



格子ボルツマンモデルの計算精度向上に関する研究

平石, 雅之

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2009-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲4614

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1004614>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏 名	平石 雅之
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学 位 記 番 号	博い第 4614 号
学位授与の 要 件	学位規則第 5 条第 1 項該当
学位授与の 日 付	平成 21 年 3 月 25 日

【 学位論文題目 】

格子ボルツマンモデルの計算精度向上に関する研究

審 査 委 員

主 査	教 授	薦原	道久
	教 授	中山	昭彦
	教 授	富山	明男
	准教授	片岡	武

差分格子ボルツマン法は、格子ボルツマン法を発展させた、従来の流体の運動方程式を用いない流体の数値計算法である。差分格子ボルツマン法は過去の研究から、流体計算法として有効である事が示されている。また、精度良く音波の計算ができるといった優れた利点も見出されている。

しかし、差分格子ボルツマン法による計算の多くは基礎的な問題にとどまっている。特に乱流場の計算に関しては、まだあまり研究が行われていない。流体の流れのほとんどは乱流であり、工学的問題において乱流場の解析を行う事は今日非常に重要になってきている。特に近年の輸送機関の高速化にともない空力騒音の抑制は重要な課題のひとつとなっており、乱流場における空力音の数値解析は空力騒音の予測及び抑制のための手段として極めて重要であると考えられる。

一方で、現在、騒音抑制のための試みとして、ロケットの打ち上げに伴う噴流に水を噴霧することで騒音を低減できることが確認されており、HII-A ロケット打ち上げにも適用され一定の効果が確認されている。また、新幹線のトンネル出口騒音についてもトンネル出口において水を噴霧することで騒音がおさえられることも確認されている。これらの現象のメカニズムは分かっていないが、水の噴霧による音の減衰を実験的にとらえることは非常に困難である。したがって、メカニズム解明のためには気液二相流と音場を同時に解析可能な数値計算法の開発が必要であると考えられる。従来のナビエ・ストークス方程式系を用いた解法では、これらの複数の現象が複雑に影響し合う流れを定式化し直接計算することは困難である。一方、差分格子ボルツマン法は前述の通り、音波の計算に有効であると同時に、混相流への適用が容易であるという利点がある。

そこで、本研究では格子ボルツマン法および差分格子ボルツマン法の計算手法の向上に関する提案を行い、乱流や二相流と音場を同時に計算可能なモデルの構築を行った。以下にその要点をまとめる。

まず、差分格子ボルツマン法に乱流モデルを導入した差分格子ボルツマン法サブグリッドモデルを提案した。そして 3 次元角柱周りの乱流計算を行い、平均流速や平均変動速度などの乱流統計量の計算結果が実験値とよく一致することを確認した。また 3 次元角柱周りの乱流から発生する空力音についても実験値との定性的な一致が確認できた。(3 章)

次に、プラントル数が一定であるという格子ボルツマン法の問題点を解決するため、プラントル数を任意にとることのできる格子ボルツマンモデルを提案した。内部自由度を有する格子ボルツマンモデルに、熱拡散係数に対応する緩和時間係数を導入し、粘性係数と熱拡散係数の比を任意にとれるよう拡張した。また、サーマルクエット流の計算を行い、計算モデルがプラントル数に応じた温度分布を与えることを示した。(4 章)

さらに、従来ナビエ・ストークス方程式系で用いられている対流流出条件を差分格子ボルツマン法に導入することを提案し、差分格子ボルツマン熱流体モデルにおける流出境

界条件による影響について比較した。その結果、従来用いられてきた一樣流出条件を用いた場合では渦が境界から流出する際に境界と干渉しあい、そこからの圧力変動が音場の予測精度に大きく影響を与えた。一方、流体のマクロ量を用いた対流流出条件を用いた場合では境界で反射することなく渦が流出し、計算領域を極端に小さくした場合にも抗力・揚力係数に与える影響が小さく、音場の予測精度も大きく向上した。(5 章)

また、BGK 方程式の離散化手法としてスペクトル法を導入し、その計算精度について検証を行った。また、2 次元等方性乱流の計算を行い、高精度の離散化スキームを用いることで格子ボルツマン法による乱流計算が可能であることを示した。(6 章)

前述の通り、FDLBM において移流項の差分近似に風上差分などの安定なスキームを用いた場合、その誤差である数値粘性が流れ場の変動成分を大きく減衰させてしまうが、スペクトル法のような離散化手法を用いることで高精度な計算が可能である。しかしながら、スペクトル法は複雑な形状の計算領域を持つ計算には適していない。そこで、より汎用性が高く、空力音の解析に適した差分スキームである Dispersing Relation Preserving スキームを導入した。また、ガウシアンパルスの伝播計算を行い、より高精度なスキームであるコンパクト差分スキームを用いたオイラー方程式の数値解とよく一致することを確認した。さらに、2 次元せん断流の解析を行い乱流場及びそこから生じる空力音について DNS との比較を行った。その結果、差分格子ボルツマン法による結果は DNS による結果とよく一致することを確認した。(7 章)

最後に、混相流への適用が容易であるという差分格子ボルツマン法の強みを生かし、二相流モデルを用いて、液滴と平面音波の干渉に関する 2 次元計算を行った。その結果、剛体による散乱音場は物体を中心に同心円状に分布することが確認できた。一方、液滴による散乱音波は、音波は主に平面波の進行方向へ放射しすることを確認した。これらの違いは液滴の変形により生じていると考えられる。次に、気泡の振動により生じる水中音及び液滴の水面への衝突による水中音の計算を行った。その結果、音速の異なる二相の流体計算が可能であることが確認できた。また、気泡の上昇に伴う振動による水中音及び気液界面で生じる空中音を同時に解析することができた。(8 章)

氏名	平石 雅之		
論文 題目	格子ボルツマンモデルの計算精度向上に関する研究		
審査委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教授	萬原 道久
	副 査	教授	中山 昭彦
	副 査	教授	富山 明男
	副 査	准教授	片岡 武
	副 査		
要 旨			
格子ボルツマン法は、分子に擬した粒子の分布関数の時間発展を解くことにより、連続体としての流体の運動を計算する手法であり、近年複雑流体流れの解析に用いられている。本論文では、格子ボルツマン法とくに差分格子ボルツマン法に対し、乱流モデルの導入、比熱比およびプラントル数を任意に決定できるモデルを導入し、また境界条件の改良および計算手法としてスペクトル法の応用、分散保存スキームの導入、混相モデルおよび気液界面と音波との相互干渉のモデルによるシミュレーションなどを行い、全体として格子ボルツマン法の計算技術についての研究を行ったものである。 第1章は緒論で、研究の背景および目的と論文の構成について述べている。 第2章では格子ボルツマン法および差分格子ボルツマン法の基礎的な事項を述べ、この後の議論の導入としている。 第3章において、差分格子ボルツマン法の乱流モデルである Large Eddy Simulation モデルについての研究を述べている。Navier-Stokes 方程式をベースにした計算で用いられる、サブグリッドモデルを、差分格子ボルツマン法に適用する場合、渦粘性をダイナミック Smagorinsky モデルを適用しマクロな変形速度から見積もり、これを離散化 BGK 方程式の緩和時間を局所的に変えるモデルを提案した。またサブグリッドモデルとしてフィルターをかける操作は、もとの離散化 BGK 方程式の分布関数に対して作用させている。このモデルを用いた角柱周りの3次元計算で、流れの諸量およびエオルス音がよい精度で得られることを示した。特にエオルス音に関して、層流計算では得られない高い周波数の音域まで再現された。 第4章では、比熱比および Prandtl 数を任意に選択できるモデルを提案している。一般に格子ボルツマン法を含む BGK モデルを用いた運動論的スキームにより得られる流れは、運動量拡散と熱拡散が一定の関係を持ち、Prandtl 数を任意に選ぶことが出来ない。これを粒子のもつエネルギーを、マクロな流体の内部エネルギーの部分と運動エネルギーの部分とに分解し、それぞれの緩和時間を別々に選ぶことにより、熱伝導係数を変化させ Prandtl 数を任意に選択できるモデルとした。熱 Couette 流れのシミュレーションにより、さまざまな Prandtl 数に対する計算結果から、モデルの妥当性を示した。 第5章では無限に広い領域での外部流れに対する、有限の距離にある外部境界における境界条件について述べている。一般的に格子ボルツマン法においては、単純な流出境界条件を想定して、分布関数の外挿を行うと流れと逆方向に移動する粒子に対しては、計算が下流か			

氏名	平石 雅之
らの情報が伝わることとなり、計算が不安定となる。こういった境界でもマクロな変数により定義される局所平衡分布関数を与えることとし、外挿法を対流流出条件に基づいて適切にとることにより計算を安定化できるだけでなく、物体下流からの非物理的な反射を抑えることが可能となった。円柱周りの流れから生じるエオルス音のシミュレーションにより、無反射の境界条件が得られることを示し、この手法の妥当性を明らかにした。 第6章では離散化 BGK 方程式をスペクトル法を用いて計算する手法について述べている。用いた手法はガラーキン・スペクトル法であり、3次元方向に三角関数で展開する。非熱流体モデルを用いた場合、局所平衡分布関数の流れの速度に対する次数は2であるので、2次のエリアッシング誤差を取り除き、波数空間での発展方程式を解き、時間ステップごとに物理空間に変換して物理量を求める。ステップ状の流れを計算し、厳密界との比較を行っており、計算の誤差は、格子数の増加に伴いモデルの持つ固有の誤差にきわめて急速に近づくことを示した。またこの手法で2次元等法性乱流の計算を行い、数値粘性の小さい良好な結果が得られることを示した。 第7章は分散性波動の分散性を正しく再現するスキームを、差分格子ボルツマン法に適用する研究について述べている。離散化 BGK 方程式の移流項に Tam らによるスキームを適用している。検証は初期に圧力がガウス分布するパルスの伝播を計算し、4次精度のスキームでより高精度のコンパクトスキームと同等の結果を示している。また2次元せん断乱流の計算では、渦塊の形成距離等良好な結果が得られことを示すとともに、せん断乱流から生じる空力音についても良好な計算結果が得られることを示した。 第8章では気液2相流のモデルについて述べ、気液界面と音波の相互干渉に関するシミュレーション結果を示している。音波が液滴に衝突する際の反射・散乱の2次元の計算例では、個体円柱からの音波の反射に対し、変形する液滴においては反射・散乱波が複雑な様相を呈することを示している。また水中を上昇する気泡が水面に達したときに発生する音波のシミュレーションを行い、空中音、水中音の同時計算が可能であることを示した。液滴の水面との衝突時に発生する水中音についても、液滴半径と水中音の初期波形との関連も明らかにしている。 第9章は結論である。 本論文は格子ボルツマン法における離散化 BGK 方程式を、気液2相流をも含めたさまざまな計算対象に応じて適切に離散化し、かつ外部境界での取り扱い等精度の高い解を得ることを目的とした研究であり、広く新しい計算技術の提案を行ったもので、格子ボルツマン法の適用範囲を広めることに関して重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。 よって、学位申請者の平石雅之は、博士(工学)の学位を得る資格であると認める。	