

# 3D形状測定機およびX線CTを用いた 岩石不連続面のラフネス測定

上野 徳馬<sup>1\*</sup>・吉田 龍人<sup>1</sup>・中島 伸一郎<sup>1</sup>・Song CHENLU<sup>2</sup>・岸田 潔<sup>2</sup>

<sup>1</sup>山口大学大学院 創成科学研究科建設環境系専攻 (〒755-0097 山口県宇部市常盤台2丁目16-1)

<sup>2</sup>京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8510 京都府京都市西京区京都大学桂)

\*E-mail: i016ve@yamaguchi-u.ac.jp

X線CTは岩石内部のき裂を非破壊に観察する有効な手段であるが、き裂面の凹凸やき裂開口幅分布、接点分布などの情報を精緻に測ろうとすると、その精度が課題となる。本研究ではX線CTによる岩石き裂面凹凸形状の計測精度を把握することを目的とする。直径14 mm×長さ31 mmの単一き裂を有する花崗岩供試体をマイクロフォーカスX線CTにより撮像し、エッジ検出法に基づく画像解析によりき裂面凹凸形状を求めた。同時に、3D形状測定機によってき裂表面の標高分布を直接的に計測し、CT画像から求めた凹凸形状との比較を行った。比較の結果、X線CTから求めたき裂面の凹凸形状は、3D形状測定機による標高分布に対して、240μmの誤差があることが明らかとなった。

**Key Words :** image processing, rock fracture, X-ray CT, discontinuous face roughness, registration

## 1. はじめに

放射性廃棄物地層処分計画では、人工バリアが経年劣化して放射性物質が地下水に沿って流出することを想定し、天然バリアである岩盤の地質学・力学・水理学的特性を詳細に把握する必要がある<sup>1)</sup>。岩盤不連続面は、地圧の変化や温度環境の変化の影響を受けて開口状況を変化することから、その定量的評価はとくに重要である。

応力や熱が岩盤不連続面の開口・接触状況に与える長期的な影響を検討するため、単一き裂を有する岩石試料を用いて室内実験が実施されている<sup>2)</sup>。実験では、X線CTにより、载荷中のき裂の状態を非破壊的に観察している。CT撮像結果からき裂の形状を精緻に測定するためには画像処理が重要である。これまでの研究から、単純な二値化処理で岩石部分とき裂部分を分離する方法は、閾値設定の困難さを避けることができず、き裂を精度よく抽出できないこと、Canny法に基づくエッジ検出を用いることで、き裂壁面の形状を抽出しやすいことが明らかになっている<sup>2,3)</sup>。

一方、CT画像に対するエッジ検出により得られたき裂面形状の計測結果の正確さについては未検証であった。そこで本研究では、き裂面を開いて3D形状測定機により表面形状を測定し、CT画像から得られた表面形状との比較を行うことで測定の正確さを検証することとした。

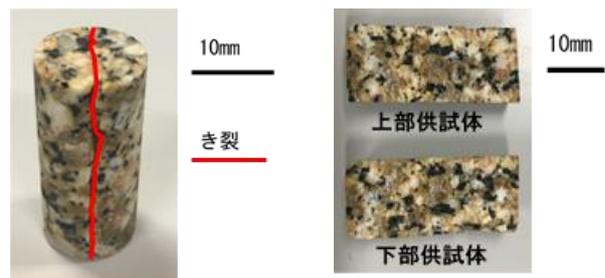
## 2. ラフネス測定

### (1) 供試体

本研究で使用した供試体は直径14 mm、高さ31 mmの花崗岩(図-1)である。愛知県豊田市安永川付近のトンネル現場から花崗岩の掘削ズリを採取し、120 mm×80 mm×32 mmのブロックに成形したのち、コアカッターで直径14 mmに成形した。その後、割裂によりコアの中心軸に沿う単一き裂を作成した。一軸圧縮強さは123 MPaである。

### (2) 3D形状測定機によるラフネス測定

3D形状測定機(VR-3200, キーエンス社)を用いて、き裂面を開いた状態で標高分布を測定した。この測定機は、LED投光部から縞状の光を照射し、対象物の凹凸による縞のひずみを受光部で取り込んで、三角測量による



(a) 外観

(b) 亀裂面

図-1 花崗岩供試体

演算により各点の高さと位置を測定するものである（光切断法）。測定精度は今回の条件では水平方向（x, y 方向） $\pm 5\mu\text{m}$ 、高さ方向（z 方向） $\pm 3\mu\text{m}$  である（キーエンス：VR-3200 - ワンショット 3D 形状測定機，<https://www.keyence.co.jp/ss/products/microscope/roughness/equipment/3d-measurement.jsp>）。図-2 に示すように、測定と同一領域のカラー画像が同時に得られることも本測定の特徴である。今回は水平方向の計測間隔は  $23\mu\text{m}$  とした。

図-2 にき裂面（両面）の標高分布図をカラーマップにより示す。標高の基準面（ゼロ高さ）は、最高点・最低点から自動的に設定されている。図-2 より、き裂面の最大高低差は上部供試体で  $2.21\text{mm}$ （最高点 $+957.2\mu\text{m}$ 、最低点 $-1254.0\mu\text{m}$ ）、下部供試体で  $2.45\text{mm}$ （最高点 $+1068.5\mu\text{m}$ 、最低点 $-1384.9\mu\text{m}$ ）であった。この供試体のラフネスは最大高低差  $2.5\text{mm}$  程度の粗さを有しているといえる。なお、一般のレーザプロファイラでは、透明に近い表面は測れない（検出エラー）ことが多いが、今回用いた 3D 形状測定機では検出エラーは生じなかった。

### (3) X線CTによるラフネス測定

マイクロフォーカスX線CT（inspeXio SMX-225CT，島津製作所）を用いて花崗岩供試体を撮像した。撮像条件を表-1に示す。

長さ  $31\text{mm}$  の供試体に対して  $1654$  枚の画像が得られた。

水平断面CT画像の一例を図-3に示す。画像中央を左右に貫く黒い細帯がき裂である。グレー部分が岩石で、白い模様は高密度の鉱物部分に該当する。画像の座標軸は左上コーナーを原点として、右向きにx軸、下向きにy軸、紙面直交方向がz軸である。

### (4) CT画像に対するエッジ検出によるき裂形状の抽出

CT画像に対してSobelフィルタによるエッジ検出を施して、き裂を抽出した。エッジは画素値（CT値）の空間的な勾配を表し、2次元でいえば次式である。

$$L = \sqrt{\left(\frac{\partial f_x}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_y}{\partial y}\right)^2} \quad (1)$$

ここで、 $L$ は勾配の大きさ、 $f$ は画素値である。画像のx方向、y方向それぞれの勾配 $\partial f/\partial x$ 、 $\partial f/\partial y$ はSobelオペレータと呼ばれる次の検出器をかけることで算出する<sup>3)</sup>。

$$D_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad D_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

実際には、水平断面内だけでなく奥行方向（z 方向）も考慮した 3 次元的なエッジ検出を実施した。3 次元エッジ検出処理後のエッジ画像の一例を図-4 に示す。このようなエッジ画像を二値化後（閾値 254），き裂相当部分、すなわち上部供試体の場合は下側輪郭，下部供試体の場合は上側輪郭，を取り出した。輪郭の抽出にあたっては、

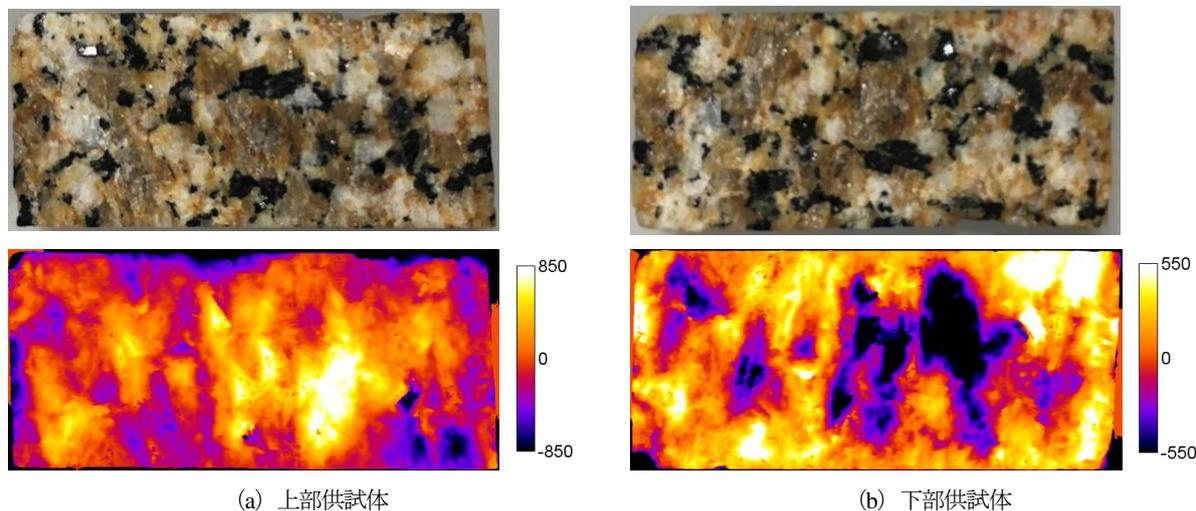


図-2 3D形状測定機から得られた標高分布画像

表-1 撮像条件

Voltage [kV]	110	FDD [mm]	400
Current [ $\mu\text{A}$ ]	40	FCD [mm]	54
Slice thickness[mm]	0.02	Pixel size [mm]	0.01695
Matrix size	$1024^2$	Magnification	14.931
Number of projection	1200	Images integrated for one projection	5

図-5に示すように、画像端部からy方向にピクセル値を探索していき、エッジに当たった時のピクセル位置をき裂と判定する自動探索を行っている。

各スライス毎に抽出したき裂部分のピクセルをz軸方向に重ねることによって、供試体のき裂面の標高分布を求めた。図-6にき裂面の標高分布図を示す。

### (5) SIFT法による画像位置合わせ処理

3D形状測定機による標高分布画像(図-2)とX線CTから取得した標高分布画像(図-6)の座標を合わせるために、SIFT法<sup>9)</sup>に基づく画像間の特徴点同定とアフィン変換による拡大・回転・移動補正を実施した。アフィン変換による相似変形は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} X_n \\ Y_n \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda \cos \theta & -\lambda \sin \theta & T_x \\ \lambda \sin \theta & \lambda \cos \theta & T_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 $\lambda$ は拡大・縮小率、 $\theta$ は回転角度、 $T_x$ 、 $T_y$ はそれぞれx、y方向の平行移動量である。結果として、3D形状測定機による標高分布画像(図-2)に対するCTによる標高分布画像(図-6)の変換パラメータは、上部供試体で拡大縮小率 $\lambda = 0.86$ 、回転角度 $\theta = 1.57^\circ$ 、平行移動量 $T_x = -197.5 \text{ px}$ 、 $T_y = -547.7 \text{ px}$ 、下部供試体で $\lambda = 0.86$ 、 $\theta = 1.57^\circ$ 、平行移動量 $T_x = -193.9 \text{ px}$ 、 $T_y = -558.2 \text{ px}$ 、と得られた。

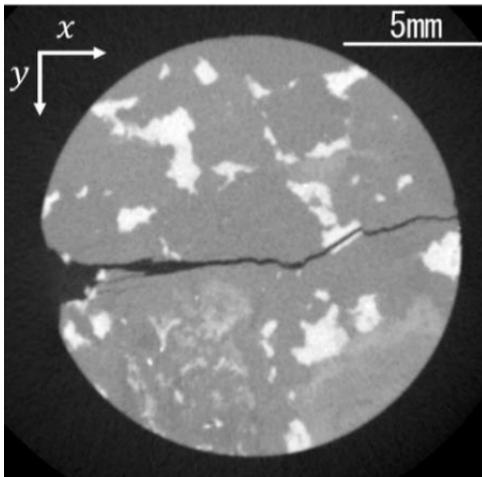


図-3 供試体断面のCT画像

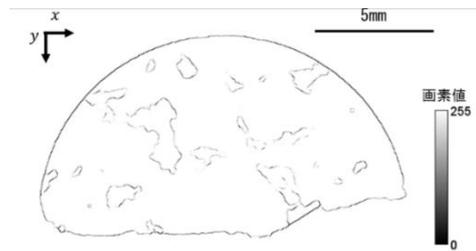


図-4 エッジ検出実行後のCT画像

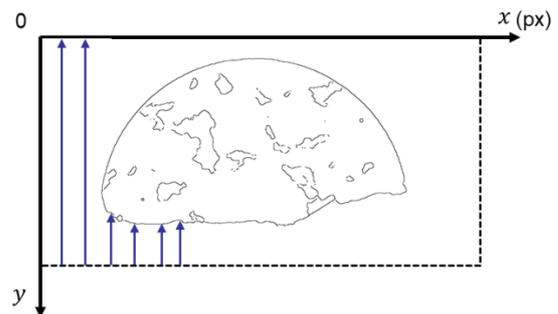
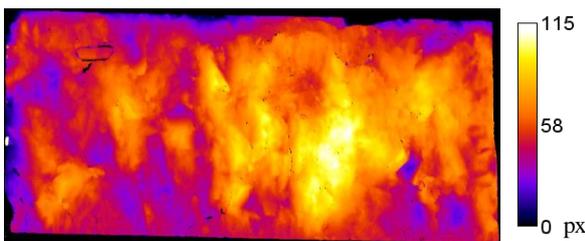
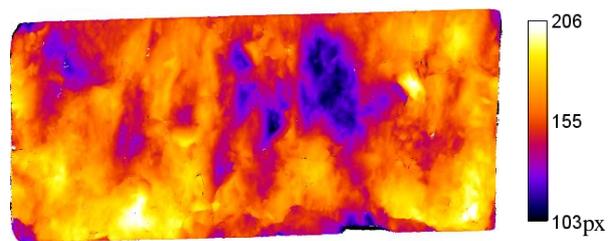


図-5 不連続面ピクセル座標の取得方法



(a) 上部供試体



(b) 下部供試体

図-6 CT画像から求めた標高分布画像

位置合わせ処理後のCT標高分布画像から算出したき裂面の最大高低差は上部供試体で3.10 mm、下部供試体で6.75 mmとなった。2(2)で示した3D形状測定機による最大高低差(上部供試体で2.21 mm、下部供試体で2.45 mm)に比べるとCT画像による標高分布の高低差が大きいのは、測定時の供試体の姿勢の差異によるものと推測される。すなわち、上述の画像位置合わせ処理により面内の位置合わせは行われているものの、面外回転の姿勢補正が残っている。

### (6) 姿勢補正

面外回転に関する姿勢補正については、標高分布の平均平面(最小二乗平面)を求めて処理することとした。具体的には、3D形状測定機によるき裂面標高分布、CT画像処理によるき裂面標高分布について、それぞれ最小二乗平面を求め、測定標高から最小二乗平面標高を差し引くことで、疑似的に平均平面を水平に合わせた。平均平面の法線ベクトルを比較したところ、3D形状測定機による標高分布の平均平面に対して、CT画像処理による標高分布の平均平面は、上部供試体で $6.61^\circ$ 、下部供試体で $3.83^\circ$ の傾きを有していた。

### 3. 測定精度評価

前節の手順で位置合わせおよび姿勢補正を行った CT 画像処理による標高分布と 3D 形状測定による標高分布の最終処理結果を図-7 に示す。図より CT 画像処理による標高分布図 (上部供試体(a), 下部供試体 (b)) は 3D 形状測定による標高分布図 ((c),(d)) と凹凸状況がおおむね一致していることが確認できる。

図-8 は、CT 画像処理による標高から 3D 形状測定による標高を差し引いたものである。図より、上部・下部

供試体ともに標高差は±200μm に収まり、全体的に偏りなく平坦になっていることがわかる。前節の位置合わせおよび姿勢補正が有効に機能したといえる。なお、上部供試体の右上および下部供試体の下端沿いにマイナスの領域が確認できる。これは、3D 形状測定から CT 撮像までの間に試料隅角部に欠損が生じたためであることを確認している。

図-7 の標高分布を詳細に検討するため、各分布図の中心測線の標高を抜き出したものを図-9 に示す。図より、CT による標高波形は 3D 形状測定によるものとほぼ一

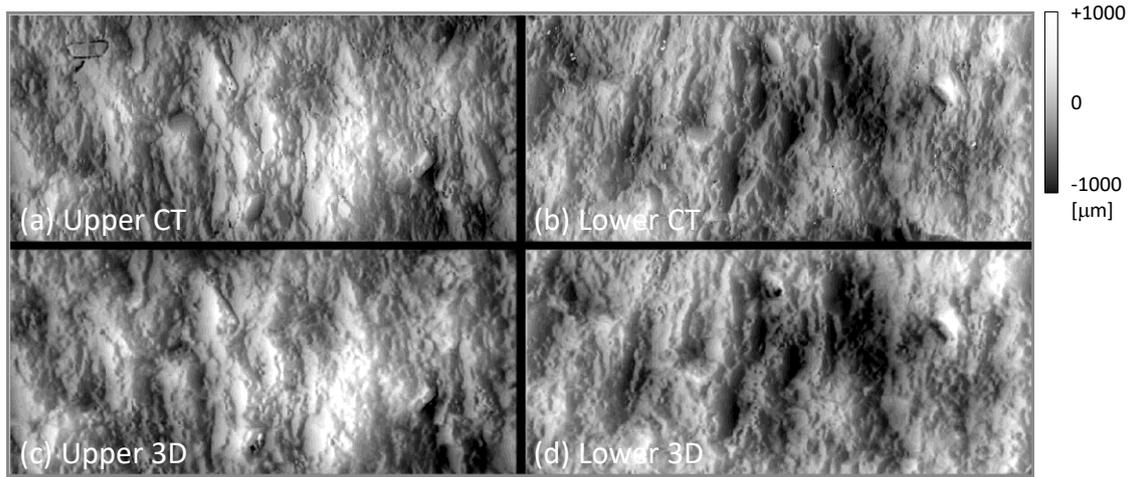


図-7 CT 画像処理および 3D 形状測定によるき裂表面の標高分布測定結果

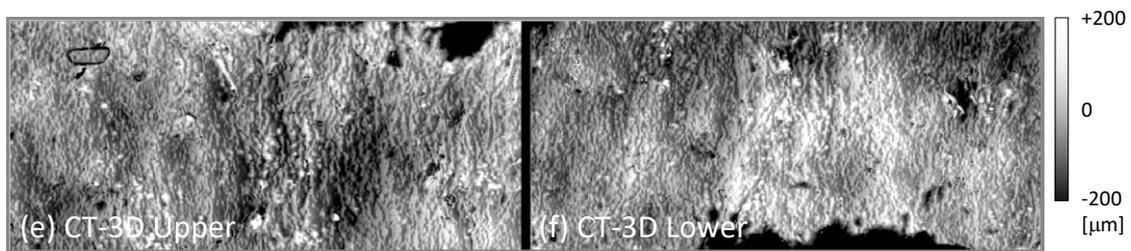


図-8 標高差分布図 (CT画像処理による標高から3D形状測定による標高を差し引いたもの)

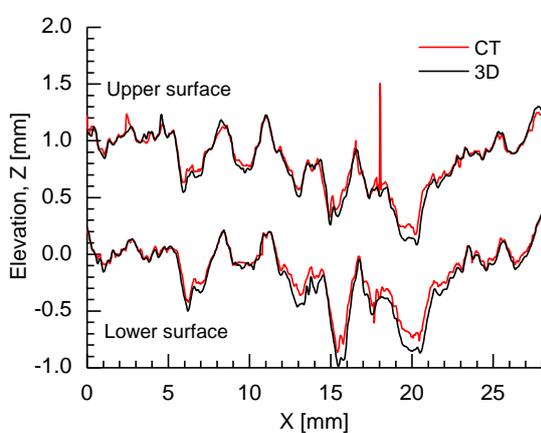


図-9 図-7の中心測線上の標高分布

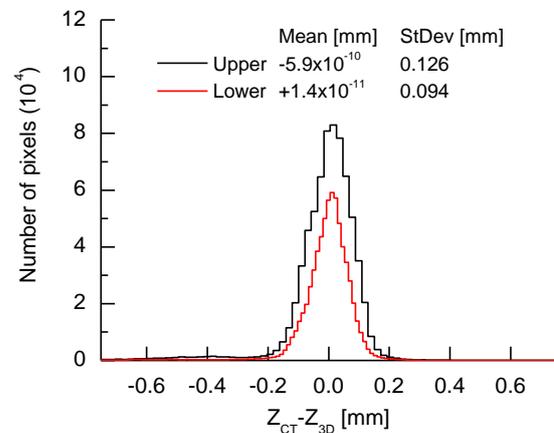


図-10 標高差 (図-8) のヒストグラム

致していることが確認できる。X=15 mm, 20 mm あたりで差異が見られるが最大でも 0.2 mm 程度である。また、X=18 mm あたりの CT による標高がスパイク状に異常値を示しているが、これはエッジ検出時にき裂壁面の抽出に失敗した検出エラーによるものである。

図-10は、図-8で求めた標高差のヒストグラムを示している。ヒストグラムより、標高差はゼロを中心に左右対称に分布しており、標準偏差は上部供試体で0.126 mm, 下部供試体で0.094 mmとなった。これより、今回の測定条件では、CT画像処理によるき裂面形状の測定精度は、3D形状測定機による測定に対して約0.1 mm程度のばらつきを有しているといえる。なお、この標準偏差は、試料隅角部の欠損エリアも含んだものであり、欠損エリアを除いた場合には標準偏差は0.07 mm程度であることを確認している。

#### 4. まとめ

本研究では、X線CT画像に対するエッジ検出により得られたき裂面形状の計測結果の正確さを把握すること

を目的とし、3D形状測定により取得した標高分布とCT画像処理により取得した標高分布の比較を行った。測定結果の比較に先立って、SIFT法による画像間の位置合わせおよび姿勢補正等の処理を実施した。

最終的に得られた標高分布測定結果によれば、X線CTによるき裂面形状測定結果は、3D形状測定機による結果に対して0.1 mm程度のばらつきを有することがわかった。

#### 参考文献

- 1) 安原英明, 木下尚樹, Dae Sung Lee, 中島伸一郎, 岸田潔: 力学-化学連成概念モデルによる花崗岩不連続面の透水・物質輸送経時解析, 土木学会論文集C, P.41, 2009.
- 2) 石川智優:  $\mu$ フォーカスX線CTを用いた三軸拘束圧下における岩盤不連続面形状の抽出と透水特性の実験的評価, 京都大学修士論文, 2016.
- 3) Canny, J., A Computational Approach To Edge Detection, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8:679-714, 1986.
- 4) David G. Lowe, Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, International journal computer of vision, 60 (2), pp. 91-110, 2004.

## MEASUREMENT OF ROCK DISCONTINUOUS FACE ROUGHNESS BY X-RAY CT AND 3D LASER PROFILER

Tokuma UENO, Ryuto YOSHIDA, Shinichiro NAKASHIMA, Song CHENLU and Kiyoshi KISHIDA

In order to verify the accuracy of the rock discontinuity shape from the X-ray CT images, the method of measuring the elevation of rock discontinuities by X-ray CT image processing, measurement accuracy using a 3D laser profiler, correcting posture error of rock specimen. In the elevation measurement, the altitude distribution was acquired after three-dimensional edge detection, binarization, and discontinuity surface search. Measurement evaluation was carried out by comparing the elevation distribution acquired from the CT and 3D laser profiler by the SIFT. Posture correction was performed by obtaining the least squares plane of the altitude distribution and subtracting from the original altitude distribution.