

傾斜円柱前縁境界層中に導入された点源攪乱からの 速度変動の成長

榎本保之*、福西 祐*

Growth of a Point Source Disturbance in the Leading Edge Boundary Layer of a Yawed Cylinder

by

Yasuyuki Enomoto and Yu Fukunishi

Tohoku University

ABSTRACT

A numerical simulation study solving incompressible Navier-Stokes equations is carried out to investigate the boundary layer of a yawed circular cylinder. Special attention is paid to the new instability due to the curvature of external streamlines found in three-dimensional boundary layers, which is different from the cross-flow instability, and is called the streamline-curvature instability. It is shown that a wavy structure grows from a point source. The difficulty in determining whether the structure is created by a cross-flow instability or a streamline-curvature instability is shown.

Key Words: Yawed Cylinder, Boundary Layer Transition, Three-Dimensional Boundary Layer, Streamline-Curvature Instability

1. 緒 言

現在就航している旅客航空機の多くは、衝撃波の発生などを回避する目的で後退翼を採用しているが、翼の後退のため、翼面上に発達する境界層は3次元化し、2次元の場合よりも早く乱流に遷移することが知られている。このことにより粘性抵抗は増加し、揚抗比の悪化へとつながっている。粘性抵抗を軽減する事は、現在の航空機の性能の向上及び次世代の新型航空機の開発の面から重要となってくるため、3次元境界層の構造究明は重要な研究課題となってきた。

後退翼上に発達する境界層は曲がった流線や横流れ速度成分によって特徴づけられる。横流れの存在は3次元境界層固有のねじれ速度分布を作り、2次元境界層に見られるT-S型不安定に加えて横流れ不安定を引き起こすことが知られている。これに加え、Itoh⁽¹⁾は、境界層の外縁の流線の曲率に起因する流

線曲率不安定と呼ばれる新しい不安定の存在を予測している。横流れ型および流線曲率型の不安定は共に縦渦型であり、流線曲率不安定のすぐ後ろで横流れ不安定が起こると予測されることから、不安定波が観察されても二つのうちのどちらの不安定に起因するのかを区別することは困難であると考えられる。しかしながら理論は点源攪乱を用いた場合、横流れと反対方向の位相速度をもつ横流れ攪乱と横流れ方向に伝わる流線曲率攪乱とに空間的に分離出来るはずであると予測しており⁽²⁾、これが手掛かりとなる可能性がある。

本研究の目的は、3次元非圧縮ナビエ・ストークス方程式を有限差分法で解くことにより求め、横流れ境界層中の速度変動の成長について詳細に調べ、理論予測の正当性を検証し、3次元境界層のより深い理解を追い求めることにある。

* 東北大学

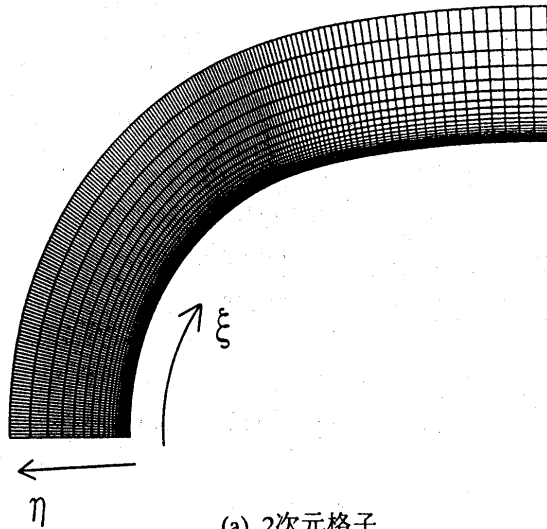
2. 数値解析法

支配方程式は、以下に示す無次元化された3次元非圧縮性ナビエ・ストークス方程式 (1) と、連続の式 (2) である。

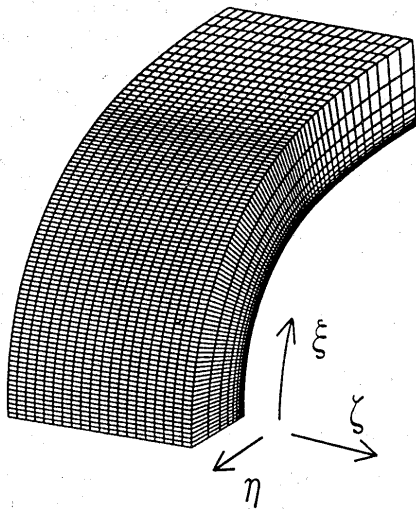
$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\text{grad } p + \frac{1}{Re} \Delta \mathbf{V} \quad (1)$$

$$\text{div} \mathbf{V} = 0 \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{V} は主流速度 U_∞ で無次元化した速度ベクトル、 p は動圧で無次元化した圧力、 Re は代表長さを前縁の曲率半径 r_0 と後退角 Λ を用いた値 $L = 2r/\cos\Lambda$ としたときのレイノルズ数 ($Re = U_\infty L/\nu$) である。



(a) 2次元格子



(b) 3次元格子

図1. 計算格子

計算アルゴリズムは高レイノルズ数の流れにおいても十分な精度の解が得られるMAC法を用いた。この際、時間微分は1次精度の前進差分、空間微分には2次精度の中心差分、また、対流項に対しては3次精度の風上差分を用いた。物理量を食い違い格子を用いて配置し、速度と圧力を交互に陰解法により求めた。

速度の境界条件としては、物体表面においては滑り無しの条件、流入境界及び外縁境界についてはポテンシャル流、流出境界にはノイマン条件を用いた。圧力の境界条件は物体表面及び流出境界に対してはノイマン条件を用い、流入境界及び外縁境界についてはポテンシャル流の速度場からベルヌーイの定理より求めた値を用いた。また、速度、圧力ともにスパン方向には周期境界条件、前縁より上流の上下対称面では対称条件とした。

前縁の形状としては翼の前縁形状を模擬しアタッチメントラインから 70° までを曲率半径一定の円形とし、それ以降は曲率半径を徐々に (0.5% ずつ) 大きくした。

図1に計算格子を間引きした図を示す。格子数は θ 方向に180、 η 方向に40、 ζ 方向に41とした。前縁が $\theta=0$ 、円柱表面が $\eta=0$ 、攪乱を加える位置が $\zeta=0$ である。

3. 結果

計算条件は、横流れ不安定、流線曲率不安定共に、攪乱源付近で成長すると予測されているレイノルズ数⁽²⁾ $Re = 1.0 \times 10^6$ 、空気の動粘度 $\nu = 1.501 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ とし、後退角 $\Lambda = 30^\circ$ 、前縁の半径 $r = 0.05 \text{m}$ の円柱を対象とした。吹き出し、吸い込みはの位置はアタッチメントラインからの角度 $\theta = 18^\circ$ とし、速度変動の振幅 a は攪乱が線形に成長するように主流速度 U_∞ の0.1%とした。また流線曲率不安定により攪乱が最も大きく成長すると予測された周波数⁽²⁾、 $f = 7167 \text{Hz}$ の速度変動を与えた。

3.1 攪乱を与えない場合

初めに攪乱を与えない場合の結果を示す。図2は $\theta = 18^\circ$ の位置における境界層内の速度分布を示したものである。周方向速度、スパン方向速度ともに Falkner-Skan-Cooke の理論値と良く一致していることが分かる。また、速度分布に横流れ速度成分が存在することが分かる。

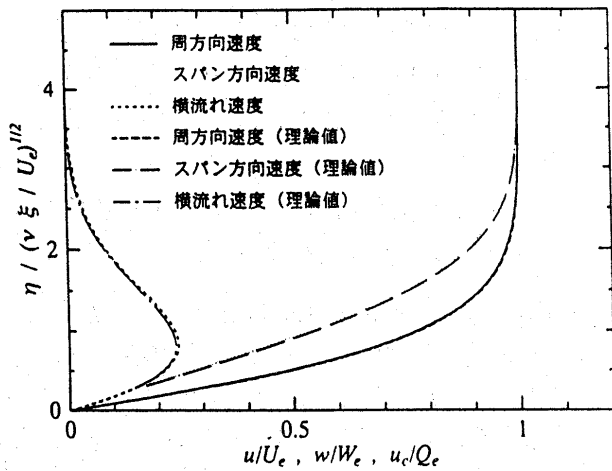


図2. 境界層速度分布

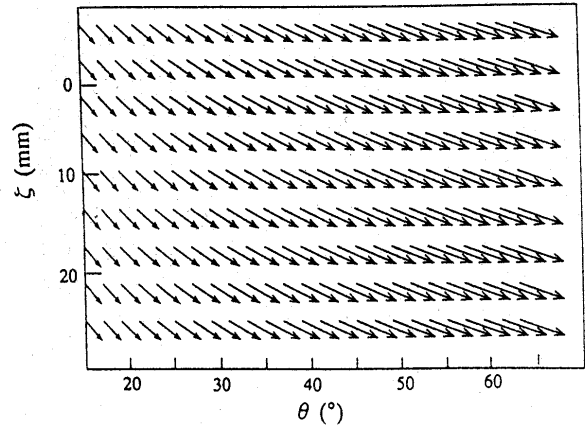


図4. 速度ベクトル図
(η = 0.157mm)

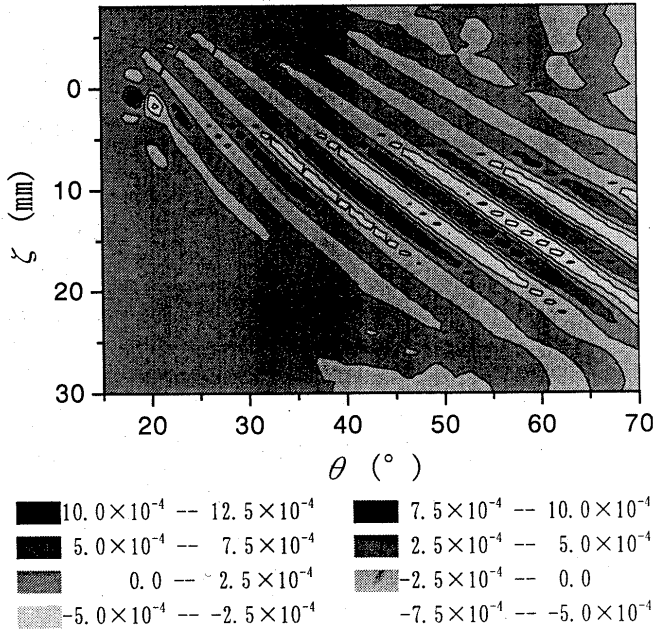


図3. 周方向の速度変動のコンター図
(η = 0.157mm, Ωt = 0)

3.2 攪乱を与えた場合

先に得られた値を初期条件として、攪乱を与えた流れの計算を行なった。壁面での吹き出し、吸い込みを模擬するために壁面境界の一点に(3)式のような非定常境界条件を与え計算を行った。

$$u(\xi_0, \eta_0, 0, t) = a \sin(\Omega t) \quad (3)$$

図3に壁面からの高さη = 0.157mmの位置におけるζ方向に軸を持つ渦度変動ω'のパターンを示す。速度変動のパターンも同様となる。θ = 18°の点源から発生した速度変動は下流に進むにつれ、ζ方向に広が

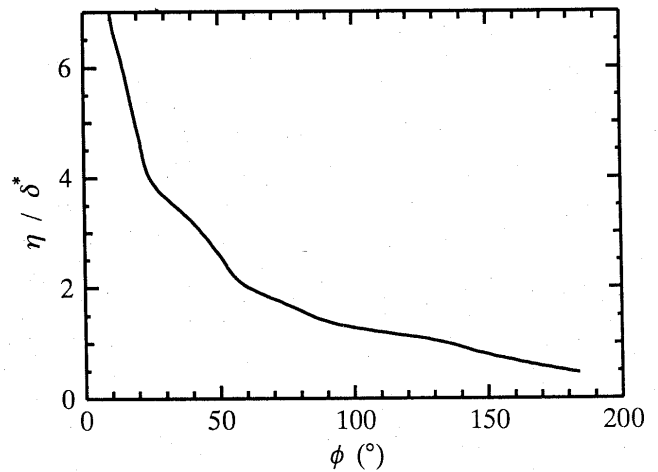


図5. 位相分布
(θ = 50°, ζ = 10.0mm)

りながら成長していく様子がわかる。図4が同じ高さη = 0.157mmにおける速度ベクトルを表しており、変動は縦渦構造として成長したものであることがわかる。

図5にはθ = 50°, ζ = 10mmにおける速度変動のη方向の位相分布を示す。境界層内で位相がほぼ180°変化しており、これは横流れ不安定による速度変動の性質と一致する。

図6はθ = 40°, η = 0.157mmにおける速度変動のζ方向パターンに時間的な変化を表している。この図より、パターンがζ軸に関して負の方向に進行していることがわかる。この方向は3次元境界層内の横流れ速度の方向であり、この性質は流線曲率不安定に起因する速度変動において予測されている性質と一致する。

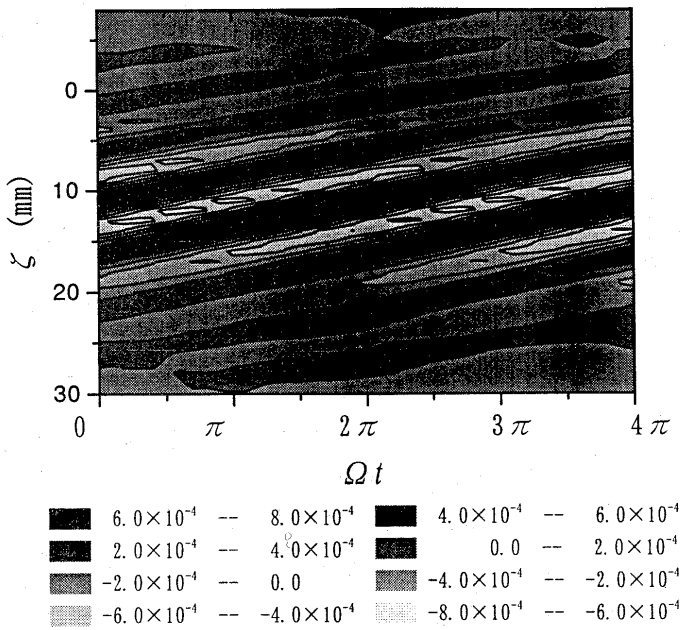


図6. 周方向の速度変動の時間的变化
($\theta = 50^\circ$, $\eta = 0.157\text{mm}$)

4. まとめ

傾斜円柱の前縁近くの壁面において、吹き出し吸い込みのくり返しに相当する速度変動を与えることにより、横流れ境界層中に速度変動が成長していく様子を数値シミュレーションにより再現した。その結果、速度変動はスパン方向に広がりながら下流方向

に伝播し、縦渦列が並ぶ形の渦度構造を形成することが明らかとなった。

そして形成された速度変動場の性質は：

- (1) 壁面付近と境界層外縁との位相差が約 180° あり、横流れ不安定による速度変動の性質と一致した。
- (2) 伝播方向は横流れの方向で、これは流線曲率不安定による速度変動の性質と一致していた。

結果として、速度変動の成長は見られたものの、それが横流れ不安定によるものか流線曲率不安定によるものか判別することができなかった。ましてや2種類のものを見出すことはできなかった。今後計算の精度、とくにグリッド依存性の有無などを調べていく必要がある。

参考文献

- (1) Itoh, N. ,Instability of three-dimensional boundary layers due to streamline curvature. Fluid Dyn. Res. (1994),pp. 353-366.
- (2) Itoh, N. ,Development of wedge-shaped disturbance originating from a point source in a three-dimensional boundary layer. Fluid Dyn. Res. (1996)