

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：15501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18331

研究課題名(和文)多孔質内CO₂-油-水三相システムの挙動解明を目指したデジタルロック解析法の開発研究課題名(英文) Development of Digital Rock Method to Elucidate the Behavior of CO₂-Oil-Water System in Porous Media

研究代表者

Jiang Fei (Jiang, Fei)

山口大学・大学院 創成科学研究科・助教

研究者番号：60734358

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、CO₂圧入による回収率増進技術であるCO₂-EOR(Enhanced Oil Recovery)や、CO₂地中貯留技術における、岩石孔隙内に超臨界状態のCO₂、鉱物、油及び水の複雑な流動現象を解明することを目指した。そのため、油-水-CO₂三相モデルを開発し、大規模デジタルロックシミュレータを構築した。実験では時間的・コスト面から実現が困難あるいは不可能な条件下のCO₂-EORシナリオを再現できた。実の岩石空隙スケールレベルでの流れ計算によって、三相浸透率を正確に推定することに成功した。原油の回収率が三相流の界面張力、粘性及び岩石の濡れ性などのパラメータへの依存性を調べた。

研究成果の概要(英文)：This study aims to elucidate the complex flow behavior of CO₂-oil-water-mineral system for the application of CO₂ geological storage technique with the combination of enhanced oil recovery (CO₂-EOR). For this purpose, we developed a large scale digital rock simulator with a three-phase model. We successfully reproduced various CO₂-EOR scenarios by computer simulations, which are impossible to be investigated by experimental approach. By carrying out the complex flow simulation directly on the pore-scale rock geometry, we successfully calculated the three-phase relative permeability of CO₂-oil-water-mineral system. Moreover, the relationships between oil recovery factor with parameters such as interfacial tension, viscosity and wettability have been investigated.

研究分野：計算力学

キーワード：デジタルロック EOR 多孔質媒体シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

近年国際的に地球温暖化対策とされる二酸化炭素 (CO₂) の回収・貯留技術 (CCS) の重要性に対する認識が高まっている。特に東日本大震災以降、石炭火力発電所の新設計画が相次いでおり、CCS の早期の技術確立が喫緊の課題となっている。しかし、CCS 地中貯留の実施に当り、その安全性、キャパシティ及び地層にもたらす影響などを慎重に評価する必要がある。また、CCS の社会受容性を向上するため、エネルギーコストへの影響を考慮し、CCS 配備石炭火力の発電原価を低減する対策が必要となる。CO₂-EOR は、CO₂ を油層に圧入することで、石油をより押し出しやすくする斬新な技術である。これは原油回収率を向上するだけでなく CO₂ 排出量削減にも貢献できる技術、CCS を単なるゴミ処理のイメージから経済利益を生み出す技術と転換する技術と、世界各国で注目を集めている。しかし、CO₂-EOR に関する技術的経験や、CO₂・鉱物・油及び水の複雑システムに関する基礎研究はまだ未熟である。特に岩石孔隙スケール(数 μm 以下)における複雑多相流動の解明が CCS 地中貯留の安全評価や CO₂-EOR 技術確立には不可欠である。

2. 研究の目的

油-水-CO₂ 三相流システム挙動解明は非常に複雑であり、特に薄膜流動現象をモデリングするのが重要である。これは水濡れ性媒体中に取り残された油滴が、ある界面張力条件下で水と CO₂ の間で薄膜化し、再び連続性を持つことで流動性を回復する現象で、その石油増進効果は既に確認されている。しかし、薄膜形成に影響を与える因子(拡張係数、毛細管圧力、圧入レート、圧入量、浸透率など)と回収率、回収に要する時間の関係はまだ解明されておらず、本研究では、これらの因子が CO₂-EOR に対する影響を定量的評価する目的とした油-水-CO₂ 三相モデルの開発及び大規模デジタルロックシミュレータの構築を目指す。

3. 研究の方法

この地下の流動現象は、流体の物性(粘性、密度)、ポアの形状(大きさ、分布)、濡れ特性(ウェッタビリティ)に代表される岩石の性質、CO₂ 圧入速度、油-水-CO₂ 三相界面張力等の条件により、その挙動が大きく変化する。このような複雑な現象を解明するためには、スタンフォード大学が提唱しているデジタルロック技術が注目されている。これは岩石サンプルを Micro-CT などのイメージング技術で岩石物質成分や空隙形状データを採取し、それを用いてコンピュータ上で空隙内流体シミュレーションの実施や、サンプル全体の浸透率、電気伝導度、弾性係数などの計

算方法である。

我々はこのデジタルロックにおいて、革新的な流体計算手法である格子ボルツマン法 (LBM: Lattice Boltzmann Method) を用いて、界面現象の物理化学モデルを加え、CO₂-油-水三相システムの挙動解明を目指した大規模デジタルロックシミュレータを開発した。LBM は、流体を格子上で並進・衝突する仮想的な粒子の集合体ととらえ、格子上の粒子分布関数を用いて質量・運動量保存則をみたすように流体の巨視的変数を求める手法である。従来の Volume of Fluid (VOF) 法や Level Set 法などの界面追跡法と異なり、粒子間相互作用による多相流体界面を自己組織的に再現でき、比較的簡単なアルゴリズムで多相流体の移動と変形を捕らえることができる。この手法の優れた境界適合性を併用し、複雑な多孔質形状内の流れ計算に応用することができた。本研究では、岩石サンプルから、断面 CT の画像を処理、デジタルロック構築、三相流体シミュレーション、原油回収率の評価など一連の解析手法を構築した。開発したシミュレータを大規模化及び効率化し、パソコンで空隙内油-水-CO₂ 三相流動計算を行った。

4. 研究成果

(1) 貯留層岩石に対するデジタルロックの再構築

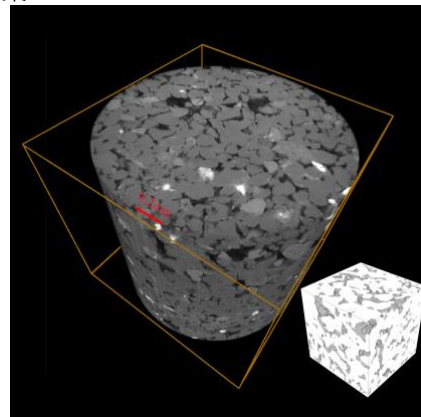


図1. マイクロ X-CT 画像から構築されたベレア砂岩のデジタルロック

代表性のあるベレア砂岩サンプルを、約 2mm 単位のサイズに加工し、円柱に整形した。整形したサンプルを 1-2 ミクロンの解像度で CT 測定を行い、得られた CT 断面図から、岩石性質(空隙サイズ、均一性)を分析し、画像処理技術で空隙形状を明確に分かるように最適化した。二次元の断面像から補間計算によって、岩石 3 次元形状モデルを再構築した(図1)。

(2) 格子ボルツマン法三相流動モデルの開発及び検証

格子ボルツマン法三相流動モデルの開発及び検証は完成できた。多相分離、ラプラ

ス法則、接触角(図2)などの検証シミュレーションを行って、計算精度を確認した。多孔質媒体内における超臨界 CO2-水-油が共存した流体挙動のモデリングが成功した。また、GPU を用いて開発した三相流シミュレーターを高速化及び大規模化することができた。

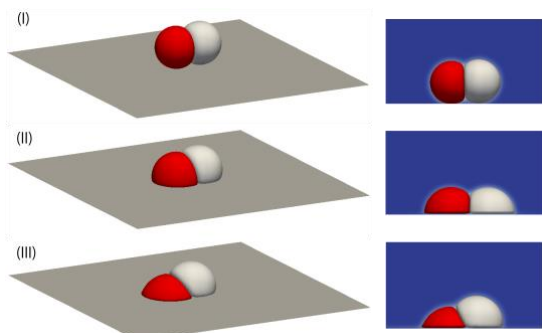


図2. 岩石濡れ性を反映する為の三相(油:赤, CO2:白)接触角の検証:I. 接触角 $60^\circ - 60^\circ$, II. 接触角 $90^\circ - 90^\circ$, III. 接触角 $30^\circ - 120^\circ$

(3) 実岩石形状へ適用し、三相浸透率を計算

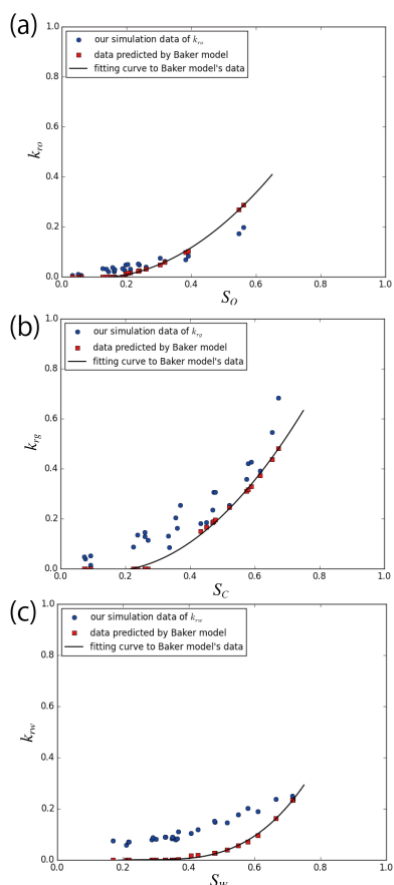


図3. 油-水- CO2 三相浸透率の計算結果と経験式の値の比較:(a) 油の浸透率, (b) CO2 の浸透率 (c) 水の浸透率

大型計算クラスターの実装によって、高解像度且つ高効率の三相流計算モデル及び大規模デジタルロックシミュレーターが完成

でき、実験では時間的・コスト面から実現が困難あるいは不可能な条件下の CO2-EOR (CO2 圧入による石油回収率増進技術) シナリオを容易に再現することができた(図4)。実の岩石空隙スケールレベルでの流れ計算によって、三相浸透率を正確に推定することに成功した(図3)。

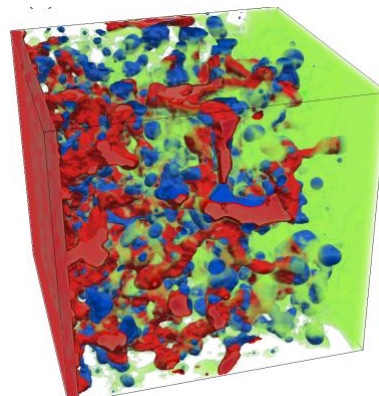


図4. CO2 圧入による石油の回収シミュレーション (赤:CO2, 青:石油, 緑:地下水)

(4) 油-水-CO2 三相岩石内の挙動が界面張力・粘性・濡れ性の依存性を調べ、CO2-EOR のメカニズムの更なる解明及び回収率評価に応用

三相流の界面張力及び粘性及び岩石の濡れ性などのパラメータが岩石空隙内の複雑流れの挙動に大きい影響を与える。これらのパラメータを調整し、CO2-EOR における原油の生産排出過程のシミュレーションを行った。計算結果の分析による CO2 の圧入有効性及び残留石油クラスターの形状、表面積などを評価指標として、回収率の依存性を調べた。また、圧入した CO2 の貯留量や、CO2 の流れやすさを定量的に推定できた。石油回収の流れパターン(ピストン状排出過程とフィルム状排出過程)も再現できた(図5)。

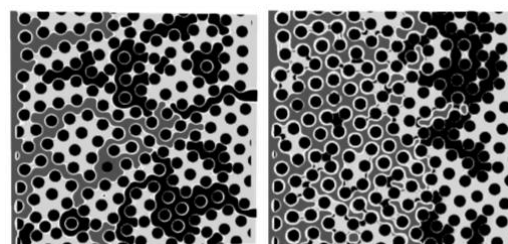


図5. 人工多孔質媒体内の三相流れシミュレーション。(黒:石油及び鉱物粒子、灰色:CO2、白:水。)左:ピストン状排出過程。右:フィルム状排出過程

今後の展望として、デジタルロック解析で得られた結果を従来のマクロモデル(貯留層シミュレーター)に組み込み、より正確且つ信頼性の高い情報を CO2-EOR プロジェクト評価に提供する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

① **Fei Jiang**, Takeshi Tsuji, Tomoyuki Shirai, Pore Geometry Characterization by Persistent Homology Theory, Water Resources Research, accepted, 2018. [査読あり]
DOI: 10.1029/2017WR021864

② Kengo Ikuo, **Fei Jiang**, and Takeshi Tsuji, Characterization of fluid behavior in 3D digitalized fracture using Lattice Boltzmann Method: Evolution of permeability by shear deformation and its representative elementary volume (in Japanese), Journal of MMIJ, accepted, 2018. [査読あり]

③ S. Singh, **F. Jiang**, and T. Tsuji, Impact of the kinetic boundary condition on porous media flow in lattice Boltzmann formulation, Physical Review E 96, 013303, 2017. [査読あり]
DOI:10.1103/PhysRevE.96.013303

④ **Fei Jiang**, Takeshi Tsuji Estimation of three-phase relative permeability by simulating fluid dynamics directly on rock-microstructure images, Water Resources Research, Volume 53, Issue 1 January, 2017, Pages 11-32 [査読あり]
DOI: 10.1002/2016WR019098

[学会発表] (計 4 件)

① **Fei Jiang**, Xian Chen, Junji Ohgi, Fluid-structure interaction simulation via the coupling of finite element and lattice Boltzmann methods, 8th Int Conf Computational Methods (ICCM2017), July 25-29, 2017

② 松村一輝, **蔣飛**, 陳獻, 大木順司, GPGPUによる有限要素法動解析の陰解法と陽解法の演算性能評価, 第30回計算力学講演会, 2017年9月16日～18日

③ **Fei Jiang**, Xuhui Li, Takeshi Tsuji, A parallel implementation of three-phase LB model for CO2-EOR, 25th International Conference on Discrete Simulation of Fluid Dynamics (DSFD 2016), Jul 4-8, 2016

④ **Fei Jiang**, Takeshi Tsuji, A three phase numerical simulation method for CCS-EOR, 13th Annual Meeting of Asia Oceania Geosciences Society (AOGS 2016), Jul 31 ~ Aug 5, 2016

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

蔣飛 (Fei Jiang)

山口大学・大学院創成科学研究科
機械工学分野・助教

研究者番号: 60734358

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

辻健 (Takeshi, Tsuji)

九州大学・工学研究院

地球資源システム工学部門・教授