

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 25 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560193

研究課題名(和文) マルチフィジックススケール対応モーメントベースボルツマン解法の研究

研究課題名(英文) Study on moment base lattice Boltzmann method for multi-physics/scale flows

研究代表者

森西 晃嗣 (Morinishi, Koji)

京都工芸繊維大学・工学科学研究科・教授

研究者番号：20174443

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：分子速度分布関数を未知数とするボルツマン方程式に基づくコンピュータシミュレーションにおいては、分子速度空間も離散化する必要があるため多くの記憶容量を必要とする。そこで、対象とする流動現象を表現するのに必要最小限のモーメントを用いるボルツマン方程式解法を提案し、その有効性を格子ボルツマン法を例に検証した。その結果、従来の格子ボルツマン法と比較して、必要な記憶容量が削減されるのに加えて、数値安定性が大幅に改善し、高レイノルズ数流れ、乱流、熱流動、気液2相流などのシミュレーションが容易かつ経済的に遂行できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：Lattice Boltzmann method is an attractive method as an alternative of the Navier-Stokes solver, especially for incompressible flows. Simplicity of the algorithm is one of the most advantage of the lattice Boltzmann method. The method, however, sometimes becomes numerically unstable, especially for simulating flows at high Reynolds numbers. In this study, moment base lattice Boltzmann method is developed. A series of numerical experiments using the method indicate that numerical simulation of flows at high Reynolds numbers, turbulent flows, thermal flows, and multi-phase flows can be done simply and economically.

研究分野：流体工学

キーワード：計算流体力学 格子ボルツマン法 二相流 乱流 熱流動

### 1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、平成 15 年度より高度生産技術支援ツールとして、分子レベルから連続体レベルまでの流動現象を自己完結的にシミュレーションできる解法の構築を目指した研究を進め、流れ場の中で分子の平均自由行程レベルの現象を含んでいる場所ではボルツマン方程式解法を、連続体レベルの現象である場所ではナビエ・ストークス方程式解法を、それぞれ自己完結的に選択しながらシミュレーションを行うボルツマン/ナビエ・ストークス統合解法を完成させ、マルチスケールの流動現象に対してこの解法により、従来の手法より計算効率が 100 倍程度改善されることを確認した[1]。

ナビエ・ストークス方程式では流速や圧力などの物理量が未知数となるのに対して、ボルツマン方程式は分子速度分布関数が未知数で、流速や圧力などは分布関数のモーメントとして求まる。したがって、ボルツマン/ナビエ・ストークス統合解法では、それぞれの解法が使用される領域が接している境界では、ナビエ・ストークス方程式解法から得られる物理量(モーメント)から分布関数を構成し、それをボルツマン解法に受け渡す操作が必要に成る。このモーメントから分布関数を構成する手法の研究過程で、必要最小限のモーメントを用いてボルツマン方程式が解法できれば、さらなる計算効率の改善が期待できる。

また、その手法の単純さから近年ナビエ・ストークス方程式解法に代わって非圧縮性流れのシミュレーションに広く用いられている格子ボルツマン法も分布関数が未知数である。そこで、格子ボルツマン法に対しても必要最小限のモーメントを用いる解法を確立出来れば、格子ボルツマン法の欠点の一つである必要な記憶容量の多さを緩和することが期待できる。

以上のような観点から、対象とする流れ場に応じて必要最小限のモーメント自律的に選別し、その時間発展をボルツマン方程式で計算する手法の開発研究を行う着想に至った。

[1]K. Morinishi, Multi-Scale Flow Simulation Using a Kinetic/Continuum Hybrid Scheme, Computational Fluid Dynamics Journal, Vol. 16, No. 4, pp. 28-39, 2007.

### 2. 研究の目的

高度生産技術支援ツールとして、分子レベルから連続体レベルまでの様々な流動現象を自己完結的にシミュレーションできる解法の構築を最終目標として、本研究では、対象とする現象を再現するのに必要最小限のモーメントを未知数として、その時間発展をBGK 近似したボルツマン方程式で計算することにより、従来の分布関数を未知数とする

ボルツマン解法よりも格段に経済的な解法の研究開発を行う。特に、熱流動、2 相流、乱流、および、流体/固体連成問題など、マルチフィジックス現象への拡張を意図して研究を進める

### 3. 研究の方法

本研究の遂行に際しては、ボルツマン方程式の未知数である分布関数を必要最小限のモーメントで適切に表現する必要がある。そこで、粒子(分子)速度の数が少なく手法が単純である格子ボルツマン法を対象として、次のような項目順に研究を進める。

- 1) 単純な流動現象に対して分布関数を必要最小限のモーメントで表す方法を求め、それを用いて規範的なテストケースのシミュレーションを行い、その信頼性の検証を行う。
- 2) 熱流動現象を表現するのに必要最小限のモーメントを選別し、規範的なテストケースのシミュレーションを行い、その信頼性の検証を行う。
- 3) 気液 2 相流を表現するのに必要最小限のモーメントを選別し、規範的なテストケースのシミュレーションを行い、その信頼性の検証を行う。
- 4) 乱流の規範的なテストケースのシミュレーションを行い、乱流現象に対する本手法の信頼性の検証を行う。

### 4. 研究成果

本研究で得られた主な研究成果を、研究方法で示した 4 つの項目ごとに以下に示す。

#### 1) 単純な流動現象

単純な流動現象に対しては、2 次元流れでは 6 個のモーメントを、3 次元流れに対しては 10 個のモーメントで現象を表現できることを確認した。一般に、格子ボルツマン法では、2 次元流れでは 9 速度(D2Q9)モデルが、3 次元流れでは 19 速度(D3Q19)モデルが広く用いられているので、本手法を用いることにより必要な記憶容量が緩和される。

図 1 は、規範的なテストケースの一つであるレイノルズ数  $Re=5000$  の 2 次元正方空洞流れにおける結果である。一般に、格子ボルツマン法は高レイノルズ数流れで数値的不安定性を示し、このテストケースでは少なくとも  $200 \times 200$  以上の格子を用いないと解が得られないことが報告されているが[2]、必要最小限のモーメントを用いて計算する本手法は、 $80 \times 80$  の格子でも Ghia の規範解とよく一致した解が得られ、数値的安定性が改善されていることが確認できる。

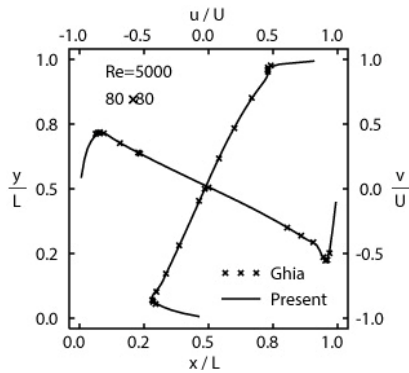


図1 正方空洞流れの速度分布

図2は、Doubly periodic shear layersの結果である。流れ場の基準レイノルズ数  $Re=10000$  で、格子点数は  $128 \times 128$  である。この条件に対して格子ボルツマン法の解は偽りの渦を作り出すことが知られているが[3]、本解法の結果には偽りの渦が見られない。さらに、図3と4に示すように、本手法(MLBM)で得られた速度分布を信頼性の高い擬スペクトル法(PSM)の結果と比較しても遜色が無く、本手法の信頼性が確認できる。

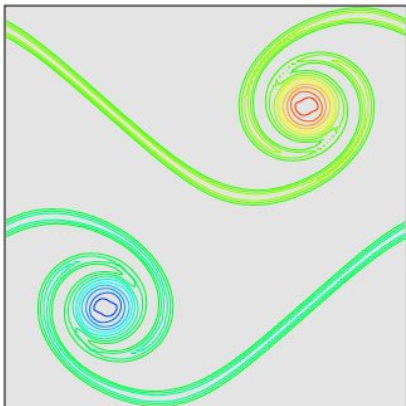


図2 本手法の渦度分布

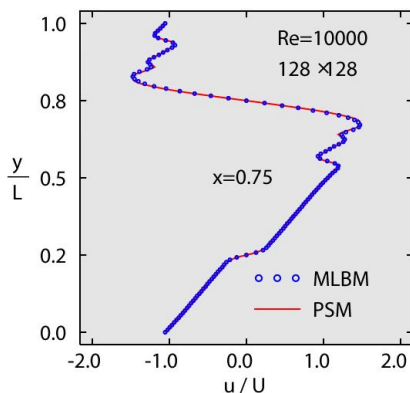


図3 X方向速度分布の比較

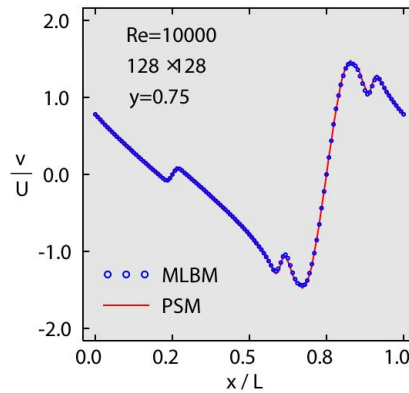


図4 y方向速度分布の比較

- [2] S. Ansumali and I. V. Karlin, Single relaxation time model for entropic lattice Boltzmann methods, Physical Review E, Vol. 65, 056312, pp. 1-9, 2002.
- [3] P. J. Dellar, Bulk and shear viscosities in lattice Boltzmann equations, Physical Review E, Vol. 64, 031203, pp. 1-11, 2001.

## 2) 熱流動現象

熱流動現象のシミュレーションでは、単純な流動現象のシミュレーションに用いる分布関数に加えて、エネルギーを表す分布関数を導入する。このエネルギーを表す分布関数により流体中の温度分布が求まる。単純な流動現象のシミュレーションに必要なモーメントに加えて、温度と熱流束に相当するモーメントを導入することにより、エネルギーを表す分布関数の時間発展が求まることを確認した。すなわち、2次元流れでは単純な流動現象のシミュレーションに必要な6個のモーメントにエネルギーの分布関数の表現に必要な3個のモーメントを加えた合計9個のモーメントを用いれば、3次元流れでは単純な流動現象のシミュレーションに必要な10個のモーメントにエネルギーの分布関数の表現に必要な4個のモーメントを加えた合計14個のモーメントを用いれば、それぞれ、熱流動現象のシミュレーションが可能に成ることを確認した。

## 3) 気液2相流

気液2相流のシミュレーションでは、単純な流動現象のシミュレーションに用いる分布関数に加えて、気液界面を表現するレベルセット関数の移流を表現する分布関数を導入する。レベルセット関数の移流は、単純な流動現象のシミュレーションに用いるモーメントに加えて、レベルセット関数とその流動を表現するモーメントを用いることにより、実

行可能であることを確認した。すなわち、2次元流れでは単純な流動現象のシミュレーションに必要な6個のモーメントにレベルセット関数とその移流を表現するのに必要な3個のモーメントを加えた合計9個のモーメントを用いれば、3次元流れでは単純な流動現象のシミュレーションに必要な10個のモーメントにレベルセット関数とその移流を表現するのに必要な4個のモーメントを加えた合計14個のモーメントを用いれば、気液2相流のシミュレーションが可能になることを確認した。

図5は液体中を上昇する単一気泡のシミュレーション結果である。密度比は1000、粘性係数比は100で、代表レイノルズ数は $Re=55$ である。気泡の初期形状は球とし、その直径を32等分する等間隔格子を用いている。終端速度に達した時に得られた気泡の形状は対応する実験結果と良く一致しており、本手法の信頼性が確認できる。



図5 液体中を上昇する単一気泡

#### 4) 乱流

乱流の規範的なテストケースとして Kida の一様等方性乱流[4] (図6) と Moser らのチャンネル乱流[5] (図7) を取り上げた。

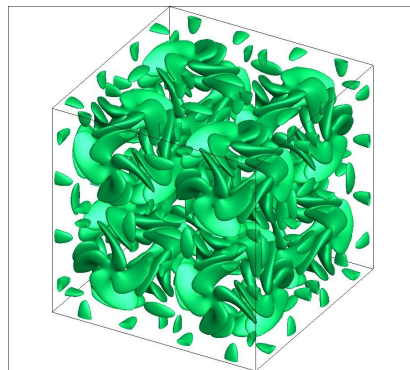


図6 一様等方性乱流の渦度分布

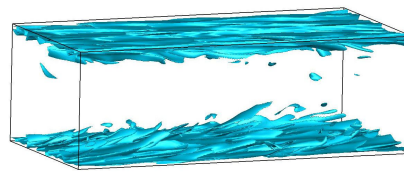


図7 チャンネル乱流

一様等方性乱流のシミュレーションでは、流れ場が格子により十分分解されている場合は、本手法の結果は信頼性の高い擬スペクトル法の結果と比較して遜色が無いことを確認した。また、図8に示すように、流れ場に対して格子の分解能が不十分で、格子ボルツマン法(LBM)では計算が途中で発散するケースでも、本手法(MLBM)は擬スペクトル法(PSM)と同様な結果を与える。これより、本手法は、格子ボルツマン法と比較して、数値安定性が改善されていることが確認出来る。

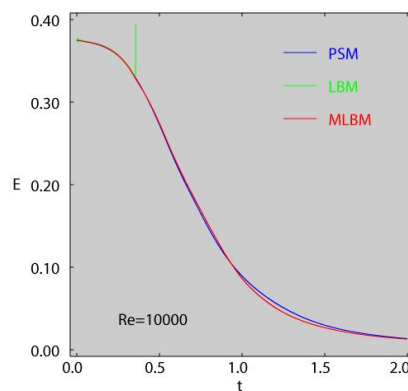


図8 エネルギーの時間履歴

また、図 9～11 に示すレイノルズ数  $Re_t=180$  のチャンネル乱流のシミュレーション結果より、本手法の信頼性が確認出来た。

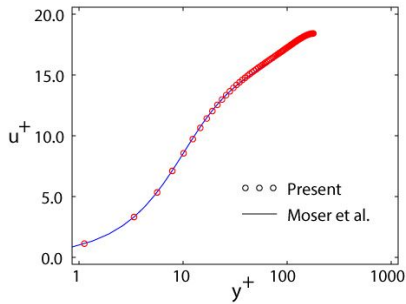


図 9 主流速度分布の比較

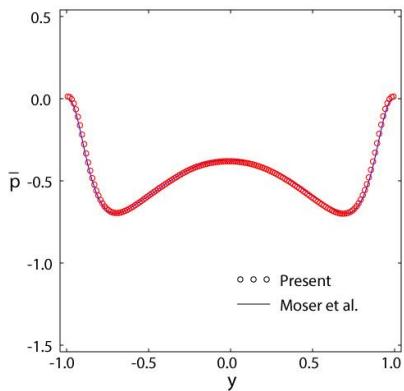


図 10 平均圧力分布の比較

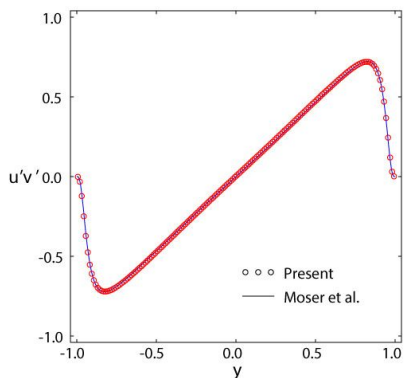


図 11 レイノルズ応力の比較

[2] S. Kida and Y. Murakami, Kolmogorov similarity in freely decaying turbulence, *Physics of Fluids*, Vol. 30, No. 7, pp. 2030-2039, 1987.

[3] R.D. Moser, J. Kim, and N.N. Mansour, Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to  $Re_t=590$ , *Physics of Fluids*, Vol. 11, pp. 943-945, 1999.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

K. Morinishi, T. Fukui, Parallel computation of turbulent flows using moment base lattice Boltzmann method, *Parallel CFD 2015*, 243-244, 2015, 査読無.

T. Hashimoto, I. Tanno, T. Yasuda, Y. Tanaka, K. Morinishi, N. Satofuka, Higher order numerical simulation of unsteady viscous incompressible flows using kinetically reduced local Navier-Stokes equations on a GPU, *Computers & Fluids*, Vol. 110, 108-113, 2015, 査読有.

K. Morinishi, T. Fukui, Parallel computing approach of moment base two-phase lattice Boltzmann method, *Parallel CFD 2014*, 104-105, 2014, 査読無.

I. Tanno, T. Hashimoto, T. Yasuda, Y. Tanaka, K. Morinishi, N. Satofuka, Comparison of virtual flux method on LBM and on other methods on a GPU, *Computers & Fluids*, Vol. 88, 822-825, 2013, 査読有.

K. Morinishi, T. Fukui, Moment Base Lattice Boltzmann Approach for Multiphysics Flow Problems, *ICCFD7-1605*, 1-9, 2012, 査読無, <http://www.iccfd.org/iccfd7/proceedings.html>

〔学会発表〕(計 5 件)

Koji Morinishi, Parallel computation of turbulent flows using moment base lattice Boltzmann method, 27th International Conference on Parallel Computational Fluid Dynamics (Parallel CFD 2015), May 20, 2015, Montreal, Quebec (Canada).

Koji Morinishi, Parallel Computing approach of moment base two-phase lattice Boltzmann method, 26th International Conference on Parallel Computational Fluid Dynamics (Parallel CFD 2014), May 21, 2014, Trondheim (Norway).

Koji Morinishi, Moment Base Lattice Boltzmann Method for Incompressible Multi-phases Flows, 10th International Conference for Mesoscopic Methods in Engineering and

Science (ICMMES 2013), July 25, 2013,  
Oxford (UK).

Koji Morinishi, Moment Base Lattice  
Boltzmann Approach for Incompressible  
Two-phase flows with Large Density  
Ratio, 6th European Congress on  
Computational Methods in Applied  
Sciences and Engineering (ECCOMAS  
2012), September 10, 2012, Vienna  
(Austria).

Koji Morinishi, Moment Base Lattice  
Boltzmann Approach for Multiphysics  
Flow Problems, 7th International  
Conference on Computational Fluid  
Dynamics (ICCFD7), July 9, 2012, Big  
Island, Hawaii(USA).

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

森西 晃嗣 (MORINISHI, Koji)  
京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・教授  
研究者番号：20174443