

凹曲面に沿う境界層遷移の過程（続報）

山田浩平（明大院），伊藤光（明大・理工）

Process of boundary layer transition on a Concave Wall

Kohei Yamada* and Akira Ito*

*Dept. of Mech. Eng., Meiji University

ABSTRACT

Process of laminar-turbulent boundary transition on a concave wall of 1m in the radius of curvature was studied experimentally under free-stream velocity of 3m/s. It is presented that flow visualization by smoke techniques and flow measurement by X-type probe. It was discussed about flow fluctuation and normal profiles of mean velocity and turbulent intensity taken at the center of a single low-speed region.

Key Words : boundary layer transition , Görtler vortices , horseshoe vortices

1. はじめに

凹曲面に沿う流れの境界層内には Görtler 渦および馬蹄形渦が生成し、乱流境界層への遷移が促進される。馬蹄形渦は高周波の流れの挙動であり、馬蹄形渦の崩壊に伴って乱流境界層が形成される。本研究では、凹曲面曲率半径 $r=1$ m、空気主流速度 $u_0=3.0$ m/s とし、煙による流れの可視化と X 型熱線流速計による測定を行なった。そして馬蹄形渦の崩壊に着目し、高周波の流れの挙動について検討したので報告する。

2. 実験装置および方法

実験装置は前報¹⁾と同様で、観測筒の曲率半径 $r=1$ m、幅 400mm、高さ 100mm、長さ 2600mm である。座標は、前幅方向中央を原点 O とし、長さ、高さ、幅方向をそれぞれ x 、 y 、 z とする。また、それぞれに対応する速度成分を u 、 v 、 w とした。

流れの可視化では、壁面から軽油蒸気を流入させる軽油ミスト法とスモークワイヤ法を用いた。光源にはストロボを用い、一眼レフカメラで撮影している。なお、軽油ミスト法による煙導入位置を x_N 、スモークワイヤ法によるワイヤ位置を x_W 、 y_W 、 z_W とした。測定では、観測筒上部のスリットから X 型プローブを挿入し、各 x 位置において yz 断面内を 1mm 間隔で移動させて u - v 、 u - w の測定を行なった。ただし、速度勾配 ($\partial u / \partial y$, $\partial u / \partial z$) が大きい測定位置では、プローブ形状の影響によりそれぞれ w 、 v に大

きな誤差が見られた。そのため、その位置における v 、 w を取り除いて、検討を行なった。

3. 煙による流れの可視化

図 1(a)は凹曲面上に生成する馬蹄形渦の様相である。高周波の馬蹄形渦は $x=750$ mm 付近で生成し、 $x=900$ mm 付近で崩壊している。崩壊下流では、煙のかたまりが周期的に現われていて、スパン(z)方向へと拡散していくことがわかる。図 1(b)のように壁面付近では、低流速域で煙がスパン

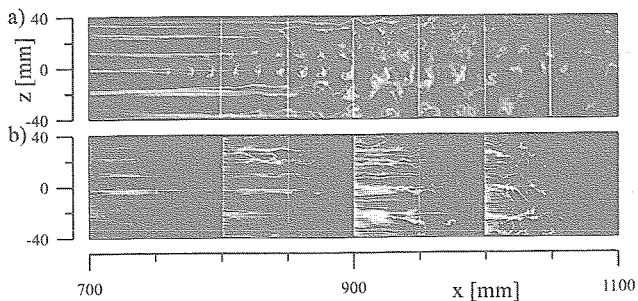


図 1 馬蹄形渦の様相と凹曲面壁付近の流れとの比較

- a) 軽油ミスト ノズル位置 $x_N=650$ mm
b) スモークワイヤ位置 $x_W=700, 800, 900, 1000$ mm $y_W=3$ mm

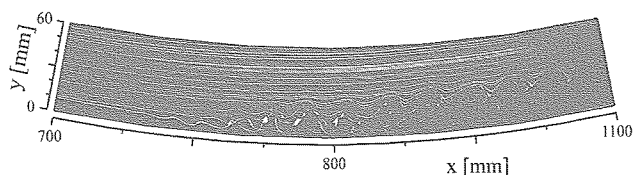


図 2 馬蹄形渦対称面内の流れ

スモークワイヤ法 $x_W=700$ mm $z_W=-3$ mm

方向に揺らぎ、馬蹄形渦の崩壊下流では全体の煙が揺らいでいる。

図2は馬蹄形渦の対称面 ($z = -3 \text{ mm}$) 内の流れである。馬蹄形渦は、上部で主流を巻き込みながら大きく成長していき、この巻き込みは馬蹄形渦の崩壊下流でも確認できる。壁付近では煙の揺らぎが見られ、吹上げによって煙が上方へと上がるため、下流では煙は確認できない。

4. 高周波の流れ変動

測定によって得られた流速分布を図3に示す。ここで u_x は各 x 位置における境界層外縁速度である。壁付近 ($y = 2 \text{ mm}$) では、低流速域である馬蹄形渦の対称面が下流に伸びている。この対称面 (破線) における y 方向への流速および乱れ度分布 (図4) を見ると、対称面上部 (○) の速度勾配 ($\partial u / \partial y$) が大きい y 位置で局所的に $\sqrt{u'^2} / u_x$ が高い。下流に進むにつれて、対称面上部では $\sqrt{u'^2} / u_x$ が低くなり、対称面下部 ($y = 3 \text{ mm}$ ●) では高くなる。また縦渦の回転作用により、対称面では流れが吹上げられるため、 v / u_x が正方向に対称面上部 (○) まで現われていて、大きさは $x = 900 \text{ mm}$ (馬蹄形渦の崩壊) で最大となる。

対称面上部および下部の速度波形およびスペクトルを図5に示す。上部では 150 Hz 付近に幅広いスペクトルが現われていて、これが馬蹄形渦の周期的な流れである。この周期的な流れについて検討するため、対称面上部および下部の速度波形にハイパスフィルタ 50 Hz (HPF) を適用させて再度 $\sqrt{u'^2} / u_x$ を算出した (図6)。低周波成分を除去したことで、 $\sqrt{u'^2} / u_x$ が小さくなり、対称面上部 (図4) の局所的に高い $\sqrt{u'^2} / u_x$ は低周波成分に起因することがわかる。馬蹄形渦の高周波の流れによる $\sqrt{u'^2} / u_x$ は $x = 800 \text{ mm}$ 付近からは高くなるが、下部 ($y = 3 \text{ mm}$) ではやや下流の $x = 900 \text{ mm}$ 付近から高くなる。さらに下流でも、高周波成分による対称面下部の $\sqrt{u'^2} / u_x$ は 7% 程度と一定である。

これらより、まず馬蹄形渦の高周波 (150 Hz) の流れが対称面上部で形成されるため高周波成分による $\sqrt{u'^2} / u_x$ が高くなる。この流れは馬蹄形渦の崩壊に伴って周期性が衰えていくが、壁付近の流れに高周波の速度変動が現われる。これらの高周波の速度変動により乱流境界層が形成されていくと考えられる。

参考文献

- 1) 伊藤光, 山田浩平 : 凹曲面に沿う境界層遷移の過程, 航空宇宙技術研究所特別資料, Sp-59, 2003, pp.81-82.

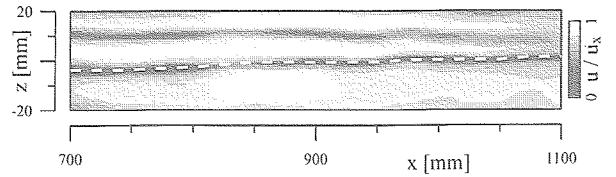


図3 等流速分布 $y = 2 \text{ mm}$

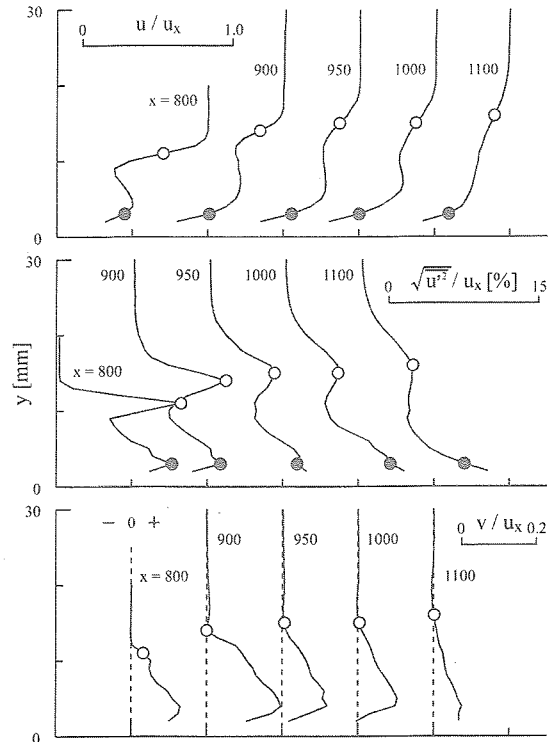


図4 流速および乱れ度分布 (馬蹄形渦対称面)

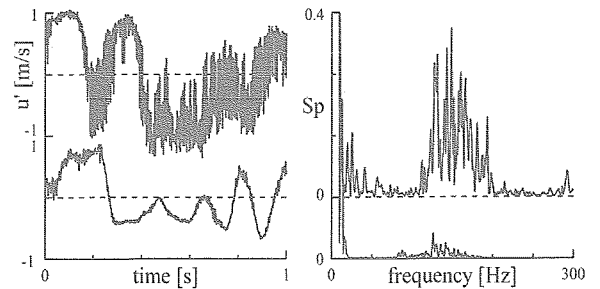


図5 速度波形およびスペクトル ($x = 900, z = -1 \text{ mm}$)

上: $y = 14 \text{ mm}$ 下: $y = 3 \text{ mm}$

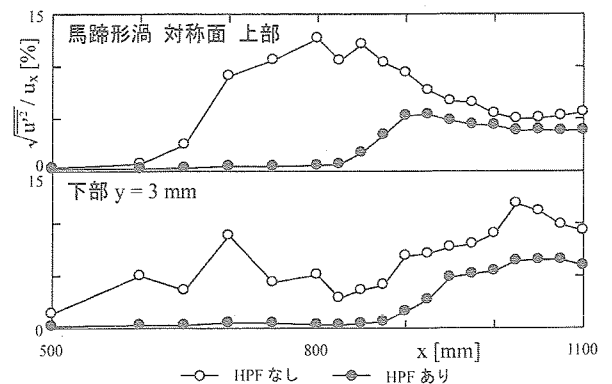


図6 $\sqrt{u'^2} / u_x$ の変化 (馬蹄形渦 対称面)