リングからの渦発生と渦流量計への応用[†]

高 本 正 樹*・小 宮 勤 一*・泉 耕 二**

Vortex Shedding from a Ring and an Application to a Vortex Flowmeter

Masaki TAKAMOTO*, Kin-ichi KOMIYA* and Kouji IZUMI**

This paper is concerned with vortex shedding from rings and an application of this phenomenon to a vortex flowmeter for pipe flow.

Vortex rings shed alternately from the inside and outside of a ring rotate opposite to each other and form stable vortex rows on the common axis of symmetry. The configuration of the rows is found to be different from that of Karman vortex street, that is, the spacing between the alternating vortices is not equal. Characteristics of vortex shedding from rings with various shapes are also experimentally investigated.

Vortex shedding from a ring in pipe flow is not disturbed by the existence of the wall of the pipe and axisymmetrical velocity profile. The frequencies of vortex shedding from a ring can be detected more stably at the behind of the center of the ring comparing to vortex shedding from a plate. Thus, a ring is thought to have advantages as a bluff body of a vortex flowmeter for pipe flow.

Keyword: vortex shedding flowmeter, flow velocimeter, vortex, vortex ring

1. ま え が き

カルマン渦列は、一様な流れの中で円柱などのような2次元柱状物体から安定に放出されることが知られている。この現象は、規則性がよいことから流量計に適用され、現在では広い分野で用いられるようになって

ている。ところで、3次元での安定な渦列の放出についても、今までに多くの理論的、実験的な研究がなされている¹⁾。たとえば、球の後流渦は、3次元の周期的な構造が見られる²⁾が、流量計に応用できるほどの規則性はない³⁾。われわれは、先に、リングから規則的なリング渦列が放出され、高精度の流速測定にも利用できることについて報告した⁴⁾。

このリング渦は、リングの内側と外側から交互に発生し、同軸上に大小2列の安定なリング渦列を形成する。3次元の渦糸は、曲率をもつことにより自己誘導速度成分が生じ⁵⁾、2次元のカルマン渦列とは異なる特性が現れる。本文では、風洞実験、および流れの可視化実験により明らかにしたこれらの特性について述べる。工業用の渦流量計は、円管内で用いることが多い。軸対称な流速分布をもつ円管内の流れの中では、従来の渦流量計で用いられている2次元柱状物体に比較し、リングは渦発生体として、より合理的な形状であると考えられる。そこで、円管内の流れの中で、リングから発生する渦の安定性、管壁の影響などについて調べ、リングの渦発生体への適用性についても検討を行う。

2. 実験装置、および実験方法

実験は、主に、**Photo. 1**に示す400mm×400mmの測定部断面をもつ低乱風洞を用いて行った。渦の発生は、流体振動現象であり、流体の境界や流れの乱れの影響を受けやすいと考えられる。しかしながら、ここで実験対象に用いたリングの半径は10mm程度であり、また、本風洞は0.03%程度の低い乱れ率の流れを発生できるため、渦発生に及ぼす測定部壁面や乱れの影響は、ほとんどないと考えられる。なお、乱れ率は変動流速成分の2乗平均平方根の1様流速の大きさに対する比を百分率で表わすことにする。まず、リングを細いワイヤで風洞測定部内に流れに対して垂直につるし、複数の熱線風速計を用いてリング後流の流速変動の波形、位相、周波数などを測定した。渦の発

[†] 第19回計測自動制御学会学術講演会で発表(昭55・8)

第20回計測自動制御学会学術講演会で発表(昭56・7)

* 計量研究所 茨城県新治郡桜村梅園 1-1-4

** 筑波大学水理実験センター 茨城県新治郡桜村天王台 1-1-1

* National Research Laboratory of Metrology, Niihari-gun, Ibaraki

** Environmental Research Center, Tsukuba University, Niihari-gun, Ibaraki

(Received November 26, 1981)

(Revised March 11, 1982)

Photo. 1 Low turbulent wind tunnel with a test section of 400 mm×400 mm A; Test section, B; Hot wire anemometer, C; Nozzle

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus for flow visualization

生には、引き込み現象がある⁶⁾ので、渦発生の周波数とワイヤの固有振動数の一致を避けるため、ワイヤの張力を変えながら測定した。熱線風速計のセンサの位置は、リングの中心に原点、流れの方向にX軸、それに垂直な上下方向に、Y軸をとり、(X, Y)座標を用いて表わす。一様流の流速は市販のJIS形ピトー静圧管を用いて測定した。

リング後流の流れの可視化には **Fig. 1** に示す幅 400 mm、深さ 400 mm、長さ 1000 mm の水槽を用いた。リングは細い翼形断面をもつ支持棒で、走行台車に固定してある。電解沈澱法⁷⁾により可視化した流脈は、台車上に固定したカメラから、また、アルミ粉末法で可視化した流線は、静止系に固定したカメラから撮影した。なお、電解沈澱法では、リング表面に薄く塗ったハンダを約 20V の直流電圧で電気分解した。

軸対称の流速分布をもつ円管内の流れの中で、リングから発生する渦の特性は、**Photo. 2** に示す実験装置を用いて調べた。この装置は、直径 50 mm の円管内にリング、円柱などの渦発生体を容易に取り付けることができ、その後方でセンサの位置を移動させられる熱線風速計により、発生する渦を検出することができる。この装置の上流側に直管を接続し、送風機で発

Photo. 2 Experimental apparatus for observation of vortex shedding in pipe flow A; Setting chamber, B; Model ring, C; Pipe

Fig. 2 Symbols denoting dimensions of a model ring

生させる流れの流速分布を十分に発達させた。また、下流側に接続した直管内で、中心部の流速をピトー静圧管で測定した。円管内の流れは、 $v=1$ m/s 程度で層流から乱流に移移し、乱れ率は $v=2\sim 20$ m/s の範囲で 3~4% 程度であり、かなり乱れている。

リング各部の寸法を表わす記号を **Fig. 2** に示す。実験では、主に、矩形的の断面形状をもつリングについて、リングの平均直径 d とリングの幅 W の比を変え、リングから発生する渦の特性を調べた。さらに、異なる断面形状をもつリングについても、渦発生の周波数などを測定したが、以下では特に断わらない限り、矩形的の断面形状をもつリングについて述べているものとする。なお、ここで用いるレイノルズ数 Re 、およびストローハル数 St は、それぞれ次式で表わされるものとする。

$$Re = \frac{vW}{\nu} \quad (1)$$

$$St = \frac{fW}{v} \quad (2)$$

ν : 流体の動粘性係数

f : 渦発生の周波数

3. リング渦の特性

3.1 リング渦列の発生とその構造

風洞中につるしたリングの中心後方の点 $(0.5d, 0)$ の流速ゆらぎの波形を **Fig. 3** に、その周波数解析し

Fig. 3 Oscillograms of velocity fluctuations in ring wakes $Re=300$, $t=2$ mm, $d_0=20$ mm, ($X=0.5d$, $Y=0$)

Fig. 4 Frequency spectra of velocity fluctuations in Fig. 3

Fig. 5 Oscillograms of velocity fluctuations in ring wakes $d/w=6$, $t=2$ mm, $d_0=20$ mm ($X=0.5d$, $Y=0$)

Photo. 3 Streakline behind a ring started impulsively from rest. $Re=68$, $d/w=5$, $t=3$ mm, $d_0=60$ mm

(a) $Re=51$

(b) $Re=74$

Photo. 4 Streakline behind a ring in the plane including the axis of symmetry $d/w=5$, $t=3$ mm, $d_0=60$ mm

た結果を Fig. 4 に示す。リングは $t=2$ mm, $d_0=2$ mm に固定し, d_i を変えることにより, パラメータ d/W の値を変えている。なお, このときの Re 数は約 300 である。明瞭な境界はないが, リングの d/W の値が小さくなると, Fig. 4 (a), (b) のように, 渦発生による流速ゆらぎに, それよりも低い周波数の流速ゆらぎが重畳して測定されるようになる。また, 逆に d/W の大きいリングでも, (e) のように, 同様の傾向が少し現れる。この中間では, 低周波の流速ゆらぎもなく, Fig. 5 に示すように, 広い Re 数範囲で非常に規則的な渦発生による流速ゆらぎが観測される。なお, Re 数が小さくなると, 規則的な流速ゆらぎが観測される d/W の範囲が広がる傾向がある。

安定に渦が発生するときのリング後流の構造を, さらに明らかにするため, 小さい流速で大きい Re 数が得られる水中で, リング後流の流れを可視化した。

Photo. 3 は, 出発流れの出発直後に近いときの流脈

(a) $d/w=5$, $Re=57$ (b) $d/w=19$, $Re=48$ **Photo. 5** Streakline is superposed on a streakline
 $t=3$ mm, $d_0=60$ mm

を示す可視化写真である。この写真から、リングの内側と外側から完全なリング渦が交互に発生していること、また、最初のリング渦はリングの内側から発生していることがわかる。Photo. 4 は、同様の可視化を光スリットにより、リングの中心軸を含む面で切断し、撮影したものである。Photo. 4(a)は、リング渦列が発生する臨界 Re 数に近い Re 数における、また、(b)は、それよりも少し大きい Re 数における渦発生の様子を示す。リングの外側と内側から発生する大小のリング渦は、互いに逆符号の循環をもち、安定な配列をなしている。この渦列全体は、リング渦の相互干渉により、一様流の中で流れと逆方向に移動速度をもつが、最初にリングの内側から発生したリング渦は、これらの渦列とは独立に、一様流の方向に移動する。この渦列の大きな特徴は、同軸上に並んだ大小のリング渦列が、カルマン渦列のように180度の位相差で互い違いになっていないことである。孤立した1個のリング渦は、1本の直線の渦糸と異なり、次式で近似される自己誘導による自走速度⁵⁾ v_s をもっており、このことがこの相違の原因と考えられる。

$$v_s = \frac{\kappa}{4\pi a} \log \frac{a}{\varepsilon} \quad (3)$$

a : リング渦の半径

ε : リング渦の芯の半径

κ : リング渦の循環

ここでは κ の符号から、内側のリング渦は流れに対してリングから遠ざかる方向に、外側のリング渦はそれと逆方向に v_s をもつため、渦列全体が流れに対してリング方向へ移動しつつ、両者は相対的に接近する。一方、 κ の符号の異なる両者は、接近すると相互干渉により反発し合う。したがって、両者は接近しても通過するには至らず、可視化写真に示す位置関係で安定する。この安定な渦配列は、渦が放出された後すぐに達成される。

Photo. 5 (a), (b) は、流脈に流線を重ね合せた可視化写真で、それぞれ $d/W=5, 19$ のリングの後流の様子を示している。前者では、中心軸付近に内側のリング渦の強い影響が及んでいるが、後者では、ほとんどその影響が見られない。なお、さらに d/W の値が小さいリングについては、明瞭なリング渦の発生は、可視化できなかった。

つぎに、リング渦列の波長 λ と f を風洞中で測定した。これらの測定値から、渦の干渉によりリング渦列全体が流れに対してもつ相対速度 v_r は、次式で推定することができる。

$$v_r = v - \lambda f \quad (4)$$

Fig. 6 には、パラメータ d/W による λ と v_r の変化を、それぞれ W と v で無次元化して示してある。なお、同図中の () 内に示す値は、連続して撮影した可視化写真から求めた値である。 $d/W=6 \sim 19$ の範囲で、 λ , v_r に大きな変化はなく、また、リング渦列は、カルマン渦列と同様に、一様流の中で流れの1割程度の速さで流れと逆方向に動いている。**Fig. 7** は、 Re 数に対する f の変化を St 数で整理した結果である。なお、 $d/W=4$ のリングからの渦放出は、規則性がよくないため、大体の値を示してある。 St 数は、 $Re=1000$ 以下の範囲ではかなり変化し、 $Re=200$ 程度で最大になる。

Fig. 6 Spacing and relative velocity of ring vortex streets $Re=100$

Fig. 7 Variation of Strouhal numbers with Reynolds numbers $t=2$ mm, $d_o=20$ mm

Fig. 8 Shapes of cross sections of rings and their Strouhal numbers $Re=300$, $d/w=6$, $d_o=20$ mm

3.2 リング断面形状の影響

さらに、リングの断面形状を変えたときの渦発生について調べた。まず、Fig. 8 に示す 4 種類の断面形状をもつ $d/W=6$ のリングから、発生する渦の周波数を測定した。なお、同図中の t は、リング断面の流れ方向の厚さを表わしている。いずれのリングからも規則的にリング渦が放出され、カルマン渦の場合と同様に、断面が円のように後流幅の狭い形状のリングでは、 St 数が大きい。また、流れに対して前後が対称でない断面形状をもつリングでは、流れに対する向きによって、渦発生のようなすが異なる。Fig. 9 は、このような断面形状をもつ $d/W=5$ のリングについて、流れに対する向きを変え、リング中心後方で測定した流速ゆらぎの波形である。Fig. 9(a) は、(b) に比較して後流幅が広く、したがって、実質的には d/W の値がより小さなリングからの渦放出となっており、規則性が劣る結果になっていると考えられる。

Fig. 10 は、Fig. 3(e) の $d/W=12$ のリングについて、 f と Re 数の関係を示す図で、縦軸の f は、 W と ν を用いて無次元化してある。 $Re=400$ 程度のとこ

Fig. 9 Oscillograms of velocity fluctuations in ring wakes $Re=500$, $d/w=5$, $t=5$ mm, $d_o=60$ mm, ($X=0.5d$, $Y=0$)

Fig. 10 Variation of non-dimensional frequencies of ring vortex shedding with Reynolds numbers $d/w=12$, $t=2$ mm, $d_o=20$ mm

Fig. 11 Frequency spectra of velocity fluctuations in the discontinuous region in Fig. 10

ろで、無次元周波数に急激な変化が見られる。このリングの断面形状は矩形ではあるが、 $W=1.54$ mm, $t=2$ mm で Fig. 3 の他のリングに比較し、 W より t がかなり大きい。このように、幅に比較して流れ方向に

厚い物体では、前縁で剥離した流れが後縁付近で再附着する⁹⁾が、 Re 数の増加に伴って再附着しなくなると、後流幅は急に広くなり、このような不連続領域が現れると考えられる。Fig. 11 には、この不連続領域での流速ゆらぎの波形の周波数解析した結果を示す。

Fig. 11(b) は、この領域の中間で、再付着が間欠的に発生し、同時に二つの渦放出モードが見られる。このように、一方のモードから他方のモードへ、しだいに遷移してゆくため、ヒステリシスはほとんど現れない。

4. 渦流量計への応用

工業用の流量計は、円管内を流れる流体の流量測定に用いられることが多い。ところで、カルマン渦列は、基本的に 2 次元流の中で安定に発生する。しかし、円管内の流速分布は軸対称であり、その中に取り付けた柱状の渦発生体の両端近くでは、流れが複雑になるため、渦の発生が乱される。そこで、従来の渦流量計では、円管内 3 次元流中で、できるだけ 2 次元性のよい渦が、安定に放出されるような断面形状をもつ柱状物体が、渦発生体として設計されている。また、最近では、さらに積極的に、断面形状が軸方向に連続的に変化する柱状物体を用いて、渦放出を安定化する試み⁹⁾もなされている。しかしながら、このような 3 次元流中では、カルマン渦の 2 次元性に固執しないで、むしろ、3 次元的な渦を安定に放出させることが、より根本的な対策と考えられる。このような観点から、円管内の流れの中で、リングから放出される渦について、調べ、リングの渦発生体への適用性について検討した。

まず、円管内で同じ幅の平板とリングから発生する渦について比較した。Fig. 12(a) は平板後方の点、(b) は平板近くの点、(c) はリング外側の近くの点、(d) はリング中心後方の点の流速ゆらぎの波形で、渦発生体から見て (a) と (d)、(b) と (c) が同じ位置に対応している。(b) の点は、平板から発生する渦を最も安定に検出できる位置であり、(c) のリング外側の点と同様な波形が得られるが、(c) の点がわずかに波形の乱れが小さい。(a) の点では、平板から離れているため、渦発生による流速ゆらぎの振幅は小さくなり、流れの乱れと区別できなくなる。それと同じ距離だけリングから離れている (d) の点では、リングの中心後方であるため、リング渦の円周全体からの積分された影響を受けることにより、流速ゆらぎの振幅は大きくなり、不規則な流れの乱れの影響は相対的に小さくなって、このような正弦波状の波形が得られると考

Fig. 12 Comparison of velocity fluctuations in plate wakes and ring wakes in pipe flow $Re=500$, $d/w=6$, $t=2\text{mm}$, $d_0=20\text{mm}$

Fig. 13 Oscillograms of velocity fluctuations in ring wakes in pipe flow $Re=5000$, $d/w=6$, $t=2\text{mm}$, $(X=0.5d, Y=0)$

えられる。したがって、円管内の乱れの大きい流れの中でも、リングから発生するリング渦は、より安定に検出される。

つぎに、リング渦発生に及ぼす管壁の影響について調べた。Fig. 13 には内径 50 mm 円管内で大きさの異なる $d/w=6$ のリングの後流の流速ゆらぎの波形を示す。管壁の影響だけとはいえないが、円管内ではリングと管壁のすき間によって、この波形は大きく変化する。たとえば、オリフィス板のように、このすき間がないリングからは、規則的な渦は放出されないが、Fig. 13(e) に示すように、わずかでもすき間があれば、後流の流速ゆらぎは、かなり周期的になる。また (b) の波形は、非常に安定である。これは次元流中のカルマン渦発生の場合と同様に、リング外周から軸対称の管壁までの間隔が適当であるとき、管壁の存在は、リング渦発生を安定化する効果があるからと考えられる。

5. あとがき

一様な流れの中で、リングから発生する渦の諸特性を明らかにし、さらに、この渦の流量計への応用を検

討するために、円管内の流れの中で、リングから発生する渦について調べた。得られた主な結果を以下に要約する。

一様流中で

(1) d/W の値が 6 前後の後方では、広い Re 数範囲で、渦発生による規則的な流速ゆらぎが観測される。

(2) リングの外側と内側から交互に発生する渦は、流体中でリング状に完全に閉じており、その配列はカルマン渦列のように、180 度の位相差で互い違いにはなっていない。

(3) St 数は $Re=1000$ 以下で大きく変化し、 $Re=200$ 程度で最大となる。また、 St 数はリングの断面形状によっても大きく変化し、特に、 w に対して t が大きくなると、不連続な領域が現れるようになる。

直径 50mm の円管内で

(4) 管壁とリングの間に、わずかでもすき間があれば、周期的に渦が発生する。

(5) 外径 20mm, $d/W=6$ のリング後方で、最も規則的な流速ゆらぎが観測され、これは同一の w の平板の場合に比較して、より乱れが小さい。

リングから発生する渦は、2 次元的なカルマン渦のように、渦系の両端から乱されることがないし、リング中心部後方では、渦の円周全体からの積分された影響が及ぶため、この点では平板の場合に比較して、よ

り安定に渦周波数を検出できるなど、渦流量計に応用するうえでの特長がある。しかしながら、今後、この流量計を開発するためには、(i) 低 Re 数領域での非直線性の補正、(ii) リングの支持方法、(iii) 円管内での最適なリングの断面形状、寸法など、さらに解決しなければならない問題がある。

参 考 文 献

- 1) S. Goldstein: Modern Developments in Fluid Dynamics, 577/579, Dover Publications (1965)
- 2) E. Achenbach: Vortex Shedding from Spheres, J. Fluid Mech., **62**-2, 209/221 (1974)
- 3) S. Taneda: Visual Observations of the Flow Past a Sphere at Reynolds Numbers between 10^4 and 10^6 , J. Fluid Mech., **85**-1, 187/192 (1978)
- 4) 高木, 小宮: リングの渦流速計ブラックボディへの適用 計測自動制御学会論文集, **17**-4, 506/510 (1981)
- 5) G. K. Batchelor: An Introduction to Fluid Dynamics, Chap. 7, Cambridge Univ. Press (1967)
- 6) P. K. Stansby: The locking-On of Vortex Shedding due to the Cross-Stream Vibration of Circular Cylinders in Uniform and Shear Flows, J. Fluid Mech., **74**-4, 641/665 (1976)
- 7) 浅沼: 流れの可視化ハンドブック, Chap. 5, 6, 朝倉書店 (1977)
- 8) 岡島: 一様流中におかれた矩形断面構造物周りの流れ, 構造物の耐風性に関するシンポジウム講演論文集, 177/181 (1978)
- 9) 本多, 山崎: 円管内 3 次元流中での渦放出の安定化計測 自動制御学会論文集, **17**-7, 764/769 (1981)