

審査の結果の要旨

氏名 小林 克年

本論文は「壁面モデルを適用した乱流 LES の構築とその実用性の評価」と題し、7章より成っている。

まず、第1章において乱流数値予測の研究状況を概観し、特に、ラージ・エディ・シミュレーション(LES)法が汎用性の高い数値予測法として期待されるが、高レイノルズ数流れの予測に膨大な計算負荷を要することが工学応用の重大な障害であることを示して、壁面モデルの導入によってその解決を図るという本研究の目的が提示される。

第2章では、LES 法および壁面境界条件のモデル化について従来研究を概観して各手法の定式化とその特徴、欠点等についての比較評価が述べられる。滑り無し境界条件(No-Slip)の LES で壁乱流を数値解析した場合には乱流境界層の内層領域(粘性底層, 緩和層, 対数則領域)に全体の約 50%の格子を集中する必要があるが、これは実用上過大な計算負荷となる。そこで、内層領域を直接計算することを放棄しても高い予測精度を保つため壁面境界条件として必要な壁面剪断応力, 壁面熱流束, 壁面温度を壁面モデルから算出する手法の必要性が指摘される。その結果として、壁面近似には代数式型モデルとして Spalding 則と森西の方法を、微分方程式型モデルとして 0 方程式モデルと Cabot の方法が基本的手法として採用した。また、温度境界条件にも同様の考察の元に代数式型モデルと微分式型モデルを定式化した。これらの壁面モデルを導入した LES 法について、以下では 5 種の異なる乱流場に対して数値検証の実施結果を報告している。

第3章では、圧力勾配の効果が無視できる最も単純な壁乱流として 2 次元平行流の代表例である平行平板間乱流, 円管内乱流を取り上げた。この例では、代数式型モデルと微分式型モデルの間に予測結果の有意な違いはなく平均速度を高精度で予測できることが示された。また、従来の No-slip 条件に比して、代数式型モデルで 12,13%, 円管内乱流で 21,25%の計算負荷低減を実証している。

第4章では、逆圧力勾配平板境界層を取り上げる。逆圧力勾配平板境界層では負の圧力勾配が生じるため、平均速度分布が通常対数速度分布と異なり、代数型モデルの計算精度に問題が生じる可能性が懸念されるが、微分方程式型モデルでは圧力項を明示的にもつことでその影響を壁面剪断応力の算出に反映することができるためより一般的と予想される。両者の数値検証結果からは、本解析対象では上記の予測差異は小さく、壁面せん断応力や平均速度分布については実験値をほぼ近似できること、また、2 次の乱流統計量に関してはモデル化の過程から推定されたとおり予測精度は低いことが示された。

第5章では、体積力の働く乱流場の例として旋回乱流が取り上げられる。旋回乱流の壁面近傍では遠心力によって乱れが促進される。この現象を壁面モデルに反映させるため、勾配リチャードソン数を用いた微分方程式型モデルの修正を新たに提案した。まず、静止直円管内旋回乱流の

数値検証結果から、基本モデルは軸方向及び周方向壁面剪断応力の減衰分布を実験値よりも過小評価するのに対して、修正モデルでは勾配リチャードソン数の効果により乱流渦粘性係数が旋回乱流場における過小評価を改善し、実験値の壁面剪断応力を高精度で予測できることを示した。平均速度及び乱流強度、レイノルズ剪断応力の予測精度に関しては両者に予測結果の差異は殆ど見られないことも確認された。また、No-slip 条件が可能な計算に対して計算負荷を21%減少する計算格子では、平均速度場は高精度で予測できているが2次の乱流統計量は予測精度が悪く、計算時間を36%減少させる場合では平均速度場および2次の乱流統計量ともに高精度で予測できることを報告している。旋回成分がない通常の円管内乱流では、勾配リチャードソン数はゼロに漸近し、修正モデルが基本モデルと同様に適用可能であることも確認している。さらに、旋回を伴う工学流れの例として円筒炉内強旋回乱流を取り上げた。レイノルズ数が約 3×10^6 と非常に高いこの対象では現在の計算機環境でNo-SlipのLESで高精度な予測を行うことは不可能であるが、本研究で提案する修正された微分方程式型壁面モデルを適用することで平均速度場および乱流強度をある程度予測できることを実証した。

第6章では、温度場予測を伴う乱流場として円形衝突噴流の熱流動解析を行った。ここでは、速度場と同様に壁近傍において温度境界層方程式を解き、温度の境界条件として必要な壁面熱流束および壁面温度を算出する微分式型壁面温度モデルを考案した。数値検証の結果から、速度場に関しては代数式型モデルと微分方程式型モデルの間に予測精度の差異は殆どないが、代数式型モデルで適用される温度の対数分布則はよどみ点領域において不適切であるため熱伝達係数を過小評価するのに対して、微分方程式型モデルがより良い精度で実験値を予測することが実証された。

第7章では、上記の数値検証から、本研究で提案した微分方程式型壁面モデルがLESの計算負荷を低減しつつ高精度の数値予測を可能とする有効な手段であると結論付けるとともに、複雑な乱流場では境界層方程式中の乱流渦粘性係数のモデル化に適切な修正が有効であること、2次の乱流統計量の予測に関しては更なる検討が必要であること、などを指摘している。

以上の研究成果を審査するに、乱流LES法において近年注目されていたが予測精度や計算手法などの確定していなかった壁面モデルの導入に関して、豊富な数値検証を示し、また、精度改良の有力な修正法を提案したことで、その実用性を実証した価値は大きい。さらに、並列計算を駆使して高レイノルズ数流れや温度場を伴う熱流動解析の実例を示すなど、LES実用化へ向けての工学的寄与も評価できる。

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。