

## 境界層遷移における速度場のスパン方向歪みと乱れの生成

The Spanwise Distortion of the Velocity Field and Production of the Turbulence  
in the Boundary Layer Transition○木村隆太<sup>1</sup>, 安藤伸吾<sup>2</sup>, 栗宇武志<sup>2</sup>, 関谷直樹<sup>3</sup>, 松本彰<sup>3</sup>  
Ryuta Kimura<sup>1</sup>, Shingo Ando<sup>2</sup>, Takeshi Kuriu<sup>2</sup>, Naoki Sekiya<sup>3</sup>, Akira Matsumoto<sup>3</sup>

A spot had a highly reproducibility in its velocity perturbations during the initial stage of its downstream development. From measurements of the velocity field in detail, we found that the velocity profile in the spot was laterally distorted. In addition, the velocity-wave amplitude was irregular in this region. It was expected that these features of velocity field were induced by spanwise flow. Thus, the purpose of the present study was to investigate the effect of a spanwise flow on the laminar-turbulent transition of the spot. The results obtained show that the lateral distortion of the velocity field and the irregularity of the velocity perturbation were caused by spanwise flow in the spot.

## 1. はじめに

我々は小さな人工的攪乱を用いた実験により、1つのヘアピン渦が層流斑点を経て乱流斑点に遷移する一連の過程から乱流遷移過程を調べてきた。攪乱によって層流境界層内に生成された斑点はその初期段階で、斑点内の速度場の構造は、スパン方向に交互に並んだ層流境界層の速度よりも低速な領域、高速な領域がそれぞれ流れ方向に真っ直ぐ伸びる特徴を有する。この初期の斑点は斑点内で瞬時速度変動の再現性が良いことから層流斑点と呼んでいる。斑点が下流発達し乱流斑点への遷移が始まると、局所的に瞬時速度変動の振幅や位相に不規則性が現れることが明らかとなった。さらに、層流斑点では斑点内の速度場は主に、壁面垂直方向流れによって主流方向の運動量が運ばれることによって形成されるが、不規則性が現れる位置ではFig.1に示すように必ずしもそうではない結果が得られた<sup>[1]</sup>。すなわち、主流方向の瞬時速度波形の振幅に不規則に変化する谷が出現する時刻  $T=0.054\text{sec}$  で壁面に垂直方向の流れがほとんど生じていない特徴的な瞬時速度波形が現れた。この時刻では、低速の領域が斑点の外側に向かって伸びるように分布していたことから、この速度変動の谷はスパン方向の流れがもたらした運動量輸送の結果であると推測した。

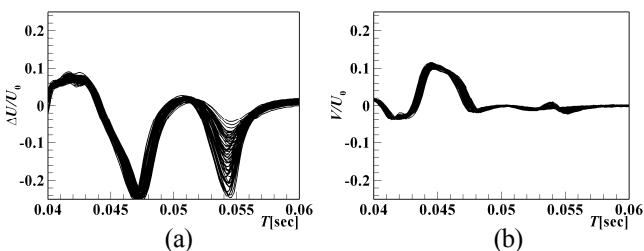


Fig.1 Velocity perturbations at  $x=140\text{mm}$ ,  $y/\delta=0.44$  and  $z=5.0\text{mm}$

そこで、本報告は、スパン方向流れが乱流斑点への遷移に及ぼす影響を調べることを目的として、斑点内のス

パン方向流れを計測した結果である。

## 2. 実験装置および方法

実験は回流型の低乱風洞で行った。測定部には平板が垂直に設置されており、この平板上に2次元の層流境界層(排除厚さ  $\delta^*$  に基づくレイノルズ数  $R_{\delta^*}=990$  一定)を形成した。平板前縁から  $750\text{mm}$  下流には直径  $1\text{mm}$  の小孔が開けられており、この小孔からジェットを噴出し層流境界層に初期攪乱を与えた。境界層に攪乱を与えるジェットは、無風時に壁面近傍で計測したジェット流速の波高値が主流速度  $U_0$  の  $80\%$ 、半値幅が  $2\text{msec}$  のパルス状のジェットである。先行する斑点の影響を受けることなく、それぞれが単独の斑点として扱うことができるようにジェットの噴出間隔は  $250\text{msec}$  とし繰返し噴出させた。座標は小孔を原点とし、主流方向を  $x$ 、平板垂直方向を  $y$ 、横幅方向を  $z$  とした。

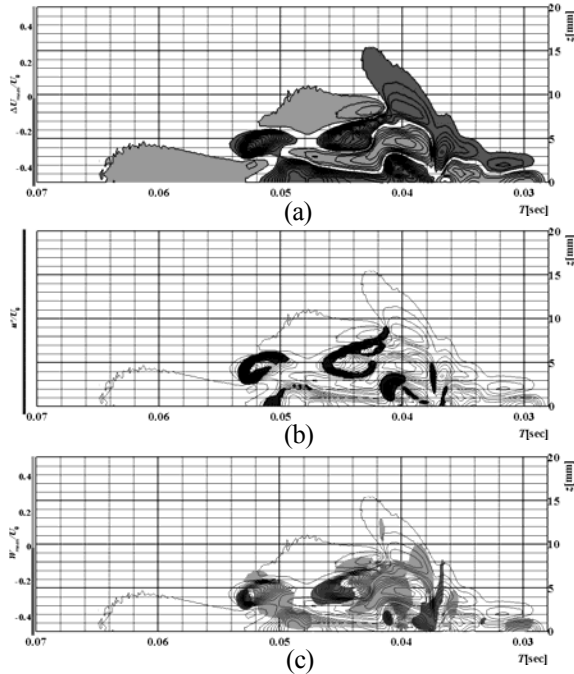
斑点内の主流方向の速度成分  $U$  とスパン方向の速度成分  $W$  を同時計測するために、境界層実験用に壁面垂直方向の大きさを小さくしたX型熱線プローブを新たに製作した。製作したX型熱線プローブは、主流に対する傾斜角を  $60^\circ$  とし、あえて風向の感度を下げることで近接2線式熱線プローブに用いた較正方法<sup>[2]</sup>を適用した。本較正方法による  $U$ ,  $W$  の測定精度は、主流に対する風向  $\phi$  が  $-30^\circ < \phi < 30^\circ$  の範囲で  $0.5\%FS$  と従来のX型プローブと同程度の測定範囲、かつ十分な精度を有している。

斑点内の速度波形の採取はジェット生成のパルス電圧の立ち上がりトリガーとした条件付サンプリングで行い、256回繰返し採取した。

## 3. 実験結果および考察

Fig.2 は  $x=140\text{mm}$ ,  $y/\delta=0.44$  において採取した主流方向

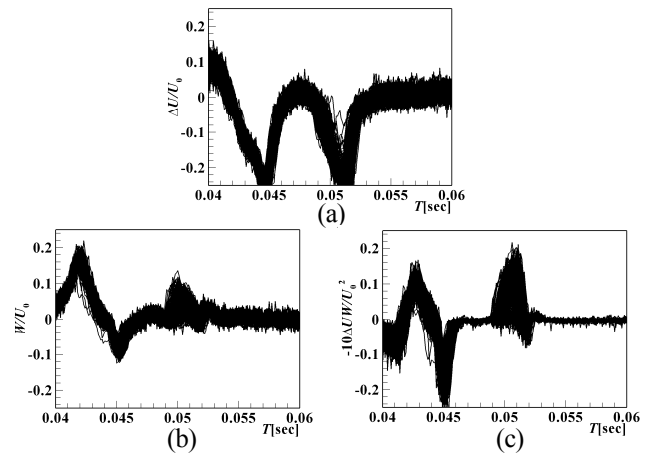
の偏差速度  $\Delta U = U - U_b$  ( $U$ :瞬時速度,  $U_b$ :ブラジウス速度) の集合平均  $\Delta U_{\text{mean}}$ , 不規則性の尺度である乱れ  $u'$  およびスパン方向速度の集合平均  $W_{\text{mean}}$  を  $U_0$  で無次元化した  $z$ - $T$  断面等値線図である. ここで,  $T$  はジェット生成のパルス電圧の立ち上がりからの経過時間である.



**Fig.2** Contour maps of velocities at  $x=140\text{mm}$  and  $y/\delta=0.44$ .  $\Delta U_{\text{mean}} / U_0$  の等値線図(a)では  $T=0.036\text{sec}$  から  $0.054\text{sec}$  にかけて斑点内部で高速領域 ( $\Delta U_{\text{mean}} > 0$ ) と低速領域 ( $\Delta U_{\text{mean}} < 0$ ) が互いに入り組むように速度分布がスパン方向に歪んでいることがわかる. この領域で乱れ, すなわち不規則性が現れていることが(b)に示す  $u' / U_0$  の等値線図との対応からわかる. この速度分布のスパン方向の歪みは斑点内の  $U, V$  同時計測の際でも見られたが, この原因を  $V_{\text{mean}} / U_0$  の速度分布から明らかにすることはできていない. そこで, 今回計測した  $W_{\text{mean}} / U_0$  の等値線図(c)を見るとスパン方向に  $\Delta U_{\text{mean}} / U_0$  等値線が歪んでいる領域で  $W_{\text{mean}}$  が生じている.  $\Delta U_{\text{mean}} / U_0$  等値線が斑点中央 ( $z=0\text{mm}$ ) 方向に歪められている領域 ( $T=0.037\text{sec}$ ,  $z < 4\text{mm}$ ) では斑点の中心に向かう  $W_{\text{mean}} < 0$  が, その背後の  $\Delta U_{\text{mean}} / U_0$  等値線が斑点の外縁方向に歪められている領域では外向きの  $W_{\text{mean}} > 0$  が生じている. この結果は, 斑点内部で生じた速度場のスパン方向への歪みが  $W_{\text{mean}}$  に起因することを示している.

次に, Fig.1 に示した振幅の不規則性を伴う瞬時速度変動の谷が  $W$  による運動量輸送によってもたらされたものであるか 256 本の瞬時速度波形から明らかにしていく. Fig.3(a) は不規則性を伴う速度変動の谷が現れた  $z=5.0\text{mm}$  における  $\Delta U / U_0$  の瞬時速度変動波形である.  $T=0.049\text{sec}$  から  $0.052\text{sec}$  にかけて存在する速度変動の谷

が  $U, V$  同時計測で得られた Fig.1(a)の振幅に不規則性が現れた速度変動の谷に対応している. 速度変動波形が大きく見えるのはローパスフィルターを通しておらず, 小さな高周波ノイズが含まれるためである. (b)に示す  $W / U_0$  の瞬時速度波形には  $T=0.049\text{sec}$  から  $0.051\text{sec}$  にかけて主流速度の 10%もの外向きの  $W$  が生じていることがわかる.  $V$  と比較すると, この値は約 5 倍で, この位置では  $V$  よりも  $W$  が支配的であることを示している. さらに, 速度相関である  $-\Delta U W / U_0^2$  もこの時刻で正であることから低速の運動量をもった流体が外側に向かう  $W$  によって輸送されていることを示している. 以上の結果より, 瞬時速度波形に現れた振幅の不規則性を伴う速度変動の谷は,  $W$  によって, 斑点中央付近の低速の運動量をもった流体を外側に運ぶことに起因することが明らかになった.



**Fig.3** Velocity perturbations at  $x=140\text{mm}$ ,  $y/\delta=0.44$  and  $z=5.0\text{mm}$

#### 4. まとめ

斑点内の  $U, W$  速度成分の同時計測から以下のことが明らかとなった.

- 1) 乱流斑点遷移で生じる斑点内の速度分布のスパン方向の歪みは斑点内のスパン方向流れによって生じる.
- 2) 斑点内の瞬時速度波形に現れる不規則性もまたスパン方向流れによって生じるもので, 層流斑点から乱流斑点への遷移過程ではスパン方向流れが重要な役割を担う.

今後, 系統的に乱流遷移におけるスパン方向流れの影響を調べる必要がある.

#### 参考文献

- [1] 関谷, 松本, 「乱流斑点への遷移領域における不規則性の発達」, 日本航空宇宙学会論文集, Vol.58, No.678, 2010
- [2] Sekiya, N., Matsumoto, A., "Development of a Hot-wire Probe with Two Parallel Wires Placed Closely Together", J. Fluid Sci. and Tec., Vol.4, pp.95-106, 2009