

[別紙 2]

審査の結果の要旨(案)

論文提出者氏名 長田 光広

本論文は、流線曲率を伴う壁面剪断乱流の輸送機構に関する研究と題し、7章より成っている。

近年、環境調和性の高い多様な分散エネルギーシステムの構築の観点から、そのコアテクノロジーのひとつとして数十～数百kWのマイクロガスタービンが注目を集めている。小型のラジアル圧縮機、タービン内の乱流場は、レイノルズ数は比較的低いものの、強い曲率の影響を受けるが、そのような乱流に関する基礎知識や数値予測手法は未だ十分ではない。したがって、流線曲率を有する壁面剪断乱流において、輸送現象を支配する物理機構の解明、および、その高精度な予測手法の開発は、マイクロガスタービンをはじめとする小型の回転機の性能向上の観点から重要な工学的課題である。本論文は、乱流の直接数値シミュレーション (DNS) を用いて曲がりチャンネル乱流の数値実験を行い、曲率半径を系統的に変化させた場合の凸面、凹面での乱流統計量のデータベース構築、乱流構造の可視化と統計解析、そしてラージエディシミュレーション (LES) による乱流場の予測精度の向上を目標とした流線曲率の影響を含めたSGSモデルの導出と検証を行ったものである。

第一章は序論であり、マイクロガスタービンを中心とする分散エネルギーシステムを出発点として、圧縮機、タービンの熱流動を支配する要因について議論し、性能向上には数値流体力学 (CFD) を用いた設計が必要であると述べている。特に、従来行われていた、 $k-\epsilon$ モデルなどの1点完結型乱流モデルだけではなく、大規模な剥離を伴う流れに対しても高精度予測が可能なLESの役割が重要になると述べている。そして、熱流動の支配要因として流線曲率が乱流場に与える影響の重要性を指摘し、現在までに行われてきた、平均流、乱流統計量、テーラー・ゲルトラー渦に関する実験的、数値的研究について概観している。そして、高次の統計量や遠心力に起因する乱れの生成・消滅機構が明らかでないこと、曲率の変化に対する系統的な理解が不十分であること、曲率の影響を取り入れたLESモデルの開発が必要であることを指摘している。

第二章では、本論文で計算対象とする、流線曲率を持つ乱流場として曲がりチャンネル乱流の数値解析法について述べている。従来、様々な乱流場のDNSで用いられてきた空間離散化手法、時間離散化手法について概観し、計算時間の増大を抑制しながら安定に計算を進め、かつ、数値誤差を最小にする観点から、一般座標系における2次精度差分法および4段階フラクショナルステップ法を用いたと述べている。また、速度場、温度場の支配方程式、一般座標系を用いたNavier-Stokes方程式への座標変換、空間・時間離散化手法について詳細に述べている。

第三章では、曲がりチャンネル乱流のDNSにおいて、チャンネル半幅を曲率半径で除した無次元曲率を0.013, 0.05, 0.1, 0.2と系統的に変化させ、乱流統計量、乱流構造、レイノルズ応力生成イベ

ントに対する曲率の影響を中心に述べている。曲率の弱い場合については、凸面側で壁近傍の渦構造の抑制、凹面側で逆に促進が発生し、曲率の強い場合には、凸面側で渦構造がほぼ消滅する一方、凹面側で流れ方向に軸を持つ大規模渦が発生すると述べている。乱流強度については、チャンネル中央近傍で半径方向成分が曲率の増大に伴い増加することが大きな特徴であり、特に、無次元曲率が 0.05 を越えると、半径方向成分が主流方向成分を上回る特異な現象が生じることを明らかにしている。そして、そのメカニズムとして、遠心力による流れ方向成分から半径方向成分への乱流応力の変換が支配的であることをレイノルズ乱流応力の収支の議論から明らかにしている。

第四章では、乱流生成渦の時空間的發展を調べるために、Linear Stochastic Estimation (LSE) を初めて時空間的な統計推定に拡張し、乱流場データベースからレイノルズ応力に支配的な乱流構造の抽出を行っている。構造の抽出の前後の時空間發展をコンピュータグラフィックスを用いて可視化を行い、凸面および凹面における壁近傍の渦構造の発達・衰退過程を明らかにした。凹面側では、通常の壁乱流と同様にの自律的な乱れの生成が生じていることを示した。一方、凸面側では、乱れの抑制効果によって自律的な乱流生成メカニズムが失われ、ロールセル状の大規模渦によって壁近傍に鉛直上昇流および下降流が注入されることをトリガとしてレイノルズ応力に貢献の高い構造が発生することを明らかにした。

第五章では、曲率を有する壁面乱流の解析に適した SGS モデルの検討を行っている。まず、既存の SGS モデルについて概観し、それらの特徴を比較している。そして、無次元曲率が 0.1 より大きい場合には、遠心力による SGS 応力の生成が剪断応力による生成の 5 割を超えることを示し、SGS モデルにおいて遠心力効果を直接取り込むことが必要であることを示している。そして、WET の手法により遠心力生成項を陽的に表現した、等方、非等方の 2 つの新しい SGS 応力モデルを構築した。その結果、標準スマゴリンスキーモデル、ダイナミックスマゴリンスキーモデルに比べ、本論文で開発したモデルの予測精度は高く、なかでも非等方モデルでは SGS 垂直応力、せん断応力、散逸率のいずれも良くとらえられることを示した。

第六章では、実際のガスタービン内流動場により近い、流線曲率と場の回転効果が重畳する乱流場について DNS を行っている。遠心力とコリオリ力が同じ方向に重畳する場合、または、逆方向に重畳する場合について、詳細な乱流統計量を明らかにした。特に、逆方向に重畳する場合には、回転数に伴って不安定側が凹面から凸面へ移りかわるため、乱れの分布が大きく変化することを明らかにした。また、フラックス・リチャードソン数の分布により、2 つの異なる体積力の影響を定量的に示した。さらに、強い正方向回転の場合には、2 つの体積力による過剰生成によって、チャンネル全域で半径方向から他成分への圧力歪み相関を通じたエネルギー分配が起こるといった特異な現象が生じることを明らかにした。

第七章は結論であり、本論文で得られた成果をまとめている

以上、本論文では、一般座標系における乱流の直接数値シミュレーションコードを開発し、曲がりチャンネル乱流場の解析を行い、詳細な乱流統計量のデータベースを構築した。また、乱流生成に支配的な準秩序構造について、LSE を時空間相関に拡張した解析により詳細に調べ、自律的な乱流生成が抑制される凸面側で大規模渦構造がトリガとなる特異なメカニズムが働くことを明らかにした。また、流線曲率を有する乱流の工学的モデルとして、遠心力生成を陽的に取り込んだ等方/非等方のSGSモデルを新たに開発し、従来のダイナミックSGSモデルに比べ、予測精度が向上することを示した。さらに、流線曲率と回転が重畳するチャンネル乱流場において、2つの体積力が同方向、逆方向に働く場合の乱流統計量の挙動を明らかにした。これらによって、本論文は、流線曲率を有する剪断乱流の物理メカニズムに対する新しい知見を加えたのみならず、SGSモデル構築を通じて小型ターボ機械などの乱流場予測に有効な手段を与えるものであり、熱流体工学をはじめ機械工学の上で寄与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。