

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04047

研究課題名(和文) 亀裂連結性の定量評価手法の開発と亀裂連結性が岩石の物性に与える影響

研究課題名(英文) Characterization of fracture network of cracked rocks and prediction of these transport properties

研究代表者

高橋 美紀 (Takahashi, Miki)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・研究グループ長

研究者番号：40470033

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：岩石に含まれる亀裂の連結性は地下深部での流体の移動を制御する重要な要素であるにもかかわらず、亀裂のジオメトリと浸透率や電気伝導度などの物性との関係は明解ではない。この研究では、加熱・急冷により人工的に亀裂を入れた花崗岩試料のマイクロフォーカスX線CT画像を用い、亀裂の抽出と特徴の解析、測定された浸透率・電気伝導度との比較を行った。CT画像から亀裂のみ抽出するために、Trainable Weka Segmentationやtextured Renyi entropy法を利用し、亀裂ネットワークの中で最も重要なボトルネックの位置の特定にPersistent homology解析を利用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地下深部の流体移動は、亀裂の連結性は地下深部から地表への流体そのものの移動のみならず付随して圧力や熱の移動をも強くコントロールしているにもかかわらず、多孔質媒体に比べてそのジオメトリの複雑性や不均質な分布により、孔隙率などの情報のみでは浸透率などの流体移動特性を推定するのは困難である。本研究では、亀裂ネットワークを持つ岩石の、流体移動に最も強く寄与する流路の特徴を抽出する手法の開発に取り組んだ。本研究は地球のダイナミクスに関する諸問題の解決に貢献するだけでなく、亀裂性貯留層における水・熱資源等の開発のうえでも重要な情報を提供可能である。

研究成果の概要(英文)：Although rough correlations between the fracture geometries and the measured transport properties, such as porosity-permeability relationship have been proposed, we have not fully clarified the relationship between the structure of fracture network and measured properties. In this research, we challenged to establish a method how to extract characteristics of the fracture network, using 3D volume of microfocus X-ray CT images of thermally cracked granite rock specimen, and will compare between the measured and calculated transport properties: permeability and electrical conductivity. Using a trainable segmentation technique (a plugin, trainable wake segmentation, installed in Fiji), we could extract 8-bit gray scale 3D crack images. Then those images were binarized by textured Renyi entropy method. We finally compared the measured permeabilities and estimated ones from the binarized images based on persistent homology analysis which provides a size of pore of the critical path.

研究分野：構造地質学

キーワード：亀裂ネットワーク 浸透率 電気伝導度 弾性波速度

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地殻における水(流体)の通り道である亀裂の分布・連結性は、地殻の水の分布や、間隙水圧の大きさとその時間変化に影響を与え、地殻の強度などの物性を不均一にし、プレートの運動や地震の発生など地球のダイナミクスに多大な影響を与えているはずだが、その実態、とくに亀裂の連結性に関する実態は不明である。そこで、本研究の核心をなす学術的「問い」として、亀裂の連結性はどのようにして定量的に評価されるべきか?を設定した。

2. 研究の目的

当初、亀裂の分布をマイクロフォーカス X 線 CT 画像から抽出し、亀裂連結性の定量評価を試みることで、その上で亀裂連結性と岩石の物性(特に、弾性的性質・浸透率・電気伝導度)の関係を得ることを目的とした。研究の進捗に従って、亀裂連結性以上に代表となる流路のボトルネックとなるポア径のサイズが重要とわかってきたので、代表となる流路のボトルネックを探索することに研究の目的を修正している。

3. 研究の方法

本研究では亀裂を含むが破砕にまでは至っていない試料を作成する必要がある。また、亀裂生成前後での各種物性測定を実施の上、マイクロフォーカス X 線 CT 画像から抽出される亀裂ネットワークの特徴と比較する。手順は下記のとおりである。一連の測定や解析にもそれぞれ試行錯誤が必要となり、手法の確立も研究成果の一部となっている。

(1) 試料準備

大島花崗岩ならびに稲田花崗岩のブロックから直径約 26mm 長さ約 30mm の円柱を切り出したものを試料とする。試料は円柱軸に対し直行報告に rift 面を持つものと直行方向に hardway 面を持つものを用意した。熱クラックを入れるため高温(550 もしくは 650)にした炉の中に 1 時間放置しその後氷水に投入することで形成した。亀裂生成前後で孔隙率・弾性波速度測定とマイクロフォーカス X 線 CT 画像の撮影を実施し、亀裂生成後には浸透率・電気伝導度測定も実施した。

(2) マイクロフォーカス X 線 CT 画像の撮影

マイクロフォーカス X 線 CT を用いた試料の撮影には、高知大学海洋コア総合研究センター共同利用(代表:北村真奈美 20A012、20B010)の採択を受け、同センター共同利用機器 Xradia を使用した。解像度は $27.4 \mu\text{m}/\text{voxel}$ である。例として、稲田花崗岩、650 からの急冷による亀裂生成前後での CT 画像(ほぼ同じ位置での試料の断面)を図 3 - 2 - 1 に示す。既存亀裂が多く存在する rift 面に近い方向で開口幅の大きな亀裂が生じているのが確認できるが、rift 面に垂直な方向(grain 面)にも亀裂が生成されている。大島花崗岩でも同様の撮影を行ったが、解像度不足により亀裂の抽出が困難だったため、浸透率などとの比較は稲田花崗岩についてのみの報告する。

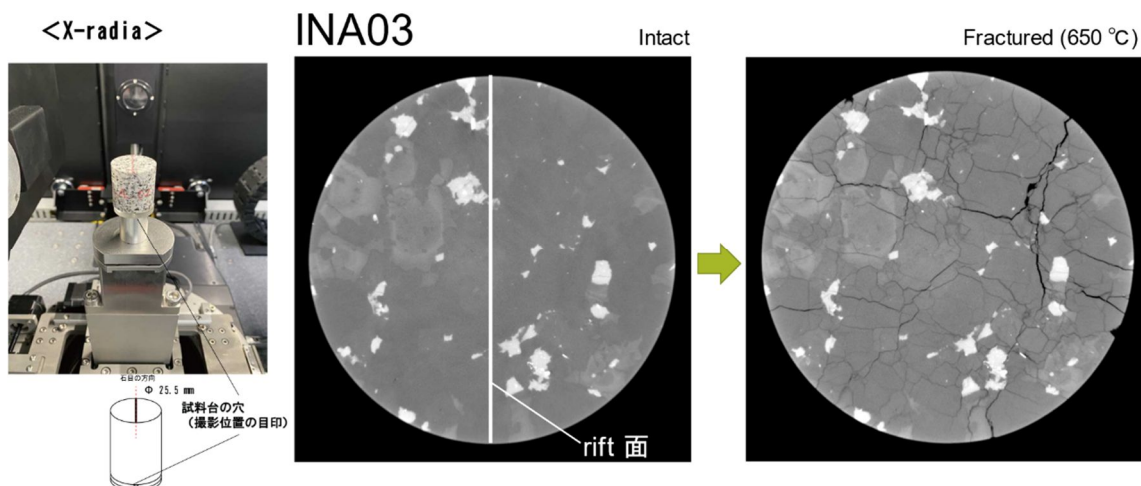


図 3 - 2 - 1 熱クラック生成前後の稲田花崗岩試料の X 線 CT 画像

(3) 孔隙率・弾性波速度測定

亀裂生成前後で、孔隙率・弾性波速度を計測した。孔隙率は乾燥重量と湿潤状態での重量の差から計測した。また乾燥時と湿潤時で弾性波速度をそれぞれ計測している。弾性波速度測定には超音波探傷子を用い、P 波についてはオリンパス社製 V103-RM を S 波は V153-RM を用いた。

(4) 浸透率・電気伝導度同時測定

浸透率・電気伝導度を同時測定するために装置の開発を行った。透過させる流体として 0.1mol/l の KCl 溶液を、熱クランクを入れた稲田花崗岩に透過させ浸透率・電気伝導度を同時測定した。試料の上流と下流に圧力計を置き、差圧の測定と排出された流体の重さを計測することで浸透率を測定した。排出された流体が蒸発しないよう表面はシリコン油で覆った。また、試料に銀 塩化銀の電極に設置することで電気伝導度を計測した。KCl 溶液の電気伝導度は 1.27 ~ 1.28S/m である。

(5) CT 画像からの亀裂ネットワーク抽出

各種物性と亀裂のジオメトリとを比較することを念頭に、CT 画像をから亀裂のみの抽出を試みた。CT 画像は 8 ビットグレースケールのスライス画像をスタックして 3 次元表示するが、ここで問題となるのがブロードなグレースケールの分布から亀裂と固体部分とを明瞭に分離することの難しさである。CT 画像において亀裂は固体部分より暗く表示されるが、雲母・角閃石などの明るく表示される鉱物内を通る亀裂はそれ以外に比べて明るくなる。固体と亀裂の分離のルールが単純ではない。よってここでは画像処理ソフト Fiji の Plugin である Trainable Weka Segmentation (Arganda-Carreras et al., 2017) を用いた。この Plugin は機械学習を用いた分離方法であり、亀裂と固体部分を教師データとして指定し自動分離を行うことができる。試料ごとの CT 値の微妙な違いは石英鉱物のグレースケールの平均値の差から調整し、調整を行った後のスライス画像について同じ教師データを用いて亀裂の抽出を行った。抽出された亀裂画像は 8 ビットグレースケールの probability map として表現される。この probability map のスライス画像をスタックした 3 次元画像について 2 値化を行う。2 値化には Textured Renyi Entropy 法 (Sahoo and Arora, 2004) を用いた。亀裂の抽出と二値化の例を図 3-5-1 に示す。

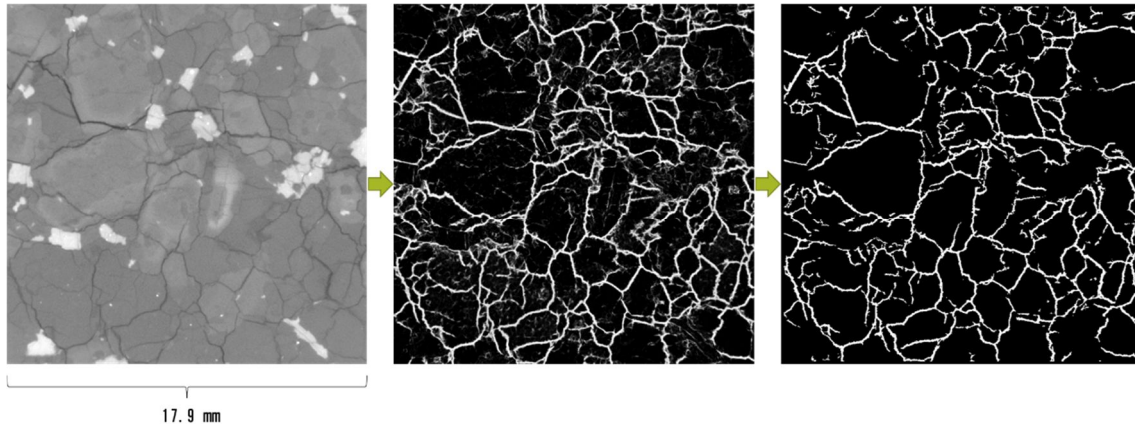


図 3-5-1 8 ビットグレースケールの CT 画像(左)から亀裂の抽出(中央)と二値化処理(右)までの例。太い亀裂は抽出に成功しているものの、薄い亀裂に対しては解像度以下ということもあり、亀裂の抽出ができていない。

(6) Persistent homology 解析

Persistent homology 解析はトポロジー解析の一種で、物体の表面の連続性を損なわないよう変形したときに保持される形状の特徴を効率よく抽出することができる (Suzuki et al., 2021)。今回、この Persistent homology 解析を利用して、亀裂のネットワークの中で最も流体の流れやすさに寄与する流路 (ここではループ) の抽出を試みた。Persistent homology 解析には Obayashi et al., (2022) にて開発された Python ベースのソフトウェア HomCloud (<https://homcloud.dev/index.en.html>) を利用し、Suzuki et al., 2021 の手順を参考にした。具体的には、亀裂の 2 値化画像をもとに、亀裂表面から亀裂内部に向かって正の値を、亀裂表面からマトリクス内部に向かって負の値を各ボクセルに付与し、最も大きな負の値を持つボクセルから塗りつぶすという作業をする。あるところで流路が形成されるが、そのタイミングを birth と呼び、その際に塗りつぶされた負の値を birth time と呼ぶ。また、亀裂内部にまで塗りつぶしが進むと、亀裂内部まで塗りつぶされ最後には流路の閉鎖が起こる。このタイミングを death と呼び、その際に塗りつぶされた正の値を death time と呼ぶ。また、death が発生した座標を death position とする。下記 4 パターンの 3D の 2 値化亀裂モデルに対し解析を行い、それぞれ death position を検出した。

- 1: 上流側と下流側を開放し、流路・上面のループ・下面のループ・内部ループ・ノイズの death position を検出
- 2: 上流側と下流側を閉鎖し、内部ループ・ノイズの death position を検出
- 3: 下流側のみを開放し、流路・下面のループ・内部ループ・ノイズの death position を検出
- 4: 全ての面を閉鎖し、内部ループ・ノイズの death position を検出

わかりやすいよう、2D 白黒画像での結果を例として、図 3-6-1 に示す。

定義より対象とする birth と death のペアは (birth time, death time) = (負, 正) である。

1~4の death position のうち、重複しないものを探索すると、唯一の death position が残る。この death position における death time に画像の解像度をかけたものが流路のポア径に相当する。この作業を稲田花崗岩試料 4 つに対して実施し、浸透率・電気伝導度の実測値と Persistent homology 解析から得られたポア径から推測される浸透率との比較を行う。

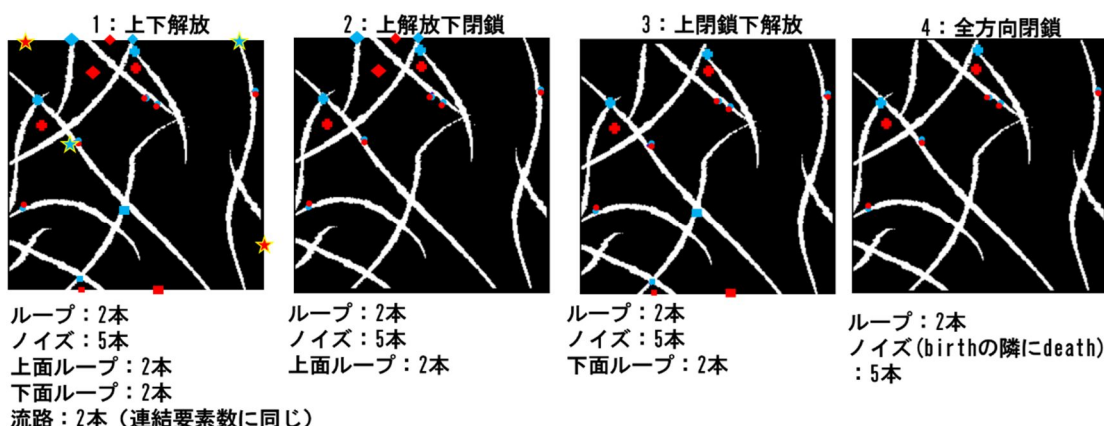


図 3-6-1 連結要素が 2 つある亀裂ネットワークモデルについての Persistent homology 解析例。赤点が birth position 青点が death position である。また 1 の解析結果における点はそのそれぞれの亀裂ネットワークにおけるもっとも重要なボトルネックとなる death position である。

4. 研究成果

(1) 亀裂の生成にともなう各種物性の変化

図 4-1-1 に孔隙率の増加に対する各物性値の変化について示す。亀裂生成前の花崗岩には 1% 以下の孔隙率しかなかったが、熱クラック生成後は最大で 4.5% もの孔隙率の増加がみられた。大島花崗岩と稲田花崗岩を比較すると稲田花崗岩の方が大島花崗岩に比較し、孔隙がより増加し、弾性波速度はより低下した。熱クラック生成前の温度で比較すると 550 より 650 の方がより孔隙が増し、弾性波速度も低下した。条件による孔隙率と弾性波速度の低下に差はあるが、孔隙率と弾性波速度の関係は条件に依存せず一つのカーブに乗ることがわかる。また、孔隙の増加に対し、浸透率は logarithmic に増加した。一方孔隙の増加に対し、線形に電気伝導度の増加がみられた。Tortuosity が一定であれば、電気伝導度は孔隙率に比例することを反映していると考えられる。

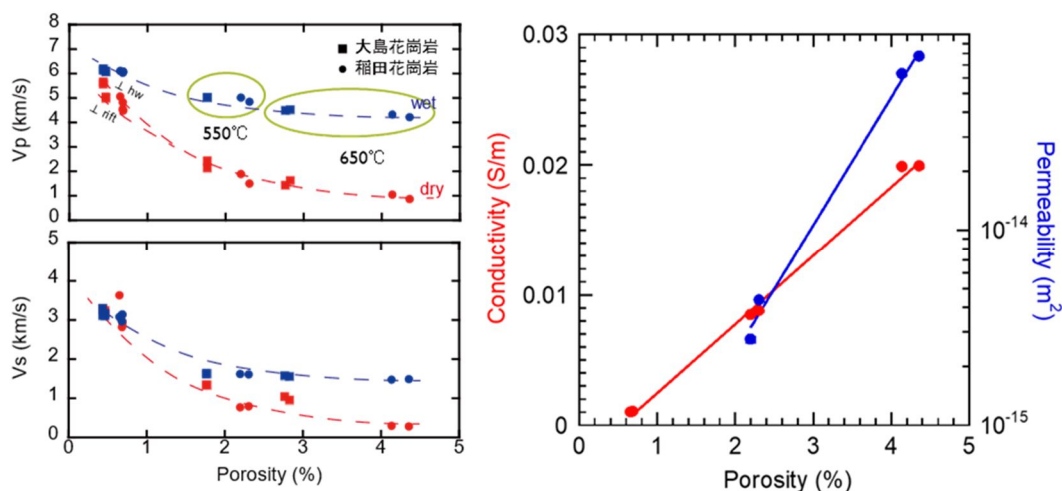


図 4-1-1 左: 孔隙率と弾性波速度 (Vp ならびに Vs) との関係。赤: 乾燥状態, 青: 湿潤状態での弾性波速度。右: 孔隙率と電気伝導度 (赤) と浸透率 (青) の関係。

(2) CT 画像からの浸透率の推定と実測値との比較

CT 画像からの亀裂ネットワーク抽出例を図 4-2-1 に示す。(3)-5 にて示した手順により 3 次元の亀裂ネットワークの抽出を実施し、(3)-6 にて示した Persistent homology 解析を実施した。図 4-2-1 の は立方体の上面と下面を開放した状態での Persistent homology 解析の結果得られた death position の分布である。(3)-6 で示した手順によりこの連結要素 (1 個) におけるもっとも重要なボトルネック、つまり「最も太い開口を持つ流路のうち、最も狭い場所となっているポイント」を探索し (critical death position), そのポア径を計測することができた。図 4-2-1 に例として示した稲田花崗岩のほか、650 から急冷による熱クラック試料においては、critical death の開口は 47.5 μm であった。また、550 から急冷試料については、

27.4 μm であった。これは 1voxel のサイズであり、これより細かい亀裂が支配的な試料の場合は画像からの推定が難しくなるということの意味する。解像度を上げたいところだが、撮影条件の制約や PC の処理能力に問題が残る。

最後に、critical death をボトルネックとする 1 本の流路が担う浸透率を推定し、実測値との比較を行った。550 から急冷試料で推定浸透率は $6.9 \times 10^{-16} \text{m}^2$ であり(実測は $2.74 \sim 4.34 \times 10^{-15} \text{m}^2$)、650 の場合は $6.2 \times 10^{-15} \text{m}^2$ であった(実測は $6.28 \sim 7.73 \times 10^{-14} \text{m}^2$)であり、実測値に比較して半桁から 1 桁小さい値となる。推定値は critical death をボトルネックとする 1 本の流路にすべて押し付けたと仮定したときの浸透率であるので、推定の下限值ともいえるから、推定値が実測値よりも小さくなるのは妥当ではある。しかしながら、半桁から 1 桁しか小さくならないという点は議論の余地があり今後の課題である。また、Equivalent channel model をもとに、実測の浸透率・電気伝導度から求められるポア径はわずか数ミクロンのサイズとなり、画像として見えている印象と大きく異なる点も議論が必要な点であり、従来のモデルの妥当性も含め再検討が必要と考える。

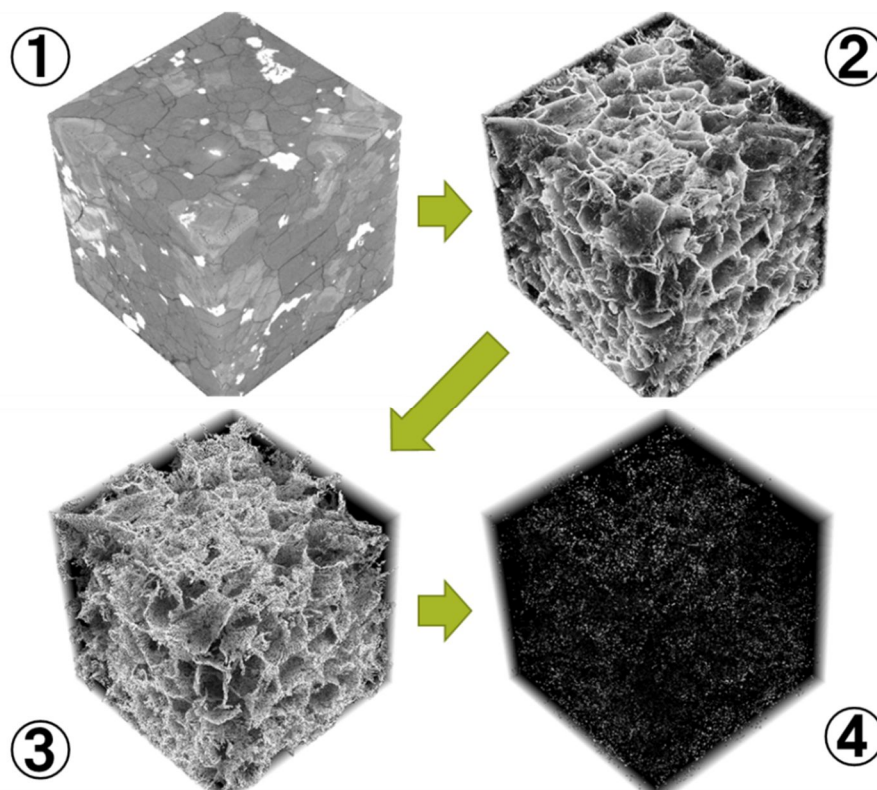


図 4-2-1 稲田花崗岩 650 から急冷による熱クラック試料。3次元 CT 画像，亀裂の 3次元 probability map，亀裂の 2 値化画像，Persistent homology 解析による death position の分布。立方体一辺の長さは約 17.9mm。流体は上面から下面へ流れる。

< 引用文献 >

- Arganda-Carreras, I., Kaynig, V., Rueden, C., Eliceiri, K. W., Schindelin, J., Cardona, A., & Sebastian Seung, H. (2017). Trainable Weka Segmentation: a machine learning tool for microscopy pixel classification. *Bioinformatics*, 33(15), 2424-2426. doi:10.1093/bioinformatics/btx180
- Sahoo, P.K. and Arora, G. 2004, A thresholding method based on two-dimensional Renyi's entropy, *Pattern Recognition*, 37, 6, 1149-1161, doi.org/10.1016/j.patcog.2003.10.008.
- Suzuki, A., Miyazawa, M., Minto, J.M. et al. Flow estimation solely from image data through persistent homology analysis. *Sci Rep* 11, 17948 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97222-6>.
- Obayashi, I., Nakamura, T., Hiraoka Y., Persistent Homology Analysis for Materials Research and Persistent Homology Software: HomCloud, *Journal of the Physical Society of Japan*, 91, 091013 (2022) 10.7566/JPSJ.91.091013.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高橋 美紀・岩崎 夏波・一松 駿斗・北村 真奈美・上原 真一・渡邊 了
2. 発表標題 亀裂の連結性評価と亀裂の連結性が岩石物性に与える影響について
3. 学会等名 日本地質学会第128年学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋 美紀・岩崎 夏波・一松 駿斗・北村 真奈美・上原 真一・鈴木杏奈・渡邊 了
2. 発表標題 Characterization of fracture network of thermally cracked granite rocks and prediction of transport properties
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	上原 真一 (Uehara Shinichi) (20378813)	東邦大学・理学部・教授 (32661)	
研究分担者	渡邊 了 (Watanabe Tohru) (30262497)	富山大学・学術研究部都市デザイン学系・教授 (13201)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	北村 真奈美 (Kitamura Manami) (40795960)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・研究員 (82626)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	廣瀬 文洋 (Hirose Takehiro)		
研究協力者	一松 駿斗 (Hitotsumatsu Hayato)		
研究協力者	岩崎 夏波 (Iwasaki Kanami)		
研究協力者	鈴木 杏奈 (Suzuki Anna)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関