

TSUBAME 共同利用 平成 27 年度 学術利用 成果報告書

多層流 LBM シミュレーションを用いた CO<sub>2</sub> トラッピングメカニズムの解明  
Investigation on CO<sub>2</sub> trapping mechanism using multiphase LBM simulation

辻 健

Takeshi TSUJI

九州大学 カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所

International Institute for Carbon-Neutral Energy Research, Kyushu University

<http://i2cner.kyushu-u.ac.jp/~tsuji/>

## 邦文抄録

CO<sub>2</sub> 地中貯留において、岩石内での CO<sub>2</sub> のトラッピングメカニズムの解明や、CO<sub>2</sub>-水-石油といった三相の複雑な挙動を明らかにするため、格子ボルツマン法(LBM:Lattice Boltzmann Method) を用いた大規模デジタル岩石シミュレータを開発した。GPGPU (General Purpose Graphics Processing Unit)並列計算を利用し、マイクロ X 線 CT で得られたデジタル岩石に対して、大規模多相流シミュレーションを実施した。計算領域が巨大になったため、REV よりも大きなモデルで計算でき、実験データを用いた検証が可能となった。様々な貯留層の条件で多相流シミュレーションを行い、CO<sub>2</sub>トラッピングメカニズムの解明、効果的に CO<sub>2</sub>を貯留できる貯留層条件の解明、さらに石油の増進回収(EOR; Enhanced Oil Recovery)で回収量を向上させる条件を明らかにした。

## 英文抄録

We developed a large-scale digital rock simulator by using the innovative lattice Boltzmann method (LBM) to reveal the complex flow behavior of super-critical CO<sub>2</sub>-water-oil system and the trapping mechanism of injected CO<sub>2</sub> inside the porous media. By using the GPGPU (General Purpose Graphics Processing Unit) parallel computing technique, we carried out large-scale simulation on the real rock geometry obtained from micro-CT scanner. After validating the model, we carried out various simulations under different reservoir conditions to investigate the CO<sub>2</sub> trapping mechanism and provide useful information for Enhanced Oil Recovery (EOR).

*Keywords:* 多相流 LBM, GPGPU, 二酸化炭素の地中貯留, 多孔質媒体

## 背景と目的

二酸化炭素の地中貯留(CCS)は、岩石の間隙に CO<sub>2</sub> を注入することで永久的に地下に閉じ込める技術で、大気中の CO<sub>2</sub> を近未来的に削減できる技術として注目されている。このプロジェクトにおいて、安全に、また効果的に CO<sub>2</sub>を地中貯留するためには、間隙内部の CO<sub>2</sub> の挙動を調べるのが重要となる。その CO<sub>2</sub> の挙動を調べるため、多くの実験が実施されている。また実験が難しい条件での CO<sub>2</sub> 挙動や、その定量化に向けて流体計算が多く実施されている。しかし地層を流れる CO<sub>2</sub> の挙動シミュレーションでは、単純化した間隙モデルに基づく評価に限られているのが現状であった。このような単純化した間隙形状では、実際の地層内の流体挙動を説明することが難しい。近年、マイクロフォーカス X-CT などのイメージング技術が発達により、実際の岩石の間隙形状(デジタル岩石)を、 $\mu\text{m}$  の解像度で抽出

することができるようになった(図 1a)。さらに計算機の発達によって、デジタル岩石に対して、格子ボルツマン法(Lattice Boltzmann Method; LBM)による流体シミュレーションを実施できるようになってきた。

本研究グループでは、Graphics Processing Unit (GPU)を用いた並列計算により、実際の岩石の巨大な間隙モデル(グリッドサイズ:  $1000^3$ )に対して、高解像度( $2\ \mu\text{m}$ )で LBM シミュレーションを行うことに成功した(図 1b)。計算領域のサイズアップを行うことで、間隙スケール( $\mu\text{m}$  スケール)から岩石コアスケール(mm スケール)の数値シミュレーションが可能となった。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、CO<sub>2</sub>トラッピング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。

## 概要

本年度は、まず計算コードの高効率化を行った。去年度までは、マルチ GPU 計算に関する計算領域の分割法として、流体格子数を均等に割り、z方向に分割する方法を採用していた。分割領域の界面では、一層の ghost レイヤーが設けられ、これは領域間のデータ転送、かつカラー勾配の計算に用いられる。しかし、この次元分割では、スケーリング性能が悪く、計算ノードの数が増えるにつれて、通信時間が全体の計算時間に占める割合が増えてくる。これを改善するため、三次元分割を行い、スケーリング性能を向上させた。

改良した並列計算コードを用いて、岩石間隙内の水と CO<sub>2</sub> 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 (Tsuji and Jiang, 2016)。ここでは、(1) 様々な貯留層条件で多相流の挙動を計算し、効果的に CO<sub>2</sub> を貯留できる条件を調べた研究、(2) CO<sub>2</sub> 初期分布状態が CO<sub>2</sub> の残留トラッピングへ与える影響を調べた研究、(3) 三相の LBM シミュレーションコードを開発し、それを CO<sub>2</sub> 圧入による石油の増進回収 (EOR) の研究に適用した結果を紹介する。

## 結果および考察

### (1) 様々な貯留層の条件における CO<sub>2</sub> の挙動解明

様々な貯留層の条件において岩石間隙内の CO<sub>2</sub> の挙動を計算し、岩石間隙の中にどれくらいの量の CO<sub>2</sub> を貯留できるか調べた (Tsuji et al., 2016)。図 1c と図 1d に、CO<sub>2</sub> を圧入した速度の違いが、間隙内部を流れる CO<sub>2</sub> の挙動に与える影響を示している。CO<sub>2</sub> を圧入する速度が小さい場合のほうが、最終的に貯留される CO<sub>2</sub> の量が大きくなること等がわかった。この流体計算を様々な条件で実施すれば、貯留層の条件に依存した CO<sub>2</sub> の貯留量や、CO<sub>2</sub> の流れやすさを定量的に推定できる。今回は、50 ケースを超える貯留層条件の下で、CO<sub>2</sub> と水の挙動を計算した。その結果、CO<sub>2</sub> の貯留量 (飽和度) は、キャピラリー数と、水と CO<sub>2</sub> の粘性比の 2 つのパラメータで決定できることが明らかになった。キャピラリー数と粘性比は、貯留層の状態や CO<sub>2</sub> の圧入方法で決定される。つまり、本研究で開発した手法を用いれば、CO<sub>2</sub> を効率的に貯留することのできる貯留層条件を明らかにすることができる。

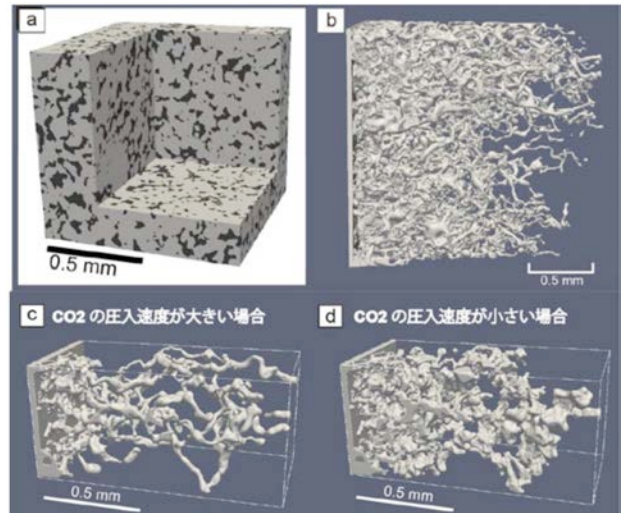


図 1. (a) 岩石内部の間隙構造。黒い部分が間隙部分で、この中に CO<sub>2</sub> を圧入する。灰色の部分が岩石の構成粒子。(b) 岩石間隙モデル (パネル a) の中を流れる CO<sub>2</sub> の挙動 (Tsuji et al., 2016)。(c) CO<sub>2</sub> の圧入速度が大きい場合の岩石間隙内での CO<sub>2</sub> の挙動。(d) CO<sub>2</sub> の圧入速度が小さい場合の CO<sub>2</sub> の挙動。

### (2) 初期分布状態が CO<sub>2</sub> 貯留率への影響

岩石間隙内での CO<sub>2</sub> の初期分布の違い (図 1) は、CO<sub>2</sub> 圧入後に安定して地層に CO<sub>2</sub> がトラップされる度合い (貯留率) にも影響を与えることが予想される。我々のグループでは、これらの初期 CO<sub>2</sub> の分布や形状を定量的に評価し、CO<sub>2</sub> 貯留率との関係を明らかにした (Jiang et al., 2016)。まず、人工的に異なる分布を持つ 4 つの圧入 CO<sub>2</sub> モデルを作成した: (a) ランダム分布、(b) コーティング分布、(c) 実際の CO<sub>2</sub> の圧入 (Drainage 過程) によって得られた分布、(d) パッチ分布 (図 2 左)。この CO<sub>2</sub> 分布 (初期状態) に周期条件を与え、現実近い平衡状態に変換した (図 2 右)。この 4 つのモデルでは、CO<sub>2</sub> クラスターの形状、連続度、表面積などの特性は大きく異なる。この平衡状態の CO<sub>2</sub> 分布に対して、水を圧入するシミュレーション (Imbibition 過程) を実施し、残留トラップする CO<sub>2</sub> 量を定量化した (図 3)。

この結果から、ランダム分布とコーティング分布の場合が、高い CO<sub>2</sub> の貯留率を有することがわかった。また、初期 CO<sub>2</sub> クラスターのサイズ、長さ、表面積、連続度と真球度などの形状パラメータを計算し、これらのパラメータが貯留率に与える影響について検討を行った。

その結果、初期 CO<sub>2</sub> の連続度と真球度が残留トラッピング率に最も影響していることが分かった。このことから、ガスと水を交互に圧入する手法、またはマイクロバブル圧入方式が有効であることが示された。

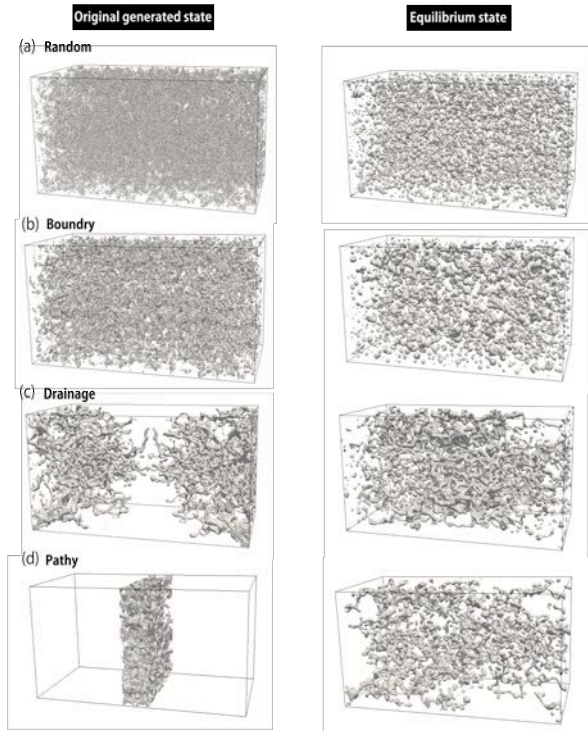


図2. 異なる CO<sub>2</sub> 初期分布状態(左:生成時の分布、右:平衡時の分布)。(a)ランダム分布、(b)コーティング分布、(c)実際の CO<sub>2</sub> の圧入によって得られた分布、(d)パッチ分布。

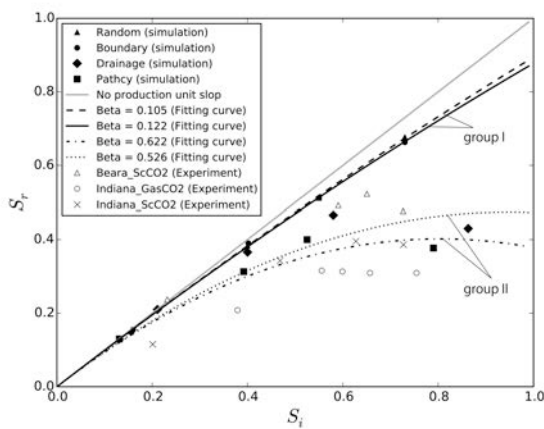


図3. 異なる初期 CO<sub>2</sub> 分布による貯留率(残留飽和度と初期飽和の比)

### (3) 三相モデルへの拡張及び CO<sub>2</sub>-EOR への応用

CO<sub>2</sub> 圧入による石油の増進回収率技術(CO<sub>2</sub>-EOR; Enhanced Oil Recovery)は CCS と EOR 技術を併用することによって、石油回収率を向上するだけでなく CO<sub>2</sub> 排出量削減にも貢献できると考えられている。しかし、油-水- CO<sub>2</sub> 三相流システムは非常に複雑である。また薄膜流動現象をモデリングすることが回収率を評価する上で重要とされている。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 CO<sub>2</sub> 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。

本研究では、格子ボルツマン法のシミュレータを三相流モデルへ拡張し、岩石間隙内の油-水- CO<sub>2</sub> 三相システムの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。その手法を用いて、薄膜流動現象を表現できる界面モデルを作成し、CO<sub>2</sub>-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(図4)。この計算結果から、CO<sub>2</sub> 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。

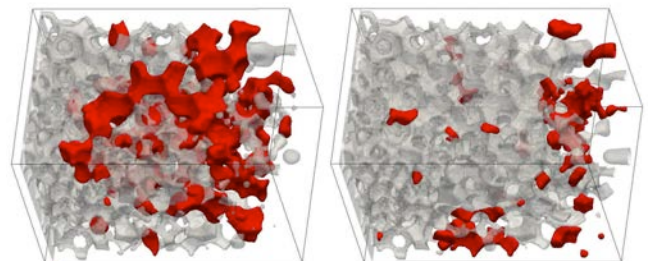


図4. トラップされている原油(左図)を CO<sub>2</sub> の圧入によって再び流動させ(右図)、原油の回収率を向上させる。水・岩石粒子は透明、石油は赤色、CO<sub>2</sub> は灰色で示す。

### まとめ、今後の課題

GPU を用いて格子ボルツマン法を巨大なデジタル岩石モデルに適用し、間隙内の流体挙動を計算した。REV より大きなデジタル岩石モデルを用いたアプローチによって、貯留層内での CO<sub>2</sub> の挙動や反応を再現することが可能となってきた。さらに3相の流体計算も可能となってきた。ここでは3つの成果を報告したが、これら以外の課題にもチャレンジし

ており、今後も本手法の適用分野を広げる努力を継続する。

近い将来、CO<sub>2</sub> 地中貯留をはじめとした地下流体を扱うプロジェクトでは、貯留層をデジタル化し、貯留層内で生じている挙動や地化学反応を正確にモデル化することが可能になると考えられる。それにより、貯留層を有効に利用またはコントロールできるようになると考えられる。

引用文献（本研究課題で得られた成果）

Jiang, F., T. Tsuji (2016), Effects of Initial Saturation Distribution on the Residual Saturation of the Nonwetting Phase in Porous Media, International Journal of Greenhouse gas Control, Volume 49, Pages 179-191

Tsuji, T., F. Jiang, K.T. Christensen (2016), Characterization of immiscible fluid displacement processes with various capillary numbers and viscosity ratios in 3D natural sandstone, Advances in Water Resource, doi:10.1016/j.advwatres.2016.03.005.

Tsuji, T., F. Jiang (2016), Two-phase porous flow simulation for natural sandstone on GPU supercomputer, TSUBAME E-Science Journal, 14, 1-7.