

## 強い主流乱れが励起する境界層攪乱の代数的増幅

## Algebraic Growth of Boundary Layer Disturbances Excited by Strong Free-stream Turbulence

○黒川幸二, 阪府大工, 大阪府堺市学園町 1-1, E-mail:kurokawa@aero.osakafu-u.ac.jp

西岡通男, 阪府大工

坂上昇史, 阪府大工

Koji Kurokawa, Osaka Prefecture University, 1-1 Gakuencho Sakai Osaka

Michio Nishioka, Osaka Prefecture University

Shoji Sakaue, Osaka Prefecture University

In the present study a boundary layer flat plate is installed in a free-stream of 2.2 m/s and 1.5 m/s, which is highly fluctuating owing to grid-generated turbulence. The free-stream turbulence is of about 7 % at the leading edge. Under these flow conditions smoke-wire flow visualizations and hot-wire measurements are made to clarify the subcritical boundary layer transition caused by strong free-stream turbulence. It is found that the free-stream turbulence generates elongated streaks, and transition is triggered by the streak instability which can lead to the formation of a turbulent spot. The streak instability starts to occur at  $R_\theta = 85$  to develop to trigger similar instabilities of the neighboring streaks at  $R_\theta = 120$ . Furthermore we found it to be beyond  $\theta^+ = 7.3$  that the wall friction increases downstream. It is stressed that the critical condition describes the lowest Reynolds number for the boundary layer transition.

平板境界層が強い外乱を受けて亜臨界レイノルズ数域で乱流に遷移する現象は、壁乱流構造を生成・維持するメカニズムを理解する上で興味深く、遷移予知や層流・乱流制御などの応用面でも重要である。本研究では、亜臨界遷移に関する従来の研究を簡潔にまとめ、次に、強い主流乱れによる境界層の亜臨界遷移に関する筆者らの最近の実験結果を示し、代数的に増幅し低速ストリークを発生・成長させる境界層攪乱の特性や乱流遷移の下限レイノルズ数について考察している。

最近、Matsubara & Alfredsson<sup>1)</sup>は、強い主流乱れが境界層に及ぼす影響を実験的に調べ、乱流に導く攪乱が  $R_{\delta^*} = 370$  ( $R_\theta = 143$ ) の位置あたりから成長を始める様子を可視化している。ここで  $R_{\delta^*}$ ,  $R_\theta$  はそれぞれ排除厚さ  $\delta^*$ , 運動量厚さ  $\theta$  に基づくレイノルズ数を表す。この実験によれば、主流乱れにより境界層内に縦渦と低速ストリークがつかられ、ストリークの不安定性で攪乱が成長し、乱流斑点が生まれるというシナリオが示唆される。

筆者らは、強い主流乱れが乱流斑点を形成する過程を捉えることを狙った実験を行っていて、昨年<sup>2)</sup>の年会では、乱流格子で強い主流乱れをつくり、熱線とスモークワイヤ法による可視化で注意深く流れを観察し、次の結論を得た。すなわち、強い主流乱れによる亜臨界遷移では、 $R_\theta = 85$  付近で始まったストリークの不安定の影響が  $R_\theta = 114 \sim 119$  付近でその上下のストリークに波及する。そして、このような崩壊の連鎖によって  $R_\theta = 120$  あたりから乱流斑点の形成が始まり、境界層を乱流へと導く。

さて本研究では、同じ乱流格子を用い、主流速度を 2.2m/s と 1.55m/s に設定し、熱線信号を AD 変換して記録する実験を行い、亜臨界遷移の初期段階であるストリークの発達と変動の増幅との関係や、遷移の下限レイノルズ数についてより詳しく調べた。その主要な結果を次に簡条書きする。

(1) 主流乱れが境界層平板前縁で約 7% と強い場合にも代数的に増幅する攪乱が発生する。(2) この攪乱は熱線で見ると 10Hz 以下の低周波数の変動として捉えられる。(3) この変動の振幅(実効値)分布は理論<sup>3)</sup>の予測に近く、最大値をとる  $y$  位置  $y_m$  は最初は  $y_m/\delta^* = 1.3$  あたりである。(4) この最大値を代表値として、その自乗でこの攪乱のエネル

ギーを表し、前縁からの距離に基づくレイノルズ数  $Re_x$  に対してプロットすると、図 1 に示すように、 $Re_x = 1.5 \times 10^4$  に至るまで直線的に増す様子が明らかであり、確かに代数的に増幅している。(5) 図 1 で興味深い点は、壁面摩擦係数(摩擦速度  $u_\tau$ ) が下流に増し始めるのは、主流が 1.55m/s, 2.2m/s のいずれの場合も  $4.2 \times 10^4$  である。(6) このことは  $u'_m/U_\infty = 0.1 \sim 0.15$  の攪乱を伴う層流状態の流れが存在することを示している。(7) 筆者らは、平面ポアズイユ流やブラジウス境界層について粗さトリップを用いたり、平板前縁でヘアピン渦を発生させたりして、遷移の下限レイノルズ数を調べ、それが  $\theta u_\tau/\nu = 8$  とえられることを示した。(8) この関係は  $\theta u_\tau/\nu = 8$  を示唆しているが、今回、 $\theta^+ = \theta u_\tau/\nu = 7.3$  を確認した。(9) このように、 $\theta^+$  は重要な量であるが、先述の  $y_m/\delta^*$  を  $\theta^+$  に対してプロットすると、遷移域では直線的に変化する。この特性は代数的増幅攪乱の非線形発達の特徴と言える。

## 参考文献

- 1) Matsubara, M. and Alfredsson, P. H., J. Fluid Mech., **430**, 149-168 (2001).
- 2) 西岡, 坂上, 野坂, 黒川, 2004 年会論文集 168-169, (2004).
- 3) Luchini, P., J. Fluid Mech., **404**, 289-309 (2000).

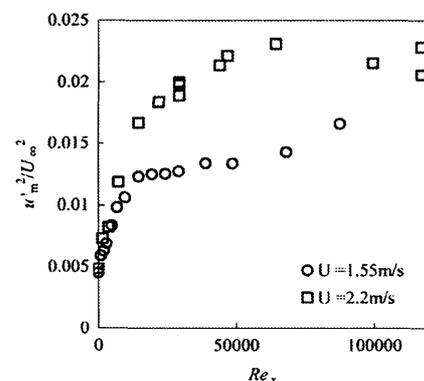


Fig.1 Algebraic growth of boundary layer disturbances.