

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656536

研究課題名(和文) 格子ボルツマン法とGPGPUを応用した高解像度局所海洋流動モデルの開発

研究課題名(英文) Development of a high-resolution local scale ocean simulation model based on LBM and GPGPU

研究代表者

胡 長洪 (HU, CHANGHONG)

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号：20274532

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円、(間接経費) 570,000円

研究成果の概要(和文)：海洋CCSに関わる要素環境評価技術である局所海洋流動モデルの開発を目的として、格子ボルツマン法(LBM)とGPU計算の応用に関する研究を行った。高レイノルズ数流れの数値計算を安定化するために、LES乱流モデルを導入した。物質拡散の計算について、高レイノルズ数・高ペクレ数の問題に対してHybrid LBM/FVM法を開発して計算精度を高めた。数値計算の大規模化・高速度化のために計算コードのGPU実装を行った。開発されたGPUベースのLBMモデルを使って、CO₂貯留池からの溶解と拡散、海底下地中貯留地から漏れたCO₂液滴の上昇挙動に対する数値シミュレーションを行い、有望な結果が得られた。

研究成果の概要(英文)：As a novel local scale ocean simulation model for environment assessment of marine CCS, a lattice Boltzmann method (LBM) combined with GPU computing technology has been developed. A large eddy simulation (LES) model has been implemented to the LBM code for high Reynolds number flows. To increase the accuracy of CO₂ diffusion computation on high Reynolds and high Peclet number problems, a hybrid LBM/FVM (finite volume method) method has been developed. The GPU parallel computing technique has been applied to accelerate the simulation. Using the developed LBM-based numerical model, two numerical simulations on CCS, the CO₂ dissolution, diffusion, and convection from a CO₂ lake, and the ascent behavior of a CO₂ droplet leaked from a sub-seabed storage site, have been carried out and promising results have been obtained.

研究分野：総合工学

科研費の分科・細目：船舶海洋工学・海洋環境

キーワード：海洋CCS 環境評価技術 格子ボルツマン法 GPGPU

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。日本では陸上における地中貯留の適地が乏しく、海洋隔離 (海洋溶解と深海底貯留) 及び海底下貯留が期待されており、それに対する研究の必要性が高い。

海洋ベースの CO₂ 隔離技術は海洋という地球規模の環境を利用する技術であり、その実現には国際的な合意が得られる必要があるため、海洋ベースの CO₂ 隔離技術が周辺海洋環境へ及ぼす影響を明確に評価することが求められている。海洋科学による環境評価手法を確立するために、海底下貯留層から漏洩された CO₂ の挙動や深海底貯留の CO₂ ハイドレートの溶解速度に関する予測は不可欠である。これらの局所現象は海底地形変化及び複雑な海底乱流に強く影響されることで、海洋大循環モデルの扱える対象外になり、数値シミュレーションには工学 CFD の手法が必要である。一方、計算領域の大きさを考えると、現存の工学 CFD 手法では CPU 処理能力の限界から非常に困難である。

2. 研究の目的

本研究では新しい CFD 手法の組み合わせ・改良により、海洋 CCS の環境評価に必要な新しい局所海洋流動・拡散モデルの開発を目的とする。

3. 研究の方法

格子ボルツマン法 (LBM) と GPU 計算を応用した CFD 手法を開発する。特に LBM の難点である高レイノルズ数流れへの適用、物質拡散計算の安定性などの課題に対して重点的に研究を行う。CO₂ 深海底貯留や海底下貯留に対して、漏洩された CO₂ の拡散の予測に開発された CFD 手法の応用に関する研究を行う。その CFD モデルの境界条件と初期条件を実海域に近い値で与えることは重要で、海洋大循環モデルとの連携を試みる。

4. 研究成果

(1) 格子ボルツマン法の開発と改良

格子ボルツマン法を使って海洋流動・拡散に対する数値計算を行うために一つの重要な研究課題は乱流モデルの応用である。高レイノルズ数流れの数値計算が不安定になりやすい問題に対して、本研究では LES 乱流モデルの導入と MRT 衝突演算子の応用により、計算の安定性を改良している。図 1 には高レイノルズ数キャビティ流れに関する 2 次元数値計算例を示しており、ほかの Navier-Stokes ソルバーによる DNS 結果と比較し、高い計算精度が確認された。

LBM による数値計算はすべて陽的スキームで行え、かつ優れた境界適合性がある特性から、GPGPU 計算と併用することで大規模数値

計算に威力を発揮できることから、本研究は LBM プログラムに対して GPU 計算の開発を行った。図 2 は GPU 計算のために計算領域の分割方法で、計算中 GPU と主メモリの間のアクセスを極力減らす工夫を施した。

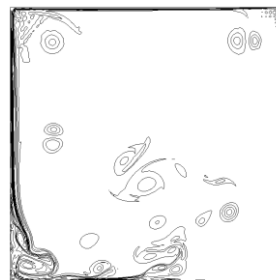


図 1 キャビティ流れの 2 次元計算例: Re=10⁵ の等温度線

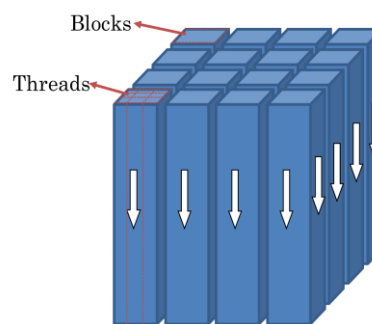


図 2 LBM 法に対する GPU 実装にスレッドとブロックの構造

GPU 計算を利用する LBM 計算プログラムの 3 次元拡張も行った。図 3 にはチャンネル流れに関する 3 次元 GPU 計算の一例で、レイノルズ数 Re=180 の乱流渦構造を示している。

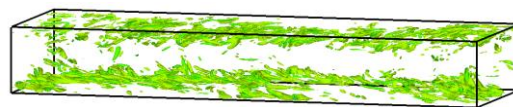


図 3 チャンネル流れの 3 次元計算例: Re=180 の乱流渦構造

(2) 物質拡散計算に Hybrid LBM/FVM の開発

物質拡散の計算について、従来の LBM 拡散モデルでは、高レイノルズ数・高ペクレ数 (Peclet number) の問題に対して得られた拡散スカラー場にノイズが生じ、計算精度に問題がある。本研究では、Hybrid LBM/FVM (Finite Volume Method) 法を新たに提案してこの問題を解決している。この方法では、流れ場の計算に LBM を、拡散場の計算に FVM を使用する。FVM の移流項計算に TVD (Total Variation Diminishing) 法を応用している。自然対流問題に対して開発された Hybrid LBM/FVM 法の精度検証を行い、従来の LBM 拡散モデルより計算精度が顕著に改善されたことを確認している。図 4 に深海底貯留池から CO₂ の拡散に関する 2 次元数値シミュレー

ションを示しており、CO₂ 濃度拡散計算に単純な LBM と Hybrid LBM/FVM 法による計算結果を比較している。LBM/FVM 法の計算結果に拡散スカラー場の数値ノイズが抑えられたことが分かった。なお、この計算に境界条件は海洋大循環モデルの計算結果に参考して決められた。このケースでは貯留池付近海流流速は 0.02m/s に設定しており、貯留池の上流側に渦が形成されており、図 5 に示す数値シミュレーションの結果ら確認できる。このような高空間解像度の数値シミュレーションモデルを開発したことで、詳細な局部流動が把握できるようになり、海洋ベースの CO₂ 隔離に関する海洋環境評価の確実性の向上に繋がる。

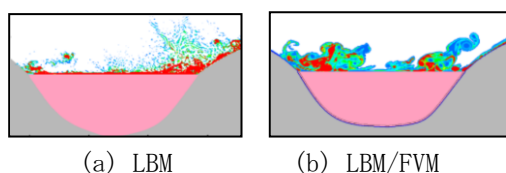


図 4 CO₂ 貯留池からの溶解と拡散の数値シミュレーション

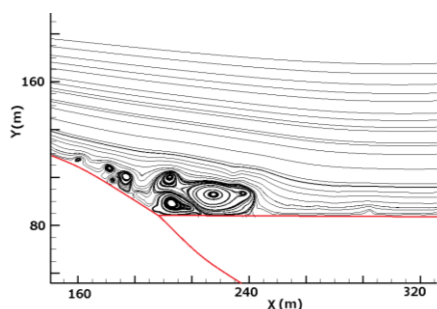


図 5 計算した貯留池付近の流線

(3) 二相流格子ボルツマン法の開発

現実的に日本では海底下地層に CO₂ を貯留する方式が一番有望とされており、これまで技術開発に関する研究が盛んに行われた。この貯留技術に対する安全性及び海洋環境影響の評価に関して、海底下貯留されている液体 CO₂ が漏洩した場合、海水中 CO₂ 液滴の上昇に対する予測が必要である。本研究ではそのために二相流に関する格子ボルツマン法 (LBM) を開発した。相の界面を追跡するにはフェーズフィールド法 (PFM) を採用した。また、海水に溶解しながら上昇する CO₂ 液滴を正確にシミュレーションするために、CO₂ 液滴の溶解モデルを構築した。図 6 は初期直径 14mm の CO₂ 液滴の上昇に対する数値シミュレーションで、CO₂ 液滴の変形が再現されている。また、液滴の上昇スピードについて計算と実験を図 7 に比較しており、高い計算精度が得られたことが示されている。

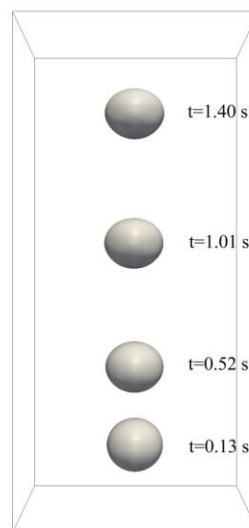


図 6 初期直径 14mm の CO₂ 液滴上昇シミュレーション

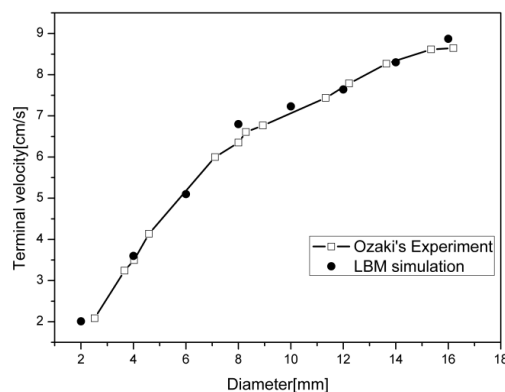


図 7 上昇速度に関する計算と実験の比較

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, Changhong Hu: Numerical Simulation of a Rising CO₂ Droplet in the Initial Accelerating Stage by a Multiphase Lattice Boltzmann Method, Applied Ocean Research, V. 45, pp. 1-9 (doi: 10.1016/j.apor.2013.06.005), 2014 (査読有)
- [2] Changhong Hu, Makoto Sueyoshi, Fei Jiang, Kiminori Shitashima, Tetsuo Yanagi: Rise and Dissolution Modeling of CO₂ Droplet in the Ocean, Journal of Novel Carbon Resource Sciences, Vol. 7, pp. 12-17, 2013 (査読有)
- [3] 蔣 飛、胡 長洪: 格子ボルツマン法による海洋中 CO₂ 液滴挙動の数値シミュレーション、日本機械学会第 25 回計算

力学講演会論文集、 pp. 674-675、2012
(査読無)

- [4] Fei Jiang、Changhong Hu: Development of a Hybrid LBM/FVM Approach for Numerical Simulation of CO₂、日本船舶海洋工学会講演論文集、第 14 号、371-372、2012 (査読無)

[学会発表] (計 2 件)

- [1] 蔣 飛、胡 長洪: 格子ボルツマン法による海洋中 CO₂ 液滴挙動の数値シミュレーション、日本機械学会第 25 回計算力学講演会、2012 年 10 月 8 日、神戸

- [2] Fei Jiang、Changhong Hu: Development of a Hybrid LBM/FVM Approach for Numerical Simulation of CO₂、日本船舶海洋工学会講演会、2012 年 5 月 18 日、神戸

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

胡 長洪 (HU CHANGHONG)
九州大学・応用力学研究所・准教授
研究者番号: 20274532