

[別紙 1]

論文の内容の要旨

論文の題目 『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)

氏 名 武 海濱 (WU Haibin)

近年のエネルギー問題に対して、マイクロガスタービンを用いた分散エネルギーシステムの構築が注目を集めている。小型化の要請から圧縮機・タービンの構成要素であるインペラの流れは強い回転の影響を受けることになるが、マイクロガスタービンの性能向上の観点からも、回転を伴う壁面せん断乱流の物理機構の解明及び予測は非常に重要である。

スパン方向座標軸周りに回転する発達したチャンネル乱流は、コリオリ力が重要な役割を演じる壁面乱流の典型として長く研究されて来た。Johnston ら⁽¹⁾の実験, Launder ら⁽²⁾のモデル予測, Kristoffersen & Andersson⁽³⁾及び Elsamni⁽⁴⁾の直接数値シミュレーション (DNS) をその代表として挙げることができる。これら一連の研究では、回転数の増大に伴い、正圧側 (不安定側) における乱流強度が増大し、また負圧側 (安定側) における乱流強度が減少することが示された。最近、Oberlack ら⁽⁵⁾は流れ方向座標軸周りに回転するチャンネルがコリオリ力影響下のもう一つの規範的な流れであることを指摘し、これに対して理論解析, DNS, LES 及び応力方程式モデルによる予測を行った。また、Elsamni⁽⁴⁾は壁面垂直方向座標軸周りに回転するチャンネルの DNS も行った。流れ方向及び壁面垂直方向回転のケースではスパン方向にも平均流速を生じ、特に壁面垂直方向回転ではコリオリ力はスパン方向に対する直接の駆動力として作用するため、スパン方向に大きな正味の流量を持つ。

上記のように、過去の研究においては流れ方向に平行あるいは垂直な方向軸をもつ回転についての考察が行われたが、現実のマイクロガスタービン内部では、回転軸が流れ方向に対し様々な角度を持つ可能性がある。従って実機内部での運動量・熱輸送を正しく予測するためには、チャンネル乱流等の規範的な流れに任意方向軸周りの回転が加わった場合の乱流構造及び乱流輸送機構の解明が必要不可欠である。そこで本研究では、流れ方向、スパン方向、壁垂直方向といった三つの軸方向ベクトル成分のうち、同時に二軸成分を有して回転する場合について、その回転数をパラメータとして

直接数値シミュレーションを行った。また、ラージ・エディ・シミュレーション (LES) における既存の三種類のサブグリッド・スケール (SGS) モデルの評価を、得られた DNS データベースを用いて行った。

まず、流れ方向とスパン方向に同時回転するチャンネル乱流を対象として、二つのケースを考えた。第一のケースでは回転数絶対値 ($Ro = (Ro_l Ro_i)^{1/2} = 5, 7.5 \text{ and } 11$) を一定として回転軸と流れ方向の角を 0 から 90 度に変化させ (Case I), 第二のケースではスパン方向の回転数を一定 ($Ro_z = 2\Omega_z \delta / u_{\tau 0} = 2.5$) として流れ方向の回転数を変化させた ($Ro_x = 2\Omega_x \delta / u_{\tau 0} = 2.5 \sim 15$) (Case II)。スパン方向と流れ方向の回転数が同程度の場合 (Case I), スパン方向の回転は両壁面近傍での運動量・熱輸送を支配し、流れ方向の回転は負圧側のみで乱流強度の若干の回復を誘起することが認められた。一方、流れ方向回転がスパン方向回転よりも強い場合 (Case II), 正圧側ではスパン方向回転の効果が依然として卓越し、負圧側では流れ方向回転の効果により乱流強度は増加した。このため、負圧側における摩擦係数及び乱流応力は顕著に増大する一方、正圧側における変化は僅かであった。また、スパン方向回転によって誘起されたロールセルの規則的な分布が流れ方向回転の影響を受けることが確認された。具体的には、流れに対して反対方向回転を持つロールセルが減衰し、ロールセルより小さな渦が特に負圧側で出現した。この二次流れの変化によって平均温度及び温度変動の分布は変化し、両壁面におけるヌセルト数及びその近傍における乱流伝熱は増加した。またこの時、両壁面近傍の乱流伝熱の比較より、負圧側における増大がより顕著であった。流れ方向回転によって両壁面近傍における縦渦構造も同様に変化し、流れに対して正方向の回転を持つ渦は強められ増加する一方、反方向に回転の渦は弱められ減少した。

流れと壁垂直方向に同時回転のチャンネル乱流については、壁垂直方向の回転数を一定 ($Ro_y = 2\Omega_y \delta / u_{\tau 0} = 0.04$) として流れ方向の回転数を変化させた ($Ro_x = 2.5 \sim 15$)。壁垂直方向の回転が強いスパン方向の平均速度を誘起し、絶対速度はスパン正方向に傾いた。これにより、スパン方向回転が存在しないにもかかわらず、スパン方向回転と同様な効果が確認された。正圧側では乱流運動量・熱輸送を強くなるが、負圧側では乱流強度が抑制された。このため、摩擦係数とヌセルト数は負圧側で減少、及び正圧側で増大した。さらに、正圧側での大きなスケールの渦の発生もあり、この渦はおおよそ絶対速度方向に伸長していた。流れとスパン方向同時回転の Case II と同様に、流れ正方向に回転する大きな渦は卓越し、流れと反対方向に回転する渦はさらに小さく弱められた。また、正圧側における渦構造及び縞状構造の増加、負圧側における乱流構造の減少を示した。

壁垂直とスパン方向に同時回転のチャンネル乱流に関しては、壁垂直方向の回転数を一定 ($Ro_y = 0.04$) とし、スパン方向の回転数を変化させた ($Ro_z = 2.5 \sim 15$)。スパン方向回転の効果は依然としてチャンネルの両側で運動量・熱輸送を支配していた。しかし、壁垂直方向回転によって絶対速度はスパン方向に傾くため、有効な“スパン”方向回転は弱められた。ここで、“スパン”方向というのは $x-z$ 平面における絶対速度垂直方向である。この結果、同じ回転数のスパン方向回転チャンネルと比べ、正圧側における乱流の増大、及び負圧側における乱流の減少傾向が小さくなることを示した。

三軸方向の回転が同時に存在する場合には、回転数を適当に定めることにより（本研究で $Ro_x = 15$ 、 $Ro_y = 0.04$ と $Ro_z = 7.1$ ）、絶対平均速度、温度及び絶対乱流応力と熱流束の分布はチャンネル中心に対称あるいは反対称となる場合がある。このケースでは、スパン方向回転の効果によりチャンネル下壁面近傍の乱流強度は増大し、一方流れ方向と壁垂直方向回転の効果によって上壁面近傍の乱流強度が増大した。結果として乱流強度は両側において同程度となり、壁垂直回転からスパン方向回転のような効果の生じることが確認された。しかし、乱流構造は両壁面近傍において異なり、これら回転の効果の本質的な相違を示した。

最後に、一連の DNS より得られたデータベースを用いて LES における既存の三つの SGS モデルの評価を非回転と回転チャンネル乱流で行った。これら三つのモデルは Smagorinsky モデル(DSM)⁽⁶⁾、Dynamic Mixed モデル(DMM)⁽⁷⁾ 及び Dynamic Clark モデル(DCM)⁽⁸⁾ である。DSM とスペクトル・カットオフフィルタを同時に用いた場合、非回転および垂直方向回転チャンネル乱流における予測はこれら三つのモデルの中で最も優れていることが分かった。また、他の回転チャンネル乱流による結果を全て考慮すると、DMM の予測が最良であることを示した。モデル計算に必要な CPU 時間を考えると、DSM のモデル式はその単純さ故に CPU 時間が最短であり、DMM はスケール相似部分の計算量が多いため CPU 時間が最長であった。

以上をまとめると、本論文では、小型回転機械中で回転効果を受ける壁乱流の基本的な力学機構及び熱輸送機構を解明するため、流れ方向に対して任意方向の軸周りに回転を伴うチャンネル乱流の DNS を行った。多様な条件下でのシミュレーション結果より、基本的にはスパン方向の回転効果が最も著しいこと、しかし、他の回転成分が強くなると、乱れの再増幅・乱流渦の回転方向の選択性・スパン方向平均流の誘起による乱流構造の歪みなどの特徴が現れることも明らかにした。これらのシミュレーションで得られたデータベースは、三つの LES モデルの検証に用いられ、モデルとフィルタの選択によってより良い予測が得られること、また、総じて DMM による予測

は回転チャネル乱流においては最良であることを示した.

参考文献

- 1) Johnston, J. P., Halleen, R. M., Lezius, D.K. 1972 Effects of spanwise rotation on the structure of two-dimensional fully developed turbulent channel flow. *J. Fluid Mech.* 56, 533-557.
- 2) Launder, B. E., Tselepidakis, D. P., Younis, B. A. 1987 A second-moment closure study of rotating channel flow. *J. Fluid Mech.* 183, 63-75.
- 3) Kristoffersen, R., Andersson, H. I. 1993 Direct simulations of low-Reynolds-number turbulent flow in a rotating channel. *J. Fluid Mech.* 256, 163-197.
- 4) Elsamni, O. 2001 Heat and momentum transfer in turbulent rotating channel flow. *Ph.D. diss.*, The University of Tokyo.
- 5) Oberlack, M., Cabot, W., Rogers, M. M., 1999. Turbulent Channel Flow with Streamwise Rotation; Lie Group Analysis, DNS and Modeling. In *1st Int. Symp. Turbulence & Shear Flow Phenomena*, Santa Barbara, 85-90.
- 6) Germano, M., Piomelli, U., Moin, P. & Cabot, W. H. 1991 A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model. *Phys. Fluids A3* (7), 1760-1765.
- 7) Bardina, J., Ferziger, J. H. & Reynolds, W. C. 1980 Improved subgrid scale models for large eddy simulation. *AIAA Pap.80*, 1357.
- 8) Clark, R. A., J. H. Ferziger, & W. C. Reynolds 1979 Evaluation of subgrid-scale models using an accurately simulated turbulent flow. *J. Fluid Mech.* 91, 1-16.