

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 海保 真行

本論文は論文題目「四面体有限要素を用いた並列 LES 解析の実用化に関する研究」と題して、産業界における実機レベルの解析のニーズの高まりに対応した実用的な非定常乱流解析技術の構築を目的とし、四面体非構造格子を用いたメッシュ生成方法、解析アルゴリズム、並列化方法を含んだ実用性の高い LES (Large Eddy Simulation) 技術の提案をしている。すなわち、複雑な流路形状に対応可能な高速・高品質な四面体メッシュ生成方法の開発、ナビエ・ストークス方程式の安定で高精度な解析アルゴリズムの提案、解析アルゴリズムに対応した高効率な並列化手法の開発、及び、提案した LES 技術の基礎的問題・実用問題における検証を主たる内容としている。従来から LES の研究は盛んに行われているが、差分法や六面体メッシュによるものが多く、複雑な流路に対してメッシュ生成に非常に時間がかかるという問題点があった。また、四面体メッシュを用いた解析についても、安定な解析の困難さから定常乱流解析に留まる研究が多い。本論文の研究は、全自動メッシュ生成が可能な四面体メッシュの有効性に着目し、四面体メッシュを用いた LES の安定化・実用化について検討したものである。特に、本論文では、円柱周りの流れ・円管サーモサイフォン・立方キャビティ内自然対流などの基礎的な検証問題に対する精度検証に加え、タービン発電機の冷却流路内の流れ・パンタグラフ周りの流れなど、実用問題における精度検証を行い、提案した LES 解析手法が、産業上幅広い応用分野が考えられる圧力損失予測・非定常流体力予測・乱流熱伝達予測に対して、有効に適用できる見通しを得ている。

第1章では、研究の動機・背景・目的、従来の研究、及び、論文の構成が述べられている。ここで申請者は、従来の LES や四面体メッシュを用いた解析などに関する多くの研究活動の成果をまとめることにより、非定常乱流解析の産業界での適用を進めるには、Turn Around Time が短く安定な解析を実現できる実用的な LES 技術を構築する必要があることを述べている。

第2章では、安定で高精度な非定常乱流解析を実現するための、ナビエ・ストークス方程式の解析アルゴリズム及び LES 解析手法を提案している。特に、非構造格子特有の解析の不安定性を除去するために、FS (Fractional Step) 法に準拠し SIMPLER (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations Revised) 法に類似の2段階の速度・圧力補正を行い、Crank-Nicholson 法と BTD (Balancing Tensor Diffusivity) 項を導入した解析アルゴリズムを提案するとともに、壁面近傍のメッシュ解像度不足に起因するスマゴリンスキーモデルがもつ問題点に対する実用的な解決策を試行している。

第3章では、高精度な解析を実現するための四面体メッシュ全自動生成手法、及び、その高品質化手法が述べられている。壁面の三角形メッシュを壁面の法線方向にスウィープして生成する層状メ

ツシュとそれ以外の領域の不規則メッシュを接続する層状-不規則結合メッシュを全自動で生成するジェネレータを開発するとともに、その高品質化のためラプラススムージングによる方法と要素アスペクト比を直接改善する方法を組み合わせた手法を開発している。高品質化の効果は 90 度ベンド流れ解析を例題に検証されている。

第 4 章では、解析時間短縮のための高効率な並列化手法が述べられている。第 2 章で提案された解析アルゴリズムに対応し、陽解法部分と陰解法部分とに異なる並列化を施し、その間にデータ構造変換を行うというハイブリッドな並列化手法を開発し、日立製並列計算機 SR2201 の 32CPU を用いて約 80% の高い並列化効率を実現している。

第 5 章では、等温場の解析結果について述べている。基礎的検証問題としては、円柱周りのレイノルズ数が 10,000 の流れを解析している。生成パラメタが異なる 4 種類のメッシュを用いて、速度場、圧力場、速度変動、流体力変動などについて検証を行うとともに、境界層厚さを見積もるための指標として、滑らかな平板に沿った乱流境界層厚さの実験式を採用し、メッシュ生成パラメタと境界層厚さ、解析精度との関連についての結論を導いている。実用的検証問題としては、タービン発電機のロータ冷却流路の圧力損失予測、パンタグラフの非定常流体力予測を取り上げ、解析精度の検証を行うとともに、上記メッシュ生成パラメタについての結論との関連について説明している。また、複雑な流路形状であるパンタグラフの問題において、従来の六面体メッシュを使用した解析とメッシュ生成時間、解析時間などの比較を行い、本解析手法の実用性の高いことを確かめている。

第 6 章では、非等温場の解析結果について述べている。基礎的検証問題として、円管サーモサイフォンと立方キャビティ内自然対流を取り上げ、熱伝達率についての解析精度の検証を行っている。実用的検証問題としては、回転電機の冷却などでしばしば問題となる回転閉塞空間内の高レイリ数熱伝達予測を取り上げ、解析精度の検証を行っている。その中で、境界層厚さを見積もるための指標として、垂直平板の自然対流熱伝達の実験式を採用し、等温場と同様、その指標が有効であることを説明している。

第 7 章においては全体の結論及び今後に残された課題が述べられている。

以上を要約すると、実用的な LES 技術の構築という面からみて、本研究において提案された四面体非構造格子による LES 解析手法は、メッシュ生成手法、解析精度、TAT など様々な面において、実用性の高い手法である。さらに、精度検討の内容についても、圧力損失予測、非定常流体力予測、乱流熱伝達予測という、産業上非常に幅広い応用が考えられるものを対象としており、提案された LES 解析手法は、産業上重要な技術となることが期待される。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格であると認められる。