

# 吹付け厚さリアルタイム計測システムの開発

## Development of spray thickness real-time measurement system

山本 悟*	日比 康貴*
Satoru Yamamoto	Yasutaka Hibi
大林 孝一**	島根 大悟**
Koichi Obayashi	Daigo Shimane

### 要 約

山岳トンネル工事の更なる生産性・安全性向上を目的に、山岳トンネル無人化施工システム（Tunnel RemOS：トンネルリモス）の構築を進めている。本システムはトンネル掘削作業に使用される各施工機械に対する遠隔操作システムで構成されており、これらの構成技術を効果的に組み合わせることによりトンネル施工の無人化を目指すものである。

現在、無人化施工システム構築の第一段階として各施工機械のガイダンス技術や無線による遠隔制御技術の開発を進めている。その中で一次覆工に用いる吹付け機のガイダンス技術「吹付け厚さリアルタイム計測システム」について、九州支社 福岡 201 号筑穂トンネル新設工事にて現場検証を行いながら継続的にシステムの改善を行い、確実な出来形の確保及び生産性向上に対する効果の確認と課題の抽出を行った。

本稿では、現在構築を進めている山岳トンネル無人化施工システムの概要を述べるとともに、その要素技術の一つである「吹付け厚さリアルタイム計測システム」の開発状況を報告する。

### 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. Tunnel RemOS の概要
- § 3. 吹付け厚さリアルタイム計測システム
- § 4. 現場実証結果
- § 5. 現場実証で得られた課題
- § 6. まとめ

### § 1. はじめに

我が国における高齢化に伴う労働人口の減少の流れは今後さらに加速すると予測されており、それに伴う建設就業者の減少・高齢化も着実に進行している。その中でも特に山岳トンネル工事においては、坑内の過酷な環境におい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定確保や高齢化対策が喫緊の課題となっている。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向上が不可欠であり、その方策の1つとしてICT技術やメカトロニクスを駆使した無人化（遠隔操作）・自動化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作業が必要とされ、現状では無人化・自動化技術が進んでいない。

このような背景から、当社では、山岳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システムを効果的に組み合わせる山岳トンネル工事全体の無人化・自動化を実現する山岳トンネル無人化施工システム（Tunnel RemOS：Tunnel Remote Operation System）の構築を進めている。

### § 2. Tunnel RemOS の概要

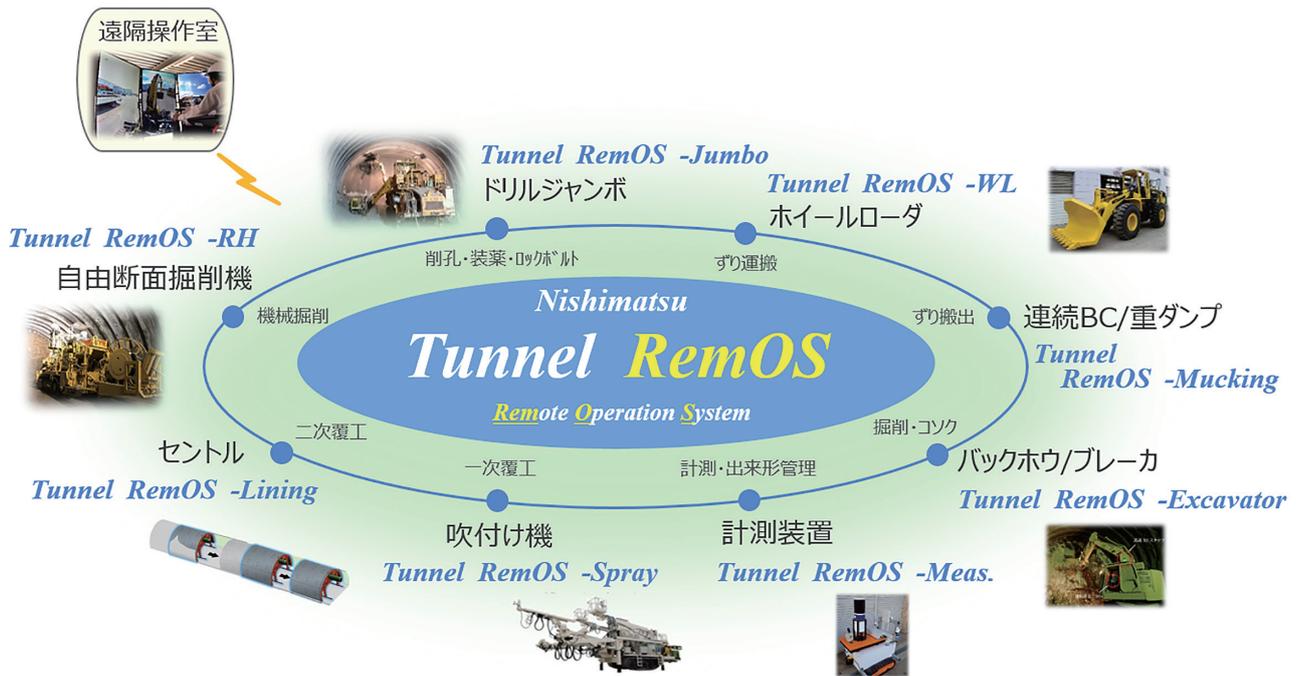
現在構築を進めている Tunnel RemOS の構成を図一1に示す。本システムは、掘削作業に使用する自由断面掘削機、ドリルジャンボや油圧ショベル、ずり運搬作業に使用されるホイールローダ、一次覆工作業に使用される吹付け機等、各作業に使用される施工機械の遠隔操作システムで構成されている。またこれらの遠隔操作システムには以下3分野の要素技術が備わっていることを基本としている。

- ① 作業場所への遠隔「機体移動（走行）」技術
- ② 作業場所における遠隔「機体動作（作業）」技術
- ③ 遠隔操作に必要な「計測・ガイダンス」技術

これらの各分野の要素技術についてはそれぞれ個別に開発を進め、完成した技術から先行して現場適用を実施

\* 技術研究所土木技術グループ

\*\* 九州（支）筑穂トンネル（出）



図一1 Tunnel RemOS (山岳トンネル無人化施工システム) の構成

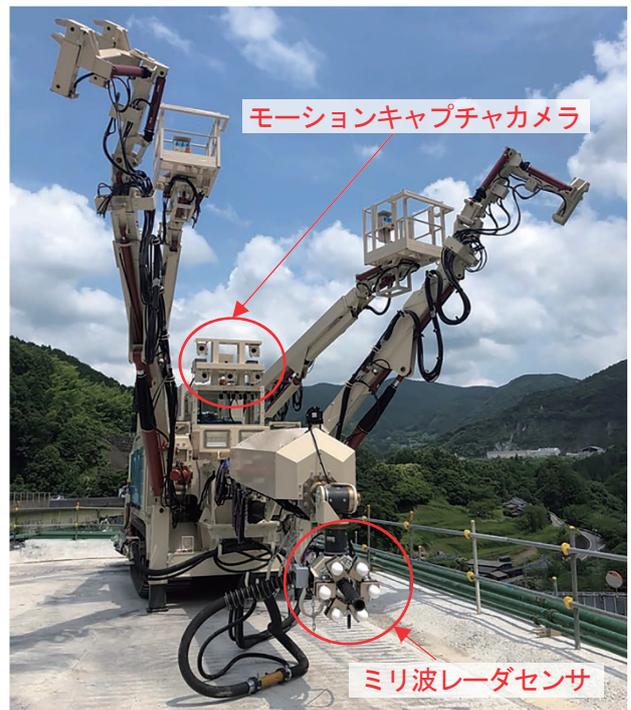
するとともに、既存技術の活用も積極的に行うことでシステム構築の迅速化を図っている。

上述の Tunnel RemOS の構成技術のひとつである吹付け機の遠隔操作システム「Tunnel RemOS-Spray」は、吹付け機の移動走行及び吹付作業を遠隔操作する「遠隔操作システム」と吹付け作業時において吹付け厚さをリアルタイムで確認する「計測・ガイダンスシステム」で構成される。本稿では、先行して開発した計測・ガイダンスシステムである「吹付け厚さリアルタイム計測システム」について報告する。

### §3. 吹付け厚さリアルタイム計測システム

本システムは、吹付け機のノズル周囲に配置したミリ波レーダを用いて、吹付け面までの距離を計測することで吹付け厚さを可視化し、リアルタイムにモニターで確認することが可能であり、写真一1に示す新型吹付け機に搭載されている。また、切羽近傍での吹付け厚さの目視確認を無くすことで作業リスクを低減し、より精度の高い出来形確保が期待できる。さらに、新たに開発したモーションキャプチャカメラシステムにより、吹付け面とのノズル距離、角度を正確に制御することでコンクリートの付着率が向上し、リバウンドの低減を図ることが可能である。

本システムは、以下の4つの計測システムとリアルタイム表示システム及び新型吹付けロボット部で構成される。



写真一1 システムを搭載した新型吹付け機

#### 3-1 吹付け機位置姿勢計測システム

ロボット車体後方3箇所に取り付けたプリズムを自動追尾式トータルステーションにより計測することで、吹付け機の位置・姿勢（モーションキャプチャカメラの位置・姿勢）を算出する。

#### 3-2 モーションキャプチャシステム

吹付け機に搭載した空間座標を高精度で計測することができるモーションキャプチャカメラ6台によって、ノ

ズル部に設置した自発光LEDマーカの中心位置を算出することで、吹付時の揺動等に起因するブームのたわみを考慮したノズルの位置をリアルタイムで計測することが可能である(図-2)。

また、モーションキャプチャカメラはトンネル作業環境における防じん・防水対策として、専用カバーで防護しIP55クラスを確保した(写真-2)。

3-3 ミリ波レーダシステム

吹付けノズル周囲に取り付けた6台のレーダセンサ(写真-3)からミリ波レーダを照射し、その反射波を捕捉してノズルから吹付け面までの距離をリアルタイムに計測する。ミリ波レーダは周波数が76.5GHz帯の高周波であるため、吹付け時の粉塵等の影響を受けにくい。

3-4 吹付けコンクリート厚さ演算システム

各計測システムで得られた情報を基に、以下のコンクリート厚さを算出する。

吹付け前：掘削完了面と目標仕上がり面をもとに必要な吹付けコンクリート厚さを3次元で算出。

吹付中：吹付けノズルの位置、吹付け方向、吹付け面までの距離をもとに現在の吹付け厚さ及び目標仕上がり面までに必要な残りの吹付け厚さを3次元で算出する(図-3)。

3-5 リアルタイム表示システム

吹付け厚さのリアルタイム表示は、吹付け面を10cm×10cmのグリッドに分けて、システムで取得した吹付け面の点群データを基に差分計算を行い、吹付け箇所の壁面を3D及び2Dのコンター図で表現している(図-4)。画面中央の3D表示部はオペレータが任意の方向から確認できるようにタッチパネル操作が可能となっている。コンター図は10Hz(1秒間に10データ)で描画しているため、オペレータが吹付け厚さを確認しながら吹付けを行うことが可能である。また、コンター図の色分けの範囲は任意に設定することが可能である。



写真-2 モーションキャプチャカメラの防じん・防水対策



写真-3 ミリ波レーダシステム

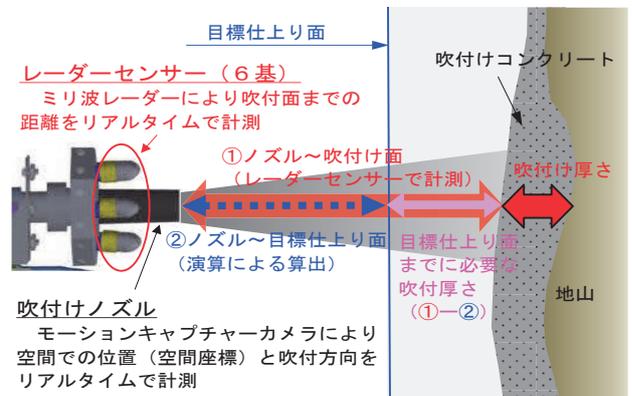


図-3 吹付け厚さ算出イメージ

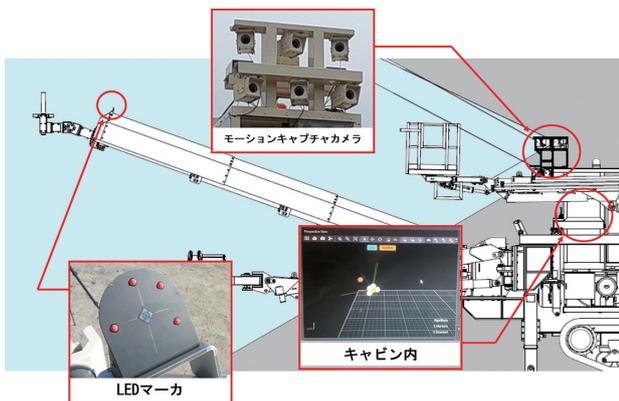


図-2 モーションキャプチャシステム概略図

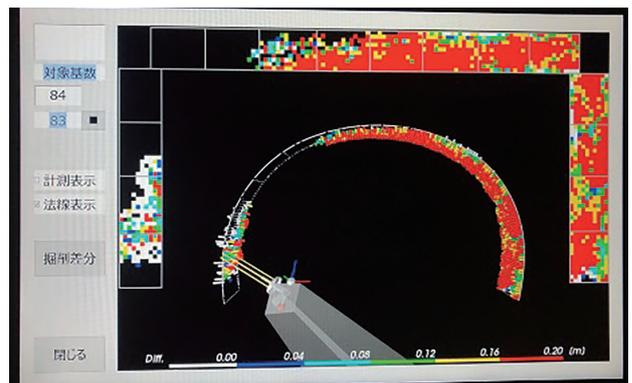


図-4 タブレット表示部

### 3-6 吹付けロボット部

3 段式伸縮ブーム (図-5) 及び回転モータ部で構成された 6 軸吹付けロボットを新たに開発した。ロボットの関節部には回転角を計測するロータリエンコーダが内蔵されている (図-6)。また、油圧シリンダ内部には伸縮計が内蔵され、エンコーダと伸縮計のデータから吹付けロボットのノズル位置及び方向をレーザ制御盤に送信し、モーションキャプチャシステムの位置データと統合している。

## §4. 現場実証結果

### 4-1 工事概要

本技術を適用した福岡 201 号筑穂トンネル新設工事は、福岡都市圏と筑豊地域を結ぶ八木山バイパス (国道 201 号) の 2 車線区間を 4 車線化することにより、交通ボトルネックを解消し、信頼性の高いネットワークを構築するとともに、対面通行区間の解消による安全・安心の確保を目的とする事業である。2019 年度から 4 車線化事業に着手し、有料道路事業と公共事業を組み合わせた整備により事業を進めており、本工事はその一環として篠栗町と飯塚市を結ぶ下り線のトンネル工事である。

工事名：福岡 201 号筑穂トンネル新設工事  
 発注者：国土交通省 九州地方整備局  
 北九州国道事務所  
 施工者：西松・奥村特定建設工事共同企業体  
 工事場所：福岡県糟屋郡篠栗町大字内住地内～福岡県飯塚市内住地内  
 工期：令和 2 年 12 月 24 日～令和 5 年 5 月 31 日  
 工事内容：工事延長 L=1311.0 m  
 トンネル工 L=1304.9 m  
 坑内付帯工 箱抜き工 58ヶ所  
                   裏面排水工 1式  
                   地下排水工 1式  
 抗門工 起点側 1式 終点側 1式  
 掘削補助工法 1式  
 道路改良工 1式

### 4-2 実証結果

吹付け厚さリアルタイム計測システムを搭載した新型吹付け機を現場に導入し (写真-4)、以下の項目について現場実証を行った。

#### (1) システムの精度

システムの計測精度検証のため、「吹付け厚さリアルタイム計測システム」を使用して吹付けを行った吹付け面に検測孔を設けて、実測と本システムで計測したデータの比較を行った。その結果、良好な計測精度を得られたが、レーダセンサが計測している吹付け面までの距離データの送信に遅延が確認されたため、吹付けノズルが大

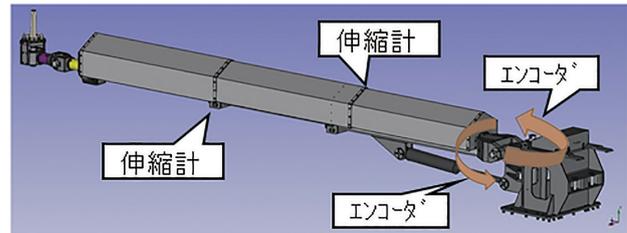


図-5 吹付けロボットブーム部

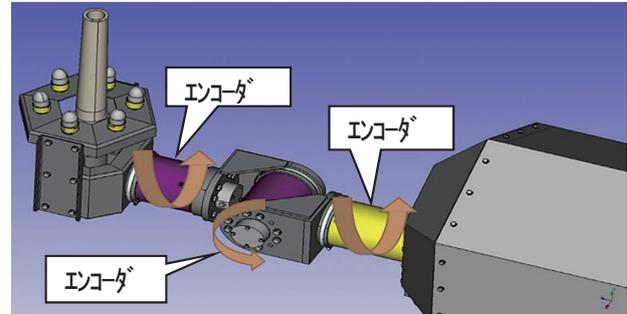


図-6 吹付けロボットノズル部



写真-4 システム現場実証状況

きくかつ素早く動く場合に計測誤差が増大する可能性があることが判明した。今後はデータ遅延の解消を行い引き続き精度検証を進めていく。

#### (2) システムの耐久性

##### ① 吹付け機位置姿勢計測システム

検証期間中の誤動作や故障は確認されなかった。しかし、システムと吹付け機本体はトンネル坑内の Wi-Fi を使用して通信を行っており、切羽までの距離 (通信距離) が 80 m 程度以上になると通信の切断がたびたび発生した。今後は指向性アンテナを使用するなどして安定した通信環境を確保する必要がある。

##### ② モーションキャプチャシステム

検証期間中に 2 台のモーションキャプチャカメラが故障し予備品と交換した。カメラは専用の防じん・防水カバーの中に収められているが、精密機械のため故障を完全に防ぐことは難しい。そのため、常に予備品を用意し迅速に交換できる体制を整えておく必要がある。

### ③ レーダシステム

検証期間中にレーダシステムの故障は確認されなかった。後述するように、コンクリートを吹付ける際にはね返り（リバウンド）の堆積により計測精度が著しく低下するが、リバウンドの堆積が無い場合は吹付け中の粉じん下においても吹付け面の計測は可能であった。

#### (3) システムの操作性

各システムの起動は、吹付け機運転席に取り付けてあるモニタ上の計測開始ボタンを押すことで自動で開始される。さらに、鋼製支保工の建て込みに使用する坑内計測システムと連動しているため、現在の支保工基数を選択することなく吹付け厚さのリアルタイム表示が可能である。

また、今回の新型吹付け機用に開発した回転モータを使用した吹付けノズルについては、従来の吹付けノズルと操作方法が異なるため最初は操作に戸惑うこともあったが、慣れることで特に問題なく吹付け作業を実施することが出来た。

## §5. 現場実証で得られた課題と対策

前述したとおり、現場検証を通じて計測精度や耐久性、操作性等について一定の成果は得られたが、現場で継続して運用するためには以下のような課題を解決する必要があるため、今後も現場での改善を行っていく。

### 5-1 吹付けコンクリートリバウンドによる堆積除去

コンクリート吹付け時、側壁から肩部にかけて吹付けを行っている間は、レーダ部分へのリバウンドの堆積はほとんど見られないが、天端部を吹付ける際にノズルが上を向くためリバウンドが堆積する（写真-5）。レーダは1cm程度のリバウンドが堆積すると吹付け面までの計測の精度が極端に低下することが確認できた。

そこで、リバウンドの堆積除去を目的として以下の対策を検証した。

#### (1) エアー及び水洗浄装置

レーダ先端に堆積するリバウンドを吹き飛ばすためのノズルを配置し、吹付け時にエアー及び水にて洗浄する装置を製作し、レーダ部に取り付けた（写真-6）。しかし、レーダ部分にノズルを配置したことで、かえってリバウンドが溜まりやすい構造となり、堆積したリバウンドの重みで吹付け作業中にノズル操作が不能になる事態となった。そのため、この装置に関しては取付けを断念した。

#### (2) 回転式レーダカバー

レーダの前面にレーダの計測を阻害しない素材で作成したカバーを配置し、さらに回転させることによってリバウンドの堆積を防ぐ装置を新たに試作した（写真-7）。現在も現場検証を継続しており、リバウンドの堆積を防止する一定の効果が得られている。



写真-5 レーダ部分へのリバウンドの堆積状況



写真-6 エアー及び水洗浄装置のリバウンドの堆積状況



写真-7 回転式レーダカバー



写真-8 粉じん堆積状況

### 5-2 モーションキャプチャシステムの耐久性

モーションキャプチャカメラは自発光 LED マーカの動きを常に2台以上のカメラでとらえる必要があるため、カメラ前面の保護カバーに粉じんが堆積すると、ノズルの位置計測の精度が低下するか、もしくは見失う恐れがある。モーションキャプチャシステムは吹付け箇所から5m程度離れているため、吹付け作業時に直接リバウンドが堆積することは無かったが、粉じんの堆積が確認された(写真-8)。モーションキャプチャカメラ前面に設置した保護カバーには粉じんの堆積を軽減するためのエア吹き出し口を設置し、システム稼働中は常時エアによる清掃を行っていたが、不十分であった。現場実証中は保護カバーを清掃しながら計測を行ったが、今後はエアの吹き出し口の配置やエア吹き出し量の調整を行う等の改善を実施する予定である。

### 5-3 リアルタイム表示の遅延

吹付けノズル部に装備したエンコーダによる回転角及びモーションキャプチャシステムによる位置は10Hz(0.1秒間隔)でほぼリアルタイムに統合されて、各レーダセンサのトンネル断面内での位置と向きが算出されている。しかし、現状ではレーダセンサから送信される距離データに遅延が確認されているため、吹付けノズルが大きく動作した場合にデータの統合がずれて、吹付面の

計測誤差として現れる恐れがある。レーダセンサの送信遅延については今後のシステム改良で解消する見込みであり、全てのデータをリアルタイムに統合させることで計測誤差の更なる抑制を図る予定である。

## §6. まとめ

今回現場検証を行った「吹付け厚さリアルタイム計測システム」については、引き続き現場で得られた課題を解決しながら、現場で常時運用可能な技術へと改善していく。それと並行して、新型吹付け機の遠隔操作システムを開発中であり、筑穂トンネルの新型吹付け機の遠隔操作を導入予定である。特に、今回の「吹付け厚さリアルタイム計測システム」は遠隔操作時のオペレータをガイダンスするための大切な要素技術であるため、より早期の実用化を目指していきたい。

なお、本システムは西松建設(株)、清水建設(株)、戸田建設(株)、前田建設工業(株)、エフティーエス(株)の5社共同開発技術である。

**謝辞.** 現場での実証にご協力を頂いている筑穂トンネル工事の関係者ならびに大勢の皆様へ心より感謝申し上げます。