

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630463

研究課題名(和文) デジタルコアラボラトリー構築を目指した原油回収の学理の構築

研究課題名(英文) Oil recovery initiatives for digital rock physics and laboratory

研究代表者

末包 哲也 (SUEKANE, Tetsuya)

東京工業大学・工学院・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

研究成果の概要(和文)：デジタルロック技術の実用化を目指して、空隙スケールでのX線CT計測による流体力学的な現象解明手法の開発を行うとともに、空隙スケール計測に基づいた流動数値シミュレーションを行った。流動計測では、原油回収効率の低下の原因になっているスナッフオフ現象の直接可視化を行った。また、水・ガス相互圧入やサーファクタント攻法などの原油増進回収法のメカニズムの解明を行った。従来の定性的な現象理解を超える、定量的な把握が可能になった。計測された構造を対象とした単相流および多相流数値解析を行った。特に、トラップされた非湿潤相から湿潤相への物質輸送現象の理解に着目し、CO₂ガスに見られる特異な物質輸送現象を見出した。

研究成果の概要(英文)：Nobel techniques to visualize as well as to simulate multiphase flows at a pore scale in porous media have been developed for commercial application of digital rock physics. Oil production processes by means of various enhanced oil recovery schemes including WAG and surfactant flooding have been visualized to enhance our quantitative understandings of these recovery mechanisms. In the WAG scheme, gas injection itself does not contribute oil recovery but in following water flooding trapped gas bubbles plugging flow paths of water facilitate oil production depends on the wettability of oil to porous material. Based on the structures of porous media obtained by X-ray microtomography, numerical simulations of both single phase flow and multiphase flow were performed. We focused on the dissolution mass transfer of trapped gas bubbles to a flowing wetting phase. Structure of a porous medium impacts on the local mass transfer rate because the thickness of stagnant layers.

研究分野：環境熱流体

キーワード：原油増進回収 X線CT 格子ボルツマン法 多孔質 空隙スケール 界面張力

1. 研究開始当初の背景

(1) 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。これまでに原油生産のプロセスでは、回収率の向上を達成するために、原油増進回収法など手法が開発され、一定の効果を挙げている。これらの手法の開発・実証には実験室レベルでのコア試験などが広範に用いられてきた。また、現象の理解には、岩石多孔質を体積平均したいわゆるダルシーモデルに基づいた現象論的な考え方が適用されてきた。しかしながら、さらなる原油回収率の向上を考えると、これらのモデルに基づいた現象の理解はもはや限界に達しており、より微視的なスケール、すなわち、多孔質の空隙スケールでの流体力学的な現象理解が必要不可欠な状況になっている (図 1)。そのためには空隙スケールでの多孔質内流動を計測できる手法を開発する必要がある。これらの計測手法は原油増進回収法だけでなく、亀裂浸透や岩石内部の地化学反応など原油採掘に関連する諸現象の理解の根底をなし、将来大きな波及効果を期待することができる。

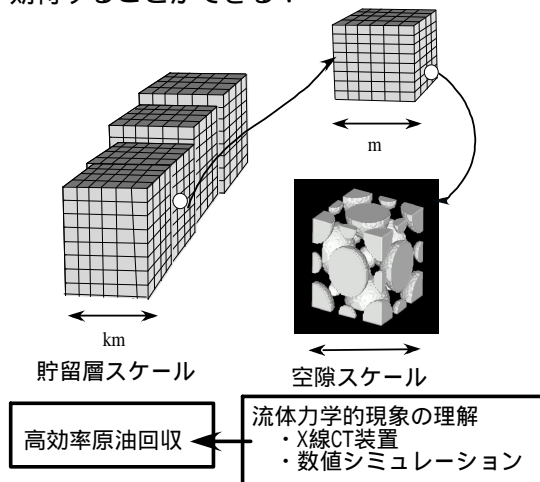


図 1 空隙スケール現象理解の必要性

2. 研究の目的

(1) 原油回収効率の大幅な向上に資する技術として期待されているデジタル・コア・ラボラトリーの実用化に向け、多孔質内部の空隙スケールでの流動ダイナミクスの計測技術開発を行う。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、従来の体積平均化されたダルシースケールの現象理解から、空隙スケールでの流体力学的な現象理解へ深化させることにより、多孔質内混相流に関する学術基盤を整備する。これらの知見に基づいて、高効率原油回収手法の開発を行う。具体的には、水・ガス交互圧入法(WAG)

およびサーファクタントフラッシングの原油回収メカニズムを解明する。空隙スケール計測を数値解析と融合し、デジタル・コア・ラボラトリーの実用化に向けた開発を推進する。

3. 研究の方法

(1) 本研究は、マイクロフォーカス X 線 CT 装置を用いた空隙スケールでの現象計測実験と空隙スケールでの数値シミュレーションによる研究から構成される。初めに、実験的な研究について説明する。多孔質体内の計測には、X 線 CT 装置(Comscan techno Co., ScanXmate-RB090SS)を使用した X 線源自体が被測定物の全周 360° から 625 枚の透視画像を撮像し、内部構造の再構成画像を得た。尚、1 秒間に 10 枚のペースで透視画像を撮影したため、1 スキャンに 62.5 秒の時間を要した。再構成画像は垂直方向に 992 枚のスライス画像で構成されている。多孔質体は、ガラスビーズ、焼結ガラス、ペレア砂岩を用いた。(2) X 線 CT 装置から取得される多孔体に対して格子ボルツマン法を用いて数値流動解析を行った。そして、従来の実験的手法よりも短期間かつ簡便に、多孔質内二相流解析が可能となるような数値流体解析技術の開発を目指し、多孔質ごとの流れ場の特徴の違いおよび CO₂ や原油のトラップが流れ場に与える影響などを解明する。

4. 研究成果

(1) 図 2 は焼結ガラスを用いた水注入実験における油生産過程の様子である。図 2 において初期状態(a)では油で完全に満たされている状態であるが、(b)(c)と水が注入されるに従って、油が生産されている様子が確認できる。この焼結ガラスは親水性のため、注入された水は油に比べて多孔質媒体を濡らしやすい相 (Wetting phase, WP) である。従って、水は多孔質の比較的径の細いポアを浸透し、径の太いポアに油がキャピラリートラッピングされる。さらに、下流になるにつれて単独ポアレベルでの残留ではなく、数ポアにまたがる大きさで油が残留する。初め、充填層入り口に取り付けられた焼結フィルターによって広範囲に水が浸透していくが、毛管力の影響を受けて次第に狭い範囲で水が浸透していく。このような毛管力の影響によっておきる不安定性をキャピラリーフィンガリングと呼ぶ。キャピラリーフィンガリングはガラスビーズ充填層のときにはあまり見られなかった。これは、焼結ガラスがガラスビーズよりも不均質な多孔質構造をしていることが起因している。CT 計測に基づいた多孔質構造解析からポアスロート比、配位数の分散が焼結ガラスのほうがガラスビーズ充填層より大きいことが分かった。多孔質構造の不均質性によって局所的に水が進行していき、図 2 (d) 上部分のように大量の油が残留する。

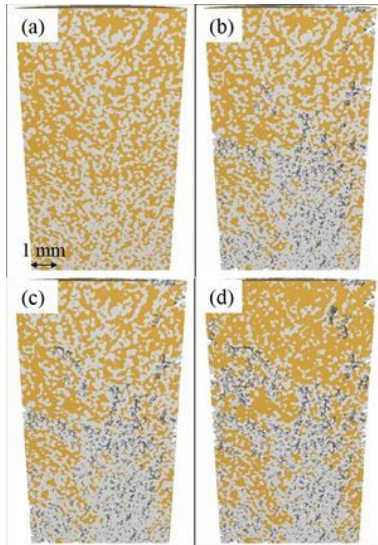


図2 親水性焼結ガラスを用いた水注入実験における油生産過程。(a)初期状態(b)90秒後(c)180秒後(d)ブレイクスルー時。

図3は図2の一部を拡大し、注入された水が進んでいく過程を20秒毎に追ったものである。紫の矢印は注入された水の先端を示している。ガラスビーズにおける水注入による油生産過程と同じようにピストンライクディスプレイースメントを通じての油生産が確認できる。

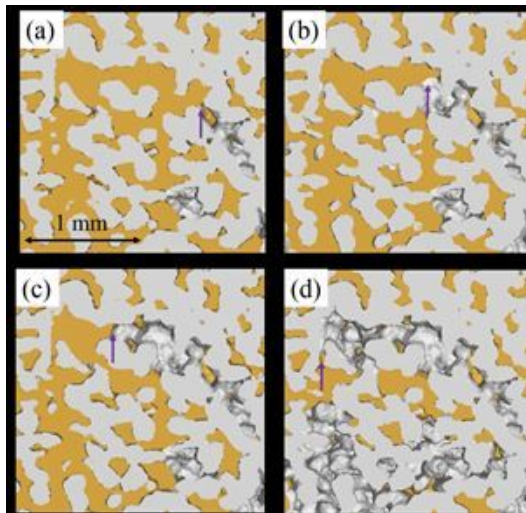


図3 親水性焼結ガラスにおける油生産過程のピストンライクディスプレイースメント。水注入からそれぞれ(a)120秒後(b)140秒後(c)160秒後(d)ブレイクスルー時。

図4は、ピストンライクディスプレイースメント及びスナップオフディスプレイースメントが起きている様子を比較したものである。ポアボディとポアスロートのアスペクト比は、ピストンライクディスプレイースメントが起きている場合は1.1、スナップオフディスプレイースメントが起きている場合は3.0である。スナップオフディスプレイースメントはアスペクト比及び、多孔質体とWPの接触角に

依存するが、アスペクト比が1.5以下であればどんな条件下でもスナップオフが発生しないことが知られている。

焼結ガラスの場合、ガラスビーズにはない比較的大きなポアスロート比が、スナップオフディスプレイースメントを引き起こし、多くの油を残留させた。このように、ポアの大きさだけでなく、ポアスロート比や不均質性が油の生産に大きく影響していることが3次元画像によって明らかとなった。

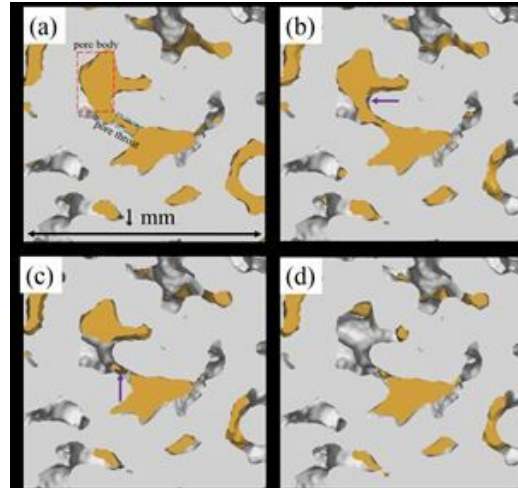


図4 親水性焼結ガラスにおける油生産過程のスナップオフディスプレイースメント。水注入からそれぞれ(a)120秒後(b)140秒後(c)160秒後(d)ブレイクスルー時。

親油性ガラスビーズを用いた実験で得られたCT画像が図5である。丸く映っているのがガラスビーズ、オレンジが油、初期状態において透明の部分が不動水、水注入後透明の部分がNaI(ヨウ化ナトリウム)水溶液、緑がガスである。

親油性の場合、油はWP、水及びガスは濡れにくい相(NWP)である。一回目の水注入時、注入された水は油に対してNWPである。毛管圧は赤矢印の方向に働く。毛管圧の式を考えると、細いポアスロートの毛管圧は、太いポアスロートの毛管圧よりも大きい。従って、抵抗が小さい太いポアスロートを進んで行く。水が進まなかった細いポアスロート及びその先のポアに油が残留する。油が細いポアスロートに残留している様子が確認できる。その一方で、図の上部には、油が大きな塊のようになって残留している。これは、進入してきた水が不動水の影響を受けることによるものである。親油性の場合、不動水は径の大きなポアに存在しており、連続性を保っている。そこに水が浸入してくると連続性を保った不動水を伝えていき、油が大きな塊のように残留する様子も確認できた。このような現象が起こることによって、親油性の場合は水注入後も油残留率が高い。ガス注入過程において、ガスは油及び水に対してNWPのため、径の太いポアスロートを進んで行く。ガス注入前、径の太いポアスロート

及びその先のポアには水が存在している。すなわち、一回目の水注入によって作られた流路をガスが進むことになる。詳細に画像を検証することにより、水があるポアをガスが進んでいることが確認できた。

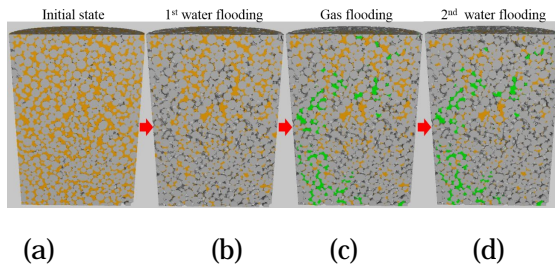


図5 親油性ガラスビーズを用いた水ガス相互注入実験における油生産過程。

(2) 次に、ガラスビーズ、焼結ガラス、ペレア砂岩の3種類の粒子を充填層に詰めて撮影したCT画像をもとに流動数値解析を行った代表的な結果について述べる。解析に用いる多孔体の大きさは $180 \times 100 \times 100$ mesh である。有次元量に換算すると、それぞれガラスビーズ多孔体: $2.58 \times 1.43 \times 1.43$ mm, 焼結ガラス多孔体: $2.47 \times 1.37 \times 1.37$ mm, ペレア砂岩多孔体: $1.02 \times 0.566 \times 0.566$ mm である。

多孔体の構造が流動場を与える影響を解明するため3.1節で生成したそれぞれの多孔体にWPを満たし、流動させる単相流解析を行った。WPの粘性および密度は有次元に変換を行った際にそれぞれ $\mu = 1.0 \times 10^{-6}$ Pa·s, $\rho = 1000$ kg/m³ となるように設定した。流動方向(Z軸方向)に流入流出境界条件を設定し、その他の境界は固体壁とした。本解析では解析領域の流入側に高い圧力、流出側に低い圧力を設定し、一定の圧力差を与えることによりWPを流動させ、定常状態となるまで解析を続けた。

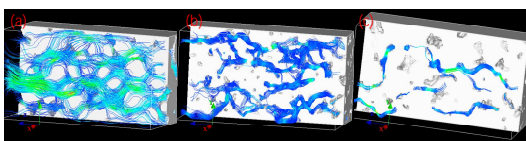


図6 (a)ガラスビーズ, (b)焼結ガラス, (c)ペレア砂岩, 内部の単相流流動解析結果。

図6はLBM解析で得られた速度分布を3次元的に可視化した画像である。ガラスビーズ多孔体においてWPの流動は多孔体全体で起こった。一方でペレア砂岩の多孔体の一部においてはWPの流動のない箇所が見られた。これはペレア砂岩が一様ではないため、行き止まりや孤立部分が生じたためと考えられる。また、解析結果から各多孔体に関する絶対透過率を求めた。空隙率が増加するとともに絶対透過率も増加しており、定性的な傾向と一致している。各格子点の平均流動方向速度の頻度ヒストグラムを図7に示す。横軸には各格子点の速度をそれぞれの平均流速で正規化した値、縦軸には頻度をとっている。ヒストグラムを見ると、空隙率の減

少にもなって、平均流速に対して流速が大きい格子点の数が増加している。ガラスビーズ、焼結ガラス多孔体は空隙が均質であるため速度分散が小さくなったと考えられる。

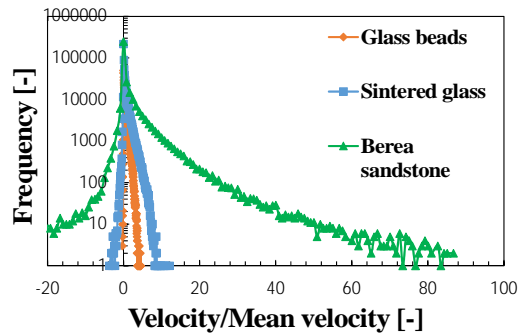


図7 図6に対する速度頻度

WPで満たされた多孔体内の中心付近の位置に半径25の球状のNWPを配置し、流入流出口に圧力差を与えて二相流解析を行った。WPとNWPの粘性比および密度比はPanらのものと値を一致させている。図8の黄色部は二相流解析を行った後のNWPを表す。ガラスビーズ多孔体において、NWPは連続性を保ったまま流動した。一方で焼結ガラスおよびペレア砂岩の多孔体では、WPが切り離され小さくなった状態でトラップされた。本解析モデルでは二相の境界において擬似速度が発生するため、NWPがトラップされた部分を固体に置き換え、WPのみを流す単相流解析を行った。図7のカラーで表示された線は単相流解析の結果であり、WPの流線を表している。図8a, bを見ると、ガラスビーズ多孔体および焼結ガラス多孔体について、NWPの周辺を取り巻くように流線が生じている。すなわち、WPの流動に伴うNWPの物質輸送が起こることが示唆された。一方で、図8cを見ると、ペレア砂岩多孔体においてはトラップされたNWPの周囲においてWPが観察されなかった。これは物質輸送が活発に起こらないことが示唆している。

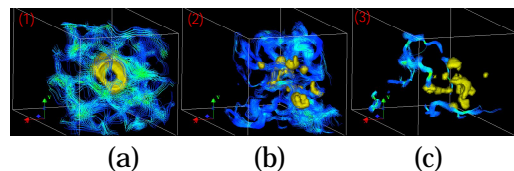


図8 トラップされたNWP(黄色)周りのWPの流動場。(a)ガラスビーズ, (b)焼結ガラス, (c)ペレア砂岩。

ガラスビーズ、焼結ガラス、ペレア砂岩のそれぞれの粒子で構成される多孔体に対して格子ボルツマン法を用いてWPのみの単相流解析および二相流解析を行った。ガラスビーズ、焼結ガラス、ペレア砂岩を詰めた充填層をX線CTで撮影して得られた画像をもとに多孔体データを取得した。単相流解析の結果、多孔体の空隙率が増加するとともに絶対透過率が増加し、定性的

な結果と一致した。また、空隙率が減少すると、平均流速に対して流速が大きい格子点の数が増加した。二相流解析を行った結果、ガラスビーズおよび焼結ガラス多孔体において、NWP周囲でWPの流動が起こった。そのためNWPがWPに溶解していく物質輸送現象が活発になることが示唆された。一方、ペレア砂岩多孔体に関して、NWP周囲でWPの流動は見られなかった。すなわち、物質輸送現象は活発に起こらないことが示唆された。

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8件)

Jiang, L., Yu, M., Wu, B., Suekane, T., Li, W., Song, Y., Characterization of dissolution process during brine injection in Berea sandstones: an experiment study, *RSC Adv.*, 査読有, Vol. 6, 2016, pp. 114320-114328, DOI: 10.1039/C6RA19024

Jiang, L., Liu, Y., Yang, M., Zhou, X., Yu, M., Zhang, Y., Song, Y., Xue, Z., Suekane, T., Behavior of CO₂/water flow in porous media for CO₂ geological storage, *Magnetic Resonance Imaging*, 査読有, Vol. 37, 2016, pp. 100 - 106, doi: 10.1016/j.mri.2016.11.002

Liu, Y., Lv, P., Liu, Y., Jiang, L., Suekane, T., Song, Y., Wu, B., Liu, S., CO₂/water two-phase flow in a two-dimensional micromodel of heterogeneous pores and throats, *RSC Advances*, 査読有, Vol. 6, 2016, pp. 73897-73905, DOI: 10.1039/C6RA10229H

Sakai, S., Nakanishi, Y., Hyodo, A., Wang, L., Suekane, T., Three-dimensional fingering structure associated with gravitationally unstable mixing of miscible fluids in porous media, *Heat Transfer Research*, 査読有, 2017, DOI: 10.1615/HeatTransRes.2017016840

Wang, L., Hyodo, A., Sakai, S., Suekane, T., Three-dimensional visualization of natural convection in porous media, *Energy Procedia*, 査読有, Vol. 86, 2016, pp. 460-468 doi: 10.1016/j.egypro.2016.01.047

Suekane, T., Saito, Y., Jiang, L., Non-wetting phase saturation after drainage from the wetting-phase-filled porous medium, *Journal of Fluid Science and Technology*, 査読有, Vol. 10, No. 2,

2015, pp. 1-13, doi: 10.1299/jfst.2015jfst000x

Jiang, L., Liu, Y., Song, Y., Yang, M., Xue, Z., Zhao, Y., Zhao, J., Suekane, T., Shen, Z., Application of X-ray CT investigation of CO₂-brine flow in porous media, *Exp. Fluids*, 査読有, Vol. 56, 2015, doi: 10.1007/s00348-01501959-x

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, Vol. 9, No. 2, 2014, pp.1-10, <http://dx.doi.org/10.1299/jfst.2014jfst0012>

[学会発表](計8件)

パトモノアジ アニンディチヨ, 末包哲也, Investigation of CO₂ Dissolution Mass Transfer in Porous Media by utilizing CT X-ray Microtomography, 資源素材学会春季大会, 2017.3.27-29, 千葉工業大学

Suekane, T., Application of micro-tomography to CCS, 2nd International Forum on Advanced Technologies, pp. 145-147, 2016.3.7-8, University of Tokushima, **Invited**.

Liu, Y., Nagai, Y., Suekane, T., Pore scale imaging of enhanced oil recovery by WAG including nanofluid application, 2nd International Forum on Advanced Technologies, pp. 93-95, 2016.3.7-8, University of Tokushima,

Suekane, T., Study on trapping mechanisms in CCS by X-ray microtomography, I2CNER Workshop, 2016.2.4, University of Kyushu, **Invited**.

Nagai, Y., Suekane, T., Three phase interaction among gas, water and oil in three-dimensional porous media by X-ray micro-tomography, International Workshop on Heat Transfer Advances for Energy Conservation and Pollution Control, 16-19, October, 2015, Taipei, Taiwan

Wang, L., Hyodo, A., Sakai, S., Suekane, T., Three-dimensional visualization of natural convection in porous media, 8th Trondheim Conference on CO₂ Capture, Transport and Storage, Trondheim, Norway, 16-18 June, 2015

永井 湧太, 末包 哲也, 三次元多孔質
体内における三相流のポアスケールで
の可視化, 資源・素材 2015 (千葉),
2015.3.28-30, 千葉工業大学

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

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

末包 哲也 (SUEKANE, Tetsuya)

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号 : 3 0 2 6 2 3 1 4