

# ヘッドマウントディスプレイによる山岳トンネルの遠隔吹付け技術の開発

大成建設(株) 正会員 ○木下 勇人 大成建設(株) 正会員 谷 卓也  
大成建設(株) 正会員 竹中 計行 大成建設(株) 正会員 宮本 真吾  
大成建設(株) 正会員 松田 一輝 大成建設(株) 正会員 文村 賢一

## 1. はじめに

山岳トンネル工事では、岩石の落下等（肌落ち）による労働災害がたびたび発生しており、肌落ち災害は、その半数近くが死亡または休業1ヵ月以上と重篤度が高い状況にある。この状況を受けて、厚生労働省は、山岳トンネル工事の切羽近傍における労働災害の防止を図るため、「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」を2016年12月に公表しており、2019年1月には更なる安全性向上に向けてガイドラインの改正がなされている。改正ガイドラインの5番目の項目「事業者が講ずることが望ましい事項」には、「事業者は、肌落ちによる労働災害を防止するため、切羽への労働者の立ち入りを原則として禁止し、真に必要な場合のみ立ち入らせるようにすること。また、この措置を実効性のあるものとするため、（中略）等の完全な機械化等を積極的に進めること。」と示されている。写真-1に示す通り、従来のトンネル吹付け工ではオペレータは切羽近傍で吹付け機を操作しなければならず、トンネル吹付け工の遠隔操作技術は、肌落ち災害の防止を目的とする技術の一つである。

また、従来のトンネル吹付け作業は、切羽近傍で長時間実施される高粉塵環境下での作業となっている。粉塵対策については、2020年7月に厚生労働省が改定した「ずい道等建設工事における粉塵対策に関するガイドライン」に、コンクリート吹付け作業に関する措置として「より本質的な対策として、遠隔吹付け技術の導入を検討すること。」と明記されている。つまり、吹付け作業で発生する粉塵による健康被害低減の面からも、吹付け工の遠隔操作技術が望まれている。

以上の背景から、山岳トンネル工事の作業の安全性向上と環境改善を図るため、災害対応用に開発済みの臨場型遠隔映像システム「T-iROBO Remote Viewer」をコンクリート吹付け工に適用した遠隔操作技術「T-iROBO Remote Shotcreting」（以下、「本技術」と記す）を開発した。本報告では、本技術の概要と、現場で実施した検証実験の結果について報告する。

## 2. T-iROBO Remote Shotcreting の概要

本技術は、安全な吹付け機運転席でヘッドマウントディスプレイ（以下、「HMD」と記す）を装着したオペレータが、吹付け機に複数台装備したカメラからの映像をHMDを介して視聴しながら吹付け機を遠隔操作する技術である（図-1）。本技術により、吹付け機オペレータは切羽から離れた運転席から、切羽近くにいるような臨場感を持って吹付け作業を行うことが可能となる。本技術の特徴を次節に示す。

### (1) 吹付け機へのシステム一括搭載

本技術のシステムは図-1に示すように全て吹付け機に搭載されており、システムの電源は吹付け機の電源と連動して作動するため、吹付け機を切羽近傍にセットした後は即座に遠隔操作を開始できる。また、遠隔操作は見通しの良い吹付け機の運転席で実施するため、オペレータの安全性を確保できる他、周囲の作業員と容易に連携を図ることができる。



写真-1 従来のトンネル吹付け作業

キーワード トンネル吹付け 遠隔操作 HMD ステレオカメラ

連絡先 〒254-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町334-1 大成建設株式会社 技術センター TEL045-814-7229

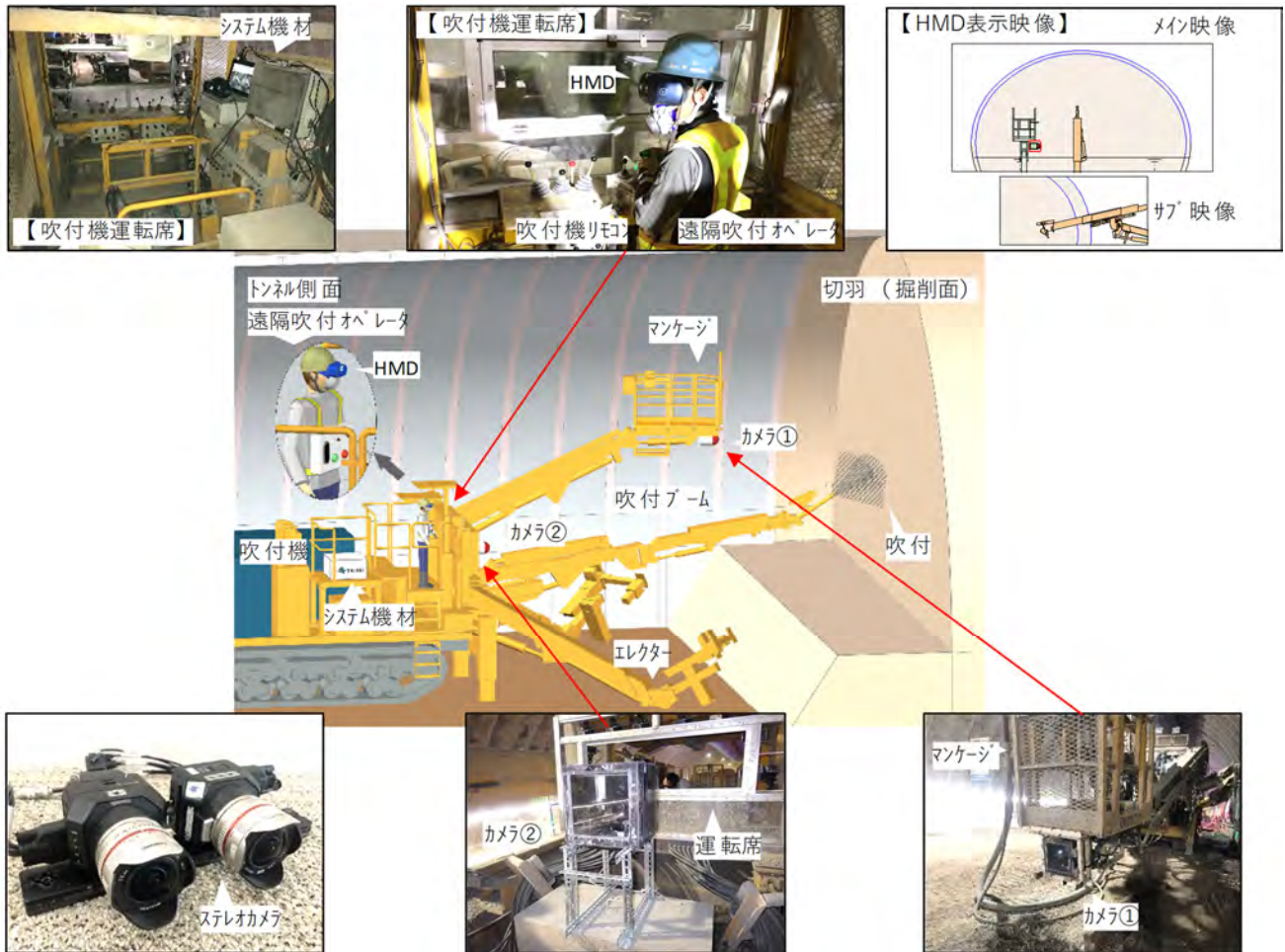


図-1 本技術の概要図

## (2)HMDによる臨場感

表示するカメラ映像は頭部に装着したHMDの動きと同期するため、オペレータは頭を動かすだけで、見たい方向のカメラ周辺の状況をリアルタイムに見ることができる。カメラには魚眼レンズが取り付けられており、左右 100 度、上下 80 度程度の広範囲の映像を一度に取得できる。カメラ映像は、吹付け機運転席部に設置した制御 PC まで遅延なく伝送され、制御 PC では、受信した映像データのレンズ歪みを補正し、目視に極めて近い形でHMDに表示する。そのため、オペレータは臨場感を持って吹付け作業を行うことができる。

## (3)ステレオカメラによる遠近感把握

装備するカメラは図-1 の左下に示すステレオカメラとした。ステレオカメラは左右それぞれで独立した映像を取得できるため、HMDを介して見ると、左右の視差から遠近感を得られる。これによりHMDを装着したオペレータは従来と同様、吹付け厚さを把握しながら作業をすることができる。

## (4)複数台カメラによる死角低減

ステレオカメラは吹付け機のマンケージ下部と運転席前部の2箇所に設置した(図-1, 下中央, 右下参照)。運転席前部のカメラ②では全体を俯瞰できる映像が取得され、マンケージ下部のカメラ①では、マンケージが自由に移動可能なため吹付け面に寄った映像が取得できる。HMD上では運転席とマンケージの映像が常に確認できるため、オペレータは死角なく遠隔操作ができる。

## (5)表示映像の切替

吹付け作業は、主に切羽正面の掘削面である鏡部を対象とする1次吹きと、切羽側壁外周部の支保工間アーチ部を対象とする2次吹きに大別される。それぞれの作業でオペレータが必要とする映像が異なるため、1次吹き用と2次吹き用のそれぞれに対応できるシステムとした。これらの対応はボタン操作で瞬時に切り替え可能であり、作業の進捗に合わせて切り替えることで、円滑な遠隔吹付け作業を可能とした。

### 3. 現場実験

本技術の開発にあたっては、実際のトンネル現場にて複数回の実験を行い、システムの検証と改善を繰り返して実用化を果たした。本章では、開発初期から実用化に至る各段階で行った現場実験について述べる。

#### (1) プロトタイプの検証

##### (a) プロトタイプ

カメラ映像の視認性検証と設置場所の選定を目的にプロトタイプを製作した。プロトタイプの仕様を図-2に示す。カメラの設置場所は、チルト機構など向きを変化させられる自由度の高いマンケージを選択し、衝突等からカメラを防護可能であるマンケージ下部に設置した。また、カメラを除くシステムは別途準備した車両に搭載し、オペレータは吹付け機付近に停車したシステム搭載車両から遠隔操作する仕様とした。

##### (b) 現場実証

実際のトンネル現場にてプロトタイプの有効性を検証するための実証実験を行った。システム設置状況を写真-2に示す。吹付け作業時の吹付けブームの振動に伴うカメラ映像の乱れがオペレータのカメラ酔いを誘発することが懸念されたが、試行したオペレータからは、映像の乱れは全く感じないとの意見が得られ、プロトタイプの有効性が確認された。

しかし、一方で、いくつかの課題が挙げられた。

##### (c) 課題

遠隔吹付けを試行したオペレータへのヒアリングから明らかになった課題を以下に示す。

##### ① 映像解像度の不足

映像が粗く、吹付け作業には解像度の向上が必要。

##### ② 施工サイクルへの負荷

システム搭載車両の移動やセットアップに15分以上の時間を要し、施工サイクルへの負荷が大きい。

#### (2) 映像解像度と施工サイクル負荷の検証

##### (a) 改良タイプ1

プロトタイプの実験で明らかになった課題の改善を目的に改良タイプ1を製作した。映像解像度の向上のため、使用するレンズを円周魚眼レンズから対角魚眼レンズに変更した(表-1)。これまでは、広範囲の映像を取得可能でHMDとの親和性が高い円周魚眼レンズを採用していたが、吹付け作業に必要な解像度を確保できなかった。そこで、視野範囲が円周魚眼レンズよりも減少するが、より高い解像度で映像を取得できる対角魚眼レンズに変更した。

また、全てのシステムを吹付け機に搭載し、セットアップ時間の短縮を図った。これに伴い、遠隔吹付けオ

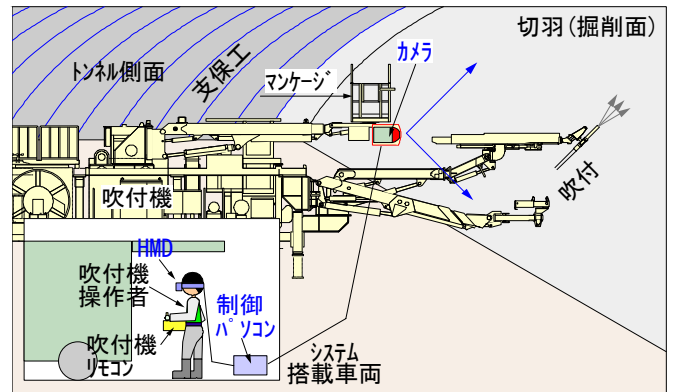
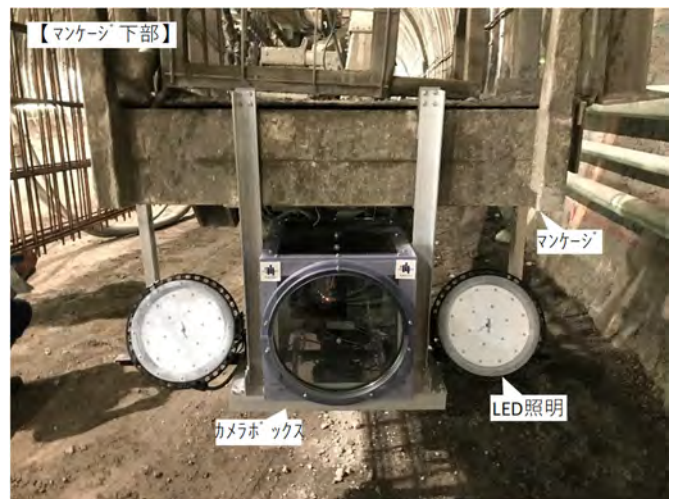


図-2 プロトタイプ仕様



(a) マンケージへのカメラ設置状況



(b) 遠隔吹付け実施状況

写真-2 プロトタイプのシステム設置状況

オペレータは吹付け機の運転席部で遠隔操作を行うこととした。カメラボックスから制御パソコンへの配線は、マンケージブームへの既設配線に沿わせ、機材の電源は吹付け機の分電盤から供給して外部電源を用いない仕様とした。

### (b)現場実証

実際のトンネル現場にて改良タイプ1の有効性を検証するための実証実験を行った。システム設置状況を写真-3に示す。改良タイプ1によりセットアップ時間は約1分程度に収まり、吹付け機が切羽へ移動する時間内に完了するため、施工サイクルへの影響が大幅に低減した。本技術は、作業員数の低減や吹付けの高速施工には直接貢献しないが、オペレータの疲労の軽減や安全性向上が期待できることが分かった。また、変更したレンズで吹付け作業に必要な視野範囲と解像度が確保されることも確認した。

しかし、一方で新たに次項に示す課題が挙げられた。

### (c)課題

オペレータへのヒアリングから新たに明らかとなった課題を以下に示す。

#### ①必要な映像情報の不足

マンケージ下部のカメラによる1方向からの映像では吹付け作業に必要な情報が不足していることが分かった。マンケージ下部のカメラでは、カメラを装備しているマンケージ自体のブームや吹付けノズルのホースが映像に反映されない。そのため、オペレータは接触や干渉の恐れから十分なノズルワークを行うことが困難であった。また、ノズルが映るとその後方の切羽面が死角となることも課題として挙げられた。

#### ②作業進捗に伴う必要な映像情報の変化

吹付け作業の1次吹きと2次吹きとでは必要とする映像情報が異なることが分かった。2次吹きでは支保工間を詳細に確認するが、1次吹きではオペレータは常に切羽全体を観察して次に吹き付けるべき箇所を随時判断しながら作業を進めている。1次吹きでは切羽全体を常に把握可能な映像が必要であり、2次吹きでは支保工間を詳細に確認可能な映像が必要との判断に至った。

以上の課題を改善した機器による、次の段階の現場実験及び実験結果について次節で述べる。なお、作業に伴う重機の振動が、搭載したシステムの正常作動を阻害することが懸念されたが、その影響は見られなかった。

### (3)カメラ追加による操作性検証

#### (a)改良タイプ2

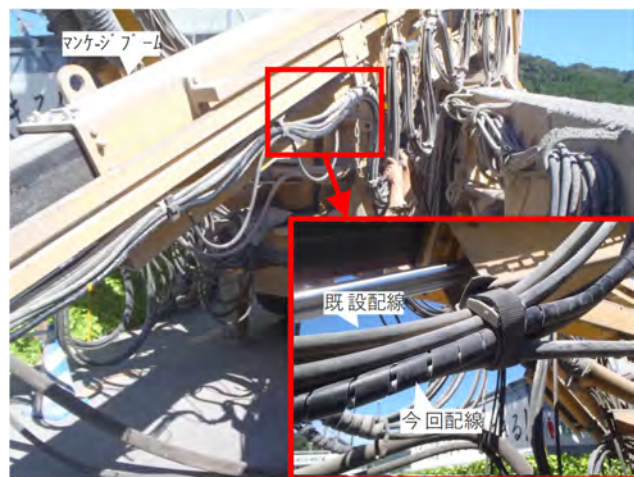
前実験で挙げた2つの課題の改善を目的に改良タイプ2を製作した。これが本開発技術の最終形である。

表-1 レンズ仕様

分類	円周魚眼レンズ	対角魚眼レンズ
外観		
視野角	水平：200度 鉛直：144度 (円周200度)	水平：120度 鉛直：81度 (対角190度)



(a) 吹付け機へのシステム設置状況



(b) マンケージブームへのカメラ配線状況

写真-3 改良タイプ1のシステム設置状況

常に切羽全体を俯瞰可能な運転席部分にさらにステレオカメラを追加し、1次吹き用と2次吹き用のそれぞれに最適化したシステムを構築した(表-2)。本システムでは、HMD上の正面方向にメイン映像が、下方にサブ映像が表示される。正面を向いてメイン映像を視聴しながら吹付作業を行い、頭を少し傾けて下を見るとサブ映像が見られる仕様としている。1次吹き用では、切羽全体を俯瞰できる運転席前部のカメラ②をメインに使用し、ノズルにより死角となる部分はサブとなるマンケージ下部のカメラ①で補うことができる。2次吹き用では、マンケージ下部のカメラ②をメインとし、サブとなる運転席前部のカメラ①でブームの干渉や死角部分を把握することができる。また、それぞれのシステムはHMDに追加装備した切替ボタンにより任意に切り替え可能なシステムとした。

表-2 2つの吹付け作業に最適化したシステムの仕様

	1次吹き用システム	2次吹き用システム
HMD表示映像	<p>メイン映像 (運転席前部カメラ)</p> <p>サブ映像 (マンケージ下部カメラ)</p>	<p>メイン映像 (マンケージ下部カメラ)</p> <p>サブ映像 (運転席前部カメラ)</p>
カメラ位置関係	<p>(マンケージ 操作者)</p> <p>遠隔吹付オペレータ</p> <p>吹付機</p> <p>カメラ①</p> <p>カメラ②</p> <p>平面図</p> <p>側面図</p>	<p>(マンケージ 操作者)</p> <p>遠隔吹付オペレータ</p> <p>吹付機</p> <p>カメラ①</p> <p>カメラ②</p> <p>平面図</p> <p>側面図</p>

## (b)現場実証

実際のトンネル現場にて改良タイプ2の有効性を検証するための実証実験を行った。改良タイプ2を用いて吹付けオペレータに一連の吹付け作業（1次吹きと2次吹き）を遠隔操作で実施した状況を写真-4に示す。吹付けオペレータは、吹付け機の運転席に着席した状態でHMDを装着し吹付け機を遠隔操作した。3名のオペレータで実施したが、全員から①画質も綺麗でよく吹ける、②支保工間も十分に吹き付けることができる、③吹付け機のブームを目視する位置が今までとは異なるが慣れれば問題ないだろう、との評価を得ることができた。

## 4. まとめ

山岳トンネル工事の作業の安全性向上と環境改善を目的に、HMDを用いて安全な吹付け機運転席から遠隔でのコンクリート吹付け作業を可能にする「T-iROBO Remote Shotcreting」を開発した。山岳トンネル工事での現場実証実験から、安全かつ確実に遠隔吹付け作業が可能であることを確認した。実際に本技術を使用したオペレータからは操作性および作業環境に対し高い評価を得ることができ、安心して快適な作業環境を提供できたとと言える。

今後は、完成したシステムを継続して現場の吹付け作業で使えるようPCやカメラ等の機器の保護も考慮

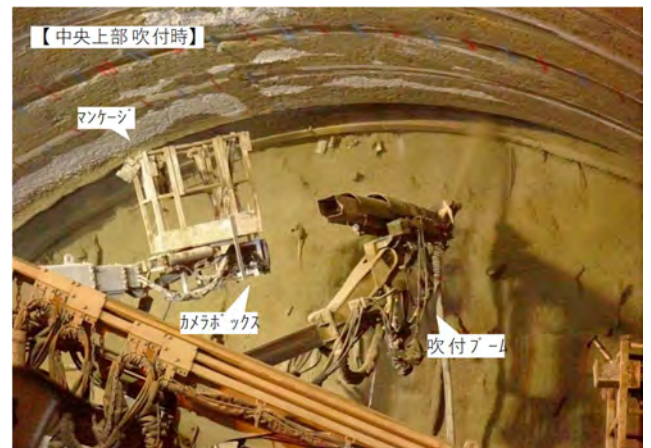
したハウジングの改良や取り付け架台の耐久性向上等を行い、当社山岳トンネル工事へ広く展開していきたい。さらに、オペレータの吹付け作業を記録・分析し、吹付け作業の自動化技術の開発につなげる等、開発した技術を元に、継続して山岳トンネル工事の品質確保、安全および生産性向上に貢献していきたい。

## 参考文献

- 1)西田与志雄，友野雄士，高倉克彦：HMDによるトンネルコンクリート吹付け機の遠隔操作技術の開発，土木学会第74回年次学術講演会，VI-739，2019.
- 2)高倉克彦，西田与志雄，小仲井一朗：HMDによるトンネル吹付け機の遠隔操作技術の開発（その2）～2眼カメラ配置方法に関する実験～，土木学会第75回年次学術講演会，VI-434，2020.
- 3)渡辺正嘉，竹中計行，宮本真吾：HMDによるトンネルコンクリート吹付け機の遠隔操作技術の開発（その3）～初期セットアップ時間の短縮～，土木学会第76回年次学術講演会，VI-529，2021.



(a) 遠隔操作の実施状況



(b) 吹付け状況

写真-4 改良タイプ2による遠隔吹付け作業