

No. 21

境界層における層流と乱流の流れ方向界面に関する研究

寺島 修, 三木 佑介, 伊澤 精一郎, 熊 鰲魁, 福西 祐 (東北大工)

Study of Laminar/Turbulent Streamwise Interfaces in a Boundary Layer Flow

O. Terashima, Y. Miki, S. Izawa, A. K. Xiong and Yu Fukunishi

Dept. of Mech. Eng., Tohoku University

ABSTRACT

Streamwise interfaces between laminar and turbulent regions in a flat-plate boundary layer are investigated using a rake of single hotwire probes. Two pieces of piezo-ceramic actuators are used to generate trapezoidal shaped turbulent regions, which have a wide leading edge in the spanwise direction. Its aim is to eliminate the contamination between the side interfaces and the downstream interface that are unavoidable in turbulent spot experiments. Experimental results show that a turbulent region has a sharp leading edge and a gradual trailing edge. It is shown that when a turbulent region passes by, the RMS value remains high for a while although there is little disturbance remaining. It is also shown that inside this region, known as the calmed region, because the flow returns laminar away from the wall, the turbulent flow near the wall is accelerated, which may be causing the inverse-transition.

Keywords : turbulent spot, calmed region, streamwise interface, boundary layer

1. はじめに

境界層の乱流への遷移のうちのバイパス遷移の典型的なものは、乱流斑点が生まれ、成長し、境界層中を埋め尽くすことで完了する。半世紀以上も前にその存在が確認された乱流斑点に関する研究は、実験および数値計算によって様々な角度から進められ、その基本的な性質はかなり明らかにされている⁽¹⁾。最近では、個々の乱流斑点が層流領域をどのように浸食していくのかという観点からの研究も進み、圧力勾配の大きさが乱流斑点の伝播に及ぼす影響⁽²⁾や、乱流斑点の合体と乱流領域の成長の関係⁽³⁾などについての報告がなされている。われわれのグループでも、稲澤⁽⁴⁾が、ピエゾアクチュエータを用いて平板上にくさび状の乱流領域を励起し、乱流領域と層流領域のスパン方向の界面構造を条件付き抽出法とアンサンブル平均処理により調べ、乱流領域が層流領域へせり出す瞬間には壁面垂直方向に並ぶ一対の縦渦が存在し、この縦渦対により誘起される乱流領域から層流領域へ向かう流れが乱流領域の拡大をもたらしていることを明らかにした。

このように乱流領域の浸食メカニズムに関する知識は多くなってきているが、矢じり型の乱流斑点の場合前縁部は横の界面をも兼ねているため、その界面の本来の姿

を知ることはできない。そこで本研究では、乱流領域の前縁と横の界面を切り離して考えられるように、点源の代わりにスパン方向に十分な大きさをもったアクチュエータを用いて平板境界層中に間欠的に台形状の乱流領域を励起し、層流領域と乱流領域の流れ方向界面の構造について詳細に調べた。また、得られた結果を従来知られている乱流斑点の特徴と比較し検証した。

2. 実験装置

実験は吹き出し型の低乱風洞を用いて測定部を密閉型の状態で行った。本実験で用いた風速 $U = 5.0\text{m/s}$ における主流の乱れ強さ u'_{rms}/U は 0.25% 以下である。Fig. 1 に実験装置の概略を示す。平板は全長 1,800mm、幅 490mm、厚さ 10mm のアルミニウム合金製で、前縁部は長短軸比が 24:1 の楕円状に加工されており、前縁部と平板部の継ぎ目において主流乱れを受容しないように曲率変化が滑らかになるような工夫がなされている。また、測定部上部壁面は可動式になっており、平板上の圧力勾配がゼロになるように調整した。その際、流れが前縁近傍ではく離しないよう平板後縁に取り付けたフラップを操作した。座標系の原点は前縁部中央とし、流れ方向に x 軸、壁面垂直方向に y 軸、スパン方向に z 軸をとった。

本実験では、 piezoceramic actuator を用いて層流境界層中に乱流領域を間欠的に導入した。アクチュエータは、平板前縁から350mm の位置にその後縁がくるようにスパン方向に2枚並べて貼り付けた。1枚のアクチュエータの大きさは、幅40mm、長さ150mm、厚さ0.5であり、アクチュエータ端部の影響を取り除くため平板の端まで同じ厚さのダミーフィルムで覆われている。piezo actuator の駆動周波数は1Hz、印加電圧は80Vrms とした。このとき、アクチュエータの上流側30mm を両面テープで壁面に固定しているため、下流端が1Hzで上下する。アクチュエータが最も持ち上がったときの先端の高さは壁面からおおよそ2mm であり、これはこの位置における境界層厚さ $\delta_{0.99}$ の39%、排除厚さ δ^* の113%に相当する。なお、piezo actuator が静止した状態での流れは層流であり、上げたままの状態では、 $x=600\text{mm}$ において速度分布は十分発達した乱流の速度分布をとる。

流速の測定には単線の熱線風速計を用い、アクチュエータの駆動信号を基準信号として条件付き抽出とアンサンブル平均処理を行った。サンプリング周波数は5kHz である。さらに流れ方向の層流・乱流界面の様子を詳しく調べるため、 $y=1.0, 2.5, 4.0, 5.5, 7.0, 8.5\text{mm}$ の高さに計5本のプローブを取り付けた楕形のプローブ列を作成し、検出用プローブとして $x=750\text{mm}$ の位置に設置した。

3. 乱流領域の特定方法

本研究では、速度変動の強さではなく、その不規則性が大きい領域を乱流領域と定義している。すなわち、ある位置 x における速度分布 $U(t)$ を層流時の流速 U_l と速度変動 $u(t)$ に分解し、

$$U(t) = U_l + u(t) \quad (1)$$

不規則成分を速度変動 $u(t)$ のアンサンブル平均からのずれとして定義し、不規則成分強度 $\langle u'(t) \rangle$ を次式

$$\langle u'(t) \rangle = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i(t) - \langle u(t) \rangle)^2} \quad (2)$$

により算出する。ここで N はアンサンブル平均の回数であり、実験により 96 ~ 120 である。そして、この不規則成分強度が主流の2% 以上であれば乱流領域と見なすこととした。したがって、たとえ速度変動のRMS 値が大きいても、不規則成分強度が低ければ乱流領域とは見なさない。

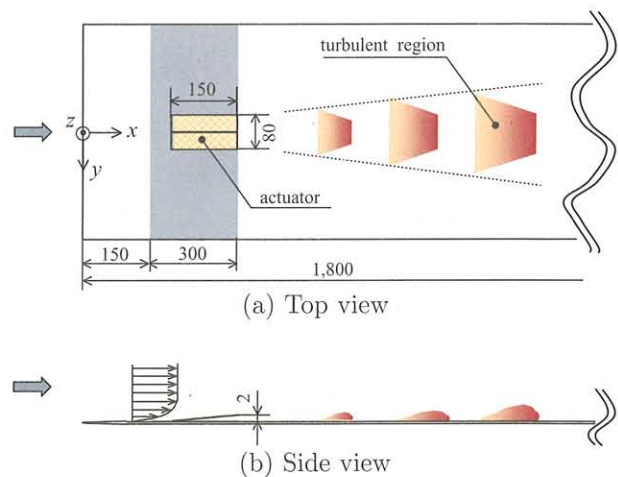


Fig.1 Experimental setup.

4. 結果と考察

Fig. 2 に、 $z=0\text{mm}$ における不規則成分強度を用いて判別した乱流領域を示す。ここで、 T はアクチュエータの駆動周期であり、測定領域 ($650 \leq x \leq 920$) における境界層厚さは、層流時 7 ~ 9mm、乱流時 10 ~ 18mm である。乱流領域の先端は $y=5\text{mm}$ 付近にあり、層流領域にせり出すように進んでいるのに対して、乱流領域の最後尾は壁面近くにあり、裾を引きずるように進んでいることがわかる。このとき、乱流領域のスパン方向への広がりを見てみると、Fig. 3 に示すように、乱流領域の前縁部はスパン方向にほぼ一様である。したがって、piezo actuator を用いたことによってスパン方向界面とは独立した流れ方向界面がねらい通り生成できていることがわかる。また、この図から乱流領域のスパン方向への広がり角を求めてみると10.12 度程度となっており、これは乱流斑点の広がり角とほぼ一致する。

Fig. 4 は、 $z=750\text{mm}$ における乱流領域の通過に伴う速度変化を表している。Fig. 2(a) に見られるように乱流領域は壁面から離れた位置からせり出しはじめるので、それにとまって、まず $y=5 \sim 8\text{mm}$ の高さの速度が急激に減少する。約 $0.01T$ 遅れて壁面付近の領域も乱流領域に取り込まれ、流速が急激に増加している。 $y=3.5\text{mm}$ の高さでは一旦速度が増加してから減少している。このような高さの違いによる流速の増減は、層流境界層と乱流境界層の速度分布の違いによるものである。これに対して乱流領域の後縁部では、前縁部のように $t/T \approx 0.12$ を境に速度変動と不規則度が急激にステップ状に増加することはなく、変動が大きいても乱れがないままの状態がゆるやかに層流の速度分布に回復していく。また、このとき壁面に近い領域では回復が遅い。このように、速度変動の大きい領域と不規則性が強い領域とは必ずしも

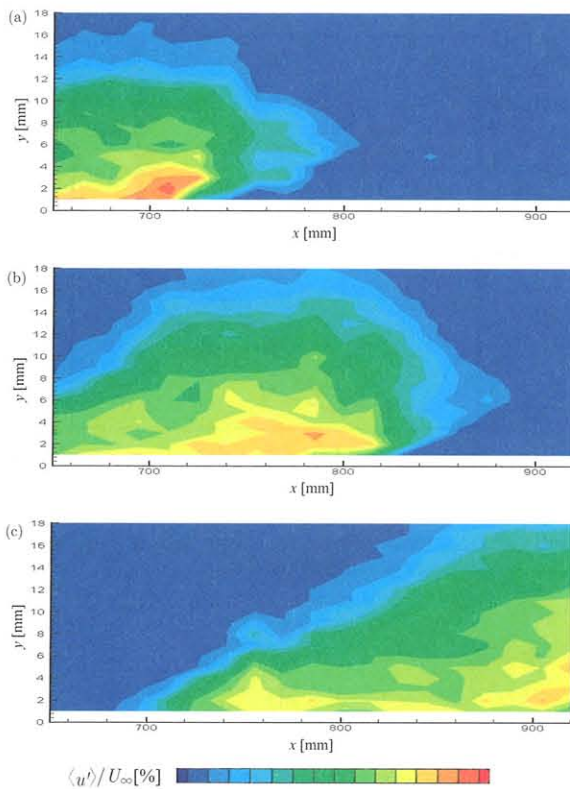


Fig.2 Contour maps of $\langle u' \rangle / U_\infty$ in xy plane at $z = 0$ mm and $t/T = 0.122$ (a), 0.140 (b) and 0.178 (c).

一致していない。両者を比較した場合、乱れの不規則性が強い領域を乱流領域と定義する本手法の方が妥当であると我々は考えている。

そこで次に、流れ方向および壁面垂直方向の複数の測定点における測定から得られた乱流領域のアンサンブル平均像をもとに、高さごとの界面の移動速度とその高さにおける局所流速の比較を試みた。その結果、励起された台形状の乱流領域前縁部界面の移動速度は $0.8U_\infty \sim 0.95U_\infty$ であり、過去の研究で測定されている乱流斑点前縁の移動速度とほぼ等しいことがわかった。一方、後縁部界面の移動速度は乱流斑点のそれよりも小さく、 $0.3U_\infty \sim 0.4U_\infty$ 程度であった。ただし後縁部では速度がゆるやかに回復する calmed region が存在するので、検出方法やしきい値の違いでこの移動速度の値は大きな影響を受けやすい。

Fig. 5 は、前縁部および後縁部界面の移動速度 U_{int} を局所平均流速 U と比較したものである。図中縦軸の η は、壁面からの高さ y を主流速度 U_∞ と平板前縁からの距離 x を用いて無次元化したものであり、 $\eta = y\sqrt{U_\infty/\nu x}$ がある。乱流領域の前縁部では、界面の移動速度は $\eta = 4$ 以下の領域で局所流速よりも速くなっており、その差は壁面に近づくほど大きくなっている。また、後縁部にお

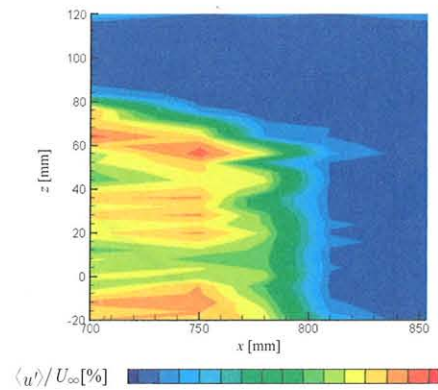


Fig.3 Contour maps of $\langle u' \rangle / U_\infty$ in xz plane at $y = 2$ mm and $t/T = 1.380$.

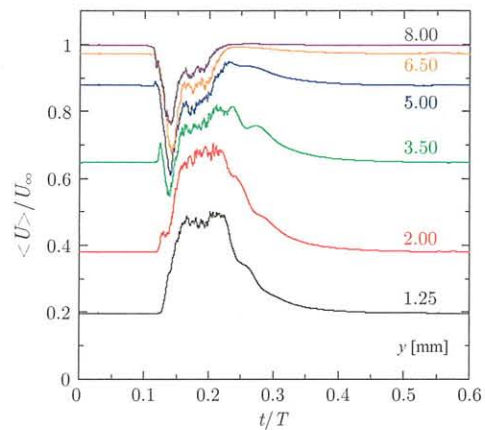


Fig.4 Ensemble-averaged signals of the rake of hotwire probes, $\langle U \rangle / U_\infty$, at $x = 750$ mm and $z = 0$ mm for the different distances from the wall.

いては、 $\eta \simeq 1.3$ を境に界面の移動速度と局所流速の大きさが逆転している。したがって、層流・乱流界面を通しての流体の移動に注目すると、前縁ではどこでも界面を通して層流側から乱流側へと流体が流れ込んでいることになるが、後縁では壁面から離れた領域ではやはり層流側から乱流側へと界面を通しての流体が流れ込むのに対し、壁面近傍では界面を通して乱流領域から層流領域に向かって流体が移動している。すなわち乱流状態にあった流体が界面を通過して層流化していることになる。

Fig. 6 は、境界層の速度分布が乱流領域の通過に伴いどのように変化するかを調べた結果である。Fig. 4 に示した熱線の出力波形からも明らかなように、乱流領域のせり出しによって壁面から離れた $\eta = 4.0$ 付近の速度分布が大きく変形している ($t/T = 0.122$)。これはこの高さでは乱流部分の速度勾配が大ききことによる。さらに乱流領域の浸食が進むと、速度分布は乱流境界層の速度分布に近づく ($t/T = 0.140$, Fig. 2(b))。その一方で、乱流領域後縁部では壁面から離れた場所が先に層流となるため、

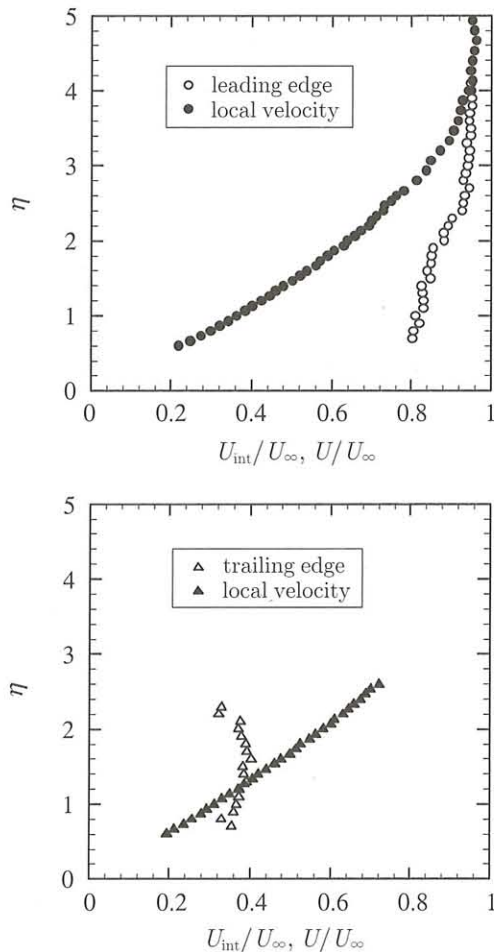


Fig.5 Propagating velocity of the laminar/turbulent interface compared to the local velocity.

(Fig. 2(c)), 境界層の外縁から速度勾配が緩やかとなる ($t/T = 0.178$)。その結果壁面近くの乱流領域は加速を受け、乱流型速度分布が右へとシフトする形になる。同様の結果は、Johnson の乱流斑点を対象とした数値シミュレーション⁽⁶⁾においても報告されている。このように乱流領域後縁部の再層流化が起きている領域は増速領域になっており、壁面近傍で引き起こされるこの局所的な加速がこの領域で乱流状態の流体が再層流化する原因である可能性が高い。

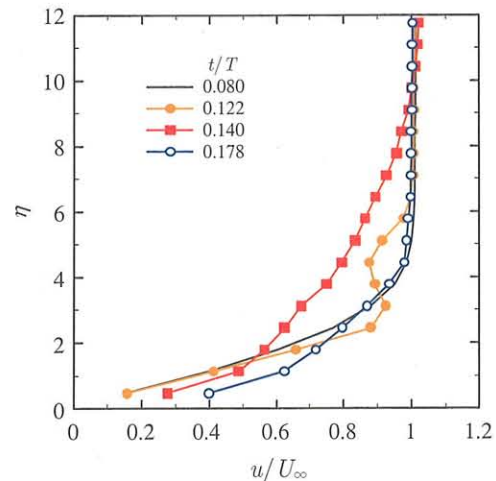


Fig.6 Streamwise velocity profiles accompanying the passing of a turbulent region.

5. まとめ

ピエゾアクチュエータを用いて、スパン方向に十分な大きさをもった台形状の乱流領域を平板境界層中に間欠的に励起し、層流領域と乱流領域の流れ方向界面の構造について調べ、以下の知見を得た。励起された台形状の乱流領域前縁部界面の移動速度は従来のくさび形の乱流斑点のものと同ほほ等しく、calmed region と呼ばれる後縁では、乱れはなく速度分布がゆるやかに層流の速度分布に回復する。この再層流化が起こる壁面近傍の乱流領域は増速領域にあり、ここでの流れの加速が乱流を層流化させる原因である可能性が高い。

参考文献

- 1) Riley J.J., Gad-el-Hak, M., *Frontiers in Fluid Mechanics*, Springer-Verlag (1985), 123-155
- 2) Chong, T.P., Zhong, S., *Journal of Thrombomachinary*, 127 (2005), 545-551
- 3) Makita, H., Nishizawa, A., *Journal of Turbulence*, 2 (2001), 1-14
- 4) Inasawa, A., *Ph.D. Thesis*, (2005)
- 5) Johnson, M.W., *International Heat and Fluid Flow*, 22 (2001), 409-416