



三次元レーザスキャナ計測の坑道壁面の 割れ目観察への適用性*

早野 明¹ 板倉 賢一²

Applicability of The Three-Dimensional Laser Scanning to The Fracture Mapping on a Gallery Wall

by Akira HAYANO^a and Ken-ichi ITAKURA^b

- a. Japan Atomic Energy Agency, Hokushin432-2, Horonobe-cho, Hokkaido, 098-3224, Japan
(*Corresponding author, E-mail: hayano.akira@jaea.go.jp / FAX: 01632-5-2344)
b. Graduate School of Engineering, Muroran Institute of Technology, 27-1 Mizumoto, Muroran, 050-8585, Japan

Fracture mapping conducted during gallery excavation on construction projects of a large-scale underground facility is based on traditional geological techniques such as visible observations and simple measurements of fracture orientation using a clinometer. Therefore, some difficulties persist, such as securing data quality and worker safety. Three-dimensional (3D) laser scanning, which can instantly acquire point clouds representing the 3D shape of an object surface, is can be effective for resolving these difficulties. In order to confirm the applicability of the three-dimensional laser scanning to the fracture mapping on a gallery wall, this study proposes the method for obtaining attribute information from a point cloud, such as trace length and orientation, associated with the spatial distribution of fractures. In the proposed method, the two-dimensional image is generated from the point cloud to obtain the trace map. After the proposed method was applied to an approximately 50-m-long horizontal gallery excavated into the granitic rock, the reproducibility of the attribute information of fractures obtained solely from the point cloud was examined. Results show that the number of fractures extracted from the point cloud is approximately 80% of those extracted by traditional geological techniques. Although the trace length reproducibility ratio of fractures is approximately 70%, fracture orientations calculated from the point cloud compare favorably with those measured by an on-site researcher. Most fractures that were not extracted from the point cloud do not act as water-conducting fractures because they had short lengths and because they were bonded tightly. Even if the fracture data obtained from the point cloud were applied to modelling for hydrogeological analysis, the results would probably not be influenced strongly. Results of this study indicate the possibility of applying 3D laser scanning to fracture mapping.

KEY WORDS: Fracture Mapping, 3D Laser Scanning, Point Cloud, ArcGIS Spatial Analyst, Fracture Trace Map, Fracture Orientation

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分や石油・天然ガスの備蓄などの大規模な地下施設建設プロジェクトにおける坑道掘削では、通常、掘削直後のトンネルの側壁や切羽を対象とした壁面地質調査が行われる。その壁面地質調査で取得される地質データはプロジェクトにおいて重要であり、一般的な山岳トンネルの掘削工事のように地山評価や支保判定のために用いられるだけでなく、プロジェクトの目的に応じて水理解析や力学解析などのベースとなる地質構造モデルの構築に用いられる。掘削対象の岩盤が亀裂性岩盤として分類される場合、壁面地質調査では割れ目の分布と性状に着目した観察が行われる（以下、「割れ目観察」）。割れ目観察では、坑道壁面における割れ目の分布位置とトレース長が調査

員の目視観察によるマッピングや写真撮影によって記録され、さらに、割れ目方位がクリノメーター（傾斜計と水準器が組み込まれた方位磁石）を使用して簡易的に測定されるといったように、従来からの手法（以下、「従来手法」）が今日においても一般的である。総延長 200 km 以上の坑道掘削が想定される高レベル放射性廃棄物の処分場建設¹⁾のような大規模な地下施設建設プロジェクトでは、長期間、昼夜にわたって坑道掘削が行われ、それに伴い膨大な回数の割れ目観察が実施されると考えられる。もし、割れ目観察が従来手法に基づくならば、以下の課題が生じることが懸念される。

- － 坑道掘削工事に伴い実施される割れ目観察には制限時間があり、建設コスト削減の観点から観察時間が短縮される場合、制限時間内に施設設計や解析評価の要求品質を満たすデータを取得できない。
- － 割れ目観察毎に調査員が異なる場合、データの品質は調査員の経験や能力などに依存するため、データの品質にバラつきが生じる。
- － 岩盤崩落や落石による労働災害の防止の観点から調査員の露岩部分への立入が制限される場合、岩盤に接近した目視観察

*2016 年 9 月 9 日受付 2017 年 3 月 17 日受理

1. 正会員 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター

2. 正会員 室蘭工業大学 大学院工学研究科 教授
[著者連絡先] FAX: 01632-5-2344

E-mail: hayano.akira@jaea.go.jp

キーワード：割れ目観察，三次元レーザスキャナ計測，点群，ArcGIS 空間分析，割れ目トレースマップ，割れ目方位

ヤクリノメーターを岩盤に当てた割れ目方位の測定ができないため、データ取得精度が低下する。

これらの課題解決には、観察時間の短縮、データ品質の平準化およびデータ取得精度の維持の三つを実現できる手法を用意する必要があり、物体表面の三次元形状を瞬時にかつ高解像度で取得できる三次元レーザスキャナ計測（以下、「レーザ計測」）が有効であると考えられる。これまでに、いくつかの既往研究によってレーザ計測を適用した割れ目観察手法の検討が行われた。例えば、道路や鉄道沿いの岩盤が露出する斜面を対象とした計測²⁻⁹⁾やトンネルにおける側壁や切羽を対象とした計測¹⁰⁻¹²⁾が行われ、岩盤表面の三次元形状から層理面や割れ目面といった不連続構造を抽出し、その分布位置や方位を取得できることが示された²⁻¹²⁾。また、数 m から十数 m 規模の露頭や坑道を対象として、割れ目方位の測定に関する正確性やデータ取得に関する最適な条件の検証³⁻⁵⁾、あるいは割れ目抽出のためのアルゴリズムの検討⁶⁾が行われた。しかしながら、十数 m 以上の長さの坑道を対象として、レーザ計測データに基づく割れ目データと従来手法に基づく割れ目データを十分に比較した事例は、著者の知る限り存在しない。そのため、レーザ計測データから従来手法に基づく割れ目データをどの程度再現できるのか良く分かっていない。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構は、高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する研究のうち深地層の科学的研究の一環として、岐阜県瑞浪市にある瑞浪超深地層研究所（以下、「瑞浪研究所」）において調査坑道の掘削を伴う研究開発を行っている。亀裂性岩盤である結晶質岩を主な研究対象とし、調査坑道の掘削時における調査のひとつとして割れ目観察が実施された¹³⁾。そして、割れ目観察を含む壁面地質調査の手法整備の一環として、一部の坑道では、割れ目観察と並行してレーザ計測が行われた。本研究では、レーザ計測の割れ目観察への適用性、すなわち、レーザ計測データから従来手法に基づく割れ目データをどの程度再現できるのか確認することを目的とする。そのため、レーザ計測データから割れ目の分布位置、トレース長および方位を取得する方法を検討し、その方法を瑞浪研究所の長さ 50 m 程度の水平坑道に適用して割れ目データを取得し、その結果を従来手法に基づく割れ目データと比較する。

なお、瑞浪研究所の坑道掘削時に行う割れ目観察は、地下水や物質の選択的な移動経路として機能すると推定される断層や割れ目の分布や特徴を把握することを目的としている¹³⁾。よって、本研究における割れ目とは、掘削前から存在する天然割れ目を指しており、掘削時の発破によって生じた岩盤の亀裂や破断面は対象外である。

2. 瑞浪研究所の地質概要と本研究の対象範囲

瑞浪研究所には、白亜紀後期～古第三紀の土岐花崗岩体と、それを不整合に覆う新第三紀中新世の瑞浪層群が分布する。瑞浪研究所の坑道掘削地点では、深度約 170 m 以深（標高約 30 m）に土岐花崗岩が分布し、不整合を介して瑞浪層群が上位に分布する¹⁴⁾。土岐花崗岩体は、岩体の中心部ほど珪長質な正累帯深成岩体とされており¹⁵⁾、岩体のほぼ中心に位置する瑞浪研究所に分布する岩石は黒雲母花崗岩（以下「花崗岩」）である¹⁴⁾。Fig. 1 に、本研究の対象となる坑道の位置と、その坑道の壁面における割れ目と岩盤等級の分布を示す。瑞浪研究所の坑道は、深度 500 m の主立坑および換気立坑の 2 本の立坑と、それらをつなぐ水平坑道群から構成される¹⁶⁾。本研究は、亀裂性岩盤である土岐花崗岩体に対して掘削された可能な限り長い水平坑道を対象とするため、主立坑中心からの掘削距離が 100.5 m である深度 300 m 研究アクセス坑道から検討範囲を選定する（Fig. 1）。水平坑道における

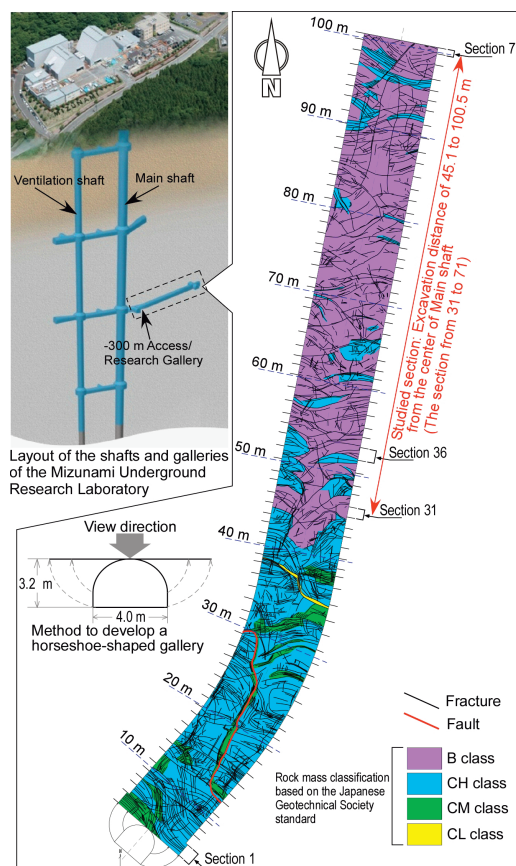


Fig.1 Layout of shafts and galleries of the Mizunami Underground Research Laboratory, with a rock mass classification map of the -300m Access/Research Gallery showing the studied section. (The Rock mass classification map is based on Kawamoto et al.¹⁹⁾)

1 回の掘削サイクル毎の掘削長は、岩盤分類評価に基づく地山判定結果に応じて異なり 1.0 から 1.7 m であり、深度 300 m 研究アクセス坑道では、71 回の掘削サイクルによって掘削された。割れ目観察も掘削サイクル毎に行われ、それぞれの観察区間には主立坑側から順に管理番号が振られている（Fig. 1）。主立坑沿いには、強い変質を伴う北北西走向の断層がほぼ鉛直に分布する。その断層には見かけの幅が数十 cm ～ 1 m 程度の優黑色を呈する貫入岩が近接して分布しており、花崗岩との接触部分では特に変質が著しく、石英以外のほとんどの鉱物が粘土鉱物に置換された粘土変質部の場合が多い¹⁷⁾。深度 300 m 研究アクセス坑道の主立坑から掘削距離 40 m までの範囲の岩盤では、主立坑沿いの断層から派生した断層の分布に伴い著しく割れ目が発達し、さらに変質作用を被っており、地盤工学会の岩盤分類評価¹⁸⁾に基づく判定は D 級ないし CL 級である（Fig. 1）¹⁹⁾。そのような岩盤では、壁面形状が複雑であり、レーザ計測データが表す坑道壁面形状だけから割れ目面の部分とそれ以外の部分を判別することは困難である。一方で、断層近傍の割れ目は、地質構造モデルにおいて一定の幅をもった断層帯あるいは破砕帯といった一つの構造としてまとめられるため、必ずしもその中の個々の割れ目の属性情報を必要としない。本研究では、断層などの要因で極端に割れ目が発達するような区間は対象外とする。そのため、深度 300 m 研究アクセス坑道の掘削距離 45.1 から 100.5 m までの長さ 55.4 m の区間（観察区間 31 から 71）を本研究の対象範囲とする（Fig. 1）。この範囲の岩盤等級は、ほとんどが B 級であり（Fig. 1）、割れ目間隔は平均して 60 cm 以上で岩盤の変質の程度は弱い¹⁹⁾。

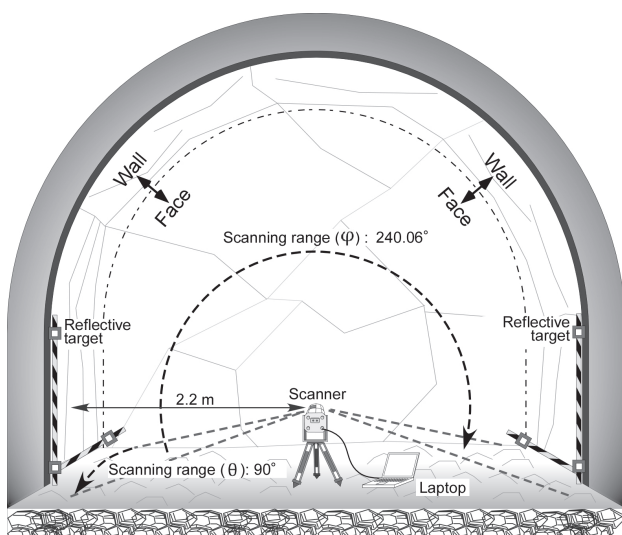


Fig.2 Schematic of 3D laser scanning in the gallery.

3. レーザ計測の概要と点群の前処理

レーザ計測は、発破によって砕かれた岩石を取り除いた直後に、割れ目観察と併行して実施された。レーザ計測に用いた機種は、RIEGL 社製の LMS-Z360i である²⁰⁾。Fig. 2 に、水平坑道におけるレーザ計測の模式図を示す。坑道壁面は、側壁と切羽の部分に分けられる。スキャナ本体は、レーザ光が坑道側壁に照射される姿勢で坑道中心に設置され、坑道の側壁を中心に計測された。レーザ計測の取得データは、坑道壁面の三次元形状を表す点群である。Fig. 3 に、点群の処理の流れと各過程における点群の構成を示す。生データの点群の各点は、レーザスキャナの位置を原点とするローカル座標系である球面座標系 (θ, φ, r) と直交座標系 (x, y, z) 、レーザ光の反射強度 (I) 、デジタルカメラで撮影される可視画像と点群のマッチングによって与えられる色情報 (R_p, G_p, B_p) から構成される (Fig. 3a)。生データ以降の構成と処理については後述する。側壁には、点群の座標系をローカル座標系から東西南北座標系に変換する際の基準となる反射ターゲットが設置される。レーザ光を照射するスキャンは、左側壁から開始される。坑道の掘進方向 (Fig. 2 の θ 方向) と平行に坑道の奥から手前に向けてスキャンを行う毎に、スキャナ本体のレーザ光の発信部は、天盤を経由し右側壁の方向 (Fig. 2 の φ 方向) に 0.06° 刻みで回転する。スキャン範囲は、 θ 方向が 90° 、 φ 方向 240.06° である。レーザ計測の所要時間は、スキャナの設置と撤去を含めて 20 分程度である。スキャナ本体から側壁までの最短距離は約 2.2m であり (Fig. 2)、 θ 方向のスキャン範囲から計算されるスキャン可能な掘削長は 4.5m 程度である。しかし、レーザ光の発信部から側壁までの距離 (r) は、スキャン範囲の中心部より端部の方が長いので、その結果、スキャン範囲の端部では中心部より点群の点間隔が大きくなる。このことを考慮すると、実際にスキャン可能な掘削長は、最大でも 3m 程度である。深度 300 m 研究アクセス坑道における掘削サイクル毎の掘削長は 1.0 から 1.7 m であることから、1 回で側壁全体を計測でき、計測範囲には、坑道側壁だけでなく、切羽および前区間の支保や吹付コンクリートの一部も含まれる。 θ 方向および φ 方向のスキャン解像度は両方とも 0.06° であり、取得される点数は、 θ 方向が 1,500 点、 φ 方向が 4,001 点の計 6,001,500 点である。生データのスキャン解像度に対する点群の点間隔は r によって異なり、すべての点の r の平均から算出される点間隔は 2.7 mm 程度である。しかしながら、生データとしての点群には

- $(\theta, \varphi, r, x, y, z, I, R_p, G_p, B_p)$
 - Processing of raw data
 - Convert scanner's own local coordinates to global coordinates
- $(\theta, \varphi, r, X, Y, Z)$
 - Developing a horseshoe-shaped point cloud on 2D $x'y'$ plane
- $(\theta, \varphi, r, X, Y, Z, x', y', z')$
 - Analysis of the shape of the gallery wall
 - Generate the image for reading fractures
- $(\theta, \varphi, r, X, Y, Z, x', y', z', S, A, R_v, G_v, B_v)$
 - θ, φ, r : Scanner's own local spherical polar coordinate system
 - x, y, z : Scanner's own local orthogonal coordinate system
 - X, Y, Z : Global coordinate system
 - x', y', z' : Local orthogonal coordinate system after development of scanner's own local spherical polar coordinate system
 - I : Reflection intensity of laser beam
 - S : Slope on 2D $x'y'$ plane
 - A : Aspect on 2D $x'y'$ plane
 - R_p, G_p, B_p : Colour information from the camera image
 - R_v, G_v, B_v : Colour information from the image for reading fractures

Fig.3 Components of point clouds and data processing.

ノイズが含まれるため、後述する点群のリサンプリング (平滑化) と判読画像の生成によって、最終的な点間隔は 11 mm 程度になる。

レーザ計測直後の生データの点群の前処理には、RIEGL 社の地上型 3D レーザスキャナ用ソフトウェア RiScan PRO を用いた。はじめに、ローカル座標系である直交座標系 (x, y, z) (Fig. 3a) が東西南北座標系 (X, Y, Z) (Fig. 3b) に変換される。東西南北座標系への変換により割れ目方位の算出が可能になる。東西南北座標系には、国土地理院が定める平面直角座標系 VII 系を採用した。RiScan PRO では、左側壁および右側壁に設置された反射ターゲット (Fig. 2) に東西南北座標系の座標値を割り当てると変換マトリクスが計算され、それを用いて座標変換が行われる。つぎに、生データの点群に含まれるノイズの処理と後述する判読画像の生成の際にパソコンへの負荷を軽減するために、点群のリサンプリングと不要部分の削除を行う。具体的には、スキャン解像度が、 θ 方向および φ 方向ともに 0.06° から 0.12° になるように、すなわち、それぞれの方向の点群の点数が 2 分の 1 になるようにリサンプリングを行う。この場合、点群全体としては 4 分の 1 になる。点群の不要部分の削除に関しては、吹付コンクリートなどの範囲の点群を削除した他、点群の構成要素のうち、後述の判読画像の生成において必要としないレーザ光の反射強度 (I) および色情報 (R_p, G_p, B_p) を削除する (Fig. 3a, b)。以上の処理を行うと、1 区間あたりの点群の点数は、約 600 万点から約 60 万点になる。

4. 割れ目観察の概要と点群に基づき取得する割れ目の属性情報

割れ目観察は、坑道掘削の掘削サイクルの中で、発破によって砕かれた岩石を取り除いた直後に実施される。観察終了後、原則として鋼製支保、ロックボルトおよび吹付コンクリートによる支保に露出した岩盤は覆われるため、この観察が坑道壁面から割れ目データを取得できる唯一の機会である¹³⁾。掘削サイクル毎に割り当てられる観察時間は、地上から坑道への資機材の搬入出を含めて約 1 時間である¹³⁾。坑道掘削作業は、昼夜にわたって実施されるため、調査員は適宜交代される¹³⁾。観察作業時における天盤や側壁からの落石による労働災害を防ぐため、調査員は岩盤の露出する範囲に立ち入ることが原則禁止されており、岩盤に接近した割れ目の観察や方位の計測を行うことができない¹³⁾。

割れ目観察では、トンネルの側壁と上半アーチの境界線であるスプリングラインがスキャンラインとして設定され、それと交差する 1 m 以上のトレース長を有する割れ目が基本的な記載対象で

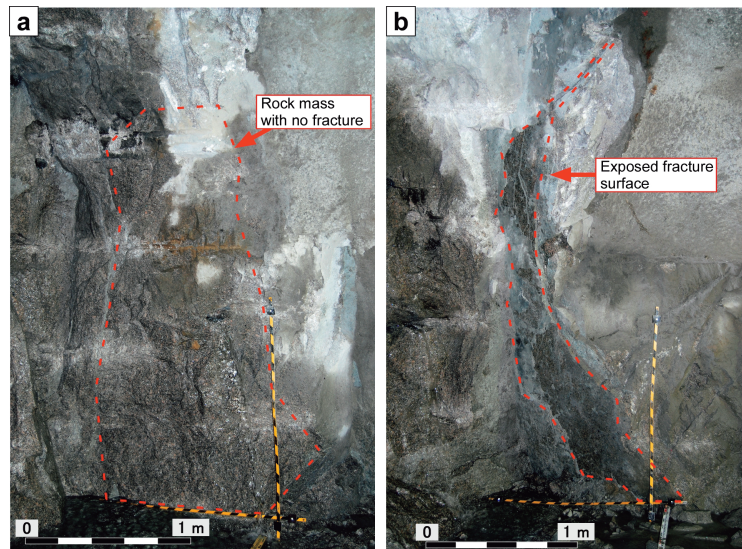


Fig.4 Surface shape of the gallery wall: (a) part of a rock mass with no fractures and (b) part of a rock mass with an exposed fracture surface.

ある¹³⁾。瑞浪研究所周辺における空中写真判読によるリニアメントと露頭の割れ目密度の検討の結果、長さが概ね1 m以上の割れ目がフラクタル特性を有すること²¹⁾が、1 m以上の割れ目に限定された主な理由である。また、瑞浪研究所周辺の土岐花崗岩体の上部には、低角度傾斜（水平面に対して概ね30°以下の傾斜）の割れ目が発達する^{22, 23)}。そのため、スキャンラインと交差しにくい低角度の割れ目であっても、2 mを超えるトレース長を有する割れ目は記載対象である¹³⁾。さらに、複数の割れ目の交差部は、透水性構造として機能する可能性があること^{24, 25)}を踏まえ、分岐、断続、雁行などの特徴を有する割れ目は、その長さに関わらず記載対象である¹³⁾。記載対象の割れ目の分布位置とトレース長は、調査員が目視観察によって作成するトレースマップとして記録されるとともに、割れ目の方位、種類、開口幅、充填物の特徴、母岩の変質状況、湧水状況などを定量・定性的な割れ目の属性情報は割れ目記載シートに記録される^{13, 19)}。割れ目方位の計測において鋼製支保などの帯磁性資材がクリノメーターに影響することが懸念される場合、その代替手段として分度器などにより坑道の掘進方向に対する角度が記録され、その結果が割れ目方位に換算される¹³⁾。これらの割れ目の属性情報のうち、点群に基づき取得できる情報は、壁面形状から読み取れる情報に限られる。Fig. 4に、坑道壁面の形状の一例を示す。坑道壁面において割れ目が無いインタクトな部分には、弱面となる部分が無く、発破の際に強い引張破壊が生じるため、壁面は粗く凹凸のある形状になる傾向がある（Fig. 4a）。また、発破の影響によりひび割れが生じる場合、その割れ目は粗い割れ目面になるだけでなく、天然割れ目と比較して連続性に乏しい。一方、坑道壁面に割れ目が分布する場合、割れ目が弱面となるため、強い引張破壊が生じることはなく、割れ目面に沿って岩盤が剥がれ落ちる。露出した割れ目面は平滑であり、また、割れ目に沿って連続するエッジ形状を形成する傾向がある（Fig. 4b）。厳密には、天然割れ目とそれ以外の掘削影響による破断面やひび割れを識別するためには、形状だけでなく割れ目面の形態や充填物の特徴などの情報も踏まえる必要があるが、それぞれの形状の特徴は明確に異なるため、識別は容易である。よって、点群に基づき取得する割れ目の属性情報は、壁面形状から平滑な面を割れ目として読み取るにより抽出できる割れ目の分布位置およびトレース長である。それに加えて、抽出される割れ目の方位を点群の東西南北座標系の座標値か

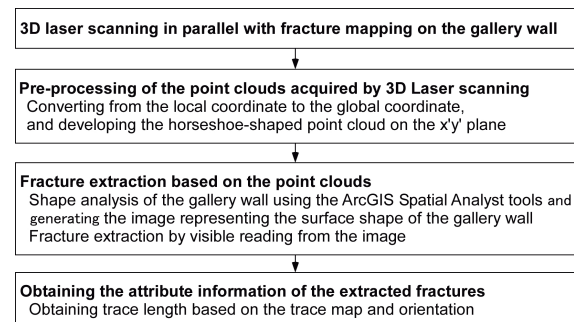


Fig.5 Methodology of fracture mapping based on point cloud data acquired by 3D laser scanning.

ら算出できる。しかし、割れ目の種類、充填鉱物の特徴、母岩の変質状況、湧水状況などの定性的な属性情報は、壁面形状と関係がないため点群から取得することはできない。また、本研究が対象とした点群の解像度では、より詳細なスケールの形状認識を伴う割れ目面の凹凸といった形態や割れ目の開口幅を取得することはできない。

5. 点群に基づく割れ目データの取得方法

Fig. 5に、坑道内におけるレーザ計測の実施から点群に基づいて割れ目を抽出し、その属性情報を取得するまでの手順を示す。坑道内におけるレーザ計測を実施した後は、室内作業として生データの点群の前処理を行う。その内容は、3章において述べた。ここでは、点群に基づき割れ目を抽出する方法と、その後の抽出した割れ目の属性情報としてトレース長と方位を取得する方法について、観察区間36の結果を示しながら説明する。

5・1 坑道壁面に分布する割れ目の抽出方法

5・1・1 方法の検討 既往研究による割れ目の抽出方法は、割れ目を自動的に抽出するためのアルゴリズムを使用する方法と、点群から構築された三次元モデルから目視によって割れ目を抽出する方法に大別される。前者の方法には、点群から構築したメッシュモデルの各メッシュの法線ベクトルを分類することにより割れ目を抽出する方法³⁾や、格子状に配列した一定サイズの立方体ブロックで点群を分割し、各ブロックに含まれる点に対して最小2乗法により面をフィッティングさせ、それらの面の位置

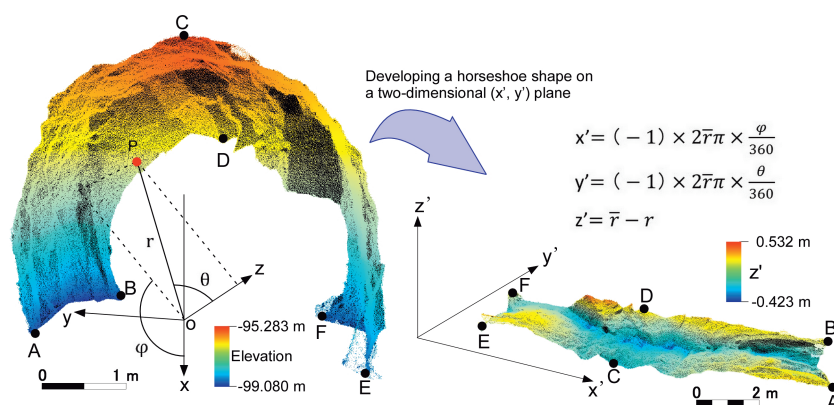


Fig.6 Method used to develop a horseshoe-shaped point cloud on the $x'y'$ plane. Coordinates (θ, ϕ, r) are the scanner's own local spherical polar coordinate system. Coordinates (x', y', z') are the local orthogonal coordinate system after development of the coordinates (θ, ϕ, r) .

と方向に基づく分類によって割れ目面を抽出する DiAna アルゴリズム⁶⁾などがある。前者の方法は、自動的に割れ目を抽出できるため、客観的なデータ取得の観点では優位であるが、既往研究⁶⁾の事例では、数メートルスケールの露頭への適用に限られている。一定の長さを有する馬蹄形の坑道かつ発破掘削により形成された複雑な壁面形状に対して適用できる汎用的なアルゴリズムは存在しない。そのため、十数 m 以上の長さの坑道に対しては、後者の方法が採用されている¹⁰⁾。本研究においても同様であり、前者を採用する場合、割れ目が形成する平滑面と強い引張破壊によって形成された凹凸のある破断面を最も効率的に判別するための閾値を検討した上で、既往研究のアルゴリズムの最適化あるいは新たなアルゴリズムの構築を行う必要がある。本研究では、点群が表す坑道壁面形状から従来手法に基づく割れ目データをどの程度再現できるのか確認することに主眼を置いているため、後者の方法を採用する。既往研究では、三次元モデルをパソコンのモニタに表示させ、それを回転させながら割れ目だと判断できる平滑面やエッジ形状が割れ目として抽出されているが¹⁰⁾、馬蹄形の坑道が対象の場合、一つの視野方向から、すなわち、二次元平面上に坑道壁面全体を表示することができない。三次元モデルに示された割れ目の抽出結果は、割れ目観察の記録シートに表示する際に使い勝手が悪いだけでなく、割れ目の分布位置とトレース長を取得に用いるトレースマップを作成する際に、三次元の割れ目の抽出結果を二次元平面上に展開する必要がある。トレースマップの作成においては、点群が表す壁面形状を二次元に展開してから割れ目を抽出の方が容易である。そこで、本研究では三次元モデルの目視判読する方法ではなく、二次元平面上に計測範囲全体の壁面形状を表示した画像（以下、「判読画像」）から割れ目を目視判読によって抽出する方法を検討する。

5・1・2 判読画像の生成 判読画像の生成には、Esri 社の地理情報システムソフトウェア ArcGIS の拡張機能である地形分析ツールを使用する。ArcGIS では、本来地形図などの地理情報が扱われるため、数値標高モデル (DEM) データのような X 軸を東西方向、Y 軸を南北方向、Z 軸を標高とした直交座標系のデータが ArcGIS に入力され、XY 平面上において Z 値を参照するマップが生成される。もし、ArcGIS の XY 平面上に馬蹄形の点群が置かれ、Z 値を参照するマップが生成される場合、坑道の側壁部分の点が重なるため、XY 平面のマップに坑道壁面全体を表示することができない。そのため、ArcGIS には馬蹄形の点群を二次元平面上に展開した点群を入力する必要がある。Fig. 6 に、点群の展開方法を示す。Fig. 6 の左側は馬蹄形の生データの点群を示しており、その座標系は、レーザスキャナの位置 o を原点とする

ローカル座標系である球面座標系 (θ, ϕ, r) あるいは直交座標系 (x, y, z) (Fig. 3a) である。Fig. 6 の右側は二次元平面上に展開された点群を示しており、その座標系は二次元平面上に展開後の直交座標 (x', y', z') (Fig. 3c) である。 x', y', z' は θ, ϕ, r から計算される。具体的には、 x' と y' は観察区間毎の r の平均値とそれぞれ θ と ϕ から算出される弧の長さとし、 z' は観察区間毎の r の平均値と各点の r との差とする。また、二次元平面上に展開後、 z' 方向のプラス側に坑道壁面の内側が向くようにするため、 θ と ϕ から算出される弧の長さに -1 を乗じた。ArcGIS には、二次元平面上に展開された後の x', y', z' が追加された点群 (Fig. 3c) を入力する。Fig. 7 に、ArcGIS の拡張機能である地形分析ツールを使用した壁面形状の分析と画像生成の手順を示す。はじめに、入力した点群の x', y', z' に基づくラスタ空間分析が行われ、 $x'y'$ 平面上に格子状に並んだ一定サイズのセルが配置され、各セルに含まれる点の z' の平均値を参照値とするラスタデータ（画像）が生成される。その際、各セルに概ね 4 個の点が格納されるようにセルサイズを調整する。次に、Fig. 7 に示す 3×3 の格子がラスタデータの各セルを移動し、 3×3 の格子の中央に位置するセル e に対して、隣接する 8 個のセル (a, b, c, d, f, g, h, i) の z' 値の平均値を加味するアルゴリズムにより傾斜と傾斜方位が計算される。その結果、傾斜と傾斜方位を参照値とするラスタデータ（画像）が生成される。それぞれの画像の配色については、傾斜に対しては白黒濃淡を与え、傾斜方向に対しては色相環を与える。最後に、傾斜画像に 65% 透過する傾斜方位画像を重ね合わせることで判読画像が生成される。判読画像の各セルの色情報 (R_v, G_v, B_v)、傾斜および傾斜方位を各セルに含まれる点と対応づけた点群を出力した (Fig. 3d)。これにより、判読画像の色情報と東西南北座標系 (X, Y, Z) が関係付けられるため、目視判読により抽出した割れ目の方位が算出可能になる。

5・1・3 判読画像を用いた割れ目抽出方法 Fig. 7 に示す傾斜画像および傾斜方位画像において、坑道壁面に露出する割れ目は平滑であるため、同一の平滑面にあるセルの値はほぼ同じである。割れ目方位は、傾斜と傾斜方位の組み合わせで一つのデータであるため、傾斜画像に傾斜方位画像を重ね合わせた判読画像においては、ほぼ同じ色が広がる領域が割れ目として識別できる。坑道壁面に割れ目面が広く露出する場合、判読画像ではほぼ同じ色が広がる領域になり、割れ目面が連続してエッジ形状を形成する場合、判読画像ではほぼ同じ色が線状に並ぶ。馬蹄形の坑道のアーチ部分は二次元平面上に展開されることにより歪みが生じるが、アーチ部分に割れ目面が分布する場合であっても、判読画像では割れ目面は曲面として表現され、傾斜と傾斜方位は緩やか

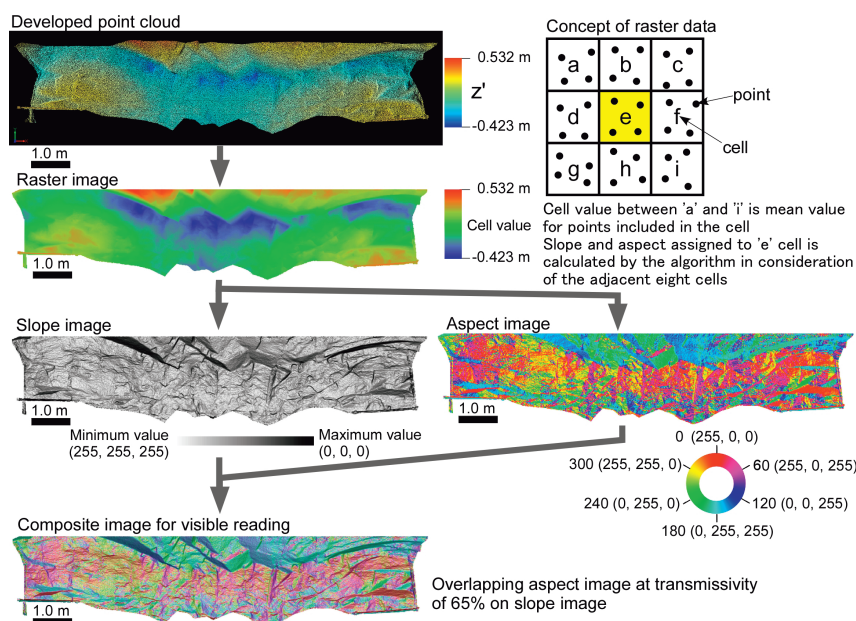


Fig.7 Procedure used to create the image for extracting fractures using the ArcGIS Spatial Analyst tools.

に変化するので、判読画像から曲面を割れ目として識別することは容易である。よって、判読画像において割れ目として識別する基準は、①ほぼ同じ色の広がる領域、あるいは②ほぼ同じ色が線状に配列する部分となる。割れ目観察では、1 m以上のトレース長を有する割れ目が記載対象であるが、判読画像では必ずしも割れ目の端から端まで完全にトレースすることができないため、判読画像上1 mより短い割れ目であっても抽出する。Fig. 8に、判読画像を用いた割れ目抽出の一例として、観察区間36の結果を示す。Fig. 8aに、判読画像から割れ目を抽出し、その部分をトレースした結果を示す。Fig. 8bに、調査員の目視観察に基づく割れ目観察結果を示す。データ整理の都合上、割れ目にはそれぞれ共通の番号を振っている。レーザ計測の範囲外の部分には網掛けをしている。Fig. 8cに、判読画像からの抽出された割れ目の属性情報を従来手法に基づくデータと比較した結果を示す。観察区間36において、従来手法に基づく観察により18条の割れ目が抽出されたが、そのうち、レーザ計測の範囲内にある割れ目は17条である(Fig. 8b, c)。それらの割れ目のうち、判読画像からは16条の割れ目を抽出することができた。トレース長および割れ目方位の比較については後述する。

5・2 抽出した割れ目の属性情報の取得方法

点群から取得できる割れ目の属性情報は、4章で示したとおり、割れ目の分布位置、トレース長、割れ目方位である。割れ目の分布位置およびトレース長は、判読画像の目視判読に基づき作成されるトレースマップから取得する。Fig. 8aのトレースマップから計測されたトレース長をFig. 8cに示す。トレース長は、グラフィックソフトウェアにおいて作成されたトレースマップから、トレースラインの長さを読み取ることによって取得される。従来手法のトレースマップは、設計上の坑道の仕上がり形状の大きさで作成されているが、判読画像の大きさは、実際の掘削形状に基づいているため従来手法のトレースマップより大きい。従来手法のトレース長と比較するため、判読画像のスケ-

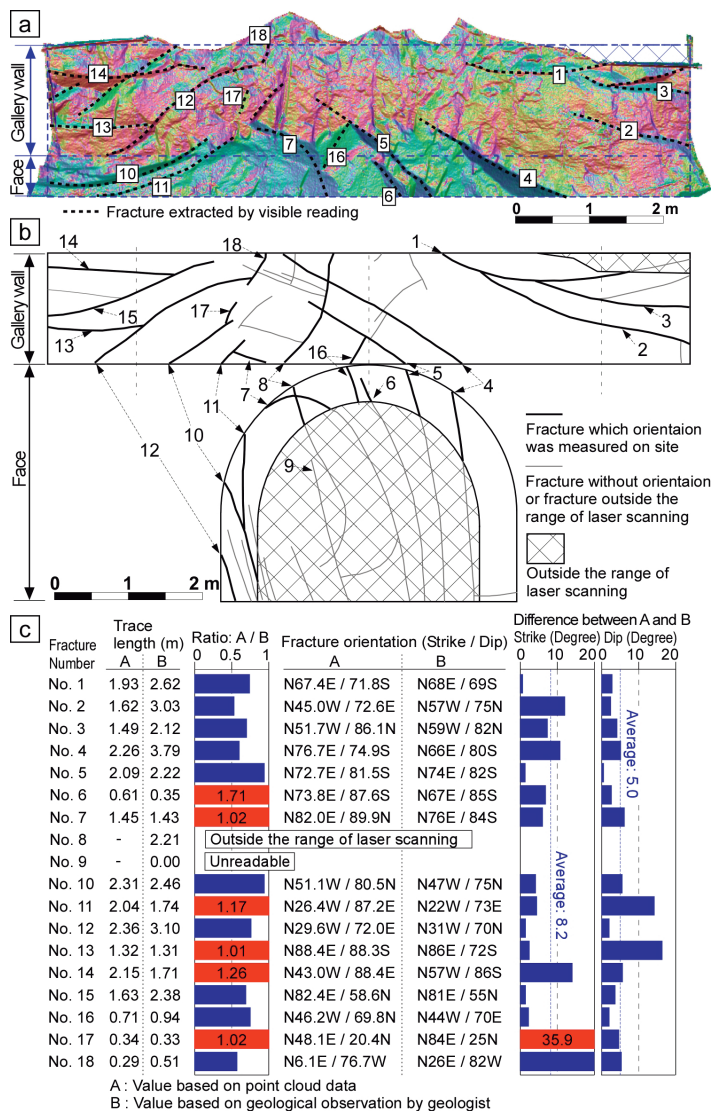


Fig.8 Results of fracture mapping in section 36: (a) visually recognized fractures on the image generated from the point cloud, (b) fractures extracted by visible observation in the gallery, and (c) comparison of fracture attribute information extracted by (a) and (b).

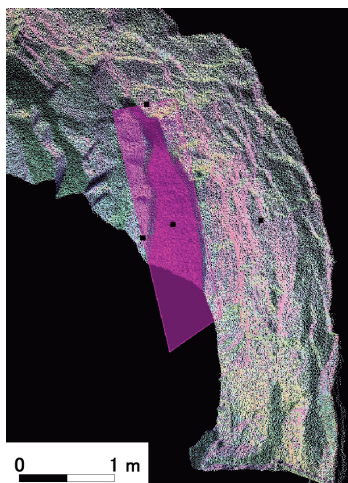


Fig.9 The plane fitted to the selected point cloud for the extraction. The orientation (strike and dip) of the extracted fracture are calculated from the best-fit plane. This fracture is No.4 of section 36. Three black squares on the fitted plane are used for calculation of the fracture orientation.

ルを従来手法のトレースマップのスケールに調整した後、トレース長を取得した。また、比較の範囲を同一にするため、Fig. 8cに示した従来手法のトレース長には、レーザ計測の範囲外の部分を含めていない。トレース長の比較の結果は、判読画像から抽出した16条の割れ目のうち6条は完全にトレースを再現しており、それ以外の割れ目は、少なくとも5割以上のトレースを再現している (Fig. 8c)。

点群から取得するもう一つの属性情報である割れ目方位の算出には、Topcon社のScanMasterを使用した。Fig. 9に、ScanMasterを用いた割れ目方位の計測例を示す。判読画像生成後にArcGISから出力する点群 (Fig. 3d) をScanMasterに入力し、東西南北座標系 (X, Y, Z) に基づき点群を三次元で表示する。判読画像から抽出した割れ目に対応する箇所を容易に選択するため、三次元に表示した点群には、判読画像と同じ色を配色する。ScanMasterでは、判読画像から抽出した割れ目に対応する点群を選択し (Fig. 9の

紫色の点群)、選択された点群にフィットする面を生成することができ (Fig. 9の紫色の長方形)、さらに、その面を代表する3点 (Fig. 9の黒い四角) の座標値を出力することができる。割れ目方位 (走向と傾斜) は、出力した3点の座標値を用いて、3点を通る面の方程式を解く方法²⁶⁾によって算出する。観察区間36において割れ目方位を比較した結果、No. 17の割れ目は低角度の割れ目であることもあり走向の差が35.9°と大きい、その差は平均して走向が8.2°、傾斜が5°であり、概ね従来手法の結果と調和的である。

6. 結 果

点群が表す坑道壁面の形状から従来手法に基づく割れ目データをどの程度再現できるのか確認するために、5章において検討した方法を、深度300 m研究アクセス坑道の掘削距離45.1から100.5 mまでの長さ55.4 mの区間に適用し、割れ目データを取得した。Fig. 10に、判読画像の割れ目抽出に基づいて作成されたトレースマップと従来手法に基づくトレースマップを示す。これらのトレースマップは、水平坑道の区間毎の結果のうち側壁部分について結合することにより作成される。判読画像に基づき作成した各区間のトレースマップを結合する際、区間毎の割れ目の連続性の判断は、従来手法のトレースマップに基づいた。4章に示した通り、従来手法による割れ目観察では、スプリングラインと交差する概ね1 m以上の割れ目が記載対象である。再現性の評価にあたっては、従来手法のトレースマップにおける1 m以上の割れ目を判読画像から抽出できたか否かが、ひとつの評価指標になる。よって、従来手法に基づくトレースマップ (Fig. 10b) に示された割れ目のうち、スキャンラインとの交差の有無は関係なくトレース長が1 m以上の割れ目を‘抽出すべき割れ目’として定義し、これらの割れ目に対して点群に基づく割れ目の属性情報を比較した。ただし、1 m以上の割れ目であっても、割れ目方位が計測されていない割れ目は比較対象から除外した。Fig. 10において、‘抽出すべき割れ目’は、Aと記した太い実線の割れ目である。

割れ目の分布位置については、それぞれの割れ目の位置の差 (距離) ではなく、そこに割れ目が存在したか否かという観点か

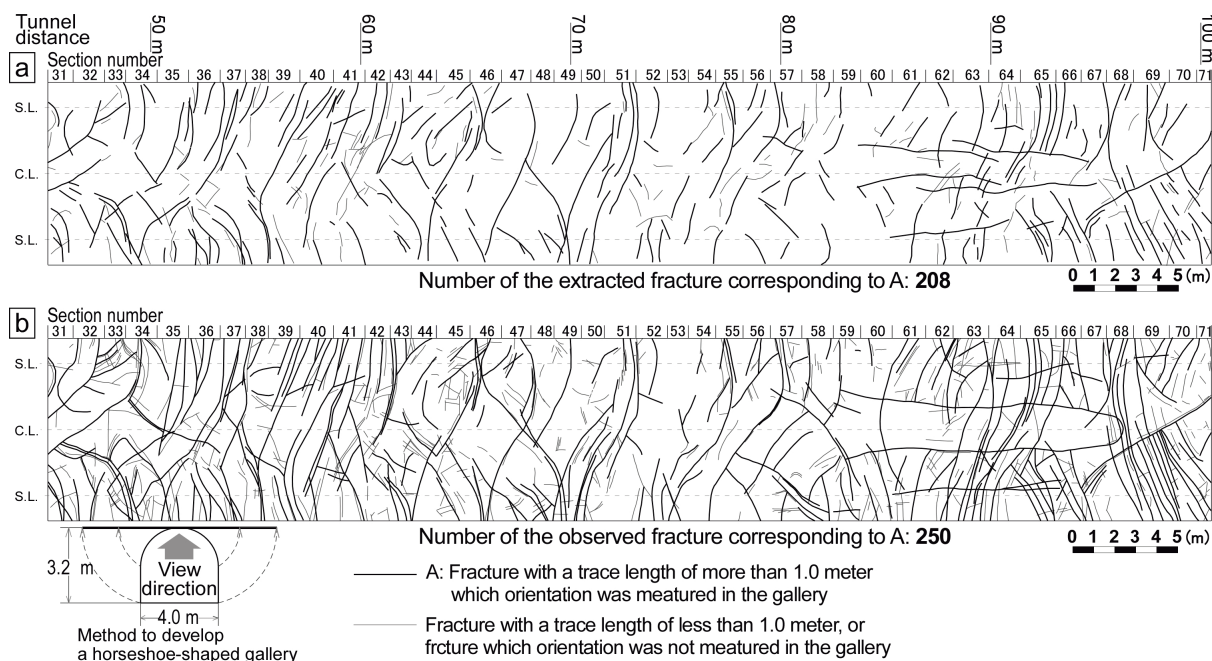


Fig.10 Fracture trace maps: (a) trace map based on a visible reading of the image generated from the point cloud and (b) trace map obtained as a result of on-site visual observation.

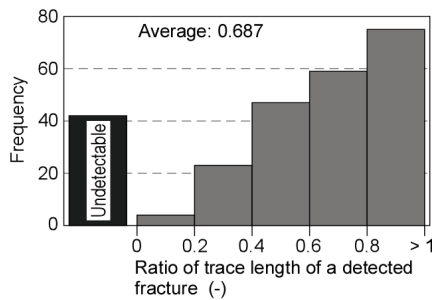


Fig. 11 Histogram of the ratio of trace length of the fracture extracted from images based on the point cloud to the trace length of fracture observed by a researcher. The black bar represents fractures that were not extractable from the images for fracture extraction.

ら比較した。すなわち、‘抽出すべき割れ目’に対して抽出できた割れ目の頻度を比較した。なぜなら、割れ目データとして位置が数 cm ずれることよりも、割れ目頻度が数%異なる方が、地質構造モデルの構築に与える影響はるかに大きいからである。従来手法のトレースマップにおいて‘抽出すべき割れ目’の頻度は250条であり (Fig. 10b), そのうち、判読画像から抽出できた割れ目の頻度は83.2%にあたる208条であった (Fig. 10a)。

割れ目のトレース長の比較においては、従来手法に基づくトレース長に対して判読画像から抽出できたトレース長の割合、すなわち、トレース長の再現率を求めた。Fig. 11に、その再現率の頻度分布を抽出できなかった割れ目の頻度とともに示す。80%以上の再現率の割れ目は75条と最も頻度が高く、再現率が低くなるほど頻度も低くなる。抽出できなかった割れ目を除く再現率の平均は、68.7%であった。

割れ目方位の比較においては、走向と傾斜の組み合わせによって一つの面の方位が表されることから、走向と傾斜を別々に比較することは好ましくない。Fig. 12に、点群に基づく割れ目方位と従来手法に基づく割れ目方位の差に関する模式図を示す。それぞれの面には上向きの法線がある。割れ目方位の比較の指標を一つにすることが最適であるため、それぞれの割れ目面の法線がなす角 (以下、「法線のなす角」) を比較の指標とする。法線のなす角を求める際には、法線を完全に交差させて低角の方を採用する。すなわち、法線のなす角は0°から90°の範囲にある。Fig. 13に、

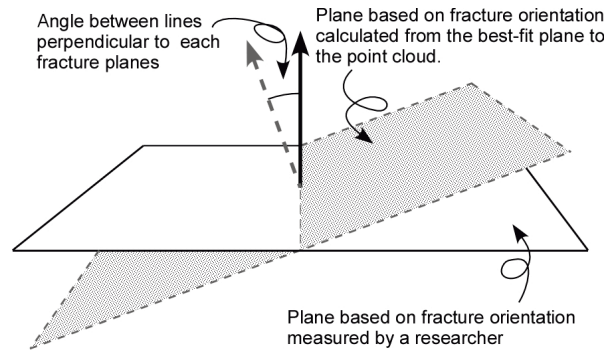


Fig. 12 Schematic diagram showing the angle between lines perpendicular to the fracture orientation measured by a researcher and that calculated from the best-fit plane to the point cloud.

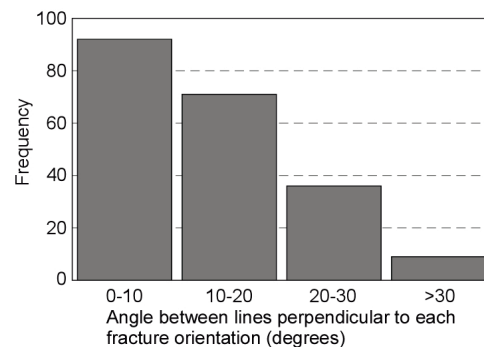


Fig. 13 Histogram of the angle between lines perpendicular to the fracture orientation measured by a researcher and that calculated from the best-fit plane to the point cloud.

割れ目方位の比較結果として、法線のなす角の頻度分布を示す。法線のなす角が0°から10°の範囲が最も頻度が高く、ほとんどの割れ目は30°以下であった。Fig. 14に、点群に基づく割れ目方位と従来手法に基づく割れ目方位のすべてを、それぞれのステレオネットに分けてプロットした結果をFisher分布に基づくプロットの集中度のコンターとともに示す。それぞれのステレオネットが示す卓越方位の第1ピークの差は傾斜が6°, 傾斜方位が2°であり, 第2ピークの差は傾斜が3°, 傾斜方位が0°であり, いずれもその差は僅かであった。

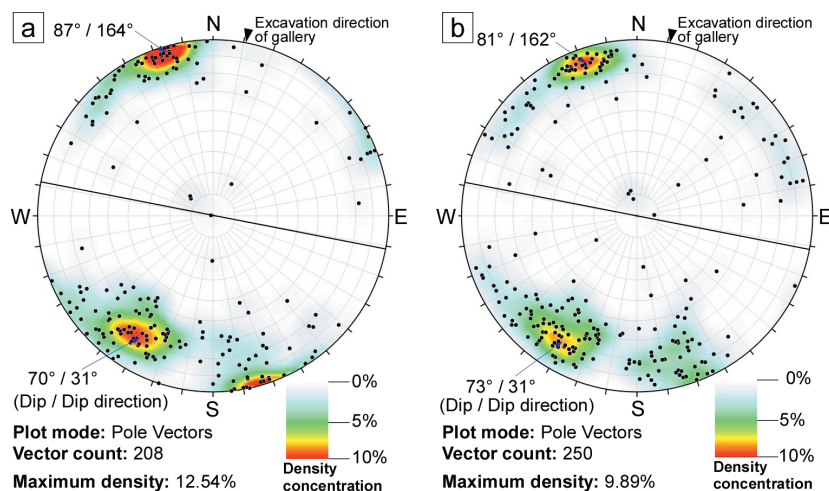


Fig. 14 Stereonet projections of fracture orientation data: (a) poles to fractures calculated from the point cloud and (b) poles to fractures measured using traditional geological techniques. Contours were made using a Fisher distribution (lower-hemisphere equal-area projection). The solid line in the stereonet indicates the range where poles of planes parallel to the excavation direction of the gallery is plotted.

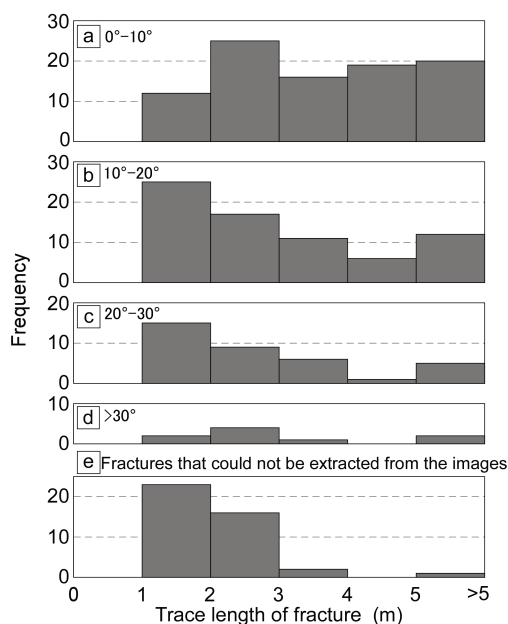


Fig.15 Histograms showing trace lengths of fractures. The trace length is based on the fracture map presented in Fig.1. These histograms show the angle between lines perpendicular to the fracture orientation measured by a researcher and that calculated from the best-fit plane to the point cloud: (a) 0-10°; (b) 10°-20°; (c) 20°-30°; (d) >30°; and (e) fractures that were not extractable from the images.

7. 考 察

7・1 点群に基づく割れ目データの再現性と割れ目の特徴の関係

本研究では、亀裂性岩盤である花崗岩を対象とした坑道掘削時の割れ目観察とレーザ計測の一事例ではあるが、坑道壁面形状を表す点群に基づく割れ目データの従来手法に基づく割れ目データに対する再現性に関する結果を得た。その結果に基づき、再現性の高い割れ目と低い割れ目のそれぞれの特徴について考察する。

Fig. 15 に、従来手法に基づくトレース長の頻度分布を示す。Fig. 15a-d は、判読画像から抽出できた割れ目に対応しており、割れ目方位の比較の指標である法線のなす角別に分けられている。Fig. 15e は、判読画像から抽出できなかった割れ目に対応している。判読画像から抽出できなかった割れ目のトレース長の頻度分布 (Fig. 15e) は、抽出できた割れ目に関する頻度分布 (Fig. 15a-d) と比較して、短いトレース長の割合が高く、3 m 以上のトレース長を有する長い割れ目はほとんど含まれていない。また、割れ目方位別のトレース長の頻度分布を比較すると、それぞれの全体に頻度は異なるが、法線のなす角が小さい割れ目ほど、トレース長の長い割れ目の割合が多い。Fig. 16 に、従来手法によって取得された割れ目の充填鉱物の幅の頻度分布を示す。トレース長の頻度分布 (Fig. 15) と同様に区分している。判読画像から抽出できなかった割れ目に対応する頻度分布 (Fig. 16e) は、抽出できた割れ目に対応する頻度分布 (Fig. 16a-d) と比較して、充填鉱物の幅が小さい割れ目の割合が高く、2 mm 以上の充填鉱物の幅を有する割れ目はほとんど含まれていない。また、割れ目方位別に比較すると、法線のなす角が小さい割れ目ほど、2 mm 以上の充填鉱物の幅を有する割れ目の割合が高い。Fig. 17 においても、上記に示した頻度分布と同じ区分で、グラウトが認められた割れ目の割合 (以下、「グラウト割合」) を示す。判読画像から抽出できなかった割れ目のグラウト割合は、20%程度であり、法線のなす角が 30°未満の割れ目に対応する割合と比較して明らかに低い。また、割れ目方位に関して、法線のなす角が 30°以上のグラウト割

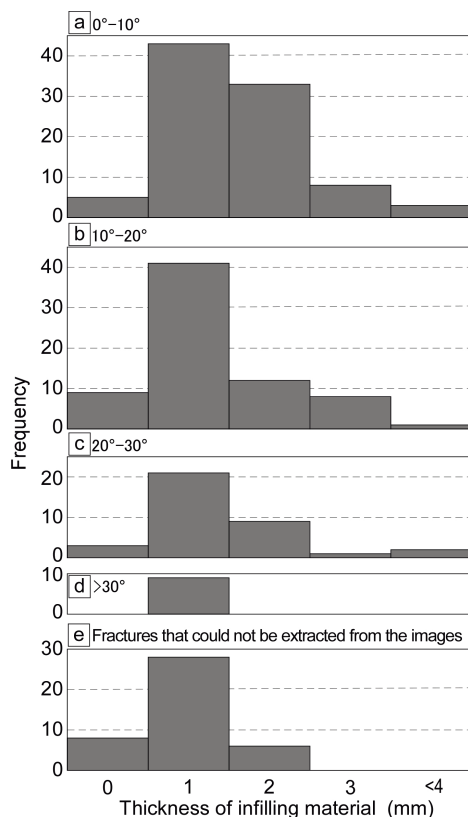


Fig.16 Histograms of material infilling fracture thickness. The infilling material thickness is referred from results of a study by Kawamoto et al. ¹⁹⁾. These histograms show the angle between lines perpendicular to the fracture orientation measured by a researcher and that calculated from the best-fit plane to the point cloud: (a) 0-10°; (b) 10°-20°; (c) 20°-30°; (d) >30°; and (e) fractures that were not extractable from the images.

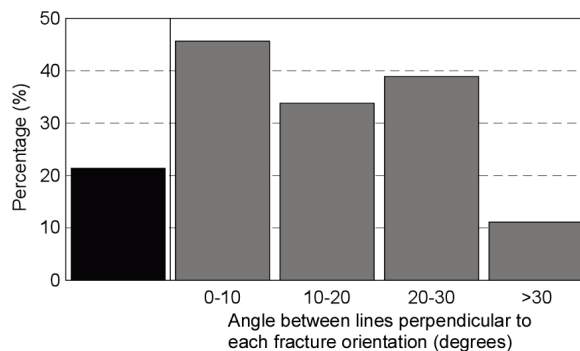


Fig.17 Percentages of fractures with injected grout material. The black bar represents fractures that were not extractable from the images for fracture extraction.

合は、それ以下のグラウト割合と比較して極端に低い。以上のことから、再現性の低い割れ目の特徴は、トレース長が短く、充填鉱物やグラウトをあまり介しない傾向があるため、おそらく割れ目面の密着性が強いと考えられる。一方、再現性の高い割れ目の特徴についてはその反対であり、トレース長が長く、充填鉱物やグラウトをよく介する傾向があるため、割れ目面の密着性は弱い、部分的には開口していると考えられる。

判読画像から抽出できなかった 42 条の割れ目に対して、その原因を検証するために、従来手法に基づくトレースマップと写真および判読画像を参照した。その結果、以下のことが原因として挙げられる。

- ① 割れ目面の露出が小さい、もしくは、割れ目面の形状が不明瞭である。…… 85.7% (36 条)

- ② 割れ目間隔が狭く壁面形状が複雑である。…… 4.8% (2 条)
- ③ 観察範囲の境界付近に位置する割れ目であり、前区間の吹付コンクリートに一部覆われるなどの原因により、割れ目の露出が不明瞭である。…… 9.5% (4 条)

抽出できなかった割れ目の特徴は、トレース長が短く割れ目面の密着性が高い割れ目であるため、発破直後において坑道壁面上に割れ目面が露出しにくかったと考えられ、やはり、①の原因が大半を占めている。また、抽出できなかった割れ目の中には、湧水により坑道壁面が著しく濡れることによって生じる点群の部分的な欠損や著しいノイズによる原因が相俟って、判読画像からの割れ目抽出がより難しくなっている割れ目も存在した。

トレース長の再現率は、抽出できた割れ目の平均で 68.7%であり、必ずしも高いとは言えない結果であった。充填鉱物やグラウトをよく介在し、坑道と完全に交差するような大きさの割れ目であっても、部分的には密着性が高い。そのため、判読画像において識別できる程度の割れ目面が、割れ目の端から端まで露出することは稀である。さらに、充填鉱物やグラウトをよく介在する開口性の割れ目は湧水を伴う傾向があるため、その割れ目近傍では点群にノイズが生じやすい。これらの理由から再現率があまり高くなかったと考えられる。

割れ目方位の再現性についても同様であり、トレース長、充填鉱物の幅、グラウト割合との関係から、割れ目のトレース長と割れ目面の密着性に依存する。しかし、割れ目の特徴以外に、点群に基づく割れ目方位と従来手法に基づく割れ目方位の両者には、計測誤差が含まれることを理解する必要がある。4 章で述べたとおり、調査員が行う簡易計測では、鋼製支保などの帯磁性資材の影響を避けるため、クリノメーターの代わりに分度器が使用されている。また、天盤からの落石による労働災害防止のため、必ずしも調査員は、分度器を直接岩盤にあてた計測を行うことができない。そのため、通常の野外での地質調査の時よりも若干大きい数°から十数°程度の計測誤差が生じていると考えられる。一方、点群から求められる割れ目方位の計測誤差は、壁面形状の精密性よりも、反射ターゲットに入力する東西南北座標系の正確性に依存する。本研究の場合、反射ターゲットに入力された東西南北座標系の値は、現場で測量された厳密な値ではなく設計上の数値であるため、数°程度の計測誤差が生じていると考えられる。割れ目方位の真値を知ることができないため、正確な計測誤差を見積もることはできないが、両者にはある程度の計測誤差が存在する。そのような状況であっても、両者の卓越方位にほとんど差が無かったことから、点群に基づく割れ目方位は概ね妥当であったと推測する。しかしながら、割れ目方位を計測するためには、判読画像から割れ目を抽出できることが前提条件であり、この意味からも、割れ目方位の再現性は、割れ目のトレース長と割れ目面の密着性に依存する。

7・2 地質構造モデルの構築および水理解析への影響

ここでは、点群に基づき取得した割れ目属性情報を従来手法に基づくデータの代替として地質構造モデルの構築や水理解析に用いる場合の影響について考察する。亀裂性岩盤に対して構築される地質構造モデルのひとつは、個々の割れ目を確率論的に発生させて構築される割れ目ネットワークモデルである。点群に基づき取得した分布位置から求められる割れ目傾度、トレース長および割れ目方位は、そのモデル構築の際に必要なパラメータである。割れ目方位に関しては、点群に基づく割れ目方位と従来手法に基づく割れ目方位のそれぞれの卓越方位を比較した結果、その差は僅かであった (Fig. 14)。よって、割れ目方位がモデル構築に影響することはない。一方、点群から抽出できた割れ目の割合は 83.2%であり、さらにトレース長の再現率は、抽出できた割れ目

の平均で 68.7%であった (Fig. 11)。よって、地質構造モデルでは、割れ目傾度から換算される三次元割れ目密度とトレース長から推定される割れ目サイズが過小評価される。しかしながら、これらの過小評価が水理解析に与える影響は少ない。なぜなら、水理解析では、モデル化の対象が透水に寄与する割れ目に限定されるためである。深度 300 m 研究アクセス坑道の先行ボーリング調査では、本研究の対象範囲において、1,000 L/min を超える湧水が複数認められ、当該区間では、坑道掘削前にプレグラウチングが実施された²⁷⁾。その後の割れ目観察では、グラウト材の充填状況が着目された。グラウトが充填されている割れ目は、坑道と完全に交差する程度のトレース長を有し、さらに、炭酸塩鉱物の充填といった開口性の特徴を有するなど透水性割れ目に関連付けられている¹⁴⁾。このような特徴は、再現性の高い割れ目の特徴と一致する。

7・3 坑道掘削時の割れ目観察における課題解決への寄与

本研究の結果、割れ目の記載基準である‘抽出すべき割れ目’のほとんどを判読画像から抽出できることが確認できたが、判読画像に基づき作成されるトレースマップを従来手法のトレースマップのレベルに完全に一致させることは現状では難しい。すなわちトレースマップを作成する観点では、調査員の目視による割れ目観察を完全にレーザ計測に置き換えることはできない。一方、点群に基づく割れ目方位の計測は、従来手法と比べて遜色のない方法と言えるが、計測の有無は、トレースマップの精度に依存する。これらの結果を踏まえ、冒頭で述べた坑道掘削時に行われる割れ目観察における三つの課題に対して、レーザ計測のそれらの解決に対する寄与について述べる。

7・3・1 観察時間の短縮への寄与 掘削サイクル毎に割り当てられる観察時間は 1 時間程度であるのに対し、レーザ計測の所要時間は 20 分程度である。点群に基づく割れ目データは、従来手法に基づく割れ目データを完全に再現しておらず、また、点群から取得することができない、特に、定性的な割れ目属性情報は調査員の目視観察によって取得する必要がある。そのため、調査員の観察作業を完全にレーザ計測に置き換えることはできないので、単純に 20 分に短縮できる訳ではない。しかしながら、点群に基づくトレースマップの作成によって、ほとんどの‘抽出すべき割れ目’の分布位置とトレース長を取得できるため、調査員の現場での目視観察を大幅に簡略化できる。さらに、点群データに基づくトレースマップに示される割れ目の方位は、すべて室内作業として点群から測定可能であり、そのトレースマップを調査員の目視観察によって補完することを前提とする場合、現場での割れ目方位測定は不要になる。以上のことから、調査員の目視観察や割れ目方位測定の要する時間を短縮することができる。レーザ計測の最中でも観察作業を行うことが可能であるため、1 時間の観察時間を最短で 20 分に短縮できる可能性がある。

7・3・2 データ品質の平準化への寄与 割れ目観察終了後、坑道壁面は、原則として鋼製支保、ロックボルトおよび吹付コンクリートによる支保に覆われるため、遡り調査を行うことはできない¹³⁾。そのため、観察区間毎に調査員が異なり、データ品質にバラつきが生じたとしても、観察終了後にそれを改善することは難しい。そこで、点群から作成する判読画像が、バラつきを解消するための基礎データになり得る。点群に基づくトレースマップの再現性は完全ではないが、調査終了後に、割れ目の見落としがあったか否かを確認できるデータになる。さらに、割れ目方位測定は室内作業として行えるため、現場で測定を忘れたとしても問題とならない。よって、レーザ計測は割れ目データの平準化に寄与する。

7・3・3 データ取得精度の維持 調査員の労働災害防止の観

点から、露出した岩盤に接近した目視観察やクリノメーターを岩盤に当てた割れ目方位測定が行えない。そのため、割れ目データの取得精度が低下することが懸念される。この対策としてレーザ計測を導入することによって、調査員の目視観察を簡略化でき、現場での割れ目方位測定が不要になる。その結果、現場での観察作業において、調査員が岩盤に接近する必要性を大幅に減らすことができると同時に、調査員におけるデータ取得精度の低下はレーザ計測によって補うことができる。

8. ま と め

大規模な地下施設建設プロジェクトの坑道掘削時に実施される割れ目観察が、調査員の目視観察とクリノメーターなどを使用した割れ目方位の簡易計測といった従来手法に基づく場合、観察時間の短縮、データ品質の平準化およびデータ取得精度の維持の三つの課題が生じる。これらの課題解決には、レーザ計測の適用が有望である。しかしながら、十数 m 以上の長さの坑道を対象としてレーザ計測を行い、そのデータに基づく割れ目データと従来手法に基づく割れ目データを比較した事例が存在しない。そのため、それがどの程度従来手法に基づく割れ目データを再現できるのか分かっていない。本研究では、これを確認することを目的として、はじめに、レーザ計測データである点群から割れ目データを取得する方法を検討した。つぎに、検討した方法を、レーザ計測と割れ目観察が並行して行われた瑞浪研究所の深度 300m 研究アクセス坑道の長さ 55.4 m の区間に適用して割れ目データを取得し、従来手法に基づく割れ目データと比較した。本研究の成果は以下のとおりである。

- (1) ArcGIS の地形分析ツールを使用して、坑道壁面形状を表す点群から割れ目を抽出するための判読画像を生成し、それに基づき割れ目の分布位置とトレース長を示すトレースマップを作成する方法が構築された。さらに、トレースマップにおいて抽出した割れ目に対応する点群に基づき割れ目方位を算出する方法が構築された。
- (2) 点群に基づくトレースマップでは、割れ目観察の記載基準である 1 m 以上のトレース長を有する 250 条の割れ目のうち、83.2%にあたる 208 条が抽出され、トレース長の再現率は、抽出できた割れ目の平均で 68.7%であった。点群に基づく割れ目方位は、従来手法に基づく割れ目方位と比べても遜色ない。
- (3) 点群に基づく割れ目データの再現性は、割れ目のトレース長と割れ目面の密着性に依存しており、透水に寄与しないトレース長が短く密着性の強い割れ目の再現性は低い。一方で、透水に寄与しない割れ目は、水理地質構造モデルで考慮されないため、点群に基づく割れ目データをそのまま用いても水理解析結果に与える影響は小さい。
- (4) レーザ計測の導入によって、調査員の目視観察によるトレースマップの作成を簡略化でき、さらに、坑道内における割れ目方位測定を省略できるため、作業時間を短縮できる。
- (5) 坑道壁面形状を表す点群に基づく判読画像は、壁面観察終了後の室内作業において、割れ目のトレースマップの品質を平準化できる基礎データになり得る。さらに、室内作業において割れ目方位が取得可能であるため、その品質も平準化できる。
- (6) レーザ計測の導入によって、調査員が岩盤に接近する必要性を大幅に減らすことができると同時に、調査員におけるデータ取得精度の低下をレーザ計測によって補うことができる。

将来的には、レーザ計測技術や点群処理技術が飛躍的に向上すると予想され、それに伴い割れ目データの取得精度の向上が期待できる。また、客観的データの取得のために、点群を入力すると自動的に割れ目データを取得できるといったアルゴリズムを構築し、それをソフトウェア化することが今後の課題である。

謝辞 三次元レーザスキャナ計測を含めた研究坑道の壁面地質調査は、(国研)日本原子力研究開発機構および大林・大成・安藤ハザマ特定共同企業体の技術者によって実施された。また、本稿を纏めるにあたり、室蘭工業大学の鈴木幸司教授に点群を用いた形状分析に関してご議論いただき貴重な助言を頂いた。三井住友建設株式会社の山地宏志氏、大津慎一氏に点群処理に関してご指導頂いた。(国研)日本原子力研究開発機構の酒井利啓氏、山口正秋氏に ArcGIS の操作方法に関してご指導頂いた。本稿の匿名査読者 3 名からは、本稿を改善する上で有益なご意見を頂いた。ここに付記して謝意を表する。

References

- 1) NUMO: NUMO-TR-04-01, (2004).
- 2) M. Lato, J. Hutchinson, M. Diederichs, D. Ball and R. Harrap: *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **9** (2009), 935-946.
- 3) M. Lato, M. S. Diederichs, D. J. Hutchinson and R. Harrap: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **46** (2009), 194-199.
- 4) M. Sturzenegger, D. Stead: *Engineering Geology*, **106** (2009), 163-182.
- 5) P. Lai, C. Samson and P. Bose: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **72** (2014), 325-335.
- 6) G. Gigli and N. Casagli: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **48** (2011), 187-198.
- 7) M. J. Lato and M. Vöge: *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **54** (2012), 150-158.
- 8) P. Assali, P. Grussenmeyer, T. Villemin, N. Pollet and F. Viguier: *Journal of Structural Geology*, **66** (2014), 102-114.
- 9) J. Mah, C. Samson and S. D. McKinnon: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **48** (2011), 932-941.
- 10) S. Fekete, M. Diederichs and M. Lato: *Tunnelling and Underground Space Technology*, **25** (2010), 614-628.
- 11) S. Fekete and M. Diederichs: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **57** (2013), 11-23.
- 12) G. Wang, Q. Feng and K. Roshoff: In *ISRM International Symposium on Rock Mechanics-SINOROCK 2009*. International Society for Rock Mechanics.
- 13) T. Tsuruta and E. Sasao: *Journal of the Japan Society of Engineering Geology*, **56** (2016), 289-297.
- 14) M. Ishibashi, T. Ando, E. Sasao, T. Yuguchi, S. Nishimoto and H. Yoshida: *Journal of the Japan Society of Engineering Geology*, **55** (2014), 156-165.
- 15) T. Yuguchi, T. Tsuruta, T. Nishiyama: *Japanese Magazine of Mineralogical and Petrological Sciences*, **39** (2010), 50-70.
- 16) Japan Atomic Energy Agency: <https://www.jaea.go.jp/04/tono/jigyuu/160420/h28gaiyo.pdf>, (2016).
- 17) T. Tsuruta, M. Tagami, K. Amano, T. Matsuoka, A. Kurihara, Y. Yamada and K. Koike: *The Journal of the Geological Society of Japan*, **119** (2013), 59-74.
- 18) Japanese Geotechnical Society: *New Designation and Explanation of Japanese Geotechnical Society, Method for Engineering Classification of Rock Masses* (JGS3811-2004), (2004), pp.54-56.
- 19) K. Kawamoto, K. Kuboshima, M. Ishibashi, T. Tsuruta, E. Sasao, K. Ikeda, S. Mikake, I. Hara and M. Yamamoto: *JAEA-Data/Code 2012-009*, (2012).
- 20) H. Mochida, K. Amano and T. Tsuruta: *Journal of the Japan Society of Engineering Geology*, **48** (2007), 126-131.
- 21) K. Sasaki and K. Ota: *JNC-TN7400 2004-007*, (2004).
- 22) E. Sasao, T. Yuguchi, Y. Ito, T. Inoue and M. Ishibashi: *10th Asian Regional Conference of International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG ARS 2015)* (USB Flash Drive).
- 23) M. Ishibashi, A. Kurihara, T. Matsuoka and E. Sasao: *JAEA-Research 2012-018*, (2012).
- 24) Y. Morita and K. Watanabe: *Proceedings of the Symposium on Rock Mechanics*, **32** (2003), 365-370.
- 25) S. Takeuchi, R. Takeuchi and K. Ando: *Proceedings of the Institute of Natural Sciences, Nihon University*, **45** (2013), pp.95-110.
- 26) K. Shiono, K. Masumoto and K. Wadatsumi: *Pasokon niyoru ChishituzugakuEnshuu*, (Kyoritsu Shuppan Co., Ltd., Tokyo, 1990), pp.5-38.
- 27) S. Mikake, M. Yamamoto, K. Ikeda, K. Sugihara, S. Takeuchi, A. Hayano, T. Sato, S. Takeda, Y. Ishii, H. Ishida, H. Asai, M. Hara, M. Kuji, K. Minamide, H. Kuroda, H. Matsui, T. Tsuruta, R. Takeuchi, H. Saegusa, T. Matsuoka, T. Mizuno and T. Oyama: *JAEA-Technology 2010-026*, (2010).