

低速ストリークの生成と崩壊

浅井雅人（首都大）

Generation and breakdown of low-speed streaks

Masahito Asai

Dept. of Aerospace Eng., Tokyo Metropolitan University

ABSTRACT

Two-dimensional local wall suction is applied to a developed turbulent boundary layer such that most of turbulent vortices in the original outer layer can survive the suction and cause the resulting laminar flow to undergo re-transition. Near-wall low-speed streaks which are once suppressed by the local wall suction soon start to grow downstream the suction. After attaining near-saturation the low-speed streaks soon undergo the sinuous instability to lead to re-transition. Even under high-intensity turbulence conditions, about half or slightly less than the turbulent intensity of developed wall turbulence, the sinuous instability amplifies disturbances of almost the same wavelength as predicted from the linear stability theory though the actual growth is in the form of wave packet with the number of wave periods not more than two. On the other hand, when low-speed streaks are artificially produced by using a periodic array of screen set immediately downstream of the suction trailing edge where turbulent fluctuations are as strong as in the developed wall turbulence, the streak breakdown is governed not by the linear instability process but by the transient disturbance growth.

Key Words: Transition, Low-speed streak, Streak instability, Transient growth, Wall turbulence

1. 序論

壁近傍乱流を支配している組織構造は、低速と高速の筋状構造が交互に並んだストリーク構造と、低速の筋（低速ストリーク）の蛇行と共にジグザグ状に重なり合って発達する縦渦群である。これらは互いに再生成サイクルを形成して乱流構造を維持しているというモデルが提案されている¹⁻³⁾。そのサイクルにおいて、ストリーク不安定が縦渦構造を生成する一つの重要な機構として注目されるが、一方では、発達した乱流場のように、乱れが強く、かつ様々なスケールの変動成分を含んでいる場合、変動の過渡増幅（Transient Growth）がストリークの崩壊に導く可能性が指摘されている⁴⁾。実際、壁乱流においてストリーク不安定が起きているのか、或いは一気に過渡増幅によるストリークの崩壊に至るのか、これまでのところ明らかにされていない。そこで、乱流変動に対して低速ストリークが如何に応答するかを境界層の再遷移実験を通して調べた。

2. 再遷移過程におけるストリークの発達と崩壊⁵⁾

図1に実験装置の概略を示す。乱流境界層に適切な強さの局所吸込みを行うことにより壁領域の乱流構造（ストリークや縦渦）のみを消滅させる。壁から離れた位置に存在していた渦は吸込まれずに存続し、元々乱流境界層のコアを形成していた強い乱流

変動が吸込み下流域でストリークを誘起し再遷移に導く。図2は、その様子を、壁近くで測定された速度変動の実効値 u' (x 成分) と w' (z 成分) の x 方向変化で示している：主流速度 $U_\infty = 4\text{m/s}$ 、吸込み領域は $-100\text{mm} < x < 0$ の範囲である。 u' は吸込み領域のすぐ下流から増幅し、一方 w' は $x=150\text{mm}$ 付近まで減衰を続ける。図2(b)は、PIVで測定された瞬間速度場 ($U+u$) の yz 面内分布 ($y=1\text{mm}$, 壁単位で約13)を示している。吸込み直後から低速ストリークが成長するのがわかるが、これが図2(a)の u' 成分の増加に対応し、乱流中の渦自身 (w') は減衰しながらストリークを誘起していく様子を示している。この新たに生まれるストリークのスパン間隔は元の乱流境界層のそれ（壁単位で80~100）とほとんど同じである。

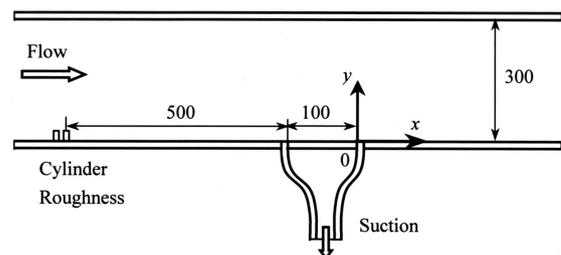


図1. 測定部の概要（単位 mm）。

ストリークが十分成長すると崩壊が起き縦渦が生まれるが、それは図 2(a)において $x=200\text{mm}$ 以遠で見られる w 変動の増幅に対応する。その様子は、図 3 の可視化写真に捉えられている。局所的にストリークの波打ち(波長約 20mm で 2 波長程度)が見られ、ストリーク不安定が起きていることが示唆される。その波長のヒストグラムを求めると、最頻値は壁単位で 300 程度である。これは、Schoppa & Hussain³⁾ の壁乱流の DNS 結果から抽出された低速ストリークの線形不安定の解析結果とよく一致する。

3. 壁乱流中の強い乱れによるストリークの崩壊

前節において、ストリーク不安定が起きる段階では乱流変動の強さは壁乱流時の半分程度以下にまで減衰していた。従って、壁乱流中においても同様のストリーク不安定が起きているのか、或いは一気に過渡増幅によるストリークの崩壊に至るのか、まだ明らかでない。そこで、この疑問に答えるために、吸込み領域のすぐ下流の $x=35\text{mm}$ 位置に、網片を周期的に並べ人工的に周期低速ストリーク⁶⁾を導入した。網片のスパン間隔は 7.6mm (壁単位で 100)、高さとは幅はそれぞれ 1.9mm と 2.5mm である。

図 4 は、スクリーン下の 10mm 下流 ($x=45\text{mm}$) において測定された $y-z$ 断面の平均速度分布 $U(x, y)$ と u 変動の実効値分布を表している。図のように、変動の分布は垂直剪断層上で大きな実効値をもつ Sinuous モードの分布を示している。図 5 は、各周波数成分の攪乱増幅を実効値の自乗(すなわちエネルギー)の x 方向変化で示している。ここで、 u'_{0-20} は 20Hz 以下の変動成分を表す。 100Hz 以下の周波数成分のいずれも増幅率はそれほど違いがなく、網の x 位置からわずか 15mm 下流の $x=50\text{mm}$ 付近で増幅がとまる。ストリーク間隔が 7.6mm (壁単位で 100) であることから、ストリーク間隔の 2 倍(壁単位で 200)しか増幅域が無い。その段階で実効値 u'/U_∞ は 14% に達する。また、最大振幅に達するまでのエネルギー増幅は x に比例した代数的増幅であり、いわゆる過渡増幅の特徴を表している。すなわち、ストリークの崩壊に導く変動の増幅は線形ストリーク不安定による指数関数増幅ではなく代数的増幅であり、ストリーク間隔の 2 倍程度の距離で最大増幅を示したのち減衰過程に入る。また、増幅率の周波数依存性も顕著でない。従って、壁乱流中のストリークの崩壊においては、過渡増幅機構の重要性とともに、攪乱として作用する乱流変動の強さや特徴がストリークの崩壊を強く支配することが示唆される。

引用文献

1) Jeong J., Hussain F., Schoppa W. and Kim J., J. Fluid Mech., 332 (1997) 185-214.
 2) Jimenez J. and Pinelli A., J. Fluid Mech., 389 (1999) 335-359.
 3) Kawahara G. and Kida S., J. Fluid Mech. 449

(2001) 291-300.

4) Schoppa W. and Hussain F., J. Fluid Mech., 453 (2002) 57-108.
 5) Asai M., Konishi Y., Oizumi Y. and Nishioka M., J. Fluid Mech. 586 (2007) 371-396.
 6) Asai M., Minagawa M. and Nishioka M., J. Fluid Mech., 455 (2002) 289-314.

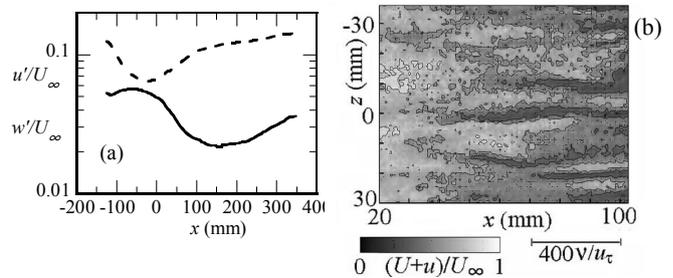


図 2. 変動の発達. (a) u' (破線), w' (実線), (b) 壁近傍の可視化. すべて $y=1\text{mm}$ で測定.

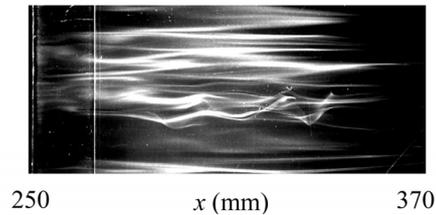


図 3. ストリーク不安定の可視化. スモークワイヤ位置 $(x, y)=(250\text{mm}, 1\text{mm})$.

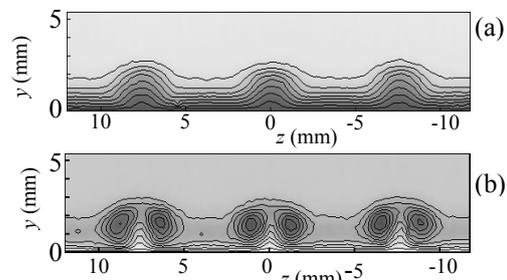


図 4. 平均速度 U と実効値 u' の (y, z) 分布 ($x = 45\text{mm}$). (a) $U/U_\infty = 0.1\sim 0.9$, (b) $u'/U_\infty = 0.015\sim 0.135$.

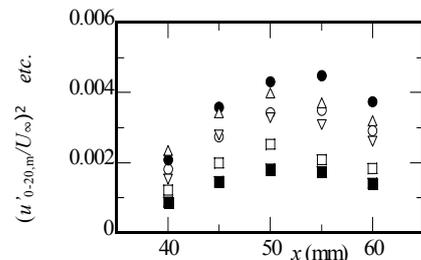


図 5. 変動の発達. $\circ (u'_{0-20,m}/U_\infty)^2$, $\bullet (u'_{20-40,m}/U_\infty)^2$, $\Delta (u'_{40-60,m}/U_\infty)^2$, $\nabla (u'_{60-80,m}/U_\infty)^2$, $\square (u'_{80-100,m}/U_\infty)^2$, $\blacksquare (u'_{100-120,m}/U_\infty)^2$ etc.