

令和 2 年 6 月 7 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K14169

研究課題名（和文）デジタル岩石物理学によるフラクチャーを含む岩石のアップスケーリング

研究課題名（英文）Upscaling of fractured rock using digital rock physics

研究代表者

池田 達紀（Ikeda, Tatsunori）

九州大学・工学研究院・助教

研究者番号：00736845

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、デジタル岩石物理学により、フラクチャー（クラック）を含む不均質な岩石サンプルの弾性的特徴をアップスケールする手法の開発を行なった。その結果、岩石内部のクラックのアスペクト比や不均質性を考慮しながら、岩石サンプル全体を異方性弾性体としてモデル化することができた。モデル化に必要なパラメータ決定においては、さらなる制約が必要であることがわかったものの、この手法により不均質性を異方性として反映しながらモデル化することが可能になると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の岩石物理学に基づく理論的な手法では、フラクチャーなどの不均質性の強い岩石サンプルをモデル化することが困難である。そこで本研究では、X線CTスキャナによりデジタル化した岩石を利用し、岩石内の不均質性やクラック形状を考慮できるモデル化手法を開発した。この手法により地熱貯留層になりうるフラクチャーやクラックなどを含む不均質な岩石をモデル化することで、貯留層特性を精度よく把握することに役立てることができると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a method to upscale elastic characteristics of heterogeneous rock samples including fracture (or crack) using digital rock physics. As a result, we can model whole rock samples as anisotropic media considering the crack aspect ratio and heterogeneity within rock samples. Although a further constraint is required to define parameters in our modeling, our approach has a potential to model heterogeneous rock samples reflecting heterogeneity as anisotropy.

研究分野：デジタル岩石物理学

キーワード：デジタル岩石物理学 数値シミュレーション アップスケール フラクチャー クラック 異方性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地下に存在する断裂系(フラクチャー)は地熱貯留層としてのポテンシャルが高いため、フラクチャーが卓越する岩石をフィールドスケールにモデル化(アップスケール)することができれば、貯留層としてのポテンシャル評価や地熱貯留層のモニタリングの高精度化につながる。しかしながら、フラクチャーのような強い不均質性を持つ岩石は、従来の岩石物理学による理論的な取り扱いによるモデル化が困難であり、アップスケールする手法の確立には至っていない。一方、近年の画像解析技術とデータ取得機器の発達により、X線CTスキャナにより岩石サンプルの内部構造を3次元的に可視化し、数値シミュレーションによりその岩石物性を調べるデジタル岩石物理学が急速に発達している(例えば、Dvorkin et al., 2011)。デジタル岩石物理学により、フラクチャーやクラックを含む複雑な岩石であっても、その特性を数値的にモデル化することが可能であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、フラクチャーを含む不均質な岩石をアップスケールするためのデジタル岩石物理学を用いた手法開発を目的とする。具体的には、岩石サンプルをX線CTスキャナでデジタル化し、数値シミュレーションを適用することで、不均質な岩石サンプルを異方性を有する均質な媒質としてアップスケールすることを試みる。

3. 研究の方法

(1) デジタル岩石データの取得

本研究では、フラクチャー(クラック)を含む不均質な岩石として、延岡衝上断層の露頭で取得された高さ38mm、直径38mmの円柱状のサンプルを利用した。このサンプルに高知大学海洋コア総合研究センターのマイクロX線CTスキャナ(Xradia; 解像度41 μ m)を適用することで、岩石のデジタル画像データを取得した(図1)。デジタルデータは1004 \times 1014 \times 1018ピクセルであり、一辺が約4cmの立方体に対応する。

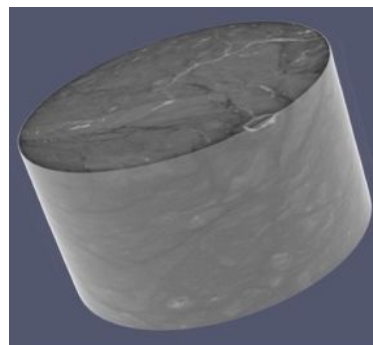


図1. 岩石サンプルの3次元デジタル画像データ。グレースケールはCT値に対応しており、色が白いほどそのピクセルの密度が高いことを表している。

(2) 3次元弾性体モデルの作成

このサンプルに対し、segmentation less 岩石物理学(Tisato and Spikes, 2016)に基づき、ピクセルごとに弾性定数が異なる3次元弾性体モデルを作成した。まず、岩石サンプルの密度データをもとにデジタルデータの輝度値(CT値)(図2a)を密度分布に変換した(図2b)。さらにピクセルごとの密度情報から空隙率を推定し(図2c)、有効媒質理論を適用することでピクセルごとの弾性定数を決定した(図2d)。有効媒質理論としては Modified Hashin-Shtrikman bound (MHS) (Nur et al., 1998)および Differential Effective Medium (DEM) (Mukerji et al., 1995)の2種類を適用し、それぞれの有効性を検討した。

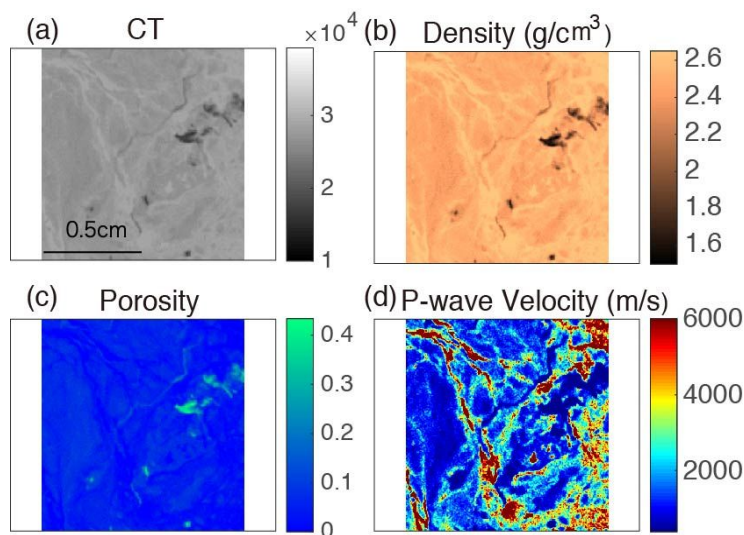


図2. segmentation less デジタル岩石物理により3次元デジタルデータのある断面に対し、各ピクセルのP波速度を推定した例。(a)CT値、(b)密度、(c)空隙率、(d)P波速度の分布。

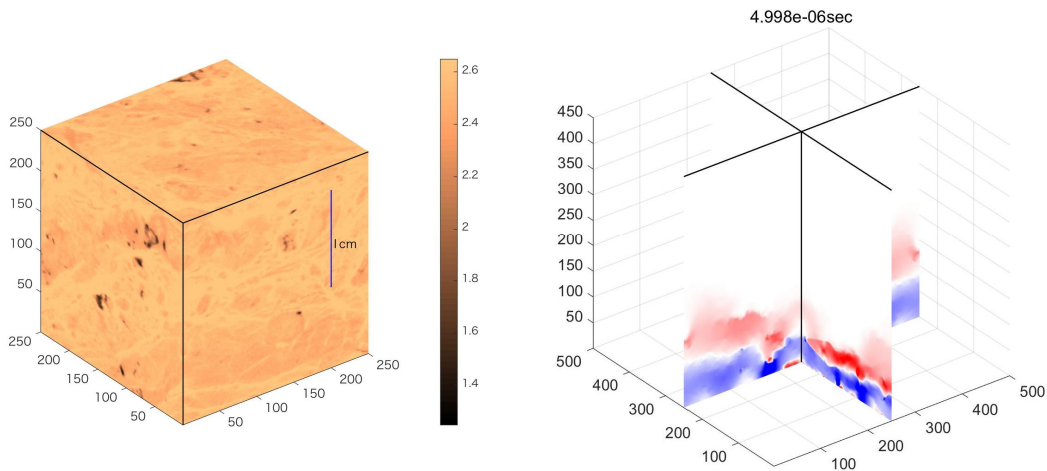


図 3. (左)波動シミュレーションに用いた弾性体モデル(密度分布 (g/cm³)). (右)左に示すモデルに対して下面から P 波を入射させた例。

(3)弾性波動シミュレーションによる P 波および S 波速度の推定

作成した 3 次元弾性体モデルに対し、弾性波動シミュレーションを適用することで、デジタル岩石全体の P 波および S 波速度を推定した(図 3)。ただし 3 次元弾性体モデル作成におけるピクセルごとの弾性定数は、有効媒質理論の種類やそのパラメータ(クラックのアスペクト比および critical porosity) に依存する。これらのパラメータを制約するために、実験室で P 波および S 波速度を計測し、シミュレーション結果と比較した。さらに弾性波の入射方向を変えることにより、弾性波速度の異方性を計測し、異方性弾性体モデルを作成した。

4 . 研究成果

有効媒質理論として MHS を用いたモデリングにおいて、critical porosity ごとに弾性波動シミュレーションにより推定した P 波および S 波速度を図 4 に示す。同じ岩石サンプルに対して実験室で計測した P 波および S 波速度と比較すると、critical porosity が 4% の場合、シミュレーションによる S 波速度と実験値の差は 9.7% であるのに対し、P 波速度は 50% 程度過大評価をしてしまう。一方、critical porosity を導入した DEM を用いたモデリングの結果では、より実験値に整合的なシミュレーション結果が得られていることがわかる(図 5)。例えば、critical porosity を 10%、クラックのアスペクト比(α)を 0.075 とすると、P 波、S 波速度の実験値との差はそれぞれ 2.0、1.4% である。

これは今回用いた岩石に対しては、DEM を用いたモデリングの方が適していることを示している。しかしながら、異なる critical porosity を用いた場合においても実験値と整合性の高い結果が得られており、critical porosity と α を一つの P 波、S 波速度の実験値から決定することは難しい。あらかじめ、実験的に critical porosity もしくはアスペクト比を見積もっておく必要があると考えられる。

さらに critical porosity を 10%、クラックのアスペクト比を 0.075 とした DEM を用いたモデリングによる 3 次元弾性体モデルに対し、波の入射方向を変えることにより P 波速度の異方性を推定した。その結果、鉛直(z)方向を伝播する P 波比べ、水平(x, y)方向を伝播する P 波速度の方が 40% 程度速いという顕著な異方性を観測した。異方性の卓越す

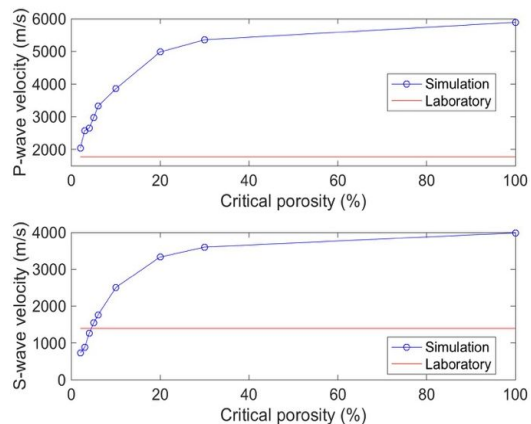


図 4. MHS を用いたモデリングによる数値シミュレーション結果と実験値の比較。

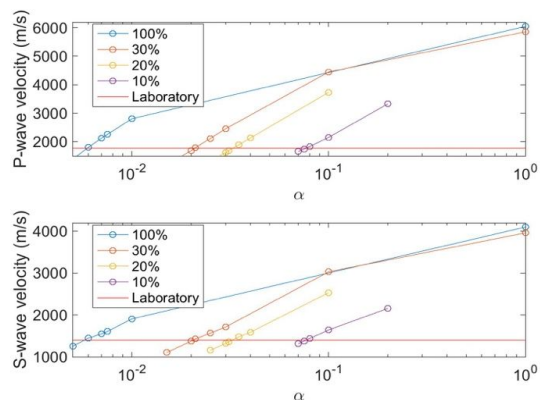


図 5. DEM を用いたモデリングによる数値シミュレーション結果と実験値の比較。カラーの違いは critical porosity の違いに対応する。

る方向や強度はそれぞれフラクチャーの方向やその密度と関連していると考えられる。

今回適用したデジタル岩石の解析手法により、不均質な岩石をその内部の不均質性(密度分布)やクラック形状を考慮しながら、均質な異方性弾性体としてモデル化することができる。当初は高解像度(解像度 1~数 μm)のデジタル画像データを取得し、空隙分布を推定することを計画していた。しかしながら、解像度以下の微細なスケールの不均質性が確認されたため、逆に解像度を下げ、ピクセルごとにアップスケールする segmentation less 岩石物理学を適用した。この方法では、岩石内の空隙形状の推定が困難であり、流体シミュレーションによる水理特性と波動シミュレーションによる弾性特性を結びつけることができなかった。一方で低解像度なため、デジタルモデル全体は cm スケールとなる。そのため、よりフィールドに近いスケールの現象と結びつけやすく、実験値との比較では、サンプルのサイズや入力周波数など、室内実験とほぼ同じ条件で数値シミュレーションを行うことができる。

課題としては、ピクセルごとに適用する有効媒質理論の適用限界が明らかになっていない点が挙げられる。その適用性検証のため、様々な解像度で同じ範囲のデジタルデータを取得し、適用限界について議論する必要がある。

<引用文献>

J. Dvorkin, N. Derzhi, E. Diaz, and Q. Fang, Relevance of computational rock physics, *Geophysics*, 76(5), 2011, E141–E153.

T. Mukerji, J. Berryman, G. Mavko, and P. Berge, Differential effective medium modeling of rock elastic moduli with critical porosity constraints, *Geophysical Research Letters*, 22(5), 1995, 555–558.

A. Nur, G. Mavko, J. Dvorkin, and D. Galmudi, Critical porosity: A key to relating physical properties to porosity in rocks, *Leading Edge*, 17, 1998, 357–362.

N. Tisato, and K. Spikes, Computation of effective elastic properties from digital images without segmentation, *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2016*, 2016, 3256–3260.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 K. Sawayama, T. Ikeda, T. Tsuji, and Y. Fujimitsu
2. 発表標題 Numerical experiments of elastic wave propagation through digitalized fractures under various aperture and saturation conditions
3. 学会等名 International Symposium on Earth Science and Technology 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 澤山和貴、池田達紀、藤光康宏
2. 発表標題 デジタル岩石亀裂を用いた比抵抗及び弾性波速度に対する水飽和の影響の解明
3. 学会等名 日本地熱学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Sawayama, F. Jiang, T. Ikeda, T. Ishibashi, T. Tsuji, Y. Fujimitsu, and H. Asanuma
2. 発表標題 Estimation of Permeability and Water Saturation from the Resistivity and Elastic Wave Velocity: Insight from Laboratory Experiment and Digital Fracture Simulation
3. 学会等名 World Geothermal Congress 2020 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田達紀、辻健
2. 発表標題 デジタル岩石物理学による岩石の不均質性を考慮した弾性的特性のモデル化
3. 学会等名 物理探査学会第141回学術講演会
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----