

氏名	むはまっど いずはむ びん いすまいる MUHAMMAD IZHAM BIN ISMAIL
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	博乙第196号
学位授与の日付	平成27年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位論文題目	Study on Regularized Lattice Boltzmann Method for High Reynolds Number and Turbulent Flow Simulations (正規化格子ボルツマン法における高レイノルズ数と乱流の流れのシミュレーションの研究)
審査委員	(主査)教授 森西晃嗣 教授 岡本達幸 教授 西田秀利 教授 村田 滋 准教授 田中 満

論文内容の要旨

本論文は、格子ボルツマン法の長所である手法の単純さを保持しながらその大きな欠点である数値的な不安定性、特に高レイノルズ数流れにおける数値的な不安定性に対する一つの治癒法を提案しその有効性を立証している。コンピュータを用いた流動現象のシミュレーション(Computational Fluid Dynamics, CFD)は、流体の運動を巨視的に記述するナビエ・ストークス方程式に対する様々な数値解法の開発と共に発展してきたが、近年分子の運動を微視的に記述するボルツマン方程式から派生した格子ボルツマン法(Lattice Boltzmann Method, LBM)が提案され、普及し始めている。しかしながら、ナビエ・ストークス方程式に基づく解法と比較して、格子ボルツマン法は、アルゴリズムの単純さが大きな特徴であるが、計算に多くのメモリを必要とする点と高レイノルズ数流れにおける数値的な不安定性が大きな欠点で、その適用範囲が制限されてきた。本論文では、乱流を含む規範的な流れのシミュレーションにおいて、格子ボルツマン法の基礎変数である分布関数に代わって必要最低限のモーメントを用いることにより、手法の単純さを保持しながら必要なメモリ量を削減すると共に、高レイノルズ数流れでの数値的な不安定性を緩和することに成功し、格子ボルツマン法の新たな展開を提示している。

論文は5章からなり、第1章は序論で、CFDの歴史から格子ボルツマン法誕生の経緯、その長所と短所やこれまでの研究動向を網羅し、それらを踏まえた本論文の目的を、「格子ボルツマン法のアルゴリズムの単純さを維持しながら高レイノルズ数流れでの数値的な不安定性を緩和する手法の開発」と位置付けている。

第2章は支配方程式の導出で、最初にボルツマン方程式から派生した格子ボルツマン法とその欠点である数値的な不安定性を克服するためにこれまで提案されたエントロピック格子ボルツマン法や多緩和格子ボルツマン法を紹介し、次に必要最低限のモーメントを用いる本手法の導出を記述している。さらに、乱流への適用に際して格子分解能が不足する際にこれまで用いられてきたラージエディシミュレーション(LES)格子ボルツマン法を紹介している。

第3章では本手法の並列計算への適用性を確認している。格子ボルツマン法はアルゴリズム

ムが単純であることから並列計算への適合性に優れている。そこで、分布関数に代わってモーメントを使用する本手法の並列計算への適用性を検証し、本手法が従来の格子ボルツマン法と遜色無く適合性に優れていることを実証している。

第4章は乱流を含む様々な規範的流動現象のシミュレーションにおいて本手法の有効性の検証を行っている。4.1節では、最も規範的な検定問題である2次元正方空洞内流れのシミュレーションにおいて本手法はエントロピック格子ボルツマン法より数値的安定性と信頼性において優れていることを示している。4.2節では、曲面を有する形状への適用性を検証している。格子ボルツマン法のアルゴリズムの単純さはデカルト格子を用いることに起因するが、デカルト格子上で曲面を取り扱うためには何らかの工夫が必要となる。ここでは本手法がモーメントを使用する利点を生かし、仮想流束法と組み合わせることにより曲面形状が容易に取り扱えることを示している。4.3節では流路内の角柱を過ぎる流れのシミュレーションにおいて本手法がエントロピック格子ボルツマン法や多緩和格子ボルツマン法より安定性や信頼性において優れていることを示している。4.4節では2次元一様等方性乱流のシミュレーションを行い、本手法と従来の格子ボルツマン法、および、ナビエ・ストークス方程式に基づく手法の中でも最も信頼性の高い手法の一つである擬スペクトル法との結果の比較を行い、本手法が従来の格子ボルツマン法よりも安定性に優れ、また、信頼性の点で擬スペクトル法と遜色が無いことを示している。4.5節では3次元一様等方性乱流のシミュレーションを行い、流れ場に対して格子分解能が十分有る場合は本手法の結果は信頼性の高い擬スペクトル法を用いた直性シミュレーション結果を再現し、流れ場に対して格子分解能が不足している場合はラージエディーションシミュレーション法と同様の結果を自然に再現することが示されている。この結果を踏まえて4.6節では円柱を過ぎる高レイノルズ数流れに対して本手法とラージエディーションシミュレーション法との結果の比較が示されている。

最後に、第5章は結論で、分布関数に代わって必要最低限のモーメントを用いる本手法により、従来の格子ボルツマン法の長所であるアルゴリズムの単純さを保持しながら必要なメモリ量の削減と高レイノルズ数流れにおける数値的な不安定性の緩和に成功した結論している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、格子ボルツマン法の長所である手法の単純さを保持しながらその大きな欠点である数値的な不安定性、特に高レイノルズ数流れにおける数値的な不安定性に対する一つの治癒法を提案し、その有効性を立証している点に学術的価値が認められる。コンピュータを用いた流動現象のシミュレーション (Computational Fluid Dynamics, CFD) は、流体の運動を巨視的に記述するナビエ・ストークス方程式に対する様々な数値解法の開発と共に発展してきたが、近年微視的に記述するボルツマン方程式から派生した格子ボルツマン法 (Lattice Boltzmann Method, LBM) が提案され、普及し始めている。しかしながら、ナビエ・ストークス方程式に基づく解法と比較して、格子ボルツマン法は、アルゴリズムの単純さが大きな特徴であるが、計算に多くのメモリを必要とする点と高レイノルズ数流れにおける数値的な不安定性が大きな欠点で、その適用範囲が制限されてきた。本論文は、乱流を含む規範的な流れのシミュレーションにおいて、格子ボルツマン法の基礎変数である分布関数に代わって必要最低限のモーメントを用いることにより、手法の単純さを保持しながら必要なメモリ量を削減すると共に、高レイノルズ数流れでの数値的な不安定性の緩和に成功しており、この分野の学術の進展に大きく

寄与すると判断される。また、モーメントを用いる手法は、物理現象との対応がより明確に成り、様々な現象に対する格子ボルツマン法の適用に道を開くことが期待できる。

本論文は、査読制度を有する学術雑誌に掲載された下記に示す2編の学術論文（1，2）と査読制度を有する国際会議論文（3）および学会発表論文（4）を基に構成されている。

1. M. Izham, T. Fukui, K. Morinishi, Application of Regularized Lattice Boltzmann Method for Incompressible Flow Simulation at High Reynolds Number and Flow with Curved Boundary, Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 6, No. 6, pp. 812-822 (2011).

2. M. Izham, T. Fukui, K. Morinishi, Simulation of three-dimensional homogeneous isotropic turbulence using the moment-based lattice Boltzmann method and LES-lattice Boltzmann method, Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 9, No. 4, pp.1-13 (2014).

3. M. Izham, T. Fukui, K. Morinishi,, A Comparative Study of Regularized Lattice Boltzmann Method and Entropic Lattice Boltzmann Method for High Reynolds Number Flows, ASCHT11, Paper ID091, pp. 1-7 (2011).

4. M. Izham, T. Fukui, K. Morinishi,, Regularized Lattice Boltzmann Method with Virtual Flux Method for Incompressible Flow Simulations, 24th CFD Symposium, E6-4, pp. 1-6 (2010).