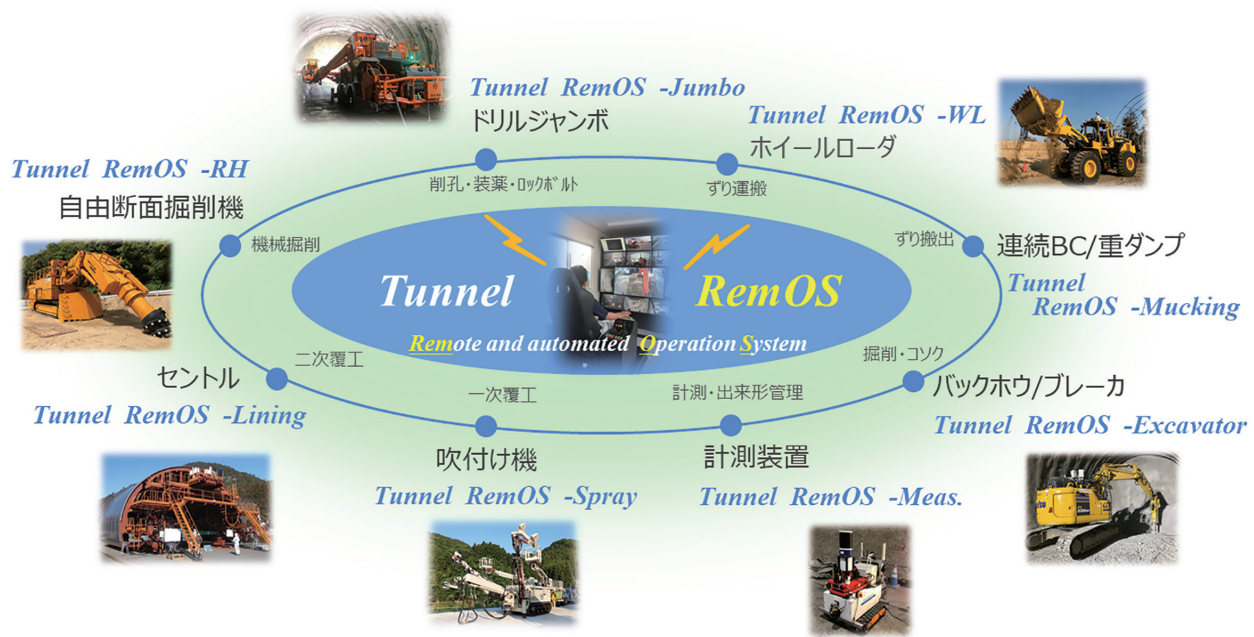
- ・作業場所への遠隔「機体移動（走行）」技術
- ・作業場所での必要な遠隔「作業動作（作業）」技術
- ・遠隔操作に必要な「計測・ガイダンス」技術

これら各分野の技術については、それぞれの分野別に開発を進め、完成したものから先行して現場適用を実施するとともに、既存技術（とくに計測技術など）の活用も積極的に行い、システム構築の迅速化を図っている。

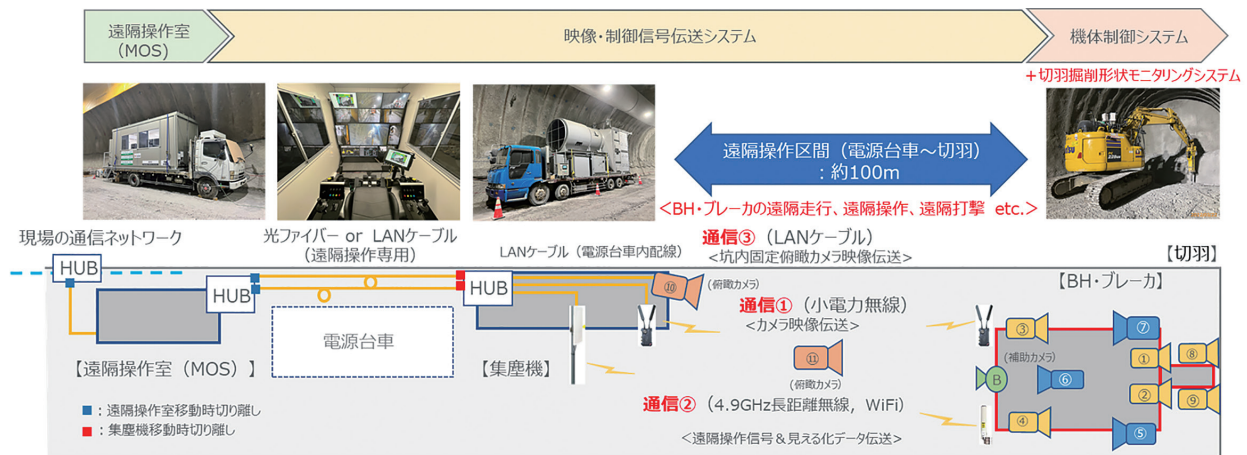
さらに、山岳トンネル無人化施工システムの開発拠点を整備し、現場適用と並行して複数重機の協調運転や自動化技術の開発にも着手し、山岳トンネル工事の自動化に向けた取り組みも開始している。

* 技術研究所土木技術グループ

** 北日本（支）新幹線磐石（出）



図ー1 山岳トンネル無人化・自動化施工システム「Tunnel RemOS」



図ー2 「Tunnel RemOS-Excavator」のシステム構成例

§ 3. 油圧ショベル遠隔操作システム

山岳トンネル掘削の最先端部である切羽においては、発破後に掘削設計断面線よりも内空側に残った地山を掘削する整形作業（以下、あたり取り）が行われている。これまで、あたり取りの際は作業員が切羽直下に立ち入り、目視にて整形が必要な箇所（以下、あたり箇所）を判断してレーザーポインター等で重機オペレータに指示を出していた。しかし、切羽は地山が露出しており、岩塊の抜け落ち（肌落ち）がひとたび発生すると、死傷災害につながる可能性が高い危険な場所であり、厚生労働省からも「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン」³⁾において、切羽への原則立入禁止が示されている。そこで、あたり取り作業に使用される油圧ブレーカのオペレータの安全性の向上、作業環境の改善のために、ブレーカやバックホウ等の油圧ショベルの遠隔操作施工システム「Tunnel RemOS-Excavator

（トンネルリモス-エクスカベータ）」を開発した。

3-1 システム概要

今回開発した油圧ショベル遠隔操作システム「Tunnel RemOS-Excavator」（以下、本システム）は、図ー2に示すように遠隔操作室、映像・制御信号伝送システム、機体制御システムおよびガイダンスシステムである「切羽掘削形状モニタリングシステム」で構成されており、油圧ブレーカの走行から切羽でのコソクやあたり取りなどの一連の作業を無線で遠隔操作することが可能である。重機オペレータは切羽から離れた位置に配置された遠隔操作室内のモニタに表示された切羽映像を見ながら油圧ブレーカを操作するため、切羽近傍の無人化や作業環境の改善が期待される。

(1) 遠隔操作室

遠隔操作室は4tトラックの荷台に補強済みユニットハウスを設置し、電源台車後方（切羽から150m程度後

方)に駐機させた(写真一1)。室内には運転席、操作レバー、スイッチおよびフットペダルを配置した操作コクピットと、油圧ブレーカの前後左右側方に搭載したFHDカメラ映像や俯瞰カメラ映像および機体情報を映す12個のモニタに加え、後述する「切羽掘削形状モニタリングシステム」の計測モニタが配置されている(写真二2)。オペレータは操作コクピットに搭乗してモニタ画面を見ながら機体走行やブーム・アーム操作、チゼルの打撃等を遠隔で行う。なお、掘削時の音や振動もセンサにより取得し、コクピット上で再現することによって、機体上での実機操作に近い作業環境を実現する工夫がされている。

現在は試行段階であるため遠隔操作室をトンネル坑内に配置しているが、光ファイバーケーブルを使用することによりトンネル坑外に配置して切羽の油圧ブレーカを遠隔操作することも可能である。さらには、パブリック5Gなどの通信インフラの発達によって、例えば東京都心のオフィスから複数のトンネル現場の重機を遠隔操作することも技術的には可能である。

また、操作コクピットは、トンネル掘削に使用されるドリルジャンボや吹付け機、ホイールローダなどの大型重機をセレクトスイッチで選択することによって、操作レバーやスイッチ、フットペダルなどの設定が変更され、1台のコクピットから各大型重機の遠隔操作が可能なマルチオペレーションシステムとなっている。

(2) 映像・制御信号伝送システム

重機を安定的に遠隔操作するためには映像・制御信号を有線接続にて伝送する方法が確実である。しかし、複数の重機が輻輳して作業を行うトンネル切羽においては有線接続では切断等の恐れがあるため、映像・制御信号の伝送については5GHz帯の小電力無線および4.9GHz長距離無線の2種類の無線伝送方式を使用した通信システムを構築している。油圧ブレーカには9台のFHDカメラと各無線送信用のアンテナ(写真一3)が設置されている。さらに、移動基地局として送信用のアンテナが切羽の最先端設備である集塵機上部に設置されている(写真一4)。カメラの映像データは変換・合成を経て、小電力無線により移動基地局に無線伝送され、そこからLANケーブルを介して遠隔操作室へ有線伝送される。また、俯瞰カメラ映像は小電力無線により遠隔操作室へ直接無線伝送される。一方、制御信号、機体情報(音、振動等)、ガイダンスシステムのデータ等は4.9GHz長距離無線を使用して送受信され、情報の一部はモニタに表示されるとともに、専用PCに運転データとして蓄積される。

(3) 機体制御システム

遠隔操作室からの制御信号は、先述の映像・制御信号伝送システムを介して油圧ブレーカのキャビン上に設置された機体制御システム(写真一5)に伝送され、その信号をもとに機体の油圧ユニットに取り付けた作動油の



写真一1 遠隔操作室



写真二2 操作コクピットおよびモニタ



写真一3 映像・制御信号伝送システム



写真一4 移動基地局 (集じん機)

比例制御電磁弁を操作することで、機体の走行、ブーム・アーム操作、ブレーカ打撃といった掘削作業に直接関係する動作を遠隔操作で実施することができる。また、それ以外のクラクション合図や「切羽掘削形状モニタリングシステム」の操作等、有人作業時に可能なすべての動作についても遠隔制御することができる。

(4) 切羽掘削形状モニタリングシステム

油圧ブレーカの遠隔操作にてあたり取りを行う場合、遠隔操作室からあたり箇所を認識しづらいという問題がある。切羽にて有人搭乗する際は、作業員が切羽直下に立入り、目視にてあたり箇所を判断してレーザーポインター等で重機オペレータに指示を出していたが、遠隔操作ではその判断に代わる「計測・ガイダンス」技術が必要となる。そこで、あたり取りを行う油圧ブレーカに搭載した高速3D スキャナ（写真－6）で切羽の掘削形状を計測して、掘削形状の点群データと設計断面を比較し、設計断面線よりも内空側に残ったあたり箇所をモニタにヒートマップ表示させる「切羽掘削形状モニタリングシステム」⁴⁾を遠隔操作室から操作可能とした（図－3）。本システムにより、崩落等危険な切羽に近づくことなく遠隔操作室からあたり箇所が確認できるため、安全かつ効率的にあたり取りを実施することが可能である。

§ 4. 現場試行結果

油圧ショベル遠隔操作システムを2022年4月から北海道新幹線磐石トンネル（北）他工事に導入した。オペレータ複数人の協力のもと、実施工時の発破・ズリ出し作業完了後の切羽において、遠隔操作による駐機場所からの移動やあたり取り作業といった一連の作業を数回にわたって試行した。なお、本来の切羽は油圧ブレーカとともに油圧バックホウ、ホイールローダおよびダンプトラックが輻輳しながら作業を行うが、試行段階では安全性を考慮して油圧ブレーカ単独での作業とした（写真－7）。

4-1 現場概要

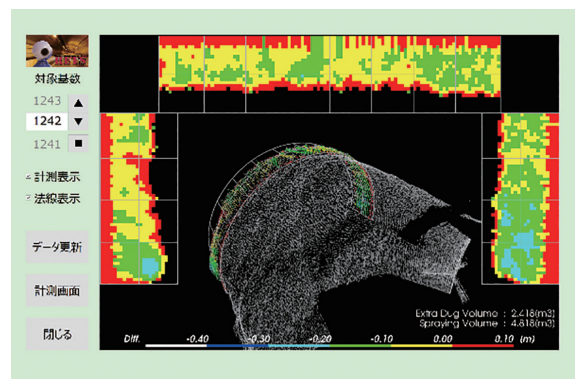
工 事 名：北海道新幹線、磐石トンネル（北）他
 発 注 者：（独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構北海道新幹線建設局
 工事場所：北海道二海郡八雲町地内
 工 期：平成29年10月4日～令和6年10月21日
 受 注 者：西松・浅沼・中山・岸本特定建設工事共同企業体
 掘削工法：発破掘削ベルトコンベア方式の補助ベンチ付き全断面掘削工法
 主要工種：斜坑掘削 L=450 m、本坑掘削・覆工・インバート工・地下排水工・路盤工 L=3,150 m



写真－5 機体制御システム（キャビン上）



写真－6 高速3D スキャナ（キャビン上）



図－3 モニタリングシステム計測結果例



写真－7 遠隔操作中の油圧ブレーカ

4-2 試行成果と課題

(1) 掘削箇所の認識不良

試行当初、遠隔操作者は遠隔操作室内の操作コクピットにおいて、写真-8に示す中央の画面映像（黄色破線部分）を頼りにブーム・アーム操作を行い、あたり箇所への掘削を行っていた。しかし、中央のカメラ映像は掘削箇所から遠く、映像も不鮮明なため「切羽掘削形状モニタリングシステム」のヒートマップを確認しながらでもあたり取りを行うのは困難であった。そこで、写真-9に示すように、油圧ブレーカのチゼル部分にブラケットを新設し、そこにカメラを設置することで、より掘削箇所に近い、より鮮明な映像の取得に成功した。写真-10は改良したカメラ位置での遠隔操作によるあたり取りの状況である。黄色破線部分に新設したカメラ映像を映すことで、あたり箇所を正確に認識することができるため、効率的にあたり取りを行うことが可能となった。

(2) サイクルタイムの遅れ

遠隔操作によるあたり取りのサイクルタイムは実機にオペレータが搭乗した場合と比較して、30%程度増加した。これは、モニタ画面と「切羽掘削形状モニタリングシステム」の計測画面のみでは遠近感が掴みにくく、あたり取り作業に時間が掛かってしまうことに起因する。なお、この「遠近感が掴みにくい」という問題は、現在開発に取り組んでいる「Tunnel RemOS」共通の課題でもある。その他の要因としては、遠隔操作の現場試行が断続的かつ短期間であったため、オペレータが運転コクピットの操作に慣れていないという問題や、オペレータの年齢や遠隔操作に対する適性等も関係していると考えられる。

これら諸問題を解決するために、「切羽掘削形状モニタリングシステム」で計測されたあたり箇所をオペレータがモニタ画面上で選択することで、自動的に油圧ブレーカのチゼルが選択された位置に移動するチゼル自動誘導システムを開発中であり（写真-11）、将来的にはあたり取りの自動化に繋げていく考えである。

§5. システム導入効果

油圧ショベル遠隔操作システム「Tunnel RemOS-Excavator」の導入効果について、以下に示す。

(1) 安全性の向上

遠隔操作室から油圧ブレーカのすべての操作を行うことで切羽が無人となり、飛び石や切羽崩落による人的被害が無くなる。また、「切羽掘削形状モニタリングシステム」を搭載することで、あたり箇所の確認で切羽直下に立入ることも無くなるため安全性が向上した。

(2) 作業環境の改善

油圧ブレーカによる掘削作業は振動、騒音、粉じんおよび飛び石の飛来等、オペレータにとって苦渋な環境であるが、遠隔操作室は切羽から離れている上に空調が完

備されており、快適な作業環境でトンネル掘削を施工することが可能である。



写真-8 遠隔操作によるあたり取り（改良前）



写真-9 チゼルブラケット、カメラ



写真-10 遠隔操作によるあたり取り（改良後）

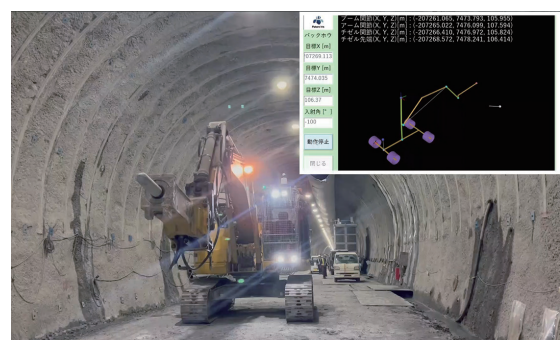


写真-11 自動誘導システム試行状況

(3) 操作性の向上

オペレータがより実機に搭乗している時の感覚で操作できるよう、操作コクピットにおいて実機の音と振動を再現している。また、現場試行を通じて、カメラの台数や配置の工夫、無線伝送技術の選定を行うことで、遠隔操作をするために必要な視認性と低遅延による高い操作性を実現することができた。

(4) 高い汎用性

本システムは重機メーカー問わず後付けが可能のため、汎用性の高いシステムとすることができた。

§ 6. おわりに

今回、山岳トンネル工事における油圧ショベルの遠隔操作システム「Tunnel RemOS-Excavator」を開発し、現場試行を行った。現場試行では油圧ブレーカの切羽への移動や切羽作業（コソク作業やあたり取り）といった一連の作業を遠隔操作にて実施することができたが、サイクルタイムの増加等の課題も残された。今後は、課題解決に向けたシステム改良を継続するとともに、油圧バックホウやホイールローダとの共同作業を遠隔・自動化さ

せたトンネル掘削作業の完全無人化への取り組みを続け、更なる安全性向上・省人化を目指していく。

参考文献

- 1) 山下雅之・山本悟・田口毅：山岳トンネルにおける無人化施工への取り組み：施工機械の遠隔操作システムの実用化を目指して，土木施工，Vol. 62, No. 1, pp. 135-139, 2021
- 2) 山下雅之・山本悟・田口毅：山岳トンネルにおける切羽近傍作業の無人化を目指した取り組み，建設機械施工，Vol. 73, No. 7, pp. 43-48, 2021
- 3) 厚生労働省：山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン（平成 28 年 12 月 26 日策定，平成 30 年 1 月 18 日改正），<https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000149309.html>（参照 2024-04-17）
- 4) 山本悟・三井善孝・高橋将史：切羽掘削形状モニタリングシステムの開発，令和元年度土木学会全国大会 第 74 回年次学術講演会，VI-281, 2019