

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560224

研究課題名(和文) 遷移過程にある平板境界層の摩擦および伝熱機構の解明

研究課題名(英文) Skin Friction and Heat transfer of transitional boundary layer

研究代表者

飯田 雄章 (IIDA, OAKI)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70273307

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：低レイノルズ数での圧力勾配の無い平板境界層のバイパス遷移における剛体回転の影響を数値計算により調べた。回転によるコリオリ力の効果で境界層の安定性が変化する。本研究の目的は剛体回転の影響と境界層遷移について、より詳細に調べる事である。この結果、遷移を促進、抑制させる要素を明らかにする事は遷移について深く理解し制御する事にも繋がる。本報では特にコリオリ力による効果について、低速ストリークやイジェクションなどの乱流構造の観点から考察した。

研究成果の概要(英文)：The effects of anticyclonic system rotation on the spatially developing transitional boundary layer are studied by using the spectral methods with fringe region. By using the forcing term limited in the fringe region at the edge of the computational domain, the outlet flow condition is forced to be identical with inflow condition. Visualization of the numerical results shows that generation of the low-speed streaks are followed by oscillation and breakdown of the low-speed streaks. Imposing anticyclonic system rotation makes the flow unstable and tends to make transition i.e., both low-speed-streaks generation and their breakdown, occur at shorter distance from the inlet condition. In all cases of system rotation, however, generation of low-speed streaks is related to enhancement of ejection motion, i.e., outward motion of low-speed fluids from the wall, while their breakdown is more related to sweep motion, i.e., inrush motion of high speed fluids toward the wall.

研究分野：熱工学

キーワード：乱流 遷移 剛体回転 境界層

### 1. 研究開始当初の背景

平板の上を流れる流体が層流から乱流に遷移する過程で摩擦や熱伝達率が增大することは、実験的事実としてよく知られているがその詳細は未知な部分が多い。一般に、流体の摩擦抵抗を減らし熱伝達を増大させることは、エネルギーを有効利用し二酸化炭素の排出を抑制する上で重要な技術である。例えば、層流より乱流の方が熱伝達率が上がるが、あまり乱れすぎると流動抵抗が著しく増大し熱交換器等の機器の性能を低下させる。従って、適度に乱れた状態を維持することが望ましい。この点から、遷移過程での摩擦や熱伝達率について調べることは、伝熱機器の性能を向上させる大きな手がかりになる。

### 2. 研究の目的

本研究では、主として以下の2点を主要な研究目標とする。

- 1) 境界層において遷移過程を模擬できるスペクトル法による直接数値シミュレーションのコードを開発する。
- 2) 遷移過程において、熱伝達率や摩擦係数が增大するメカニズムを乱流構造の点から明らかにする。

### 3. 研究の方法

スペクトル法を用いた境界層のシミュレーションとして NASA (現ボーイング社) の Spalart 博士の方法 (フリンジ法) がある。スペクトル法では周期境界条件として出口流れと入口流れが一致するが、フリンジ領域内で外力を加えることで出口流れを強制的に理想的入口条件へと変化させた。この結果、流れ方向へのフーリエ・スペクトル法の適用が可能になる。

また、スパン方向を軸としてチャネル全体を回転させることにより、系全体を不安定にして遷移が比較的上流で発生するようにした。一方、回転の向きが逆で系全体が安定になる場合の計算もその影響についても評価する。

### 4. 研究成果

フリンジ領域を使ったスペクトル法による遷移境界層の数値シミュレーションコードの開発と計算を行った。また、剛体回転の影響について調べ、遷移領域において摩擦、熱伝達率が增大するメカニズムを乱流構造の点から考察し、国際会議論文、国内会議の会議録として報告した。

図1に示すように回転数が増大するとより上流で摩擦係数  $C_f$  の増大が発生し、遷移が早まる。以下、乱流構造に関して議論するが、座標系は  $X, Y, Z$  を流れ方向、壁垂直方向、スパン方向とする。

図2に示すように遷移過程にある平板境界層で摩擦係数が增大する領域では、低速領域の筋状の構造 (低速ストリーク) が現れ、成

長していく。図3に示すように、筋状の構造 (低速ストリーク) が生じる領域では、ロール状に  $X$  方向に伸びた渦が生じており、これと関連して生じる吹き上げ (イジェクション) により低速ストリークが形成されたと考えられる。

さらに、図4に示すように低速ストリークと関係する縦渦 (流れに垂直な断面の渦) の相互作用により壁面近傍への高速流体の吹き込み (スイープ) も強められ壁面での摩擦係数が增大する原因となっている。

ただし、図2と図5の比較から下流でスイープの増加がさらに強くなるとストリークの破断と崩壊が生じて摩擦係数の増加が抑えられる (文献1参照)。

回転の向きが逆で、系が安定となる場合にはイジェクションおよびストリークの発生が抑えられることで、摩擦係数の増大が遅れ、遷移点が下流にずれる (文献2, 3参照)。

文献(4)では渦同士の相互作用がスイープを強めること、剛体回転が相互作用に強く影響することを報告している。

以上、以下の通りまとめられる。

回転により不安定化された平板境界層の遷移過程では、摩擦係数が増大する前に、低速領域の筋状の構造 (低速ストリーク) が生じる。

さらに、低速ストリークを作り出すロール状の渦の相互作用が始まると、高速流体が壁面に吹き込むことで摩擦係数が急激に増大する。

ただし、壁面近傍で高速流体の吹き込みがさらに活発化すると筋状の構造が破断、崩壊し摩擦係数の増大が抑えられる現象が見られた。

回転により安定化された平板境界層でも同様の傾向は見られるが、低速ストリークの発生が抑えられることで遷移点が下流にずれ、遷移しにくくなる傾向が見られる。

また、スパン方向の剛体回転が渦同士の相互作用、高速流体の吹き込み減少に大きな影響を及ぼすこともわかった。

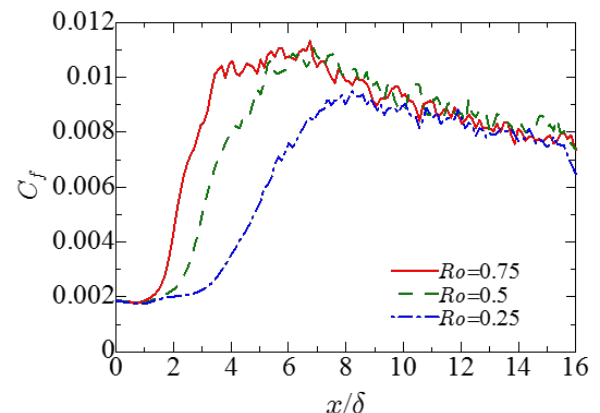


図1 摩擦係数  $C_f$  の流れ方向  $X=x/\delta$  の分布,  $Ro$  は回転速度  $\Omega$  を無次元化したもので、大きいほど不安定になる。

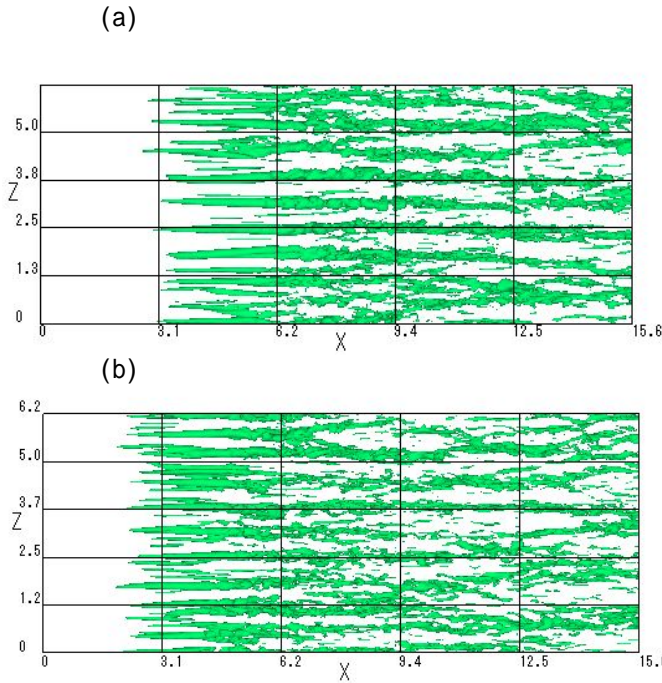


図 2 低速領域の分布, (a)  $Ro=0.25$ , (b)  $Ro=0.5$ ; (a)では, ストリークの発生は  $X=3.1$  で, (b)では,  $X=3.1$  以前に見られる。また, (a)では  $X=6.2$  以降, (b)では  $X=6.2$  以前でストリークの分断, 崩壊が見られる。

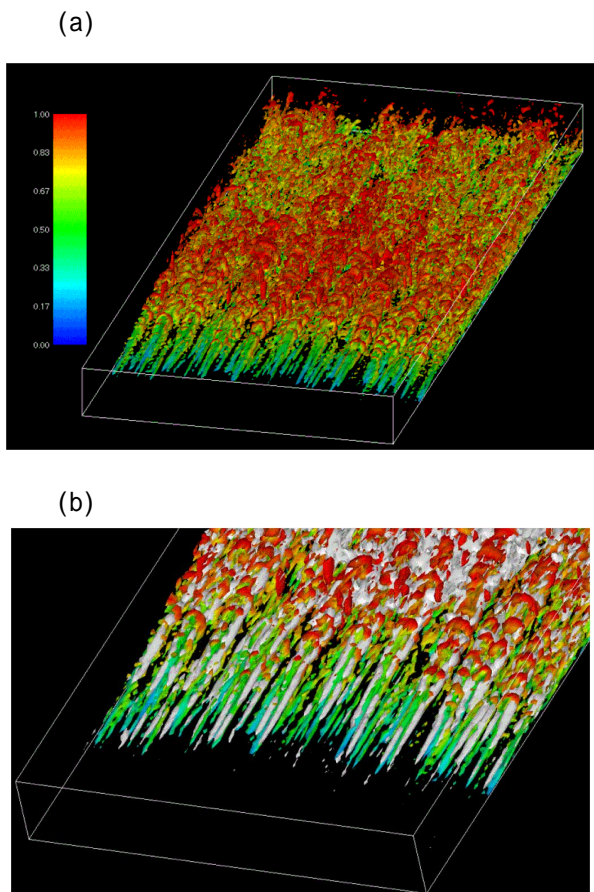


図 3 渦とイジェクションの分布( $Ro=0.5$ ), (a) 渦の分布, 色はその位置での流れ方向速度 (高速; 赤, 低速; 青), (b) (a)の渦の分布にイジェクションの分布(白)を重ねた。上流の低速流体で特徴付けられる渦は, イジェクションとよく相関しており, 低速ストリークは渦によるイジェクションと関連して生じる。

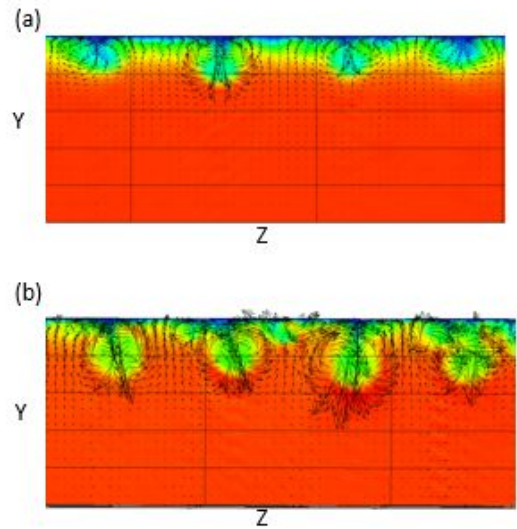


図 4  $X=3.2$ での断面図(一部)。青は低速領域, 赤は高速領域, (a)  $Ro=0.25$ , (b)  $Ro=0.5$ ; (a)では, 渦により低速流体が巻き上げられている。(b)では, 渦同士の相互作用により壁に向う運動により高速流体が壁面近傍により接近している(スイープ)。図 1の摩擦係数と比較すると  $Ro=0.5$ ではこの領域  $X=3.2$  から下流に向かって摩擦係数が増大していることがわかる。

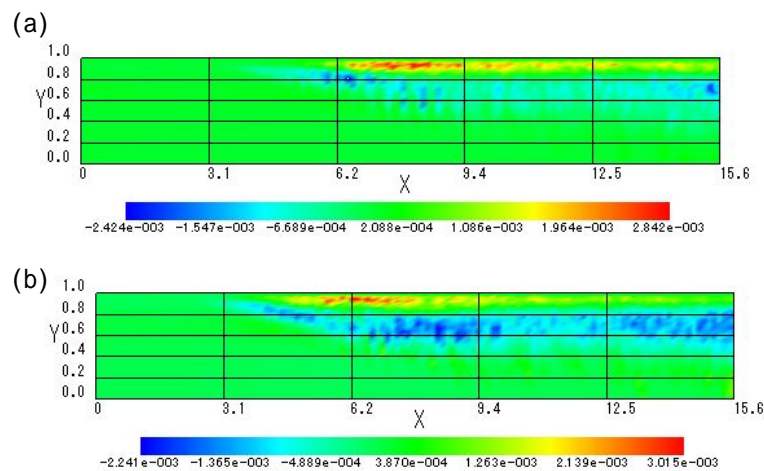


図 5 イジェクションを負(青), スイープを正(赤), 他はゼロしたときのスパン方向(Z方向)平均値の分布。(a)  $Ro=0.25$ では,  $X=6.2$ から下流では壁面近傍でスイープが支配的となる。(b)  $Ro=0.5$ では  $X=6.2$ の手前からスイープが支配的となっている。これは, 図 2でストリークの破断, 崩壊が始まる位置とほぼ一致する。

## 文献

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(1) Iida, O., and Noto, K., Effects of system rotation on transitional boundary layer, Proceedings of the 15th international heat transfer conference, IHTC-15, August 10-15, 2014, Kyoto, Japan, In USB flash drive (15p).

(2) 能登, 飯田, 剛体回転の境界層遷移への影響, 日本流体力学会年会 2014, 宮城, September 15-17, 2014.

(3) 能登, 飯田, 剛体回転の境界層遷移への影響, 日本流体力学会中部支部講演会, 三重, November 7, 2014.

(4) Iida, O., Effects of system rotation on vortical structure on wall turbulence, Journal of Fluids Engineering, 137, 021201, 2015.

〔雑誌論文〕(計 2 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

飯田 雄章 (イイダ オアキ)  
名古屋工業大学准教授  
研究者番号: 70273307