

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656562

研究課題名(和文)空隙スケール・マイクロCTに基づく原油回収ダイナミクスの解明

研究課題名(英文)Micro-tomography of oil recovery dynamics at a pore scale

研究代表者

末包 哲也(SUEKANE, TETSUYA)

東京工業大学・総合理工学研究科(研究院)・教授

研究者番号：30262314

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：多孔質の空隙スケールの界面張力や濡れ性に支配される水・油の二相流動を高分解能で可視化する。岩石内部にトラップされるオイル量を決定する上で重要となるスナップオフの進行過程を可視化し、現象の解明を行った。次に、トラップされたオイル液滴周囲の流動場計測を行った。トラップされたオイルに隣接するポアにおいても水は流動しているが、両者の間には流動していない澱んだ水膜が存在し、両者の間の物質輸送を阻害している。これは、界面活性剤などを用いたトラップされたオイル液滴の再移動化の低下要因となる。空隙スケール計測を数値解析と融合した、数値解析に基づいた多孔質内流動パラメータ推定手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：Crude oil production from reservoirs involves multiphase flow in porous media. Recent rapid development in micro-focused X-ray CT scanners allows us to visualize and observe the migration of the interfaces between phases at a pore scale. In this study, we visualize two-phase flows of oil and water which is governed by the capillarity and wettability at a pore scale resolution. First the snap-off process that disconnects oil blobs from the continuum to be trapped in a porous medium by capillarity and reduces oil recovery. Next the flow field around the trapped oil blobs is visualized. Water is flowing even at the pores just proximate to trapped oil blobs. However, the stagnant water films which thickness is lower than the pore scale separate oil blob and flowing water. We developed a numerical simulation code of two phase flow in porous media based on the lattice Boltzmann method. Numerical simulations were carried out for porous structures which were obtained by X-ray CT.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学，地球・資源システム工学

キーワード：多孔質 原油回収 混相流 空隙スケール

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化が世界的な緊急課題と成っている一方で、再生可能エネルギーの開発状況を鑑みると、少なくとも21世紀中は1次エネルギー源を化石燃料に依存せざるを得ない。特に、資源の大半を海外に依存する我が国にとっては、エネルギーセキュリティの観点からも化石燃料資源の安定供給をより強固なものに発展させる必要がある。翻って、油層工学の立場からみると、これは既存の貯留層からの原油回収率向上を意味する。原油を包蔵している貯留岩中には、生産が進むにつれ、水が侵入し、水と油の界面張力および固体岩石への濡れ性により、複雑な流動場を形成する。油が連続相を形成している間は生産を持続することができるが、いったん連続性が途切れる(スナップオフされる)と界面張力の影響を強く受け、岩石内部にトラップされ、生産を継続することが困難であると考えられている。

岩石中に存在する油に対する現在の生産性は20%程度で、飛躍的な生産性向上が望まれている。しかしながら、生産性を低下させるスナップオフやトラップ現象については全く現象の把握が進んでいない。本研究では、提案者がこれまでに開発してきたマイクロフォーカスX線CT装置を高度に駆使した多孔質空隙スケール可視化手法を用いて、空隙スケールの現象解明に基づいた原油の生産性の飛躍的向上を目指す。

2. 研究の目的

原油を貯留層から生産する際の、回収率の飛躍的な向上を目指して、岩石多孔質内部の空隙スケールの流動現象のダイナミクスを解明する。これまでに独自に開発してきたマイクロフォーカスX線CT装置を駆使した可視化手法により、多孔質の空隙スケールの界面張力や濡れ性に支配される水・油の二相流動を高分解能で可視化する。岩石内部にトラップされるオイル量を決定する上で重要となるスナップオフの進行過程を可視化し、現象の解明を行う。次に、トラップされたオイル液滴周囲の流動場計測を行い、トラップされた油滴に作用する毛管力や剪断力を評価することにより、トラップされたオイル液滴の再移動化や原油増進回収のための指針を得る。空隙スケール計測を数値解析と融合し、多孔体流動現象の流動ダイナミクスを解明する。

3. 研究の方法

高分解能マイクロフォーカスX線CT装置を使用し、多孔質内部の空隙スケールでの流動現象をダイナミクスとして可視化する。比較的容易なガラスビーズ充填層を計測対象として、原油の生産プロセスを多孔質のポアスケールで可視化する。これに基づいて、原油生産性を低下させている要因を解明し、回収率を飛躍的に向上させる生産ストラテジー

の提案を行う。また、岩石多孔質内部の局所的な流動場を把握することにより、原油増進回収(EOR)プロセスの最適設計に関する指針を得る。空隙スケール計測手法を開発する一方で、これまでに開発を行ってきた空隙スケールでの濡れ性や界面張力を考慮した格子ボルツマン法に基づいた解析を融合し、解析と計測を統合した現象解明を行う。

4. 研究成果

図1はオイル(ドデカンに10%のヨードデカンを添加)で満たされた粒子径400 μm のガラスビーズ充填層に水を鉛直上向きに注入したときの浸透の様子をX線CTで可視化した結果を示している。遅い注入速度であるために、粘性せん断力の効果が小さく、流れは毛管圧に支配されている。よって、ガラスビーズに対して濡れやすい相である水は多孔質構造の狭い部分を選択的に透過するためキャピラリーフィンガリングが発生する。しかしながら、発生したフィンガーは重力の影響により成長が抑えられる。よって、水と油の界面は安定であり、高い生産効率が達成されている。

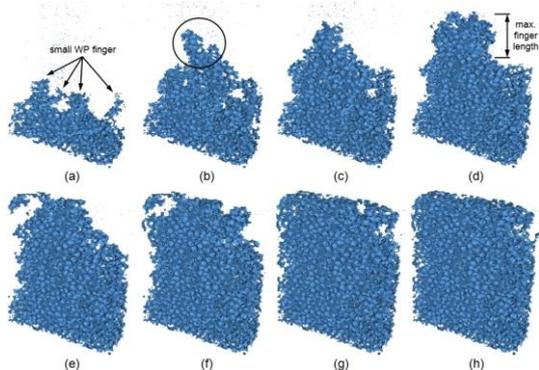


図1: オイルで満たされたガラスビーズ多孔質へ鉛直上向きに水を注入した時の浸透の様子. $Ca = 4.3 \times 10^{-9}$: (a-f) 注入後30分から30分毎.

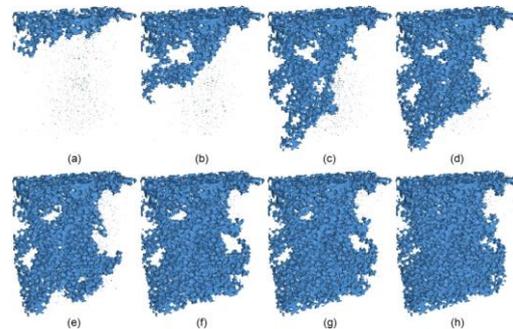


図2: オイルで満たされたガラスビーズ多孔質へ鉛直下向きに水を注入した時の浸透の様子. $Ca = 4.3 \times 10^{-9}$: (a-f) 注入後30分から30分毎.

一方、図2に示した鉛直下向き注入の場合、発生したキャピラリーフィンガリングが重力により抑制されず、むしろ強調される。そのために、油を置換している水の界面は不安定になり、フィンガーが成長する。よって、多

くの油が充填層内部に残留し、生産性が低下している。水の一部が充填層の出口に到達する（これをブレイクスルーと呼ぶ、）と充填層に作用している圧力勾配が急激に低下し、以降、油を駆動する力が急激に低下するため、油の流動はみられなくなる。

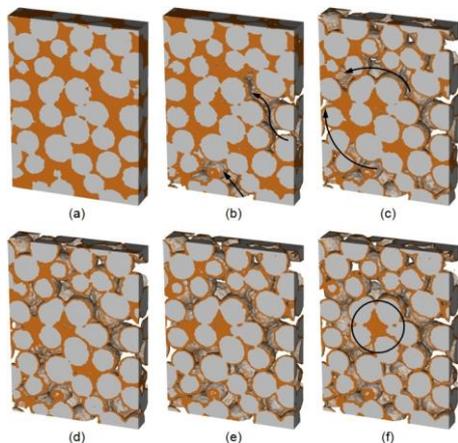


図3: オイルが切断されトラップに至る様子。鉛直上向き注入, $Ca = 4.3 \times 10^{-9}$: (a-f) 30 分毎.

図3に鉛直上向き注入時の油がトラップされる様子を示している。多孔質を白、オイルをオレンジで表示し、水は表示していない。最初、水は、上述のように、毛管圧の違いにより細い流路を選択的に浸透する。伸びた水のフィンガーが再び結合し、油の連続性を絶つ(図3c)。この場合、油は充填層の3次元性により、可視化していない面を通じて流出しているが、図3eに至って完全に連続性が絶たれ、空隙内部に残留している。

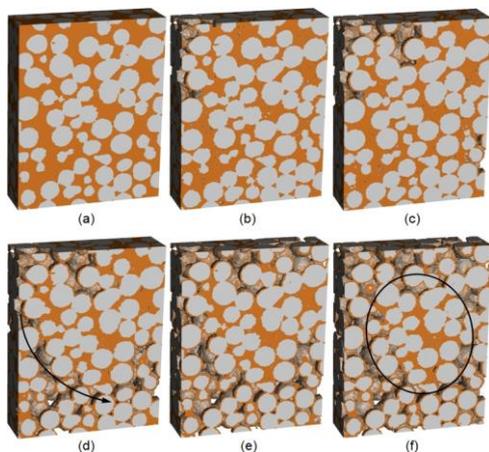


図4: オイルが切断されトラップに至る様子。鉛直下向き注入, $Ca = 4.3 \times 10^{-9}$: (a-f) 30 分毎.

図3と同様に、図4には鉛直下向き注入時の油がトラップに至る様子を示している。鉛直下向き注入の場合、界面のキャピラリーフィンガリングが浮力により、強調され、フィンガーの成長が早い。よって、オイルは大きなポアスケールの構造を有しながら、比較的早い段階で切断に至る。よって、油の生産性は低く、高い飽和率で油が残留する。

多くの EOR プロセスでは、トラップ状態にある貯留層にガス、熱水、蒸気、界面活性剤、バクテリアなどが注入される。たとえば、界面活性剤攻法の場合、注入した界面活性剤は界面に到達しなければ役を為さない。注入した界面活性剤が界面に到達するまでのプロセスは、油がトラップされている状態での水の流動場に強く依存している。

ここでは、油がトラップされている状態における水の流動場観察を行う。可視化にはマイクロフォーカス X 線 CT 装置を用いる。水にヨウ化ナトリウム(NaI)をドープすることでトレーサーとして、流動場の可視化を試みる。水の注入は最初に、ヨウ化ナトリウムでドープされた水(以下 PWP: Primary Wetting Phase と呼ぶ、)が注入される。油がトラップされ定常状態になるまで継続される。この状態において、充填層の内部には油がトラップされ、それ以外の空隙は PWP で満たされている。次に、注入する溶液を精製水(以下 SWP: Secondary Wetting Phase と呼ぶ、)に変化させる。同じ流量で注入を継続し、1 分ごとに CT 計測を行う。PWP と SWP は混和する溶液で油のトラップには影響を及ぼさない。密度や粘性もほぼ同じような値であるが、ヨウ素原子を含んでいることで X 線に対する減衰定数が異なり、CT 画像上では異なる液体として識別することができる。この性質を利用して、PWP で満たされている多孔質中に SWP が侵入する様子を可視化する。

ポアスケールでの水の流動場可視化の結果を図 5 に示す。鉛直下向き注入の例を示している。図 5a, b は初期状態として充填層が油で満たされている様子、および、PWP を約 3 PV 注入後、油がトラップされ定常状態に至っている状態を示している。なお、ガラスビーズは白、油はオレンジ、PWP は水色、SWP は青で示されている。図 5c-g は SWP が充填層内に侵入してくる様子を 1 分ごとに示している。図 5h は十分に SWP を注入して定常状態となっている様子を示している。SWP は画像下端の中心部分から充填層に侵入し軸方向に進みながら徐々に半径方向に広がっている。水が一様に流入するように、注入のスリーブにはガラス焼結フィルターを用い

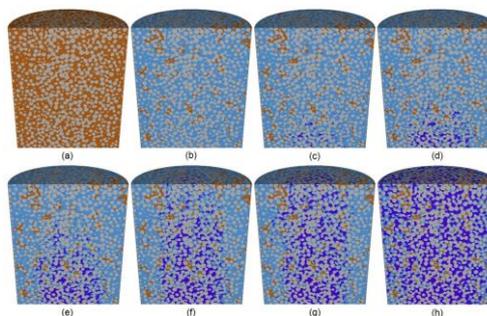
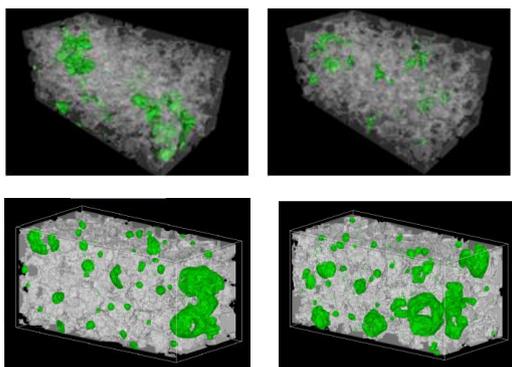


図 5: 鉛直下向き時の水の流動場 $Ca = 2.1 \times 10^{-7}$ (a) 油 (b) PWP 後の定常状態, (c-h) SWP から 1 分おき.

ているが、局所的に流入している。このスケ



(a) 豊浦標準砂 (b) ガラスビーズ

図6: デジタルコア解析, 上: CT 画像, 下: LBM 解析

ールで見た範囲では、流入点に関する不均質性をのぞいて、油のトラップや多孔質構造の不均質性に起因するような流動場の不均質性は確認できず、ポア毎にほぼ一様に流動している。

格子ボルツマン法(LBM)とは流体を有限多数の速度を持つ仮想粒子の集合体と近似し、各粒子の衝突と移流を粒子の速度分布関数を用いて逐次計算することで巨視的な流れ場を求める計算手法である。数値シミュレーションは地下貯留条件を考慮し、物性値を決めている。数値シミュレーションは無次元で行った。多孔質構造内の二相流では、界面張力と濡れ性による毛管力が流れ場に与える影響が大きい。そのため界面張力、濡れ性、毛管力の再現性を検証し、計算プログラムの妥当性を確認した上で数値シミュレーションを行っている。

数値シミュレーションと実験の比較を行う。比較に用いる実験は超臨界 CO₂・水系で行ったものを用いた。水飽和させた豊浦標準砂、ガラスビーズ充填層に高温高压下で CO₂ を圧入した後に水を圧入することで残留ガストラップさせたものを、X-ray CT 計測した。実験で、豊浦標準砂、ガラスビーズ充填層に残留ガストラップされた CO₂ の状態を図6の上段に示している。

数値シミュレーションは実験で使用した豊浦標準砂とガラスビーズ充填層の画像データを元に作成した同じ多孔質体で行った。図6の下段に LBM による数値シミュレーションから得た残留ガストラップ状態を示す。

表1に実験と数値シミュレーションの残留ガストラップ量を示す。残留ガストラップ量や気泡の大きさは類似する傾向にあることがわかる。一方、気泡の残留位置は大きく異なっており、実験及び解析ともに改善が必要である。解析の場合、対象領域が非常に狭く、フィンガーの成長を十分に捉えられていないため、解析領域の拡張が必要である。また、実験に近いキャピラリー数で解析できるように、モデルの拡充も必要である。一方、実験においても、流速の安定化が必要である。

表1: 残留ガス飽和率

	実験	解析
豊浦砂	8.89 %	9.12 %
充填層	6.24 %	7.02 %

図7に数値シミュレーションから得られた豊浦標準砂の流れ方向断面における速度分布を示す。残留ガストラップされる CO₂ の周囲は流速が大きいことがわかる。残留ガストラップのされ方には違いがあるとされている。数値シミュレーションを行うことにより3種類のガスの切断様式である、デッドエンド、ポアダブルット、スナップオフを確認することができた。

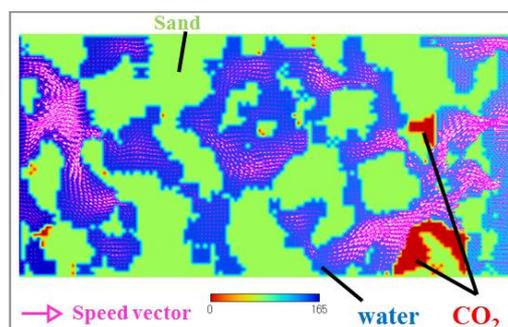


図7: 解析で得られた気泡周りの流速分布

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 3 件)

- ① Setiawan, A., Suekane, T., Y. Deguchi, K. Kusano, Pore-scale investigation of the effect of connate water to water flooding behavior, *Journal of Fluid Science and Technology*, 査読有, (掲載決定), 2014
- ② Setiawan, A., Suekane, T., Deguchi, Y., Kusano, K., Three-dimensional imaging of pore-scale waterflooding phenomena in water-wet and oil-wet porous medium, *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*, 査読有, Vol. 2, pp. 25-31, 2014 DOI: 10.4236/jfcmv.2014.22005
- ③ Setiawan, A., Suekane, T., Effect of wettability on oil trapping process in porous medium, *Theoretical and Applied Mechanics*, 査読有, Vol. 62, pp. 201-209, 2014

[学会発表] (計 10 件)

- ① Setiawan, A., Suekane, T., Deguchi, Y., Kusano, K., Pore-level visualization of imbibition and drainage processes, The 16th International Symposium on Flow Visualization, June 24-28, 2014. Okinawa Convention Center, Okinawa, Japan

- | | |
|--|---|
| <p>② <u>Suekane, T.</u>, Tezuka, R., Pore-scale observation of surfactant flooding for weakly water-wet porous media – effect of gas injection to improve oil recovery, 7th International Conference on Computational and Experimental Methods in Multiphase and Complex Flow, 3-5 July, 2013, A Coruña, Spain, invited</p> <p>③ Setiawan, A., <u>Suekane, T.</u>, Visualization of pore-level phenomena in packed glass beads during waterflooding, 石油技術協会平成 25 年度春期講演会, 2013 年 6 月 27-28 日, 東京</p> <p>④ Setiawan, A., <u>Suekane, T.</u>, Effect of wettability on oil trapping process in porous medium, 第 62 回理論応用力学講演会, 2013 年 3 月 6-8 日, 東京</p> <p>⑤ 手塚 涼太, 末包 哲也, 出口 祥啓, 草野 剛嗣, 原油増進回収過程における多相流の基礎的研究, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2012, pp.285-286, 2012 年 11 月 17-18 日, 熊本</p> <p>⑥ Setiawan, A., 末包 哲也, 出口 祥啓, トラップされた石油の存在が流れ場に及ぼすポアスケールでの影響, 電気学会新エネルギー・環境研究会, 電気学会研究会資料 FTE-12-033, 2012 年 9 月 6-7 日, 横浜</p> <p>⑦ 末包 哲也, 手塚 涼太, 渡邊 浩平, サーファクタントフラッディングにおけるガス注入の効果, 石油技術協会平成 24 年度春期講演会, p.115, 2012 年 6 月 5-8 日, 秋田</p> <p>⑧ Setiawan, A., <u>Suekane, T.</u>, Direct observation of oil trapping mechanism, 平成 23 年度中四国熱科学・工学研究会研究討論会, 2011 年 4 月 20 日, 愛媛</p> <p>⑨ 手塚 涼太, 末包 哲也, ポーラスプレートによる原油回収過程における多相流の基礎的研究, 第 48 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 2011 年 6 月 1-3 日, 岡山</p> <p>⑩ Setiawan, A., <u>Suekane, T.</u>, Microtomography of oil production process in porous medium, International Workshop on X-ray CT Visualization for Socio-Cultural & Engineering Environmental Material, December, 7-8th, 2011, Kumamoto University, Kumamoto, CD-ROM, pp.65-66, 2011 Best Presentation Award</p> | <p>(2) 研究分担者
なし</p> <p>(3) 連携研究者
なし</p> |
|--|---|

6. 研究組織

(1) 研究代表者

末包 哲也 (SUEKANE TETSUYA)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授

研究者番号 : 30262314