

自然遷移中に現れる縦渦構造と Transient growth の関連性について

松原 雅春 P.H. Alfredsson

Relevancy between streaky structures in natural transition and transient growth theory

by

Masaharu Matsubara* and P. Henrik Alfredsson**

*Tohoku University,

**Royal Institute of Technology

ABSTRACT

Investigation of natural transition has been done in a flat plate boundary layer subjected to free stream turbulence using hot wire anemometry. Upstream of turbulent spots generation low frequency components of velocity fluctuations in a boundary layer are much larger than in free stream while high frequency components are damped. The wall-normal position of the maximum fluctuation corresponds with the maximum amplitude of the transient growth perturbation, and energy of disturbance linearly increases with distance from the leading edge but not exponentially. These results suggested that the primary instability in the natural transition corresponds to streaky structures predicted by the transient growth theory. This instability has notably different character from modal perturbations such as the Tollmien-Schlichting waves.

Key words: boundary layer, natural transition, free stream turbulence, transient growth

1 はじめに

主流乱れが数%程度の場合、境界層遷移は従来考えられていた Tollmien-Schlichting 波 (以下 T-S 波) から始まる遷移過程と異なり、遷移の初期段階ですでにストリーク構造が重要な役割を演じていることが、流れの可視化¹⁾により明らかになった。ストリーク構造は、スパン方向に境界層厚さの約2倍、流れ方向に極めて長いスケールを持つ。このストリークが下流でスパン方向に振動を始め、その直後、乱流に崩壊しそこから乱流斑点の成長が開始する。この場合、遷移過程で T-S 波は観察されないうえ、このようなスパン方向に波長を持つ攪乱の成長は、従来の線形理論における Squire の定理と矛盾する。

一方、従来の線形理論では流れ方向に対する解の相似性を仮定しているが、その仮定を用い

ない場合には、T-S 波とは全く別の性質や構造をもつ攪乱がより速く成長することが理論的に示されている (例えば²⁾)。このような攪乱の成長は粘性を考慮した場合に成長が急速ではあるが一時的なため Transient growth と呼ばれている。

ここでは熱線流速計による測定結果をもとに、自然遷移過程に現れる攪乱の構造や性質を明らかにし、さらに Transient growth 理論による予測との比較を行う。

2 実験方法および結果

実験は試験部断面 $0.8\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ を持つ大型回流風洞に長さ 2 m 幅 1.2 m の前縁付き平板を挿入し、その前縁 1.5 m 上流に乱流格子を取り付け主流乱れを発生した。前縁上 ($x=0\text{ mm}$) の主流乱れ強さ $Tu=U_{rms}/U_\infty$ は 1.5% で、主流流

速 U_∞ は 12 m/s である。

流速測定には白金製の I 型熱線プローブと二軸移動装置を用い、流れ方向に 24 点、壁垂直方向に 32 点、それぞれの位置で 1000000 点の流速データを 2.5 kHz でサンプリングした。

図 1 に、乱流斑点が発生する以前の境界層内と主流中における流速波形とそのスペクトル解析の結果を示す。主流中の波形に対して、境界層内の波形 (図 a) は低周波成分が卓越しており、高周波成分が弱まっているのが分かる。またこの波形のスペクトル (図 b) をみても、主流中に比べ境界層内で 200 Hz 以下の低周波成分が増加し、それ以上の高周波成分が減少している。これは境界層内で低周波攪乱が成長していることを意味している。特に数 Hz 程度の攪乱は、エネルギーで主流攪乱の 100 倍以上におよぶ。

図 2 に流れ方向流速の乱れ強さ u_{rms} を示す。乱れ強さは各流れ方向位置での最大値 $u_{rms,max}$ で割っている。壁垂直方向 y はブラジウス境界層の排除厚さ δ で無次元化してある。攪乱の分布は境界層外縁を除いて相似であり、境界層外側では主流乱れの一定値の落ち着く。実線は Transient growth 理論³⁾による最大成長率を持つ攪乱の振幅分布で、境界層外側を除いて乱れ強さ分布とよく一致していることが分かる。

図 3 に各流れ方向位置における乱れエネルギーの最大値 $E_{max} = u_{rms,max}^2$ と、その最大値をとる壁垂直方向の位置 y_{max} の流れ方向変化を示す。横軸は前縁からの距離に基づくレイノルズ数 $Re_x = U_\infty x / \nu$ である。乱れエネルギーは (図 a) Re_x に比例して増加するが、乱流斑点が発生し始める $Re_x = 10^6$ 付近で増加率が急激に増し最大値をとった後、遷移の終了とともに乱流値に近づく。Transient growth 理論によると、ある流れ方向位置の攪乱エネルギー E と初期攪乱エネルギー E_i の比 E/E_i は Re_x に比例することが知られており、境界層内での攪乱のエネルギーが Re_x に比例することは、このことと合致する。また、乱れが最大値をとる位置 (図 b) は乱流

斑点発生前では $y_{max}\delta = 1.3$ の理論値とほぼ一致し、乱流斑点の発生とともに壁方向に移動し遷移が終わると乱流値となる。

攪乱の成長による平均流速分布を図 4 に示す。ここでは乱流斑点が通過した時の流速は平均から取り除いている。図 a で流速分布と実線で示したブラジウス分布の比較すると、 $y\delta < 1.7$ でブラジウス分布よりわずかに加速し $y\delta > 1.7$ で減速する。平均流速の変化がわずかなことから、攪乱自体は数%の大きさに達しているものの、線形性が仮定できる程度の大きさであると思われる。図 b にはブラジウス分布との差 U_d を示す。縦軸は差の最大値 $U_{d,max}$ で無次元化してある。ブラジウス分布との差はほぼ同じ分布をとり、 $y\delta = 1.7$ で $U_d = 0$ になっている。 U_d の分布が相対的なのは、図 2 で示したような一定の振幅分布を持つ攪乱の非線形干渉により主流が歪まされていることを示唆している。

3 終わりに

主流乱れが数%程度の自然遷移の場合、可視化にみられるストリーク構造と思われる流れ方向に非常に長い波長を持つ攪乱が成長することが、流速測定の結果からも明らかになった。この攪乱のエネルギーの成長は指数関数的でなく前縁からの距離に比例して増加することや、乱れ強さの壁方向分布から、Transient growth 理論で予測される攪乱の成長が示唆される。しかしここでは示さなかったが、攪乱のスパン方向波長など Transient growth 理論と一致しない点もあり、実験と理論の両面にわたってさらなる研究が必要だと思われる。

参考文献

- 1) 松原, Alfredsson: 航空宇宙研究所 SP-36(1997). 5-8.
- 2) Hennigson, D. S.: In *Advances in turbulence V* (Benzi R., editor, 1995), 190-204. Kluwer.
- 3) Luchini, private contact (1997).

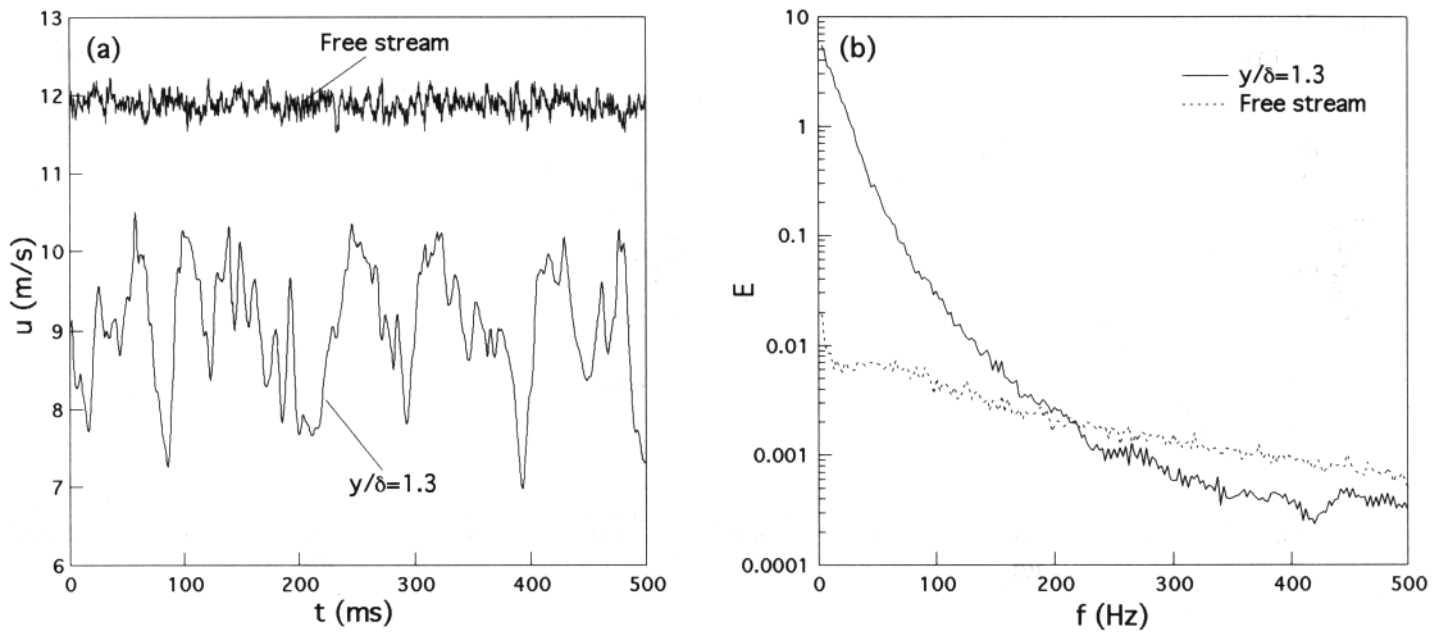


図 1 主流攪乱と境界層内攪乱との比較 ($x=700$ mm) (a) 流速波形 (b) スペクトル

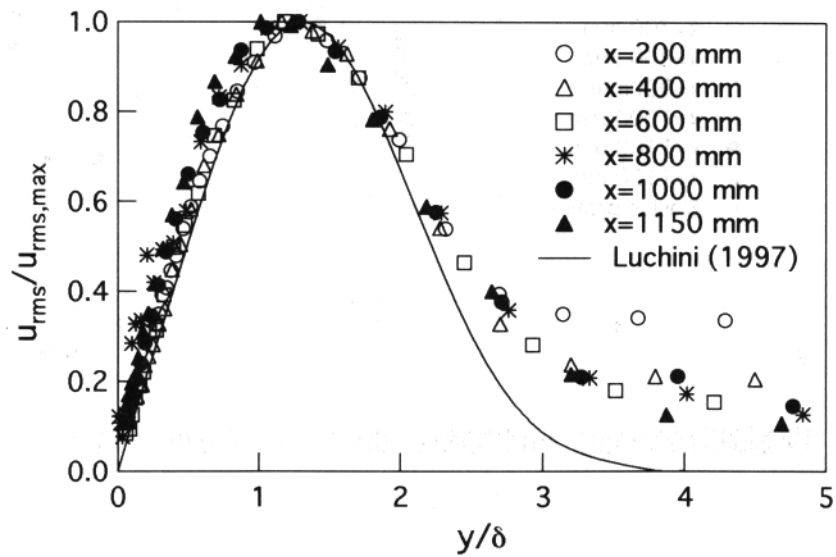


図 2 乱れ強さ分布と Transient growth 理論⁹との比較

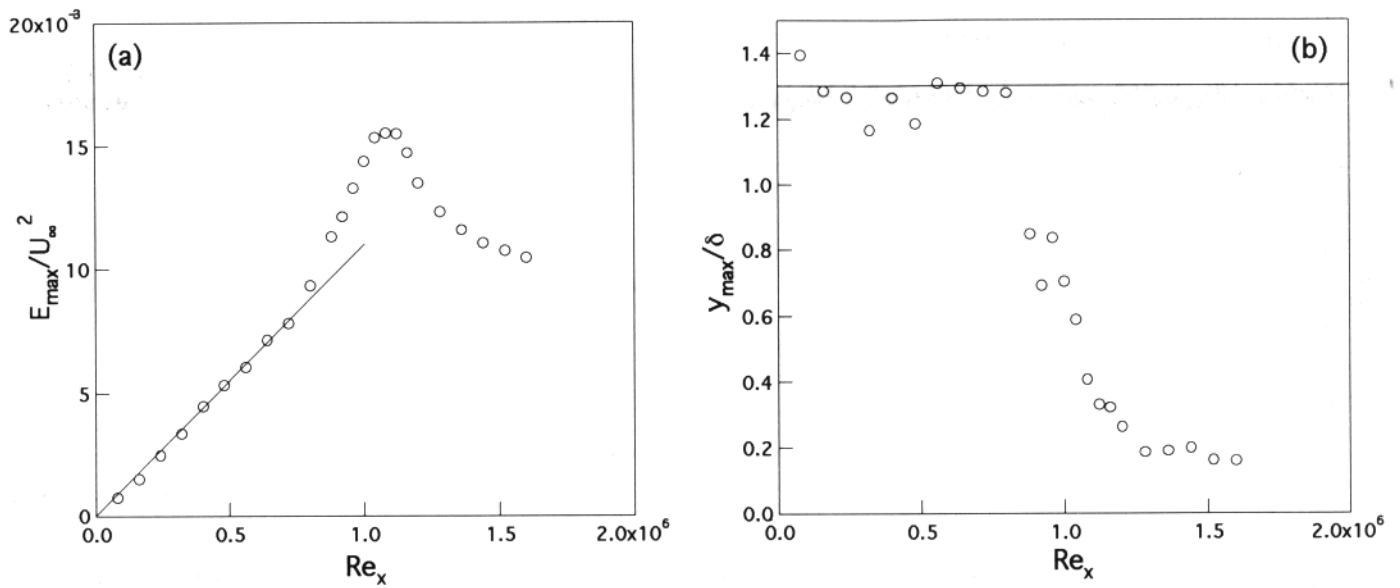


図 3 最大乱れエネルギーとその壁垂直位置の流れ方向変化 (a) 乱れ強さ、(b) 最大位置

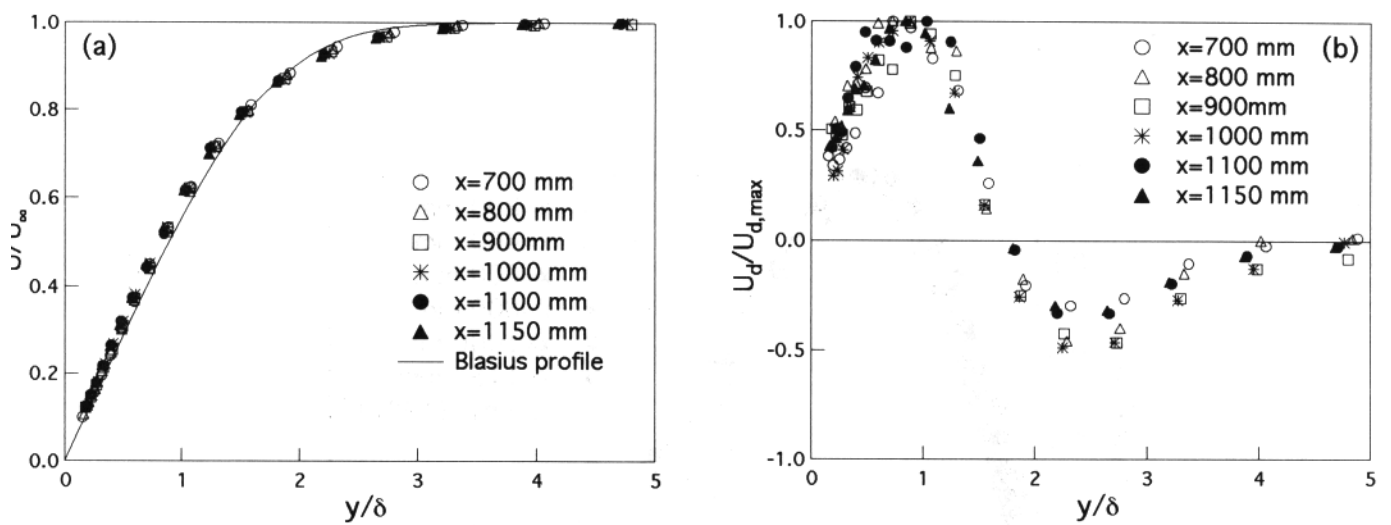


図 4 平均流速分布の変化 (a) 平均流速 (b) プラジウス分布との差