

審査の結果の要旨

氏名 今村 太郎

修士（工学）今村 太郎 提出の論文は、「Incompressible Flow Simulation using Generalized Interpolation-based Lattice Boltzmann Method（一般座標系格子ボルツマン法による非圧縮流体解析コードの構築）」と題し、本文7章および付録3項から成っている。

航空機や宇宙機の離着陸をはじめとする様々な問題において低速流中における空力特性解明の必要性は高く、そのための非圧縮性流れ数値解析コードの高性能化が望まれている。これまでの数値流体力学では、ナビエ・ストークス方程式を支配方程式とし、それを差分法などによって離散化して解く手法がとられてきた。特に、非圧縮性流れについては圧力に対するポアソン方程式を導き、速度場と交互に解く Marker-And-Cell(MAC)法が代表的手法として用いられている。しかし、解析対象の形状が複雑になると圧力場の収束解を得るために多くの反復計算が必要となり、計算時間が増大する等の問題が指摘されており、より優れた非圧縮性流体解析法の開発が望まれている。近年、気体分子運動論の視点から定式化された手法として、格子ボルツマン法（Lattice Boltzmann Method）が注目されている。これは、流体を有限種類の速度をもつ多数の仮想粒子の集合体と近似し、各粒子の並進と衝突とを粒子の分布関数を用いて逐次計算することで巨視的流れ場をシミュレートするものである。分布関数の時間発展は隣接する格子点の情報から陽的に解かれ、マクロな物理量である速度や圧力は分布関数のモーメントとして算出される。この方法では反復計算や遠方格子点とのデータのやりとりがないため、大型並列計算機に適している。しかし、計算格子が等間隔直交格子等の等方的なものに限られるため、高レイノルズ数流れや複雑物体周り流れなど、実用問題への適用には問題があった。

このような背景から筆者は格子ボルツマン法に着目し、一般座標系への拡張をはじめとする各種計算手法を開発することで、その欠点の克服に成功している。多くの検証問題を解き、結果を詳細に検討することで、ここで改良された格子ボルツマン法が従来のナビエ・ストークス解析に匹敵する精度と計算効率を持つことを示している。本論文は非圧縮性流れ数値解析の高性能化に際し有用な知見をもたらすものである。

第1章は序論で、非圧縮性流体解析法および格子ボルツマン法に関するこれまでの研究を概観し、本論文の目的と意義を明確にしている。

第2章では、従来型の格子ボルツマン法、特に衝突演算に Bhatnagar-Gross-Krook (BGK)衝突モデルを用いた Lattice BGK (LBGK)モデルについて解説している。LBGK モデルが非圧縮性ナビエ・ストークス方程式と等価であることを示すと同時に、計算格子への制約や境界条件の設定法など、その問題点を

指摘している。

第3章では、格子ボルツマン法を任意形状周りの高レイノルズ数流れ問題に適用するための計算手法が提案され、その詳細が述べられている。まず、任意形状に適用させるために一般座標系に拡張された手法として Generalized Interpolation-based Lattice Boltzmann Method(GILBM)の定式化を示し、移流計算における空間精度を二次以上に保つことが数値粘性を押さえる上で重要であると指摘している。壁面上での境界条件としては、Chapman-Enskog 展開を用い、粒子の分布関数について一次の非平衡量までを考慮したモデルを導出し、物体形状表現の精度を向上させている。また、Baldwin-Lomax 乱流モデルを例にとり、乱流解析への適用方法についても説明されている。さらに、定常問題に対し局所時間刻み法を用いて収束までの計算時間を短縮する方法についても、その詳細が述べられている。

第4章では、二次元流れ問題を解くことで、提案する手法の検証を行っている。キャビティ流れや円柱周り流れ等の解析を幅広いレイノルズ数に対して行い、実験結果や他の計算結果との定性的かつ定量的比較から、この計算手法による結果がナビエ・ストークス方程式の差分法による解析と同等の精度を持つことが示されている。また、定常問題に対して局所時間刻み法を導入した計算が行われ、計算時間の大幅な短縮が得られることを実証している。

第5章は、三次元流れ問題における手法の検証であり、キャビティ流れおよび、大迎角デルタ翼周りの流れが解析されている。後者では翼背面の縦渦とその崩壊が捉えられており、提案する手法がこのような複雑な三次元流れ場解析に適用可能であることを示している。

第6章では、提案する計算手法の数値流体力学における位置付けが考察されている。並列計算機を用いた場合、プロセッサ数にほぼ比例して計算速度の向上が得られることから、提案する手法は並列計算機に適していることを明らかにしている。次に、実用問題への適用性を実証するために、超音速旅客機周り低速流れの計算例が示されている。その結果、ここで提案された手法は並列計算機を用いた大規模計算において、精度と計算速度の点で特に優れた手法であると結論づけている。

第7章は結論であり、本研究で得られた知見をまとめている。

付録は3項から成り、三次元計算に用いる15速度(3D-15V)モデルの導出法、三次元計算における内挿関数の定式化、一次の非平衡を考慮した粒子の分布関数の導出法、に関する説明がなされている。

以上要するに、本論文は格子ボルツマン法を一般座標系に拡張し、それに付随した各種計算手法を開発することで、任意形状、高レイノルズ数流れに適用可能で、高い計算精度と並列計算機への適用性をもつ非圧縮性流体解析法の構築を行ったものであり、数値流体力学に新しい知見をもたらすとともに、飛行体周りの低速流れ解析への適用を示した点で、航空宇宙工学上貢献するところが大きい。

よって、本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。