122 ステレオ PIV による円柱後流の三次元渦度計測

吉田 雅之 (筑波大学大学院)、榊原 潤 (筑波大学機能工)

Stereo-PIV study of 3D vortical structures in a cylinder wake

Masayuki YOSHIDA and Jun SAKAKIBARA

ABSTRACT

Measurements of velocity/vorticity of cylinder wake by using stereo-PIV method. Three-dimensional vorticity iso-surfaces were successfully reconstructed from temporal series of velocity in a cross-sectional plane assuming Taylor's hypothesis. Vortex structure having a mode A pattern was observed at $Re=1000$.

Keyword PIV, vortical structure, cylinder wake

1. 緒言

物体の周囲を流体が流れる系は多くの工業的分野に見られる。特に物体が円柱の場合には、いわゆるカルマン渦構造を伴う円柱後流が存在し、円柱に非定常的な振動が加わることが知られている。円柱後流は2つの二次元的なせん断層を有する流れであり、その初期流れの微小変化はK-H不安定及び二次的不安定性により増幅され、せん断渦およびリブ構造が成長していくことが染料による可視化ならびに、数値計算により明らかとなっている⁽¹⁾。一方、実験結果に基づいた渦度場の可視化は計測法の困難さに起因して行われていない。そこで、本研究ではステレオPIVを用いた実験的計測手法により円柱後流の主流方向に垂直な断面における速度3成分を時系列に計測し、渦度分布を三次元的に可視化することを目的とする。

2. 実験装置及び実験方法

実験装置の概略をFig.1に示す。トレーサ粒子(ダイヤモンド、粒子径約40 μ m)を懸濁したアクリル製水槽(長さ1000mm×奥行き200mm×深さ300mm)内で、直径 $D=20$ mmアスペクト比8.0の円柱を水槽上部に取り付けられた電動送り装置(ロボシリンダ、IAI)により一定速度 U で移動し、鉛直に照射したレーザーシートによって流動場を可視化した。

水槽内の水が静止した後円柱を移動させ、円柱がレーザーシートを通過した直後のレーザーシート面の画像をCCDカメラ0,1(kodak, ESI, 0)を用いてPCに取り込んだ。得られた画像からステレオPIV法⁽²⁾を用いて瞬時の速度3成分を得て、さらに得られた時系

Fig.1 Experimental apparatus

列速度データの時間方向をテラーの凍結仮説に基づいて流れ方向に置き換えることで、流れの速度勾配を求め、渦度3成分の三次元分布を得た。ここで渦の移流速度を $U/2$ と仮定し流れ方向距離を $x^* = -tU/2$ とおく。これを用いて次式のように定義された渦度を、得られた速度データから算出した。

$$\omega_x = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}, \quad \omega_y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial x}$$

$$\omega_z = \frac{\partial v}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

なお、移流速度は本来 x に大きく依存すると思われるが、その実測値がなかったため、ここでは上記のように定数とした。

3. 実験結果及び考察

D に基づいたレイノルズ数 $Re_p=1000(U=55\text{mm/s})$ での円柱後流三次元渦度分布をFig.2に示す。せん断渦の主要な渦度成分として、 $|\omega_z| \cdot D/U = 1.4$ の等値面を黒で、またリブ構造として $|\omega_x|(\omega_x^2 + \omega_y^2)^{1/2} \cdot D/U = 1.4$ の等値面を白で、 $|\omega_x|(\omega_x^2 + \omega_y^2)^{1/2} \cdot D/U = -1.4$ の等値面を縞模様で示している。Fig.2(a)、(b)、(c)は、同じ結果をそれぞれ異なる角度から見たものである。図中、主流方向は右向きで $t=0$ に円柱の背面が位置する。Fig.2(c)より円柱背面では $y/D=0.5$ 、 $y/D=-0.5$ にせん断層が存在し、その後方にロールアップしたせん断渦、A、Bが確認される。この2つのせん断渦の間から縦渦Dが下流に伸び、また、Bの下流側から縦渦Cが伸びていることが分かる。Fig.2(a)、(b)において上側せん断層の縦渦は2対確認され、それらの間隔は $2D$ 程度である。一方、下側せん断層には $1D$ 程度の間隔をなした渦対構造が観察された。なお、渦の移流速度を定数としたため、下流に行くに従って渦構造が全体的に伸びた形となった。

Williamson⁽¹⁾によれば、円柱後流の渦構造には2つのモードがあることが知られている。縦渦の渦度 ω_x 成分が下流に行くに従い正、負と交互に変わるモードAが $Re < \text{約} 260$ で、同じ符号が続くモードBが $Re > \text{約} 260$ において存在する。さらに、モードAはスパン方向波長が $4D$ 程度で最も不安定であるのに対し、モードBでは $1D$ 程度が最も擾乱が増幅される。

本実験のレイノルズ数($Re=1000$)においてはモードBの存在が期待されるが、上述の結果に見られるスパン方向波長($1D \sim 2D$)はおよそWilliamson⁽¹⁾のモードBのそれに一致するものである。しかしながら、レイノルズ数が $Re=1000$ と比較的高く渦構造が複雑であり、縦渦の渦度 ω_x 成分の正負に基づいたモードの判断は困難である。

4. まとめ

ステレオPIVにより円柱後流の速度三成分計測を行い、テラーの凍結仮説に基づいて三次元渦構造の視化をおこなった。 $Re=1000$ において、せん断渦の放出およびせん断渦間に発生した縦渦が捉えられた。なお、本報では渦の移流速度を定数としたため、下流に行くに従って渦構造が伸びた形となった。今後、よ

Fig.2 Iso-surface of spanwise vorticity ω_z and streamwise vorticity ω_x

り適切な移流速度を用いることが課題である。

参考文献

- 1) Williamson, C.H.K Vortex Dynamics in the Cylinder Wake, *Annu. Rev. Fluid. Mech.*, pp.477 (1996)
- 2) A.K.Prasad, R.J.Adrian, Stereoscopic particle image velocimetry applied to liquid flows, *Exp. Fluids*, 15, pp.49 (1993)