

令和元年6月24日現在

機関番号：15501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14306

研究課題名(和文) 微小圧子押込みによる岩石亀裂の圧力溶解現象と物性変化の直接観測

研究課題名(英文) Observation of pressure solution on rock fracture surface

研究代表者

中島 伸一郎 (Nakashima, Shinichiro)

山口大学・大学院創成科学研究科・准教授

研究者番号：70346089

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：微小圧子による岩石亀裂の圧力溶解沈殿現象の直接観測を実現するための基礎技術として、マイクロフォーカスX線CTを用いた亀裂開口・接触状態の計測方法の開発を行った。X線CT画像に対してCanny法に基づくエッジ検出処理を行うことで、亀裂の開口幅や接触面積を高精度に計測可能であることを実証した。CT画像のレジストレーション法も検討し、撮像時期の異なるCT画像の座標合わせが可能となった。これらの画像処理技術は微小圧子押込み実験の計測技術のひとつとして活用される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震発生メカニズムの解明や高レベル放射性廃棄物の地層処分の計画、地中深部で行われる強化地熱システム(EGS)の開発などの地中深部のプロジェクトにおいて、亀裂の透水性や摩擦強度の長期変化は極めて重要な課題である。本研究では、亀裂接触部近傍で発生する圧力溶解沈殿現象を室内実験で直接観測する微小圧子押込み実験のための基礎技術として、X線CTによる亀裂開口・接触状況の計測技術を開発した。この技術により、亀裂内部の接触位置・面積を非接触で高精度に計測することが可能となった。

研究成果の概要(英文)：In measuring rock fracture apertures and contact area from X-ray CT images, a binarization method has generally been used to separate the air void parts (fractures) from the rock parts. However, reasonable thresholding is often an essential problem in this method, especially for heterogeneous rock materials. This study suggests a new method for detecting fracture surfaces from CT images using an edge detection algorithm that is known well in the field of image processing as Canny edge detection. Applying this edge detection method to the CT images of a single granite fracture, 15 mm in diameter and 30 mm in length, this study successfully measures the fracture surface geometry, the aperture distribution, and the contact ratio. This image processing approach will be a useful measuring tool for micro-indentation experiment for rock fractures.

研究分野：岩盤力学

キーワード：岩石亀裂 圧力溶解沈殿 微小圧子 X線CT

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

エネルギー分野における近年のシェール革命、地熱 EGS 計画、放射性廃棄物地層処理等の課題を受け、地層岩石の亀裂物性に対する化学的影響の合理的評価のニーズが高まっている。岩石亀裂の透水性や摩擦強度が長期的に変化する主要因のひとつは、亀裂接触部付近での圧力溶解沈殿と言われているが、この化学的プロセスと力学現象への影響を直接的に観察した事例は極めて少ない。従来の単一亀裂を用いた圧力溶解に関する実験では、亀裂面を重ね合わせたときの真の接触位置と接触面積の特定は極めて困難であり、結果的に接触圧の大きさも鉱物の種類も特定できないという実験上の制約がある。

本研究は、岩石亀裂の圧力溶解沈殿を実証するためには、①圧力溶解沈殿が生じる位置を制御すること、②圧力溶解沈殿が生じる高い接触圧を作り出すことが不可欠であることに着目し、解決策としてマイクロインデンテーション用の微小圧子を岩石表面に長時間押し当てることで圧力溶解沈殿を生じさせる方法を着想した。載荷面積を抑えることで高い接触圧を与えることができ、回転摩擦試験や除荷試験と組み合わせることで、圧力溶解沈殿後の押込み箇所での摩擦強度や固着度も測定可能である。

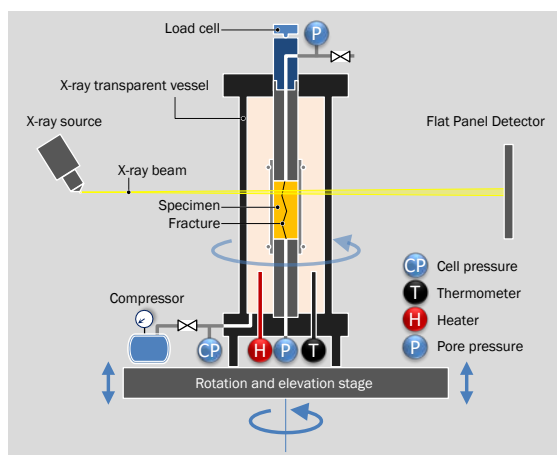
2. 研究の目的

本研究は、岩石亀裂の圧力溶解沈殿とそれに伴う亀裂物性変化を直接観測する新手法の開発を目指す。岩石亀裂の圧力溶解沈殿を実証するために、マイクロインデンテーション用の微小圧子を、岩石表面に長時間押し当てることで、圧力溶解沈殿を生じさせる手法を検討する。特定箇所の変形を経時観察し、圧力溶解沈殿後の押込み箇所での固着度と摩擦強度を計測することで、圧力・温度・時間に依存する鉱物ごとの溶解沈殿量と、これに伴う固着度・摩擦強度変化の定量評価を可能にする。本研究期間では、岩石亀裂の接触状況の直接観測のための基礎技術として、X線 CT 画像処理技術の開発と精度検証に注力した。

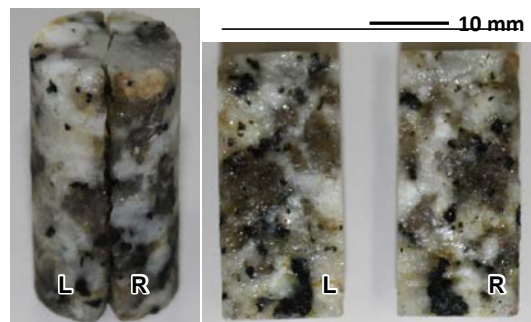
3. 研究の方法

(1) エッジ検出に基づく亀裂接触状況計測のための X 線 CT 画像処理法の検討 (図-1)

不連続面の室内実験において試料の拘束や透水環境を維持したまま内部構造を可視化できる X 線 CT は、亀裂の開口・接触状態をその場観察しうる数少ない方法のひとつである。一般に X 線画像からのき裂測定では、CT 値に閾値を設けて 2 値化し岩石と空隙を分離する。ところが実際には、鉱物配置の不均質性や光線効果などの影響を受けて有効な閾値の設定自体が困難な場合が多い。本研究では、画像処理におけるエッジ検出のアルゴリズムを用いて CT 値の空間的勾配からき裂を抽出する手法を試みた。直径 15mm×長さ 30mm の縦割れき裂を有する花崗岩試料の CT 画像に対してエッジ検出を適用し、接触率の算定等を行った。



(a) X線透過型三軸セル



(b) 単一亀裂を有する花崗岩供試体

図-1 X線 CT スキャナによる花崗岩供試体の撮像

(2) X 線 CT 画像処理による亀裂形状計測の精度検証 (図-2)

X 線 CT 画像のエッジ検出で得られる岩石亀裂形状の計測精度を検証することを目的とし、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 により撮像するとともに、エッジ検出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 レーザプロファイラによって亀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。

(3) CT 画像のレジストレーション法の検討および亀裂面形状の長期変化 (図-3)

異なる時期に撮像された X 線 CT 画像から岩石亀裂の開口・接触状況の経時変化を追跡するためには、撮像時の供試体の位置や姿勢を考慮した CT 画像の座標合わせ (レジストレーション) が必要となる。本研究では、SIFT 法に基づく画像のレジストレーションを行い、撮像時期間の

画像のずれを補正することを試みた。さらに、(1)～(3)で開発された一連のCT画像処理法を用いて、単一亀裂を有する花崗岩供試体の長期拘束圧・加温実験 (Ishikawa et al., 2015) のCT画像を処理し、拘束圧および温度による亀裂の開口・接触状況の変化を追跡した。

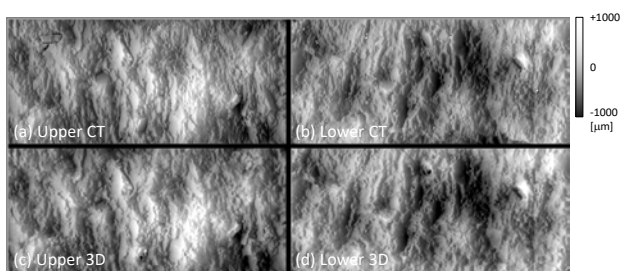


図-2 X線CT画像処理および3Dレーザプロファイラで計測した亀裂面ラフネス形状

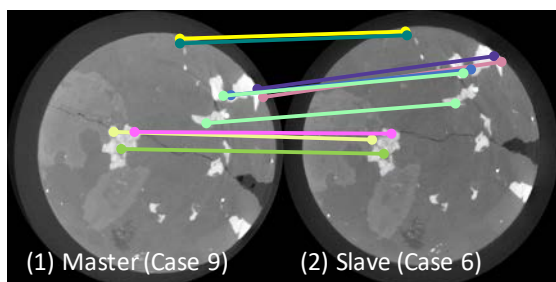


図-3 異なる時期に撮像されたX線CT画像のSIFT法に基づく座標合わせ

4. 研究成果

(1) エッジ検出による亀裂形状の抽出

図-4はCT生画像(左から1番目)からCanny法に基づくエッジ検出を行い、亀裂面形状を抽出した例である。Sobel Filterによるエッジ検出から、細線化(非最大エッジ抑制)処理、ノイズ処理というプロセスを通して、亀裂形状(右から1番目)が抽出される。図-5は、二値化法(従来法)とエッジ検出法により求めた亀裂形状と開口幅分布を比較したものである。両者の接触率を比較すると、二値化法では67%,エッジ検出法では7.7%と、10倍程度の差が生じた。新鮮な岩石亀裂の非拘束圧条件下での接触率として7%程度という値は妥当であり、エッジ検出法の有効性が確認された。

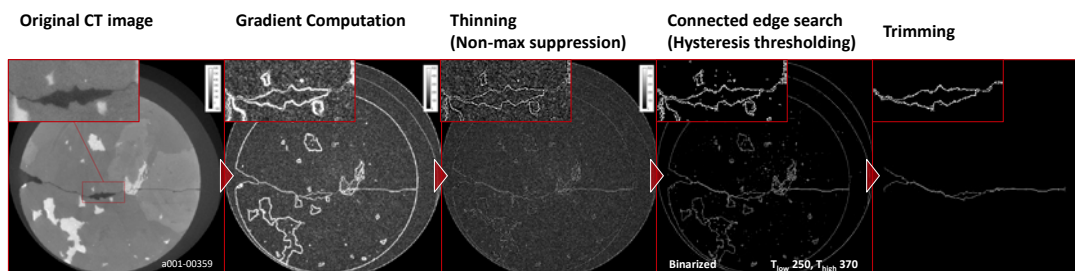


図-4 Canny法に基づくエッジ検出による亀裂面形状の抽出プロセス

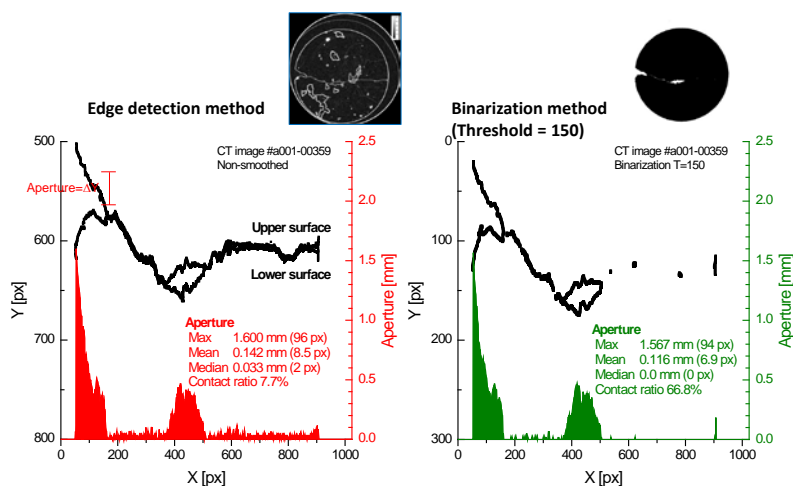
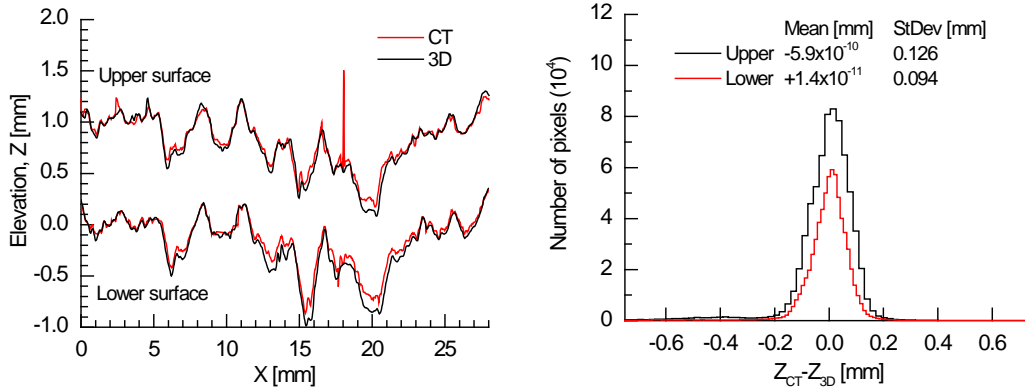


図-5 エッジ検出法(左)および二値化法(右)による亀裂面形状と開口幅分布の比較

(2) エッジ検出法による亀裂形状計測の精度の検証

図-6(a)は、X線CT画像のエッジ検出により求めた岩石亀裂面の標高分布(赤)と3Dレーザラフネスプロファイラにより求めた標高分布(黒)を比較した例である。図より、CTによる標高波形は3Dラフネスプロファイラによるものとほぼ一致している。図-6(b)の標高差ヒストグラムについての比較から、CT画像処理による測定精度は、3Dラフネスプロファイラに対して約0.1mm程度のばらつきを有していることが明らかとなった。なお、この標準偏差は、試料隅角部の欠損エリアを含んだものであり、欠損エリアを除いた場合には標準偏差は0.07mm程度であることを確認している。



(a) 図-2の中心測線上の標高分布

(b) 標高差のヒストグラム

図-6 X線CTと3Dレーザラフネスプロファイラによる亀裂面形状測定精度の比較

(3) エッジ検出法による亀裂形状計測の精度の検証

図-7は、単一亀裂を有する花崗岩試料の長期拘束圧・加温実験(Ishikawa et al., 2015)についてCT画像処理により亀裂開口幅と接触率の経時変化を求めたものである。この実験では、表-1に示すように、亀裂に対して3MPaの拘束圧を約100日間与え、その後、試料温度を60℃まで上げた。図-7(b)より、20℃のCase 1~7では平均開口幅にほとんど変化がない。一般に拘束圧を大きくすると亀裂が閉じることが推察されるが、本実験では、拘束圧の増減や高い拘束圧の長期保持は開口幅に大きな影響を与えていないという結果になった。一方、温度が20℃から60℃に上昇すると、それまで0.19mm前後を推移していた平均開口幅が大きく増加し約0.21mmとなった。これは加温による供試体の熱膨張が原因で亀裂開口幅が広がったためだと考える。拘束圧一定条件で実験しているため、供試体外向きも含めた全体的な膨張が生じ、鉱物に応じた熱膨張率の違い等によって、き裂接触点の微小なずれが生じて結果的に開口幅の拡大につながったと推測する。

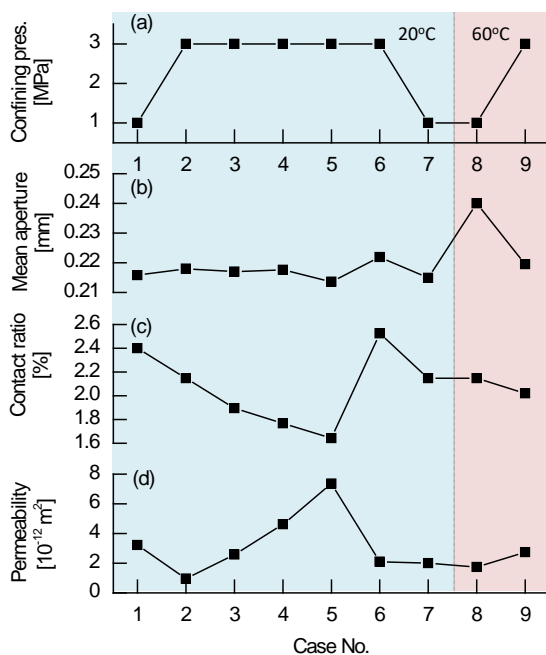


表-1 単一亀裂を有する花崗岩試料の長期拘束圧・加温実験

Case	拘束圧	温度	経過日数
1	1 MPa	20℃	0日
2	3 MPa	20℃	11日
3	3 MPa	20℃	42日
4	3 MPa	20℃	88日
5	3 MPa	20℃	92日
6	3 MPa	20℃	98日
7	3 MPa	20℃	117日
8	1 MPa	60℃	154日
9	3 MPa	60℃	160日

図-7 長期拘束圧・加温実験中の亀裂開口幅、亀裂接触率および透水係数の経時変化

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕（計9件）

- 1) 上野徳馬, 吉田龍人, 中島伸一郎, Song Chenlu, 岸田潔: 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, 第46回岩盤力学に関するシンポジウム, 2019.
- 2) 上野徳馬, 吉田龍人, 中島伸一郎: X線CT画像処理による岩石不連続面のラフネス測定, 土木学会中国支部第70回研究発表会, III-21, 2018.
- 3) 吉田龍人, 上野徳馬, 中島伸一郎, 岸田潔: 花崗岩X線CT画像のヒストグラムに基づく非き裂ピクセル除去処理, 土木学会第73回年次学術講演会, 2018.
- 4) 吉田龍人, 上野徳馬, 中島伸一郎, 宋忱潞, 岸田潔: SIFT法による花崗岩CT画像のレジストレーションとき裂開口幅の観察, 第39回西日本岩盤工学シンポジウム, pp.5-8, 2018.
- 5) Yoshida, R., Nakashima, S., Yoshizu, Y., Song, C., Kishida, K.: Co-registration of CT images by SIFT method and observation of temporal changes in granite fracture aperture under long-term loading, 52nd US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, ARMA-2018-1253, 2018.
- 6) 吉田龍人, 中島伸一郎, 清水則一: 岩石不連続面の開口幅分布計測のためのX線CT画像処理法の検討, 平成29年度土木学会中国支部研究発表会, III-24, pp.205-206, 2017.
- 7) 吉田龍人, 中島伸一郎, 清水則一, 岸田潔: μ CT画像処理による花崗岩不連続面の開口幅分析計測手法の検討, 第38回西日本岩盤工学シンポジウム, pp.15-18, 2017.
- 8) Nakashima, S., Sakamoto, T., Yasuhara, H., Kishida, K.: Observation and quantification of fracture aperture in granite core using X-ray tomography and edge detection technique, 51st US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, No.0247, 2017.
- 9) 中島伸一郎, 石川智優, 坂本隆, 岸田潔: X線画像のエッジ検出による岩石き裂開口幅の評価, 第14回岩の力学国内シンポジウム, 講演番号069, 2017.

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。