C232 形状の異なる物体背後の後流の可視化

福山大学 梅田眞三郎* ミシガン大学 Wen-Jei Yang

Visualization of Wake Flows around Various Kinds of Cylinders

Shinzaburo UMEDA* and Wen-Jei YANG**

Wake flows around cylinders are different in each shape of cylinders and different Reynolds number. It is important to visualize the flow in the wake of cylinders as a basic study for the fluid engineering. An experimental study was performed to investigate the wake flows around various kinds of cylinders. The flow patterns were visualized by particles of the ion exchange resin. The velocity variations in the flow field were measured using two-dimensional laser Doppler velocimetry. The mechanism of the wake flows around cylinders are clarified. The characteristics of the oscillation in the wake flows are also determined by the frequency analysis.

1. まえがき

流れの中におかれた物体のまわりには、後流という二次流がみられる。物体形状と流れの違いにより後流の形態が異なることは既に知られている。特に、Reynolds数が大きくなるにつれて物体背後に顕著なカルマン渦列があらわれることが知られている。筆者ら¹⁾は、菱形を並べたネットワーク管路内での菱形まわりの流路内に発生する渦が連結振動を起こし、その管路末端の噴流がCoanda効果とともに振動するFlip-flop流れが起こることを発見している。そのネットワーク管路の水深は、菱形の横幅と同程度の小さいものとなっているため、物体や上・下層の壁の摩擦等の影響を受け、従来のカルマン渦列とは異なった渦の形成が想像される。すなわち、三次元的な挙動を示すカルマン渦列を上・下層の壁が押さえる形の平面的な振動へと変化させていると思われる。種々のネットワーク管路を流体力学での制御として応用して行くにあたっては、その流況及び振動の解明の基礎的な研究が重要と思われる。

本研究では、物体の直径と同程度の水深を持つ管路内で円形、矩形及び菱形などの異なった物体背後の後流を注入トレーサ法により可視化した。さらに、二次元レーザ流速計(LDV)を用いて物体背後の流速変動のスペクトル特性の解析も行った。

2. 実験方法

管路の幅が48mm、長さが300mmで管路水深を8mmとする管路内に円形、菱形及び矩形物体をそれぞれ5個と左右壁側に半個ずつの合計6個を配置した。Table 1にType名、物体の直径Dあるいは幅w、長さl及び物体個数を一覧にして示した。なお、矩形に関するType R-4、Type R-5については、下流側に1個と左右に半個ずつの合計2個をさらに追加した。また菱形については、その先端の角度が30°となっている。その配列は、顕著な後流の発生を期待して各物体の中心位置を結ぶ交線の角度¹⁾が30°となるようにした。また実験装置の経済性を考え、Fig.1に示すような二本の管路を並行に設置し、上流側水槽水位Huを種々に変化させて実験を行った。Re数については、下流端流量Qを測定し、それを管路断面積A=4.8×0.8cm²で割った平均流速U₀を代表流速とし、各物体の流れに直角方向の幅w(円形の場合には直径D)を代表長さとする $Re=U_0 \cdot w / \nu$ とした。

流線の可視化にあたってはイオン交換樹脂のハイポラス・ポリマ粒子を用いた。また後流での流速変動をLDVにより計測した。その測定点は、流線の可視化写真を参考に、上流側から2列目の物体の中心位置にある物体背後の後流と主流の境界付近の点とした。

Table 1 Types of cylinders

Shape	Circle			Diamond			Rectangle				
Type	C-1	C-2	C-3	D-1	D-2	D-3	R-1	R-2	R-3	R-4	R-5
D or W (mm)	8	12	16	8	12	16	6	6	6	8	12
l (mm)				Angle:30°			14.9	22.4	29.9	13.9	20.8
Number of cylinders	6	6	6	6	6	6	6	6	6	8	8

* Fukuyama Univ., Gakuen-cho, Fukuyama, Hiroshima, 729-02 Japan

** Univ. of Michigan, G.G. Brown, Ann Arbor, Michigan 48109-2125, U.S.A.

3. 実験結果と考察

3. 1 流線の可視化

注入トレーサ法により Re 数の大きい場合の各種物体まわりの流線の可視化した結果の数例を Photo.1~6 までに示す。

まず、円形の結果を示す Photo.1 と 2 では、円柱径が大きくなるにつれて剥離を伴う渦を形成する後流域の大きさも変化している。円柱径の小さい Type C-1 での結果を示す Photo.1 では、上面からは後流域の個々の流線が交差したような三次元的な変動がみられる。円柱径が大きくなった場合の Photo.2 では、円柱背後の渦の領域と円柱間の流れがそれぞれより鮮明に分かれ、渦の振動に伴って流れも大きく振動しているのがみられる。すなわち、Type C-1 ではカルマン渦列に伴う流れの振動が顕著にあらわれているが、Type C-2 や C-3 のような円柱径が大きくなるにつれて主流と円柱背後の後流とが鮮明に分離され、主流の流れが Flip-flop 流れ²⁾のような周期の長い振動となっておりと思われる。

次に、Photo.3 と 4 に示す菱形の場合については、Type D-1 では、前述の Type C-1 と同じような後流域の流線が交差したような三次元的な流動がみられる。しかし菱形が大きくなるにつれて流路間隔が狭くなり、流況が円形の場合と異なっている。すなわち、菱形まわりの剥離に伴う渦の形がかなり偏平なものとなっている。そのために円形にみられたような主流の振動が顕著にはあらわれていないと思われる。またそれらの渦の再付着点までの長さが、菱形の一边の長さより大きく、菱形の左右の渦が辺長の長い Type D-3 (Photo.4 参照) の場合にも連結した形を示している。

Fig.1 Schematic of experimental setup

Photo.1 Visualization of streamline
for Type C-1($Re=10,263$)

Photo.2 Visualization of streamline
for Type C-3($Re=10,667$)

Photo.3 Visualization of streamline
for Type D-1($Re=11,874$)

Photo.4 Visualization of streamline
for Type D-3($Re=12,648$)

Photo.5 Visualization of streamline
for Type R-1($Re=8,152$)

Photo.6 Visualization of streamline
for Type R-3($Re=8,012$)

最後の Photo.5 と 6 に示す矩形の場合には、円形の場合とよく似た流動を示している。後流域の幅は、3つの Type の矩形の幅 w が同一であることからほとんど同じとなっている。ただし、矩形の長さが Type ごとで違っているため、その長さが大きくなるにつれて後流の長さもわずかに異なり、最も矩形長さの長い Type R-3 (Photo.6 参照) の場合のものが、最も短くなっていると思われる。

以上のように物体形状及び同じ物体でもその大きさにより、それぞれの後流が異なっている。すなわち今回は、管路水深を同一にしているが、物体の代表長さと管路水深との関係によっても後流が異なっていると考えられる。

3. 2 スペクトル解析

L D V による各物体背後での流れ方向及び流れに直角方向のそれぞれの流速の時間変動結果からパワースペクトルを求めた。それぞれの Type での最も Re 数が高い場合のパワースペクトルの結果を Fig.2 ～ 5 に示す。なお菱形の場合には、流れに直角方向の流速変動についてのパワースペクトルのみを示している。

まず、Fig.2 に一例を示す円形の場合には、いずれのパワースペクトルにもスペクトルのピーク値を示す卓越周波数が鮮明にあらわれている。しかも流れ方向及びそれに直角方向の両変動成分のパワースペクトルにほとんど同じ卓越周波数があらわれている。前述の流線の可視化結果と同様に、これらの円形の場合の後流は、三次元的な変動を示すことがパワースペクトル結果でも明らかになった。ただし、円柱径が大きくなった Type C-3 では、他の周波数のパワースペクトルの値も大きくなっている。また卓越周波数の値も Type C-1 や C-2 に比べて小さくなっている。

Fig.2 Normalized power spectrum
Pw/Pwmax for Type C-1

Fig.3 Normalized power spectrum
Pw/Pwmax for Type D-3

Fig.4 Normalized power spectrum
Pw/Pwmax for Type R-3

Fig.5 Normalized power spectrum
Pw/Pwmax for Type R-3

次に、菱形の場合には、いずれのTypeもパワースペクトルに顕著な卓越周波数があらわれなかった。流れに直角方向のパワースペクトル結果の一例を Fig.3 に示すように、いろいろな周波数の波が重なったノイズ的な変動の特性を示すスペクトルとなっている。図を省略している流れ方向のスペクトルも同様となっている。それぞれのパワースペクトルは、流線の可視化結果でみられたように、菱形まわりの流路内に主流が顕著にあらわれ、その主流と後流域の渦のそれぞれの振動が加わった形のものとなっていると思われる。

一方、矩形の結果の二例を示す Fig.4 と 5 では、顕著な卓越周波数がみられる場合が多くなっている。特に、矩形の長さが短い Type R-1、R-2 や R-4 の場合には鮮明にあらわれている。それに対して、Type R-5 の流れ方向のパワースペクトルには、顕著な卓越周波数があらわれず、ノイズ的な変動結果を示している。この Type は、Type R-2 の下流側に 2 個の矩形物体を追加したような形となっているため、主流と後流のそれぞれの流れが変化したことがパワースペクトルの結果に影響したものと思われる。また、流れの可視化結果にみられたように、矩形長さが最も長くなった Type R-3 の後流域は狭くなっていた。そのために Fig.4 に示される流れ方向のパワースペクトルについては、卓越周波数が他の Type のものに比べて大きくなり、短い周期の速度変動となっている。一方、流れに直角方向のパワースペクトルは、主流と後流域の渦の振動が複雑に関係したノイズ的な変動結果を示している (Fig.5 参照)。このような矩形の場合には、その長さとの関係によりパワースペクトルの違いがあらわれている。

以上のパワースペクトルでの卓越周波数が顕著にあらわれている場合の結果について、Re 数の違いに対して卓越周波数 f がどのように変化するかを調べた。その結果を Fig.6 に示す。それぞれの卓越周波数 f は、Type R-3 と R-5 を除いて、流れ方向及び流れに直角方向のそれぞれの卓越周波数 f_u と f_v を同時に図へプロットしている。図からも明らかなように、Re 数の増加に対していずれの卓越周波数も直線的に増大している。また矩形の幅が小さく、長さが最も長い Type R-3 の結果が最も卓越周波数の値が大きくなっている。この場合には、流れ方向の速度変動に関する f_u の結果のみが示され、前述のように主流の流れ方向の短い周期の変動のみが顕著にあらわれたものと思われる。逆に、円柱径の大きい Type C-2 や C-3 では、Type R-5 と同様に卓越周波数の値が小さくなり、主流がカルマン渦列振動に近い長い周期の変動になっていると思われる。

以上のように種々の物体まわりの流れの変動は、物体径や物体まわりに形成される渦及び物体間の流路を流れる主流の交差流れとの関係によって異なっていることが明らかとなった。また流線の可視化結果と同様に、管路水深に対して物体の代表長さによっても流れの振動が異なっていると考えられる。

Fig.6 Change of optimum frequency versus Reynolds number

4. 結論

ハイポラス・ポリマ粒子を用いた注入トレーサ法及び二次元レーザ流速計により配列形状の異なる物体背後の後流の可視化を行った結果、次のような結論を得ることができた。

- (1) 円形、菱形及び矩形の物体の違いにより後流域の大きさが異なることが明らかとなった。また矩形の場合、その長さによっても後流域が異なることが明らかとなった。
- (2) 管路水深に対する物体の代表長さの違いにより物体の後流の流況が異なることが明らかとなった。
- (3) 物体の違いにより後流でのスペクトル特性が異なることが明らかとなった。また、物体の直径や長さによって流れの変動の周期特性が異なることが明らかとなった。

< 参考文献 >

- 1) 梅田眞三郎, Wen-Jei YANG: ネットワーク管路における流況特性, 可視化情報, Vol.16, No.61(1996), 28-36
- 2) 梅田眞三郎, Wen-Jei YANG: 千鳥配列の円管群内の流況特性, 可視化情報, Vol.17, No.67(1997) (印刷中)