

No.14**壁乱流構造に対する境界層吸込みの影響：再層流化と再遷移過程**

浅井雅人（都科技大），星武志（トヨタ），田部井康一（都科技大院）

**Influence of boundary-layer suction on wall turbulence structures:
Laminarization and re-transition processes**

M. Asai*, T. Hoshi** and K. Tabei*

*Department of Aerospace Engineering, Tokyo Metropolitan Institute of Technology
**Toyota Motor Corporation

Boundary layer suction is applied to a turbulent boundary layer through a short porous strip to examine the development of near-wall coherent structures in the re-transition process downstream of the suction area. Low-frequency fluctuations are markedly suppressed near the wall during re-laminarization due to the suction, and they start to grow immediately downstream of the suction area, leading to wall turbulence. The growth of near-wall low-frequency fluctuations in the re-transition process is found to be associated with the appearance and meandering of near-wall low-speed streaks, which are responsible for the by-pass boundary-layer transition caused by high-intensity background turbulence.

Key Words: Turbulent boundary layer, Boundary-layer suction, Low-speed streaks, Transition

1. 序論

乱流境界層中に組織だった渦構造・渦運動の存在が見出されて以来、乱流組織構造の解明と制御に関して多くの研究がなされてきた^{1, 2)}。特に、壁近くには低速・高速領域が筋状に並んだストリーケ構造が存在し、壁乱流における組織渦の再生成過程に重要な役割を果たしていると考えられている。ストリーケ構造の形成は遷移過程においても乱流発生に先行して現れ、その崩壊により乱流の芽が生まれる^{3, 4)}。本研究では、そのような組織構造の生成機構の解明を目的として、乱流制御された境界層の再遷移過程において乱流構造の発達を詳細に調べている。乱流境界層に壁面から吸込みを行なえば乱流変動が抑制され層流化が起きることは周知である⁵。その場合、境界層吸込みによる層流化過程において乱流組織構造の成長がいかに影響を受けるのか、また、下流の再遷移過程においてそれらがどのように発達（復活）していくかは非常に興味深い。ここではこれらの点に注目する。

2. 実験装置及び方法

実験は、200mm×200mm 断面の小型吹出し式風洞の下壁上の境界層を利用して行なわれた。図1のように、測定部最上流には円柱群（直径3mm、高さ5mm）が2列並べてあり強制的に乱流に遷移させている。円柱群の400mm下流位置からスパン幅160mm、流れ方向長さ100mmにわたって吸込み領域がある。吸込み領域には直径0.3mm

の孔が1mm間隔で千鳥状に開けられており、絞り部をへてビニール管で流量計さらに空気吸入器（掃除機を利用）につながれている。吸込み流量は途中のバルブで調節される。座標系は、境界層吸込み領域の前縁を原点とし、流れ方向にx、平板上面に垂直上向きにy、スパン方向にzである。平均速度Uおよび変動uの測定は熱線風速計で、可視化はスモークワイヤ法で行なわれた。なお、瞬間の速度場の測定には5本組の熱線プローブ（スパン方向に2.5mm間隔）を使用した。実験はすべて主流流速U_∞=5m/sで行なわれた。

3. 実験結果および考察

境界層は吸込み部に達するまでに対数則に従

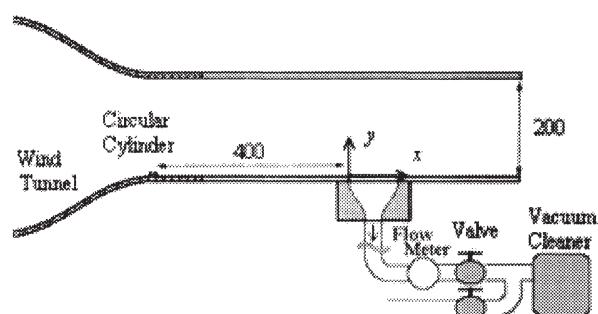


図1 実験装置。

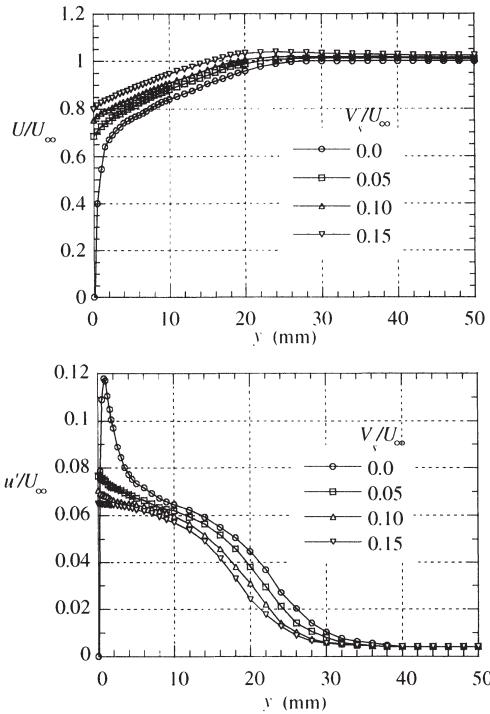


図2 平均速度 U と u' の y 分布： $x=20\text{mm}$ (吸込み領域上).

う速度分布をもつ乱流境界層に十分に発達しており、吸込み開始位置 ($x=0$) での運動量厚さに基づくレイノルズ数 R_0 は約 900 である。また、吸込み速度は吸込み領域の前後縁並びに両端の小領域を除きほぼ一様であることを確認した後、吸込み速度 V_s は流量を吸込み領域面積で割った平均吸込み速度で定義している。

図2と図3は、吸込み速度 $V_s/U_\infty = 5\%, 10\%, 15\%$ の場合について、吸込み領域 ($x=20\text{mm}$) および吸込み領域 ($x=0 \sim 100\text{mm}$) を通過後 ($x=140\text{mm}$) の平均速度分布 U および変動の実効値分布 u' を吸込み無しの場合と比較している。壁近傍の変動は平均速度成分と共にすぐに壁に吸い込まれ壁近くの実効値のピークが無くなるが、吸込み終了後にはすぐに壁近くの変動が成長を開始しもとの状態に回復していく。その壁近くの変動の減衰・回復を詳しく見るため、各吸込み強さについて u' のパワースペクトルを詳細に測定した。吸込み領域に入ると壁近くの低周波がすぐに減衰し続いて壁から離れた位置へと進行し、高周波成分はその後遅れて減衰を始める。また、吸込み領域を過ぎると低周波成分がすぐにかつ急速に復活していく。図4は、この様子を低周波 ($<100\text{Hz}$) と高周波 ($>300\text{Hz}$) 成分の u' の実効値の x 方向変化で表している。壁近くの低周波変動が減衰しそれが吸込み終了後すぐに成長する様子がわかる。ここで、 $x=140\text{mm}$ での R_0 は約 400 であり、境界層の亜臨界遷移⁸⁾の臨界値

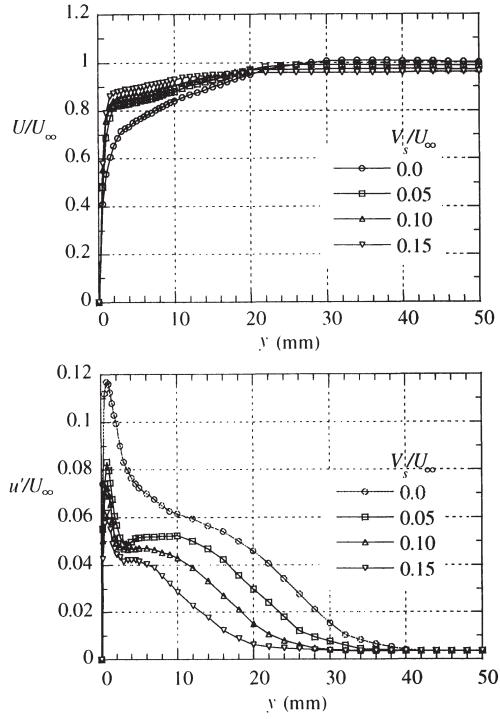


図3 平均速度 U と u' の y 分布： $x=140\text{mm}$ (吸込み領域の下流).

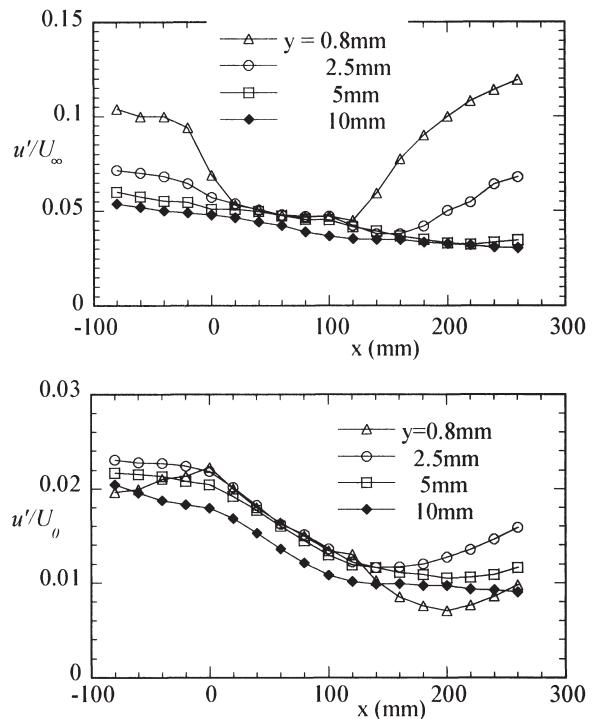


図4 低周波変動成分 ($<100\text{Hz}$) と高周波変動成分 ($>300\text{Hz}$) の実効値の x 方向変化。吸込み強さ $V_s/U_\infty = 10\%$. (a) 低周波成分, (b) 高周波成分.

(約 130) 以上であることを追記する。高周波成分の抑制は吸込み終了後もかなり下流まで続き低周波が十分な強さに回復するまで増大しない。

壁近くの低周波変動の抑制および成長はいわゆる低速ストリークの消滅・復活に関係していると推測され、また下流での高周波の成長は、ストリークが十分発達した後、その不安定^{6,7)}により生まれる組織渦(縦渦群あるいはヘアピン状縦渦対)の高周波変動への崩壊に対応すると考えられる。実際にストリーク構造の成長及び崩壊は、可視化と熱線プローブによる瞬間速度場の測定により明確に捉えることができる。図5は、図4に対応する流れの可視化写真であり、吸込みにより消滅したストリーク構造が下流で再び生まれてくる様子が見られる。また、図6は5本プローブ

で測定した壁近くの瞬間速度場であり、吸込みの無い場合と $V_e/U_\infty = 10\%$ の場合とを比較している。吸込みの無い場合、蛇行して寸断された低速ストリークがよく見られるが、吸込み後の壁近くにはかなり長くしっかりととした低速ストリークがまず現れ、それが遙動して崩壊していく様子が観察され、それらが低周波の発達(回復)に対応しているものと考えられる。

図7は、各吸込み強さの場合の吸込み後の再遷移過程におけるバースティングの回数を示している。ただし、バースティングは VITA 法により計測している。低速ストリークの発達・崩壊の始まりに伴うバースティングの頻度も増加してゆき、これはまた低周波変動の発達と共に高周波変動が増加する図4の結果に対応している。

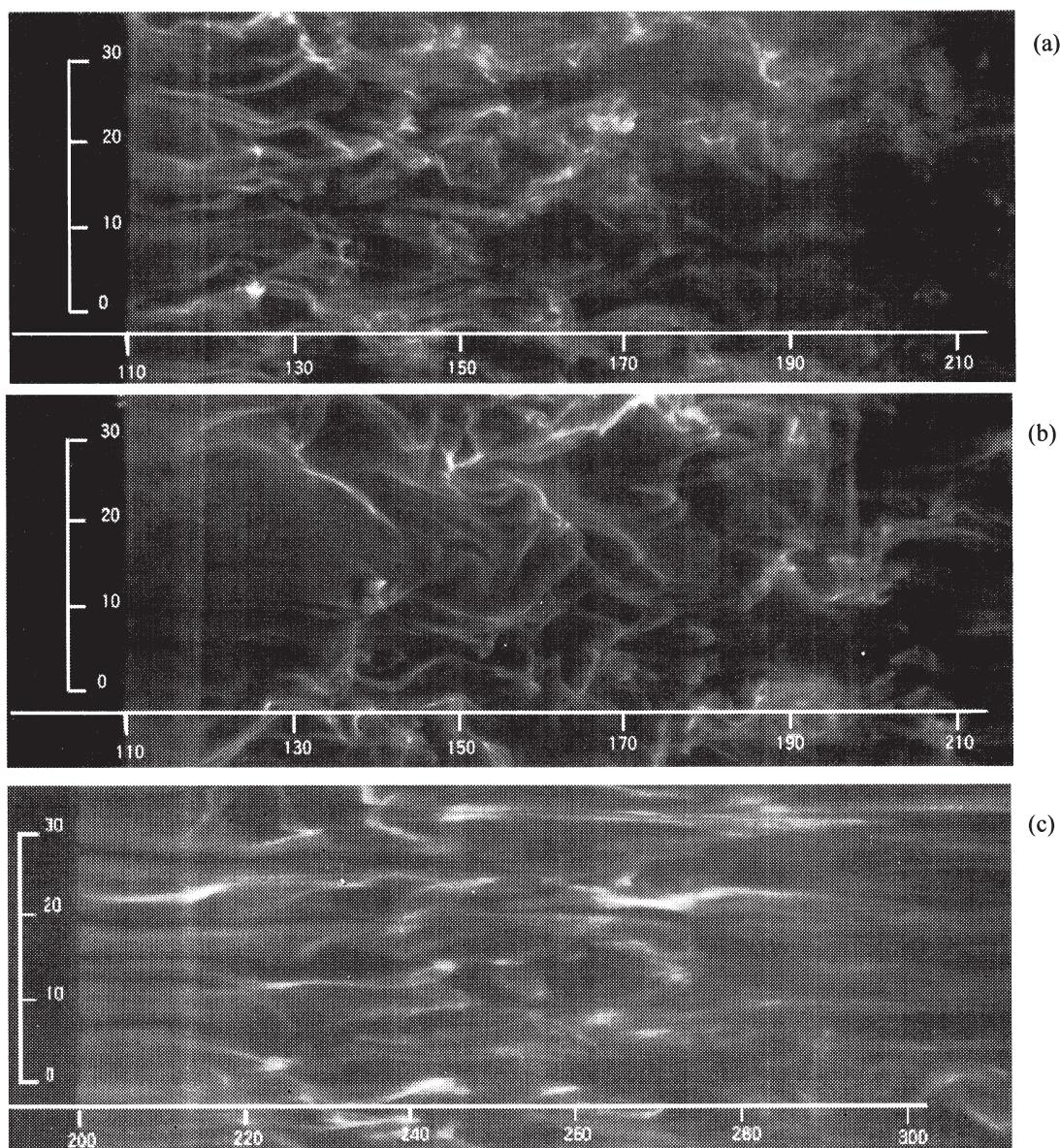


図5 スモークワイヤ法による壁近くの流れの可視化。(a) 吸込み無し、(b) (c) 吸込み強さ $V_e/U_\infty = 10\%$ 。スモークワイヤ位置；(a) (b) $x = 110\text{mm}$, (c) $x = 200\text{mm}$ 。

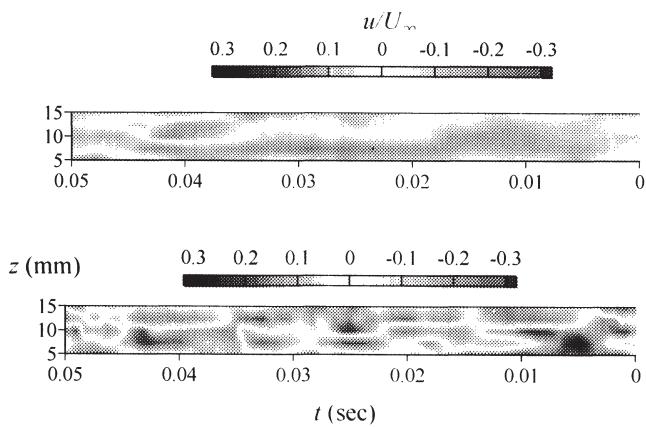


図6 壁近傍の瞬間 u 変動速度場: $(x, y) = (200\text{mm}, 0.8\text{mm})$. (a) $V_s/U_\infty = 10\%$, (b) 吸込み無し.

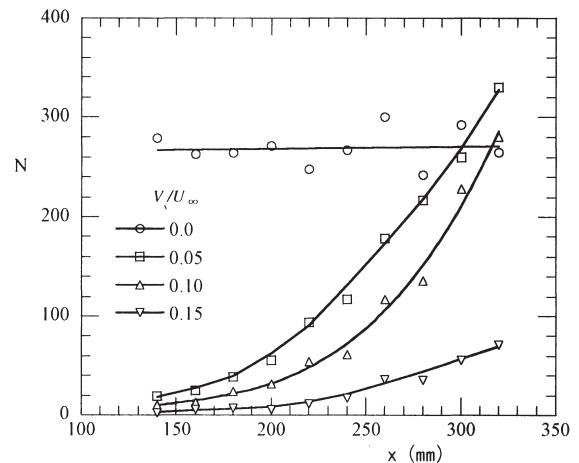


図7 バースティング頻度の x 方向変化.

4 結言

以上のように、乱流構造の発生・維持において壁近傍低速ストリーケの重要性が認識され、乱流制御の視点からもそれがキーであることが理解される。

このような低速ストリーケの成長は、乱れの強い境界層で見られるバイパス遷移の典型でもあり、壁から離れた位置を流下する減衰乱流変動により壁近くの層流化された粘性低層を刺激しストリーケ構造の発達に導くと言える。ただし、この再遷移過程における境界層の応答とバイパス遷移メカニズムとの関連はさらに詳しく調べる必要がある。

謝辞

本研究は、部分的に学術振興会科学研究費補助金（基盤研究C, 課題番号 10650897）並びに東京都特定学術研究費の援助を受けた。

引用文献

- 1) Robinson, S.K., Ann. Rev. Fluid Mech. 23 (1991) 601.
- 2) Jeong, J., Hussain, F., Schoppa, W. & Kim, J., J. Fluid Mech. 332 (1997) 185.
- 3) Nishioka, M., Asai, M. & Iida, S., in Transition and Turbulence (eds. R.E. Meyer), Academic Press (1982).
- 4) Asai, M. and Nishioka, M., in Theoretical and Applied Mech. 1996 (eds. T.Tatsumi et al.), Elsevier (1997) 121.
- 5) Effect of concentrated wall suction on a turbulent boundary layer, Phys. Fluids 7 (1995) 2465
- 6) Hamilton, J.M., Kim, J. & Waleffe, F., J. Fluid Mech. 287 (1995) 317.
- 7) Asai, M., Minagawa, M. & Nishioka, M. in Laminar-Turbulent Transition, Springer-Verlag (2000, in press).
- 8) Asai, M. & Nishioka, M., J. Fluid Mech. 297 (1995) 101.