

トンネル切羽高速高密度計測システム：TFS-Mapper の開発と現場検証

TFS-Mapper: Development and Field Verification of High-Speed, High-Resolution Measurement System for Tunnel Face

勝 部 峻太郎^{※1}
Shuntarou Katsube

松 田 浩 朗^{※1}
Hiroaki Matsuda

古 宮 正 勝^{※2}
Masakatsu Komiya

本 田 一 慧^{※2}
Issei Honda

平 野 定 雄^{※3}
Sadao Hirano

志 村 大 地^{※3}
Daichi Shimura

【要旨】

山岳トンネル工事においては、肌落ち災害防止対策として切羽への吹付けコンクリートの実施、また切羽の変状等の監視が行われている。従来の切羽の監視方法としては、吹付けオペレータや切羽監視責任者による目視での定性的な判断に頼っており、定量化および省力化が求められている。この課題に対し当社では、レーザ距離計を用いて切羽押出し量を多点同時監視するシステムを開発し、一定の成果を得ているものの、より高密度な監視が望まれていた。

上記課題に対し筆者らは、高速かつ高密度に3次元点群を取得可能なLiDARに着目し、切羽を面的かつリアルタイムに計測監視するシステム「TFS-Mapper」を開発した。そして、当社山岳トンネル工事現場において、鏡吹付けコンクリートの厚さ管理へ開発したシステムを適用し、その有効性および運用性を確認した。また、検証結果に基づき開発システムの製品化を進め、外販を開始した。

【キーワード】 NATM 鏡吹付けコンクリート LiDAR 面的計測

1. はじめに

山岳トンネル工事における災害の特徴として、発生頻度が高いこと、重篤度が高いこと、発生場所が切羽付近に集中していることが挙げられる¹⁾。厚生労働省が発出した切羽における災害防止ガイドライン²⁾では、肌落ち災害防止対策の一つとして鏡吹付けコンクリートの施工が有効とされており、切羽の自立が悪い場合には鏡吹付けコンクリートを原則実施するとされている。また、切羽の変状や亀裂の発生等の監視が必要とされている。従来の切羽の監視方法としては、吹付けオペレータや切羽監視責任者の目視による定性的な判断に頼っており、定量化が求められている。

当社ではこれまで、レーザ距離計を用いて切羽押出し量を多点同時監視するシステム³⁾を開発し、一定の成果を得ているものの、複数の計測点の監視に留まっており、切羽全体の面的な計測が求められていた。一方で、高密度に計測可能な3Dレーザスキャナは、計測に時間を要することから、即時性を必要とする切羽監視への適用は困難であった。

筆者らは前記課題に対して、高速かつ高密度に3次元点群を取得可能なLiDAR (Light Detection and Ranging)に着目し、切羽を面的かつリアルタイムに計測監視する

システム「TFS (Tunnel Face Smart) -Mapper」を開発した(図-1)。本稿では、鏡吹付けコンクリートの厚さ管理バージョンとして開発した本システムの概要、計測精度と適用性に関する検証、および現場検証の結果について述べる。

2. トンネル切羽高速高密度計測システム：TFS-Mapper の開発

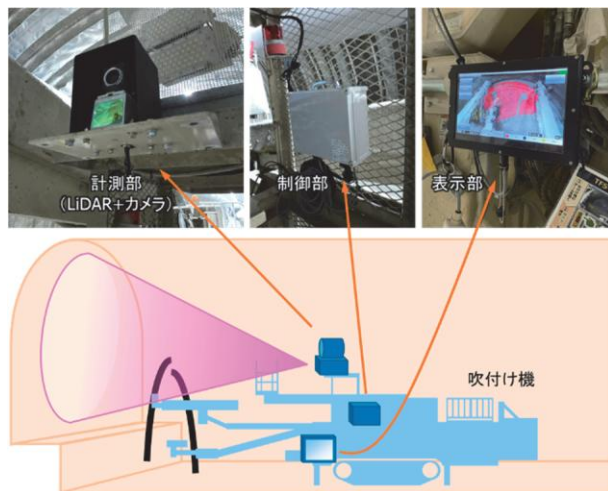


図-1 TFS-Mapperの概要

1.技術研究所 研究開発 G 生産システム研究室

2.土木本部 [名古屋] 伊那山地トンネル西作業所

3.岐阜工業株式会社

2.1 本システムの特長

- 以下に、本システムの特長を示す。
- ①切羽全面を高速かつ高密度に計測可能：
1秒間に10万点計測でき、切羽全体をリアルタイム面的に計測可能である。
 - ②切羽の押出し量や領域をリアルタイムに確認可能：
計測開始時を基準とした切羽の押出し量を高密度に計測でき、押出し量や押出し領域（面積）が確認可能である。
 - ③吹付けコンクリート厚さをリアルタイムに確認可能：
本システムでは切羽の押出しとともに、切羽全体において施工中の鏡吹付けコンクリート厚さを計測でき、確実かつ無駄のない鏡吹付けコンクリート施工が可能となる。また、鏡吹付けコンクリートの吹付け量（地山に付着したコンクリート体積）などの実績が記録可能である。

2.3 本システムの機能

本システムは、計測部であるLiDARおよびカメラ、制御部であるPC、ならびに表示部であるモニターで構成される。

(1) 計測部

採用したLiDARの諸元を表－1に示す。本製品では、視野角約70度の範囲において、毎秒10万点の3次元点群の取得を行う。

また、LiDARと同一箇所にカメラを設置し、LiDARと

表－1 採用したLiDARの諸元

レーザ光波長	905nm
視野角	70.4°（円形）
計測範囲	90m（反射率10%）
点群計測	100,000点/秒
IP等級	IP67



図－2 スイッチによるシステム操作

同等の視野角での映像取得を行う。

(2) 制御部

PCでは、LiDARによる計測点群に対し、①100mm四方を標準グリッドサイズとして、グリッドごとに切羽押出し方向の値を平均処理して計測値とし、②基準面となる初期計測値に対し、計測値が更新されるごとに初期計測値との差からヒートマップをリアルタイムに作成し、③カメラ映像に重畳表示する、という処理を行う。なお、計測値の更新間隔は任意の時間で設定でき、標準は3秒としている。また、表示色数および閾値は任意の数値を設定でき、現場状況に応じた評価および表示が可能である。

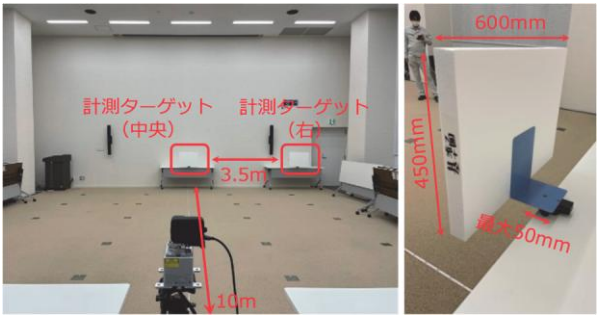
本システムの操作には、PC画面上のボタンのクリック操作のほか、図－2に示した三つのボタンからなるスイッチによる操作も可能である。それぞれ、基準面作成、計測開始、計測終了の制御を行う。

(3) 表示部

モニターでは、カメラ映像および重畳表示されるヒートマップをリアルタイムに確認可能である。また、鏡吹付け完了後に吹付けコンクリートの吹付け量を確認可能である。

3. LiDAR の計測精度および適用性に関する検証

採用したLiDARの計測精度を検証する室内実験の状況を図－3に示す。実際のトンネル切羽の規模を想定し、幅600mm・高さ450mmの発泡スチロール板を、計測ターゲットとしてLiDARから10mの距離で、LiDAR正面およびLiDAR正面より右に3.5mの位置にそれぞれ設置した。移動ステージにより10mm刻みで50mmまでLiDAR方向



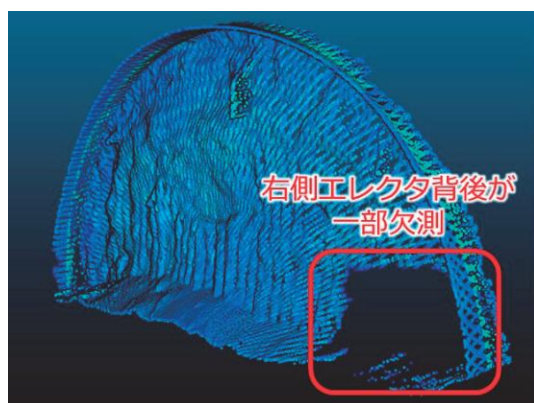
図－3 室内実験による精度検証の状況

表－2 計測ターゲット移動量に対するLiDAR計測値との差

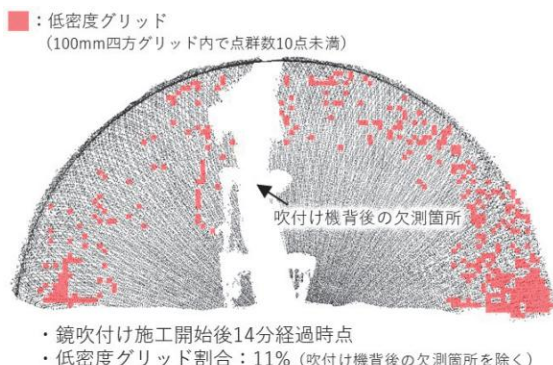
計測ターゲットの位置	計測ターゲットの変位量 (mm)				
	10	20	30	40	50
LiDAR正面	0	0	-2	-1	-1
LiDAR正面より右に3.5m	-1	-1	-1	-1	-1



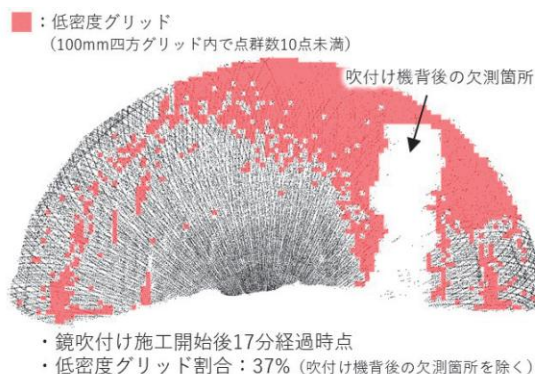
図－4 現場実験による適用性検証の状況



図－5 LiDARによる切羽計測結果の一例
(鏡吹付け施工前)



図－6 LiDARによる切羽計測結果の一例
(鏡吹付け施工中：風量 $1,500\text{m}^3/\text{min}$)



図－7 LiDARによる切羽計測結果の一例
(鏡吹付け施工中：風量 $800\text{m}^3/\text{min}$)

に発泡スチロール板を移動させ、それぞれの移動量とLiDARによる計測値とを比較した。なお、LiDAR－発泡スチロール板軸直角方向の面を 100mm 四方のグリッドで分割し、メッシュ内の計測点群のLiDAR－発泡スチロール板軸方向の値を平均し計測値とした。移動量に対するLiDAR計測値との差を表－2に示す。表より、差は最大でも 2mm であり、切羽の計測・監視において mm 単位の計測精度を有することがわかる。また、LiDAR正面だけでなく切羽全面を計測可能であることがわかる。

次に、トンネル坑内での適用性を検証する目的で、実際のトンネル工事の切羽において現場実験を実施した。実験状況を図－4に示す。実験では、LiDARを吹付け機の運転席に設置し、切羽を計測した。なお、LiDARと切羽の距離は約 10m である。

鏡吹付け施工前の切羽の計測結果の一例を図－5に示す。本計測結果の計測時間は3秒で、計測点群数は約 $300,000$ 点である。図より、吹付け機のエレクトラ背後の点群が一部欠測しているものの、地山を対象とした計測についても高密度の点群が取得でき、詳細な切羽形状が把握可能であることがわかる。

鏡吹付け施工中の切羽の計測結果の一例を図－6、および図－7に示す。送風機の通常風量 $1,500\text{m}^3/\text{min}$ のもと計測を行ったところ、切羽面に対する低密度グリッド（ 100mm 四方グリッド内で点群数10点未満）の割合は11%となった。比較検証として、風量を $800\text{m}^3/\text{min}$ と通常時の半分程度まで下げて計測を行ったところ、低密度グリッドの割合は37%となった。このことから、粉じんによるレーザ光散乱の影響があっても、通常風量であれば鏡吹付け施工中に切羽の高密度計測が可能であることがわかる。

以上の検証実験により、採用したLiDARの計測精度およびトンネル坑内での適用性を確認した。

4. 現場検証

4.1 検証概要

鏡吹付けコンクリートの厚さ管理へ本システムを適用した際の有効性および運用性を確認するため、中央新幹線伊那山地トンネル新設（戸中・壬生沢工区）（発注者：東海旅客鉄道株式会社）において、2024年4月～11月の期間で現場検証を行った。

本工事は、本坑トンネル約 6.6km 、非常口トンネル（戸中）約 1.0km 、発破掘削方式の山岳トンネル工事である。トンネル全区間で鏡吹付けコンクリートを行っており、クリアショット工法を採用して低粉じん、低リバウンドな吹付けコンクリートの施工を可能としている。

検証における機器構成を図－8に示す。計測部の設置位置は運転席上部、制御部の設置位置は運転席内、モニタの設置位置は前方左のアウトリガ付近とした。吹付け

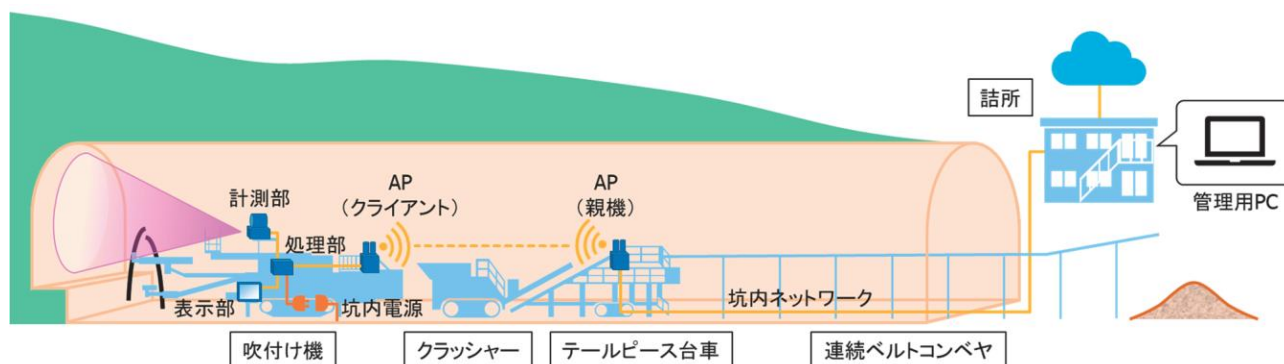


図-8 現場検証における機器構成



図-9 アクセスポイント設置状況

（左：吹付け機、右：テールピース台車）

機のエンジン始動と同時に本システムも起動し、切羽到着時に迅速に計測が開始できるため、施工サイクルを阻害することはない。また、切羽到着後には吹付け機を坑内電源に接続するので、本システムの電源も切り替わったのち継続して計測を行う。

また、図-9に示すように、吹付け機後方およびテールピース台車にそれぞれアクセスポイント（AP）を設置し、この間で無線通信を行うことで、本システムを坑内ネットワークに接続可能とした。これにより、現場内の詰所に設置した管理用PCに実績データを共有できるため、データ取得のための切羽への移動が不要となり、職員の施工管理に要する労力を削減できる。

4.2 検証結果

吹付け厚さの表示状況を図-10に示す。ここでは、吹付け厚さを赤、青、黄の順で段彩表示している。吹付け



図-11 吹付けオペレータによるモニタ確認

作業により粉じんが発生する状況であっても欠測やノイズは見られず、吹付け厚さをリアルタイムに評価・表示でき、また日々の施工サイクルの中で連続的に運用することが可能であった。吹付けオペレータは、図-11に示すモニタを施工中に確認することで、現時点での吹付け状況を視覚的に把握できた。これらのことから、本システムの適用により、手戻りのない確実な吹付けコンクリートの施工が可能となり、山岳トンネル工事の安全性向上に有効であることが確認できた。

また、吹付け量などの施工記録および管理用PCへの自動共有により、鏡吹付けコンクリートのような仮設構造物の実績の保存およびトレーサビリティの確保にも有効であることが確認できた。

5. まとめ

山岳トンネル工事における切羽の計測監視の定量化、

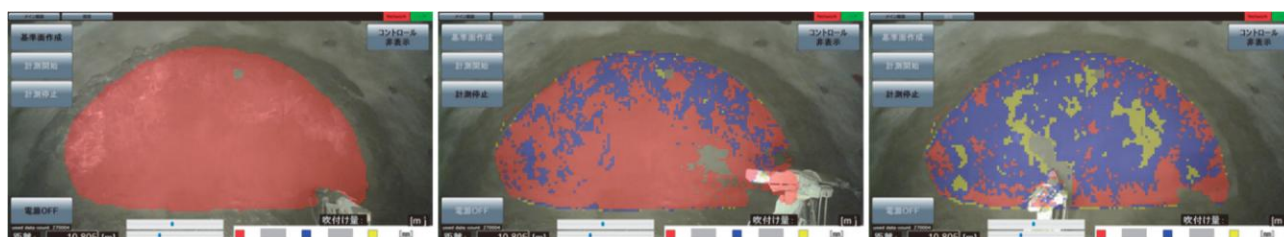


図-10 現場検証における吹付け厚さのリアルタイム表示の状況

（左：吹付け開始時点、中央：吹付け開始25分経過時点、右：吹付け開始35分経過時点）

省力化を目的として、トンネル切羽高速高密度計測システム：TFS-Mapper を開発した。開発システムについて、山岳トンネル工事現場において検証を行い、鏡吹付けコンクリートの厚さ管理へ適用した際の有効性および運用性を確認した。なお、本検証に基づき本システムの製品化を進め、NETIS登録（登録番号：KK-250013-A）を行い、外販を開始した。

本システムについては、現場展開、機能改善などを進めていくとともに、切羽押し出し監視など適用範囲を拡大していく予定である。

また本工事では、掘削を進めていた品川方において、2025年5月に隣接する坂島工区と貫通した。早期完成を目指し、引き続き安全施工を進めていく所存である。

謝辞：TFS-Mapper の開発にあたり、東海旅客鉄道株式会社、株式会社アクティオおよび株式会社コンテンツ・クリエイトより多大な協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 吉川直孝, 伊藤和也, 堀智仁, 玉手聡, 豊澤康男：トンネル切羽の肌落ちによる死傷災害の調査分析と安定対策の検討, 土木学会論文集 F6 (安全問題), Vol.67, No.2, I_125-I_130, 2011.
- 2) 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, 2024.3.26.
- 3) 寺島佳宏, 小川 勲, 熊谷幸樹, 松田浩朗, 檜岡民幸：多点同時変位計測による切羽安全監視システムの開発と不良地山における試験適用, 土木学会トンネル工学報告集, pp.219-225, No.20, 2010.11.

Summary In mountain tunnel construction, shotcreting for sealing tunnel face is used as one of the measures to prevent fall of rocks, and deformation and cracking of the face are monitored. The conventional methods for measuring and monitoring the tunnel face are performed visually by the spraying operator or the supervisor of face monitoring, and quantification and labor saving are required. To address this issue, we have developed the tunnel face measurement and monitoring system using multi laser distance meters, but it is limited to measuring and monitoring multiple measurement points, and there is a need for area measurement of the entire tunnel face. To address the above issue, we focused on LiDAR, which can acquire 3D point clouds at high speed and high density, and developed the "TFS-Mapper" system, which measures and monitors the tunnel face in real time and planarly. We then confirmed the effectiveness and operability of the developed system when applied for measurement shotcreting for sealing tunnel face at our mountain tunnel construction site. Based on the verification results, we also proceeded with commercializing the developed system and started selling externally.

Key Words : NATM, LiDAR, Face Sealing Shotcrete, Area Measurement