

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2021

課題番号：20K20948

研究課題名（和文）機械学習を用いてCTで得られた岩石間隙形状から物性を直接推定する新手法の開発

研究課題名（英文）Direct estimation of hydraulic and elastic properties from rock pore geometry based on machine learning

研究代表者

辻 健（TSUJI, Takeshi）

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：60455491

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：機械学習やパーシステント・ホモロジー（PH）を利用して、デジタル岩石モデル（岩石の間隙形状）から、その物理的性質（浸透率、弾性波速度、電気比抵抗）を推定する手法を開発した。

（1）機械学習を用いて、デジタル岩石モデル（間隙形状）から直接的に浸透特性や弾性波速度などを推定した。畳み込み層の数などのパラメータを最適化し、室内実験で生じる誤差と同様の精度で、浸透率と弾性波速度を推定することに成功した。

（2）PHを用いて、デジタル岩石モデルのパーシステンス・ダイアグラム（PD図）を構築した。PD図は岩石の間隙形状や配置の情報を有し、PD図を利用することで弾性波速度や浸透率を推定できることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

・高解像度CTを用いて取得した岩石内部構造の画像データ（デジタル岩石モデル）があれば、その岩石の水利特性や弾性特性、電気的特性を推定することが可能となった。この手法は、岩石の物性推定以外にも、CT画像を扱う医療分野や、人工素材の物性推定などの他分野への展開が考えられる。

・本研究で開発した手法を利用すれば、誰が解析しても同様の結果を得ることができる。近年、実験データの反復試験や再現性の問題が取り上げられることが多いが、その問題を低減することができる。

・機械学習で、物理特性を支配している間隙形状（岩石内部構造）を明らかにできることも分かり、岩石物理や地震学の分野へのフィードバックも可能となった。

研究成果の概要（英文）：We have developed methods to estimate physical properties (e.g., permeability, seismic velocity, and electrical resistivity) from the digital rock models based on machine learning and mathematical approach (i.e., persistent homology).

(1) We used machine learning to estimate physical properties (e.g., permeability and seismic velocities) directly from the pore geometry (digital rock model). We evaluated the optimum parameters in machine learning and succeeded to accurately estimate the permeability and seismic velocity.

(2) Because the persistence diagram derived from persistent homology includes information of the shape and geometry of rock pore space, the seismic velocity and permeability of the rock model can be estimated from the persistence diagram.

研究分野：探査工学

キーワード：デジタル岩石 機械学習 間隙形状 弾性波速度 電気比抵抗 浸透率 格子ボルツマン法 有限要素法

1. 研究開始当初の背景

地球科学や資源工学では、岩石中の流体挙動を調べることが多くの場面で求められる。例えば、地震や火山活動は、地下の流体挙動や水圧に影響を受けるとされている。また石油や天然ガスといった炭化水素の開発では、それらの流れやすさ（浸透率）が開発効率に大きく関係する。そのため現状では、岩石試料に対して室内実験を行い、長い時間をかけて浸透率を測定している。また地下構造を調べる際には物理探査を用いるが、物理探査で得られる情報は、波の伝わる速度（弾性波速度）や電気比抵抗である。そのため、岩石試料に対して室内実験を行い、それらの物理特性（弾性波速度、比抵抗など）を測定し、物理探査データと比較することで地下の岩石分布や物性を調べている。これらの室内実験（測定）には長い時間を要し、測定条件によって（測定する人によって）結果が変わることもあった。

近年、マイクロCTといったイメージング技術が発達により、実際の岩石の間隙形状を、 $\mu\text{m}$ の解像度で抽出することができるようになった。このデジタル岩石モデルに対して、数値シミュレーションを適用することで、その浸透特性や物理特性を調べることができる。このように数値シミュレーションによって、デジタル化した岩石から物性値を推定する学問分野「デジタル岩石物理」が構築されつつある。我々の研究室も、このアプローチの構築に向けて研究を実施してきた。しかし、これらの数値シミュレーションで得られる物理特性は、岩石の間隙形状と、構成粒子の物性に依存することになる。特に、岩石の間隙形状に強く依存していることが分かっている。つまり、デジタル化した岩石の間隙形状をモデル化できれば、その情報から直接、岩石物性を推定できる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究では、機械学習や数学的手法（パーシステント・ホモロジー）を利用して、岩石の間隙形状から物理特性（浸透率、弾性波速度、比抵抗）を直接推定する手法を開発する（図1）。それにより長年、実験で測定してきた物性値を、CT画像から機械学習等で推定し、岩石物理分野のパラダイムシフトを図ることを目的とした。さらに、機械学習が物理特性を推定する際に、注目する箇所を調べることで、岩石物理分野にフィードバックすることも試みた。

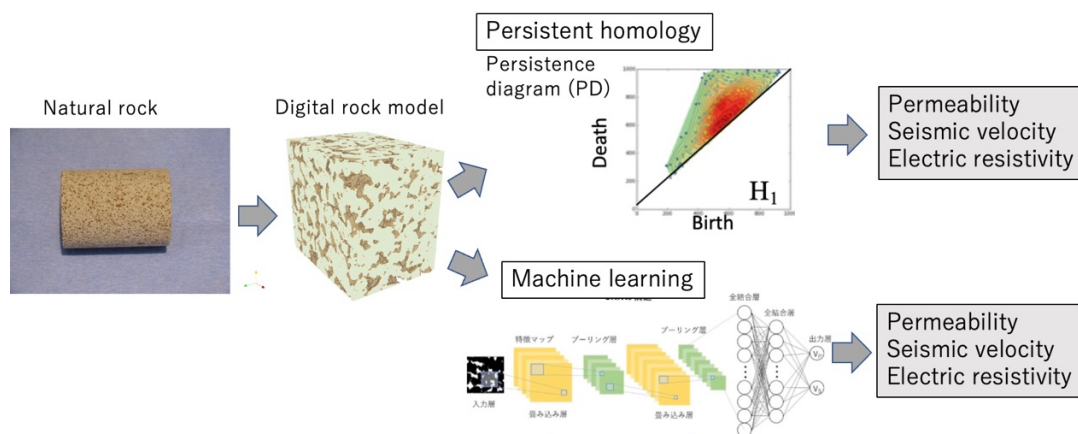


図1. パーシステント・ホモロジーを利用した手法と、機械学習を利用した手法を用いて、デジタル岩石モデルから物理特性を推定

3. 研究の方法

(1) 機械学習を用いた方法： 岩石の間隙形状（デジタル岩石モデル）を機械学習に入力し、その岩石の弾性波速度、電気比抵抗、浸透率を推定する試みを行なった。まずデ

デジタル岩石モデルに対して、格子ボルツマン法を適用することにより浸透率を推定した。さらに岩石モデルに対して有限要素法を適用することで、弾性波速度や電気比抵抗を推定した。これらを教師データとして利用し、機械学習を実施した。なお、本研究ではCNNを利用しているが、ResNetを導入して推定精度の向上を試みた。さらに畳み込み層の数など、多数のパラメータを変化させ、試行錯誤的に最適なパラメータを評価した。

- (2) パーシステントホモロジー用いた方法： 様々な岩石の3次元デジタルモデルに対してPHを適用し、パーシステンスダイアグラム (PD 図) を作成した。PD 図は岩石の間隙の分布や形状の情報を有している。この間隙形状の情報を有するPD 図から、浸透率や弾性波速度と関係する特徴量を抽出することで、その岩石モデルの物性値を推定した。さらに媒体内にフラクチャーを作成しながらCT画像を取得し、そのPD 図の時間変化を計算することで、フラクチャーの発達過程を特徴化することも試みた。

#### 4. 研究成果

- (1) 機械学習を用いて、デジタル岩石モデル (画像データ) から、浸透率、弾性波速度、電気比抵抗を推定することができた。なお、これまではCNNを用いてきたが、ResNetを導入して推定精度の向上を試みた。ResNetを利用することで深い層の学習が可能になり、推定精度を向上させることができた。弾性波速度については、平均2乗和誤差を約2%で推定できることが分かった。この誤差は小さく、本手法は実用的であることが分かる。浸透率を推定した結果では、室内実験で生じる誤差と同じオーダーで、浸透率を推定することに成功した。以上の結果から、マイクロCTで岩石の内部構造を捉えることができれば (比較的粒子の粗い砂岩であれば)、実用化のレベルまで技術を成熟させることができた。この成果は、例えば、Jiang et al., (2021)や釜野ほか(2022)などで報告している。

さらに機械学習を用いて、デジタル岩石モデルから弾性波速度を推定する際に、機械が注目する領域の可視化 (Heatmap の作成) を行った。その結果、弾性波速度の推定では、粒子同士の結合の強い固体粒子に注目していることが分かった。この手法で得られる情報 (物性推定での注目領域) は、岩石物理学や地震学の分野で利用できると考えられる。現在は、浸透率や電気伝導度を推定する上で、機械が注目する場所の推定も実施している。この成果の一部は、Shige et al. (2021)で報告している。

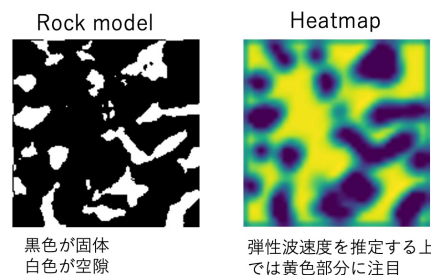


図 2. 弾性波速度を推定する際に注目している領域の可視化。

- (2) パーシステント・ホモロジーを用いて、亀裂の連結度と形状を特徴化し、浸透率を推定することに成功した。一方で亀裂の屈曲度を考慮することが難しく、岩石の種類によっては、浸透率の推定精度が低下することも明らかになった。この成果は、Suzuki et al.(2021)等で報告されている。

さらにパーシステント・ホモロジーを用いて、亀裂の初期発生時の特徴化を行った。パーシステンス・ダイアグラム (PD 図) 上で、亀裂の発生プロセスの変化を捉えることに成功し、それを解釈することで亀裂の発達過程に迫ることに成功した。この成果は、Ando et al. (2021)として公開されている。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Jiang Fei, Yang Jianhui, Boek Edo, Tsuji Takeshi	4. 巻 147
2. 論文標題 Investigation of viscous coupling effects in three-phase flow by lattice Boltzmann direct simulation and machine learning technique	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advances in Water Resources	6. 最初と最後の頁 103797 ~ 103797
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.advwatres.2020.103797	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 Suzuki A., Miyazawa M., Okamoto A., Shimizu H., Obayashi I., Hiraoka Y., Tsuji T., Kang P.K., Ito T.	4. 巻 143
2. 論文標題 Inferring fracture forming processes by characterizing fracture network patterns with persistent homology	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computers & Geosciences	6. 最初と最後の頁 104550 ~ 104550
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cageo.2020.104550	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 釜野太郎, 實松 豊, 辻 健	4. 巻 44
2. 論文標題 畳込みニューラルネットワークによる岩石の弾性波速度推定	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 映像情報メディア学会技術報告	6. 最初と最後の頁 55 ~ 60
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 Ando Isshin, Mugita Yasutaka, Hirayama Kyosuke, Munetoh Shinji, Aramaki Masatoshi, Jiang Fei, Tsuji Takeshi, Takeuchi Akihisa, Uesugi Masayuki, Ozaki Yukiko	4. 巻 828
2. 論文標題 Elucidation of pore connection mechanism during ductile fracture of sintered pure iron by applying persistent homology to 4D images of pores: Role of open pore	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Science and Engineering: A	6. 最初と最後の頁 142112 ~ 142112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.msea.2021.142112	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 Anna, Miyazawa Miyuki, Minto James M., Tsuji Takeshi, Obayashi Ippei, Hiraoka Yasuaki, Ito Takatoshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Flow estimation solely from image data through persistent homology analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 17948
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-97222-6	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 Zhang Yutian, Jiang Fei, Tsuji Takeshi	4. 巻 247
2. 論文標題 Influence of pore space heterogeneity on mineral dissolution and permeability evolution investigated using lattice Boltzmann method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemical Engineering Science	6. 最初と最後の頁 117048 ~ 117048
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ces.2021.117048	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 Suwandi Natanael, Jiang Fei, Tsuji Takeshi	4. 巻 58
2. 論文標題 Relative Permeability Variation Depending on Viscosity Ratio and Capillary Number	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Water Resources Research	6. 最初と最後の頁 e2021WR031501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021WR031501	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 Sawayama K., Ikeda T., Tsuji T., Jiang F., Nishizawa O., Fujimitsu Y.	4. 巻 127
2. 論文標題 Elastic Wave Velocity Changes Due to the Fracture Aperture and Density, and Direct Correlation With Permeability: An Energetic Approach to Mated Rock Fractures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 e2021JB022639
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021JB022639	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 Sawayama K., Ishibashi T., Jiang F., Tsuji T., Nishizawa O., Fujimitsu Y.	4. 巻 94
2. 論文標題 Scale-independent relationship between permeability and resistivity in mated fractures with natural rough surfaces	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geothermics	6. 最初と最後の頁 102065 ~ 102065
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.geothermics.2021.102065	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 Sawayama K., Ishibashi T., Jiang F., Tsuji T., Fujimitsu Y.	4. 巻 54
2. 論文標題 Relating Hydraulic-Electrical-Elastic Properties of Natural Rock Fractures at Elevated Stress and Associated Transient Changes of Fracture Flow	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Rock Mechanics and Rock Engineering	6. 最初と最後の頁 2145 ~ 2164
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00603-021-02391-5	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 釜野太郎、實松 豊、辻 健	4. 巻 121 (390)
2. 論文標題 3次元CNNとResNet を用いた岩石浸透率の推定	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 74 ~ 79
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 K. Shige, T. Tsuji, T. Ikeda, K. Sawayama	4. 巻 -
2. 論文標題 Estimation of elastic wave velocity in digital rocks: insight from feature extraction of pore structure using convolutional neural network	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceeding of International Symposium on Earth Science and Technology (CINEST)	6. 最初と最後の頁 25 ~ 26
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6件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 尾崎由紀子, 中村浩二, 宗藤伸治, 荒牧正俊, 平山恭介, 辻 健, 蔣 飛
2. 発表標題 パーシステントホモロジーを用いた鋼材の延性破壊過程の3次元解析
3. 学会等名 応用のためのトポロジカルデータ解析ワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澤山 和貴, 石橋 琢也, 蔣 飛, 辻 健, 藤光 康宏
2. 発表標題 表面形状が制約する岩石亀裂の物理的・水理的特性の関係: デジタル岩石物理による検討
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木 杏奈, 宮澤 美幸, James Minto, 辻 健, 伊藤 高敏
2. 発表標題 Characterization of permeability based on topological data of fracture network
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 池田 倫治, K. Kret, 辻 健, 池田 達紀, 辻 智大, 大西 耕造, 西坂 直樹
2. 発表標題 Pore geometry and elastic moduli of fault rocks accompanied by the Median Tectonic Line in Shikoku, southwestern Japan
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 繁 恒樹, 辻 健, 實松 豊, 池田 達紀, 蔣 飛, 澤山 和貴
2. 発表標題 機械学習を用いて岩石CT画像から弾性波速度を推定する手法の開発
3. 学会等名 物理探査学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takeshi Tsuji
2. 発表標題 Challenges and Opportunities of Geophysical Exploration to Meet Future Energy Demands
3. 学会等名 SEACG2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020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	實松 豊  (Yutaka Jitsumatsu)  (60336063)	東京工業大学・工学院・准教授    (12608)	
研究分担者	J i a n g F e i  (Jiang Fei)  (60734358)	山口大学・大学院創成科学研究科・准教授    (15501)	
研究分担者	平野 靖  (Hirano Yasushi)  (90324459)	山口大学・大学院創成科学研究科・准教授    (15501)	

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