

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2018

課題番号：17H04976

研究課題名（和文）機能性ナノ粒子トレーサーによる地下き裂3次元ネットワークの流体流動推定法の提案

研究課題名（英文）Characterization of fluid flow in 3D fracture networks by functional nano-particle tracers

研究代表者

鈴木 杏奈（Suzuki, Anna）

東北大学・流体科学研究所・助教

研究者番号：60796449

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 8,700,000円

研究成果の概要（和文）：機能性ナノ粒子を用いたナノトレーサーは、き裂岩体内の流体流動を高精度で推定する可能性がある。本研究では、ナノトレーサーを用いた新しいき裂流体流動評価法の提案を目指し、マイクロ流路や3Dプリンタを使ったき裂構造を制御した透水実験を実施した。マイクロ流路の実験では、大きさの異なる粒子が異なる流れ挙動を示すことを確認し、粒子トレーサーによるき裂構造推定法を考案した。また、3Dプリンタを用いたき裂ネットワークモデルでは、数値シミュレーションと実験との比較を行い、モデルの検証を行うことができた。さらには、き裂の構造を位相幾何学を用いて定量化し、構造と流れとの関係を解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地下開発では、限られたアクセスできる場所から見えない地下の情報をいかに取り出すかが非常に重要な課題である。本研究で提案する粒子トレーサーを井戸に注入することによって、従来型の塗料などを使ったトレーサーでは得られなかった、ジオメトリ（大きさ、長さ）の情報を取得することができると期待できる。き裂の幅の情報を得ることができると、流れる流量、流速を推定することができ、地下の見える化に一步大きく近づくことができる。また、本研究で利用するパーシステントホモロジーでは、構造と流れの関係式を導くことができた。これは、地下開発だけでなく、多孔質材料などの分野にも大きな貢献となると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Nano-/microparticles have a potential to predict fluid flow inside a fractured rock accurately. In this study, we aim to propose a new method for fluid flow evaluation using the nano-/microparticles. Flow experiments using microfluidics and fracture network models controlled by a 3D printer were conducted. Microfluidics experiments confirmed that particles of different sizes exhibit different flow behaviors, and the particles tracer-based fracture structure estimation method was devised. In addition, a fracture network model created by a 3D printer was used to compare between numerical simulation and experiment and to validate the flow model. Furthermore, the structure of the fractures was quantified using topology and the relationship between structure and flow was elucidated.

研究分野：貯留層工学

キーワード：き裂 トレーサー ナノ・マイクロ粒子 マイクロ流路 3Dプリンタ パーシステントホモロジー 流動実験

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

き裂岩体内の流動メカニズムを理解することは、地下開発における重要課題である。しかしながら、従来の地表あるいは井戸からの間接的計測は、計測精度が低く、実際の流体流動を評価している保証がない。蛍光塗料などを注入し、流体流動を評価するトレーサー試験は、地下き裂の中を流れた流体の直接的データを取得できるが、空間的なき裂分布を把握しきれない。異分野(医学、電子工学など)で着目を浴びるナノ粒子(Taylor et al., J. Appl. Phys., 2013)は、特定の機能を持たせることができるので(Fig. 1), それをトレーサーに用いれば、き裂岩石内の流体流動の3次元空間分布を高精度で得られる可能性がある。

ナノトレーサーによるき裂間流体流動推定を成功させるには、(i)ナノトレーサー流動現象の理解と(ii)その挙動を実効的に表現できる解析モデルの開発が必要である。これまで、均質多孔体・ガラスビーズによる実験により、ナノトレーサーの応答は従来の物質移動モデル(Fick 則に従った支配方程式)で表すことができないことが報告されているが、その原因を追求できていない(Huber et al., J. Contam. Hydrol., 2012), スタンフォード大 Horne グループは、マイクロモデル(シリコン基板を多孔質体・き裂岩石構造に形成したもの)による流動実験によって、ナノ粒子が粒子同士、岩石壁面との相互作用を起こし、異常拡散(凝集や吸・脱着)を示すことを顕微鏡で観測した(Alaskar et al., SPE J., 2014)。しかしながら、ナノ粒子の種類や形、き裂岩盤構造が異常拡散にどの程度影響しているのかを定量的に評価していない。また、異常拡散は、ミクロレベル(ナノ粒子間あるいは岩石との相互作用)だけでなく、マクロレベル(複雑なき裂ネットワーク)の不均質性の影響を受けると考えられ、フィールドスケールのき裂間流体流動推定につなげるためには、さらにマクロレベルで現れるき裂ネットワークの不均質性が及ぼす影響の評価が必要である。

2. 研究の目的

シリコン基板・3Dプリンタを使ってそれぞれ μm スケール(ミクロレベル)・ cm スケール(マクロレベル)のき裂構造を制御し(Fig. 2), その試験片上で透水実験を実施することで、き裂構造とトレーサー応答との関係を取得する。以下を目的とする。

1. マイクロモデルを用いた、き裂媒体におけるナノトレーサー移動現象の解明
2. 3Dプリントき裂ネットワークにおけるマクロスケールの異常拡散の解明
3. 移動現象と構造との関係性(パーシステントホモロジーに基づく岩石構造の定量化)

3. 研究の方法

3.1. マイクロモデルを用いた、き裂媒体におけるナノトレーサー移動現象の解明

シリコン基板で作成したマイクロモデルを用いて透水実験を行うことにより、 μm スケールで異常拡散が起こる要因(粒子同士・岩石との相互作用)を可視化させた。岩石のき裂-ポア構造を模擬したマイクロ流路を用いて顕微鏡化で、ナノ粒子(Fig. 3)と注入し、流動実験を実施した。既存研究では、顕微鏡観察にとどまり、トレーサー応答を取得していない。本研究では、qNano(TRPS)(Fig. 4)を用いて、粒子数をカウントすることにより、トレーサー応答曲線を取得した。

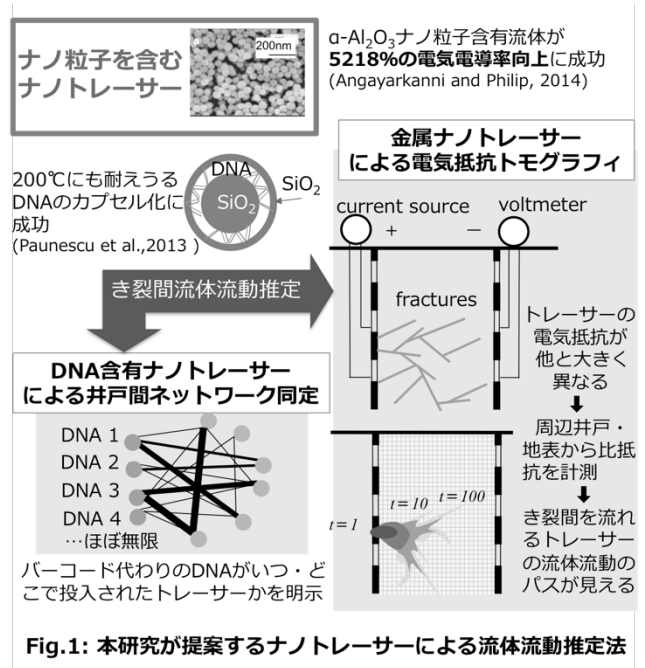


Fig. 1: 本研究が提案するナノトレーサーによる流体流動推定法

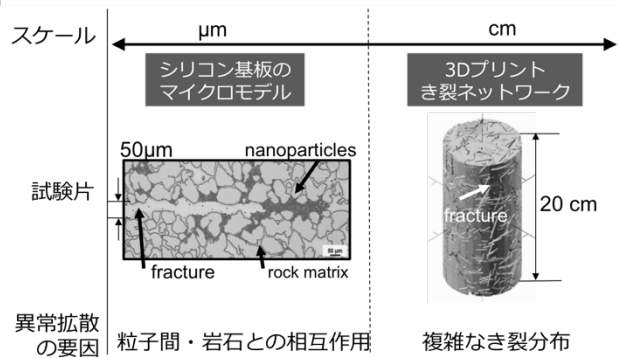


Fig. 2: 異なるスケールの透水実験

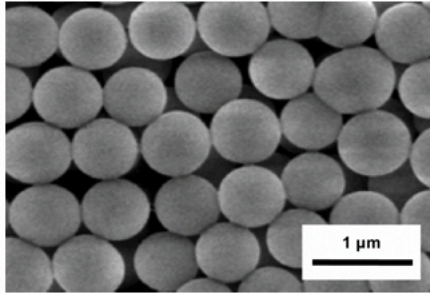


Fig.3 SEM image of nanoparticles.

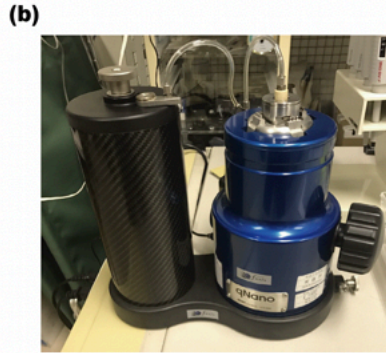
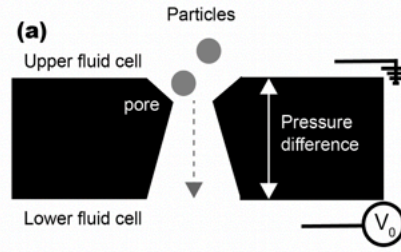


Fig. 4 Schematic of the Tunable Resistive Pulse Sensing (TRPS) system.

3.2. 3D プリントき裂ネットワークにおけるマクロスケールの異常拡散の解明

3D プリントき裂ネットワークを作成し、透水実験を行った。cm スケールの複雑なき裂ネットワークに起因する異常拡散を評価した。実験データならびに解析モデル結果を既存のき裂ネットワーク数値シミュレーションと比較し、結果の妥当性を検証した。

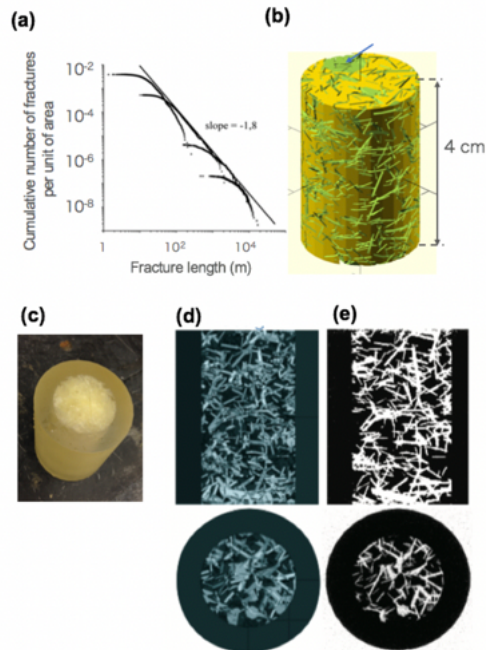


Fig. 5 Creation of an artificial crack network. (a) Relationship between fracture length and number based on field observations, (b) Design of artificial rocks (greens show fractures), (c) photograph of printed specimen, (d) cross-sectional image of design, (e) CT scan cross-sectional images of artificial rock.

3.3. パーシステントホモロジーに基づく岩石構造の定量化

複雑な媒体内の移動現象を評価する上で、不均質な構造の定量化が求められる。新しい定量的な岩石構造の評価手法を確立することを目的として本研究ではトポロジーの手法の一種である、パーシステントホモロジーを用いて構造を評価し、構造と流体挙動との関係を定量的に表現した。

4. 研究成果

4.1. マイクロモデルを用いた、き裂媒体におけるナノトレーサー移動現象の解明

シリコン基盤上にポアスケールの岩石構造を作成し、ナノ粒子を用いたポアスケールの透水実

験を実施した。ナノ粒子の流動挙動に関して顕微鏡で観察し、流出口で得られるトレーサーの応答との関係性を評価した(論文 RMRE, 2019 他)。

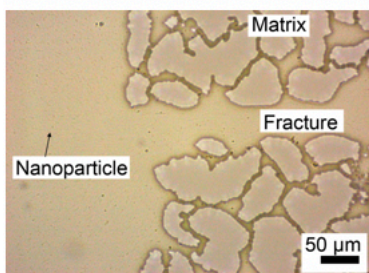


Fig.6 Observation of particle movement.

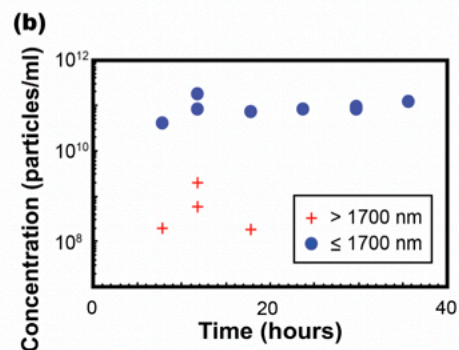
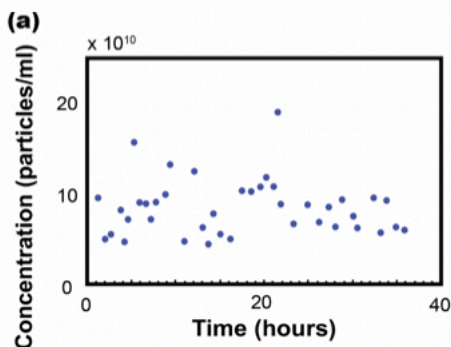


Fig. 7 Size-dependent tracer responses.

4.2. 3D プリントき裂ネットワークにおけるマクロスケールの異常拡散の解明

き裂性岩石は不均質性が非常に高く、同じコアサンプルを取得することが困難である。本研究では、3D プリンタを用いて作成した複雑なき裂岩石モデルにおける流動実験の結果と同じ形状ファイルに基づいて CFD ならびに等価浸透率モデルによって計算した数値シミュレーション結果を比較し、モデルの妥当性について議論した。地下の岩石研究において、数値計算と実験との橋渡しをする新たなアプローチを示すことができた。(論文 TiPM, 129(2), 485-500, 2018 他、受賞 Water Resources Research 2017 Editors' Choice Award, Water Resources Research, Oct 2018)

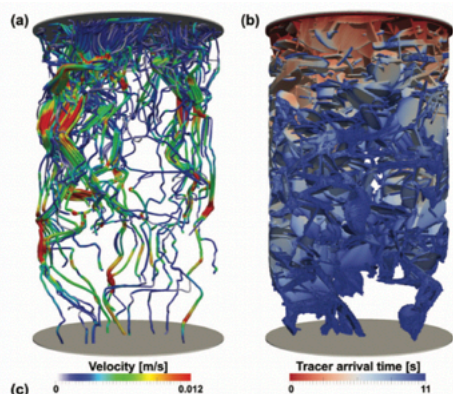


Fig. 6 Results from direct simulation.

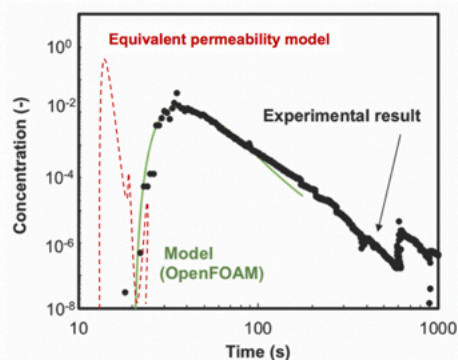


Fig. 7 Comparison between experiment and simulation.

4.4 パーシステントホモロジーに基づく岩石構造の定量化

パーシステントホモロジーを岩石き裂の評価に初めて用い、岩石き裂の幅の情報を抽出する他、つながりを評価することができた。(論文 Com & Geosci, accepted.)

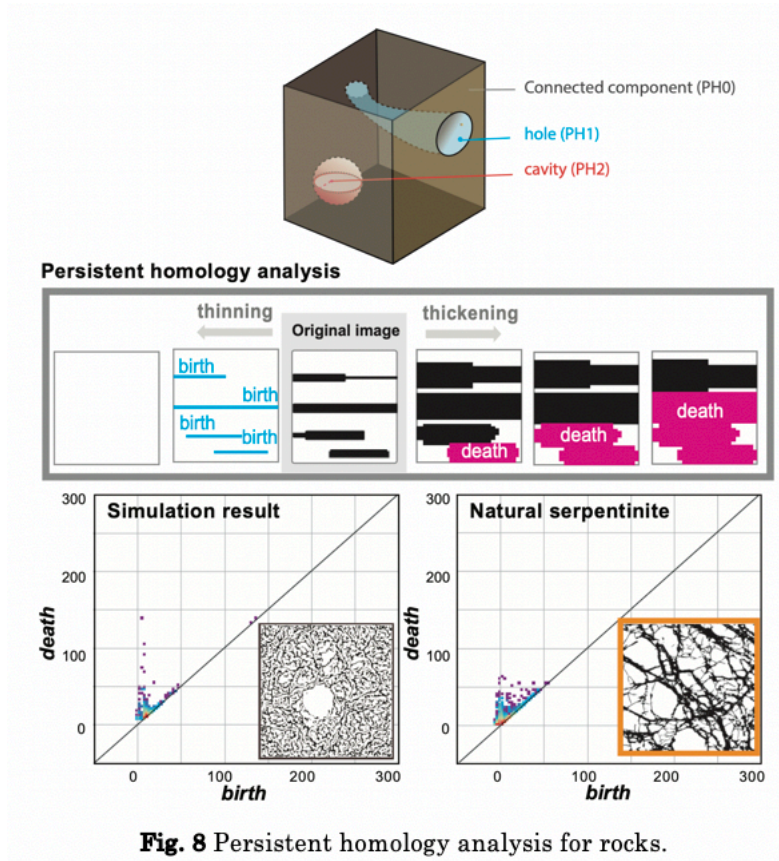


Fig. 8 Persistent homology analysis for rocks.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 A. Suzuki, J. Cui, Y. Zhang, S. Uehara, K. Li, R. N. Horne, and T. Ito	4. 巻 -
2. 論文標題 Experimental study on nano-/microparticles transport to characterize structures in fractured porous media	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Rock Mechanics and Rock Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00603-020-02081-8	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 該当する

1. 著者名 Suzuki, Ikhwanda, Yamaguchi, Hashida	4. 巻 9
2. 論文標題 Estimations of Fracture Surface Area Using Tracer and Temperature Data in Geothermal Fields	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geosciences	6. 最初と最後の頁 425 ~ 425
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/geosciences9100425	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 A. Suzuki, J. Minto, N. Watanabe, K. Li, and R. N. Horne	4. 巻 129
2. 論文標題 Contribution of 3D printed fracture networks to development of flow and transport models	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transport in Porous Media	6. 最初と最後の頁 485 ~ 500
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11242-018-1154-7	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 該当する

1. 著者名 B. Liu, A. Suzuki, and T. Ito	4. 巻 -
2. 論文標題 Effect of Capillary Force on Performance of Shale Rock Fracturing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 53rd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium	6. 最初と最後の頁 -
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 Suzuki Anna, Minto James M., Watanabe Noriaki, Li Kewen, Horne Roland N.	4. 巻 -
2. 論文標題 Contributions of 3D Printed Fracture Networks to Development of Flow and Transport Models	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Transport in Porous Media	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11242-018-1154-7	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 該当する

1. 著者名 鈴木杏奈	4. 巻 38
2. 論文標題 地下資源開発における「かたち」と「ながれ」	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ながれ	6. 最初と最後の頁 21 ~ 25
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 無
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 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 16件)

1. 発表者名 A. Suzuki
2. 発表標題 Characterization of Relationships between Flow and Fracture Structures by Persistent Homology
3. 学会等名 九州大学エネルギーウィーク2020 12CNER国際ワークショップC02貯留研究部門 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Suzuki, Y. Mukuhira, R. N. Horne, A. Abe, A. J. Hawkins, T. Ishibashi, and P. K. Kang
2. 発表標題 Link between tracer and microseismic analysis to comprehensive understanding of hydraulic feature of fractured geothermal reservoir
3. 学会等名 The 19th International Symposium on Advanced Fluid Information (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Miyazawa, A. Suzuki, and T. Ito
2. 発表標題 Topological data analysis for estimating flow characteristics of 3D fracture network
3. 学会等名 the 16th International Conference of Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 B. Liu, A. Suzuki, and T. Ito
2. 発表標題 Effect of capillary force on performance of shale rock fracturing
3. 学会等名 53rd US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮澤美幸, 鈴木杏奈, 岡本敦, 大林一平, 平岡裕章, 伊藤高敏
2. 発表標題 パーシステントホモロジーを用いた3次元き裂ネットワークの構造評価
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Suzuki, M. Miyazawa, M. Konno, and T. Ito
2. 発表標題 Topological characterization of 3D printing fracture networks
3. 学会等名 InterPore 11th Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Suzuki Anna
2. 発表標題 Rock fracture characterization and flow experiment using 3D printed samples
3. 学会等名 UW-TU:AOS-Planning Workshop 2018-Spring (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Suzuki Anna, 宮澤美幸, 岡本敦, 清水浩之, 平岡裕章, 大林一平, 伊藤高敏
2. 発表標題 パーシステントホモロジーを用いた岩石き裂構造解析
3. 学会等名 JpGU2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Suzuki Anna, Miyazawa Miyuki, Okamoto Atsushi, Shimizu Hiroyuki, Hiraoka Yasuaki, Obayashi Ippei, Ito Takatoshi
2. 発表標題 Application of persistent homology to fracture characterization
3. 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society 15th Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Suzuki Anna
2. 発表標題 3D printing of controllable fracture network and evaluating of flow characteristics
3. 学会等名 2018 Flow and Transport in Permeable Media (GRS) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nguyen Thi Thanh Huong, Suzuki Anna, Uehara Satoshi, Hashida Toshiyuki
2. 発表標題 Dry-out phenomenon and flow behaviour in rocks for CO2 geological storage
3. 学会等名 The 15th International Conference of Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Miyazawa Miyuki, Suzuki Anna, Okamoto Atsushi, Shimizu Hiroyuki, Hiraoka Yasuaki, Obayashi Ippei, Ito Takatoshi
2. 発表標題 Analysis of rock fracture pattern and fluid flow by persistent homology
3. 学会等名 The 15th International Conference of Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Cui Junzhe, Suzuki Anna, Uehara Satoshi, Shirasu Keiichi, Ito Takatoshi
2. 発表標題 Estimation of crack width in porous media by nano/micro particles
3. 学会等名 The 15th International Conference of Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Cui Junzhe, Suzuki Anna, Uehara Satoshi, Shirasu Keiichi, Ito Takatoshi
2. 発表標題 Estimation of crack width in porous media by nano/micro particles
3. 学会等名 CouFrac2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木杏奈
2. 発表標題 デジタル・テクノロジーを駆使した貯留層評価研究の挑戦
3. 学会等名 日本地熱学会, 地熱貯留層に関する研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮澤美幸, 鈴木杏奈, 岡本敦, 清水浩之, 大林一平, 平岡裕章, 伊藤高敏
2. 発表標題 数値シミュレーションと組み合わせた構造解析による蛇紋岩の形成メカニズム推定
3. 学会等名 日本地質学会第125年学術大会 (2018つくば特別大会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Suzuki Anna
2. 発表標題 3D printing of controllable fracture network and evaluating of flow characteristics
3. 学会等名 2018 Flow and Transport in Permeable Media (GRC) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Suzuki Anna, Miyazawa Miyuki, Ito Takatoshi
2. 発表標題 Topological data analysis and 3D printing technologies for flow in fracture networks
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

査読なし学会論文

- ・M. Miyazawa, A. Suzuki, and T. Ito, "Topological data analysis for estimating flow characteristics of 3D fracture network", Proc. the 16th International Conference of Flow Dynamics, 598-599 (2019).
- ・J. Cui, A. Suzuki, S. Uehara, K. Shirasu, and T. Ito, "Estimation of crack width in porous media by nano/micro particles", Proc. the 15th International Conference of Flow Dynamics, 742-743 (2018).
- ・M. Miyazawa, A. Suzuki, A. Okamoto, H. Shimizu, I. Obayashi, and T. Ito, "Analysis of rock fracture pattern and fluid flow by persistent homology", Proc. the 15th International Conference of Flow Dynamics, 738-739 (2018).
- ・N. T. T. Huong, A. Suzuki, S. Uehara, and T. Hashida, "Dry-out phenomenon and flow behavior in rocks for CO2 geological storage", Proc. the 15th International Conference of Flow Dynamics, 736-737 (2018).
- ・B. Liu, A. Suzuki, and T. Ito, "A new flow model based on pore-scale network method for supercritical CO2 fracturing", Proc. the 15th International Conference of Flow Dynamics, 734-735 (2018).
- ・A. Suzuki, J. Cui, Y. Zhang, K. Li, and R. N. Horne, "Nano-/microparticle tracers for evaluating structures in fractured porous media", Proc. the 43rd Stanford Geothermal Workshop (2018).
- ・A. Suzuki, Y. Zhang, K. Li, and R. N. Horne, "Pore-scale flow and transport in fractured porous media", Proc. the 14th International Conference on Flow Dynamics, 848-849 (2017).
- ・A. Suzuki, K. Li, and R. Horne, "Potential utilizations of 3D printed fracture network models", Proc. the 42nd Stanford Geothermal Workshop (2017).

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
--	---------------------------	-----------------------	----