

Title	格子ボルツマン法に基づく概念を利用した熱流動解析 アルゴリズムの研究開発
Author(s)	中村, 和彦
Citation	
Issue Date	1998-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/1132
Rights	
Description	Supervisor:松澤 照男, 情報科学研究科, 修士

格子ボルツマン法に基づく概念を利用した熱流動 解析アルゴリズムの研究開発

中村和彦

北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

1998 年 2 月 13 日

キーワード: 格子ボルツマン法, エネルギーのボルツマン分布, 自然対流, 境界条件.

1 背景と目的

現在、数値流体解析では、差分法、有限要素法等、流れを表すナビエ・ストークス (NS) 方程式から導出し、離散化する方法が主流である。

一方、流れを微視的立場から観る方法として粒子法がある。従来の差分法等では実現が難しい現象 (水と油のような非混在二相流、多孔質内流れ等) が表現できる可能性があるとして、注目されている。仮想の粒子を用いて、粒子の移動、衝突で流れを表現するのだが、どの粒子どうしが衝突したか等の判定に時間がかかる。

そのような点を克服している方法が、格子ガスオートマトン法 (LGA) である。粒子の運動の制限し、粒子は格子上を動き、1 ステップごとに必ず衝突する。このため、各粒子の衝突判定が不用となる。計算は単純 (ブール演算) であるが、流れの物理量の算出に空間平均をとるため、精度を高めようとすると、計算格子が他の方法以上に必要になる。

この計算格子の増大を抑え、計算規則を実数演算とした方法が、格子ボルツマン法 (LBM) である。これは、格子を構成し、ノード上でそれぞれの速度ベクトルを持つ粒子の分布確率から流れを解析する方法である。微視的立場で粒子の運動を表すボルツマン方程式に基づき、さらに、この方程式の離散式から、流体の基礎方程式を近似することができる。

また、LBM でも、ある程度微視的に粒子の振舞いをとらえることができるため、従来の差分法等では実現が難しい現象が表現できる可能性という粒子法の特徴があり、そのような試みもいくつか報告されている。

LBM は近年考案された手法であり、理論が整備されてきたのも、最近のことである。熱流動現象の具体的な数値計算を扱った論文もまだ少ない。特に、外力 (重力) が存在する体系での熱流動は、扱っていない。

そこで、熱を伴う流れを扱えるような格子ボルツマン法について検討し、さらに、外力の効果を入れ、熱と流動が強く連成する自然対流現象をシミュレートすることを本研究の目的とする。

2 方法

格子ボルツマン法で粒子の状態として、25種類ある体系で熱流動を扱うことにした。平衡分布関数としては、ボルツマン方程式の平衡解であるマクスウェル・ボルツマン分布を考え、速度 u について3次オーダーまでテイラー展開した式を仮定した。

質量、運動量、エネルギー保存則をほぼ完全に満たすために、以上2点のような条件でスキームを構成している。その際、ニュートン流体、非圧縮性、理想気体等の条件を課している。

本研究での格子ボルツマン法でNS方程式に近似するため、チャプマン-エンスコグ展開を使う手法で平衡分布関数の未定係数の関係式を得る。しかし、関係式の数が、係数の数よりも少ないため、平衡分布関数は任意性をもってしまう。そこで、エネルギーのボルツマン分布に近づくよう数値計画法を行なうことで、物理量に対して一意に平衡分布関数が求められるようにした。

また、外力に関しては、発表されている外力を含んだLBMの式を、若干変更することで、数値的に安定したシミュレーションを行なえるようにした。

境界条件では、ノード上境界、ノード間境界の2種類について断熱等の条件を実装した。

3 結果

以下、本研究で得られた結果を示す。

1. エネルギーのボルツマン分布を考慮に入れることにより、粒子の状態数25種類でも、NS方程式を満たし、物理的に適切な粒子分布（高温になると、エネルギーの高い粒子の分布が増える）をとるような平衡分布関数を得ることができた。
2. 格子ボルツマン法における外力の扱いを若干変更することにより、計算過程で負の粒子分布をとることを抑え、数値的に安定させた。また、重力場での熱流体（自然対流）の振舞いを、おおよそシミュレートすることができた。
3. 境界条件の扱いに関して、ノード上に境界、ノード間に境界が位置するそれぞれの場合で、クエット流の体系を試みた。ノード間境界での計算の方が、解析解（熱分布）との誤差が少ないという結果が得られた。

4 今後の課題

具体的な数値計算を行なうためには、境界条件の実装方法は、スキームと同等に重要であると考えられる。本研究で行なった計算では、境界付近の流体の振舞いが、差分法等の解析結果と異なっている。特に断熱の条件を課した境界においてである。熱流動の LBM で、境界条件に対する詳細な解析を検討する必要があるようだ。

また、本研究では扱えなかったが、高 Ra 数の自然対流問題のような条件の厳しい体系を計算するため、LBM における数値安定条件（差分法における CFL 条件）単位時間ステップと単位速度ベクトル長、輸送係数の関係のような、より綿密に体系と合わせるパラメータについても調べる必要がある。