同心異径円柱の後流渦の可視化

東大生研 佐賀 徹雄^o 小林 敏雄
石原 智男 上村 康幸

A Visual Study on an Interaction of Vortex Streets behind a Circular Cylinder with a Flat Step

Tetsuo SAGA*, Toshio KOBAYASHI*, Tomo-o ISHIHARA*, Yasuyuki KAMIMURA*

Wake flow behind a circular cylinder with a flat step is visualized by dye-injection method and measured by hot wire anemometer. Vortices of wake flow with different shedding frequencies change its relative locations with time. I-type connection, phase change, Y-type connection and disjunction repeat periodically. RMS values of fluctuating velocities have a maximum at I-type connection and a minimum at Y-type connection.

1. まえがき

一様流中に置かれた有限長円柱や円錐、あるいは剪断流中に置かれた円柱の後流には柱体の軸方向に離脱周波数の異なる渦が存在し、隣り合う渦は分離や結合をくりかえし後流渦の構造をより複雑なものにしている^{1), 2)}。従来、この後流渦の干渉については主として熱線流速計による変動速度の測定結果から論じられているが、現象の把握は未だ十分ではない。本研究では同心異径円柱を用いて離脱周波数の異なる二種類の後流渦が円柱軸方向に隣り合って発生する様な比較的単純な構造の流れ場を作り出し、染料注入法を用いて現象を可視化し、低レイノルズ数範囲における後流渦の分離・結合の様子を観察し、同時に熱線流速計による測定結果と比較し、後流渦の干渉を考察する。

2. 実験装置と実験方法

図1に実験装置の概略と供試同心異径円柱を示す。実験に用いた回流水槽の測定部は流路幅400mm、水深300mmで、本報での主流速度は主として22mm/sである。供試同心異径円柱は直径 $d_1 = 6\text{mm}$ と $d_2 = 5\text{mm}$ の円柱を組み合わせたもので全長300mmである。供試柱は前方よみ点から $\pm 80^\circ$ の位置に軸方向に5mmの間隔で直径0.7mmの染料注入孔をもっている。染料にはフルオ

Fig.1 Experimental apparatus and test cylinder

* Institute of Industrial Science, University of Tokyo

レセインを用いている。フルオレセイン水溶液は染料タンクからビニールチューブを通して中空の円柱内部へ供給される。染料供給は円柱まわりの流れ場を乱すことのないように染料タンクのバルブの開度で調節される。照明方法と撮影方法を図2に示す。光源はストロボスリット光源(菅原研究所 S-3A)とスライドプロジェクタ(スリット用ネガ付)で、スリット光源の位置を変えることにより任意の断面の照明が可能である。スリット光は幅3mm, 長さ400mmに設定してある。撮影用カメラはニコンフモータードライブカメラを用い現象を連続的に撮影している。使用したフィルムのASA感度は400, 絞りはF1.2, 露光時間はスライドプロジェクタの場合1/8秒, ストロボスリット光源の場合40 μ sである。撮影後のフィルムから画像解析装置(NAC MB-2)により渦速度や配置などを調べている。供試柱の後流渦の離脱周波数や速度変動の測定は定温度型熱線流速計(DISA 55M)を用いた。熱線プローブは直径70 μ m, 有効長さ1mmのニッケル細線に厚さ2 μ mの石英コーティングを施した清水用のプローブを使用した。測定断面は $X/d_1=1.67$, $Y/d_1=0.75$ でZ方向に3ヶ所位置を変えて測定を行った。熱線流速計の信号から、周波数分析器(KANOMAX 3112S)によって渦の離脱周波数を, RMS計(DISA 55D)により速度変動のRMS値を, トランスフォーマクションアナライザ(NF TF-425)により渦の位相差を求めた。

3. 実験結果と考察

同心異径円柱の後流渦は直径比が1に近くない範囲では太い方の円柱の後流渦と細い方の円柱の後流渦は(以下 Γ_1 , Γ_2 と呼ぶことにする)軸方向に結合することなく円柱接合部付近で分離してしまう³⁾。ここでは Γ_1 , Γ_2 が軸方向に結合したり分離したりする現象が現われる直径比 $d_2/d_1=0.83$ を選びその後流渦の観察を行った。図3に異なる離脱周波数をもつ2種類の渦 Γ_1 , Γ_2 が周期的に円柱から離脱し, 等速で後方へ移動する場合の渦の配置を模式的に示す。図中実線で示した渦は円柱上流側から見て左側から離脱した渦を破線は右側から離脱した渦を示す。ある時刻 t_0 で円柱の片側から発生した渦 Γ_1 , Γ_2 の中心軸は図に示すように円柱軸に対し平行(工字型結合と呼ぶ)であるが離脱周波数の違いにより時刻 t_0 の増加とともに位相差

Fig.2 Optical arrangement

Fig.3 Illustration of vortices behind a circular cylinder with a flat step

Fig.4 Typical arrangement of vortices with different frequencies

Fig.5 Hot-wire signals of wake flow

が生じ $z = 0$ 付近の渦の軸は円柱軸に対し次第に傾きを増していく。 i 番目の Γ_i の軸が i 番目の Γ_i の軸から遠ざかり $(i+1)$ 番目の Γ_i の軸に近ずくと Γ_{i+1} と Γ_i が Y 字型に結合する現象が現われる。さらに時刻が進むと Γ_{i+1} と Γ_i とは分離し Γ_{i+1} と Γ_i の位相が同期して円柱に平行な 1 本の渦 (I 字型結合) となる。このような Γ_i と Γ_i の I 字型結合 $\rightarrow$ 位相ずれ $\rightarrow$ Y 字型結合 $\rightarrow$ 分離 $\rightarrow$ I 字型結合の周期を T とすると T は Γ_i の離脱周波数 f_1 , f_2 によって定まり $T = 1 / (f_2 - f_1)$ となる。図 4 に X-Y 断面の渦列を示す。(a) は Γ_i , (c) は Γ_i に対応したともに規則的なカルマン渦が観察される。しかし (b) では渦列がくずれ不規則で弱い渦の存在が観察される。(a) および (c) の連続写真から測定した Γ_i の移動速度は主流速度の約 0.86 倍である。図 5 に位置 (a), (b), (c) における主流方向の速度変動 V の熱線流速計の測定例を示す。1 周期 T の間に Γ_i は約 6 回, Γ_i は約 7 回円柱から離脱している。(a), (c) の波形は振幅や周波数がほとんど変化せず, Γ_i の強さや離脱周波数が一定であることがわかる。図 6 に V の熱線流速計の出力信号から求めた Γ_i の位相差 $\angle P$ の時間変化を示す。位相差は時間に対しほぼ直線的に変化している。このときの位置 (a), (c) における X-Y 断面の渦列を同時に観察した写真を図 7 に示す。 Γ_i と Γ_i を識別するために (c) では 40 Hz のストロボスリット光による照明を行っている。したがって Γ_i には微少時間間隔のタイムラインが観察される。写真 (E) は I 字型結合時で $\angle P \sim 0^\circ$ に対応し、写真 (F) はそれより 7.4 秒後のもので $\angle P \sim 180^\circ$ に対応する。

$z = 0$ 付近の断面 (b) での熱線流速計による V の波形の振幅は図 5 (b) に示すように時刻との増加とともに

Fig.6 Phase difference between Γ_I and Γ_{II}

Fig.7 Top view of vortex streets

しだいに小さくなり一定時間後急に増大する。しかも振幅の小さくなった時刻付近で相ついで2つのピークをもつ。これは Γ_5 と Γ_5 および Γ_6 とか結合(Y字型結合)することに対応する。図8にこの円柱軸

Fig.8 Side view of vortex streets

方向の渦のつながりを明らかにするためX-Z面内で可視化した例を示す。この場合染料の注入は円柱の片側からのみ行っている。(1)は Γ_5 と Γ_5 の位相差が小さい場合、(2)は Γ_5 と Γ_5 の位相差が大きくなりY字型結合が生じた場合を示している。 $Z=0$ 付近の渦は位相差が大きくなると二次元性を失ない渦の強さも弱くなることと観察される。図4(b)のVの波形のRMS値(積分時間0.3秒)を1周期にわたり測定した結果を図9に示す。VのRMS値は Γ_5 と Γ_5 の位相差の増加とともに小さくなりY字型結合を生じるとき最小となり次に急増する。VのRMS値が小さいことは Γ_5 と Γ_5 の離脱周波数の相違により両者に位相差が生じ $Z=0$ 付近での渦の二次元性が失われ渦の強さが弱くなるためと思われる。又、分離後にRMS値が急増するのは Γ_5 と Γ_5 の位相が再び一致しE字型結合が生じるため $Z=0$ 付近の渦の二次元性が回復し渦の強さが強くなるためと思われる。図9に異径部付近(b)でVのRMS値が最小値をとる時間 T^* のヒストグラムを示す。Y字型結合が周期の後半で生じていることがわかる。

Fig.9 RMS values of fluctuating velocities

4. まとめ

低レイノルズ数における同心異径円柱($d_2/d_1=0.83$)の後流渦を観察し次の結論を得た。

1. 同心異径円柱の後流渦は円柱軸方向の離脱周波数の相違により位相差を生じ分離・結合を繰返す。
2. 異径部付近の乱れはY字型結合時に最小となりE字型結合時に最大となる。

参考文献

- 1) 岡本, 八木田, 機械学会論文集, 38-3/3 (1972.9), 2259
- 2) Gaster, M., J. Fluid Mech., 38, Pt 3 (1969), 565
- 3) 八木田, 児島, 松崎, 機械学会講演論文集, 823-2 (1982.3), 15

Fig.10 Probability distribution of T^*