D 1 1 2

強制波長のゲルトラー渦による二次不安定流れの可視化

矢作 陽一[☆] (明治大院), 畠山 和之 (明治大院), 伊藤 光 (明治大)Visualization of Secondary Instability Flows
by Forced Wavelength Görtler Vortices

Yoichi YAHAGI, Kazuyuki HATAKEYAMA and Akira ITO

ABSTRACT

Secondary instability flows between Görtler vortices developed in boundary layers on a concave wall were visualized. The forced wavelength of vortices were set by the notched thin leading edge plate and pre-set fine wires of 0.2 mm diameter in uniform airflow, respectively. Flows on a concave surface of $R=1$ m were visualized by injected smoke from the slits on the concave wall and filmed by high-speed camera. The horseshoe vortices and meandering flows as the secondary instability flows were observed and their behavior was studied by high-speed videos and velocity contours. The velocity was measured using a single hot-wire anemometer probe. Forced wavelength vortices by notched leading edge plate and pre-set wires were compared with natural developed vortices by straight leading edge plate.

Keywords: Görtler vortices, Forced wavelength, Leading edge plate, Pre-set wires

1. はじめに

凹曲面に沿う境界層内には Görtler 渦が発達し、後流ではその渦により二次不安定流れとしてキノコ状断面の高周波馬蹄形渦が生成する。Görtler 渦の発生間隔 (波長) は凹曲面の曲率半径、主流速度によって変わるが、凹曲面前縁付近の僅かな形状変化や上流側の流れの影響を受けやすく、一定間隔の波長を持つ Görtler 渦が発生しにくい。そこで Görtler 渦に関する実験では、この波長を強制的に与えて一定間隔の渦を発生させる方法が試されている。強制波長の与え方には、凹曲面前縁に三角形の切込みを入れた前縁板を使用する方法^{1),2),3)}と、前縁直前に垂直に配列した細いワイヤを用いる方法⁴⁾とがある。本実験では、この二種の強制波長の与え方による二次不安定流れの発達の違いについて、自然波長の場合と合わせて、高速度カメラによる可視化撮影と熱線流速計による流速測定から比較検討した。

2. 実験装置および実験方法

前縁板とワイヤそれぞれの設置位置を Fig. 1 に示す。実験には曲率半径 $R=1000\text{mm}$ 、流路断面 $400\text{mm}\times 100\text{mm}$ の観測筒を使用した。筒は透明な硬質塩化ビニル樹脂板で製作した。座標は前縁板の先端中央を原点とし、凹曲面に沿う長さ方向を x 、高さ方向を y 、幅方向を z としている。実験時の空気主流速は $u_0=2.5\text{m/s}$ 、平均乱れ度は 0.37% である。

Fig. 1 a) には、自然波長用直線前縁板を示す。Fig. 1 b) には、強制波長を与えるために三角形切込みを入れた前縁板を示す。その三角形の頂点間隔 (強制波長) $\lambda=15\text{mm}$ 、深さ $h=1\text{mm}$ である。前縁板の板厚はどちらも 0.5mm である。Fig. 1 c) にはワイヤの配置を示す。ワイヤ間隔 $\lambda=15\text{mm}$ 、ワイヤ直径 $d=0.2\text{mm}$ であり、

Fig. 1 Schematic of experimental setup (all dimensions are in mm).

a) straight leading edge plate, b) notched leading edge plate, c) pre-set wires.

Fig. 2 Visualization of secondary instability flows in x - z plane.
a) straight leading edge plate, b) notched leading edge plate, c) pre-set wires.

これを直線前縁板の上流 10mm の位置に設置した。この場合のワイヤレイノルズ数は 33 で、カルマン渦の発生レイノルズ数より小さい。

3. 二次不安定流れ可視化

Fig. 2 a) は直線前縁板による自然波長、Fig. 2 b) は三角形切り込み前縁板による強制波長、Fig. 2 c) はワイヤによる強制波長の Görtler 渦により作られた二次不安定流れを高速度カメラで撮影した画像である。可視化は凹曲面に沿って流した軽油ミストを流して写している。ノズル位置は $x=300\text{mm}$ の凹曲面壁面にある。

Fig. 2 a) には $x=700\text{mm}$ 付近で一对の Görtler 渦の回転作用によって煙が集まった吹上げ位置が確認できる。この間隔は不揃いで、その平均波長は約 $\lambda=12\text{mm}$ である。後流の $x=950\text{mm}$ 付近では、周波数およそ 130Hz の馬蹄形渦の発生がみられる。直線前縁板では Görtler 渦の波長が不揃いであるので、三角形切り込み前縁板を試作してみた。

Fig. 2 b) のように三角形切り込み前縁板で強制波長を与えた場合は、直線前縁板による自然波長の場合とよく似た現象がみられるが、 $x=800\sim 850\text{mm}$ から馬蹄形渦が発生するようになる。強制波長を与えられたことにより三角形切り込み前縁板の谷部で Görtler 渦の間隔が $\lambda=15\text{mm}$ に揃うのがみえる。

一方、Fig. 2 c) のようにワイヤによって強制波長を

Fig. 3 Mean streamwise velocity profiles at $x=100\text{mm}$

a) straight leading edge plate,
b) notched leading edge plate, c) pre-set wires.

Fig. 4 Traces of secondary instability flows in x - z and x - y plane, taken by 1000 fps high-speed camera.

与えた場合では、Fig. 2 b) よりも現象がさらに上流に移動している。Fig. 2 a)、Fig. 2 b) の前縁板の場合と異なり、馬蹄形渦は形成されない。 $x=650\text{mm}$ 付近で幅方向に周波数約 130Hz 程度の二次不安定揺らぎが確認できる。

Fig. 3 は $x=100\text{mm}$ における境界層内の流速分布の比較で、 u/u_x は流速 u を境界層外縁流速 u_x によって無次元化した値である。直線前縁板では z 方向への周期的な速度分布がみられないが、三角形切り込み前縁板では明らかに周期的な速度分布が作られている。これによって、Fig. 2 のように三角形切り込み前縁板では Görtler 渦と馬蹄形渦の生成が早まることになる。ワイヤの場合では、ワイヤの後流に局所的な低速域が作られていて、この低速域の z 方向への急な速度勾配が、周期的な揺らぎを生み出すと考えられる。

つぎに、Fig. 2 のそれぞれの二次不安定流れを詳しくみるために一秒間に 1000 コマの高速度カメラで上面(x - z 面)と側面(x - y 面)の撮影を行った。一つの馬蹄形渦および揺らぎに着目し、各 x 位置におけるそれらの変形を追跡した画像が Fig. 4 である。

4. 可視化と流速測定との比較

Fig. 5 は $x=850\text{mm}$ と $x=950\text{mm}$ 付近の上面及び側面の可視化画像と、その位置での流速分布及び乱れ度分布を比較した図である。上面からみえる煙の集まっている z 位置は、流速が低く乱れ度の高い流域に対応している。側面からは、速度勾配の急な位置を馬蹄形渦が通過していく。揺らぎのある流れでは、境界層内全体で乱れ度が高いことがわかる。

Fig. 5 Mean streamwise velocity profiles and turbulence intensity profiles at $x=850, 950\text{mm}$.
a) straight leading edge plate, b) notched leading edge plate, c) pre-set wires.

Fig. 6 には、縦渦の最大増幅率 $\kappa_{\max}$ を示す。吹下げ位置の流速 $u_{D(y)}$ と吹上げ位置の流速 $u_{U(y)}$ の最大速度差 $u_{D(y)} - u_{U(y)}$ を境界層外縁流速 u_x で無次元化した値であり、これは Görtler 渦の成長の強さを表している。Fig. 6 をみると、二つの前縁板の場合よりワイヤの場合が Görtler 渦の成長は早いだが、 $\kappa_{\max}$ の最大値は低いことがわかる。

参考文献

- 1) 十文字航洋, 伊藤 光: ゲルトラー渦間に生成する二次不安定流れの可視化 —異なる形状の凹曲面前縁板の場合—, 可視化情報全国講演会 (新潟 2005 講演論文集), vol. 25 Suppl. No. 2 (2005) pp. 243-246.
- 2) 西川広基, 赤石健太郎, 伊藤 光: 可視化情報全国講演会 (岐阜 2007 講演論文集), vol. 27 Suppl. No. 2 (2007) pp. 25-26.
- 3) 井熊友信, 西川広基, 赤石健太郎, 伊藤 光: 可視化情報全国講演会 (釧路 2008 講演論文集), vol. 28.
- 4) Winot, S.H., Mitsudhamadi, H. and Shah, D.A.: Visualizing Görtler Vortices, J. Visualization, Vol. 8 (4) (2005) pp. 315-322.

Fig. 6 Streamwise distribution of maximum disturbance amplitude $\kappa_{\max}$.