

低速ファンの翼周りにおけるはく離渦流れ場および音響場の数値解析に関する研究

草野, 和也

<https://hdl.handle.net/2324/1441226>

出版情報：九州大学, 2013, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：やむを得ない事由により本文ファイル非公開（3）

氏 名 : 草野 和也

論文題名 : 低速ファンの翼周りにおけるはく離渦流れ場および音響場の数値解析に関する研究

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

低速ファンは空調機をはじめ家電製品, IT 機器などに組み込まれ, 広く使用されている. 低速ファンの空力性能は, その基本要素である翼周りの流れに左右されるが, そのレイノルズ数は 10^5 程度であることから, 大規模な層流はく離や乱流遷移, 再付着などの複雑な現象が生じる. さらに, 実際の三次元翼では翼端渦などの大規模な縦渦構造も存在し, 翼まわりの流れ場は複雑なはく離渦流れ場を呈する. その空力性能の向上のためには, その翼周りの複雑なはく離渦流れ場の理解が必要不可欠である. また, 近年では環境への意識の高まりや製品の差別化の観点から, 空力騒音の低減化も重要な課題となっている. 実験計測のみにより, 低速ファンの翼周りの複雑なはく離渦流れ場を把握すること, さらには空力騒音を引き起こす非定常流れ現象を解明することは困難であり, CFD (Computational Fluid Dynamics) による数値解析への期待が大きい. 本論文は, 低速ファンの翼周りのはく離渦流れ場および音響場の数値解析に関する研究についてまとめたものであり, 全 6 章から成る.

第 1 章では, 本研究の背景を述べるとともに, 本研究で取り組む 3 つの課題について述べた.

第 2 章では, 数値解析手法の概要を述べた. まず, 第 3 章で用いた三次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式を支配方程式とした DES (Detached Eddy Simulation) についてその概要を説明した. 次に, 将来の大規模並列計算機を用いたターボ機械における乱流の DNS (Direct Numerical Simulation) および空力音の直接計算の実現を目標に, 大規模な並列計算に適した格子ボルツマン法 (Lattice Boltzmann Method : LBM) に基づく計算手法を提案した. マルチスケールモデルおよび Building-Cube Method に基づき, LBM 本来の単純なアルゴリズム構造を保ちつつ, プロペラファンのような複雑形状まわりの流れ場に対して容易に適用可能な計算手法を構築した. また, 高レイノルズ数流れの計算における数値不安定性を抑制するためにフィルター操作を導入した. 第 2 章の最後には, 可視化処理の方法として, 渦構造の同定法について概要を述べた.

第 3 章では, エアコンの室外機に組み込まれる半開放形プロペラファンを取り上げ, 半開放形プロペラファンの流れ場を支配する翼端渦について詳細な三次元流れ構造を明らかにすることを目的として, DES 解析の結果を示した. さらに, 計算結果に対して翼端渦の詳細な可視化を行い, 以下の知見を明らかにした. 翼端渦は, 開放領域では主流に沿って移流するが, シュラウド面下ではシュラウド面との干渉の結果, その軌跡は周方向 (隣接翼の方向) に転向する. プロペラファンの動翼下流においては, シュラウドが存在しない上に, 流れは旋回速度成分をもち, その旋回成分は流量の低下とともに増加することから, 低流量作動点では大きな旋回成分に伴う遠心力的作用により動翼下流の流れは半径外向きに大きく傾く. その結果, 流量の低下とともに, 翼端渦がシュラウド面に近づき, シュラウド面下における翼端渦の周方向への転向がより大きくなる. すなわち, 翼端

渦の周方向への転向は動翼下流の半径外向き流れに支配されていることが明らかになった。また、巻き上がり直後の翼端渦はウェークタイプの渦軸方向速度分布を示すが、それより下流側では、翼端渦の急速な成長に伴う流れ方向の大きな順圧力勾配に起因して、渦中心に最大速度をもつジェットタイプの渦軸方向速度分布が形成されることが示された。このことは翼端渦が軸方向を向いていれば、翼端渦によるブロック効果小さくなり、翼先端部での流量低下を抑制できることを示唆している。以上の知見は、シュラウドの形状および軸方向長さ、その軸方向位置などにより動翼出口流れを制御することで動翼下流の半径外向き流れを抑制できれば、ファン性能を向上できる可能性があることを示している。

第4章では、次世代の大規模並列計算機へ適合したCFDコードを開発し、将来的に低速ファンにおける乱流のDNSや空力音の直接計算などの大規模計算の実現を可能にすることを目標に、LBMに基づく計算手法を構築し、レイノルズ数 10^5 程度の翼周りの流れ場に対する計算手法の有効性を検証した。LBMの適用範囲は、これまでレイノルズ数が非常に小さい流れ場に限定されており、レイノルズ数 10^5 程度の低速ファンへ適用した例は極めて少ない。まず、レイノルズ数が 1.0×10^5 のNACA0018翼まわりのはく離遷移流れに対してDNSを実施し、翼面上の圧力分布および速度プロファイルについて実験結果と比較して、良い一致が得られることを示した。さらに、プロペラファンまわりの三次元渦流れのDNSを実施し、計算結果を羽根車後方の時間平均速度分布および乱れ度分布の計測結果、さらに高応答圧力センサーによる翼面上の圧力変動の計測結果と比較した。本計算はDNSとしては格子解像度が不足しているものの、プロペラファンまわりの複雑なはく離渦流れ場について実験結果と比較して良好な結果が得られていることが確認でき、本計算手法の低速ファンへの適用可能性が示された。

第5章では、低速ファンから発生する乱流音の高精度な予測の実現を目指して、低マッハ数の流れ場から発生する空力音の直接計算に対するLBMの適用性を検証した。レイノルズ数が 1.0×10^5 の単独翼から発生する離散周波数音の計算を行い、ピーク周波数がLBMにより予測できることを実験結果と比較して示した。また、離散周波数音の周波数および音圧レベルともに、非熱流体モデルおよび熱流体モデルの計算結果に有意な差は認められず、エネルギーの保存を考慮しない非熱流体モデルであっても空力音の直接計算が可能であることを示すとともに、非熱流体LBMは熱流体LBMおよびNavier-Stokes方程式の差分法に対して計算速度において優位性があることを示した。最後に、レイノルズ数が 2.0×10^5 のNACA0012翼から発生する乱流音の広帯域スペクトルの定量的予測を試みた。計算結果を実験結果と比較することにより、翼まわりのはく離遷移流れが再現できていることを確認し、さらに、乱流音の広帯域スペクトルが本計算手法により高精度に予測できることを示した。

第6章は結言であり、本論文を総括している。