

博士論文（要約）

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）

前山 大貴

¹Large-eddy simulation (LES) を用いた航空機空力設計への期待が、近年高まっている。LES は支配的なエネルギー保有域の大規模乱流渦を計算格子と数値計算スキームで直接解像し、保有エネルギーが小さく普遍的な小スケールの乱流のみをモデル化する数値流体力学 (computational fluid dynamics: CFD) の手法であるが、LES を用いた航空機空力設計の実現に向けての大きな課題が、高レイノルズ数壁乱流の計算コストである。航空機の空力設計では、主翼コード長ベースで 10 の 7 乗から 10 の 8 乗にもなる高レイノルズ数条件での空力予測が必要であるため、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定常 CFD が主に使用されている。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フライトエンベロープ境界付近の流れ場を予測することが困難であるため、LES を用いた非定常空力解析によってより高精度な航空機の空力設計が実現できると期待される。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、Navier-Stokes 方程式を離散化する数値計算スキームに対して盛んに研究されている。

近年、格子ボルツマン法 (lattice Boltzmann method: LBM) に基づく LES 壁面近傍モデリングに関する研究が報告されている。LBM は気体分子運動論をアナロジーとした低マッハ数流れに対する CFD の手法であり、計算アルゴリズムが単純で大規模並列計算で高い並列性能を示すことから、航空機の非定常空力設計に向けた LES ツールとしても注目される。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解析に不可欠な LES 壁面近傍モデリングの適用に課題が残されている。LBM の LES 壁面近傍モデリングに関する既往研究では、直交格子の格子線が壁面境界に沿った物体適合格子が仮定されており、またその厳密な検証は物体適合格子を用いたチャンネル乱流でのみ実施されていた。直交格子法で任意形状を扱う際には格子線と壁面境界が一致しない物体非適合のケースが必ず生じるが、そのような物体非適合格子上で壁面近傍モデリングを用いた場合に乱流境界層のプロファイルが再現できるかに関して、既往研究では明らかにされていなかった。

本論文では、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壁乱流の高精度な解析が可能な LBM の LES 壁面近傍モデリングを開発する。開発手法を用いてチャンネル乱流の解析を行い、物体非適合格子上でも乱流境界層のプロファイルが高精度に再現可能であることを示す。また、直列二円柱周り及び航空機高揚力装置翼型周りの非定常外部乱流解析へと開発手

¹ 全文 PDF については 5 年以内(2026 年 3 月まで)に公開予定

法を応用することで、剥離を伴う任意形状周りの解析に対しても、本開発手法が適用可能であることを示す。

第1章では、研究背景を整理するとともに、本論文の目的を述べる。LES 壁面近傍モデリングに関する既往研究は、物体適合格子を用いた Navier-Stokes 方程式の離散化解法に対するものが主流であり、物体非適合格子を用いた LBM の LES 壁面近傍モデリングには直接応用できず、課題が残されていることを述べる。

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（前半）と、本論文で開発した LES 壁面近傍モデリング（後半）について、その計算アルゴリズムの詳細を解説する。本章前半では、セルベースで細分化する階層型直交格子法と、LBM の基礎方程式である格子ボルツマン方程式 (lattice Boltzmann equation: LBE) について説明する。また階層型直交格子のセルサイズが切り替わる境界面における LBE の計算方法及び、階層型直交格子を用いた LBE の計算アルゴリズムに適した MPI 領域分割方法についても解説する。本章後半では、本研究で新たに開発した LBM の LES 壁面近傍モデリングについて解説する。既往研究で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物体非適合直交格子上で適用できるように、壁関数を駆動するためのイメージポイント(IP)を導入する。また、物体非適合格子上でも壁面までの距離に応じて適切に乱流渦粘性を設定できるように、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 SGS (sub-grid scale) 渦粘性のブレンディング手法を提案する。最後に、壁面近傍における急峻な接線方向速度勾配を直交格子上でモデル化するため、速度と渦粘性のプロファイルを修正する手法を導入する。

第3章では、開発手法を用いてチャネル乱流の解析を行い、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す。主流方向とスパン方向に周期境界条件を課したチャネル乱流の解析を実施し、主流方向平均速度プロファイル及び Reynolds 応力の各成分（せん断応力、垂直応力）について、格子線と壁面境界のなす角度によらず計算結果が DNS (direct numerical simulation) の結果を良好に再現できることを実証する。また、壁面近傍モデリングによって計算される摩擦係数が、経験式から求まる値と良好に一致し、壁面近傍モデリングが正しく駆動されていることを示す。開発手法では乱流境界層内層域を適切にモデリングするために二つのパラメータが導入されているが、それらのパラメータの解析結果に対する感度及び値の設定方法についても本チャネル乱流の解析中で調査する。

第4章では、開発手法を用いて直列二円柱周りの流れ場解析を行い、剥離を伴う外部流れ場に対しても開発手法が応用可能であることを示す。本問題設定は、航空機の脚から発生する空力騒音を予測するためのベンチマーク問題として実施されたものであり、乱流境界層の発達、剥離及び再付着を含むため、任意形状周りの壁面近傍モデリング手法の検証として適している。また、異なる二つの風洞で実施された実験計測値が存在することから、解析結果の定量的な比較が可能である。階層型直交格子を用いた直列二円柱周りの大規模 LES を

実施し、円柱表面の圧力係数分布や、表面圧力のパワースペクトル密度 (power spectral density: PSD) に関して、計算結果が実験計測値を定量的に予測できていることを示す。

第5章では、開発手法を用いて 30P30N 高揚力装置翼型周りの流れ場解析を行い、航空機空力設計への適用性及び近傍場騒音の予測精度について検証する。30P30N は前章で解析を実施した直列二円柱よりも複雑かつ実際の航空機に即した形状をもつため、開発手法で航空機複雑形状周りの LES 解析が可能であることを実証する。また近傍場騒音(表面圧力 PSD) の計算結果を実験計測値と比較することで、開発手法を航空機の空力・空力音響解析へ応用する際の有効性及び将来的な課題の抽出を行う。

第6章では、結論と今後の課題を述べる。