

審査の結果の要旨

氏名 前山 大貴

修士（工学）前山 大貴 提出の論文は、「Unsteady Turbulent Flow Simulations using Lattice Boltzmann Method with Near-wall Modeling (壁面近傍モデリングを用いた格子ボルツマン法による非定常乱流解析手法に関する研究)」と題し、6章からなっている。

現在の航空機空力設計の現場では、Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) 乱流モデルを用いた巡航状態の数値流体力学 (computational fluid dynamics: CFD)解析が主に使用されているが、定常 CFD では航空機の離着陸時などに見られる非定常な境界層剥離や再付着現象が支配的な流れ場を予測することが困難であるため、large-eddy simulation (LES) を用いた航空機空力設計への期待が高まっている。しかしながら、乱流境界層はレイノルズ数依存性の強いマルチスケール現象であり、壁近傍 10%程度の境界層内層域の乱流スケールはレイノルズ数の増加に対して急激に小さくなる。高レイノルズ数壁乱流を LES の計算格子で直接壁面まで解像することは、最先端のスーパーコンピュータを使用しても不可能であるため、境界層内層域の乱流ダイナミクスをモデル化する LES 壁面近傍モデリングが盛んに研究されている。一方、格子ボルツマン法(lattice Boltzmann method: LBM)は気体分子運動論をアナロジーとした CFD の一手法であり、計算アルゴリズムが単純で並列性能が高いことから、航空機の非定常空力設計に向けた LES の一手法として注目されている。しかしながら、LBM の計算アルゴリズムは直交格子法に基づいているため、高レイノルズ数壁乱流の解析に不可欠な壁面近傍モデリングの適用に課題がある。既往研究では、壁面境界が直交格子の格子線に沿ったチャンネル乱流でのみ厳密な検証が実施されているが、格子線と壁面境界が一致しない物体非適合格子上における乱流境界層のプロファイルの再現性に関して示された研究例はない。従って複雑形状周りの解析例は存在するものの、基礎的な流れ場の検証が十分になされているとは言い難い。

本研究の目的は、階層型直交格子法を用いた LBM により任意形状周りの高レイノルズ数 LES を実現するため、物体非適合直交格子上で高レイノルズ数乱流境界層のプロファイルを高精度に再現可能な、LES 壁面近傍モデリングを開発することである。基礎的な乱流場の検証問題としてチャンネル流れ、応用問題として直列二円柱周りおよび航空機高揚力装置周りの低マッハ数流れ場解析を実施し、非定常外部流れに対する提案手法の有効性を明らかにする。

第1章では、LES と LBM の既往研究について研究動向を説明し、研究背景を整理するとともに、本論文の目的を述べている。

第2章では、研究のベースとなる階層型直交格子法を用いた LBM ソルバーと、本論文で開発した LES 壁面近傍モデリングについて、その計算アルゴリズムの詳細を解説している。Malaspinas らによって提案されている分布関数の再構築に基づく LES 壁面近傍モデリングをベースに、物体非適合直交格子上でも適用可能な拡張方法について説明している。具体的には、1) 壁関数を駆動するためのイメージポイントを導入、2) 計算格子で解像されるレイノルズせん断応力成分を考慮した RANS 渦粘性と sub-grid scale 渦粘性のブレンドング手法、3) 壁面近傍における急峻な速度勾配を直交格子上でモデル化するために速度と渦粘性のプロファイルを修正、といった手続きを導入している。

第3章では、開発手法を用いてチャンネル乱流の解析を行い、詳細な検証を実施している。直交格子の格子線と壁面境界が一致しない物体非適合格子上においても、乱流境界層のプロファイルが再現可能であることを示しており、より複雑な形状周りの高レイノルズ数流れ場解析に向けた基礎を確立している。

第4章および5章では、BANC (Workshop on Benchmark Problems for Airframe Noise Computations) ワークショップの課題である直列二円柱周りおよび 30P30N 高揚力装置翼型周りの低マッハ数流れ場解析を行っている。ワークショップを通じて公開されている風洞試験データとの比較を通じ、開発手法の実用性を示している。

第6章は結論であり、本研究の成果をまとめ、今後の課題を述べている。

以上要するに、従来困難とされてきた物体非適合直交格子を用いた高レイノルズ数乱流境界層の高精度な解析を可能とする LBM の壁面近傍モデリング手法を提案しており、流体力学分野及び航空宇宙工学に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。