円管内における円柱からの渦放出*

横井 嘉文^{*1}, 斎藤 聡^{*2}
亀本 喬司^{*3}, 小川 胖^{*4}

Vortex Shedding from a Circular Cylinder in a Pipe

Yoshifumi YOKOI, Satoshi SAITO,
Kyoji KAMEMOTO and Yutaka OGAWA

Although there are many reports which present the performance of the Karman vortex shedding flowmeter, few reports discuss the features of vortex shedding in a pipe flow. In this study, the vortex shedding from a circular cylinder in a pipe was observed with the aid of the laser light sheet technique which is based on the tracer method, in the range of Reynolds numbers (based on mean flow velocity and diameter of a pipe) from 810 to 20 000. As a result of the experiments, in the Reynolds number range of 1 000 to 4 600, two typical patterns of vortex shedding were observed, one of which is a type of Karman vortex shedding and the other, a type of twin vortex shedding. It was known that the two configurations of vortex shedding appear intermittently and alternatively in the pipe flow. The relationship between Strouhal and Reynolds numbers was examined.

Key Words: Vortex, Pipe Flow, Flow Visualization, Flowmeter, Circular Cylinder

1. 緒 言

流れの中に柱状物体を置くと、その背後から交互に周期的に渦が放出され、下流においてはカルマン渦が形成される。このカルマン渦を流量計測に応用した工業計測器にカルマン渦流量計がある。このカルマン渦流量計(以下、渦流量計と呼ぶ)は簡単な構造で可動部がなく、計測流体の性質に依存しないなどの特色を持ち、水、石油、空気などの一般流体の流量測定はもとより、液体窒素、液化天然ガス(L.N.G.)などの極低温流体の流量測定や、自動車用エンジンへの空気供給量の計測などの特殊用途に幅広く用いられている。しかしながら、渦流量計の性能に関する報告⁽¹⁾⁽²⁾に対して、その内部流れに関する研究は少なく、とりわけ渦流量計の精度の向上や信頼性の確保にとって大変重要である円管内の渦放出の様子を可視化観測した例は、あまり見受けられていない。

関連する研究として、平野・菊池ら⁽³⁾は、円管内空

気流中の円柱上の時間平均圧力分布や放出される渦の配列などの特徴を熱線流速計を用いた計測により示しており、Taneda⁽⁴⁾は、平行2平板間にて円柱をえい航し、平板間隔を変えたことによる渦放出の変化を可視化して、壁の間隔と円柱外径の比が減少するにつれて渦列の波長が減少することを示している。しかし、いずれにしても円管内での渦放出の様子が明確に把握されるには至っていない。

本研究では、渦放出体に円柱を用いて渦流量計の簡単なモデル化を行い、円柱外径、管内平均流速をパラメータとして、円管内に置かれた円柱からの渦放出の可視化計測を行い、円管内の渦放出の様子を明らかにした。

2. 実験装置および方法

2・1 装置の概略 測定部内径 50 mm の円管内平均流速 1.8~45.5 cm/s (円管内径 D によるレイノルズ数, $8.1 \times 10^2 \sim 2.0 \times 10^4$) にて、レーザライトシートを光源とするトレーサ法により円管軸を含む平面の流れの可視化計測を行った。図1に実験装置の概略および図2に可視化装置と測定部の概略を示す。実験装置は測定部を含むパイプライン、はかり(ひょう量: 98N)、可視化装置から構成されている。測定部は可視

* 平成2年9月24日 第68期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成3年4月10日。

*¹ 正員、横浜国立大学大学院 (〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台156)。

*² 横浜国立大学大学院、〔現在：川崎製鉄(株)〕。

*³ 正員、横浜国立大学工学部。

*⁴ オーバル機器工業(株) (〒236 横浜市金沢区福浦1-9-5)。

化撮影の際に生じる、円管(透明アクリル製)によるレンズ効果にもとづく端面のひずみを少なくするため、透明アクリル製の水封水槽(□120 mm)が円管外周に設けられている。なお、整流装置、上流直管部 $14D$ を経た測定部における流速分布は、十分発達した流れの流速分布に近いことをトゥインクルレーザーシート法⁽⁵⁾を用いた可視化流速計測により確認している。

2・2 供試円柱と可視化方法 供試円柱は透明アクリル製で、外径 $d=10, 15, 20, 25$ mmの4種類用意した。絞り比 β (円柱外径を円管内径で無次元化したものであり、 $\beta=d/D$ で定義される)⁽⁹⁾はそれぞれ $\beta=0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ である(絞り比 $\beta=0.3$ は市販されている渦流量計の絞り比に相当する)。おのおのの円柱の端面は、円管内壁に密着するように加工されており、円柱スパン方向中央部にて、上流側よどみ点より $\pm 30^\circ$ の位置に可視化用トレーサ浸出孔($\phi 1$ mm)が設けられている。円管内水流中で浸出孔より浸出したトレーサ(青色蛍光インク、比重1.06)の挙動は、レーザーシート法⁽⁶⁾によって可視化され、シート面に垂直上方に設けたCCDビデオカメラにて撮影され、ビデオテープに録画された。

2・3 実験方法 流量調節バルブの操作により測定部の流速設定を行い、取水量と取水に要した時間から測定部の平均流速を求める。次に、円柱に設けた浸出孔よりトレーサを流れの中に注入し、可視化面内の流れ模様の録画(撮影時間は約5分)を行った。録画中にて、3～5回ほどの取水量、取水時間の測定を行い測定部平均流速を求めた。一つの円柱につき流速を6段階に変化させ、4種類の円柱につき可視化計測実

験を行った。

3. 実験結果および考察

3・1 円管内での渦放出パターンについて レーザライトシート法を用いて、円管内に置かれた円柱後流の管軸を含む断面内の流脈線を可視化したビデオ静止画像を図3に示す。また、レイノルズ数 Re (ここで、 $Re=v \cdot D/\nu$, v は管内平均流速, D は円管内径, ν は動粘性係数)により、流れの状態を層流域、遷移域、乱流域に区分し、各絞り比 β ごとの円管内の渦放出状態を表1に示す。ここで、層流域は $Re < 1000$, 遷移域は $1000 < Re < 5000$, 乱流域は $Re > 5000$ と区分した。絞り比 $\beta=0.2$ の場合にて、層流域から遷移域にかけての円管内円柱からの渦放出は、複雑な様相を示している。図3(a)と図3(b)の組合せに見られるように、同一レイノルズ数において円柱の両側から交互に放出される、いわゆるカルマン渦形の渦放出〔図3(a)〕と円柱の両側から同時に放出される、いわゆる双子渦形の渦放出〔図3(b)〕が間欠的に入れかわって渦放出

1. Pump and Valve	2. Water Tank
3. Bypass Valve	4. Flow Control Valve
5. Header	6. Flow Rectifying Device
7. Test Section	8. Circular Cylinder
9. Water Jacket	10. Riser Head
11. Bucket	12. Weigh Scale
13. CCD Video Camera	

図1 実験装置の概略

1. 2W Ar-ion Laser
2. Laser Power Unit
3. Optical Fiber Setting Manipulator
4. Optical Fiber Cable
5. Cylindrical Lens
6. CCD Video Camera
7. Pipe (I.D. 50mm)
8. Water Jacket

図2 可視化装置と測定部の概略

が行われていることが観測された。二つの渦放出の間欠的な入れかわりについては後に詳細に述べる。発達した乱流域における円管内円柱からの渦放出は図3(a)に見られるようなカルマン渦形の渦放出となっており、双子渦形の渦放出と間欠的に入れかわることはなかった。絞り比 $\beta=0.3$ の場合にて、円管内円柱からの渦放出は、層流域において図3(c)に見られるよう

に円柱の両側から交互に渦が放出され、後流では安定したカルマン渦が形成されている。遷移域における渦放出は、図3(d), (e)に見られるように、同一レイノルズ数において、カルマン渦形の渦放出と双子渦形の渦放出が間欠的に入れかわっていることが観測された。発達した乱流域における渦放出は、図3(f)に見られるように安定したカルマン渦形の渦放出となっており、双子渦形の渦放出と間欠的に入れかわることはなかった。絞り比 $\beta=0.4$ の場合にて、図3(g)に見られるように層流域では安定したカルマン渦形の渦放出が行われている。また、絞り比の増大にしたがって、カルマン渦形の渦放出の渦の巻上がり位置は、図3(a), (c), (g)に見られるように、後流側に移動することが観測された。遷移域および乱流域にて、図3(h), (i)に見られるように、同一レイノルズ数でカルマン渦形の渦放出と双子渦形の渦放出が間欠的に入れかわっていることが観測された。絞り比 $\beta=0.5$ における渦放出は層流域、遷移域、乱流域を通じて間欠的な入れかわりはあるものの、図3(j)に見られるような双子

表 1 円管内渦放出状態の分類

β Flow	Laminar	Transitional	Turbulent
0.2	Karman + Twin	Karman + Twin	Karman
0.3	Karman	Karman + Twin	Karman
0.4	Karman	Karman + Twin	Karman + Twin
0.5	Karman + Twin	Karman + Twin	Karman + Twin

(a) $\beta=0.2, Re=8.1 \times 10^2$ (d) $\beta=0.3, Re=2.8 \times 10^3$ (b) $\beta=0.2, Re=8.1 \times 10^2$ (e) $\beta=0.3, Re=2.8 \times 10^3$ (c) $\beta=0.3, Re=1.0 \times 10^3$ (f) $\beta=0.3, Re=1.9 \times 10^4$ (g) $\beta=0.4, Re=8.5 \times 10^2$ (h) $\beta=0.4, Re=2.7 \times 10^3$ (i) $\beta=0.4, Re=2.7 \times 10^3$ (j) $\beta=0.5, Re=2.7 \times 10^3$

図 3 フローパターンの可視化写真

渦形の渦放出が支配的な渦放出となっていることが観測された。

3.2 レイノルズ数とストローハル数の関係について 各絞り比 β ごとのレイノルズ数とストローハル数の関係を図4に示す。ストローハル数は、 $St = f \cdot d/v$ で表され、 f は円管内平均渦放出周波数であり、円柱後方 $3d$ の位置を観測点として、通過する渦の数と時間を測定することにより求めた。絞り比 β が $0.2 \sim 0.5$ の範囲にて、絞り比 β の増大とともにストローハル数は大きく求められており、一般に知られている二次元自由流中の円柱のストローハル数 (≈ 0.2) とは異なりを見せている。また、円管内に置かれた円柱による閉そく (blockage) 効果を考慮した流速 v^* にもとづく修正ストローハル数 St^* のレイノルズ数特性を図5に示す。ここで、閉そく (blockage) 効果を考慮した流速 v^* は、円管と円柱の間の最小開口部を通過する平均流速であり、 $v^* = v \cdot A / (A - A')$ (A は円管内断面積 $= \pi \cdot D^2 / 4$, A' は円柱投影面積)、修正ス

トローハル数 St^* は、 $St^* = f \cdot d/v^*$ で定義される。絞り比 $\beta = 0.2$ および $\beta = 0.3$ の乱流域において、修正ストローハル数 St^* は二次元自由流中の円柱のストローハル数 (≈ 0.2) と近い値を示している。図4, 5において、各絞り比 β ごとの、ストローハル数のレイノルズ数特性は遷移域付近で頂点を持つ曲線となり、レイノルズ数によるストローハル数の変動幅は、絞り比 β の増大とともに大きくなる傾向にあることがうかがえる。

3.3 カルマン渦形および双子渦形の渦放出の間欠性について ビデオ再生画像において円柱後方 $3d$ の位置を観測点として、放出された100個の渦が順次通過していく際の遷移域における円管内の渦放出の形態を記録した結果を図6に示す。図6中の○印はカルマン渦形の渦放出、●印は双子渦形の渦放出を示している。二つの渦放出の形態 (カルマン渦形の渦放出および双子渦形の渦放出) の入れかわりの規則性は見いだしにくい、二つの渦放出の形態の入れかわりが間欠的に行われているのがわかる。図7は各絞り比 β ごと

図4 ストローハル数のレイノルズ数特性

図5 修正ストローハル数のレイノルズ数特性

(a) $\beta=0.2, Re=2.6 \times 10^3$

(b) $\beta=0.3, Re=2.8 \times 10^3$

(c) $\beta=0.4, Re=2.7 \times 10^3$

(d) $\beta=0.5, Re=2.7 \times 10^3$

○ Type of Karman Vortex Shedding

● Type of Twin Vortex Shedding

図6 渦放出の間欠性

図 7 カルマン渦形渦放出の存在率の変化

とのレイノルズ数による 100 個の渦放出中のカルマン渦形の存在比率の平均値をばらつき範囲とともに示している。これにより、各絞り比 β ごとに二つの渦放出形態の存在比率がレイノルズ数によって変化しているのがわかる。特に絞り比 $\beta=0.3$ の場合、表 1 からもうかがえるように、二つの渦放出の形態が出現するレイノルズ数の範囲は、他の絞り比の場合にくらべて狭まっていることがわかる。このことより、渦流量計に適する絞り比は 0.3 近辺であることがうかがえる。また絞り比 $\beta=0.2 \sim 0.4$ において、管内の渦放出形態はカルマン渦形が支配的であるが、絞り比 $\beta=0.5$ では管内の渦放出形態は双子渦形が支配的であることがうかがえる。

4. 結 論

比較的低レイノルズ数における円管内に置かれた円柱からの渦放出を、レーザーライトシートを光源とするトレーサ法により円管軸を含む平面の流れの可視化計

測を行った結果、次の事柄が明らかとなった。

(1) 円管内の渦放出形態はカルマン渦形の渦放出と双子渦形の渦放出の 2 形態があり、その二つの渦放出の形態が互いに間欠的に入れかわって放出されていることが観測された。

(2) レイノルズ数 $8.1 \sim 10^2 \sim 2.0 \times 10^4$ の範囲におけるストローハル数とレイノルズ数の関係において、絞り比 β が大きくなるにつれてストローハル数は全体的に大きく求められ、レイノルズ数によるストローハル数の変動幅は絞り比 β の増大とともに大きくなることがうかがえる。

(3) カルマン渦形の渦放出と双子渦形の渦放出の間欠的な入れかわりは、遷移域付近で顕著に行われており、絞り比 $\beta=0.2 \sim 0.4$ における管内の渦放出形態はカルマン渦形の渦放出が支配的であるが、絞り比 $\beta=0.5$ においては双子渦形の渦放出が支配的である。

(4) 二つの渦放出の形態が出現するレイノルズ数の範囲は、絞り比 $\beta=0.3$ の場合が他の絞り比の場合にくらべて最も狭まっており、渦流量計に用いる絞り比に適している。

文 献

- (1) 山崎・ほか 2 名, 計測と制御, 10-3(1971-3), 173.
- (2) Ogawa, Y. and Matubara, N., *Proc. Int. Symp. Fluid Control Meas.*, Tokyo, 2, (1985-9), 1023.
- (3) 平野・菊池, 機論, 53-492, B(1987), 2390.
- (4) Taneda, S., *J. Phys. Soc. Jpn.*, 20-9(1965), 1714.
- (5) Kamemoto, K., ほか 3 名, *Proc. 11th Symp. Turbulence*, Missouri, (1988), A 23 1-10.
- (6) 横井・亀本, 機論, 56-526, B(1990), 1595.