

[別紙2]

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 El-Samni, Osama Ahmed Ali
(エルサムニ, オサマ アーメド アリ)

本論文は、「Heat and Momentum Transfer in Turbulent Rotating Channel Flow」(回転チャネル乱流における熱・運動量輸送に関する研究)と題し、6章より成っている。

ガスタービンや蒸気タービンなどの回転動力機械は社会のインフラを構成する重要な機器であり、それらのより優れた設計を可能とするためには、内部熱流動を精度良く予測する必要がある。また、最近省エネルギーや環境負荷軽減の観点から、小型分散エネルギーシステムへの期待が高まりつつあるが、これらの新しいエネルギー需給の基幹技術のひとつとして、マイクロガスタービンが挙げられる。そこでは強い回転の効果が、熱流動特性に特殊な状況をもたらすことが予想されている。本論文は、未解明な点の多い回転系熱流動の基本的な特性を明らかにし、乱流モデルの評価などに供するための基礎データベースを構築するため、一連の直接数値シミュレーションを行ったものである。

第一章は序論であり、本研究の背景と目的が述べられている。様々な回転装置内部の流れは遠心力およびコリオリ力の影響を受けるが、それらの体積力が主流や壁面に対して相対的にどのような方向に働くかによって大きな差異の生じることが予想される。そこで、本論文では、この問題をより一般的に考察するために、壁乱流として基本的な流れのひとつである平行壁面間チャネル内の発達した乱流を対象に、デカルト座標系の3主軸を回転軸を選んで解析したことが述べられている(これら3つの回転軸が、それぞれST(主流方向)、WN(壁垂直方向)、SP(スパン方向)と表記される)。

第二章では、支配方程式、そして用いた数値計算手法について述べている。チャネル乱流の直接シミュレーションには、一貫して擬スペクトル法を用い、回転数や回転軸方向を幅広く変化させた計算には比較的粗い格子を採用し、一方各回転軸方向に対してそれぞれ最高回転数の場合については細かい格子を採用している。乱流場は主流方向およびスパン方向に周期境界条件、および流量一定条件のもとに完全に発達させている。マイクロガスタービンなどで想定される回転翼の寸法や流速、そして回転数の範囲を想定して、レイノルズ数やローテーション数が設定されている。平均流速に基づくレイノルズ数は約

2300, 壁面摩擦速度とチャンネル半幅に基づくローテーション数は, SPおよびSTの場合, 最大で15, WNの場合での最大値は0.04としている.

第三章では, 一連のシミュレーションから得られた基本的な統計量について述べられている. STおよびWNの場合では全ての回転数において乱流が促進され, SPの場合ではローテーション数が7.5程度までは乱流は促進され, それ以上では逆に抑制された. また, 壁面摩擦係数, 熱伝達係数ともに, 多くの場合回転しないチャンネルに比して増加したが, それら全ての場合に後者の増加割合が前者のそれを上回ったことが示されている. この事実は通常の乱流における運動量と熱の輸送の相似性と異なり, 回転特有の効果であるとしている. 平均速度分布に関しては, SPの場合ではチャンネル中央部で線形かつ非対称な分布が現れることを確認し, STおよびWNの場合では大きな変化は生じないとしている. しかし, これら二つの場合にはスパン方向にも有意な平均流が生じ, STでは壁近傍およびチャンネル中心で符号が変わる4つの層状流が存在し, またWNではスパン方向に正味の流量が発生することを示している. このように流れ場は三次元の様相を呈し, 新たなレイノルズ応力の非対角成分を生じていることを示している.

第四章では, レイノルズ応力, 乱流エネルギー, 渦度, 熱流束, 温度変動およびこれらの散逸率に, 回転が直接的あるいは間接的に及ぼす影響を調べるため, それらの輸送方程式の収支解析を行っている. 3つの回転軸の場合に, 前章までに明らかにされた種々の輸送機構の変化が, これらの輸送方程式の生成, 分解, 拡散などのバランスで説明されている. また, 本研究で行った回転乱流のDNSで計算された種々の統計量や輸送方程式の収支については, 回転乱流のための乱流モデルの構築, 改良および検証に利用できるように, 詳細なデータベースが構築されている.

第五章では, 壁近傍での流れの可視化を行い, 回転と高速・低速ストリークや準秩序構造との関係を明らかにしている. 特に, ST, WNの場合には主流方向に対して傾いたストリークが形成されるという興味深い観察を報告している. また, 低速ストリーク間隔は回転しないチャンネル流のそれよりも広いことが示されている. 準秩序構造については渦度ゆらぎのRMS値, 負の局所圧力, 変形速度テンソルの第二不変量, 速度場のヤコビアン, 第二固有値といった様々な指標を用いて検出を試みている. STの場合ではシステムの回転と同方向に回転する渦は強められ, 逆方向に回転する渦は弱められる特異な機構が存在することを明らかにしている.

第六章は結論であり、本論文で得られた成果をまとめている。

以上要するに、本論文では、回転系のチャネル乱流の熱流動特性に関して、高精度を実現する直接数値シミュレーションを行って多くの統計量やそれらの収支を明らかにし、データベースを構築すると共に、可視化などを駆使して特異な乱流構造の存在を明らかにしている。これらは、回転機械における熱流動機構に関して新たな知見を提供すると共に、今後の回転系の乱流モデル開発に対してに有用な指針を与えるものである。従って、本論文は熱流体工学及び乱流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。