

コリオリ力場における乱流斑点の成長について

益田 重明* 松原 雅春**

Growth of a Turbulent Spot in a Coriolis Force Field

Shigeaki MASUDA

Keio University

Masaharu MATUBARA

Royal Institute of Technology

ABSTRACT

The structure and the growth of a turbulent spot in a Blasius boundary layer stabilized by Coriolis force has been investigated. The hot-wire measurement suggested the roll of hairpin vortices on the growth of the turbulent spot. The growth rate was found to be reduced by Coriolis force, the mechanism of which has been explained in connection with the cancellation of hairpin vortices by system rotation.

Key Words: transition, Coriolis force, turbulent spot, system rotation, artificial disturbance

1. ま え が き

不安定外力場における乱流遷移ではTaylor渦, Goertler渦, Benardセルなどに見られるように, ある定常流から別の定常流への移行を経て乱流化が起こる。一方, 安定外力場では乱流化の過程は外力が作用しない場合と基本的に同じで, その進行が外力によって抑制されるだけであることが, コリオリ力場における著者等の研究から明らかにされている^{1), 2)}。従って, 外力による遷移の抑制機構を解明することは, 乱流発生の子は何かを明らかにするという意味で, 外力が作用しない一般の流れ場における境界層制御の観点からも重要である。

本研究では, コリオリ力が壁面に直角外向きに作用する平板境界層において, 乱流斑点の成長がコリオリ力の安定効果によって抑制される様子を観察し, 縦渦の抑制が遷移の進行を妨げることを明らかにした。

2. 実験方法

実験装置についてはすでに文献1)などに述べてあるので, ここでは乱流斑点の発生法とデータ処理について述べる。観察範囲において自然遷移が起こらない程度の低いレイノルズ数に設定し, 前縁下流 $x=180\text{mm}$ の壁面に設けた直径 1mm の孔から点源攪乱を与えることによって人工的に乱流斑点を発生させた。攪乱は外部に設けたスピーカーにパルス電圧を印加することにより与え, 下流の x 一定の断面上を移動する I 型熱線プローブの流速信号をサンプルした。サンプリングは印加電圧の立ち上がりをトリガーとし, 遅れ時間 t を設定して行い, サンプル数 $N=128$ にわたるアンサンブル平均流速,

$$\langle u(y, z, t) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i(y, z, t) \quad (1)$$

および, 乱れ強さ,

$$\langle u'(y, z, t) \rangle = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \{u_i(y, z, t) - \langle u(y, z, t) \rangle\}^2} \quad (2)$$

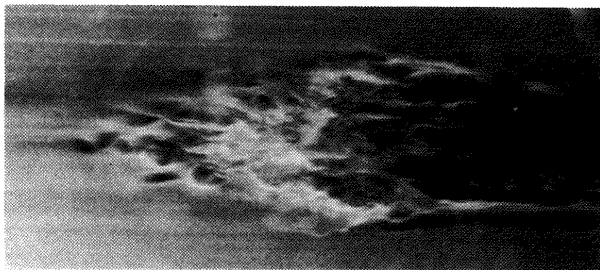
を算出した。主流流速 $U_\infty = 8\text{m/s}$, 回転角速度 $\omega = -8.4\text{rad/s}$ とした。

* 慶應義塾大学理工学部

** Royal Institute of Technology, Stockholm

3. 実験結果

図1は静止場において壁面上の二次元スリットから静かに導入されたパラフィンミストを、点源攪乱導入から42ms後に撮影したものである。乱流斑点が到着する直前(写真右端)から、縦渦によるものと思われるミストの集散と波打ちが始まり、乱流斑点の輪郭部および後端部にも見られる。斑点本体の内部にも鮮明ではないがスパン方向に数列にわたるミストの濃淡が認められる。安定コリオリ力場においても定性的に同様の写真が得られた。以下この斑点の内部の速度場の測定結果について示す。図2は $x=320\text{mm}$, $y=0.3\text{mm}$ の位置で z 方向に移動するI型熱線プローブで測定した乱流斑点底部における $z-t$ 面上での等速度線で、ブラジウス分布からのずれを表わしている。灰色の部分は乱れ強さが2%以上の領域で、写真に見える乱流斑点本体の部分にあたる。内部には対称に5つのピークが存在していて、その間隔は粘性スケールの約130倍、境界層厚さの約1.3倍である。さらに下流位置ではピークの数が増し、間隔は狭まる傾向に有る。点線で示した静止時の2%ラインと比較すると長さ、幅共に10%程度の減少が認められる。図3は斑点の高さ方向中央部($y=1.8\text{mm}$)における同様の結果でコリオリ力の効果は底部ほどは顕著でない。可視化



$x=368\text{mm}$ $x=261\text{mm}$

図1 静止場における乱流斑点の可視化写真
($t=42\text{ms}$, $U_w=8\text{m/s}$)

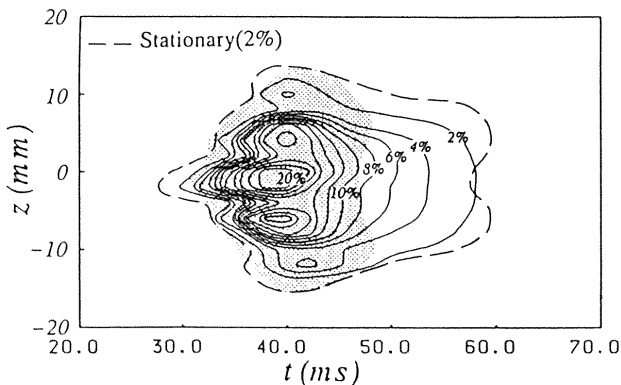


図2 安定コリオリ力場の乱流斑点底部における $z-t$ 面上の流速分布
($\omega=-8.4\text{rad/s}$, $x=320\text{mm}$, $y=0.3\text{mm}$)

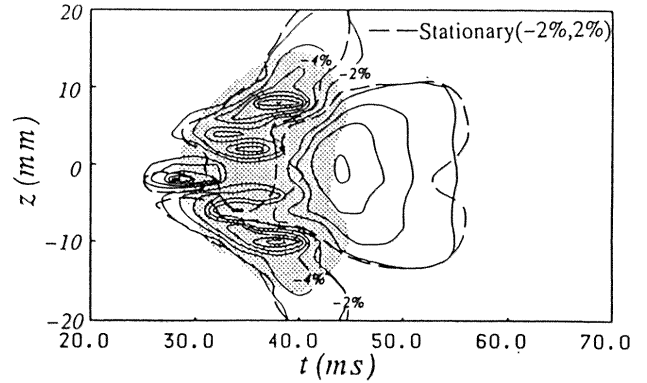


図3 安定コリオリ力場の乱流斑点中央部における $z-t$ 面上の流速分布
($\omega=-8.4\text{rad/s}$, $x=320\text{mm}$, $y=1.8\text{mm}$)

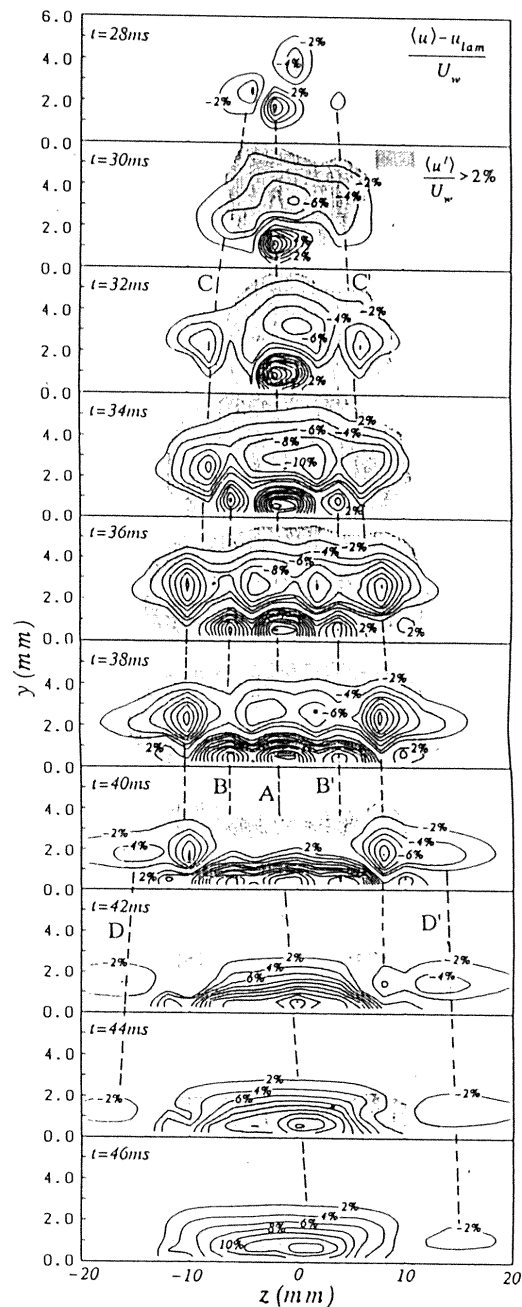


図4 安定コリオリ力場の乱流斑点の $y-z$ 断面における流速分布
($\omega=-8.4\text{rad/s}$, $x=320\text{mm}$)

写真(図1)と比較すると、ミストが白く写っている斑点の本体部分では底部で加速、中央部で減速されていること、写真で黒く尾を引いている尾部ではどの高さでも加速されていることが分かる。

図4は回転時のy-z断面等速度線である。斑点到着と同時に流速変化が始まり、中央部の壁面近傍に点線(A)で示される高速領域が、その外側に別的高速領域(B, B'), さらに外側に(C, C'), (D, D')で示される低速領域の消長が認められる。この構造は基本的には静止時と変わらず、強い攪乱の非線形成長の過程がコリオリ力には左右されないほど強固なものであることを示唆している。しかし、高速領域低速領域共、速度差は図5に示すように明らかに静止時より小さくなっている。乱流斑点のスパン方向への成長がヘアピン渦の形成による従来の説明⁵⁾に従えば、斑点内部の速度差はヘアピン渦の脚部における誘導速度の結果と見ることが出来、図1の写真と対応させると図6のようなヘアピン渦の配置を考えることが出来る。縦渦により誘起されるスパン方向速度差が、安定コリオリ力場ではもとの縦渦を打ち消す方向の渦を誘起し⁶⁾、これによってヘアピン渦の縦渦成分が弱められる結果、斑点の成長が抑えられるものと思われる。

4. まとめ

コリオリ力が壁面に直角外向きに作用する平板境界層において、点源攪乱により発生させた乱流斑点の成長を観察し、縦渦の抑制が遷移の進行を妨げることを明らかにした。

参考文献

- 1) 益田・松原：機論(B), 55-516 (1989), pp. 2162-2171.
- 2) Masubara, M & Masuda, S.: Advances in Turbulence 3 (1991), pp. 204-210.
- 3) 松原・益田：機論(B), 58-555 (1992), pp. 3231-3236.
- 4) 松原・益田：機論(B), 59-566 (1993), pp. 3025-3031.
- 5) 例えば Matsui, T.: Laminar-Turbulent Transition, ed. R.Eppler and H.Fasel, Springer (1980), pp.288-296.
- 6) 益田・松原：航空宇宙技術研究所特別資料, SP-15 (1991), pp. 25-30.

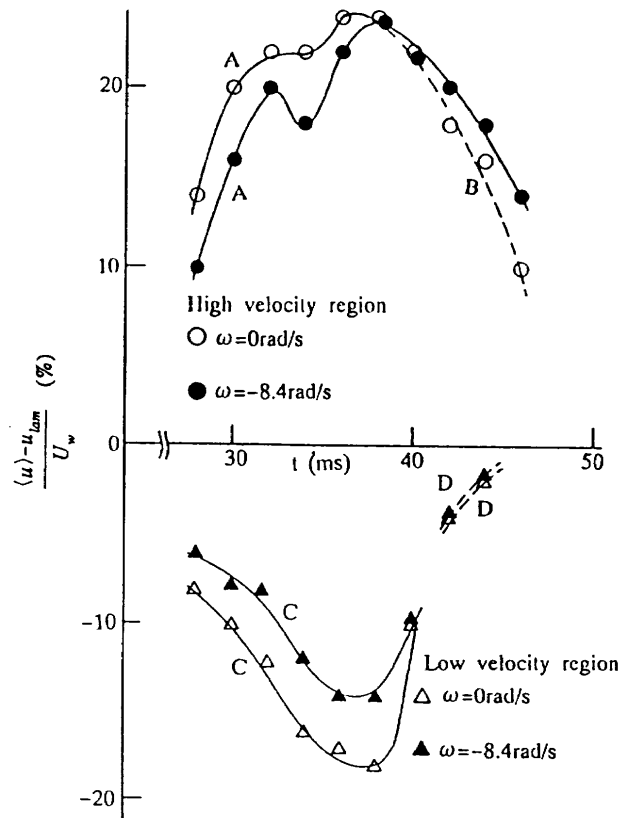


図5 乱流斑点内部の高速領域・低速領域における最大速度差 (A~Dは図4に対応)

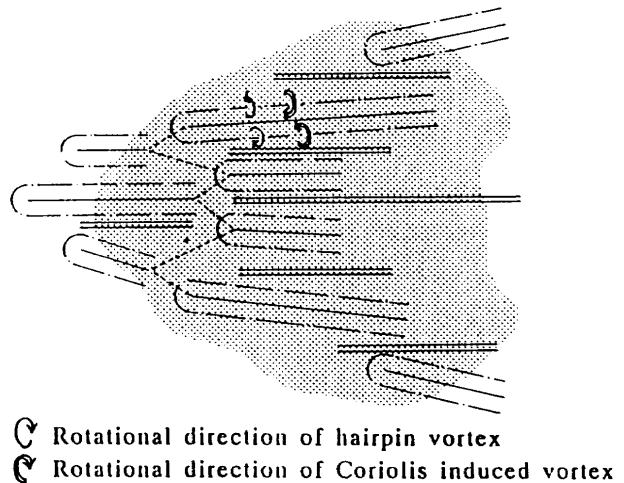


図6 低速領域とヘアピン渦の配置 (想像図)

