

境界層外部に導入した局所攪乱が遷移に及ぼす影響

福西祐, 鈴木芳宗, 茂田正哉, 伊澤精一郎(東北大工)

Effect of Outer Local Disturbance on a Boundary Layer Transition

Y. FUKUNISHI, Y. SUZUKI, M. SHIGETA, and S. IZAWA

Dept. of Mech. Eng., Tohoku University

ABSTRACT

The effect of a localized disturbance outside a boundary layer on the transition is investigated by a wind-tunnel experiment. The disturbance is introduced by a turbulence generator which consists of two vortex-ring-generating units arranged face to face along the spanwise direction in the freestream. Each vortex-ring-generating unit issues intermittent jets that soon roll up into vortex rings. The two rings each from a vortex-ring-generating unit collide outside the boundary layer generating a velocity fluctuation pattern of high-speed and low-speed regions, with the high-speed region on the downstream side. An opposite pattern appears inside the boundary layer near the wall. In the high-speed region inside the boundary layer, a generation and a growth of random velocity fluctuations are observed. The velocity fluctuation grows downstream and triggers the transition to turbulence.

Keyword: Transition, boundary layer, wind tunnel

1. 緒言

平板境界層の乱流遷移において一様流中に含まれる乱れの受容過程が遷移に大きな影響を及ぼすことは知られているが、一様流中の乱れが平板前縁から取り込まれるのか、境界層外縁から直接取り込まれるのかを区別せずに議論されることが多い。それを区別するため大野ら¹⁾は、導入した乱れが平板前縁で受容されることがないように前縁より下流の境界層外部に乱れを付加する丸棒などを設置して実験を行い、平板境界層の遷移に及ぼす外乱の影響について調べた。使用した丸棒の側面には数個の小孔があり、その孔からジェットを噴射させることで通常の方法と異なる方法で乱れが導入される。その結果、いずれの場合においても境界層内にピーク・バレー構造が励起された。また Shigeta ら²⁾は、丸棒からのジェットの噴射角度を変化させることで一様流中へ導入する乱れを変化させ、下流へ向かってジェットを噴射した場合と上流へ向かってジェットを噴射した場合とでは、境界層の乱流遷移過程が異なることを報告した。しかしながら、これらの方法では外乱導入装置自身が主流にさらされているため、わずかではあるが基本流にその影響が現れている。

そこで本研究では、装置自身の影響をできる限り排除するためスピーカーと漏斗を組み合わせた2組の渦輪発生装置を新たに製作し、側壁側から間欠

的に発生させた渦輪を流路中央で衝突させることで、一様流中に局所的かつ等方的な攪乱の導入を図った。さらに、この乱れが平板境界層に与える影響についても実験的に調べた。

2. 実験装置および方法

図1に実験装置の概略図を示す。実験には吹き出し型の低乱風洞を用いた。一様流速度 U_∞ は 5m/s とした。このとき一様流中の乱れ強さ u_{rms}/U_∞ は 0.25 % 以下であった。座標系は平板前縁の中央に原点を取り、流れ方向を x 軸、壁面垂直方向を y 軸、スパン方向を z 軸とした。平板は全長 1,610mm、幅 490mm、厚さ 10mm のアルミニウム合金製で、表面が滑らかに仕上げられている。平板前縁部は一様流乱れの受容を抑えるために長短軸比 24:1 の

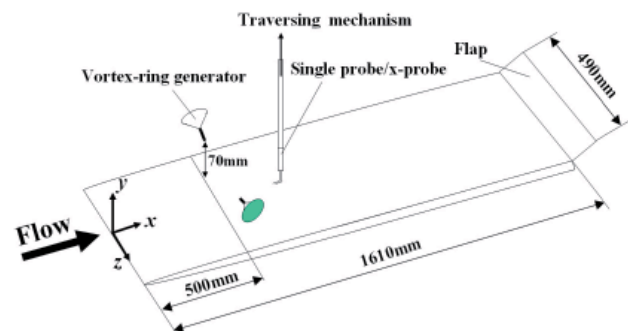


図1 実験装置

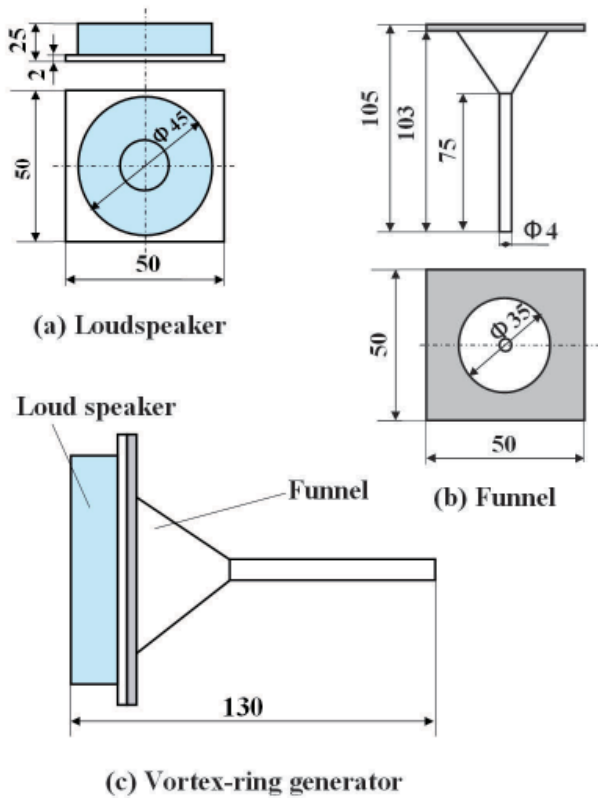


図2 渦輪発生装置

楕円形状となっており、前縁部と平板部の継ぎ目における曲率変化が滑らかになるように加工してある。平板後縁には長さ190mmのフラップを取り付け、前縁部のよどみ点位置を調節した。流れ場の測定には単線熱線プローブを用いた。測定範囲は $x=450\sim 900\text{mm}$, $y=1.0\sim 62\text{mm}$, $z=-40\sim 40\text{mm}$ である。

図2に渦輪発生装置の概略図を示す。渦輪発生装置はスピーカーと出口内径4mmの漏斗からなり、スピーカーを一定の周波数で駆動させて漏斗出口から間欠的に噴流を噴射する。図3にスピーカーへ送る信号を周期 $T (=10\text{ms})$ 、デューティー比0.5の矩形波として駆動した場合の噴流速度を示す。噴流は静止した大気中へ噴射され、噴射口下流80mmの位置において熱線プローブを用いて計測された。その結果、主流の2倍程度の速度で噴出されることわかった。

本研究では図4のように、この渦輪発生装置を向かい合わせに2個設置して同じタイミングで駆動させ、発生した渦輪を流路中央の主流中で衝突させた。2つの渦輪発生装置の噴射出口位置は、それぞれ $x=500\text{mm}$, $y=70\text{mm}$, $z=-60, 60\text{mm}$ である。各装置は鉛直下方に20度傾けて設置されており、噴射軸の延長線は $y=48.0\text{mm}$ で交差する。

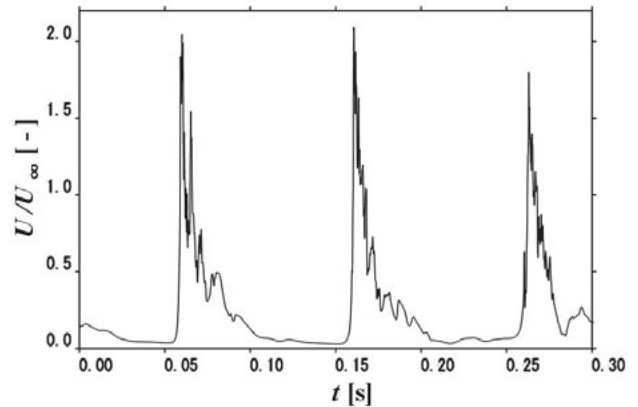


図3 渦輪発生装置による噴流の速度

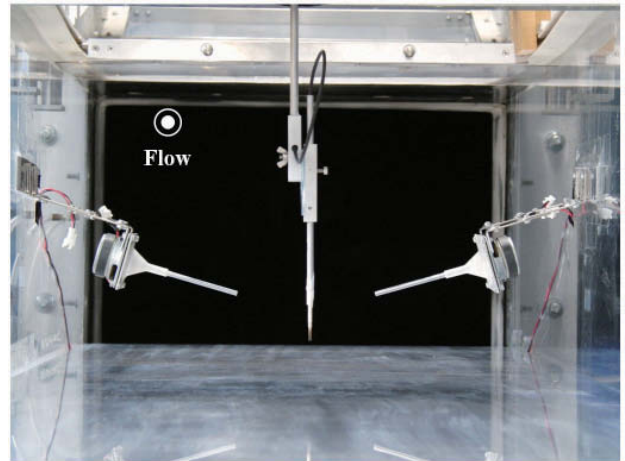


図4 局所攪乱生成装置

3. 実験結果および考察

図5に $x=550\text{mm}$ の $y-z$ 平面において計測された渦度の等値面 ($|\omega|=300\text{s}^{-1}$) を示す。図は、スピーカーの信号を基準信号として条件付き抽出を行いアンサンブル平均したデータに、テイラーの渦凍結仮説を適用して表示させたものである。この図から、渦輪対状の局所攪乱が一樣流中に間欠的に生成されており、当初期待したような局所等方な乱れを生成することなく、そのまま下流に流されて行くこともわかった。

図6に $x-y$ 平面における時間平均速度に対する速度変動のアンサンブル平均 $\langle u \rangle / U_\infty$ の分布を示す。図中の点線は境界層の外縁を表している。図において、境界層外部には導入された渦輪対による低速域と高速域が観察されている。これらは下流へ行くほど減衰するが、境界層内部には逆のパターンで高速域と低速域が生じている(図6(b))。これは、壁面では滑りなし条件を満たすべく渦度が生成され、そ

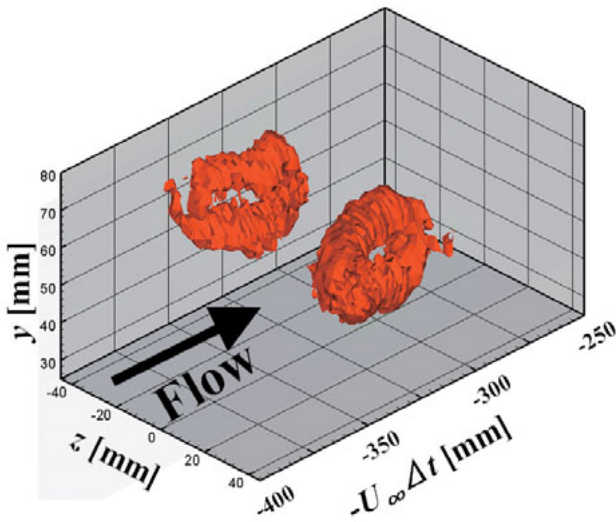


図 5 生成された外乱の渦構造 ($|\omega|=300\text{s}^{-1}$ の等渦度面)

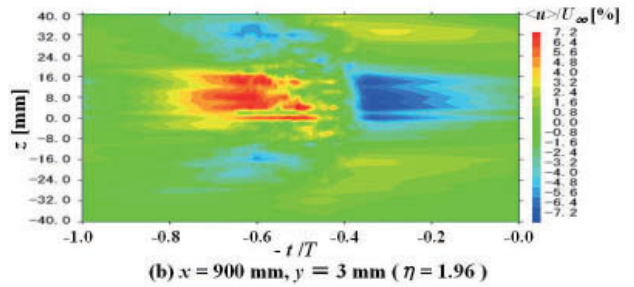
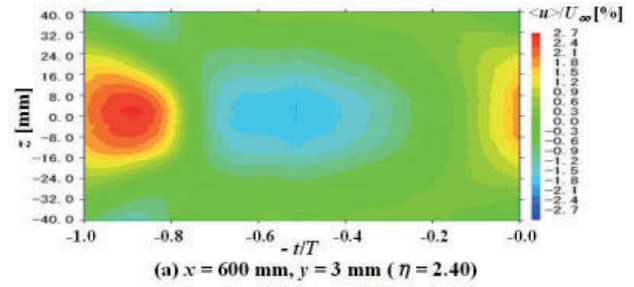


図 7 速度変動のアンサンブル平均値 $\langle u \rangle / U_\infty$ (z - t 平面, $y = 3 \text{ mm}$)

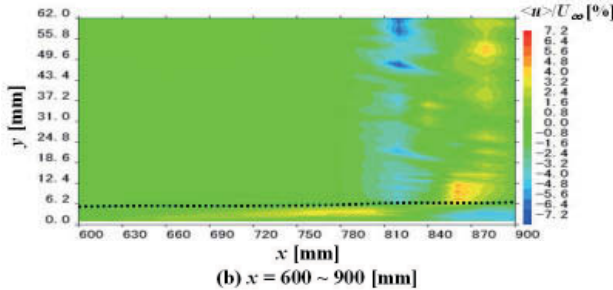
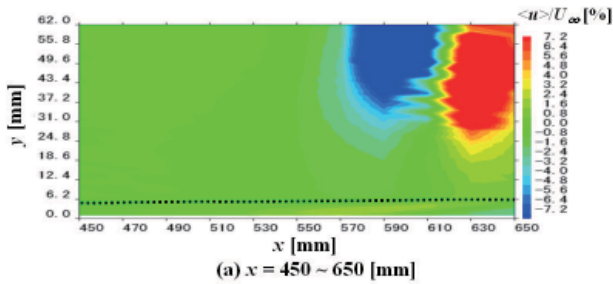


図 6 速度変動のアンサンブル平均値 $\langle u \rangle / U_\infty$ (x - y 平面, $z = 0 \text{ mm}$)

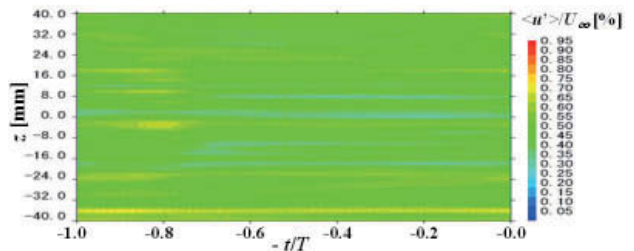


図 8 不規則成分強度 $\langle u' \rangle / U_\infty$ (z - t 平面, $x = 600 \text{ mm}$, $y = 3 \text{ mm}$)

れが渦層を形成して壁面付近に境界層外とは逆の速度変動パターンを発生させたためと考えられる。このとき境界層内の速度変動は、主流の 4.5 % 程度にも達していた。

図 7 にそれぞれ境界層内部である $(x, y) = (600\text{mm}, 3.0\text{mm})$, $(900\text{mm}, 3.0\text{mm})$ の位置における速度変動のアンサンブル平均値 $\langle u \rangle / U_\infty$ の時間変化を示す。 $x = 600\text{mm}$ で見られた規則的な速度変動パターンは下流で強度を増し、 $x = 900\text{mm}$ ではその大きさは一様流の 7.0% にも達している。本実験のように一定の間隔で渦輪が主流に乗って運ばれてくる場合、速

度場は渦輪の通過に伴って周期的に大きく変動する。このため、全時間平均に対して速度変動を定義すると、見かけ上乱れが非常に大きくなったように見えてしまう。そこで、寺島ら³⁾と同様に、全時間平均の代わりにアンサンブル平均に対しての変動成分を定義する不規則成分強度を乱れを表す指標として用いることにした。

図 8 および図 9 はその結果である。 $x = 600\text{mm}$ において、図 7 (a) では規則的な速度変動が観測されていたが、図 8 に示される不規則成分強度は小さい。一方で、図 9 に示される $x = 900\text{mm}$ では不規則成分強度が大きな値を示していることがわかる。また同じ $x = 900\text{mm}$ であっても高速域に対応する $-0.6 < -t/T < -0.4$ にのみ不規則成分が集中し、低速域にはほとんど乱れがないことがわかる。このとき、主流方向の不規則成分強度は主流の 10 % 以上であった。またスパン方向 (図 9 (b)) と壁面垂直方向 (図 9 (c)) の不規則成分強度もそれぞれ主流の

9%および 7%程度と大きな値を示していることから、高速領域は乱流状態にあると考えられる。

4. 結言

スピーカーと漏斗を組み合わせた装置によって主流中に導入された間欠的な渦輪対状の局所攪乱は下方の境界層内に流れ方向に並んだ高速域と低速域を励起した。そのうち上流側の高速域において乱れが生成され、下流で乱流に遷移することがわかった。

参考文献

- 1) 大野, 三木, 茂田, 伊澤, 福西: 第 85 期日本機械学会流体工学部門講演会論文集, (2007), pp. 37.
- 2) M. Shigeta, T. Ohno, S. Izawa, Y. Fukunishi: Proc. 12th Asian Congress of Fluid Mechanics, (2008), pp. 42.
- 3) 三木, 寺島, 茂田, 伊澤, 福西: 日本流体力学会年会 2006・講演論文集, (2006), CD-ROM.

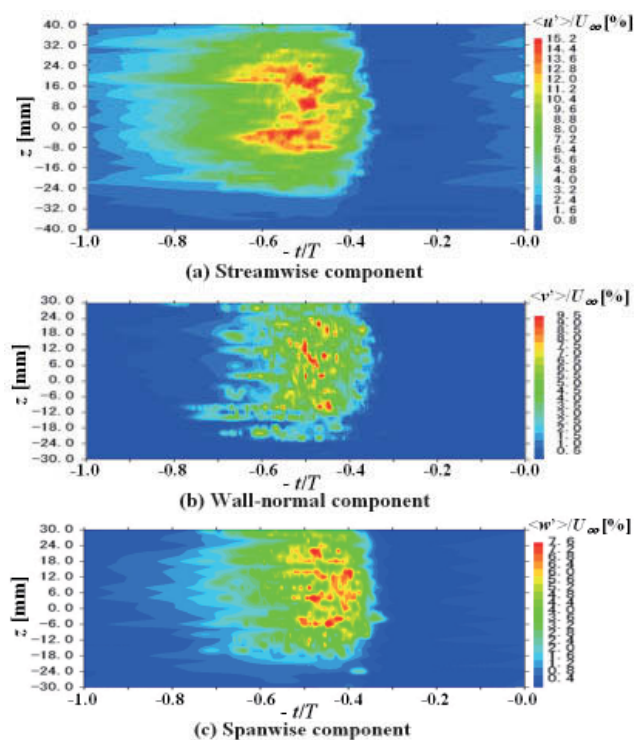


図9 不規則成分強度
(z - t 平面, $x = 600$ mm, $y = 3$ mm)
(a) $\langle u' \rangle / U_\infty$, (b) $\langle v' \rangle / U_\infty$, (c) $\langle w' \rangle / U_\infty$