

令和 6 年 10 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01869

研究課題名（和文）地熱開発に資する損傷理論とTHMC連成を融合した岩石き裂進展シミュレータの開発

研究課題名（英文）Development of rock fracturing simulator that combines damage theory and THMC coupling and its application to geothermal development

研究代表者

岸田 潔（Kishida, Kiyoshi）

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：20243066

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000 円

研究成果の概要（和文）：岩石の鉱物分布および鉱物境界の力学的特性を考慮した提案手法を用いることで、圧裂引張試験における基本的な力学特性を再現することに成功した。また、鉱物界面のような脆弱な面において周囲に先行して破壊が発生すると、その両端に引張応力が集中して亀裂が進展すること、またこれらの亀裂が繋がって巨視的な亀裂となることが確認された。

単一き裂を有する花崗岩の透水特性を調べるため、透水試験とX線CT試験を組み合わせた研究を行った。熱の影響により、き裂の接触状態の不可逆的な挙動を生じ、開口幅が閉塞する傾向が示された。長期試験の結果、圧力・温度環境が浸透率に影響を与えることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水圧破碎による熱・圧力の影響を考慮した亀裂進展過程を精緻に説明できるシミュレータの開発は、安定的な地熱増産システムの開発につながる。また、熱・圧力環境下でき裂の構造が変化し、透過率を変化するメカニズムを捉えることは、長期間の安定的な地熱開発に寄与するものである。

これらの技術は、長期間、岩盤に物質を安定的にこいていく技術にも援用可能であり、エネルギー生成後の副産物（CO₂や高レベル放射性廃棄物）の処分事業に援用できる技術である。

研究成果の概要（英文）：The proposed method, which takes into account the mineral distribution of the rock and the mechanical properties of the mineral boundary, succeeds in reproducing the basic mechanical properties in a crushing tensile test. It was also confirmed that when a fracture occurs prior to the surrounding surface, such as at a mineral interface, tensile stress concentrates at both ends of the fracture and the crack propagates, and that these cracks connect to form a macroscopic fracture.

To investigate the permeability of single cracks in granite, a combination of permeability tests and X-ray computed tomography (CT) studies were conducted. Heat-induced irreversible behavior of the crack contact state was observed, indicating a tendency for the aperture to close. Long-term tests revealed that the pressure and temperature environment had an influence on the permeability.

研究分野：岩盤工学

キーワード：水圧破碎 損傷理論 THMC連成解析 透水試験 地熱開発

1. 研究開始当初の背景

地熱開発のポテンシャルが非常に高い我が国では、地熱発電を活用することがカーボンニュートラル社会を実現するための一助となる。地熱発電は、発電時にほとんど CO₂ や温室効果ガスを排出しない再生可能エネルギーとされており、昼夜を問わずに蒸気や熱水などの地熱流体を組み上げることで発電されるため、太陽光や風力と異なり時間帯や天候に左右されずに発電が可能である。

地熱発電の一つである地熱増産システムは、水圧破砕という技術を用いて地熱貯留層に人工的に割れ目を発生させ、地熱貯留層の透水性を改善することにより、蒸気の生産性を向上させて発電量を増進かつ持続的供給を行うシステムである。

水圧破砕は岩石に引張破壊を生じさせて亀裂を生成させる技術であるが、その亀裂の発生・進展プロセスを精緻に予測することは現状でも難しい。さらに、生成された亀裂が圧力・熱環境下でどのように変化するのか、すなわち、亀裂の透水性がどのように変化するのかは、明確に把握されていない。したがって、効率的な地熱増産システムを実施するには、まず、水圧破砕による亀裂の発生・進展プロセスの精緻な予測、圧力・熱環境下での亀裂の透水性の変化の予測手法の確立が必要である。

2. 研究の目的

(1) 水圧破砕シミュレーション手法の構築と実施

本研究では、偏光顕微鏡および走査型電子顕微鏡観察や X 線回折分析により岩石の鉱物組成を精緻に把握し、実験的観測に基づき岩石が有する不均質性を考慮に入れた解析モデルを構築することを目的の一つとする。また、構築される解析モデルを用いて圧裂試験や水圧破砕モデル実験の再現解析を行い、解析モデルの妥当性・有用性を検証する。その際、Weibull 分布による確率論的モデルでも圧裂試験の再現解析を実施し、本研究で構築する解析モデルの結果と比較検討し、提案する手法の優位性を確認する。さらに、構築されたモデルを用いて実際の温度・地圧環境を模擬した地熱貯留層で水圧破砕モデル実験をシミュレートし、地熱回収の増産効果を予測評価する。

岩石のき裂発生・進展を数値解析により予測するためには、岩石のもつ不均質性に着目することが必要である。連続体モデルを用いて、鉱物の分布に着目して圧裂引張試験を数値解析において再現した既往の研究が存在する¹⁾。一方、岩石の引張によって生じるき裂進展では、鉱物境界面の脆弱性が影響を与えることが既往の実験的研究²⁾によって示唆されているが、伊澤ら¹⁾の研究において鉱物境界面での剥離や滑りは考慮されていない。本研究では、鉱物境界における割れを考慮可能なモデルを提案し、伊澤ら¹⁾の研究と同様の条件下において鉱物境界面の力学特性を考慮したき裂発生・進展解析を実施した。

さらに、様々な圧力・熱環境下での単一き裂の長期透水試験を実施し、透水試験や X 線 CT により単一き裂の構造の変化と透水性の変化について検討を実施する。

(2) 単一き裂の透水性の変化

圧力・熱環境下で単一き裂の透水性がどのような経時変化をするのか、また、そのメカニズムはどのようになっているのか、といった問いを解明するため、圧力・熱環境下での単一き裂の透水試験を行う。併せて、X 線 CT 撮影を行い、不連続面の構造や接触状態の経時変化を計測する。

3. 研究の方法

(1) 鉱物界面の影響を考慮した数値解析

本研究では損傷理論を用いた有限要素解析によりき裂発生・進展を計算した。損傷理論では、ヤング率 E は損傷変数 D ($0 \leq D \leq 1$) と初期ヤング率 E_0 を用いて、

$$E = (1 - D) E_0 \quad (1)$$

と表される。本研究では、主応力/主ひずみによる損傷判定に加え¹⁾、鉱物界面に対して垂直な向きの引張破壊と、平行な向きのせん断破壊を考慮した。以下では、圧縮応力を正、引張応力を負とする。主応力/主ひずみを用いた損傷判定は、以下のとおりである¹⁾。

$$\begin{cases} F_1 \equiv -\sigma_3 - f_{t0} = 0 \\ F_2 \equiv \sigma_1 - \frac{1 + \sin \theta}{1 - \sin \theta} \sigma_3 - f_{c0} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

ここで F_1 は引張損傷条件, F_2 はせん断損傷条件, σ_1 は最大主応力[N/m²], σ_3 は最小主応力[N/m²], f_{t0} は一軸引張強さ[N/m²], f_{c0} は一軸圧縮強さ[N/m²], θ は内部摩擦角[-]であり, 応力/強さについては, 各要素重心位置の値を使用している. 主ひずみ $\varepsilon_1, \varepsilon_3$ と体積ひずみ ε_v から求められる $\varepsilon_t, \varepsilon_c$ を用いて, 主応力/主ひずみを用いた判定による損傷変数 D_e は次式で計算される.

$$D_e = \begin{cases} 0 & F_1 < 0 \quad \text{and} \quad F_2 < 0 \\ 1 - \left| \frac{\varepsilon_{t0}}{\varepsilon_t} \right|^2 & F_1 = 0 \quad \text{and} \quad \Delta F_1 > 0 \\ 1 - \left| \frac{\varepsilon_{c0}}{\varepsilon_c} \right|^2 & F_2 = 0 \quad \text{and} \quad \Delta F_2 > 0 \end{cases} \quad (3)$$

ここで, $\varepsilon_{t0} = f_{t0}/E_0$, $\varepsilon_{c0} = f_{c0}/E_0$ である. 式(3)中の $F_1 = 0$ and $\Delta F_1 > 0$ は, 岩石中の応力状態が引張損傷条件を満たし, かつ負荷状態にある場合, 引張破壊が生じることを示しており, 同様に $F_2 = 0$ and $\Delta F_2 > 0$ は岩石中の応力状態がせん断破壊条件を満たし, かつ負荷状態にある場合, せん断破壊が生じることを示している.

本研究においては, 異種鉱物の境界面を鉱物界面として考慮した. 2種類の鉱物を含む要素における, 鉱物界面での破壊による損傷判定は以下のとおりである.

$$\begin{cases} F_{1i} \equiv -\sigma_n - f_{ii} = 0 \\ F_{2i} \equiv |\tau| - (c + \sigma_n \tan \theta) \end{cases} \quad (4)$$

ここで, F_{1i} は界面の引張損傷条件, F_{2i} は界面のせん断損傷条件, σ_n は界面に鉛直な方向の応力[N/m²], f_{ii} は界面の引張強さ[N/m²], τ は要素重心点における界面に平行な方向の応力[N/m²], c は粘着力[N/m²], θ は内部摩擦角[-]であり, 応力/強さについては各要素重心の応力テンソルをもとに, 界面に鉛直/平行な方向の応力を算出した. 結果として, 界面で生じる損傷による損傷変数 D_i は,

$$D_i = \begin{cases} 0 & F_{1i} < 0 \quad \text{and} \quad F_{2i} < 0 \\ 1 - \left| \frac{\varepsilon_{ti0}}{\varepsilon_{ti}} \right|^2 & F_{1i} = 0 \quad \text{and} \quad \Delta F_{1i} > 0 \\ 1 - \left| \frac{\varepsilon_{ci0}}{\varepsilon_{ci}} \right|^2 & F_{2i} = 0 \quad \text{and} \quad \Delta F_{2i} > 0 \end{cases} \quad (5)$$

と表現される. ここで, ε_{ti} = 要素重心における界面垂直方向のひずみ成分, $\varepsilon_{ci} = \tau / [(1 - D) E_0]$, $\varepsilon_{ti0} = f_{ii}/E_0$, $\varepsilon_{ci0} = \varepsilon_{ti} \tan \theta + c/E_0$ である. F_{1i}, F_{2i} の破壊条件については, 主応力/主ひずみを用いた判定と同様である. 以上のように求めた D_e, D_i を用いて, 本研究では要素全体の損傷変数 D を

$$D = D_e + D_i \quad (6)$$

と定義した.

本研究では, 伊澤ら¹⁾が実施した圧裂引張試験の再現解析を実施することで, 提案モデルの妥当性を検証する. 解析には, 既往研究¹⁾と同じジオメトリ形状, 載荷条件, 境界条件, メッシュを使用した(図1(a)).

不均質性のモデル化にあたっては, 伊澤ら¹⁾が使用した2次元断面画像をもとにしたモデルを使用し(図1(b)), 各鉱物の物性値もそれに倣った(表1). 鉱物界面の向きの設定にあたっては, まず各要素が2種類の鉱物を含むかどうかの判定を行った後, 2種類の鉱物を含む場合には2次元断面画像モデルとメッシュとの重ね合

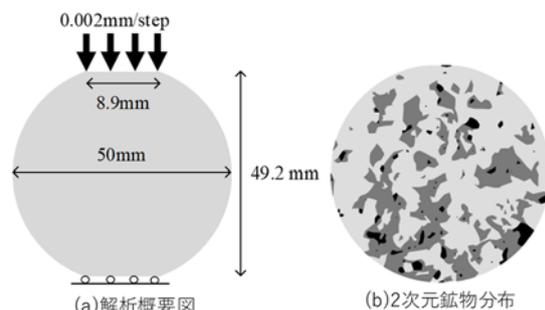


図1 解析の概要

わせをもとに各要素内において鉱物界面は平面であると仮定して鉱物界面の傾きを算出した。引張強さは全ての鉱物間で同一であると仮定し、いずれの鉱物よりも弱い 5 MPa と、さらに弱い 2 MPa を設定して比較した。また、界面の粘着力については、界面においても岩石全体で測定される値と同様であるとし、既往の研究を参考に 30 MPa とした。

表 1 使用した鉱物ごとのパラメータ一覧

鉱物	石英	長石	黒雲母
ヤング率 E_0 [GPa]	76.9	39.6	33.9
引張強さ f_t [MPa]	10.3	10.5	7.3
一軸圧縮強さ f_c [MPa]	82.5	83.6	58.6
内部摩擦角 θ [°]	50	50	50
ポアソン比 ν [-]	0.19	0.19	0.19

(2) 圧力・熱環境下での単一き裂の透水試験

実験には花崗岩円柱供試体を用い、まず、圧裂試験を実施し、供試体中央に引張り裂を作成した。実験は、最初に 3 MPa までの載荷・除荷試験を行い、各拘束圧条件で透水性の計測を行った。さらに、拘束圧を 3 MPa に固定し、熱環境を変化させながら、長期にわたる透水試験を実施した。この試験では、定期的に X 線 CT による撮影を行い、構造の変化を確認した。

4. 研究成果

(1) 鉱物界面の影響を考慮した数値解析の結果

表 2 に下部載荷板における最大荷重の解析結果を、図 2 に下部載荷板にかかる荷重と、供試体中央の縦ひずみ関係を示す。本モデルを用いた圧裂引張試験の数値解析では、既往実験¹⁾で測定された応力-ひずみ関係を概ね再現できていること、また設定した鉱物界面の引張強さが低下するにしたがって、岩石全体の強度も低下していることが確認できる。図 3 には、鉱物界面の分布とき裂進展解析結果を重ね合わせて示している。本モデルにおいて、き裂は損傷変数 D の増加によって表現される。鉱物界面の引張強さが低下するにしたがって、き裂が鉱物界面を通過する部分が多くなることや、界面の引張強さ 2 MPa の場合ではき裂が大きく曲がり、鉱物界面を選択的に通過することが観察される。鉱物界面の脆弱性を考慮した解析において、き裂が岩石中央から離れた位置を通過する原因としては、実験における 3 次元な鉱物分布を解析では 2 次元でのみ考慮していることが一因と考えられる。さらに、鉱物界面の引張強さが 5 MPa の解析におけるき裂進展時の最小主応力分布を図 4 に示す。鉱物界面で生じた小さなき裂の両端に引張応力が集中し、鉱物界面を含まない要素へもき裂が進展していく様子が確認できる。巨視的なき裂の進展にあたっては、まず鉱物界面において比較的小さな引張応力によって小さなき裂が複数発生し、これらの小さなき裂それぞれの両端に引張応力が集中することで鉱物界面以外の部分へき裂が進展していくという結果が得られた。これらの要因の複合によって、鉱物境界面の損傷が岩石全体の破壊に影響を及ぼしており、特に鉱物境界における引張強さが岩石全体の強度に大きな影響を及ぼしていることが確認された。

表 2 解析パターンごとの最大荷重

	伊澤ら ¹⁾ の実験	界面判定無し	引張強さ 5MPa	引張強さ 2MPa
最大荷重 [MPa]	6.21	6.72	5.70	4.19

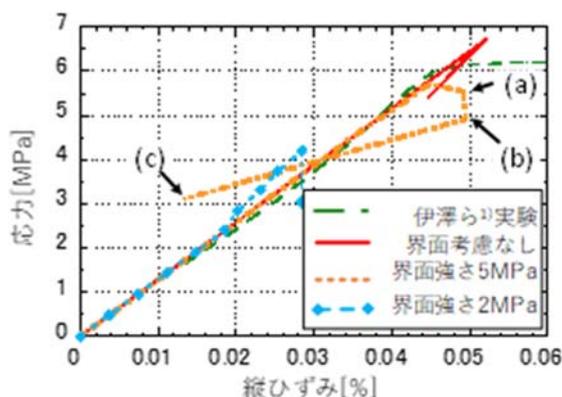


図 2 荷重-縦ひずみ関係

(2) 水圧破碎シミュレーションの結果

鉱物界面のモデル化を行い、水圧破碎モデル実験のシミュレーションを行った。ここでは、

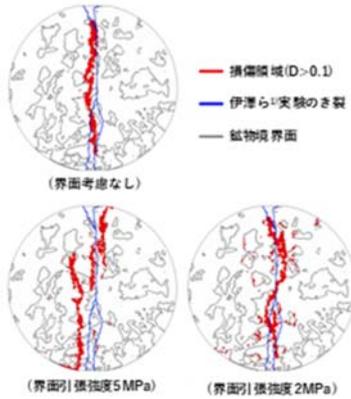


図3 各パターンのき裂進展経路

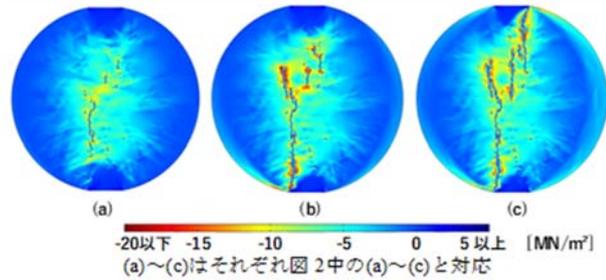
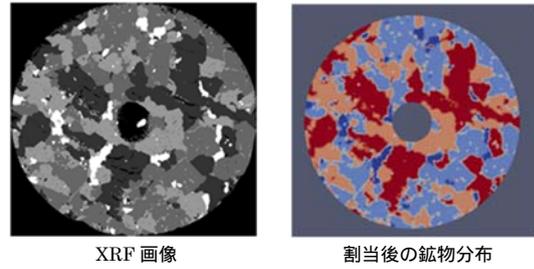


図4 最小主応力分布(界面引張強度 5 MPa の場合)

XRF で取得された画像データから対象となる花崗岩の鉱物は、石英、カリ長石、斜、黒雲母の 4 種類で構成されると仮定し、2 元断面における要素ごとの鉱物の力学特性の割り当てを行った。XRF からの鉱物分布の割り当てを図 5 に示す。各鉱物の力学物性は、表 3 に示す。

解析は、岩石実質部分の初期温度 T_0 を 20, 200, 400 と設定し、熱伝導率 h [W/m²K] を 2000 と 4000 として実施した。実際には次に示す 4 ケースを実施した。Case A では $(T_0, h) = (200, -)$ 、Case B では $(T_0, h) = (200, 2000)$ 、Case C では $(T_0, h) = (200, 4000)$ 、Case D では $(T_0, h) = (400, 2000)$ である。

図 6 は、各ケースにおける破壊伝播過程の結果をまとめたものである。岩石部分の色は、鉱物の引張強さ ($f_t(\Delta T)$) を表している。鉱物の引張強さは、損傷を評価する引張破壊の規準式に関連している。各図の下部に記されている応力と次数は、示されている図の孔壁における流体圧と各タイムステップにおける反復回数を示している。Case A は、温度一定 (20) 条件である。このケースでは、最初に円孔の対面 2 か所に主要なき裂が形成される。き裂はほぼまっすぐ生成され、鉱物界面の影響は、き裂の伝播に現れにくいものです。Case B は、熱伝導の影響を考慮したものです。この場合、破壊圧力は Case A の 27% に低下している。破壊の伝播は、大きく 2 段階に分かれており、最初は孔壁に作用する圧力が 2.30 MPa で小さな破壊が界面に沿って急速に進展し、界面の分岐点で減速し、孔壁に作用する圧力が 12.70 MPa で再び伝播する。



	XRF 画像	割当後の鉱物分布
石英	濃い灰色	濃赤
カリ長石	灰色	淡青
斜長石	明るい灰色	淡赤
黒雲母	白	濃青

図5 XRF 画像と鉱物分布の割当³⁾

表3 4 鉱物の力学物性³⁾

	Quartz	K-Feldspar	Plagioclase	Biotite
E_0 [GPa]	95.7	73.9	88.1	68.3
F_t [MPa]	49.8	45.6	47.3	43.0
F_c [MPa]	398	365	378	344
α_t [10 ⁻⁶ K]	18.6	4.9	7.2	6.4
ν	0.08	0.27	0.27	0.25

< 引用文献 >

- 1) 伊澤 正悟, 緒方 奨, 安原 英明, 木下 尚樹, 岸田 潔: 鉱物分布を考慮したき裂発生・進展解析による圧裂引張試験時の花崗岩の破壊挙動評価. 材料, 2020, Vol. 69, No. 3, pp.236-242. doi: 10.2472/jsms.69.236
- 2) 工藤 洋三, 橋本 堅一, 佐野 修, 中川 浩二: 花崗岩内に発生するクラックと鉱物粒の関係. 資源と素材, 1991, 107 巻, 7 号, pp. 423-427. doi: 10.2473/shigentosoza.107.423
- 3) Ikeda, S, Ogata, S, Yasuhara, H. and Kishida, K.: Numerical Simulation of Hydraulic Fracturing considering Grain Boundary weakness and Fluid-Rock Heat Transfer, the 58th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, Paper Number ARMA 24-0568, 2024, 6.

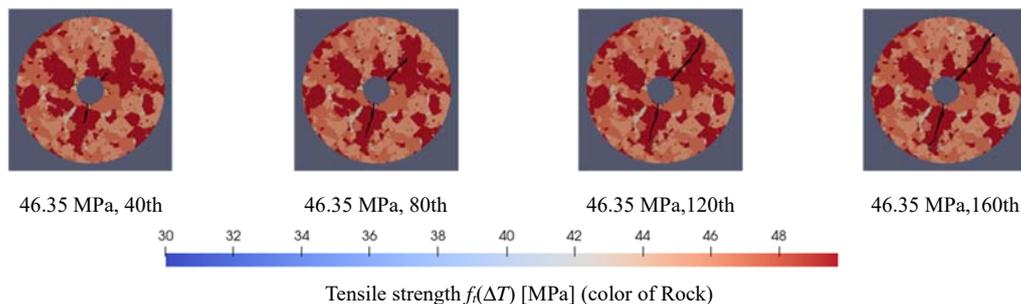


図6 き裂の進展プロセスと引張強さ³⁾ Case A: initial rock temperature 20

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ogata Sho, Nishira Eita, Yasuhara Hideaki, Kinoshita Naoki, Inui Toru, Kishida Kiyoshi	4. 巻 62
2. 論文標題 Multi-physics numerical analyses for predicting the alterations in permeability and reactive transport behavior within single rock fractures depending on temperature, stress, and fluid pH conditions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 101207 ~ 101207
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2022.101207	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Nakashima S., Isumi Y., Song C., Kishida K.	4. 巻 2022
2. 論文標題 Temporal Variation in CT Values of Pore Water in Granite Fracture Subjected to Long-Term Confining Pressure and Temperature	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 56th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium	6. 最初と最後の頁 418
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.56952/ARMA-2022-0418	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Song Chenlu, Nakashima Shinichiro, Kido Ryunosuke, Yasuhara Hideaki, Kishida Kiyoshi	4. 巻 21
2. 論文標題 Short- and Long-Term Observations of Fracture Permeability in Granite by Flow-Through Tests and Comparative Observation by X-Ray CT	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Geomechanics	6. 最初と最後の頁 12058
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002114	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Tagawa, C., Nakashima, S., Yoshizu, Y., Iseki, H., Kishida, K.	4. 巻 2021
2. 論文標題 X-Ray CT Imaging of Cement Grouted Rock and Its Segmentation With Machine Learning Algorithm,	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The 55th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium	6. 最初と最後の頁 1446
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ikeda S., Ogata S., Yasuhara H., Kishida K.	4. 巻 2024
2. 論文標題 Numerical Simulation of Hydraulic Fracturing Considering Grain Boundary Weakness and Fluid-Rock Heat Transfer	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The 58th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium	6. 最初と最後の頁 563
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.56952/ARMA-2024-0563	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 前原 崇志, 緒方 奨, 乾 徹, 安原 英明, 岸田 潔
2. 発表標題 熱 - 流体 - 力学連成モデルによる三次元地熱流体流動解析
3. 学会等名 第49回岩盤力学に関するシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 池田 尚太郎, 緒方 奨, 安原 英明, 岸田 潔
2. 発表標題 花崗岩の圧裂引張試験における鉱物界面の影響を考慮した数値解析
3. 学会等名 第58回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田川 千尋, 中島 伸一郎, 吉津 洋一, 井関 宏崇, 岸田 潔
2. 発表標題 深層学習を用いたX線CT画像処理による岩石き裂グラウト充填状況の評価
3. 学会等名 第 48 回岩盤力学に関するシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Zhiqi Li, Shinichiro Nakashima, Sho Ogata, Yanbin YU, Kiyoshi Kishida
2. 発表標題 Effect of different image segmentation methods on estimating fractured rock CT images
3. 学会等名 第58回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Zhiqi LI, Sho OGATA, Shinichiro NAKASHIMA, Hideaki YASUHARA and Kiyoshi KISHIDA
2. 発表標題 Observation of Fracture Permeability by Flow-Through Tests and X-ray CT Tests
3. 学会等名 第50回岩盤力学に関するシンポジウム
4. 発表年 2024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	緒方 奨 (Ogata Sho) (50868388)	大阪大学・大学院工学研究科・助教 (14401)	
研究分担者	中島 伸一郎 (Nakashima Shinichiro) (70346089)	山口大学・大学院創成科学研究科・准教授 (15501)	
研究分担者	安原 英明 (Yasuhara Hideaki) (70432797)	京都大学・工学研究科・教授 (14301)	

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	三好 貴子 (Miyoshi Takako) (30982318)	京都大学・工学研究科・助教 (14301)	

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