

低レイノルズ数境界層における壁乱流構造の発達過程

都立科技大 浅井 雅人 (Masahito Asai)

はじめに

境界層遷移研究はこの20～30年の間に大きく進展し、実際、線形不安定のT-S波動の成長から始まる遷移に関してはかなりの知識が得られている^{1, 2)}。筆者らのリボン攪乱(規則的なT-S波動励起)による遷移の後期段階の観察^{3, 4)}やFaselらの数値シミュレーション⁵⁾によると、二次不安定の結果最初壁から離れた所に形成される三次元高剪断層がヘアピン渦に崩壊するが、それが進行した遷移後期になるとそれらヘアピン渦の働きにより壁近くからも新たに渦が生成されて壁乱流構造が発達するように見え、乱流構造の発達によってヘアピン渦の再生成の重要性が示唆される。この点を踏まえ筆者らは、平板境界層の前縁近傍や臨界レイノルズ数以下の領域に上記遷移の後期段階に近い流れ(ヘアピン渦の出現段階)を実現し、境界層の乱流遷移を調べている。この場合でも下流(亜臨界レイノルズ数域内)でヘアピン渦の再生成が始まり乱流遷移することが観察されている^{6, 7)}。本報ではこのヘアピン渦による境界層の亜臨界遷移において観察される乱流構造の発達について報告する。実験では、二つの方法で渦が励起される。最初は、平板前縁での非定常剥離を利用した渦(前縁ヘアピン渦)励起であり、次は壁面の小孔からの孤立的な渦励起である。

前縁励起ヘアピン渦による遷移

実験は、200mm×200mmの吹き出し式風洞の開放測定部で行なわれた。図1に測定部の概要を示す。測定部の上下は開放であるが、左右は側壁で囲まれており主流の二次元性が保たれている。平板は、長さ600mm、幅195 mm、厚さ3mmの黄銅板(前縁は鋭利に加工)である。平均速度 U および変動 u の測定は熱線風速計で行なわれ、流れの可視化はスモークワイヤ法で行なわれた。この実験はすべて流速 $U_{\infty}=4\text{m/s}$ で行なわれ、ヘアピン渦は下方のスピーカにより音波を境界層平板に直角方向から放射し、鋭利な前縁で周期的に小さな剥離泡を作ることによりスパン全体にわたって励起している。まず、この遷移の特徴について説明する。

図2は前縁で励起されたヘアピン渦の可視化写真である。スピーカ周波数は51Hzであり、一周期の約 $1/3$ の時間帯にわたって小さな剥離泡が形成されすぐに三次元的な孤立渦に崩壊する。写真ではスパン全体にわたって規則的に並んだマッシュルーム状の渦構造が見られるが、これらが前縁で励起されたヘアピン渦である：ただし、前縁には薄い(0.05mm厚さ)テープが6mmの間隔で貼付されており、それによってテープの中間と真後ろにヘアピン渦がスタガード状に励起される。写真のような強いヘアピン渦を励起したとき $R_x (= xU_\infty/\nu) = 4 \times 10^4$ 付近から遷移軌道にのる。図3は、その時の壁面摩擦係数 C_f' と運動量厚さ δ_θ の x 方向変化である。遷移点($R_x = 4 \times 10^4$)での運動量厚さに基づくレイノルズ数 $R_\theta = \delta_\theta U_\infty/\nu$ は約150(渦を励起しないブラジウス流では約130)であり、この $\delta_\theta U_\infty/\nu$ の値は、円管やチャネル流における最小遷移レイノルズ数とほとんど同じであることは特筆すべきである。線形安定論によるブラジウス流の臨界レイノルズ数は $R_\theta = 200$ であるので、亜臨界で遷移が起きる。このような亜臨界遷移は、図4のように、ヘアピン渦が次々と生まれていくことによって進行するが、それはすでに成長したヘアピンが通過した後の壁近くの剪断層から新たに発達していくように見える。高速度カメラにより壁近くの剪断層が境界層外縁まで浮上する時間を測ると遷移点では粘性拡散時間 θ^2/ν 程度(剪断層の厚さの目安として運動量厚さをとると)であり、この流れは渦の生成が起きる臨界状態であることが理解される。

ヘアピン渦の生成は、渦の脚(縦渦)の働き(誘起場)により直接壁近くの剪断層が浮上するか、壁との相互作用により新たに縦渦成分が誘起されることによると思われる。これと関連して、Smithら⁸⁾は単一のヘアピン渦を作りそれが次のヘアピン渦を生成する様子を可視化により調べていて、ヘアピン渦の脚の間に二次的なヘアピン渦が生まれるだけでなく、両脚の背後にも縦渦と壁面との干渉により二次ヘアピン渦が誘起されることを示している。

次々と生まれるヘアピン渦のスケールは遷移のプロセスで徐々に増していく。例えば、図5は、壁から浮上するマッシュルーム構造(縦渦の働きによる)の可視化およびその平均スパン間隔 $\bar{\lambda}$ (壁面摩擦速度と動粘性係数で無次元化)の x 方向の変化を示している。遷移点の上流では $\bar{\lambda}u/\nu \sim 50$ であるが、遷移軌道にのると徐々にスケールを増し、最終的に発達した乱流での低速ストリーク(壁近くの煙が浮上する領域)間隔の平均値100に漸近することがわかる： $\bar{\lambda}$ の生の値は、前縁近くでは約3mm、 $x=320$ mmで約7mmである。このような乱流発生の下限とも言える低レイノルズ数の境界層においては、壁で生まれたヘアピン渦の頭部は境界層外縁まで達しそれ自身境界層外層部を形成するように見える。

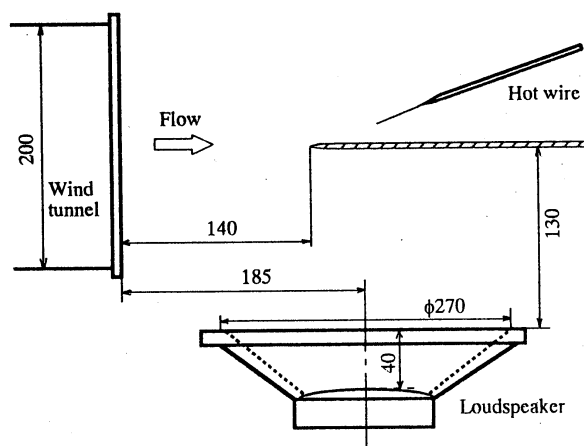


図1 実験装置の概要 (単位mm)

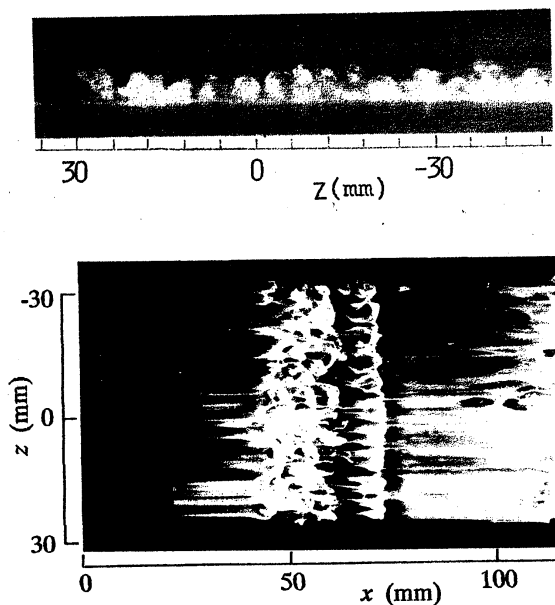


図2 前縁で励起された渦の可視化

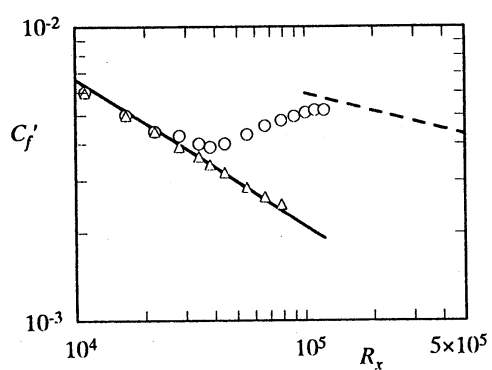
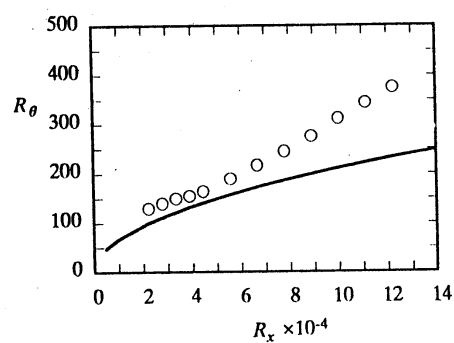
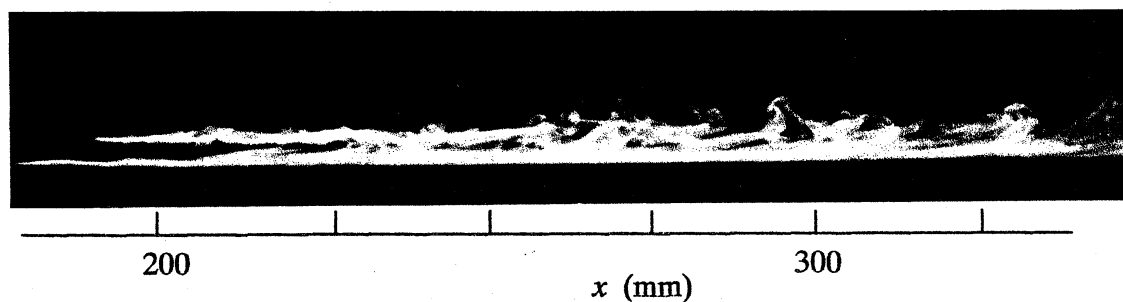
(a) C'_f vs R_x (b) R_θ vs R_x 図3 C'_f および R_θ の x 方向変化

図4ヘアピン渦による境界層遷移の可視化

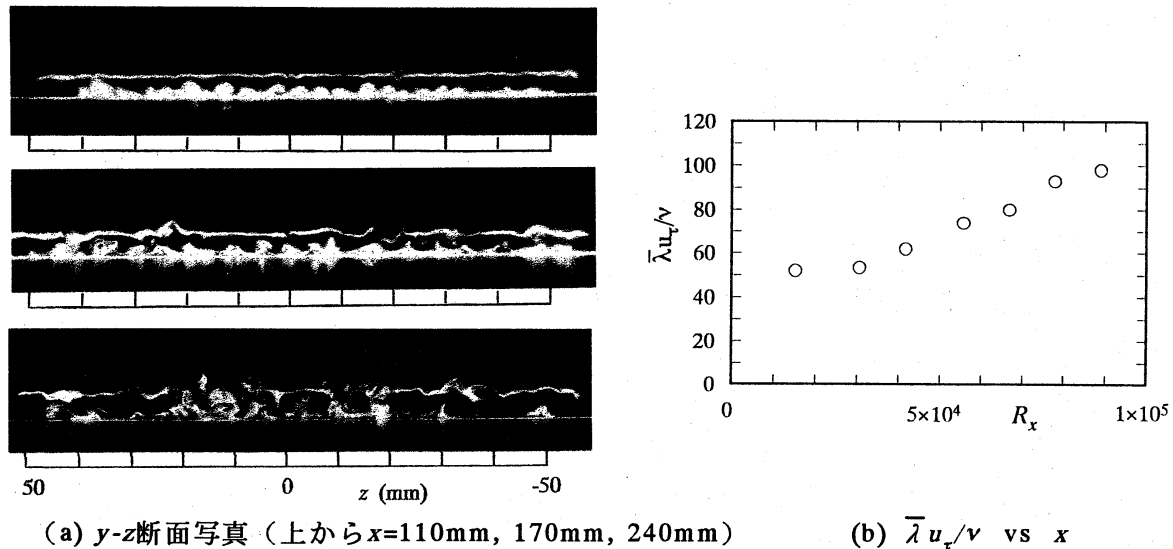


図5 ヘアピン渦のスパン間隔の変化

孤立ヘアピン渦による遷移

次の実験は、境界層平板を、前縁 ($x=0$) から80mm下流 ($x_d=80\text{mm}$) のスパン中央にヘアピン渦導入用の直径2mmの小孔が開けられた厚さ4mm (前縁は鋭利) の平板に取り替え行なわれた。孔はビニールホースを通じてラウドスピーカにつながれている。スピーカを適当な周波数で駆動すると、孔を通して空気の吹き出し・吸い込みが繰り返され、吹き出し時には剪断層を壁から浮上させる。浮上した剪断層はすぐに壊れ、その結果生じた渦は同時に変形が進みヘアピン状になる。実験は、 $U_\infty=4, 4.4, 5\text{m/s}$ で行なわれた。スピーカは52Hzの正弦波信号で駆動した。 $U_\infty=5\text{m/s}$ において、小孔位置 $x=x_d$ 位置でのブラジウス流の運動量厚さに基づくレイノルズ数は $R_\theta=110$ であり、線形安定性理論による臨界値の55%である。図6は孔から周期的に導入されるヘアピン渦の可視化写真であり、一周内に3つのヘアピン渦が励起されているのがわかる。

図7は、 $U_\infty=4\text{m/s}, 4.4\text{m/s}, 5\text{m/s}$ に対して、ほぼ同じ強さのヘアピン渦を励起したときの境界層の発達を可視化で比較している。図のように、 $U_\infty=4\text{m/s}$ の場合では励起された渦が下流に流れているだけで新たな渦の生成が見られないが、一方、 $U_\infty=4.4\text{m/s}$ と 5m/s の場合には $x=200\text{mm}$ より下流域で、導入された渦の背後 (上流) に次々と渦構造が生まれている様子が見られる。これら3つのケースの攪乱の成長を詳しく調べた結果、 $U_\infty=4.4\text{m/s}, 5.0\text{m/s}$ の場合には、攪乱源のすぐ下流から変動が増大し (可視化写真との対応から明らかに新たな渦の生成に因る)、さらに壁面摩擦係数 C_f を測定すると、前節の結果と同様 $R_x=xU_\infty/\nu=4 \sim 5 \times 10^4$ 付近 (運動量厚さに基づくレイノルズ数は約150) から層流カーブをはなれ遷移軌道にのることが確認された。

この実験で観察される重要な点は乱流生成領域のスパン方向へのコンタミネーションの特徴である。図8の可視化写真は、スモークワイヤーを壁に平行に配置して撮られたものであり、攪乱領域のスパン方向への拡がりの様子を示している。ヘアピン渦による攪乱域の両側には（おそらく渦と同時に励起されたと考えられる）斜行波が見られるだけで、攪乱域のスパン方向の拡がり角は半頂角で2度程度である。これは高レイノルズ数領域で一般に観察される乱流楔や乱流斑点の拡がり角（約10～12度）に比べて非常に小さい。図9は図8に対応する断面写真であるが、 $x=170\text{mm}$ 位置で両サイドにマッシュルーム状に煙が浮上し始め、 $x=240\text{mm}$ 位置でようやく完全に新たなヘアピン渦が生まれる程度である。

このようなスパン方向の乱流コンタミネーションについて最近さらに詳しく調べた結果、 $R_x=1\times 10^5$ 程度のレイノルズ数で2.5度程度、 $R_x=1.5\times 10^5\sim 3.0\times 10^5$ に増加すると約5度にまで増加し、上記高レイノルズ数での拡がり角に近づいていく様子を観察している。

なお、本研究は、部分的に文部省科学研究費（No.06651070）ならびに東京都特定学術研究費の援助を受けた。

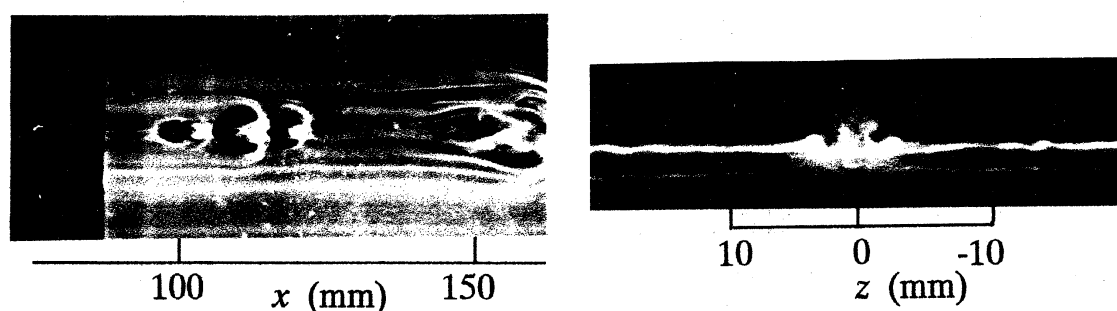


図6 ヘアピン渦の可視化 ($U_\infty = 4.4\text{m/s}$, $f = 52\text{Hz}$)

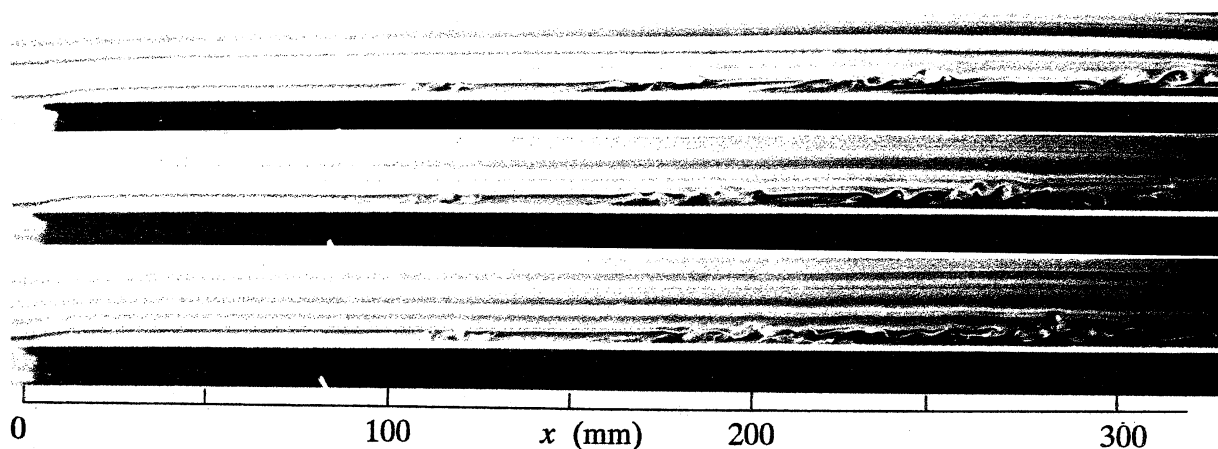


図7 ヘアピン渦による境界層遷移の可視化 (上から $U_\infty = 4, 4.4, 5\text{m/s}$) .

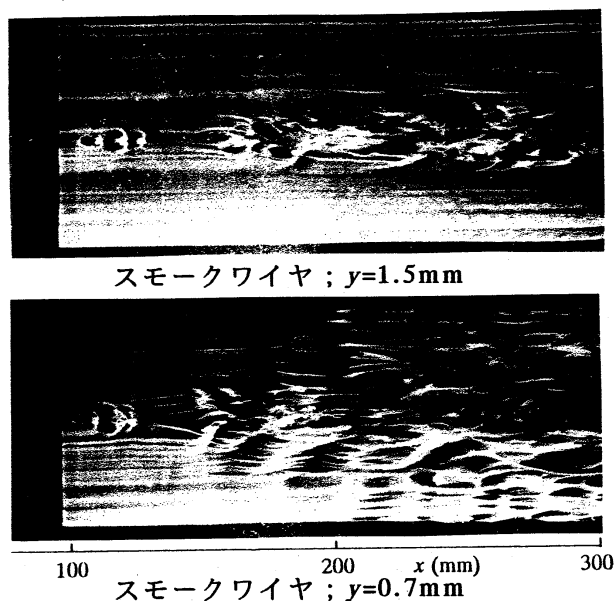


図8 ヘアピン渦による境界層遷移の可視化 ($U_{\infty} = 4.4 \text{ m/s}$)

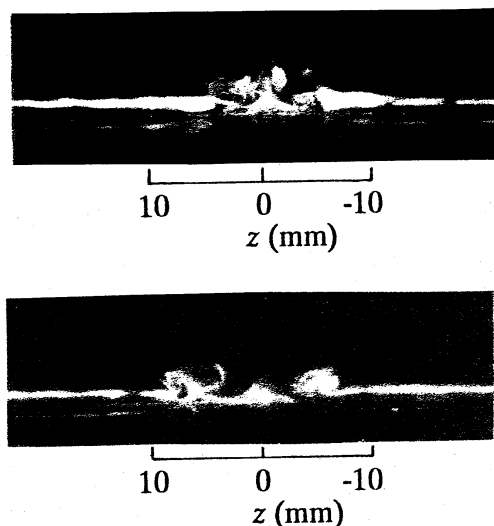


図9 y - z 断面の可視化写真 (図8に対応) (上から $x=170 \text{ mm}$, 240 mm)

引用文献

- 1) Kleiser, L. and Zang, T.A. (1991) Numerical simulation of transition in wall-bounded shear flows, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 23, 495-537.
- 2) Kachanov, Yu.S. (1994) Physical mechanisms of laminar-turbulent transition, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 26, 411-482.
- 3) Nishioka, M., Asai, M. and Iida, S. (1981) Wall phenomena in the final stage of transition to turbulence, in *Transition and Turbulence* (ed. R.E. Meyer), Academic Press, 113-126.
- 4) Nishioka, M. and Asai, M. (1984) Evolution of Tollmien-Schlichting waves into wall turbulence, in *Turbulence and Chaotic Phenomena in Fluids* (ed. T. Tatsumi), North-Holland, 87-92.
- 5) Fasel, H. (1990) Numerical simulation of instability and transition in boundary layer flows, in *Laminar-Turbulent Transition* (eds. D. Arnal and R. Michel), Springer, 587-598.
- 6) Asai, M. and Nishioka, M. (1990) Development of wall turbulence in Blasius flow, in *Laminar-Turbulent Transition* (eds. D. Arnal and R. Michel), Springer, 215-224.
- 7) Asai, M. and Nishioka, M. (1995) Subcritical disturbance growth caused by hairpin eddies, in *Laminar-Turbulent Transition* (ed. R. Kobayashi), Springer (in press).
- 8) Smith, C.R., Walker, J.D.A., Haidari, A.H. and Sobrun, U.: On the dynamics of near-wall turbulence, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* A336 (1991), 131-175.