

論文の内容の要旨

論文題目 **Heat and Momentum Transfer in Turbulent Rotating
Channel Flow**
(回転チャンネル乱流における熱・運動量輸送に関する研究)

氏 名 エルサムニ オサマ アーメド アリ

回転乱流は自然界および産業界において実用上非常に重要な流れであり、ポンプ、圧縮機、ガスタービン等の回転機械の分野では、それらの効率向上のため、回転する流路内での輸送現象の解明に多大な努力がなされてきた。さらに近年では、家庭用、自動車の駆動、携帯用電源等に対し高密度の出力を提供する超小型ガスタービンの設計という挑戦的研究課題がある。これら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、それらが壁境界に対してどの方向に働くかが流れの構造の変化に重大な影響を与えるとされている。本研究ではもう少し一般的に、コリオリ力が流れ場および温度場に与える影響を、回転軸の向きと平均圧力勾配の向きのなす角の違いから考察した。解析対象としては、コリオリ力単独の影響を見るため、主流方向とスパン方向に一様であるチャンネル流れを用い、デカルト座標系の3主軸を回転軸に選んだ。これら3つの回転軸をそれぞれ ST (主流方向)、WN (壁垂直方向)、SP (スパン方向) と表記する。

回転の一般的な効果を見るため、様々にパラメータを変化させ、粗い解像度での直接数値シミュレーション (DNS) を行った。また、各回転軸方向に対してそれぞれ最高回転数のケースについては細かい解像度でも DNS を行った。

SP および ST のケースでは、壁面摩擦速度とチャンネル半幅に基づく回転数 ($Ro_\tau = 2\Omega\delta/u_\tau$) は最高で 15, WN のケースでの最高回転数は 0.04 とした。これらは超小型ガスタービンで考えられる回転数の範囲をカバーすると考えられる。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た。平均流速 U_b に基づくレイノルズ数 ($U_b\delta/\nu$) は 2265 である。温度場に関しては物性値を固定とし、浮力を無視した。これにより温度場はパッシブスカラーとして扱える。プラントル数は 0.71 とし、両壁にはそれぞれの温度で等温条件を課した。計算条件を表 1 に示す。

ST および WN のケースでは全ての回転数において乱流が促進された。また SP のケースでは $Ro_\tau \approx 7.5$ 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。全ての回転数において壁面摩擦係数、熱伝達係数ともに回転しないチャンネルに比して増加したが、例外として、SP のケースで安定壁側ではこれら両係数は回転数と共に次第に減少、 $Ro_\tau \approx 15$ の高回転数では不安定壁側でも減少が見られた。ここで注目すべきは、全てのケースで熱伝達係数の増加割合が摩擦係数のそれを上回ったことである。例えば図 1 に示すように SP のケースで $Ro_\tau \approx 11$ の場合にはヌッセルト数 Nu が不安定壁側で 100%増加した(安定壁側では 60%の減少)のに対し、摩擦係数 C_f は不安定壁側で 17%の増加、安定壁側で 53%の減少であった。ST のケースでは最高回転数において Nu は 32%増加したのに対して C_f は 17%の増加にとどまった。WN のケースでは $Ro_\tau \approx 0.04$ で Nu, C_f ともに 15%の増加であった。

SP のケースでは以前からの知見と同様、傾き $2Ro_\tau$ で線形に変化する領域をもつ非対称な平均流速分布が得られた。最高回転数の $Ro_\tau \approx 15$ ではその傾きは 14.6 であり、このことから Kristoffersen-Andersson (1993) の低回転数での

表 1 : シミュレーションを行ったケース。欄内の数値は回転数 (Ro_τ)。

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6 fine
Case SP	2.5	5	7.5	11	15	15
Case ST	2.5	5	7.5	11	15	15
Case WN	0.01	0.02	0.04			0.04

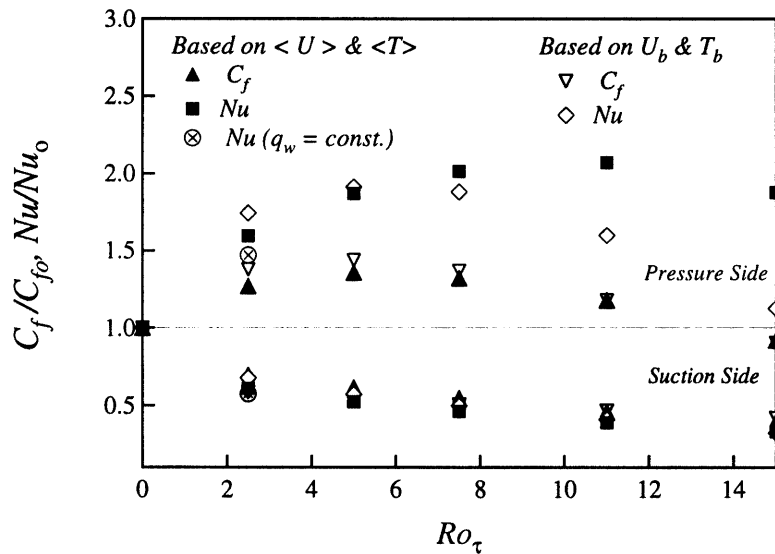


図1：SP（スパン方向回転軸）の場合の壁面摩擦係数およびヌッセルト数。

シミュレーションで観察されたようなロールセル構造は存在しないといえる。これは回転数の増加に伴い安定壁側での層流化する層の厚みが増し、主流方向に長く伸ばしたロールセル構造が小さくなりやがて消失するためだと考えられる。ST および WN のケースでは主流方向平均流速は多少平坦になるものの、大きな変化は見られなかった。またこれらのケースではスパン方向にも平均流速を生じるが、その様相はそれぞれで異なっている。ST では図2に示す通り、スパン方向平均流速は壁近傍およびチャンネル中心で符号が変わり、結果として符号の異なる4つの領域が存在することがわかる。WN では図3に示す通り、スパン方向に正味の流量を持ち、そのため正味の流れ方向が $Ro_\tau \approx 0.02$ の場合には 16° 、また $Ro_\tau \approx 0.04$ の場合には 28° 傾いた。これはコリオリ力が直接スパン方向に働き、流れを駆動する効果のためである。この様相は、スパン方向に対する平均圧力勾配の付加、もしくは形状効果により誘起される三次元流とは異なるものである。スパン方向流速により流れ場は三次元性の様相を呈し、新たなレイノルズ応力の非対角成分を生じている。この複雑な三次元性はST、WNでの構造パラメータ a_1 の変化にも表れており、WNよりもSTのケースでより大きな変化を示している。

回転がレイノルズ応力、乱流エネルギー、渦度、熱流束、温度変動およびこ

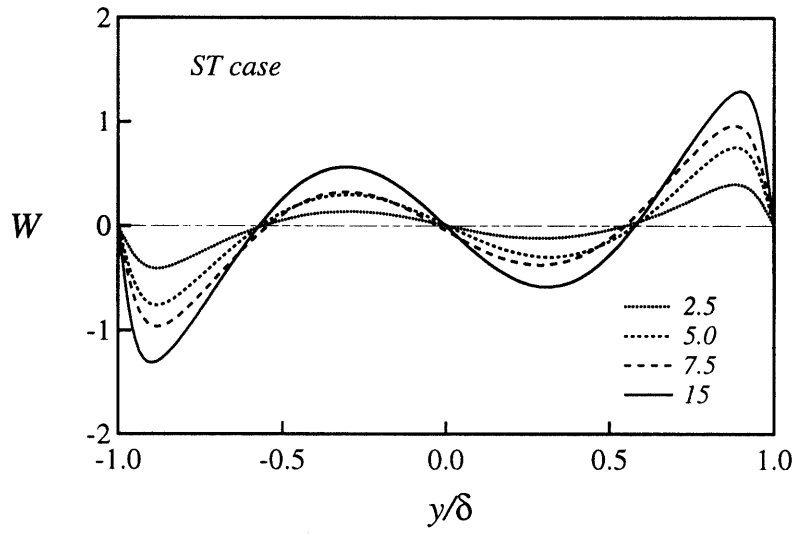


図 2 : ST (主流方向回転軸) の場合のスパン方向平均流速分布.

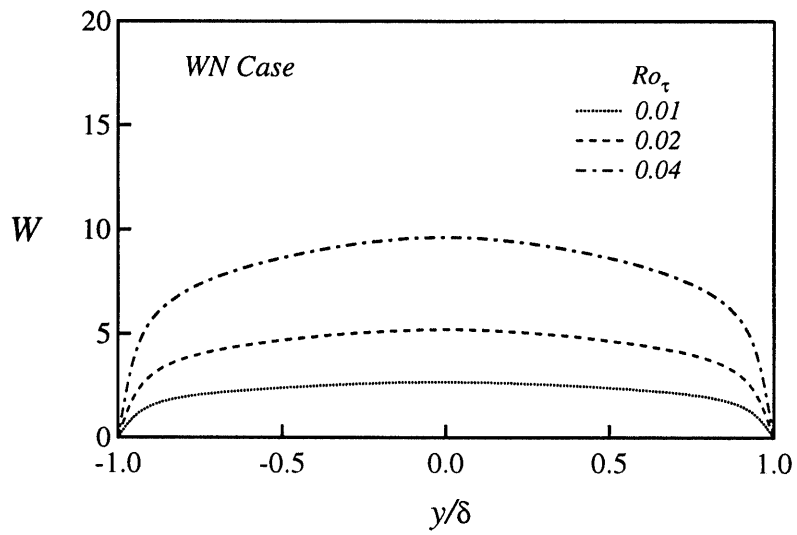


図 3 : WN (壁垂直方向回転軸) の場合のスパン方向平均流速分布.

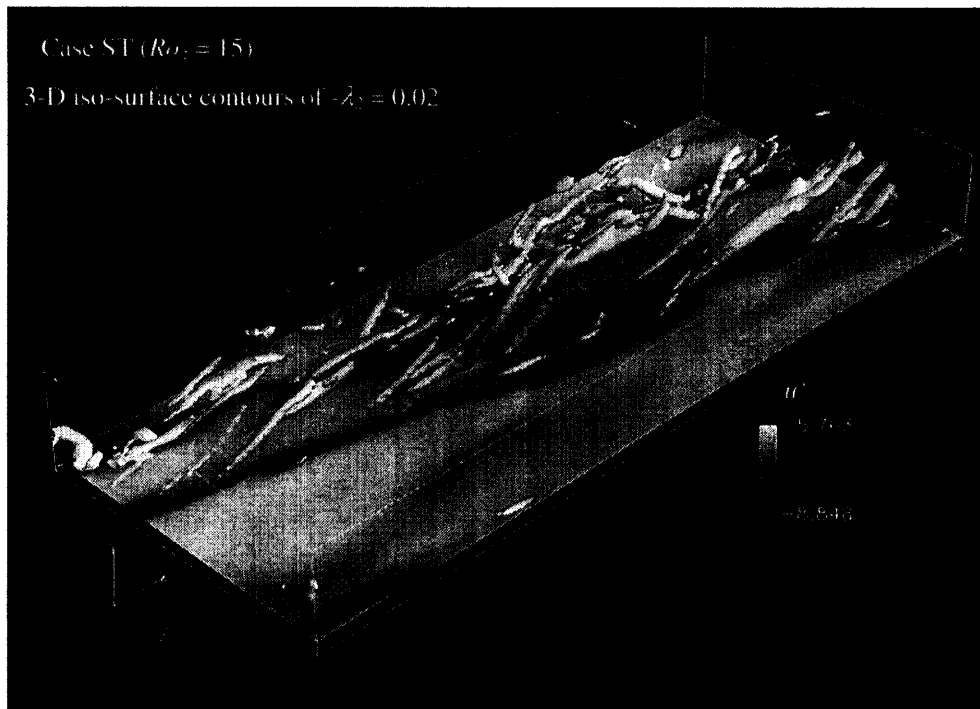


図4：ST（主流方向回転軸）の場合の壁近傍ストリーク及び渦構造（ $Ro_\tau = 15$ ）。

これらの散逸率に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た。特にSPのケースにおいて運動量輸送よりも熱輸送がより促進されることは、レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ 、熱流束 $\overline{v\theta}$ それぞれの、回転による付加的な生成項の違い、即ち、これらの項はそれぞれ $(\overline{uu} - \overline{vv})$ および $-\overline{u\theta}$ の関数であるが $(\overline{uu} - \overline{vv})$ が回転数の増加に伴い符号を変えるのに対し $-\overline{u\theta}$ は符号を変えないという違い、によって説明された。STにおいてはこれら2つの付加的な生成項は類似している。またWNにおいては回転数が低い為に回転は生成に対し殆ど影響を及ぼさないが、収支分布ではレイノルズ応力よりも熱流束のほうに注目すべき変化が現れた。

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より明確にした。ST、WNの両ケースでは主流方向に対して傾いたストリークが観察された。この傾きは壁近傍でのスパン方向平均流速に応じているため、STでは両壁側でWの反対称な分布により反対方向の傾き、WNでは同方向の傾きである。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観察された。

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 Q ，速度場のヤコビアン第二固有値 $-\lambda_2$ ，といった様々なスキームを用いて検出を試みた結果， Q ， $-\lambda_2$ のいずれを用いても準秩序構造の検出が可能であることがわかった。ST のケース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ており，また図 4 に示すように，傾いたストリーク構造にほぼ平行，さらに渦の数も少ないということが観察された。

本研究で行った 3 つの直交する回転軸での回転乱流の DNS で計算されたレイノルズ応力，渦度ゆらぎの RMS 値，熱流束，温度変動およびそれらの散逸率等の詳細なデータはデータベース化しており，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。

今後の研究課題としては，高レイノルズ数での効果，コリオリ力が準秩序構造の大きさやその生成・維持過程に及ぼす影響の考察のための可視化の利用，さらにはコリオリ力に他の体積力，もしくは複雑形状の重畳した場合の効果の解明があげられる。