

令和 6 年 5 月 6 日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20383

研究課題名（和文）デジタル岩石で探る岩石の比抵抗を支配する特徴的空隙構造

研究課題名（英文）Utilizing digital rock physics for understanding the relationship between pore microstructure and rock resistivity

研究代表者

鈴木 健士（Suzuki, Takeshi）

京都大学・理学研究科・研究員

研究者番号：20965123

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、デジタル化された岩石を用いた数値計算から、実験では直接観測できない微細空隙構造を流れる電流を可視化し、その比抵抗と空隙構造の関係を調べた。その結果、空隙率の低下に対して比抵抗とその異方性は増加し、電流分布から計算される電流経路の屈曲度（最短経路に対する実際の経路の比の二乗）も増加する、という結果を得た。これら一連の結果は、空隙率が低いほど空隙の連結が妨げられ、電流経路の屈曲度も高まり、その結果として、高い比抵抗と異方性が生じるということを示唆している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物理探査等で推定される地下の比抵抗から水の量を推定するには、含水岩石の比抵抗と空隙率・含水率の関係式が必要であり、その式の中で仮定される空隙構造が実際の岩石内部の空隙構造を再現できているかはこれまで不明であった。これに対し本研究は、実験では直接観測できない微細空隙構造中を流れる電流を可視化し、そこから岩石比抵抗を支配する空隙構造・物理を明らかにできる可能性を示した。本研究が発展し、岩石の比抵抗、空隙率、含水率の関係の最適化が進めば、地中の水の量の推定の精緻化も期待され、地中の水と地球物理学的現象（火山・地震活動など）の理解の深化へとつながる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：Rock resistivity is essential for interpreting subsurface resistivity structures obtained from electromagnetic surveys. In this study, we evaluated the relationship between resistivity and pore microstructure of clay-free sandstones based on Digital Rock Physics. The simulation results demonstrated an increase in resistivity and its anisotropy with decreasing porosity. The tortuosity values calculated from the local electric current further explain the evolutions in resistivity. This suggests that the smaller pore volumes (i.e., porosities) prevent pore connectivity and enhance tortuosity, resulting in higher resistivity and anisotropy.

研究分野：固体地球惑星物理学

キーワード：岩石比抵抗 空隙率 デジタル岩石 砂岩 有限要素法 マイクロフォーカスX線CT 空隙形状 岩石物理モデル

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

比抵抗は水の存在に敏感な物性であるため、地上で観測された電磁場観測データから推定される地下比抵抗構造(比抵抗の分布)は、「地中の水の分布」を探るのに有効な情報である。例えば、火山地熱地帯においては火山熱水系の実態把握を通じた火山噴火のポテンシャルの評価などに、地震発生域においては震源域周辺の流体分布の可視化を通じた地震発生場の理解などに、幅広く用いられている(例えば、Kanda et al., 2019; Aizawa et al., 2021)。

しかし、比抵抗の分布を「水の量の分布」へ変換するには、含水岩石の比抵抗と含水率(空隙率)の関係式が必要となり、空隙の幾何学形状を仮定して数学的に解析解を記述した理論式(例えば、Waff et al., 1974; 渡辺 2005)と、実験値を説明するために構築された経験則(例えば、Archie 1942; Glover et al., 2000)があるが、一律に使用可能なものは現状存在しない。このことは、比抵抗から含水率を推定する際の大きな問題となっている。経験則は流体の分布や連結についての物理的イメージが明確でなく、理論式はその中で仮定される空隙構造の確からしさが分からないため、現状では比抵抗から水の量を一意に推定することは困難である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、多孔質岩石における空隙構造と比抵抗の関係を調べるための第一歩として、様々な空隙率の砂岩のデジタルデータを使用し、その空隙内部に流れる電流分布を計算し、そこから岩石比抵抗の計算を行い、既存の経験式や理論式との比較を行いながら、空隙構造と比抵抗の関係を調べることである。

3. 研究の方法

(1) 使用する CT 画像・岩石

計算にはデジタル化された Fontainebleau 砂岩、Mt. Simon 砂岩、Bentheimer 砂岩のデータを使用した。データは、ボクセル(立方体)で構成される 3 次元データであり、空隙部分と岩石部分で二値化されている。Fontainebleau 砂岩のグリッドサイズは $5.7 \times 5.7 \times 5.7 \mu\text{m}$ であり、モデルの空隙率は 8% から 26% まで幅広い値をもつ。同様に Mt. Simon 砂岩の解像度は $1.74 \mu\text{m}$ で空隙率は 7-10%、Bentheimer 砂岩の解像度は $1.66 \mu\text{m}$ で空隙率は 24-26% である。後者 2 つのデータは、Fontainebleau 砂岩データで得られた結果と比較するため Spline 補間でダウンサンプリングし、グリッドサイズを $5.7 \mu\text{m}$ に統一した。

データから、 $240 \times 240 \times 240$ のボクセルで構成されるモデルを Fontainebleau 砂岩については 56 セット、Mt. Simon 砂岩と Bentheimer 砂岩からそれぞれ 8 セット用意した。Fontainebleau 砂岩については 7 つの異なる空隙率(8、10、13、15、18、21、25%)の大きなモデルから、Mt. Simon 砂岩と Bentheimer 砂岩については 13.4% と 24.9% の大きなモデルから、それぞれ抽出する場所を変えて $240 \times 240 \times 240$ のボクセルで構成されるモデルを 8 セットずつ作成した。

Fontainebleau 砂岩の各空隙率における代表的な空隙構造を図 1 に示す。黒く示されている部分は空隙を示しており、モデルの空隙率が高くなるにつれ、その比率が

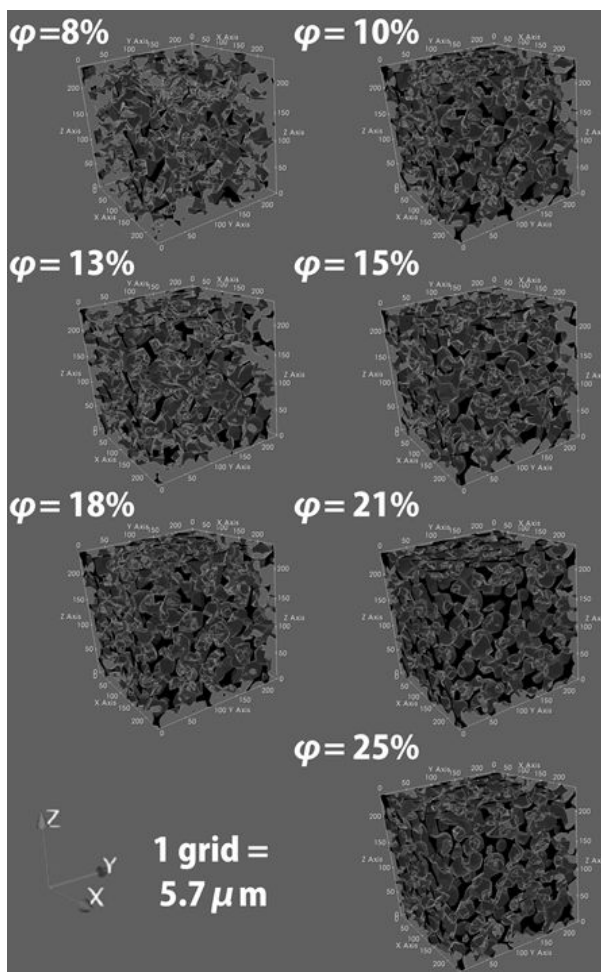


図 1 デジタル化されたフォンテーヌブロー砂岩。φ は空隙率を示す。

多くなる様子が確認できる。

(2) 岩石比抵抗の計算方法

デジタル岩石中の電流分布の計算は、有限要素法により行った(Garboczi, 1998; Sawayama et al., 2021)。本研究では、周期境界条件でモデル両端に電位差を加え、エネルギー勾配の最小化を共役勾配法によって繰り返し計算を解くことで電流分布を求めている。そこから、そこからモデルの比抵抗を求めた。空隙は海水で飽和している(比抵抗 $0.2 \Omega \cdot m$)とし、固相部分には乾燥岩石の代表的な比抵抗として $10^5 \Omega \cdot m$ をそれぞれ与えた。また、空隙構造の異方性についても評価するため、印加電圧の方向を変えて3方向(x軸、y軸、z軸)の比抵抗を計算した。

(3) 屈曲度の計算方法

本研究では、多孔質岩石の空隙中に流れる電流経路の屈曲度についても求めた各ボクセルにおいて、電圧印加方向と電流ベクトルの方向のなす角度から、屈曲度を計算した。なお、電位差を印加する軸が一つなのに対し、電位差を印加しない軸二つの屈曲度が得られるので、これを全ボクセルで求めて、その平均を取った値をモデル全体の屈曲度とした。

4. 研究成果

(1) 電流分布

電流分布の計算結果の一例として、y軸方向に電位差を加えた際に生じる局所的な電流分布の計算結果を図2に示す。図2は電流分布をカラーマップで示しており、最大電流量の1%未満の微弱な電流は透明としている。図2から、モデルの空隙率が高くなるにつれて流れる電流量が増え、モデル全体に電流が流れるようになっていく傾向を確認できる。

図2の電流分布を、z軸の中間点を通るxy平面のベクトル分布に直した図が図3である。電流ベクトルを赤、岩石部分を灰色、空隙部分を白で示している。ベクトルが互いに重なり合わないよう8点ごとに長さをスケールリングして図示し、その長さは電流量の大小を示している。空隙率が21%や25%といった高空隙率のモデルにおいては、ほとんどの電流の方向が電圧印加方向(y軸)に揃っている一方、空隙率が8%や10%といった低空隙率のモデルにおいては、電圧印加方向と垂直な(x軸)電流が多く確認された。

(2) 比抵抗と異方性

電圧印加方向の平均電流量から計算されたFontainebleau砂岩の比抵抗を、モデルの空隙率に対しプロットした図が図4である。マーカーの違いは電圧の印加方向を示している。比抵抗は空隙率の減少に対して累乗的に増加し、その傾向は比抵抗の方向に依らず概ね同じであった。また、空隙率が低いモデルにおいて得られた比抵抗は、その値のばらつきが大きく、空隙率が高いモデルにおいて得られた比抵抗は、値のばらつきが小さかった。空隙率と比抵抗の関係については、両対数グラフ上で直線的な関係が確認できるが、空隙率13%前後を境に低空隙率側と高空隙率側でその傾きが異なっている。

(3) 電流経路の屈曲度

計算された電流分布(図2)をもとに電流経路の屈曲度を求め、空隙率に対しプロットしたものが図5である。電圧の印加方向に依らず、空隙率の減少に対し屈曲度は増加した。空隙率と屈

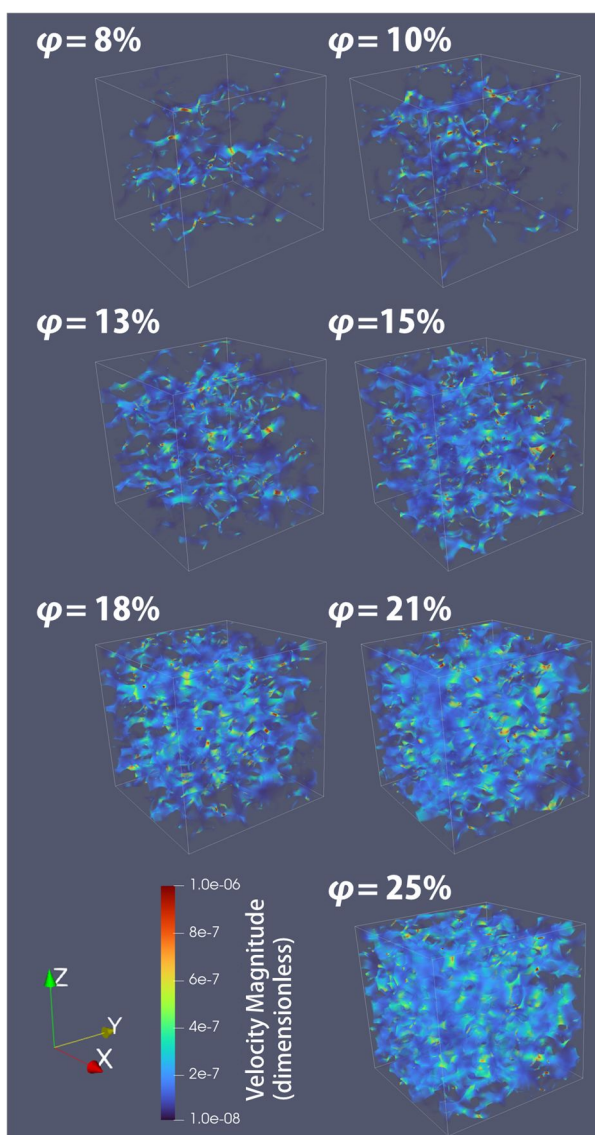


図2 計算されたデジタル岩石中を流れる電流分布。φは空隙率を示す。

曲度の関係は単純な線形の関係ではなく、空隙率が低くなるほど屈曲度の増加率は大きくなっている。また屈曲度の値のばらつきは低空隙率のモデルほど大きく、高空隙率のモデルほど小さかった。

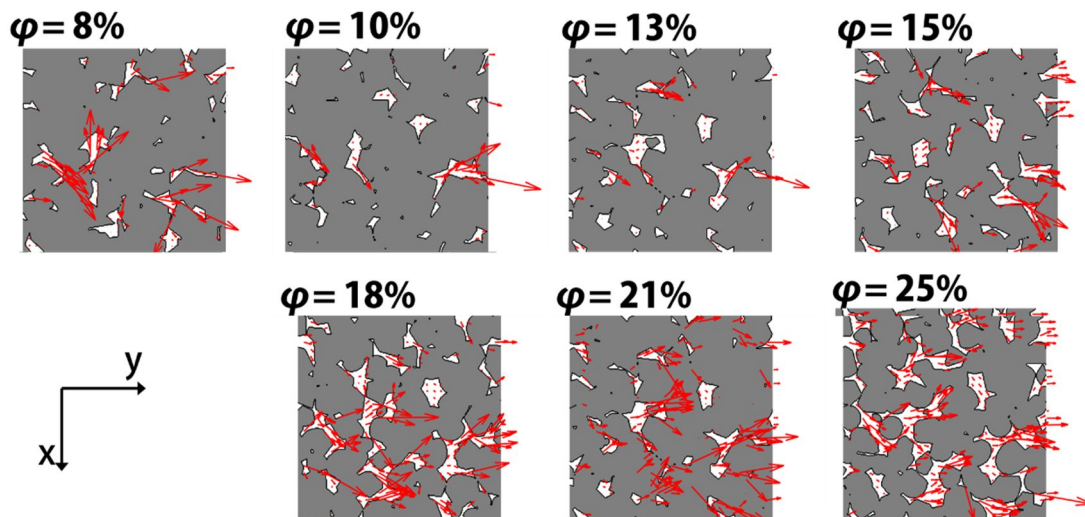


図 3 計算された電流分布の 2 次元コンター

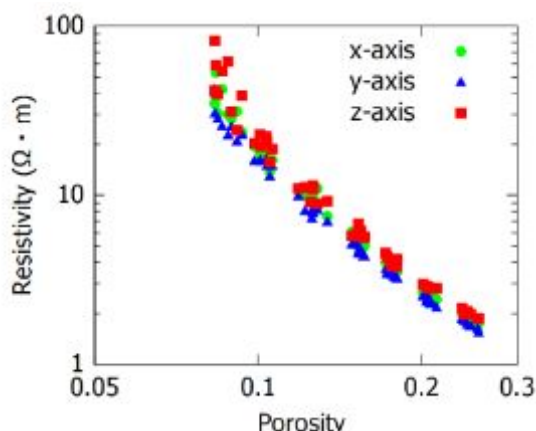


図 4 比抵抗と空隙率

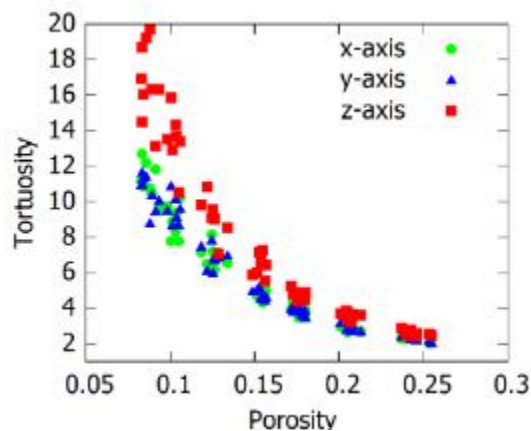


図 5 比抵抗と屈曲度

(4) 経験則・詩論式との比較

代表的経験則である Archie の式で、Fontainebleau 砂岩の各方向の比抵抗のフィッティングを行った。Archie の式に代入する経験的パラメータである a と m は、砂岩においてそれぞれ、 $0.5 \leq a \leq 2.5$ 、 $1.3 \leq m \leq 2.5$ の値をとるとされている (Guéguen and Palciauskas, 1994; 物理探査学会, 1989)。両対数グラフ上にて傾きが直線となる空隙率 17.2–25.5% の値でフィッティングを行うと、x 軸方向の比抵抗は $a=0.467$ 、 $m=2.216$ 、y 軸方向の比抵抗は $a=0.432$ 、 $m=2.116$ 、z 軸方向の比抵抗は $a=0.456$ 、 $m=2.188$ でフィッティングされた。これら a と m は先行研究と概ね整合的である (Hill and Milburn, 1956)。得られた比抵抗と、フィッティングした Archie の式、理論式であるチューブモデル、フィルムモデルを全てまとめて空隙率に対しプロットした図 6 である。また、Mt. Simon 砂岩と Bentheimer 砂岩の計算結果も図 6 にプロットしている。

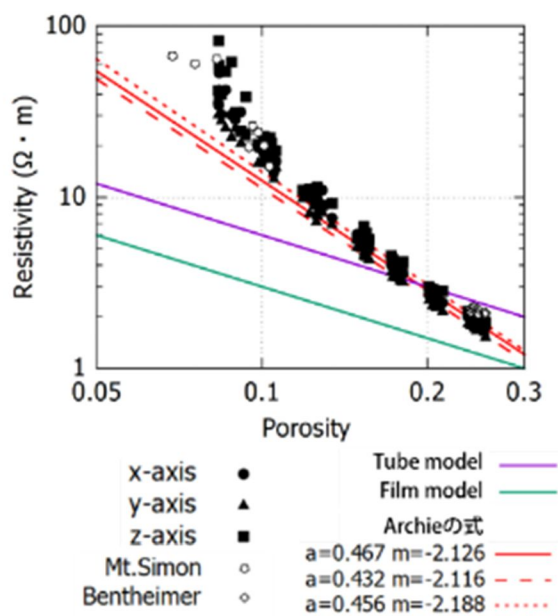


図 6 計算された比抵抗と経験則・理論式の比較

いずれの方向の比抵抗も空隙率 10% 以下になると経験的パラメータを代入した Archie の直線から逸脱している。このことは、Archie の

式を低空隙率の岩石に適用すること、単一のパラメータを代入した Archie の式から多孔質媒質の比抵抗を説明することの難しさを示唆している。また、その他の理論式も、その傾きは低空隙率の比抵抗と異なる。これは、単純な幾何学形状では砂岩の空隙形状を説明することは難しく、高空隙率の砂岩で得られた経験則もまた幅広い比抵抗の岩石を一様に説明することができないことを示唆している。

(5) まとめ

本研究は、デジタル化された岩石モデルを用いた数値計算から、実験では直接観測できない微細空隙構造を流れる電流を可視化し、それによって岩石比抵抗を支配する空隙構造・物理を明らかにできる可能性を示したものである。一連の結果から、空隙率が低いほど細孔の連結が妨げられて屈曲度が高まり、その結果、比抵抗とその異方性が高くなるということが示唆された。加えて、単純な幾何学形状を仮定する理論式だけで砂岩の空隙形状を説明することは難しく、高空隙率の砂岩で得られた経験則でも幅広い比抵抗の岩石を一様に説明することができないことが分かった。本研究を発展させることで、砂岩以外の様々な岩石においても、空隙構造から含水岩石の比抵抗と含水率(空隙率)の関係式を最適化できるようになるかもしれない。

引用文献

- W. Kanda, M. Utsugi, S. Takakura and H. Inoue, "Hydrothermal system of the active crater of Aso volcano (Japan) inferred from a three-dimensional resistivity structure model", *Earth, Planets and Space*, Vol. 71, pp. 1-10 (2019).
- K. Aizawa, S. Takakura, H. Asaue, K. Koike, R. Yoshimura, K. Yamazaki, S. Komatsu, M. Utsugi, H. Inoue, K. Tsukamoto, M. Uyeshima, T. Koyama, W. Kanda, T. Yoshinaga, N. Matsushima, K. Uchida, Y. Tsukashima, T. Matsushima, H. Ichihara, D. Muramatsu, Y. Teguri, A. Shito, S. Matsumoto and H. Shimizu, "Electrical conductive fluid-rich zones and their influence on the earthquake initiation, growth, and arrest processes: observations from the 2016 Kumamoto earthquake sequence, Kyushu Island, Japan" *Earth, Planets and Space*, Vol. 73, pp. 1-12 (2021).
- H. S. Waff, "Theoretical considerations of electrical conductivity in a partially molten mantle and implications for geothermometry" *Journal of Geophysical Research*, Vol. 79, pp. 26 (1974).
- 渡辺, "岩石の電気物性 レビュー" *地学雑誌*, Vol. 114, No. 6, pp. 837-861 (2005).
- G. E. Archie, "The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics", *Transactions of the AIME*, Vol. 146, No. 01, pp. 54-62 (1942).
- P. W. Glover, M. J. Hole and J. Pous, "A modified Archie's law for two conducting phases", *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 180 No. 3-4, pp. 369-383 (2000).
- Garboczi, "Finite element and finite difference programs for computing the linear electric and elastic properties of digital images of random materials", NIST Interagency/Internal Report (NISTIR), No. 6269 (1998)
- K. Sawayama, T. Ishibashi, F. Jiang, T. Tsuji, O. Nishizawa and Y. Fujimitsu, "Scale-independent relationship between permeability and resistivity in mated fractures with natural rough surfaces" *Geothermics*, Vol. 94, 102065 (2021).
- Y. Gueguen and J. Dienes, "Transport properties of rocks from statistics and percolation" *Mathematical geology*, Vol. 21, pp. 1-13 (1989).
- 物理探査学会, "図解物理探査" (1989) 物理探査学会.
- H. J. Hill and J. D. Milburn, "Effect of clay and water salinity on electrochemical behavior of reservoir rocks" *Transactions of the AIME*, Vol. 207, No. 01, pp. 65-72 (1956).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 SUZUKI Takeshi, SAWAYAMA Kazuki	4. 巻 73
2. 論文標題 多孔質岩石の空隙構造と比抵抗の関係解明に向けたデジタル岩石物理の活用	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of the Society of Materials Science, Japan	6. 最初と最後の頁 232 ~ 239
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jsms.73.232	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 Suzuki Takeshi, Yoshimura Ryokei, Yamazaki Ken'ichi, Minami Takuto, Sawayama Kazuki, Oshiman Naoto	4. 巻 220
2. 論文標題 Dependence of resistivity of natural rock samples on humidity	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Applied Geophysics	6. 最初と最後の頁 105271 ~ 105271
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jappgeo.2023.105271	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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Estimating electrical resistivity and tortuosity of sandstone using digital rock physics
2. 発表標題 Estimating electrical resistivity and tortuosity of sandstone using digital rock physics
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takeshi Suzuki, Kazuki Sawayama
2. 発表標題 Effects of anisotropy and tortuosity on the relationship between electrical resistivity and porosity of sandstone: insight from digital rock physics
3. 学会等名 AGU Annual Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木健士、澤山和貴
2. 発表標題 別府・阿蘇の地熱・火山地帯で採取された岩石試料の電気インピーダンス測定
3. 学会等名 2023年度 Conductivity Anomaly 研究会 (SGEPSS分科会)
4. 発表年 2023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

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