

コリオリ力場におけるテラー・ゲルトラー渦の成長と崩壊

松原雅春* 益田重明*

Growth and Breakdown of Taylor-Görtler Vortices in Rotating Blasius Boundary Layer

by

Masaharu MATSUBARA and Shigeaki MASUDA
Dept. of Mechanical Engineering, Keio University

ABSTRACT

The Coriolis force affecting normal to the wall causes Taylor-Görtler vortices in a boundary layer rotating around the spanwise axis. These vortices distort the basic Blasius boundary layer to be inflectional distribution that should be inviscidly unstable. The experimental results showed that the pitch of Taylor-Görtler vortices are independent of the given initial disturbance, and suggested some mechanisms to select the spanwise pitch. The velocity fluctuation was founded near the inflectional point of the spanwise velocity distribution, though it was not clear whether it was caused by the inviscid inflectional instability or by the spanwise fluctuation of the Taylor-Görtler vortex itself.

Keywords: Taylor-Görtler vortex, instability, transition, Coriolis force, boundary layer

1. はしがき

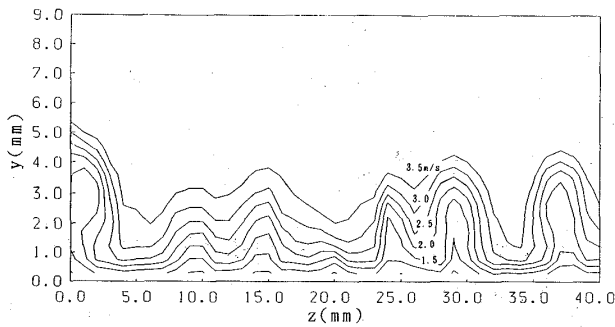
前縁に平行な軸の周りで回転する平板境界層に発生するテラー・ゲルトラー渦に関する実験結果について報告する。上流にスパン方向速度歪の形の攪乱を与えて規則的な縦渦を作り、攪乱のピッチの選択性、攪乱と縦渦のスパン方向の位置関係、縦渦の速度場、速度分布変曲点と速度変動の関係について実験的に調べた。

2. テイラー・ゲルトラー渦による遷移

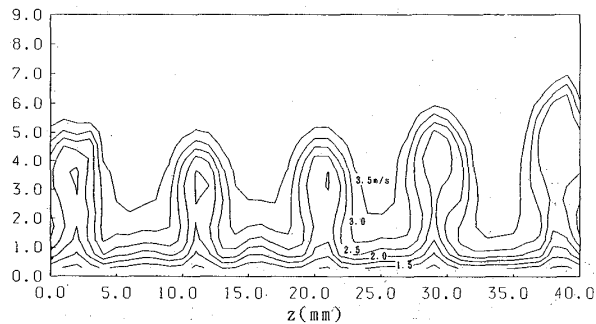
コリオリ力が壁に向かって働く場合の境界層の等流速線図を図1に示す。高流速領域と低流速領域がスパン方向に分布しているのが分る。低流速領域は壁近くの低流速の流体がテラー・ゲルトラ

ー渦により主流側に運ばれている位置に、高流速領域は逆に主流から高速の流体が壁に運ばれている位置に対応していると思われる。人工的な初期攪乱を与えない(a)の場合は、低流速領域はスパン方向に等間隔に現れずまた領域の広さも均等でない。人工的に初期攪乱を与えた場合を(b)に示す。初期攪乱として、前縁から120mm下流に高さ0.3mm、幅2mmの突起がスパン方向に10mm間隔で取り付けられている。この間隔は人工攪乱がない場合に成長するテイラー・ゲルトラー渦の間隔である。低流速領域のスパン方向の位置は人工攪乱の突起の位置に対応し等間隔になっている。また低流速領域は人工攪乱がない場合に比べ主流側に広がっており、その範囲も比較的均等であることが分る。さらに人工攪乱と低流速領域の位置との関係をはっきりさせるため、攪乱の位置をスパン方向に5mmずらした場合(c)を示す。低流速領

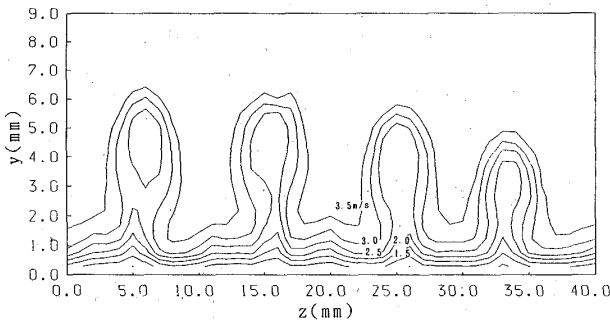
* 慶応大学理工学部



(a) 人工攪乱なし



(b) 人工攪乱あり (攪乱位置 $z=0, 10, 20, 30, 40$ mm)

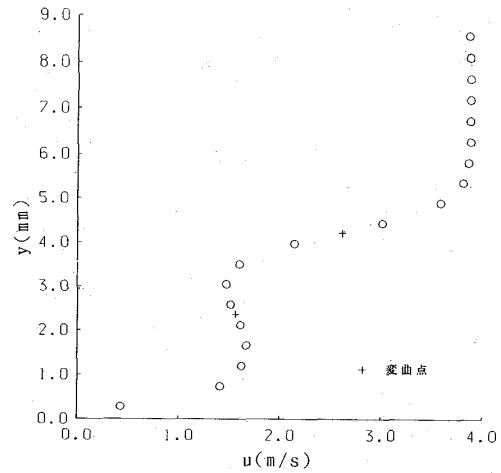


(c) 人工攪乱あり (攪乱位置 $z=5, 15, 25, 35$ mm)

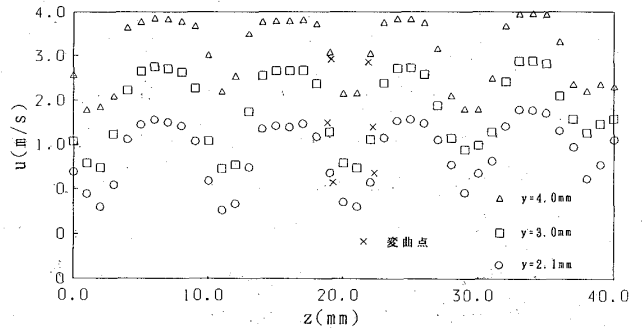
図1 等流速線図 ($U=4$ m/s, $N=68$ rpm, $X=320$ mm)

域も人工攪乱と共にスパン方向に5mmずれており、人工攪乱によるスパン方向の流速歪が突起の下流で低流速領域、その間に高流速領域として現れることがはっきりと分る。

図1(b)のときの壁に垂直方向の流速分布を図2(a)に、スパン方向の分布を図2(b)に示す。垂直方向の分布を見ると変曲点が $y=2.4$ mm と $y=4.3$ mm の二箇所に存在することが分る。またスパン方向の分布でも低流速領域と高流速領域の間に変曲点が存在する。変曲点における流速を u_s とすると非粘性型の不安定条件は、



(a) 壁に垂直方向の流速分布 ($z=21$ mm)



(b) スパン方向の流速分布

図2 変曲点を持つ流速分布 (図1(b)と同条件)

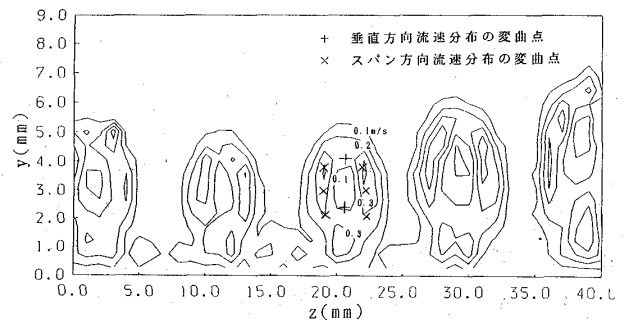


図3 等乱れ線図 (図1(b)と同条件)

$$u''(u-u_s) \leq 0$$

で、これらの変曲点はこの条件を満たしている。変曲点の位置と乱れ強さの関係を図3の等乱れ線図で見ると、壁に垂直方向の流速分布における変曲点よりはむしろスパン方向の変曲点付近で乱れ強さが大きいことが分る。ただしこの位置での流速変動波形には、一定周波数の振動は観察されていない。

図4に流速変動波形を示す。上流では完全な層

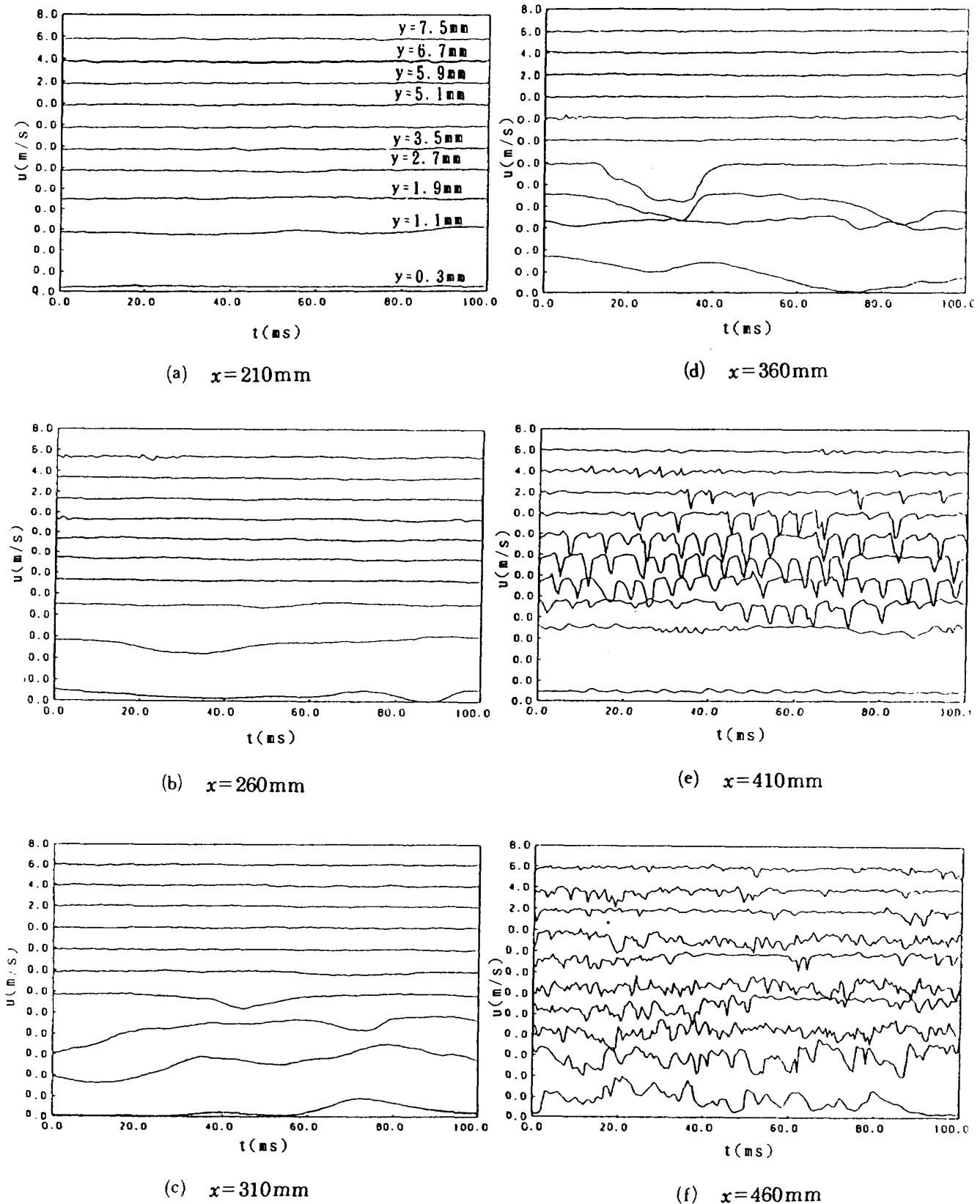


図4 流速変動波形 ($U=6\text{m/s}$, $N=60\text{rpm}$)

流であるが、前縁から310mm(c)あたりから時間的にゆっくりとした流速変動が見られる。この振動は特定の周波数をもたず振幅も一定でない。さらに下流の前縁から410mm(e)では周波数も振幅も一定の振動が見られる。多数の波形を観察する

と、流速分布に変曲点が現れてすぐにはこの振動波形は見られず、変曲点が現れてから少し下流で観察される。このことは、微小攪乱から波形に現れるほど大きな振幅に成長するには一定の時間が必要であるためと思われる。さらに下流では流速

波形は特定の周波数をもたず、乱流に遷移していることが分る。このようなスペクトル進化による遷移は凹面上の境界層¹⁾でもみられ、不安定場の特徴的な遷移であると言える。

3. スパン方向の波長の選択性

境界層のようにその代表長さである境界層厚さが流れ方向に変化している場で、テイラー・ゲルトラー渦のスパン方向の間隔が何によって決定されているかは流体力学上興味深い問題であるだけでなく、壁面の熱伝達などを考えると工学上重要な問題でもある。可視化実験の結果²⁾から、無次元間隔 $U\lambda/\nu$ は無次元回転角速度 $\omega\nu/U^2$ で整理できることが分っている。ここで U は主流流速、 λ はテイラー・ゲルトラー渦のスパン方向の間隔、 ν は動粘性係数、 ω は回転角速度である。また、凹面上のテイラー・ゲルトラー渦も無次元曲率 ν/rU で同様に整理できることが明らかになっている³⁾。ここで r は曲率半径である。しかし、テイラー・ゲルトラー渦のスパン方向波長がどのように選択されるか、十分な理解はまだ得られていない。

ここまでの実験の人工攪乱は自然に発生するテイラー・ゲルトラー渦の間隔にしているので、人工攪乱をテイラー・ゲルトラー渦のスパン方向の位置を固定するために実験の便宜上用いてきたと言える。そこでこの人工攪乱を自然発生する間隔と違う間隔にし、制御された初期攪乱として積極的に利用して下流で成長するテイラー・ゲルトラー渦のスパン方向の間隔がどのように変化するかを調べた。図5は人工攪乱の間隔 λ_d を (a) $\lambda_d = \lambda_0/2$, (b) $\lambda_d = \lambda_0$, (c) $\lambda_d = 2\lambda_0$ (λ_0 は自然に成長するテイラー・ゲルトラー渦の間隔8mm) とした場合の下流の流速分布である。どの場合でも、低流速領域の間隔が自然にできるテイラー・ゲルトラー渦の間隔と同じオーダーであり、自然の間隔の波長が選択されていることが分る。このことから、テイラー・ゲルトラー渦の間隔は与えられた初期攪乱の波長によって決定されるのではなく、主流乱れなどの自然に存在するノイズの中から選択されているものと考えられる。

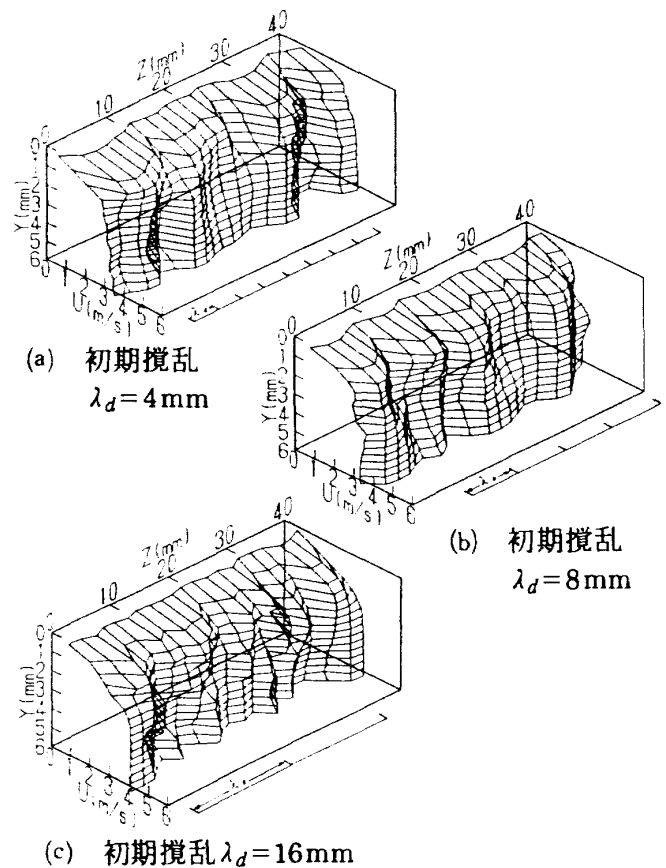


図5 人工攪乱の間隔 λ_d による流速分布の変化 ($U=4\text{ m/s}$, $N=80\text{rpm}$, $x=340\text{mm}$)

5. あとがき

コリオリ力が壁に向かって働く回転境界層は、凹面上の境界層と同様にテイラー・ゲルトラー渦の発生・成長、変曲点型流速分布、非粘性型の二次不安定、という過程により遷移することが明らかになった。また、テイラー・ゲルトラー渦のスパン方向の間隔は与えられた初期攪乱によって決まるのではなく、なんらかの波長選択により決定されることが明らかになった。

6. 参考文献

- 1) Swearingen, J. D. & Blackwelder, R. F.: J. Fluid Mech. (1987), Vol.182, pp.255-290.
- 2) 益田, 松原: 航空宇宙技術研究所特別資料 SP-15, 1991, pp.25-30.
- 3) Matubara, M. & Masuda, S.: ASME FED (1991), Vol.114, pp.103-107.