

主流中の点源攪乱による境界層遷移

益田 重明* 浜田 慎悟* 伊藤 健二*

Boundary Layer Transition Caused by Point Disturbance in Free-Stream

Shigeaki MASUDA, Shingo HAMADA and Kenji ITO
Department of Mechanical Engineering, Keio University

ABSTRACT

Response of a laminar boundary layer to an impulsive point disturbance in free stream has been examined. The ensemble average of hot-wire signal showed the penetration of disturbance through the outer edge of the boundary layer. Growth of disturbance is most remarkable at the middle of the boundary layer thickness, though it decays before breakdown.

1. まえがき

主流中の乱れの前縁のように流れが急変する場所で、乱流化へのきっかけとして受容されることが知られているが¹⁾、前縁より十分下流で境界層外縁を通して侵入する攪乱も、同様のストリークパターンを描きながら乱流に遷移する様子は、実験室においてもしばしば見られる²⁾。応用面でも伝熱促進を目的として片側に乱流促進体を取り付けたチャンネルの対向壁上の境界層や、自由表面からの攪乱を受ける海底の境界層などの遷移はこの範ちゅうに属すると考えられる。

本研究では、二次元平板境界層の主流から加えられたパルスジェット型の点源攪乱に対する境界層の応答特性を、壁面上の点源攪乱に基づく乱流斑点の成長実験と同様の手法を用いて調べた。

2. 実験装置と方法

実験は測定部断面170mm×800mm、長さ2500mmの吸い込み式風洞に平板を設置し、主流速 $U_\infty=2.2\text{m/s}$ 、主流乱れ0.5%において行った。攪乱は図1に示すように風洞対壁から挿入した内径1.9mmのパイプからのパルスジェットとし、

口径47mmのスピーカーにステップ状の電圧を印可することによって駆動した。熱線流速計出力データは1kHzのローパスフィルタを通し、攪乱による流れの変化が終了し攪乱を与える前の状態に復帰するまで(1秒)、サンプリング周波数2kHzで収録し、その後スピーカ入力電圧をリセットした。これを1サイクルとして、合計100サイクル分のデータを収録した後、アンサンブル平均値、

$$\langle u(t) \rangle = \frac{1}{N} \sum_i^N u_i(t)$$

を算出した。攪乱の強さは攪乱を与えた x 位置での境界層外縁における速度変動の最大値で定義し、スピーカ入力電圧を変えることによって実現した。本実験では可視化実験において乱流斑点と同様パターンが観察された $0.5U_\infty$ (*strong disturbance*) および観察されなかった $0.36U_\infty$ (*weak disturbance*) の2種類について流速測定を行った。パイプの判流が外乱となって境界層遷移を早めることが懸念されたので、測定領域の下流端 ($x=0.88\text{m}$) における平均流速分布 $U(y)$ がパイプを挿入しただけでは変化しないことを確かめた。

流速測定には定温度型熱線流速計を使用し、センサ長1

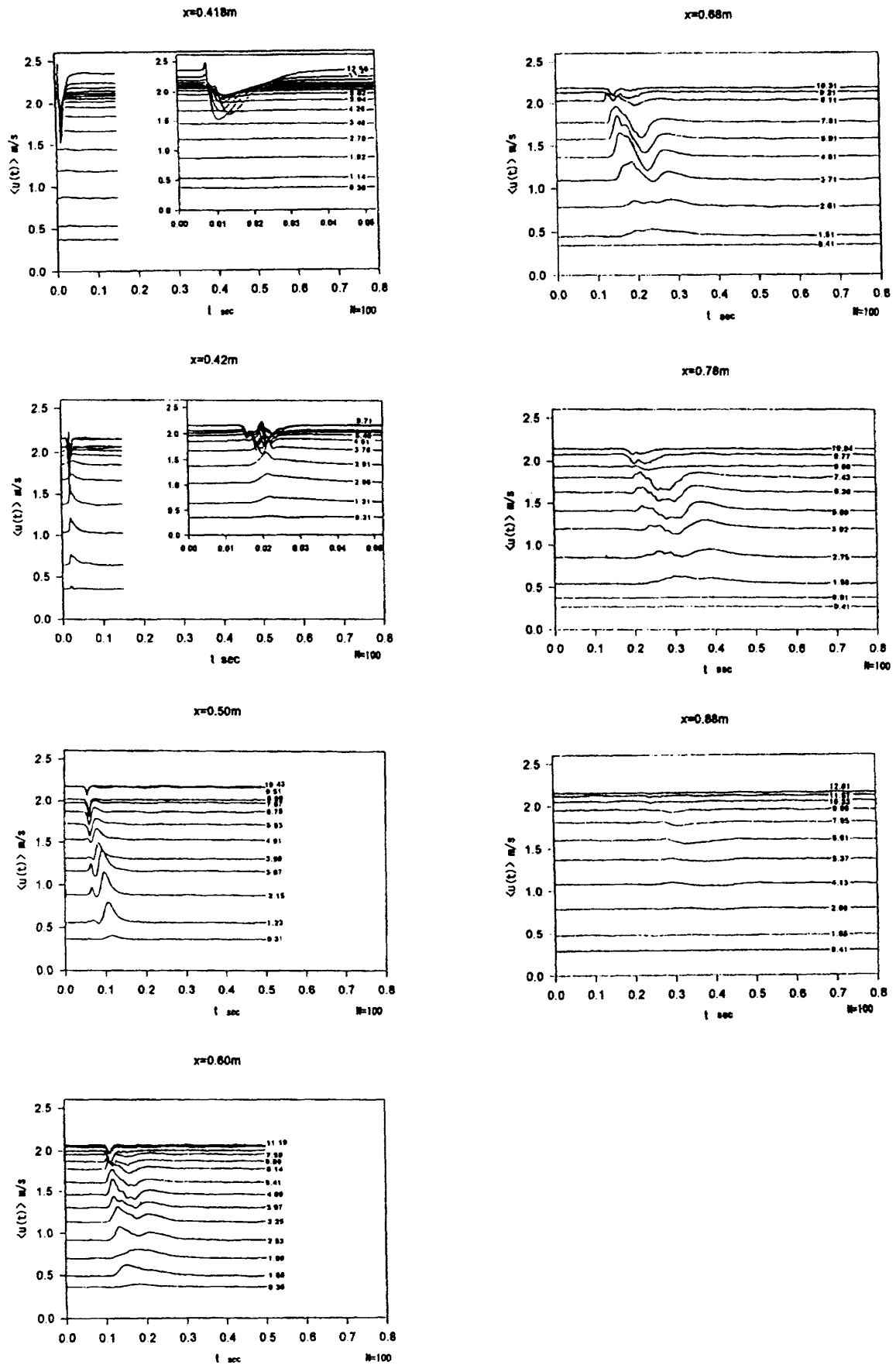


図2 アンサンブル平均の速度変化 (weak disturbance)

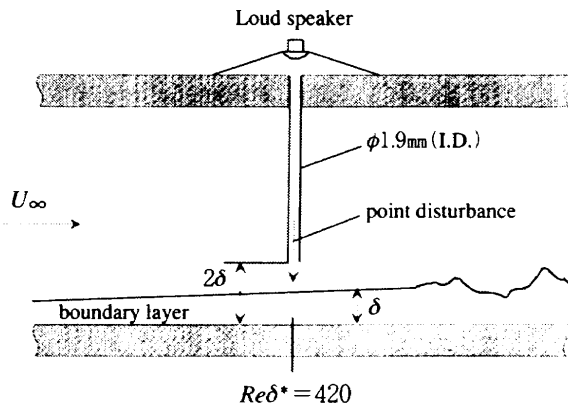


図1 実験装置

mm, 直径 $5\mu\text{m}$ のI型熱線プローブを $z=0\text{mm}$, $x=0.418\sim 0.88\text{m}$ において y 方向に移動させて行った。移動装置には手動マイクロメータ(移動精度 $5\mu\text{m}$)を使用し, y の原点はプローブに固定された位置決め用探針の壁面への接触によって定めた。攪乱を与えた x 位置における排除厚さ基準のレイノルズ数 $Re_{\delta^*}=420$ である。

3. 実験結果

図2は*weak disturbance*の場合の流速の時刻歴のアンサンブル平均値である。外乱を与えた x 位置($x=0.418\text{m}$)について見ると境界層外縁付近において(ブラジウス理論により見積もった境界層厚さは $\delta=8.4\text{mm}$)、約 20ms にわたって急減速に続く緩やかな加速が認められ、速度変化の大きさは壁面に近づくにつれて減少し、 $y<0.7\delta$ の範囲では反応はまったく認められなくなる。しかし、攪乱源よりわずか 2mm 下流の $x=0.42\text{m}$ では境界層内部に主流側とは逆の加速→減速のパターンが現れ始める。この兆候は最も壁面に近い測定点にまで達しているが、速度変化は境界層厚さの中央付近で最も大きい。この加速・減速ピークは、 $x=0.5\text{m}$ ではさらに成長するがこのほかに第2の加速・減速ピークが第1のピークに先だって現れ、以後第1ピークは減衰するのに対して第2ピークは急速に成長する。この状況は $x=0.68\text{m}$ 付近まで続くが、その後減少して $x=0.88\text{m}$ ではどの y 位置でも速度変化は見られなくなる。なお、主流での速度変化は下流に向かって単調に減少する。以上の一連の結果から、主流中の点源攪乱の場

合、 $0.36U_\infty$ というかなり強い攪乱でも境界層内で新たな不規則変動を生み出す機構には結びつかず、乱流遷移を導かないことを示している。なお、可視化実験において乱流斑点と同様のパターンが観察された*strong disturbance*の場合でも、アンサンブル平均で見ると基本的な傾向は*weak disturbance*の場合と同様であったが、各 x 位置で速度変化が始まる時刻と終わる時刻から見積もった攪乱の伝播速度やスパン方向中央断面における等速度線の形状など、壁面上の点源攪乱により発生した乱流斑点と良く似た結果が得られた。

Butler and Farrell (1992) は $Re_{\delta^*}=1000$ の場合について、種々の線形攪乱の時間発展を調べ、スパン方向にのみ周期性を持つ純三次元攪乱がすべての攪乱の中で最もエネルギー増幅率が大きいこと、増幅率は流れ方向にのみ周期性を持つ純二次元攪乱($T-S$ 波)の50倍以上に達すること、その場合でも線形の範囲で論ずる限りやがて極大値に達した後、再び減衰し乱流には至らない(*transient growth*)ことを明らかにした。本実験で与えた攪乱は点源攪乱であり、主流速の36%と強く、レイノルズ数も異なる等、Butler and Farrell の条件とは一致しないため定量的な比較は出来ないが、一端成長した後減衰するなど定性的な共通点が見られる。

4. 結論

臨界レイノルズ数において主流から加えられた点源攪乱は、境界層外縁を通して境界層内部に侵入し、境界層厚さの中央付近で最も高い増幅率を示す。しかし、境界層外縁で主流速の36%という大きな速度変化の場合でも、一度増幅した後再び減衰し、乱流には至らないことが分かった。

5. 参考文献

- 1) Nishioka, M. and Morkovin, M. V., J. Fluid Mech. 171 (1986), 219–261.
- 2) 清水, 益田, 機論 (B) 59–565 (1993), 2769–2776.
- 3) Butler and Farrell, Phys. Fluids A, 4–8 (1992), 1637–1650.