

弱い主流乱れにおける境界層遷移について

松原雅春, 高市皓太 (信州大), 剣地利昭 (岐阜高専)

Boundary layer transition subjected to weak free stream turbulence

M. Matsubara*, K. Takaichi*, and T. Kenchi**

* Dept. of Mech. Systems Eng., Shinshu University,

** Dept. of Mech. Eng., Gifu National College of Technology

ABSTRACT

Process of boundary layer transition due to free stream turbulence strongly depends on properties of the free stream turbulence. In this report, the primary instability in a weak free stream case is experimentally identified as locally generated Tollmien-Schlichting waves. This disturbance immediately breaks down with its deformation to the three-dimensional structure of the L shape and turbulent region starts to propagate in both streamwise and spanwise directions with forming a turbulent spot. Modal disturbances have chance to trigger the boundary layer transition induced by weak initial disturbance in the free stream.

Key Words: transition, boundary layer, free stream turbulence, T-S wave, streaky structure

1. はじめに

比較的大きい主流乱れの場合, 平板境界層における乱流遷移は流れ方向に伸びたストリーク構造によって引き起こされることが明らかとなっている^{1,2,3)}。しかし, 主流乱れが 1%以下の場合の遷移過程は十分に解明されていないと言える。そこで本研究では乱流格子を整流用ノズルの上流に設置して弱い主流乱れを発生させ, 平板境界層の遷移過程を流れの可視化および熱線計測によって調べた。

2. 実験方法

本実験は幅 400 mm, 高さ 600 mm の長方形断面形状で, 長さ 4 m の試験部を有する回流型風洞で行った。流れはメッシュとハニカムによって整流された後, 試験部手前に設けられた三次元ノズルによって縮流比 9 で絞られて試験部に入る。長さ 2.1 m, 幅 580 mm, 厚さ 10 mm ジュラルミン製試験平板を試験部の側壁から 100 mm 離れた位置に鉛直に設置されている。平板前縁は短辺長 20 mm の 10:1 の楕円形状で, その先端はノズル出口より 1250 mm 下流に位置している。試験板と対面する可動壁と試験板の後端のフラップは主流の圧力勾配がないように調整されている。

乱流格子は格子間隔 120 mm, 格子棒は直径 13 mm の円形パイプで, 前縁から 3800 mm 上流のノズル入口にとりつけられている。主流流速 $U_0=14$ m/s とし, そのときの前縁と同じ流れ方向位置での主流の乱れは, 流れ方向変動成分で $u_{rms}=0.0020U_0$, 垂直変動成分で $v_{rms}=0.0030U_0$ である。

流れの可視化のために, 前縁から 210 mm 下流の位置に幅 2 mm のスパン方向スロットを設け, そこから静か

にアルコールミストを挿入した。動画撮影は 0.31 メガピクセル, 毎秒 120 フレームのデジタルビデオカメラを用い, 光源にはハロゲンライトを使用した。流速測定には, 直径 2.5 μ m, 長さ 1.5 mm の白金線をセンサとする熱線流速計を用いた。熱線センサーは 3 軸のロボットアームに取り付けられ, 流れ方向, 壁面垂直方向, スパン方向に移動できるようになっている。

3. 実験結果

流れの可視化の結果を図 1 に示す。主流方向は左から右で, 可視化範囲は $435 \text{ mm} \leq x \leq 905 \text{ mm}$ である。写真には, やじり形の乱流斑点が見られ, 上流側には Λ の形をした構造がいくつか観察される。この主流乱れの場合, 高い主流乱れの場合と違ってはっきりとしたストリーク構造は見られないが, うっすらとした流れ方向に並んだ縞模様が確認できる。

Λ の形の構造をした攪乱の時間発展を見るため動画による連続写真を図 2 に示す。可視化範囲は図 1 と同じで, 時間間隔は 8.3 ms である。(a)では流れ方向に波数を持った構造が局所的に現れはじめ, (b)でそれが Λ 構造に変形し, (c)でははっきりとした強い Λ 構造が確認できる。(d)ではこの構造が乱流に崩壊し, (e)のように乱流斑点として成長している様子がわかる。(a)で見られる流れ方向に波数を持った攪乱構造の波長及び位相速度をいくつかの動画から見積もと線形安定性理論での T-S 波の値とほぼ一致しており, この攪乱は局所的な T-S 波であると考えられる。また, Λ 構造はそのスパン方向のスケールが流れ方向波長と同程度でさらにその構造から, 二次元 T-S 波による遷移過程で見られる Λ 型攪乱であると推察される。



図1 弱い主流乱れによる境界層遷移.

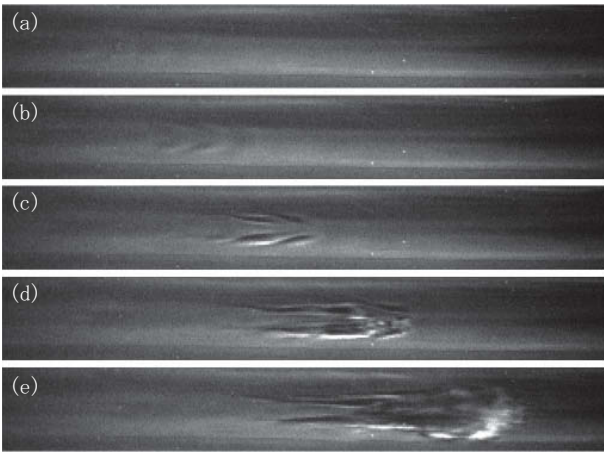


図2 攪乱の崩壊過程.

図3に熱線風速計による流れ方向の速度変動分布を示す。ここで δ^* は境界層の排除厚さである。初め、境界層中央で最大値を持つなだらかな速度変動分布を示し、下流に行くにつれ、速度変動が増加していることがわかる。この速度変動分布はストリーク構造を持つ攪乱の場合とよく似ており、弱い主流乱れの場合でも non-modal な攪乱が成長していることが示唆される。 $Re_x=6.5 \times 10^5$ より下流では壁近くで速度変動が急増している。流れの可視化の

結果と考え合わせると、これは局所的に発生した T-S 波攪乱のためと推察される。さらに下流の $Re_x=11.2 \times 10^5$ では乱流境界層とよく似た分布となっていることがわかる。

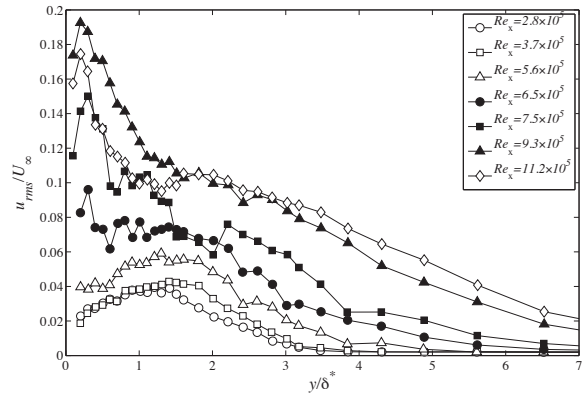


図3 流れ方向の流速変動分布.

4. おわりに

ノズル上流に設置した乱流格子により、弱い主流乱れを発生させ、平板境界層内の遷移過程の観察と速度測定を行った。流れの可視化による観察では、局所的な T-S 波が発生し、 Λ 型攪乱に変形した後に崩壊して乱流斑点へと遷移することが確認された。このことから、境界層遷移には、流れ方向に引き伸ばされたストリークによる遷移に加え局所 T-S 波による遷移による過程も存在することがわかった。

参考文献

- 1) M. Matsubara, P. H. Alfredsson: J. Fluid Mech., 430 (2001), pp. 149-168.
- 2) R. G. Jacobs, P. A. Durbin: J. Fluid Mech, 428 (2001), pp. 185-212.
- 3) J. H. M. Fransson, M. Matsubara, P. H. Alfredsson: J. Fluid Mech., 527 (2005), pp. 1-25.