

リング後流の流れの可視化

Experimental Study of the Wake behind the Ring

泉 耕 二*・高 本 正 樹**

Kouji IZUMI・Masaki TAKAMOTO

I はじめに

渦輪に関する研究は古くから理論的にも実験的にも数多く行なわれ、最近では大島(1978), Safman and Baker (1979) の報告にみられる。

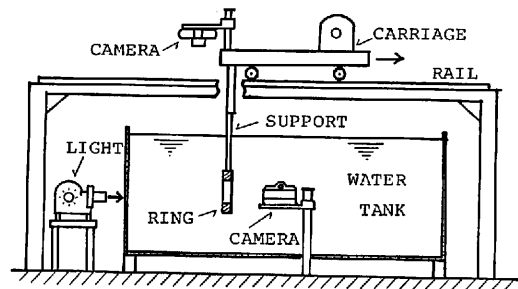
渦輪は曲率をもつ事から自己の誘起する速度により自走する性質が生ずる (Batchelor, 1967)。複数の渦輪の運動については、自走の性質と相互干渉により、渦輪の追い抜きや合体がおこる事は良く知られている (Maxworthy, 1972; Oshima and *et al.*, 1975; Yamada and Matsui, 1979)。また渦糸のつながりかえや粘性の効果についても Kambe and Oshima (1975), Oshima and Asaka (1977) 等が報告している。

一方、三次元の物体まわりの流れに関する研究は球に関するものが大半で、その他についてはほとんど報告されていない。リングの後流については、わずかに Roshko (1954) により風洞実験が行なわれ、後流中の流れの周期性からその周波数は得ているものの、構造については全く言及していない。そこで、既に著者のうちの一人は低流速での流速計の開発にリングを用い、風洞実験によりリング後流の速度分布や周波数特性等を調べ、後流中の流速変動に非常にきれいな周期性がある事を報告している (高本・小宮, 1981)。

本研究ではリング後流の流れの構造を明らかにするために水槽を用いて、流れを可視化し観察したので、その結果を報告する。

II 実験装置および実験方法

実験は水槽(幅40cm, 深さ40cm, 長さ100cm)を用い、水槽の上方に設けられた水平なレールの上をモデルを固定した測定用電車を走らせる方法を用いた。装置概観を第1図に示す。電車の速度は0.3cm/sec~100cm/secの範囲で自由に変えることができるが本実験では0.5cm/sec~12.0cm/secの範囲で測定を行なった。モデルリングの支持は翼型断面をもつサポート(厚み1.6mm, 幅6mm, 長さ15cm)により電車に固定されている。今回実験に用いたモデルリングは、外径(D)と厚みを一定にし、幅(W ; 外半径-内半径)を変えた4種類で、表1に諸量を示した。なおリングの材質は黄銅で断面形は矩形である。実験条件は、リングの形状を表わす D/W の比と Reynolds 数 ($Re=UW/\nu$, U ; 一様流の流速, W ; 代表長として幅, ν ; 水の動粘性係数) の二つのパラメ



第1図 装置の概観

* 筑波大学水理実験センター

** 通産省工業技術院計量研究所

(1982年5月8日受理)

表1 モデルリングの寸法

外径(D)	内 径	幅 (W)	厚 み	D/W
60mm	40mm	10mm	3mm	6
60	50	5	3	12
60	52	4	3	15
60	54	3	3	20

ータを変えて行なった。

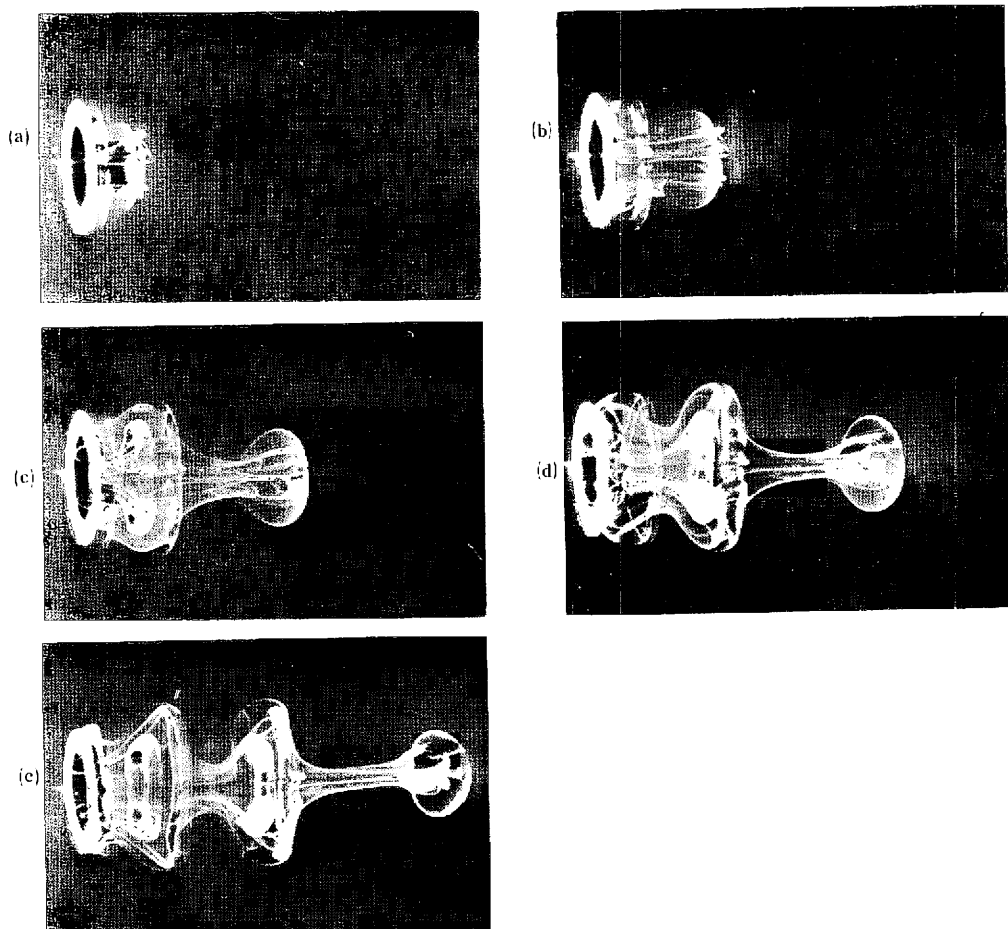
流れ模様は、電解沈澱法による統合流脈膜と、アルミ粉末法による流線を可視化し観察した。ま

た時系列的に変化する流れ模様については、連続的に撮影された流線の写真から渦輪の空間的な配置、および渦輪の移動速度等を求めた。渦輪の放出周波数の測定には熱線流速計を用い、流速変動の波形から放出周波数を読み取った。

III 実験結果

(1) リングの出発流れ ($D/W=6$ の場合)

第2図の一連の連続写真は $D/W=6$ のリングが静止から急に前進を開始した時の流れ模様の変



第2図 静止から出発したリング後方の流れ(電解沈澱法)

$D=60\text{mm}$, $W=10\text{mm}$, $D/W=6$, $U=1.1\text{cm/sec}$, $Re=68.6$ ($Re=\frac{UW}{\nu}$), 斜め上方からの写真で流れは左から右に向かっている。出発からの経過時間 t と経過時間の無次元表示 τ ($\tau=Ut/W$) (a) $t=2.1$ 秒($\tau=7.7$), (b) $t=4.9$ 秒($\tau=18$), (c) $t=8.3$ 秒($\tau=34$), (d) $t=12.8$ 秒($\tau=47$), (e) $t=16.8$ 秒($\tau=61.6$)

化を電解沈澱法で観察したものである。

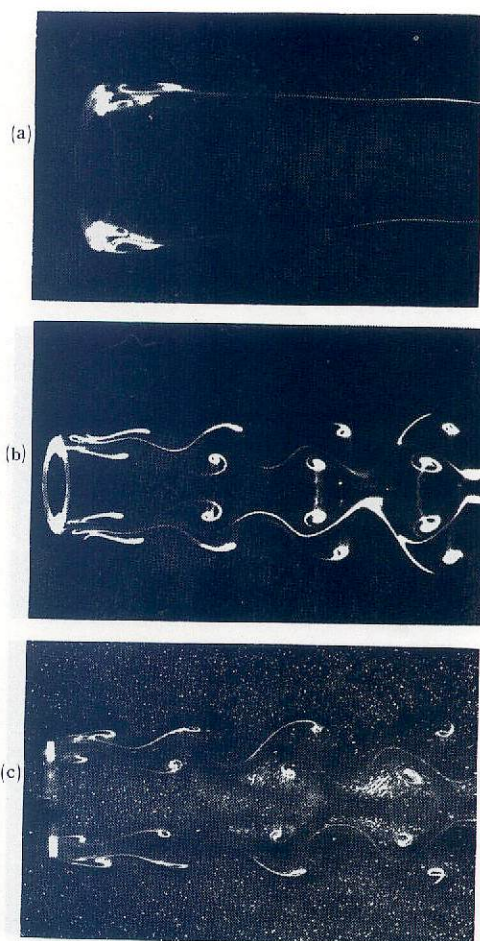
写真(a)(b)は運動開始からそれぞれ2.1秒、4.9秒経過した時の流れで、まず最初にリングの内縁から流れははく離し bulb 状の渦輪が形成されている。つづいてリングの外縁からも流れははく離し環状の渦輪が放出されている。ここでは最初に放出された内側の渦輪を出発渦輪と呼ぶ事にする。

写真(c)は9.3秒後で出発渦輪につづいて周期的に外、内、外と交互の渦輪の放出が観察される。渦輪の回転の向きは内と外で異なり内側の渦輪はリングから後方へ向かって内から外へ、外側の渦輪は外から内へ向かって回転している。

写真(d)(e)はそれぞれ12.8秒、16.8秒経過した時の流れで、出発渦輪は後方へ独立に流されている、引きつづき放出された外側の渦輪と次の内側の渦輪は後方に流されるにつれて相互に近づく様子がよくわかる。外側の環状の渦輪に内側の bulb 状の渦輪が入り込むような流れを形成している。このように外と内の渦輪が交互に放出され相互に近づきながらやがて周期的な渦輪列が形成される。ただし出発渦輪は独立に後方へ流されやがて水槽側壁に衝突する。

(2) D/W と Re 数の変化による流れ模様

第3図と第4図は流れ方向のリング中心軸を含む断面内をスリット光を用いて照らした流れ模様である。第3図は $D/W=6$ 、第4図は $D/W=20$ の場合である。比較的 Re 数の低い領域では第3図(a)や第4図(a)にみられる様にリングの内縁、外縁から流れははく離しリングの背面に一對の渦輪が付着している。リングの中心線上付近の流れには物体の影響はほとんどおよんでいない。さらに Re 数が大きくなるとおよそ Re 数40~50以上で第3図(b)(c)にみられるような渦輪の放出が始まる。前述の出発流れでも示したように $D/W=6$ の場合、流れ模様からわかる事は、リング内縁からはく離した流れは bulb 状の渦輪を形成し、また外縁からはく離した流れは環状の渦輪を形成し、それぞれ交互に放出される。放出された渦輪は後方に流されるにつれて相互に近づき、内



第3図 $D/W=6$ のリングの流れ模様、リング中心軸上断面内の流れ

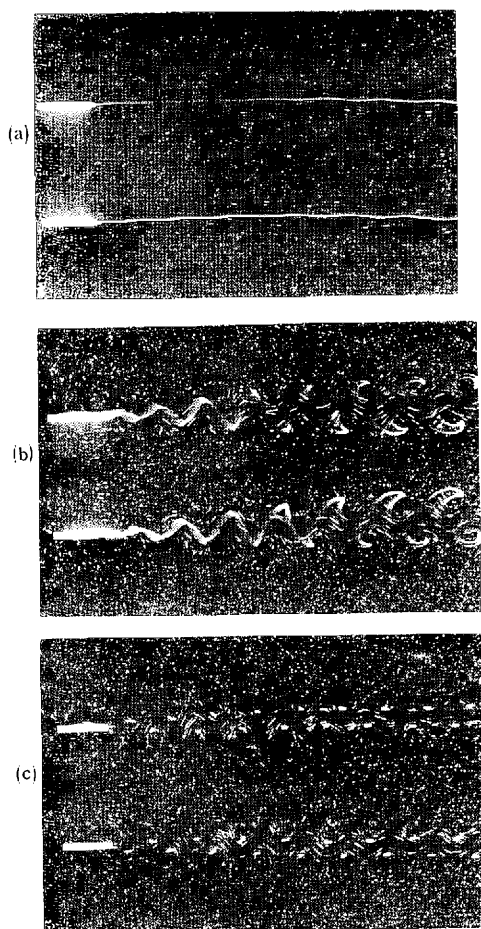
(a) $U=0.5$ cm/sec, $Re=31.2$

(b) $U=0.82$ cm/sec, $Re=51.3$

(c) $U=0.8$ cm/sec, $Re=53.8$

(a)(b)(c)は電解沈澱法、(c)は特にアルミ粉末法と併用した。また(c)は水槽に固定されたカメラにより撮影された。

側の渦輪が外側の渦輪に入り込む様に見える。すなわち内側の渦輪の位置は外側の渦輪間隔の半波長より進んでいる。また第3図(c)でもわかる様に流線を見ると中心軸上付近の流れは物体の影響を受け脈動を示している。同様に $D/W=20$ の場合 Re 数およそ40以上で渦輪の放出が始まる。第4図(b)によると流脈膜は波状を呈しているが流線は渦輪の存在を示している。さらに Re 数が大



第4図 $D/W=20$ のリングの流れ模様、リング中心軸上断面内の流れ

(a) $U=1.21\text{cm/sec}$, $Re=32$

(b) $U=1.88\text{cm/sec}$, $Re=48.2$

(c) $U=2.48\text{cm/sec}$, $Re=63.7$

アルミ粉末法電解沈澱法を同時使用水槽に固定されたカメラにより撮影され、静止流体中をモデルリングが左方へ進行している。

きくなると第4図(c)の流線、流脈膜からもわかるように明瞭な渦輪列が形成されている。この渦輪列は前述の場合と同様に外側の渦輪と内側の渦輪が相互に近づき一見対をなして周期的になっている。ただし $D/W=6$ の場合と異なる事は内側の渦輪も環状の構造をもちリング中心軸上付近の流れには物体の影響を受けていない事がわかる。同様に渦輪列の形成されている代表的な例を

第5図に示す、 $D/W=12$ の場合で電解沈澱法による全体の流れ模様である。わずかにサポートの影響が出ているものの周期性の良い配列をしており、直径の大きな外側の渦輪と小さな内側の渦輪が対をなして列を形成している。

以上で述べた流れ模様の特徴を D/W と Re 数で整理した図が第6図である。今回行なった領域ではおよそ次の5つのタイプに分類できる。

TYPE(I); Re 数およそ40以下の領域で、回転の向きの異なる一対の渦輪がリング背面に付着している。定常な流れである。

TYPE(II); $D/W=6$ の場合で $Re=50\sim 150$ の領域において、リングの内、外縁から渦輪が放出され、後方に流されるにつれて外と内の渦輪は相互に近づく。外と内の渦輪は対をなして周期的な渦輪列が形成される。内側の渦輪はbulb状の、外側の渦輪は環状の構造をもっている。

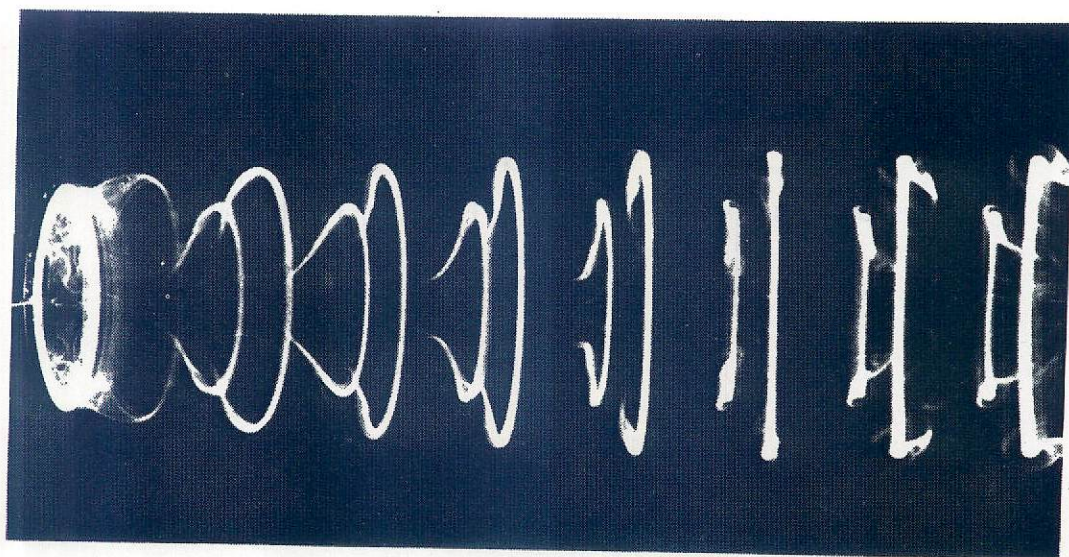
TYPE(III); $D/W=12, 15, 20$ の場合で TYPE(II)と同様であるが、内、外の渦輪とも環状の構造をもち、リング中心軸上付近の流れには物体の影響をほとんど受けていない。

TYPE(IV); **TYPE(V)**; それぞれ TYPE(II)と(III)でみられた流れが乱された流れになる。すなわち渦輪の放出は内、外交互に周期的であるが、後方に流されるにつれてすぐに三次元的に乱された流れになる。

以上5つのタイプに分類され、特にリング形状を表わすパラメータ D/W の違いによって内側の渦輪の構造が異なる事がわかった。

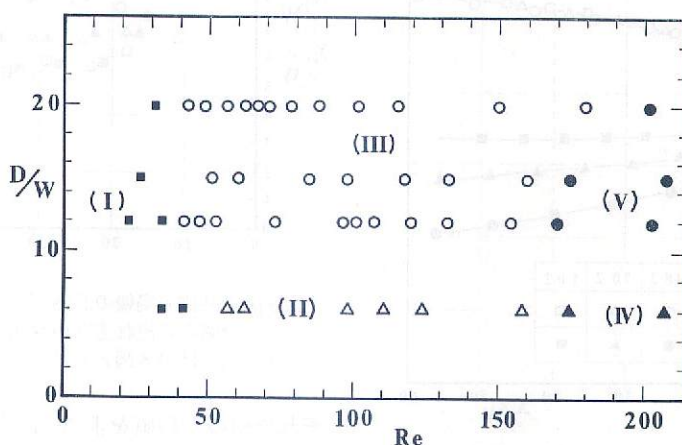
(3) 渦輪列の配置 ($D/W=20$ の場合について)

水槽に固定したカメラにより撮影された流線の写真を用いて、一樣流から見た渦輪の中心位置を判読し渦輪列の空間的な配置を決定した。しかしながら後述するように渦輪列は静止流体に対して一定速度で移動する、すなわち真の渦輪の中心位置は渦輪列とともに移動する座標系から観察した場合にのみ見る事ができる。ここでは渦輪列の移動速度はあらかじめ予測する事はできないので静止流体(一樣流系)に固定した座標系で観察した。渦輪の配置を表わす諸量の記号表示を第7図



第5図 リング後方の渦輪列 ($D/W=12$)

$U=1.36\text{cm/sec}$, $Re=54.6$, 電解沈澱法, 斜め上方より全体を観察している。



第6図 流れ模様の分布図

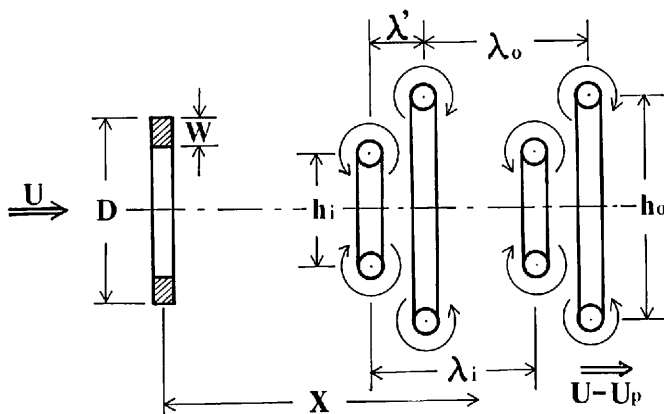
$D/W=6, 12, 15, 20$ の4種類のリングの Re 数による流れ模様の分布を示す。図中の記号は流れ模様 TYPE(I); ■ (黒四角), TYPE(II); △ (白三角), TYPE(III); ○ (白丸), TYPE(IV); ▲ (黒三角), TYPE(V); ● (黒丸) を表わす。

に示す。

まず渦輪の直径および間隔の流れ方向の変化を第8図, 第9図に示し, 諸量はリング幅 W で無次元化されている。渦輪の直径 h_o, h_i について見ると, 外側の渦輪の直径 h_o は流れ方向に徐々に大きくなり $X/W=40$ 以上でおおよそ $h_o/W=25\sim30$ に漸近する, また Re 数の変化に対してはほとんど

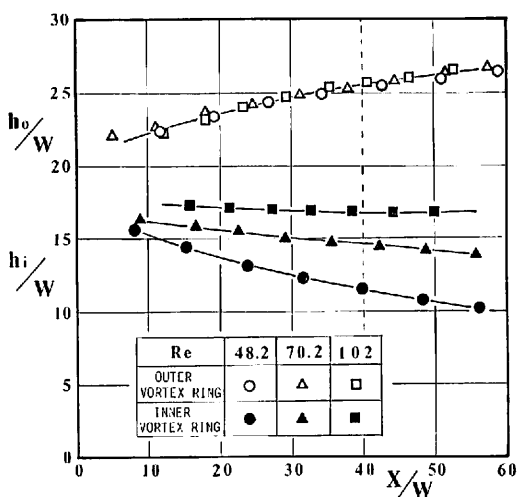
と依存していない事がわかる。一方, 内側の渦輪の直径 h_i について見ると流れ方向に徐々に小さくなる傾向にあり, Re 数が大きくなるにつれて減少する割合も小さくなる。 Re 数 100 以上では流れ方向にその大きさもさほど変化しない。

次に, 渦輪の外側と内側のそれぞれの間隔 λ_o, λ_i について見ると第9図より, 内, 外ともに流れ方



第7図 記号表示

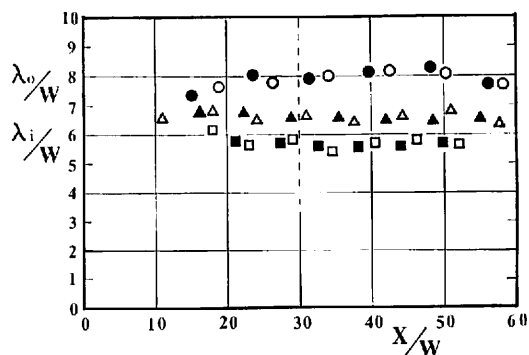
U ；一様流速， D ；リング外径， W ；リング幅， X ；リングからの流れ方向の距離， h_o ；外側の渦輪の直径， h_i ；内側の渦輪の直径， λ_o ；外側の渦輪の間隔， λ_i ；内側の渦輪の間隔， λ' ；近接する外と内の渦輪の間隔， U_p ；渦輪の移動速度



第8図 外側の渦輪の直径(h_o)と内側の渦輪の直径(h_i)の流れ方向の変化 ($D/W=20$)
外側の渦輪 (○△□)，内側の渦輪 (●▲■) を表わし，丸，三角，四角はそれぞれ $Re=48.2, 70.2, 102$ である。

向にほぼ一定の間隔である。また Re 数が大きくなるにつれてせまくなる傾向にある。

以上の事実にもとづき， Re 数の変化による諸量を比較するために，配列の代表値として直径 h_o ， h_i については $X/W=40$ (図中破線) の位置での値を用い \bar{h}_o ， \bar{h}_i とした。また同様に間隔 λ_o ， λ_i と λ' については $X/W=30$ より後方でのそれ



第9図 外側の渦輪の間隔(λ_o)と内側の渦輪(λ_i)の間隔の流れ方向の変化($D/W=20$) 図中の記号は第8図と同じ。

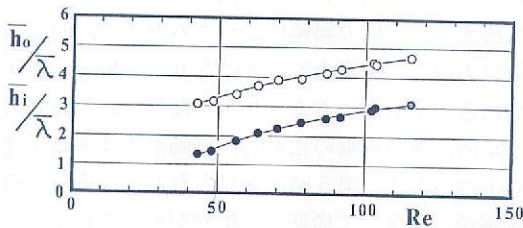
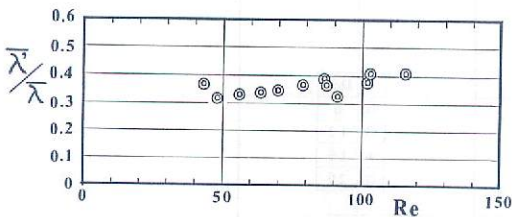
ぞれの値の平均値を求め $\bar{\lambda}$ ， $\bar{\lambda}'$ として整理し，表2にその結果を示した。なお $\lambda_o \approx \lambda_i$ であるから両方の値を用いた平均値を $\bar{\lambda}$ とした。

第10図，第11図に Re 数の変化にともなう配置の変化を示した。第10図によると渦輪の直径と間隔の比 $\bar{h}_o/\bar{\lambda}$ ， $\bar{h}_i/\bar{\lambda}$ は Re 数に依存し， Re 数とともに徐々に増加する。 $\bar{\lambda}$ は Re 数の増加にともない減少するの 비해， \bar{h}_o はほとんど変化しない，また \bar{h}_i は増加する事が $\bar{h}_i/\bar{\lambda}$ に現われ，測定された領域内で2倍に変化している。

第11図には近接する内と外の渦輪の間隔 $\bar{\lambda}'$ と $\bar{\lambda}$ の比をプロットした。 $\bar{\lambda}'/\bar{\lambda}=0.5$ の場合が外側の

表2 渦輪の空間的な配置 ($D/W=20$)

Run No	U (cm/sec)	Re	$\bar{\lambda}$ (cm)	$\bar{\lambda}'$ (cm)	\bar{h}_i (cm)	\bar{h}_o (cm)
1	1.69	43.2	2.54	0.94	3.48	7.74
2	1.88	48.2	2.43	0.78	3.60	7.62
3	2.02	56.2	2.21	0.74	3.96	7.56
4	2.48	63.7	2.05	0.70	4.26	7.62
5	2.74	70.2	1.97	0.69	4.44	7.62
6	2.85	78.5	1.90	0.70	4.68	7.80
7	3.15	86.6	1.81	0.71	4.68	7.68
8	3.14	87.3	1.80	0.66	4.68	7.56
9	3.58	91.3	1.83	0.60	4.74	7.68
10	3.99	101.9	1.71	0.65	4.98	7.68
11	3.70	103.0	1.69	0.69	5.04	7.68
12	4.52	115.4	1.61	0.66	5.04	7.68

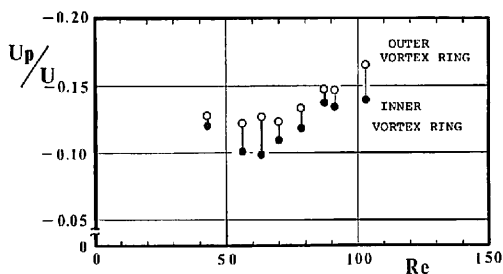
 $D=60\text{mm}$, $W=3\text{mm}$, $Re=UW/\nu$ $\bar{\lambda}$; $X/W \geq 30$ での λ_o , λ_i の平均値 $\bar{\lambda}'$; $X/W \geq 30$ での λ' の平均値 \bar{h}_i ; $X/W=40$ の点での h_i の値 \bar{h}_o ; $X/W=40$ の点での h_o の値第10図 渦輪の直径と渦輪間の間隔比のReynolds数変化, ($D/W=20$), $\bar{h}_o/\bar{\lambda}$; ○ (白丸), $\bar{h}_i/\bar{\lambda}$; ● (黒丸), ただし \bar{h}_o , \bar{h}_i ともに $X/W=40$ の点での直径の値, $\bar{\lambda}$ は $X/W \geq 30$ での λ_o , と λ_i の値の平均値を用いた。第11図 渦輪の間隔比と Reynolds 数の関係
 $X/W \geq 30$ での近接する渦輪の間隔の平均値 $\bar{\lambda}'$ と同じく内, 外の渦輪の間隔の平均値 $\bar{\lambda}$ の比を $\bar{\lambda}'/\bar{\lambda}$ で表わす。

渦列の間隔の半波長の位置に内側の渦輪が配置している場合であるが, 今回測定された領域においては $\bar{\lambda}'/\bar{\lambda}=0.3 \sim 0.4$ の範囲に位置する。すなわち, $\bar{\lambda}$ の半波長より20%~40%内と外の渦輪が近づいたことになる。

(4) 渦輪の移動速度 ($D/W=20$ の場合)

水槽に固定されたカメラにより連続的に撮影された流線の写真を用いて, 静止流体から見た渦輪の移動速度 Up を求めた。連続的な写真から渦輪の中心点の移動距離 $4x$ を読み取り, また写真撮影と同時に記録されたカメラのシャッター信号の時間間隔 T (約1.0 sec~1.5 sec)を用いて $Up=4x/T$ で算出した。ここで対象にした領域は渦輪がリングから放出されリングからの距離 $X/W \leq 30$ までの渦輪列形成初期の段階である。また作業には内と外の渦輪のそれぞれ4個ずつを選び, それ等の移動速度の平均値を用いた。

第12図に Up を一樣流の流速 U で無次元化した値と Re 数の関係を示した。図からわかるように Up/U の符号をマイナスとしたのは一樣流の方向をプラスとすると, 渦輪列は静止流体からリング



第12図 渦輪の移動速度と Reynolds 数の関係
 $0 < X/W \leq 30$ における渦輪の静止流体系か。
 らみた移動速度。白丸は外側の渦輪、黒丸は
 内側の渦輪を表わす。

の方へ引きづられている事になる。特徴的な事は、外側の渦輪と内側の渦輪の移動速度に差が見られ、必ず外側の方が内側より速い事がわかる。すなわち、渦輪列形成初期の段階においては、内と外の交互に配置した渦輪は移動速度に差がある事から相対的な運動を行ない、リングから流れ方向に向かって先に放出された外側の渦輪とつづいて放出された内側の渦輪が近づく事になる。ある一つの渦輪の移動速度について考えてみると、その速度はその渦輪を除く渦輪列全体から誘起される速度と自分自身の誘起する自走速度の和で表わされる。

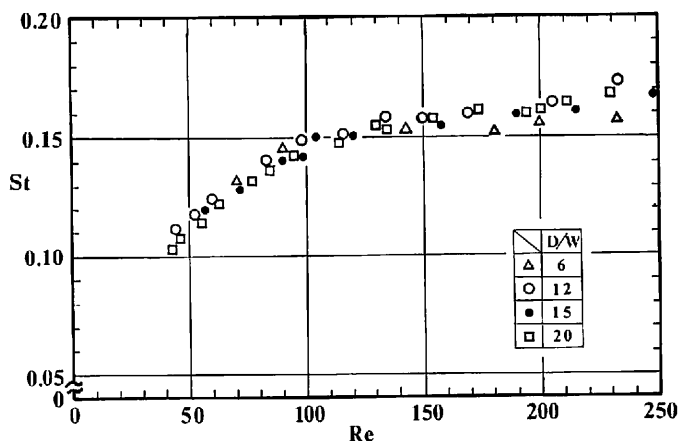
ここで自走速度について言及すると、よく知られているようにポテンシャル理論では1つの渦輪

は3つのパラメータによって表示できる。すなわち、ある有限のコアをもつ渦輪に渦度が集中していると考えて、コアの半径 δ を、渦輪の半径を a 、コアまわりの渦の強さを κ とすると、その渦輪は自分自身の誘起する速度 U_s をもつ。自走の方向は渦輪の作る平面に垂直な方向で回転の向きによって決まる。自走速度 U_s は上記3つのパラメータを用いて

$$U_s = \frac{\kappa}{4\pi a} \log \frac{a}{\delta} \quad (1)$$

で表わされる (Batchelor, 1967)。

以上の事を考慮に入れて流れの写真(例えば第5図)と第8図、第12図よりわかる事は、渦輪はリングの内側と外側から交互に周期的に放出され、放出された渦輪は後方に流されるにしたがって直径 (h_o, h_i) はともに大きくなる。すなわち(1)式からもわかる様に渦の強さが保存されると直径 ($2a$) が大きくなるにつれて自走速度は小さくなる。また自走の方向は渦輪の回転の向きによって決まり、外側の渦輪はリングの方向へ、内側は流れ方向への速度をもつ事になり、結果として互いに近づく傾向にある。しかしながら、前述のように内、外の渦輪の相対的な移動距離はある程度以上近づかず、第5図にも見られる様な内、外の渦輪が対をなして周期的な配列が形成される。



第13図 Strouhal 数と Reynolds 数の関係
 $St = f \cdot W/U$ (f : 渦輪の放出周波数, W : リングの幅, U : 一様流速)

また渦輪列は $X/W=30$ より後方では内、外の渦輪の相対的な運動は少なくなり、全体として一様流速に比べて10~15%減速している、すなわち渦輪列はリングから後方へ $U-U_p$ という速度で流されている事になる。

(5) 渦輪の放出周波数

前節までに述べた渦輪の放出についてその放出周波数を測定した、内側の渦輪の流速変動の信号波形は非常にきれいな正弦波形を示しており、その波形から周波数 $f(H_z)$ を読み取った。また周波数をリング幅 W と一様流速 U を用いて無次元化し Strouhal 数 ($St=fW/U$) を求めた。第13図に Strouhal 数と Reynolds 数の関係を示した。 $Re=40$ 以上で渦輪の放出が始まり、Strouhal 数は $St=0.1$ から Re 数とともにおよそ $Re=100$ までほぼ直線的に増加している。さらに $Re=100$ 以上では St 数はわずかながら増加する傾向にある。

IV おわりに

リングの後流を流れの可視化技術を用いて観察した。Reynolds 数がおおよそ40以上になるとリングの内、外縁から回転の向きの異なる渦輪が交互に放出される。放出された渦輪は後方に流されるにしたがって相互に近づき渦輪列を形成する。その渦輪列は直径の大きな外側の渦輪と直径の小さな内側の渦輪が対をなし、流れ方向に周期的な配列を構成している。

また渦輪列の空間的な配置は二次元の流れで良く知られた Kármán 渦列のように間隔と波長の比が一意的に決まるのではなく、リング形状を表わすパラメータ D/W と Reynolds 数に依存している。さらに渦輪列は全体として一様流速に比べて10~15%減速され後方へ流される。以上のような渦輪列の形成される領域の上限の Reynolds 数はおおよそ150~200位で、それ以上になると渦輪の放出は見られるものの乱れた流れとなる事がわかった。

リング形状を表わすパラメータ D/W の違いによる流れ模様の変化は、 D/W が小さい時 ($D/W=6$) には内側の渦輪が bulb 状の構造をしている

という事である。

よく知られている様に、渦輪は曲率を持つことから自己の誘起する速度により自走する性質がある。リング後流に見られる様な渦輪列は、渦輪の自走速度とその粘性による減衰や、また系の他の渦輪の誘導速度によって安定な配列を形成しているものと考えられる。

謝 辞

本研究を行なうにあたり、この共同研究の機会を与えて下さった井口正男前センター長に心から感謝致します。またいろいろと御教示いただいたお茶の水女子大学理学部大島裕子博士に感謝致します。実験を行なうにあたり御協力いただいた構造工学系芦刈照夫君、水理実験センター小島豊盛氏、地球科学系倉田文さんに心からお礼申し上げます。

文 献

- 大島裕子 (1978) : 渦輪。日本物理学会誌, 33, 413—417。
高本正樹・小宮勲一 (1981) : リングの渦流速計ブラッフォディへの適用。計測自動制御学会論文集, 17, 506—510。
Batchelor, G. K. (1967) : *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University Press, 510.
Kambe, T. and Oshima, Y. (1975) : Generation and decay of viscous vortex rings. *J. Phy. Soc. Jap.*, 38, 271—280.
Maxworthy, T. (1972) : The structure and stability of vortex rings. *J. Fluid, Mech.*, 51, 15—32.
Oshima, Y. and Kambe, T. and Asaka, S. (1975) : Interaction of two vortex rings moving along a common axis of symmetry. *J. Phy. Soc. Jap.*, 38, 1159—1166.
Oshima, Y. and Asaka, S. (1977) : Interaction of multi-vortex rings. *J. Phy. Soc. Jap.*, 42, 1391—1395.
Roshko, A. (1954) : On the development of turbulent wakes from the vortex streets. *N. A. C. A. Report.*, 1191, 1—25.

Saffman, P. G. and Baker, G. R. (1979) : Vortex Interactions. *Ann. Rev. Fluid. Mech.*, **11**, 95—122.

Yamada, H. and Matsui, T. (1979) : Mutual slip-through of a pair of vortex rings. *Phys. Fluid.*, **22**, 1245—1249.