

6

コリオリ力場における境界層遷移について

益田 重明* 松原 雅春*

Boundary Layer Transition in Coriolis Force Field

by

Shigeaki MATSUDA and Masaharu MATUBARA
Keio University

ABSTRACT

Experimental results on laminar-turbulent transition of Blasius boundary layer subject to Coriolis force normal to the wall have been summarized. Coriolis force toward the wall enhance the three-dimensional instability, resulting in the generation of counter-rotating vortices and their secondary instability similar to those on a concave wall. Coriolis force directed outward from the wall, on the other hand, suppresses the three-dimensionality and the transition is delayed, being associated with turbulent spots similar to the stationary boundary layer..

Keywords: transition, Blasius boundary layer, Coriolis force, Taylor-Görtler vortices, turbulent spot

1. ま え が き

前縁に平行な軸の回りに一定角速度で回転する平板上の境界層は、壁面に直角方向にコリオリ力を受けるため、遷移レイノルズ数や遷移過程が変化する。本論文は著者らが行ってきた研究を中心に、現在までに明らかになった事柄について要約したものである。

2. 正回転の場合の遷移

コリオリ力が壁面に向かって作用する場合を正回転と呼ぶことにすると、この時の遷移の様子は図1に示すように、縦渦とその崩壊によって特徴付けられる¹⁾。縞模様は回転によって縦渦が発生した事を示していて、そのピッチは回転数と共に減少し、下流域で二次不安定が生じ、その後崩壊

して乱流に至る。これに呼応して局所摩擦係数 C_f は同図に示すように変化する^{1,2)}。さらに、熱線流速計によって速度変動波形を観察すると、低周波、小振幅の変動が先ず現れ、レイノルズ数の増大と共に徐々に振幅と周波数が増大しながら連続的に乱流に至る²⁾。このことは、正回転の境界層遷移が内円筒回転ジェット流や自由せん断流など、本来微小攪乱に対して不安定な流れに見られる“スペクトル進化による緩慢な遷移”³⁾と共通の特徴を持つものと考えられる。

回転場における渦度方程式は、

$$\frac{D\boldsymbol{\omega}}{Dt} = (\boldsymbol{\omega} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nu \nabla^2 \boldsymbol{\omega} + 2(\boldsymbol{\Omega} \cdot \nabla) \mathbf{u} \quad (1)$$

と書ける。ここで $\boldsymbol{\omega}$ は相対渦度ベクトル、 \mathbf{u} は相対速度ベクトル、 $\boldsymbol{\Omega}$ は系の回転を表すベクトルである。今、 $\boldsymbol{\Omega}$ が z 軸方向に一致している場合を考えれば右辺第3項から直ちに、 $du/dz > 0$ のスパン方向領域では正の x 方向渦度成分が、また $du/$

* 慶応大学理工学部

$dz < 0$ の領域では負の x 方向渦度成分が系の回転によって強められる事が分る。図2は正回転の場合にこの様子を模式的に描いたもので、微小な速度の方向非一様性が原因となって縦渦が発生

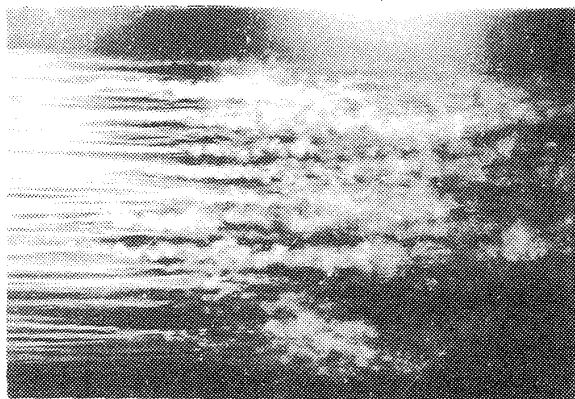
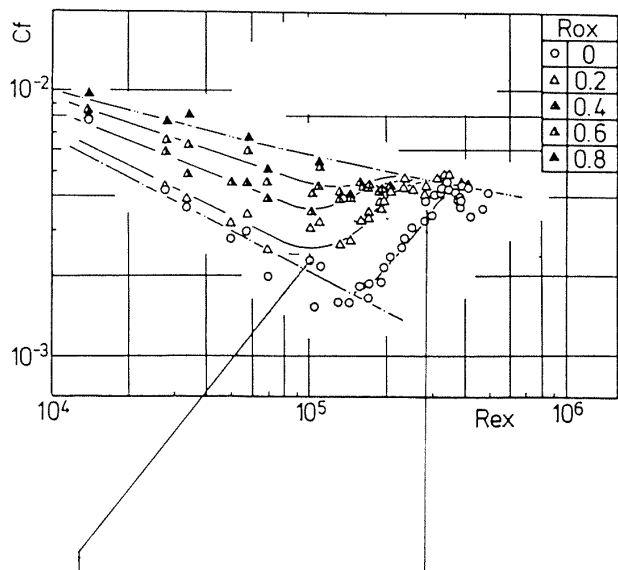


図1 正回転の場合の自然遷移の可視化写真と局所摩擦係数の変化

生し、それが低速部で壁面近傍の低運動量流体を運び上げ、高速部で主流側の高運動量流体を運び下ろす結果、非一様性がさらに強調され、この繰返しによって縦渦が益々強められる。もちろん後述する負回転の場合にはこれと正反対に、非一様性によって発生した縦渦が非一様性自身を弱める方向に回転し、流れ場は縦渦を含まない二次元的場へと変化する。

3. 線形安定理論

前節で述べた縦渦発生機構の説明は粘性を無視した定性的なものに過ぎない。そこで次に、線形安定理論によって微小攪乱に対する境界層の安定性を調べ、成長する攪乱の方向波数を定量的に求め実験と比較した⁴⁾。与えた攪乱は、

$$(u, v, w) = (U, V, 0) + (u', v', w') E \quad (2)$$

$$E = \exp [i(\alpha x + \beta z) - i\alpha ct] \quad (3)$$

(α, β : 実数, c : 複素数)

で、これを回転場の NS 方程式と連続の式に代入し、二次の微小量を省略して線形方程式を得る。境界条件、

$$y = 0, \infty \text{ で } u', v', \partial v' / \partial y = 0 \quad (4)$$

の下で解いた結果は以下の通りである。

図3は $R_{0\delta} = 0.01$ の場合の中立安定曲線で、方向波数 $\beta = 0$, すなわち二次元 TS 波型の攪乱には回転の影響は現れず、静止境界層の結果⁵⁾と一致する。 $\beta > 0.5$ では流れ方向波数 α が

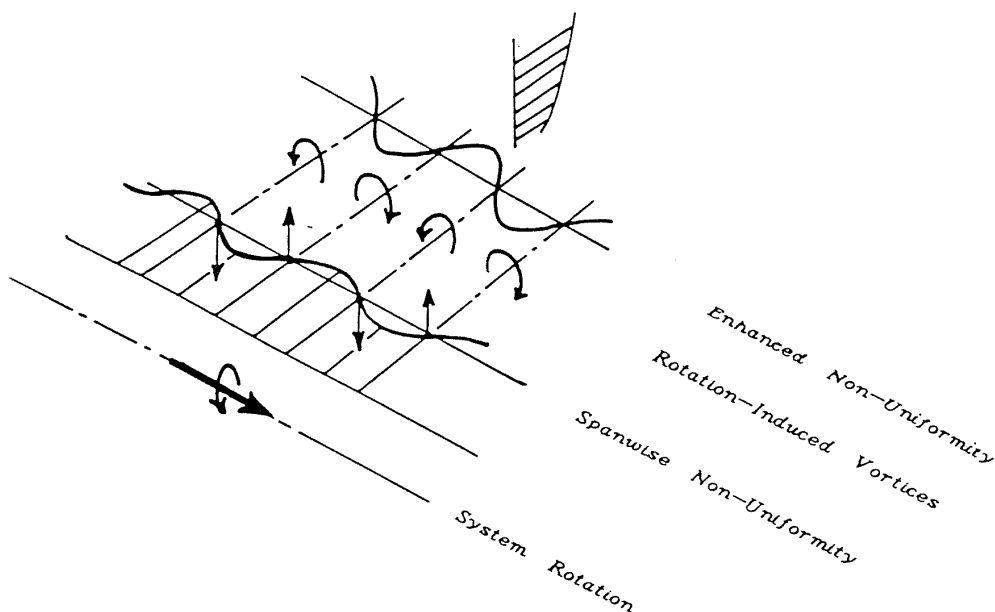


図2 回転場における相対速度の方向非一様性と縦渦の関係 (正回転の場合)

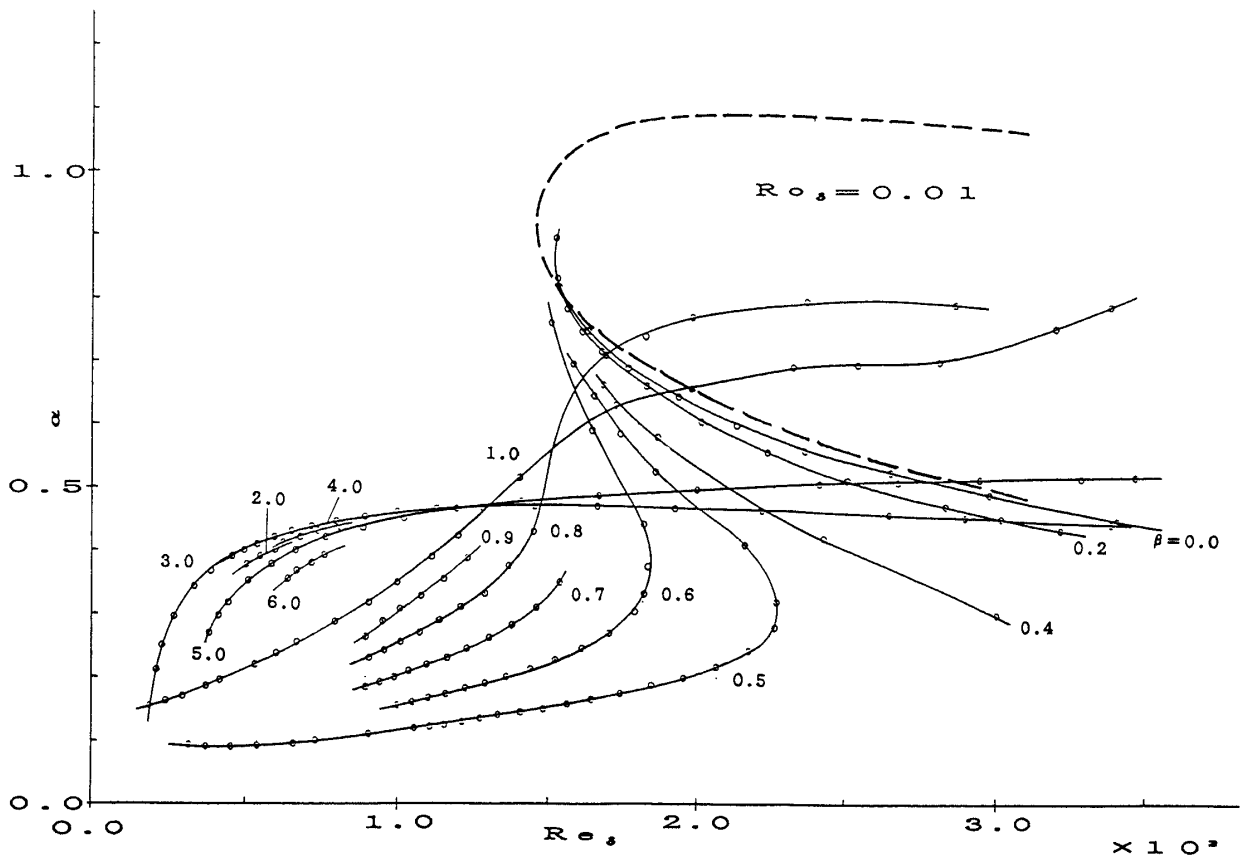


図3 正回転の場合の中立交定曲線

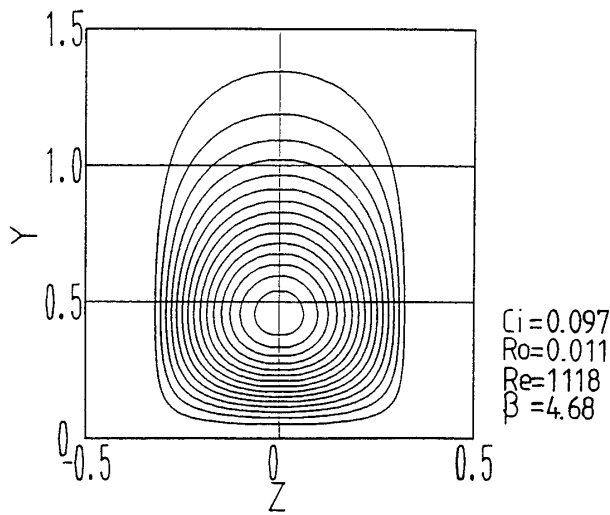


図4 正回転の場合の縦渦型攪乱の流線

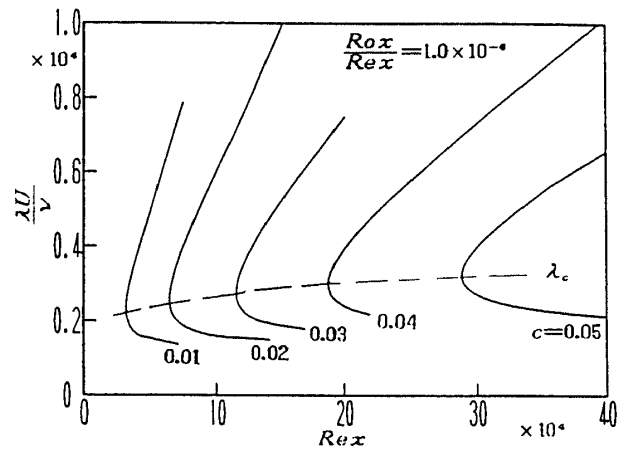


図5 正回転の場合の縦渦型攪乱の等増幅率曲線

小さいほど不安定となる。このことから、 $\alpha = 0$ すなわちスパン方向にのみ波数を有する攪乱が最初に不安定になるものと予想される。そこで、

$$E = \exp(i\beta z + ct) \quad (5)$$

の形の攪乱を与えた場合の計算結果を図4, 5に示す。図4は攪乱の流線をスパン方向半波長分について示したもので、明らかに Taylor-Goertler 型

の縦渦構造となっている。図5は回転速度を一定にした場合の等増幅率曲線で、 Re_x は前縁からの距離のレイノルズ数、 λ は攪乱の波長を表している。図6は写真より求めたピッチと計算結果を比較したもので、回転数の増加と共にピッチが減少することなどは定性的に一致しているが、定量的一致は不十分である。

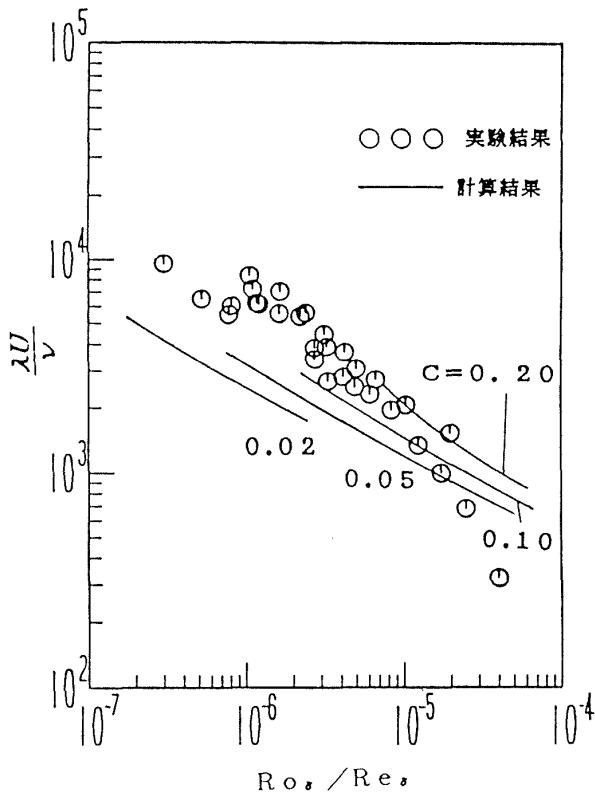


図6 縦渦のピッチ

4. 負回転の場合の遷移

負回転の場合にはコリオリ力が壁面から離れる方向に働く。その結果、第2節で述べたように攪乱の三次元化が抑制され遷移は遅れる。図7はこの時の局所摩擦係数の測定結果で、遷移レイノルズ数の増加が認められる^{1,2)}。この場合の可視化写真には人工的な攪乱を与えない自然遷移の状態でも静止場と同様の乱流斑点が認められる。また、斑点の通過に呼応して速度変動波形に間欠的な高周波変動が現れ、回転数の増加と共に変動期間と非変動期間の境界が明瞭となる²⁾。この事から負回転における遷移を、外円筒回転クエット流や軸対称ポアズイユ流など本来微小攪乱に対して安定な流れに共通して見られる、“間欠性を帯びた激変的遷移”³⁾と同等と見なす事が出来る。

そこで次に、壁面からジェットを吹出すことによって点源攪乱を与え、下流に置かれた熱線の出力信号の集合平均を取ることによって、人工乱流斑点の発生および成長に及ぼすコリオリ力の効果についてしらべた⁶⁾。図8は噴出速度 v_j に対する乱流斑点の発生確率を示しており、回転速度の

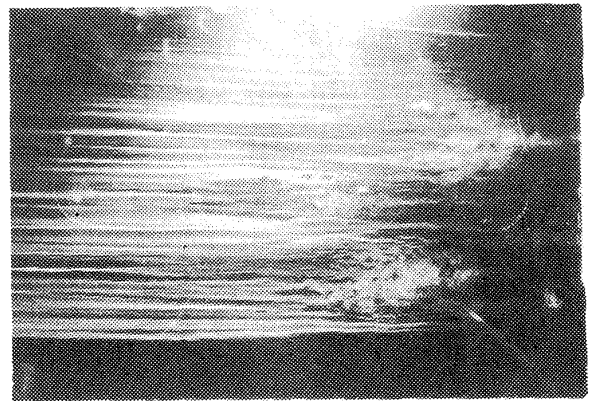
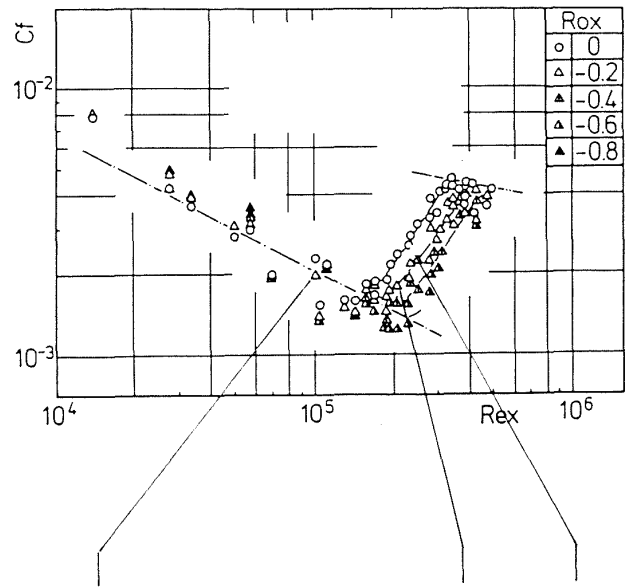


図7 負回転の場合の自然遷移の可視化写真と局所摩擦係数の変化

増加と共に発生確率が低下して行くことが分る。この結果は点源攪乱から乱流斑点に至るまでの成長過程に対するコリオリ力の安定効果を重要であることを意味している。図9は静止時及び回転数 $N=-51\text{rpm}$ の場合の乱流斑点内部の速度及び速度変動のスパン方向分布を示している。上段は集合平均速度のブラジウス分布からのずれを、下段は変動のrms値の等高線である。回転の効果は幅がやや小さくなる点に表れている。同様に対称面内の等速度線図や等乱れ線図を見ると乱流斑点の先端、特に壁面に近い部分の形状にわずかな違いが見られる。しかしその違いは、少なくともこれまで行われた実験パラメータの範囲ではわずかである。以上のことから、コリオリ力の効果は斑点の発生過程の方に強く影響し、出来上がった斑点への影響は比較的小さいと言える。

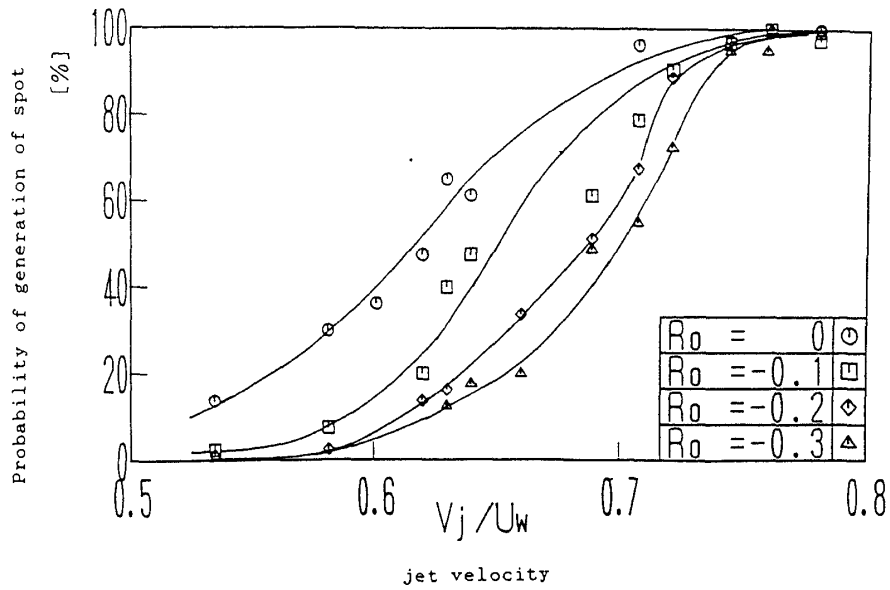


図8 負回転の場合の人工乱流斑点の実験における斑点の発生確率と攪乱の強さの関係

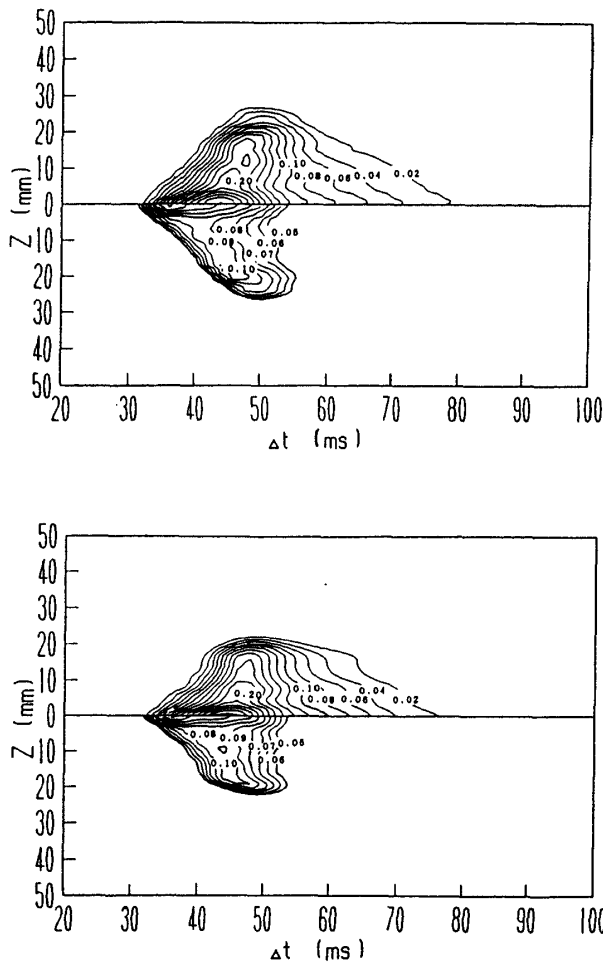


図9 人工乱流斑点の等速度線(上半面)と等乱れ線(下半面) ($x=497\text{mm}$, $y=0.5\text{mm}$, 上段: 静止時, 下段: $N=-51\text{rpm}$)

5. あとがき

前縁に平行な軸の回りに一定角速度で回転する平板境界層の乱流遷移に関して、これまで明らかにされてきた事柄についてまとめた。コリオリ力が壁面に向かって作用する場合の遷移は Taylor-Goertler 型の縦渦の発生と崩壊によって特徴付けられ、攪乱に対して本来的に不安定な流れに一般に認められる、スペクトル進化を伴った緩慢な遷移として分類できると考えられる。一方、コリオリ力が壁面から離れる方向に作用する場合の遷移は、静止境界層の遷移に見られるものと類似の乱流斑点を伴い、攪乱に対して本来的に安定な流れに共通に認められる。間欠性を伴う激変的な遷移として分類できる。

コリオリ力の作用方向によるこれらの相異は、速度のspan方向非一様性に基づく縦渦の発生に密接に関係しているものと考えられる。

参考文献

- 1) 松原・益田：第21回乱流シンポジウム講演論文集 (1989), pp.76-80.
- 2) 益田・松原：日本機械学会論文集, 516(B), (1989), pp.2162-2171.

- 3) 谷：流体力学の進歩－乱流，(1980)，p.6. Structures Research Lab. Report (1964).
- 4) 松原・益田：第22回乱流シンポジウム講演論文集 (1990)，pp.214-218. 6) 松原・益田：日本機械学会講演論文集，900-54 (1990)，pp.101-103.
- 5) Kaplan, R. E. : Cambridge Aeroelastic and