

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：15501

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15100

研究課題名（和文）低塩分濃度水攻法の石油回収率向上を目指したデジタル岩石解析手法の開発

研究課題名（英文）Development of Digital Rock Method to Elucidate the Behavior of CO₂-Oil-Water System in Porous Media for Low Salinity EOR

研究代表者

Jiang Fei (Jiang, Fei)

山口大学・大学院創成科学研究科・准教授

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）：東日本大震災以降、石油などのエネルギー資源にまだ頼らざるを得ない。最近コスト削減と同時に石油回収率を向上させる低濃度塩水攻法が注目を浴びている。低濃度塩水攻法の増油メカニズムに関しては諸説が提案されているが、まだ完全に解明されていない。本研究では、油層岩石空隙構造の形状、流体の性質などの影響を考慮し、低濃度塩水攻法の回収率向上を定量的評価する目的としたPore scaleでのマルチフィジックスモデルの開発及び大規模デジタルロックシミュレーターを構築した。革新的な流体計算手法である格子ボルツマン法を基礎に、界面現象の物理化学モデルを加え、岩石空隙スケールの増油メカニズムを明白にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では大規模pore scaleシミュレーターを開発することで実験では時間的・コスト面から実現が困難あるいは不可能な条件下の異なる岩石種類における低濃度塩水攻法シナリオを容易に再現することができるようになった。この手法の確立によって、初めて岩石コアレベルの増産効率が評価でき、かつpore scale分解能をもつシミュレーターが完成できた。更に、計算結果の分析によって、低濃度塩水攻法のメカニズムの理解及び原油回収率の向上に影響を与える重要な要素がより明確になった。

研究成果の概要（英文）：After the East Japan Earthquake, we still have to rely on the fossil energy resources. Recently, the low-salinity enhanced oil recovery (LS-EOR) method, which can reduce costs and increase oil recovery at the same time, has been attracting attention. Various theories have been proposed regarding the oil-recovery mechanism of the LS-EOR method, but the mechanism has not yet been fully elucidated. In this study, we developed a multi-physics model at pore scale and constructed a large-scale digital rock simulator to quantitatively evaluate the recovery enhancement of LS-EOR, taking into account the effects of reservoir rock pore structure geometry, fluid properties, and other factors. Based on the lattice Boltzmann method, an innovative fluid simulation method, a physico-chemical model of interfacial phenomena was integrated to clarify the mechanism of rock pore-scale oil-recovery enhancement.

研究分野：流体力学

キーワード：多孔質媒体 多相流 石油増産

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災以降、原子力発電所の稼働停止を受けて、石油などのエネルギー資源にまだ頼らざるを得ない。石油生産には一次回収である自噴回収、その後油層に水又はガスを押し込む方法(水・ガス攻法)である二次回収が行われている。二次回収法後も地下には60-70%の油が取り残されたままと言われている。回収率を更に増加する三次回収法が開発され、その中には熱で油の粘性を下げ油を流れやすくする水蒸気圧入法や、界面活性剤を圧入して油を剥がすケミカル攻法等が代表的な例である。これら従来の方法は、コストをかけて回収率を向上させる方法で、石油生産のコスト削減の要求が強まっており、石油開発業界にとっては適用が難しい状況である。コスト削減と同時に石油回収率を向上させる一石二鳥の回収方法が問われている。そこで、油層水よりも低い塩分濃度水を圧入する事により、岩石に付着した油を剥がし回収率が向上する低濃度塩水攻法が注目を浴びている。この方法は、圧入水が低塩分濃度水という点以外は通常の水攻法と同じであり、他の方法と比較して生産設備の変更など最小限で済むため安価で導入でき、操業コストも安く、さらに特別な化学薬品などを添加することなく、環境への負荷が少ないという点で魅力的な方法である。低濃度塩水攻法では多数の研究者により増油効果が確認されてきたが、その増油メカニズムに関してはまだ解明されていない。

2. 研究の目的

低濃度塩水攻法のメカニズムの解明及び回収率増加の評価には実験的な研究はもちろん、複雑な油層システムにおけるマルチスケール(nm~km)、マルチフィジックスを融合したモデリングを構築することも重要である。本研究では、低濃度塩水攻法の回収率向上を定量的評価する目的とした Pore scale でのマルチフィジックスモデルの開発及び大規模デジタルロックシミュレーターの構築を目指す。デジタルロックは岩石サンプルを Micro-CT などのイメージング技術で岩石物質成分や間隙形状データを採取し、それを用いてコンピュータ上で物理シミュレーションの実施によってサンプル全体の浸透率、弾性係数など物性または流れ挙動及び化学反応を計算する方法である。しかし、信頼性のある高精度計算を可能にするため、計算領域が岩石サンプルの REV (Representative elementary volume) サイズをカバーする必要がある。超高解像度及び超大規模計算領域に伴い、膨大な計算能力も要求される。このような膨大な計算量に対して、現存の工学シミュレーターでは CPU 処理能力の限界を超えてしまうため、非常に困難である。本研究では最新の並列計算技術 GPGPU 及びスパコン高性能計算を駆使し、超大規模実岩石 X 線 CT モデルで、間隙内部の油挙動のシミュレーションを行い、回収率を向上させるキーパラメータを割り出す。Pore scale の解像度を持つ超大規模計算によって、コアスケールの実験と直接比較することもできる。世界初となる低濃度塩水攻法 Pore scale デジタルロックシミュレーターの構築を目指す。

3. 研究の方法

我々は格子ボルツマン法を用いた多孔質媒体における二相流(油・水)モデルを開発した。それをベースにして濃度場計算モデルを組み込み、水の塩分濃度の空間分布影響を考慮した上、油が置換される挙動を正確に評価できるシミュレーション手法を開発した(図.1)。移流拡散式を格子ボルツマン法で解き、pH やイオン濃度の変化などが予測可能となる。また化学反応モデルとして、水、NaCl および CaCl₂ などの電離式を考慮し、各成分のモル濃度から活量を計算し、順反応・逆反応を決定した後、化学反応速度論に基づき、濃度の変化を計算するアルゴリズムを構築した。

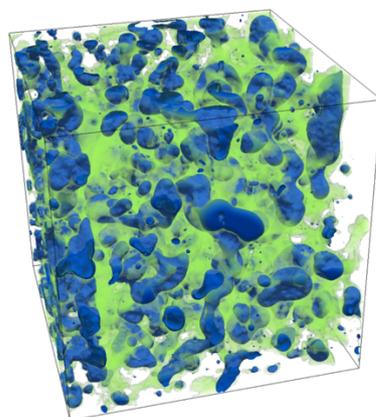


図.1 多孔質媒体内の二相流れシミュレーション

低濃度塩水攻法の回収メカニズムはさまざま提案されているが、岩石に付着した原油が剥離するのは共通認識である。Pore scale から見れば、低濃度塩水による岩石壁面濡れ性変化が主に原油の剥離の重要な役割を果たしている。また、ミクロスケールの界面と油の相互作用からのメカニズムの多くはマクロな濡れ性で反映できる。pore scale で低濃度塩水攻法を再現するため、まず局所の塩分濃度と濡れ性の関係性を数式化した。より正確な数理モデルを構築するために、分子レベルの界面現象を記述できる物理化学モデルを取り入れた (図. 2)。最終的に、構築した塩分濃度と濡れ性の関係式を二相流シミュレーターに組み込み、原油の剥離挙動の再現が計算できた。

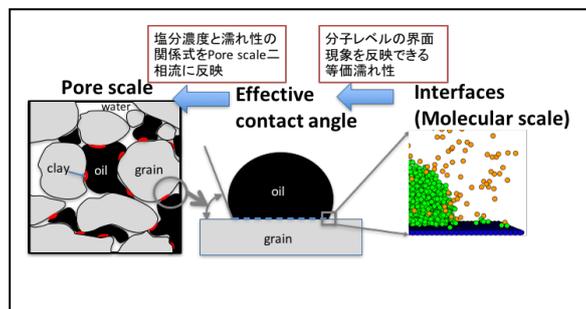


図.2 分子界面モデルと間隙流れモデルの融合

4. 研究成果

我々は開発したシミュレーターを応用し、多相流の粘性カップリング効果を考慮できるように、従来の浸透率の経験式を改良した。さらに空隙内部における粘性比が異なる三相流れを直接に解析した結果からデータベースを構築し、新たな機械学習手法を使用した三相流浸透率予測する方法を開発した。また、開発した低濃度塩水攻法 Pore scale デジタルロックシミュレーターを用いて、岩石間隙内の低塩分水と油挙動を明らかにするために、様々な条件の大規模多相流シミュレーションを行った。様々な貯留層条件で多相流の挙動を計算し、効果的に石油を取り出す条件を調べた。また、様々な塩分濃度条件でシミュレーションを行い、低濃度塩水攻法の回収率向上を定量的評価するためのデータベースを構築した。異なる塩分濃度水の圧入条件で、岩石間隙内部の二相流れシミュレーションを行った。図. 3 は異なる塩分濃度水の圧入によって、石油の飽和率の時系列変化を示す。結果として、低塩分水の場合は、50%の石油増産効果が得られた(図. 3 左上)。また、残留石油のクラスター分布を比較した結果 (図. 3 右)、高塩分水の場合(HS)は大量な石油が下流側に残り残されていることが確認でき、一方低塩分水の場合(LS)は間隙内において均等に石油を押し出すことができた。これは、低塩分水の環境で鉱物濡れ性変化することによって、原油がより脱離しやすくなると考えられる。これらの計算結果から、低塩分水の圧入有効性及び残留石油クラスターの形状、表面積などの評価指標を定量化し、回収率との関係を調べた。また超大規模シミュレーションを行い、直接コアスケール(cm)の実験結果と定量的に比較することが可能となった。それにより、REV よりも大きな計算モデルに対して様々なシミュレーションを行い、低塩分濃度水による石油増進メカニズムの解明などに重要な情報を提供できるようになってきた。今後は油層条件(岩石空隙構造の形状、油層の連続性、浸透率、圧入指数、流体の性質など)が低濃度塩水攻法の回収率にどのような影響を与えるか調べた上で、計算で得られた回収率を向上させるキーパラメータなどの知見を field scale へ適用できるマクロモデルの開発(up scaling)にも期待を寄せる。

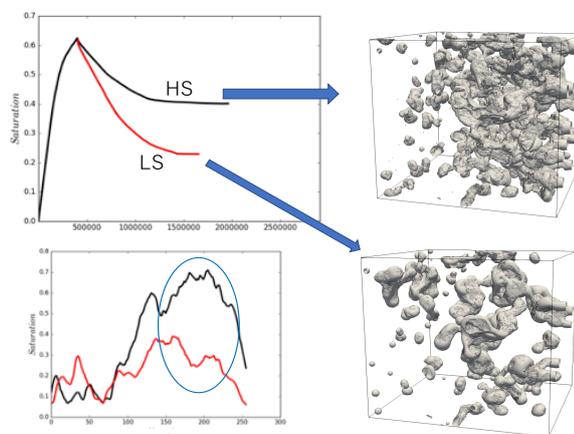


図. 3 異なる塩分濃度水の注入による残留石油 (白) の分布 (HS : High Salinity ; LS : Low Salinity)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 3件）

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 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 Jiang Fei, Liu Haihu, Chen Xian, Tsuji Takeshi	4. 巻 454
2. 論文標題 A coupled LBM-DEM method for simulating the multiphase fluid-solid interaction problem	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 110963 ~ 110963
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2022.110963	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 Li Sheng, Liu Haihu, Zhang Jinggang, Jiang Fei, Xi Guang	4. 巻 33
2. 論文標題 Modeling of three-phase displacement in three-dimensional irregular geometries using a lattice Boltzmann method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 122108 ~ 122108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0068759	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 Zhang Jinggang, Liu Haihu, Wei Bei, Hou Jian, Jiang Fei	4. 巻 35
2. 論文標題 Pore-Scale Modeling of Two-Phase Flows with Soluble Surfactants in Porous Media	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Energy & Fuels	6. 最初と最後の頁 19374 ~ 19388
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.energyfuels.1c02587	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 Li Sheng, Lu Yang, Jiang Fei, Liu Haihu	4. 巻 104
2. 論文標題 Lattice Boltzmann simulation of three-phase flows with moving contact lines on curved surfaces	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 15310
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.104.015310	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 Li Sheng, Jiang Fei, Wei Bei, Hou Jian, Liu Haihu	4. 巻 33
2. 論文標題 Prediction of three-phase relative permeabilities of Berea sandstone using lattice Boltzmann method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 063302 ~ 063302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0050727	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 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

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 Jiang Fei, Matsumura Kazuki, Ohgi Junji, Chen Xian	4. 巻 259
2. 論文標題 A GPU-accelerated fluid structure-interaction solver developed by coupling finite element and lattice Boltzmann methods	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computer Physics Communications	6. 最初と最後の頁 107661 ~ 107661
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpc.2020.107661	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 Jiang Fei, Liao Kangping, Matsumura Kazuki, Ohgi Junji, Chen Xian	4. 巻 17
2. 論文標題 Simulation of Fluid Structure Interaction Problems with Thin Elastic Plate via the Coupling of Finite Element and Lattice Boltzmann Methods	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Computational Methods	6. 最初と最後の頁 2050013 ~ 2050013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0219876220500139	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8件(うち招待講演 0件/うち国際学会 6件)

1. 発表者名 N Suwandi, F Jiang, T Tsuji
2. 発表標題 Investigation of Viscosity Ratio and Capillary Number Influence on Relative Permeability in a 2-phase Flow System using Lattice Boltzmann Method
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y Zhang, F Jiang, T Tsuji
2. 発表標題 Investigate the effect of pore structure heterogeneity on hydraulic and electrical conductivities evolution induced by mineral dissolution
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sawayama, K., Fei Jiang, Ikeda, T., Ishibashi, T., Tsuji, T., Fujimitsu, Y., and Asanuma, H.
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 Fei Jiang, Jianhui Yang, Edo Boek, Takeshi Tsuji
2 . 発表標題 An improved empirical model considering viscous coupling effect for hydraulic conductance of three-phase flow in pore network modeling
3 . 学会等名 Interpore 2020 (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Sawayama, K., Fei Jiang, Tsuji, T., and Fujimitsu, Y
2 . 発表標題 Development of two-phase fracture flow simulation method using Shan-Chen type lattice Boltzmann model
3 . 学会等名 International Symposium on Earth Science and Technology 2020 (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Yutian Zhang, Fei Jiang, Takeshi Tsuji
2 . 発表標題 Dynamic evolution of hydraulic and electrical properties of porous rock induced by mineral dissolution in pore-scale
3 . 学会等名 International Symposium on Earth Science and Technology 2020 (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Sawayama, K., Ishibashi, T., Jiang, F., Tsuji, T., and Fujimitsu, Y.
2 . 発表標題 Changes in Hydraulic, Electric and Mechanical Properties with Aperture Closure: Insight from Experimental and Numerical Approaches
3 . 学会等名 The 5th ISRM Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics and International Symposium on Rock Engineering for Innovative Future
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Sawayama, K., Ishibashi, T., Jiang, F., Tsuji, T., and Fujimitsu, Y.
2. 発表標題 Investigation of the approach to estimating permeability based on resistivity and elastic wave velocity using digital rock fractures
3. 学会等名 2019 Annual Meeting of Geothermal Research Society of Japan
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
研究協力者	辻 健 (Tsuji Takeshi) (60455491)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授 (12601)	

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		
中国	Xi'an Jiaotong University		