

掘削具合の可視化技術「SP-MAPS」を トンネル切羽に適用

掘削すべき“アタリ”箇所がプロジェクションマッピングで一目瞭然

邊 見 涼

山岳トンネル工事における発破掘削では、掘削仕上げとして、ずり出し後にブレイカーを用いて覆背面あるいは掘削内空断面に干渉する地山を除去するアタリ取り作業を行う。従来のアタリ取り作業では、掘削直後の不安定な切羽直近での目視による確認作業が発生するため、より安全な確認方法が求められていた。また、定量的な管理方法の開発も求められていた。本稿では、3D レーザースキャニング技術とプロジェクションマッピング技術をアタリ取り作業に活用した切羽版 SP-MAPS について紹介する。本システムはスキャナを用いて計測したトンネル掘削形状と設計形状の比較結果を基に、掘削の過不足量に応じて色分けしたマッピング画像を作成し、掘削素掘り面に照射することで、アタリ箇所を可視化する技術である。

キーワード：山岳トンネル，アタリ取り，プロジェクションマッピング，3D レーザースキャナ，切羽

1. はじめに

山岳トンネル工事における発破掘削工法では、発破実施後に、トンネルの設計掘削線の内側に残留した地山（アタリ）をブレイカー等で掘削し、設計掘削形状を満たすように地山を整形するアタリ取り作業を行う。従来のアタリ取り作業では、ずり出し完了後に、作業員が目視でトンネル切羽の素掘り面の掘削状況を確認し、アタリと思われる箇所をレーザーポインターにより重機オペレータに明示することが一般的である。しかし、このような方法では切羽からの肌落ちが発生した場合に作業員が巻き込まれる危険性があるなど、災害の発生リスクを十分に下げることができなかった。また、厚生労働省は山岳トンネル工事の切羽でたびたび発生する肌落ち災害の重篤度の高さから、平成 30 年に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改正し、肌落ち災害の防止を図るために肌落ちが発生する切羽への立入を原則として禁止し、切羽に立ち入る機会を減らすために切羽における作業は可能な限り機械等で行うよう求めている¹⁾。そのため、アタリ取り作業においても作業員が切羽に立ち入る必要のないよう、目視に代わる管理方法が求められていた。

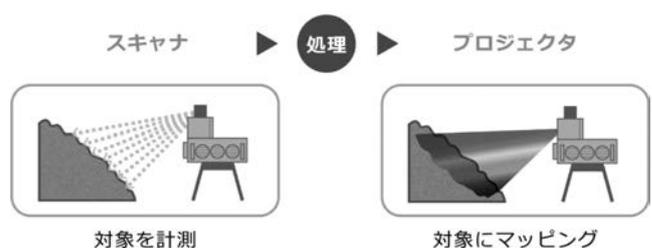
一方で、この従来のアタリ取り作業では、掘削の出来形を目視のみで確認することとなるため、その精度は作業員の経験や感覚に依存し、定量的に掘削出来形

を把握することが困難である。そのため、アタリ取り作業の繰返しによるサイクルタイムの増加や余掘りの発生に伴う吹付けコンクリート量の増加にもつながるため、効率的に余掘り量を低減する手法の開発も求められた。

上述のようなアタリ取り作業時の課題を背景にして、山岳トンネルの掘削出来形管理時の安全性、生産性向上を目的に、3D レーザースキャニング技術とプロジェクションマッピング技術を活用した計測照射システム切羽版 SP-MAPS を開発した²⁾。

2. 切羽版 SP-MAPS の概要

SP-MAPS[®]「Scanning and Projection MAPing System」(以下、本システム)とは、3D レーザースキャナ(以下、スキャナ)で対象の形状を計測し、パソコンで処理した計画掘削ラインとの差異をプロジェクタで対象に照射して見える化するシステムである(図一



図一 計測照射システムの概要

1)。これまで山岳トンネルのインバート掘削工事、ニューマチックケーソン工事に適用されてきた^{3), 4)}。

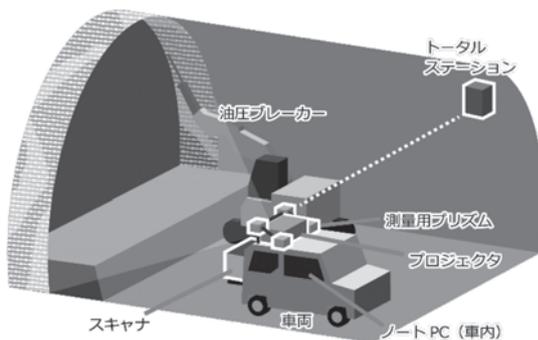
切羽版システムは、これまでの技術を山岳トンネル工事のあたり取り作業に展開し、スキャナを用いて計測したトンネル掘削形状と設計形状の比較結果を基に、掘削の過不足量に応じて色分けしたマッピング画像を作成し、掘削素掘り面に照射することで、あたり箇所を可視化する技術である。

(1) 機器構成

図—2に切羽版システムを構成する機器、図—3にシステム使用時の配置図を示す。本システムは、スキャナ、プロジェクタ、測量用のプリズム、ノートPC、測量機器(トータルステーション)から構成され、重機の往来の激しい切羽近傍において、掘削サイクルに極力影響を与えることなくシステムを運用するために、短時間での計測、照射を行うことが課題であった。そのため、トータルステーション以外の機器を車両に搭載することで機動性を確保した。また、一度に広範囲を照射し、かつ照射した画像の視認性を確保するために、プロジェクションマッピング用のプロジェクタ



図—2 切羽版システムの構成機器



使用時の配置イメージ

図—3 システム使用時の配置図

は高輝度 (15,000 lm) のものを採用し、単焦点レンズを取り付けている。施工中の坑内で使用するため、プロジェクタは防塵・防滴仕様の保護容器に格納した。

(2) 開発への取り組み

(a) 機器の改良

切羽版システムの開発にあたって、開発初期の機器構成ではプロジェクタに電力を供給する際に、外部電源を使用していたため、計測時には都度接続が必要となり、手間と時間を要していた。そこで、大容量のバッテリーを車内に設置し、計測から照射に至る一連の作業を格段に効率化した。

(b) 専用ソフトの開発

切羽版システムでは点群の分析や照射画像の作成において、システムを導入する現場ごとにトンネルの設計データ (トンネルの線形座標、計画掘削断面形状) の作成や変更を行う必要がある。当初は、専門技術者が手作業でトンネルの設計データの作成、更新を行っており、この作業に約3時間を要していた。この問題を解決するために、山岳トンネル工事の測量・計測データの収集・管理を行う施工管理システムと連携させ、線形データや断面形状情報の更新を簡易に行う線形・支保データ書き込みソフトを開発した (図—4)。このソフトにより、トンネルの設計データの作成や更新に要する時間が約1分まで短縮した。また、ファイルの出力にはボタンを1個押下すれば良いため、切羽版システムを使用する現場の関係者がトンネルの設計データを作成、更新できるようになった。

(3) 現場での使用時の流れ

切羽版システムの現場での使用時のフローを図—5に示す。

- ① ずり出し後、機器を搭載した計測用車両を切羽近傍に配置する。
- ② 車内に設置したノート PC の操作により、車両上部



図—4 線形・支保データ書き込みソフトの画面

に取り付けた4個のプリズムのうち、3個をトータルステーションによって測量することで、車両の自己位置を特定し、計測用・照射装置の基準点座標を取得する。

- ③車両後方に設置したスキャナの計測により、切羽の掘削素掘り面の形状データ（点群データ）を取得する。
- ④ノートPCで測量結果をもとに点群データの座標変換、掘削の計画掘削断面のデータと点群の比較が行われ、計画面からの距離に応じた色の情報が点群データに付与される。その後、色情報が付与された点群とプリズムの測量結果から、アタリ取りが必要な箇所を示すカラーコンター画像を作成される。
- ⑤高輝度プロジェクタにより、アタリ取りが必要な箇所を示す画像が切羽の掘削面に照射される。画像はマゼンタ、緑、青の3色で構成されており、マゼンタは掘削が必要な箇所、緑と青は計画掘削断面に対して内空が確保されている箇所（緑：余掘り量小、青：余掘り量大）を意味する。
- ⑥照射された画像をもとに、油圧ブレイカーのオペレータはアタリと判定されたマゼンタ色の地山を油圧ブレイカーで掘削する。
- ⑦再び③、④、⑤の作業を行い、マゼンタが照射されていた地山が緑もしくは青に変わればアタリ取り作業を終了し、計測用車両を撤収する。

フロー②でノートPCによりシステムの開始ボタンを押下後、車両上部のプリズムの測量から素掘り面のスキャンを経て、画像の照射までは自動で行われ、所要時間は約50秒である。また、アタリ取り作業が進み照射する画像を更新する際に、車両の位置を移動させていない場合は、トータルステーションによるプリズムの測量を省略できるため、約30秒で画像の自動更新および照射を行うことができる。そのため、作業員は掘削面に照射された画像から、掘削の過不足量を

連続的に視認しながら、仕上げ掘削を行うことができる。

3. 現場適用と成果

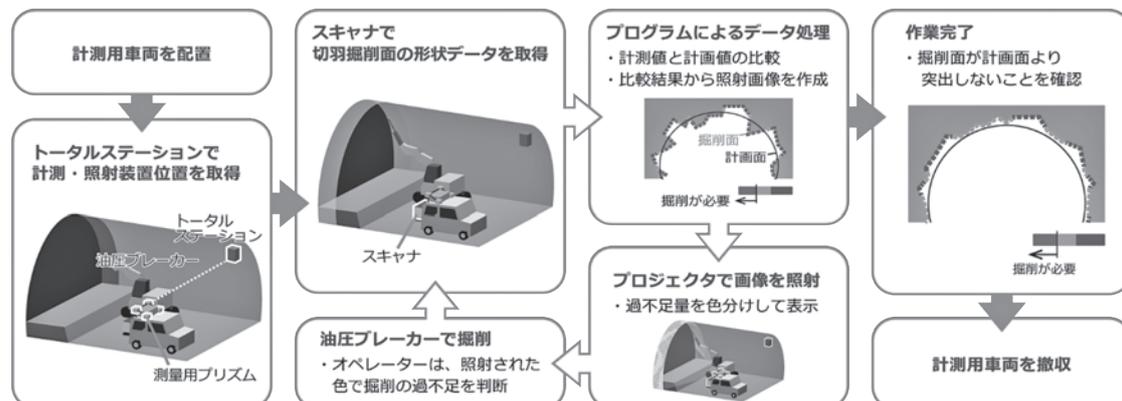
(1) 適用事例

これまでに、切羽版本システムを三遠南信自動車道三遠道路2号トンネル工事と東海北陸自動車道真木トンネル工事に適用した。本稿では真木トンネル工事での適用事例について述べる。

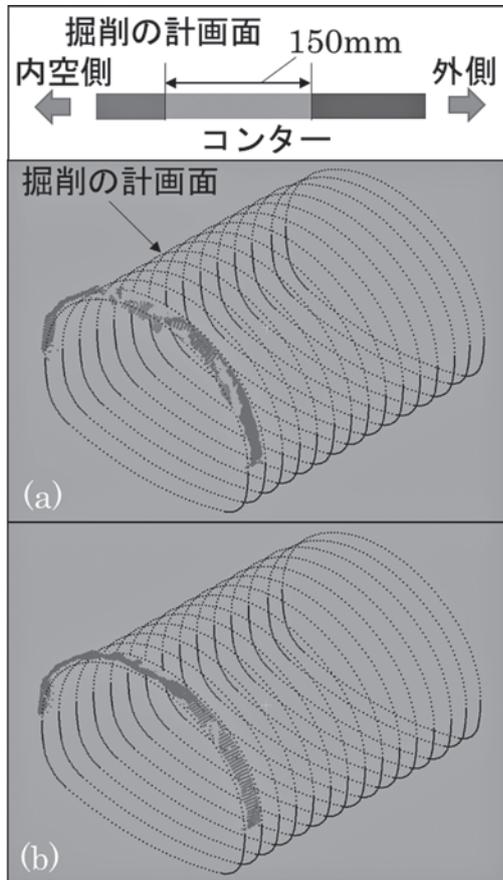
東海北陸自動車道真木トンネルは富山県南砺市に位置し、トンネル延長1,578m、掘削断面積77m²の2車線高速道路の2期線トンネルである。地質は主に濃飛流紋岩類の流紋岩および流紋岩質凝灰岩が主体であり、部分的に安山岩が貫入している。設計時の地山等級はCⅠとCⅡが大部分を占めていたが、切羽評価の結果、DⅠが主体である。切羽では140L/minの湧水を伴う天端崩落も発生しており、切羽近傍での作業を極力減らす工夫が求められていた。

(2) 成果

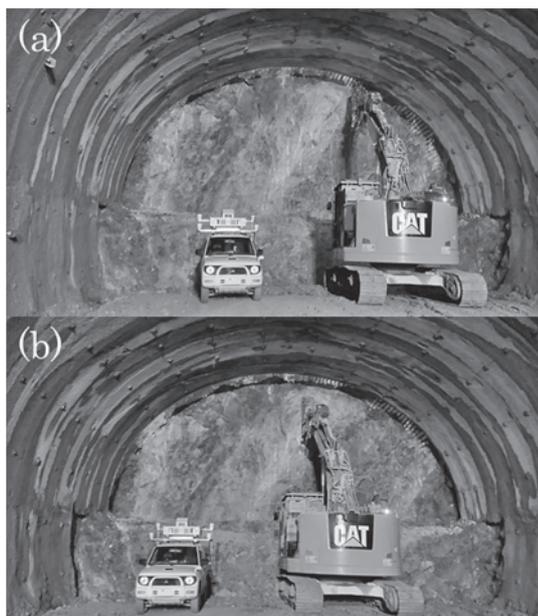
図—6に掘削の過不足の判定後の点群、図—7に真木トンネル工事での切羽版本システムの使用状況を示す。現場適用の結果、画像の照射により作業員による明示がなくとも重機オペレータにアタリ箇所を伝達できた。そのため、アタリ取り作業時に掘削状態を確認する作業員が不要になったことで、作業員が切羽内に立ち入る作業を1日あたり約2時間（1名×30分×4回）削減することができ、切羽での肌落ち災害防止に寄与することができた。また、出来形確認作業の効率化に伴い、不安定な素掘り面の露出時間が減り（標準サイクルタイム25分⁵⁾から8分短縮、約32%削減）、早期にトンネルの安定を図ることができた。さらに、アタリ取りが必要な箇所を正確に掘削することが可能



となったため、余掘り量が減り（従来比17%低減）、ずりの搬出量や打設するコンクリート量を削減した。システムの適用により、安全性と生産性の両面から大きな効果を得ることができた。



図一六 掘削の過不足の判定後の点群
(a: アタリ取り前, b: アタリ取り後)



図一七 本システムの使用状況
(a: アタリ取り前, b: アタリ取り後)

(3) 今後の課題

切羽版本システムは機器を車両に搭載したことで重機の往来の激しい切羽近傍において短時間での計測、照射が可能となった。しかし、現状のシステム構成では車両を切羽に近づける際に人が運転する必要がある。また、システム操作は車両に搭載したノート PC によって行うため、計測開始時まで人が車両近くに留まる必要がある。そのため、車両を遠隔操作可能なロボットへ置換することや、ノート PC の操作を遠隔で行うなどの改良を進めている。

また、システム運用時には車両を切羽近傍に固定させるため、車両との干渉を防ぐため、ブレーカーの作業範囲が制限される場合もある。システムの小型化、またはブレーカーの作業に影響がない位置から照射ができるようなシステムの開発を進めていく。

さらに、今後の展望として、切羽版本システムは平滑なトンネル内空断面形成に寄与することが確認できたため覆工背面の吹付け面の平滑化にも適用可能であると考え、切羽版本システムを吹付け面の平滑性の判定に応用した技術の開発にも着手している。

4. おわりに

本稿では、山岳トンネル工事のアタリ取り作業に3D レーザースキャニング技術とプロジェクションマッピング技術を活用した計測照射システム「切羽版 SP-MAPS」の概要と現場適用による効果について紹介した。本システムの導入により、切羽直下での作業員の目視確認作業を不要にし、余掘り量を削減するなど、安全性と生産性の両面から大きな効果を得ることができた。

現在、山岳トンネル工事では、引続き重篤災害発生率の下げ止まりや、人手不足や熟練技能労働者の離職による生産性の低下が課題となっている。本システムを改良しつつ、水平展開を進め、山岳トンネル工事全体の安全性・生産性のさらなる向上に努めていく所存である。

最後に、切羽版 SP-MAPS の開発にあたり現場における検証にご協力いただきました発注者の皆様をはじめ、関係者各位に厚く御礼申し上げます。

JCMA

《参考文献》

- 1) 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について、p.3, 2018.
- 2) 田中頼之、他：プロジェクションマッピングを活用した掘削仕上げ可視化システムの開発、土木学会第77回年次学術講演会、VI -922, 2022.

- 3) 青野泰久, 他: 3D スキャナとプロジェクションマッピング技術を組み合わせたトンネルの掘削管理, 地盤工学会誌, Vol.68, No.1, pp.28-31, 2019.
- 4) 石川七恵, 西川泰司, 石井洋一, 遠藤和雄, 橋本喜祐: ニューマチックケーソン掘残し部の可視化技術, 土木学会第76回年次学術講演会, 2021.
- 5) 土木工事積算基準令和4年度版 第19編 トンネル工 9. 爆破掘削方式 (補助ベンチ付き全断面掘削工法), pp.19-12.



[筆者紹介]

邊見 涼 (へんみ りょう)

清水建設株

土木技術本部 地下空間統括部 トンネル設計グループ

