

縦渦型乱流遷移の予知と層流制御

小濱泰昭, 江上泰広
東北大学流体科学研究所

One Possible Method for Transition Prediction and LFC Technique for 3D Boundary Layers

by

Yasuaki Kohama and Yasuhiro Egami

Institute of Fluid Science
Tohoku University

ABSTRACT

One possible method for transition prediction and Laminar Flow Control (LFC) technique for three-dimensional boundary layers (3D) are discussed. General 3D boundary layers, which have been essentially treated as different instabilities, are treated as the same instability. Instabilities that appear in general 3D boundary layers can be considered as "3D centrifugal instability". That occurs because of the existence of the streamline curvature both parallel and perpendicular to the wall surface. A pair of new parameter C_1 , C_2 is introduced for the prediction of the primary instability onset and fairly good prediction standard is obtained. For the onset of the secondary instability, local velocity profile is measured accurately and created new prediction parameter K_2 .

Considering very complicated transition structure, unique distributed suction method is introduced in order to delay the transition. This suction method has advantage to conventional uniform suction method in less suction power needed to control the flow field. Beyond 30% transition delay is successfully attained by about half of the suction power for uniform suction.

Key Words: swept wing, 3D boundary layer transition, transition structure, LFC, prediction.

1. はじめに

航空機の機体表面やエンジン内部流路など工学上重要な流体機器表面の境界層は、ほとんどの場合外力などの影響を受け三次元化し、二次元の場合に比べて早期に乱流遷移することが知られている。傾斜物体⁽¹⁾、回転物体⁽²⁾、湾曲物体⁽³⁾まわりの境界層流がそれであり、乱流遷移のプロセスでは必ずと言ってよいほど縦渦の発生が見られる。この縦渦運動により流れ場が急速に不安定化し、二次不安定性を誘発⁽⁴⁾して早期に乱流遷移する。

例えば後退翼の場合、最大圧力勾配の方向と速度の方向が異なる結果境界層がねじれて三次元化し、横流れ不安定性により境界層中に対流現象が発生、縦渦構造を生じる。次いでその渦運動により速度の遅い境界層底部の流れが主流方向に運ばれ、その結果縦渦に沿って局所的に変曲点不安定性が誘起され、二次不安定性が生じる。この時点で強い非定常性、高周波速度変動という乱流の性質が流れ場に付与され、急激に完全乱流へと移行する。このような縦渦構造を伴う三次元境界層の乱流遷移を正

確に予知する方法及びその制御法は、その応用上の重要性にも拘わらず乱流遷移構造が未だ完全には解明されていないために開発されていない。乱流遷移構造を考慮した制御の方法を開発する必要がある。

本研究では、これ迄明らかにされてきている三次元境界層の乱流遷移に関して概説し、次いでその遷移の予知法、及び遷移構造を考慮した有効な制御の方法について述べる。

2. 一次不安定性の予知

三次元境界層が不安定になると、横流れ渦、らせん渦、ゲルトラ渦、テラー渦などと呼ばれる縦渦構造が発生するが、その発生基準を規定するパラメータはそれぞれ異なる流れ場に対して別々のものが用いられており、三次元境界層に共通したものは今のところ一例⁽⁵⁾を除いて存在しない。もともとこれらは異なる不安定性である、との認識があり、従って同一の不安定性として共通して記述する、という試みはなされてきていない。しかし、これまでの我々の研究によれば一見ことなる流れ場ではあるが、その不安定性には強い共通性⁽⁶⁾があり、同じパラメータで記述出来ると理解している。即ち、後退翼など傾斜物体境界層内に発生する横流れ不安定性も、円錐体などの回転物体境界層内に発生する横流れと遠心力不安定性が複合して発生する不安定性も、そして凹面壁など湾曲物体境界層内に発生するゲルトラ不安定性も共通した三次元不安定性として記述できる。図1 (a), (b) に二つの典型的な場合について示している。(a)は凹面壁に沿う境界層であり、主流も境界層流も流線は壁面に垂直な曲率を有している。一方(b)はエクマン境界層であり、主流も境界層流も流線は壁面に平行な曲率を有している。いずれの場合にも主流と境界層流との間で流線の曲率を作る付加的な遠心力の大きさが異なり、見かけの圧力差が境界層内外の間に発生、境界層内に対流が発生することになる。主流や横流れ成分が存在するためにこの対流は各々異なった形の渦(凹面壁上ではペアー渦、後退翼上では同方向回転渦)構造を形成する。一般の三次元境界層では、流線は空間的に湾曲しており、従ってこの両方の曲率、壁面に垂直な成分と平行な成分とに分

解して考える⁽⁷⁾ことができる。

これまで横流れ不安定性に関連して安定計算結果と実験結果で食い違う結果^(8,9)があった。それは層流境界層が不安定になり、最初に発生する攪乱(こうらん)が安定計算では進行波型であり、実験では定在型の縦渦であることである。以上述べた実験結果から考えると、実験で検出される縦渦は計算で予想されるものとは異なり、三次元遠心力不安定性により生じた対流現象なのでは、と考えている。

3. 二次不安定性の予知

流れを制御する場合、目的によってどのような流れの状態に制御したいかは異なる。特に摩擦抵抗軽減と伝熱促進では全く相反する。前者では層流が理想であり、後者では乱流状態に近い流れが求められる。そのような観点から考えると、縦渦のみが発生している遷移領域は両方の目的で利用可能な領域である。摩擦抵抗は低く、かつ伝熱促進も縦渦の運動により促進される。従って二次不安定性の発生を予知することも工学上極めて重要である。これまでの研究から、二次不安定性が発生すると f_2 の 7~10 周期で完全乱流へと遷移することが知られている。従って安定して縦渦が存在している領域は一次不安定性発生点から二次不安定性発生点までの間ということになる。

二次不安定性は、縦渦の運動により境界層底部の遅い流れが主流方向に運べられるために、局所的に強い変曲点型の速度分布が渦軸上に形成され発生することは既にのべた。即ち二次不安定性は変曲点型不安定性である。しかし境界層中に局所的に発生するので、自由空間でのものより壁の存在による安定化が予想される。従って壁と変曲点との距離をパラメータに含める必要がある。そのような観点で以下のような二次不安定性を予知するためのパラメータを導入した。

$$K_2 = \frac{\partial(u/U_\infty)}{\partial(z/\delta)} \cdot \frac{\delta_p}{\delta}$$

ここで δ_p は変曲点高さを示す。

図2は実験的に K_2 を測定した結果であり、およそ $K_2=0.6$ で二次不安定性が発生することが分かる。

4. 三次元境界層の LFC について

二次元の境界層を層流制御する場合、基本的にはスパン方向に一樣な流れのみを考えるので二次元的にのみ対処してきている。これに対して三次元境界層の場合には、層流状態での制御の他に縦渦構造が発生して後の制御も考えられる。縦渦は極めて安定であり定在渦だからである。それに、縦渦構造が発生する以前の層流境界層は極めて薄く、例えば翼の境界層を制御する場合、前縁付近に吸い込み装置を設けることで新たな攪乱（かくらん）を誘発する危険性を伴ってしまう。

4.1 制御の指針

縦渦構造が発生して後の制御では一樣吸い込みなどの二次元的な方法は現実的でない。既にスパン方向に分布を有してしまっており、それらを除去するには少なくとも分布の存在する境界層全体を吸い込まなければならない。これは制御に必要なパワーが大きくなり過ぎること、新たな境界層が発生するので大きな摩擦抵抗増を伴うこと、などで有効な抵抗軽減効果を得られない。三次元境界層の乱流遷移では、縦渦運動により境界層底部の遅い流れが主流方向へと運ばれる結果強い変曲点型の速度分布が形成され、二次不安定性を誘起することが知られている。従って縦渦運動により渦の足元に集められた低速流を選択的に吸い込むことが出来れば、境界層はスパン方向に一樣化する方向に改善され、かつ低速流が主流方向へ運ばれにくくなるので二次不安定性の発生限界を遅らせることが可能となる。従ってこのような制御指針のもと、各々の縦渦軸に沿った渦の真下に吸い込みスリットを設けて選択的に低速流を吸い込み、結果として乱流遷移を遅らせる方法を試みている。

4.2 制御結果

図3に前記の指針のもとに製作された吸い込み装置の概要を示す。そして図4(a), (b)に吸い込みの有無による違いを断面計測結果で示す。図(a), (b)を比べることで明らかなように、選択的吸い込みにより有効に乱流遷移を遅らせることが出来ていることがわかる。図5は遷移の遅れを吸い込み量、吸い込み方法の違いに対して示したものである。この図から二次不安定性が発生する直前の位置で吸い込む時一番制御効果があることがわかる。

そして一樣吸い込みと比べておよそ半分の吸い込みで30%以上の遷移の遅れを実現⁽⁹⁾できることがわかる。

5. おわりに

以上、縦渦型乱流遷移の予知と層流制御について実験研究の立場から具体的予知方法などを挙げて論じた。主な結果を要約すると以下ようになる。

- 1) 横流れ不安定場に発生する縦渦構造はゲルトラ不安定性を三次元に拡張することでも説明できる。従って、もしかしたら実験的に検出される縦渦構造（後退翼や回転円盤境界層等）は、安定計算から出てくる位相速度ゼロの攪乱（かくらん）とは異なるものかも知れない。
- 2) 三次元境界層一般の一次不安定性の発生予知にはパラメータ C_p , C_d が適している。
- 3) 二次不安定性の発生予知にはパラメータ K_2 を用いることができる。
- 4) 縦渦型乱流遷移の制御のためには縦渦構造を考慮した選択的吸い込み法が有効である。

参考文献

- (1) 小濱, Saric, W. S., Hoos, S. A.; 機論(B), 58(1992), 3053-3059.
- (2) Kohama, Y., Suda, K.; *AIAA J.* 31(1993), 212-214.
- (3) Bippes, H.; NASA TM-75243, (1978).
- (4) Kohama, Y., Saric, W. S., Hoos, J. A.; *Proc. Roy. Aero. Soc. Conf. on: Boundary-Layer Transition and Control*, Cambridge Univ., England, Apr. 8-12, (1991). 4.1-4.13.
- (5) 小濱; 航技研特別資料 SP-18, (1992), 37-40.
- (6) Kohama, Y., Kodashima, Y., Watanabe, H.; *Laminar-Turbulent Transition*, Springer-Verlag-Berlin, (1995), 455-462.
- (7) Kohama, Y., Davis, S.; *JSME Inter. J. (B)*, 36(1993), 80-85.
- (8) Malik, M. R., Li, F., Chang, C.-L.; *J. Fluid Mech.*, 268, 1-36.
- (9) Kobayashi, R., Kohama, Y., Takamade, Ch.; *Acta Mech.* 35 (1980), 71-82.
- (10) 江上, 小濱, 小野寺; 機論(B) 63(1997), 849-856.

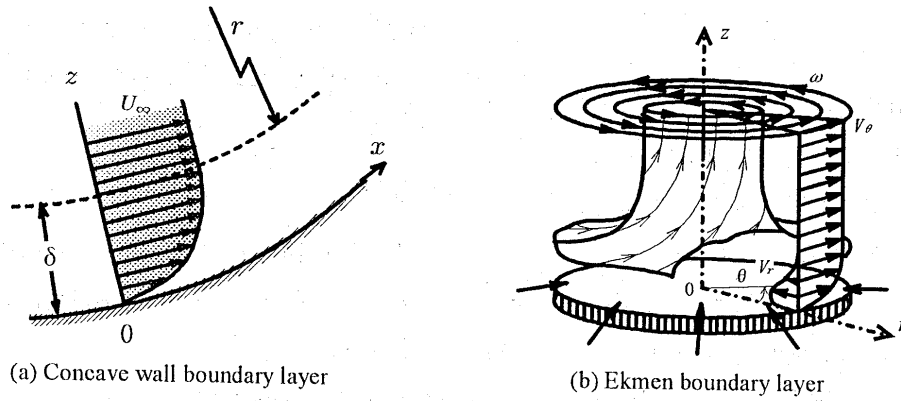
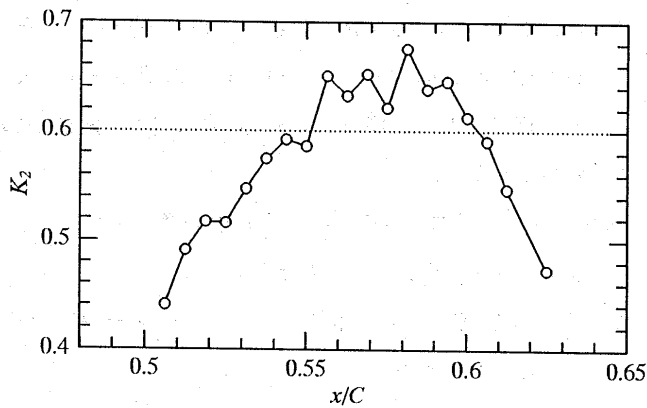
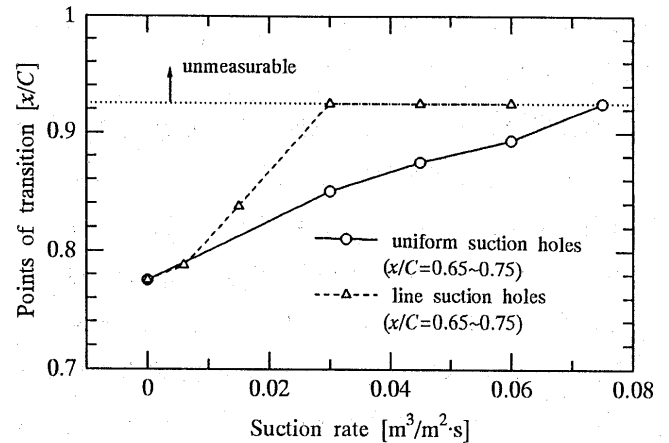
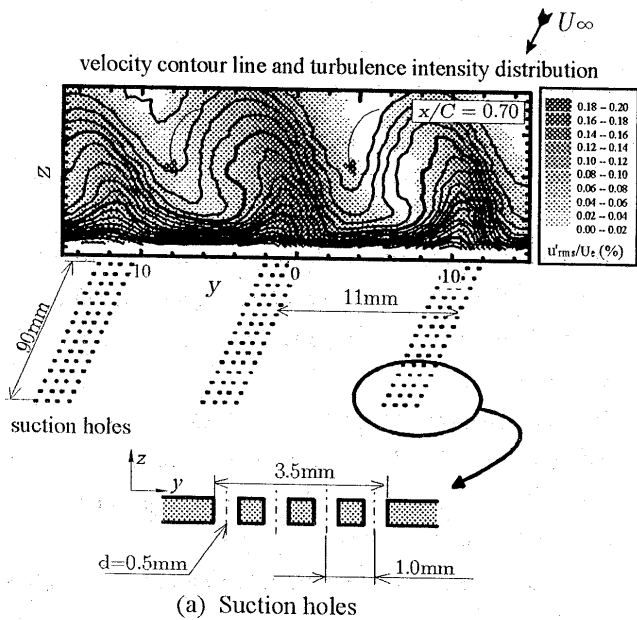
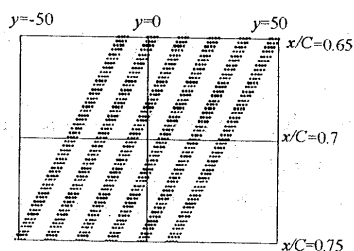


Fig. 1 3D boundary layer structure and its coordinates

Fig.2. Critical value K_2 for the onset of the high frequency secondary instability f_2 . ($U_\infty=15\text{m/s}$, $Re_c=8.0 \times 10^5$)Fig.5. Transition characteristics for distributed suction ($U_\infty = 12.3\text{m/s}$)

(a) Suction holes



(c) Arrangements of suction surfaces

Fig. 3. Details of the suction system

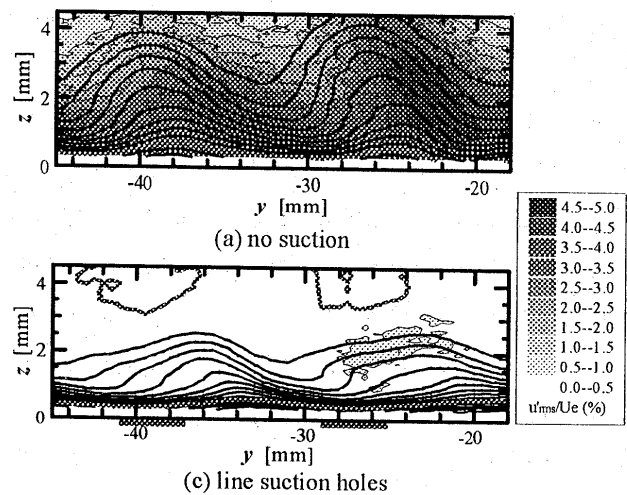


Fig. 4. Cross sectional measurement of velocity and turbulence intensity profiles for different suction surfaces.

(velocity contour line step: 5% of U_e ,Bandpass filter range : 1.25-3kHz for disturbance f_2 , $x/C=0.79$, $U_\infty = 12.3\text{m/s}$, Suction volume $0.045\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$,

~~~~~ indicates suction positions)