

[別紙2]

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 武 海濱

本論文は、”Momentum and Heat Transfer in Turbulent Channel Flow with Arbitrary Directional System Rotation” (任意方向軸周りに回転するチャンネル乱流における運動量・熱輸送に関する研究)と題し、7章より成っている。

近年、地球温暖化防止やエネルギーの有効利用を目指した技術開発、さらには化石エネルギー社会から水素エネルギー社会への転換の必要性が叫ばれる中、マイクロガスタービン／燃料電池ハイブリッドシステムに代表される次世代小型分散エネルギーシステムが注目されている。エネルギーシステムの超小型化及び分散配置により、従来の大規模集中型発電とは対照的に、超高効率で多様なエネルギー利用が可能であるという利点に期待が膨らんでいる。このようなシステムの高効率実現のためには、その中核をなすマイクロガスタービンの運転条件の柔軟性と高効率の達成が必要であり、そのためにはタービンや圧縮器等の回転機内の熱流動を性格に予測する設計手法が基礎技術として重要な課題となる。本論文は、このような小型高速のタービン、圧縮機といった回転機に生じる、回転系の乱流熱流動に関して、計算力学による基礎研究を行ったものである。計算手法としてはナビエ・ストークス方程式を忠実に数値積分する直接数値シミュレーション(DNS)を用い、またDNSによって得られた詳細データを用い、実用計算のための手法として注目されているラージ・エディ・シミュレーション(LES)におけるサブグリッド・スケール(SGS)モデルの評価を行っている。

第一章は序論であり、工業機器における回転乱流及びその準秩序乱流構造に関する従来の知見を概観し、なかでもマイクロガスタービンを核とする小型分散エネルギーシステムについて述べている。マイクロガスタービンの効率はそれを構成する機器中の熱流動の状態に大きく依存し、回転機器における圧力損失の低減、タービン翼の効率的な冷却等が重要な課題となる。これらの流れは乱流であることが多く、従って回転を有する系における乱流熱流動に関する研究が必要であると述べている。また、回転乱流をコリオリ力の働く方向によって体系的に分類し、過去に報告された研究を整理することにより、実際の機器において出現する任意方向軸周りに回転する乱流における運動量・熱輸送に関する研究は皆無であることを指摘している。LESによる実用計算のためのSGSモデル構築のためには、現象の理解および詳細データベースの構築が不可欠であり、そのためには任意方向軸周りに回転するチャンネル乱流のDNSを行うことが必要であると論じている。

第二章では、回転乱流熱流動を支配する基礎方程式及び数値計算手法について述べている。回転デカルト座標系を採用し、流れの基礎変数としては壁面垂直方向速度及び壁面垂直方向渦度を用いており、温度はパッシブスカラーとして扱っている。数値計算手法として、空間離散化には高精度のフーリエ／チェビシェフ・タウ擬スペクトル法を用い、時間積分には2次精度のアダムス・バッシュフォース／クランク・ニコ

ルソン法を用いている。LESにおけるSGSモデルとしては、ダイナミック・スマゴリンスキーモデル、ダイナミック・ミックストモデル、ダイナミック・クラークモデルの3種を選定し、その理論的背景、仮定及びモデルの導出過程を紹介している。また、過去に実験及び計算が行われた流れ系を対象に、本研究において開発した数値計算コードの検証を行っている。

第三章では、まずスパン方向回転のみ、主流方向回転のみが重畳する場合を取り上げ、それぞれの場合における乱流構造の変化とその力学機構について論じている。スパン方向回転の場合、回転による垂直応力の変化により、負圧側では乱流強度が減少し、安定化され、逆に正圧側では乱流強度が増大する。主流方向回転のみの場合は、壁面近傍の縦渦強度の増大に伴い、全領域で乱流強度が増大する。次に、スパン方向回転及び主流方向回転が重畳した効果について、回転速度の絶対値を一定とし、スパン方向回転と主流方向回転の比を変化させた場合(Case 1)、及びスパン方向回転速度を一定とし、異なる速度の主流方向回転を付加した場合(Case 2)の計算を行っている。どちらの場合も、スパン方向回転の影響が支配的ではあるものの、負圧側で顕著に乱流強度が増大する等、それぞれの効果の単純な重ね合わせとして予測できない、複雑な効果が出現する。平均速度、変動速度およびそれらの収支、乱流構造や二次流れ構造の変化等に対する詳細かつ包括的な考察より、これら複合的回転効果による摩擦係数のような平均特性、そして流れ構造の複雑な変化に関する機構を明らかにしている。また、温度場に対しても同様の解析が行われて、熱伝達率や乱流熱流束の変化に対する機構を示している。

第四章では、まず壁垂直方向回転のみの場合の乱流構造変化について論じている。壁垂直方向回転のみの場合、コリオリ力によりスパン方向に平均速度を生じ、実効的な主流方向及び壁面近傍準秩序構造の方向が傾くことが最大の特徴である。続いて主流方向回転及び壁垂直方向回転が重畳する場合のDNSを行っている。この場合、陽的にはスパン方向回転が存在しないにもかかわらず、乱流構造はスパン方向回転下のそれに類似したものが観察される。この興味深い現象は、壁垂直方向回転及びスパン方向回転それぞれのコリオリ力の和がスパン方向回転のコリオリ力の方向成分に類似となることより、説明されている。さらに、このスパン方向回転効果による構造変化を打ち消すべく陽的にスパン方向回転を加えた補足的なDNSを行い、その説明を確かなものになっている。

第五章では、壁垂直方向回転及びスパン方向回転の重畳する効果についての計算を行っている。この場合でも第三章の場合と同様、スパン方向回転の影響が卓越するが、若干その効果は抑制される。この原因を、渦構造及びストリーク構造の可視化等の手法を用いて分析することにより、壁垂直方向回転によって誘起されるスパン方向平均速度によって実効的なスパン方向回転効果が抑制されるためであることを明らかにしている。

第六章では、以上において得られたDNSデータを利用し、LESにおけるSGSモデルの精度評価を行っている。回転の無い場合、本論文で考慮した3つのSGSモデルの中では、ダイナミック・スマゴリンスキーモデルとスペクトル・カットオフフィルタの併用が最も高い予測精度を与えるが、回転のある場合にはダイナミック・ミックストモデルとガウシアン・フィルタの併用がより高精度であるとしている。また、実用計算において

は、おおよそ相反関係にあるモデルの精緻さと計算負荷のバランスを工学的に配慮して、モデルやフィルタの選定をする必要があることを指摘している。

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、基本的な壁乱流であるチャンネル乱流を対象に、回転のない場合、一方向に回転軸を有する三種類の場合、及び二方向に同時回転する三種類の場合について DNS を行い、その流動構造や統計データを体系的に整理し、任意の方向の軸周りに回転する壁乱流に生じる乱流現象の一般的な力学機構・輸送機構について新たな知見を加えている。また、得られた DNS データベースを用いて、既存の SGS 乱流モデルの系統的な評価も示している。これらの DNS データは、今後とも工学的な乱流モデルの構築のうえで標準的なデータベースとして役立てられ、さらには回転熱流体機器の性能向上に資するものと言える。従って、本論文は、乱流物理、乱流工学について新たな知見を加え、熱流体工学をはじめ機械工学の学術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。