

# 3D レーザースキャナと VR を用いた 新しい切羽観察手法の開発及びその検証

T-KIRIHA VR®の開発

小島 萌\*<sup>1</sup>・宮永 隼太郎\*<sup>1</sup>・坂井 一雄\*<sup>1</sup>・山上 順民\*<sup>1</sup>

Keywords : mountain tunnel, face observation, VR, 3D laser scanner  
山岳トンネル, 切羽観察, VR, 3D レーザースキャナ

## 1. はじめに

山岳トンネルの施工時において、掘削後の素掘り面（切羽）を観察し、岩種、地質構造、硬さ、割れ目の方向・傾度、湧水などの地山情報を把握する。これらの地山情報は、切羽近傍での岩塊崩落による災害（肌落ち災害）の防止<sup>1)</sup>、地山に施される支保工（吹付けコンクリート厚さやロックボルト長さ・間隔）の選定、施工後に発生した変状に対する対策工の検討などに適用され、安全かつ経済的にトンネルを構築する上で非常に重要である。これまで切羽観察は、施工現場の観察担当者によって行われて来たが、以下に示す通り、主に精度と情報共有の観点において課題があった。

一つ目は、近接観察と計測ができないという点である。切羽は掘削直後の不安定な地山が露出しており、肌落ち災害の危険性が高い。このため、観察時に切羽直下に立ち入ることは原則禁止されており、直接地山に触れて地質調査する事はできない。

二つ目は、現場で取得される切羽写真では奥行き情報が不明な点である。通常、切羽観察記録には切羽写真が用いられるが、写真を利用する際は平面情報である上に、素掘りの側壁面が照明の影で不明瞭になっている場合も多いため、割れ目面などの地質構造においてどのような入射方向を示すのか判別がつかないケースがある（図-1）。また、掘削面の凹凸が分からず、オーバーハング形状も判別できない。

三つ目は、遠隔地の地質専門家に評価を依頼する場合に、情報共有することが困難な点である。当社の山岳トンネル現場は全国に点在するが、地質技術者が常駐していることは稀であるため、出張して切羽確認を

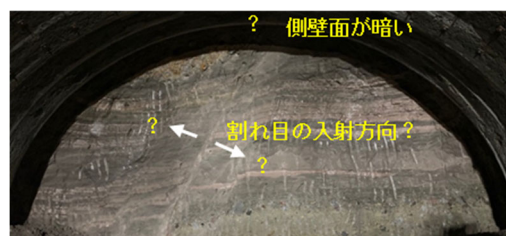
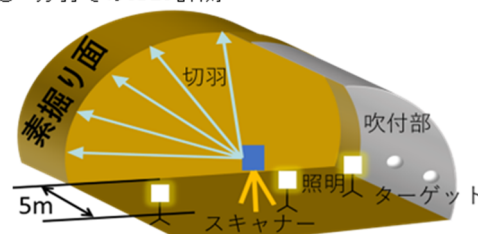


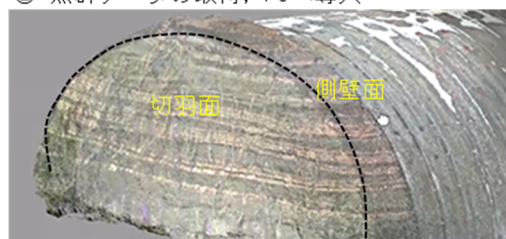
図-1 写真による切羽観察の課題

Fig.1 Issues in geological face observation on obscure photographs

### ① 切羽での3DLS計測



### ② 点群データの取得, PCへ導入



### ③ 専用機材にてVR観察

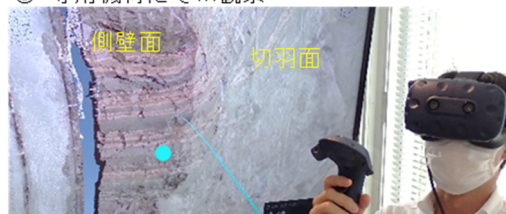



図-2 切羽観察システム「T-KIRIHA VR」の概要

Fig.2 Concept of “T-KIRIHA VR” system utilized for tunnel face observation

\* 1 技術センター 社会基盤技術研究部 地盤研究室

(a)		(b)	
外観		解像度	スキャン時間(*)
測定レート	最大100万点/秒	0.6mm	83.0分
解像度 (点間距離@10m)	0.6mm (細密)	1.6mm	13.3分
3次元位置精度	1mm+10ppm/m	3.1mm	6.6分
測角精度	14"	6.3mm	3.3分
カメラ	80Mpx (パノラマ) HDR	12.6mm	1.6分
重量	7.5kg	25.1mm	49秒
寸法	H 328 * W 258 mm	50.3mm	24秒

\* 写真撮影時間は含まない

表-1 計測に用いた 3DLS (Z+F Imager5016) の仕様  
 (a) 諸元 (b) 解像度とスキャン時間  
 Table 1 Specification of Z+F Imager 5016  
 (a)Specifications (b)The relation between point cloud resolution and scanning time

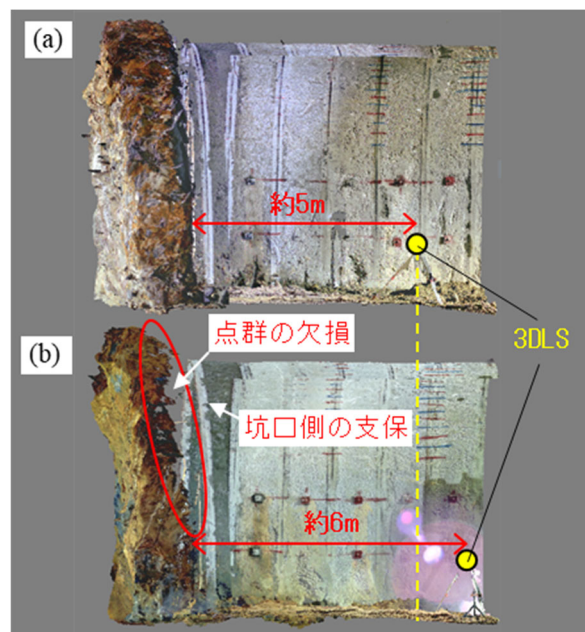


図-3 3DLS 設置位置による側壁面の取得点群の領域差  
 (a : 切羽から約 5m, b : 切羽から約 6m)  
 Fig.3 Differences in acquired ranges of 3D point clouds by the installed positions of the 3DLS  
 (a; 5m, b; 6m approximately from the face)

行う事を仮定すると、移動に時間と労力が必要となる。

これらの課題を解決するために、筆者らはデジタル化した新たな切羽観察システム「T-KIRIHA VR」を開発している。これは 3D レーザースキャナ（以下、3DLS）で計測した切羽点群データを仮想現実（以下、VR）で観察・計測するものである（図-2）。本論では、T-KIRIHA VR の仕様、3DLS 計測と観察および計測手法を説明し、切羽での適用結果を報告する。

## 2. T-KIRIHA VR のシステム概要と計測手法

### 2.1 システム概要

T-KIRIHA VR における切羽観察の手順は以下の流れである（図-2）。①トンネル掘削中の切羽が露出した際に切羽を 3DLS で計測する、② ①で得られた 3D 点群データを PC にインストールする、③ヘッドマウントディスプレイとコントローラからなる VR 機材にて点群からなる切羽映像を観察する。

次節に、使用する計測機器と観察手法の詳細を記す。

### 2.2 計測機器

一般に、露岩の点群データや色情報の取得には、写真測量法や LiDAR 計測が用いられる<sup>2)</sup>。今回は LiDAR 機器のうち、地上型レーザースキャナである 3DLS を用いた。この理由は主に、設置や計測、点群処理の手法

が簡便で短時間での計測が可能であること、取得された点群の反射強度値が地質の岩相区分にも応用できるという利点があるからである。本論文では、3DLS は Z+F 社製の Imager 5016<sup>3)</sup>を選定した（表-1a）。本機種は、点群の座標位置精度が 10m 先で誤差 1mm 以下と他社製品よりも非常に高精度で取得できる特徴がある。また、取得する点群の 10m 先での点間距離（解像度）を任意で設定できるが、高解像度のものほど計測には時間を要する（表-1b）。

3DLS 計測の際は、切羽を 2~4 台のカメラ用 LED 照明 Godox ML60（60W）で照らす事により照度を確保した。加えて点群データに絶対座標を付与するため、3DLS 用ターゲット<sup>4)</sup>を併用した。

3DLS 計測後の点群処理には、Z+F LaserControl Scout<sup>5)</sup>アプリケーションを用いた。また点群のトリミングなどの追加処理は OPT Cloud Survey<sup>6)</sup>にて実施した。


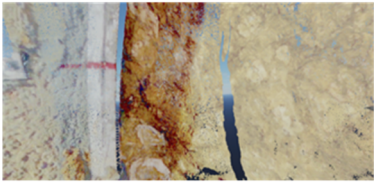






点群の VR 観察には、PC（DELL Precision7560）に VR 機器（HTC VIVE PRO）を接続し、PC にインストールした専用アプリケーション OctCloud VR<sup>7)</sup>を用いる事により点群表示を行った。

### 2.3 計測と観察手法

切羽での 3DLS 計測の手順は以下の通りである。3DLS の設置位置は安全に配慮して切羽から最低 5m 以

表-2 点群の点間距離@10m (解像度) と VR 表示の関係

Table 2 Relation between the resolution and display in VR for 3D point clouds of the faces

点間距離@10m (データ容量)	全景	評価	近接	評価
3.1mm (3.8GB: PTX形式)	 PC描画処理軽減のため疎に表示 (赤丸部)	△	 非常に良好に観察可	◎
6.3mm (0.9GB: PTX形式)	 良好だが、一部疎に見える (赤丸部)	○	 良好に観察可	○
12.6mm (0.2GB: PTX形式)	 非常に良好に観察可	◎	 疎に見える	△
25.1mm (0.1GB: PTX形式)	 一部、疎に見える	△	 疎で詳細観察には不適當	×

上の離隔をとったトンネル中央に配置した (図-2①, 図-3a)。ただし、設置位置は、3DLS のレーザーが坑口側の支保に当たって点群に欠損が生じる (図-3b) ことのないよう、可能な限り切羽に近付けて設置するのが望ましい。3DLS の解像度は、Imager 5016 において 3.1, 6.3, 12.6, 25.1mm をそれぞれ比較し、VR 上で切羽全景と近接の点群表示が共に極端に疎にならず、最も過不足なく観察可能であった 6.3 mm が切羽計測には適していた (表-2)。解像度 6.3 mm で計測した場合、一つの切羽での計測作業は、照明設置から計測完了まで約 9 分間であった (表-3①～③)。

3DLS 計測後、VR で観察可能なように点群データに関して PC を用いる事により処理した。まず、点群処理アプリケーションにて各点に絶対座標と色情報を付与し、これを点群として PTX 形式にて出力した。次に、点群データの容量を縮小するため観察に不要な範囲を OPT Cloud Survey にてトリミングし、VR アプリケーション OctCloud VR 専用の OCT 形式に変換した。最後に、これを OctCloud VR で読み込んだ。これらの PC 処理には、平均でおよそ 30 分間を要した (表-3④～⑧)。

表-3 3DLS 計測から VR 観察までの手順

Table 3 Face observation procedures with “T-KIRIHA VR”

工程	作業内容	データ容量	所要時間	切羽作業
①	照明設置 (2~4個)	-	1分	○
②	3DLS設置	-	2分	○
③	3DLS計測	-	6分	○
④	点群データ処理 (PCへ取り込み、着色)	-	10分	-
⑤	点群データ処理 (PTX形式での出力)	1.9GB	5分	-
⑥	点群データ処理 (不要箇所トリミング)	0.9GB	10分	-
⑦	点群データ処理 (VR専用OCT形式へ変換)	0.3GB	1分	-
⑧	VRソフト (OctCloud VR) での読み込み	-	5分	-
⑨	VR観察	-	-	-
-	-	合計	40分	-

3DLS計測を解像度6.3mmで実施した場合の計測時間とデータ容量

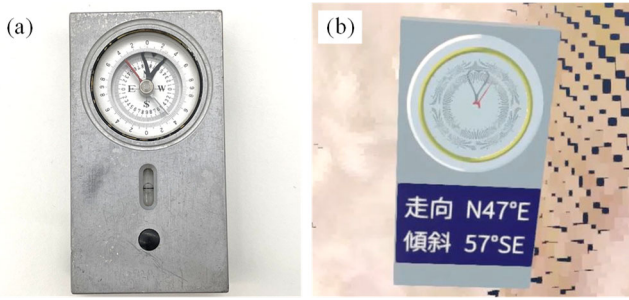


図-4 実際のクリノメーター(a)と VR クリノメーター(b)  
Fig.4 Geological compass used for strike and dip measurements (a; Conventional, b; VR)

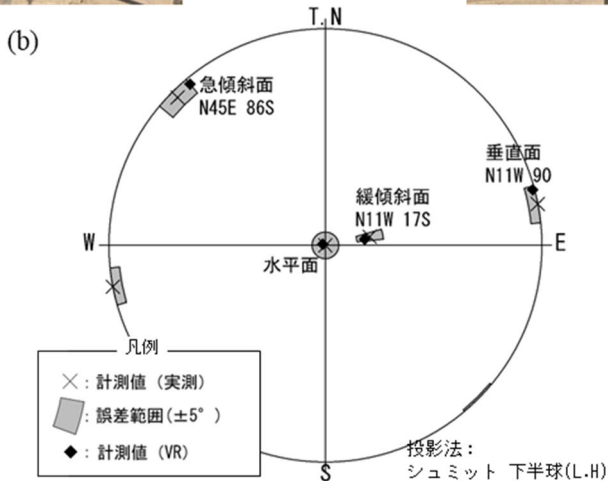
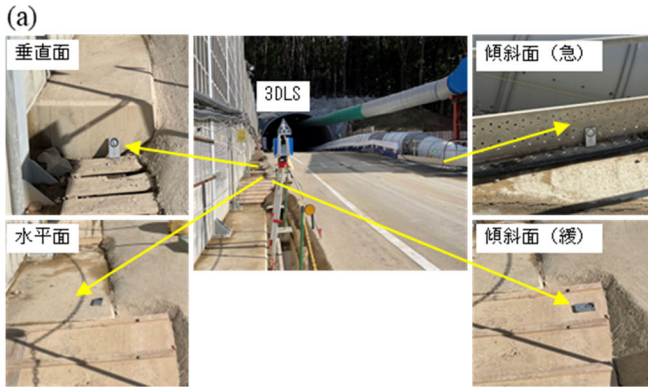


図-5 VR クリノメーター機能の精度検証箇所(a)とシュミットネットによる検証結果(b)

Fig.5 (a) Sites for verification test of geological compass tool in T-KIRIHA VR and (b) the results plotted in a stereonet diagram

OctCloud VR は、取得した点群を 3D オブジェクトに変換せず、点群のまま観察できる。また、コメント機能や長さ測定をする機能が実装されており、基本的な観察が可能である。ただし、切羽評価に必要な不連続面の走向傾斜を計測する機能は有していない状況であった。そこで、本研究では走向傾斜を計測する VR クリノメーター機能を専用開発した。計測方法は実際のクリノメーター (図-4a) を模しており、VR で表示される点群に対し 3DCAD で再現した VR クリノメーター (図-4b) を当てることで走向傾斜の取得が可能となる。

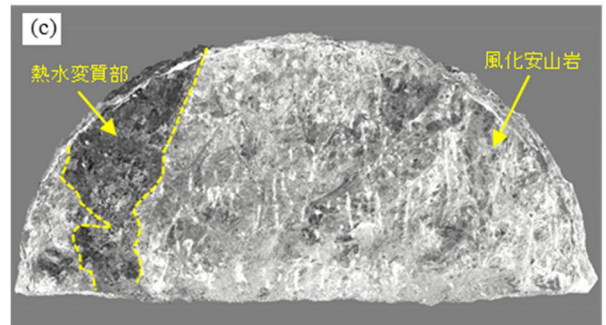
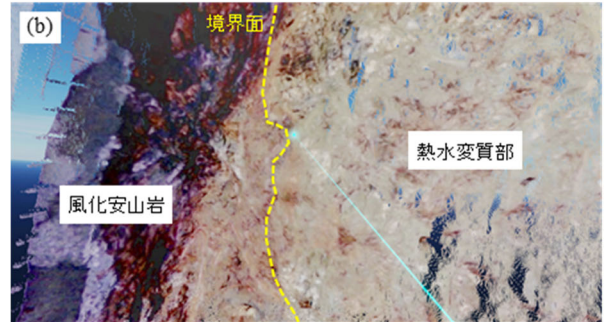
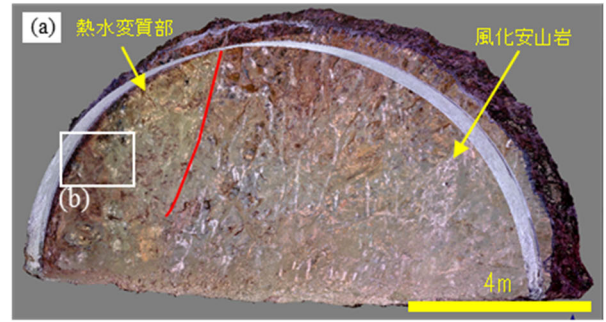


図-6 検証に使用した切羽点群データ  
(a: 色表示像, b: VR 観察像, c: 反射強度像)  
Fig.6 3D point clouds data of the tunnel face used for the verification of T-KIRIHA VR (a: Color image, b: VR image, c: Intensity image)

なお、本機能の精度検証のため、実測値と VR クリノメーターでの計測値を比較した結果を図-5 に示す。実測は、走向傾斜計測が直接可能な構造物の 4 箇所を実施した。すなわち、垂直面、水平面、傾斜面 (急)、傾斜面 (緩) である (図-5a)。それぞれの計測値はシュミットネット (下半球) 投影で表示したが、VR クリノメーターの計測値は実測値から  $\pm 5^\circ$  の誤差範囲に収まり、実測値を良く再現できた (図-5b)。

### 3. VR 切羽観察と従来法の比較

本章では、開発した T-KIRIHA VR と従来の切羽観察との比較結果を述べる。

検証対象としたのは、第四系の風化安山岩類が分布する山岳トンネル切羽である。図-6 には対象の切羽で取得した点群像を示した。図-6(a)は点群を色 (RGB 値) 情報で示している。図-6(b)は、図-6(a)の一部を VR で近

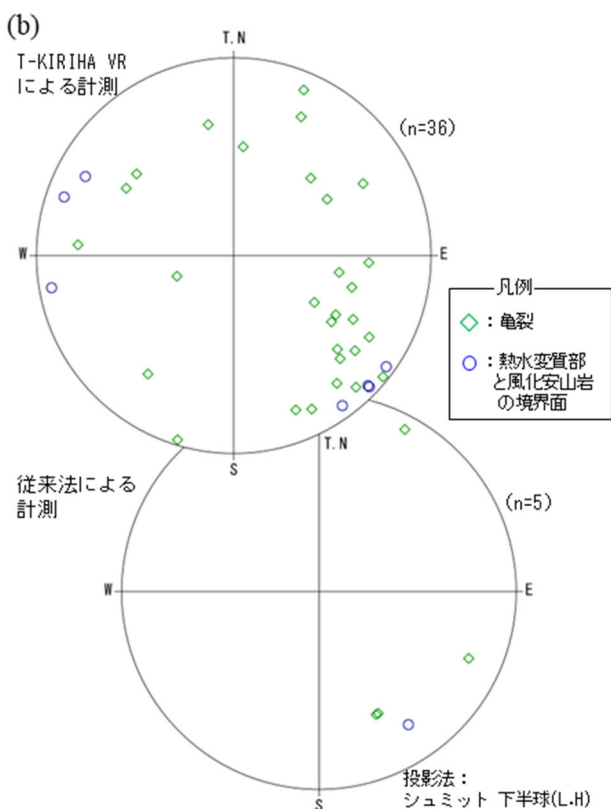
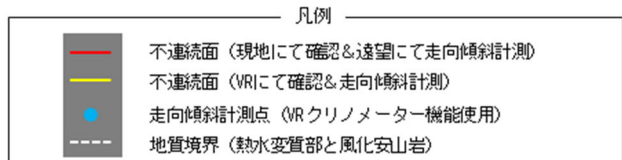
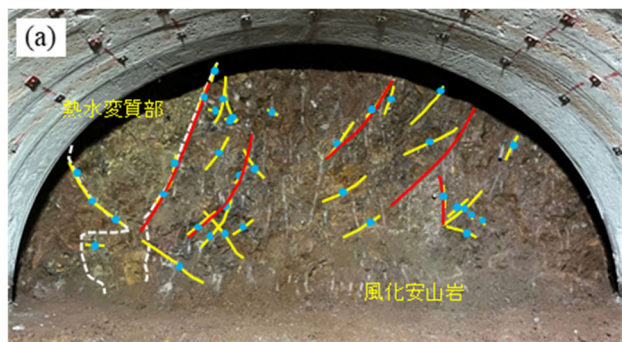


図-7 従来法と T-KIRIHA VR で得られた切羽観察データの比較  
 (a : スケッチと走向傾斜計測点, b : シュミットネットによる走向傾斜計測値の比較)

Fig.7 Comparison of the obtained data by the conventional method with those by T-KIRIHA VR  
 (a: Sketch lines of the discontinuity planes and the strike and dip measurement points, b: Results of the measurements in stereonet diagrams)

接観察したものである。図-6(c)は点群をレーザーの反射強度値で示した。なお、図-6(c)では反射強度値に強度(明暗)差が生じているが、これは、反射面の含水率の差を反映しているものと考えられる。

本切羽の大部分は暗褐色の風化安山岩から構成されるが、左側の一部には黄褐色を呈する熱水変質部が分布している(図-6a)。従来の切羽観察手法では、図-6(a)の赤線で示した通り、風化安山岩と熱水変質部の境界面構造について平滑な1条を把握した。しかし、VRにて近接観察すると、境界面は左側壁部の付近にも分布していることが分かった(図-6bの黄破線)。さらに、境界面は平滑ではなく、やや複雑に入り組んでいる。なお、地質分布や境界面構造は、点群データの反射強度において、両者に明暗(強度)の差が生じている事によっても判別できた(図-6c)。

図-7は、従来の観察手法と T-KIRIHA VR での観察により得た不連続面の構造を、スケッチと走向傾斜データで対比したものである。図-7(a)では、従来法でスケッチした不連続面の構造(赤線部)と、VR観察で把握した不連続面の構造(黄線部)を写真に重ねた。従来法では、約10分間の観察時間において先述した熱水変質境界を含む5条の明瞭な不連続面(赤線部)を記載した。一方、VR観察ではこれらに加え、より微細な33条の不連続面(黄線部)を把握できた。走向傾斜データは、従来法では上記5条の面構造を遠望計測により取得したが、VR観察ではVRクリノメーター計測により合計36個が取得できた(図-7a青丸部および図-7b)。

以上より、VRによる近接観察では、従来法では認識できない不連続面の地質構造を、多量の走向傾斜データとともに高精度で把握できることが判明した。

## 4. 考察

### 4.1 T-KIRIHA VR の有用性

従来の切羽観察は、直接素掘り面の直下に立ち入れないことや写真の不明瞭さから、詳細観察が十分に行えないという課題があった。開発したVR観察では、観察者は自由にVR空間を移動することができ、点群で再現した素掘り面の直下にも近接できた(図-2③, 表-2近接図)。また、従来の観察手法では限定されていた不連続面構造や走向傾斜の情報が、図-7のように、より詳細に把握できることが分かった。特に、VRクリノメーター機能は、実際の切羽においてクリノメーター計測を実施せずとも正確な走向傾斜データが得られるため、より詳細な地質評価に繋がる。これらのことから、VR観察は従来の切羽観察の課題を解消し得る有用なツールであると言える。

VR観察に用いる点群データは、現場において3DLS計測を実施する事により簡便に得られる。今回、3DLS

計測は、切羽から十分に離れた位置において実施しても、側壁部を含めて必要な点群データが安全に取得できることが明らかとなった（図-3a）。今後、詳細な評価が必要な切羽の場合には、3DLS 計測を実施する事でも地質専門家の遠隔フォローが可能となる。このため、VR 観察は施工現場の観点からも利点が多い。また、本システムは、将来的にはVRを用いた遠隔臨場（岩判定会議）に活用することで、専門家のみならず、発注者の移動や施工現場の待機時間を縮減する省力化にも繋がると期待される。

#### 4.2 T-KIRIHA VR の課題

現状のVR観察には、実際の施工・計測サイクルに適應する上で、2つの課題が挙げられる。

一つ目は、3DLS 計測の効率化に関する点である。本論で採用した方法では、切羽での計測作業におよそ9分間を要した（表-3①～③）。現場での切羽観察は、短時間（1～2分程度）での実施が求められることが多い。このため計測時間はより迅速化されなければならない。この点は、より改良された計測機種を選定を継続することが解決策となる。

二つ目はデータ処理とデータ容量の点である。現場で取得された点群データはVR化処理に手作業で30分を要している。また、VR観察用のデータ容量は0.3GB程度であった（表-3④～⑧）。例えば、通信環境が制限された山岳トンネルでの岩判定会議にT-KIRIHA VRを活用する場合、表-3の工程がより迅速かつ低データ容量で行われなければならない。このためには、一連のVR化工程を高速化・低容量化する開発が必要と考えられる。また、インフラの点では、現場における高速通信網の整備も求められる。

## 5. まとめ

筆者らはデジタル化した新しい切羽観察システム T-KIRIHA VR を開発し、従来の切羽観察手法では難しい地質構造の近接観察や計測を可能とした。また本システムを実際の山岳トンネル切羽において検証し、従来法を補う有用なツールであることを示した。今後は、3D レーザースキャナ計測やVR化工程における効率化を継続し、現場での実用性を高めることを目指す。

### 謝辞

検証に使用した切羽データは、国道20号下諏訪岡谷BP山田トンネル工事にて計測させて頂いた。ここに記して感謝申し上げます。

### 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，2018.
- 2) Daghigh, H., Tannant, D., Daghigh, V., Lichti, D. and Lindenbergh, R. : A critical review of discontinuity plane extraction from 3D point cloud data of rock mass surfaces, Computers and Geosciences, Vol. 169, 105241, 2022.
- 3) Z+F Imager @ 5016 Preliminary Data Sheet: <https://positics.fr/wp-content/uploads/2020/07/5016-Spec-techniques.pdf>, (2023/06/08 アクセス)
- 4) 坂井一雄・宮永隼太郎・崔瑛・浅羽絢介：トンネルの長期的な変位監視手法への3Dレーザースキャナの適用性検討，大成建設技術センター報，第55号，44-1，2022.
- 5) Z+F LaserControl®, Laserscanning software HP: <https://www.zofre.de/en/laser-scanners/laserscanning-software/z-f-lasercontrolr>, (2023/06/08 アクセス)
- 6) OPT Cloud Survey HP: <https://www.opt-techno.com/opt-cs/>, (2023/06/08 アクセス)
- 7) 点群 VR システム OctCloud VR for Business HP: <https://kac.jp/top/products/vrsystem>, (2023/06/08 アクセス)