脈動流中の静止三角柱からの渦放出に関する実験*

伊藤 正二^{*1}, 田中 榮一^{*2}, 山下 新太郎^{*2}Experiments on Vortex Shedding of Triangular Cylinder
in Oscillating Flows

Shoji ITO, Eiichi TANAKA and Shintaro YAMASHITA

The frequency of vortex shedding from a triangular cylinder in oscillatory flows in a pipe is measured. The flow oscillations are induced by means of a rotatable butterfly valve set downstream of the test section. It has been observed that the frequency of vortex shedding varies with both the oscillatory amplitude and Reynolds number under a constant oscillation frequency. These features are qualitatively the same as in the case of a circular cylinder. In order to control the vortex shedding, a triangular cylinder with a plate is used. The tendency of the Strouhal number to decrease with increasing oscillation amplitude is almost the same in the case of a circular cylinder, a triangular cylinder and a triangular cylinder with a plate. However, the triangular cylinder with a plate has the most stable characteristic of the three cylinder types in oscillatory flows. In a uniform flow, the shedding frequency varies with the distance s between the triangular cylinder and the plate, and shows a maximum value at a certain value of s .

Key Words: Vortex, Pipe Flow, Oscillatory Flow, Flowmeter, Shedding Frequency, Wake Control

1. 結 言

流れの中に置かれた物体の後方に発生する渦の放出周波数や渦によって物体が受ける交番的な力を利用して, 近年, 渦式流量計が開発され広く用いられている。これに関し, 定常流中では流量計として十分な計測精度が確認されている [例えば文献(1), (2)]. しかしながら, 脈動流れが渦放出周波数に及ぼす影響についての研究は比較的少なく, 関連するものとして, Barbi ら⁽³⁾, Armstrong ら⁽⁴⁾ および鈴木ら⁽⁵⁾⁽⁶⁾ の研究があげられる。

著者らは, 前報⁽⁷⁾において内燃機関用渦式流量計の使用状況を想定し, 従来の研究^{(3)~(6)}とは異なる実際に使用される条件下, すなわち, $Re=2.5 \times 10^3 \sim 1.8 \times 10^4$ の範囲で, 脈動の周波数 F が比較的高い 161 Hz (後述の脈動周波数パラメータ $Fd^2/\nu=2.40 \times 10^3$) において, 渦放出周波数を支配するパラメータを明確にした上で脈動流中の静止円柱からの渦放出特性を明らかにした。本研究は, これに引続き実際の渦式流量計

のモデルに近い三角柱からの渦放出特性を明らかにしようとするものである。

すなわち, 渦発生体として三角柱を用い, より実際のレイノルズ数と脈動周波数領域での渦放出を調べ, さらに, 渦の放出を制御する目的で, 三角柱後流域に平板を流れと直角に挿入し, 平板の位置が渦放出周波数に与える影響, および脈動流中での渦放出特性を実験的に調べた。

渦放出の制御に関しては, 定常流中のスリット付円柱からの渦放出特性を調べた研究がある⁽¹⁾⁽⁸⁾。この場合, 渦放出の規則性が増すことが明らかにされている。この規則性は渦式流量計として具備すべき要件であり, 本研究が対象としている脈動流中での特性も明確にすることは重要である。

記 号

D : 流路の内径
 d : 渦発生体の代表長さ
 F : 脈動の周波数
 f : 渦放出周波数
 U : 時間平均流速
 ΔU : 脈動の流速振幅
 Re : レイノルズ数

* 原稿受付 平成6年4月20日。

^{*1} 正員, 愛三工業(株) (〒474 大阪府共和町1-1-1) [現: 岐阜大学大学院]。^{*2} 正員, 岐阜大学工学部 (〒501-11 岐阜市柳戸1-1)。

- St : ストローハル数
 St_0 : 脈動のない流れでのストローハル数
 s : 渦発生体と平板の間隔
 ν : 動粘度

2. 実験装置および方法

2.1 装置の概略 図1に本研究で用いた実験装置を示す。これは前報⁽⁷⁾において用いたものと同様であるが、便宜上再掲する。装置は全長約1900 mmの吸込形風洞であり、流体は空気を用いた。測定部には代表長さ $d=15$ mmの渦発生体の流れと直角に挿入し、下流の流れ場を熱線流速計で測定した。脈動流れは高い脈動周波数を得るため、ちょう形弁を用いた回転弁方式とし、回転数は0~8000 rpmに任意に設定可能である。

発生する脈動流れは弁回転数の2倍の脈動周波数 F をもち、脈動の流速振幅は回転弁の直径を変えることにより流速との関連で種々に設定できる。前報⁽⁷⁾に示したように、本装置では $F=161$ Hzにおいて流速および弁直径にかかわらず、ほぼ正弦波的な脈動流速変化が得られている。また、定常流の状態では測定部の

図1 実験装置

図2 渦発生体の断面形状

流速が約20 m/sの場合、一様流は面積で流路の73%、乱れ強さは約0.4%の軸対称な流れである。

図2に本研究で用いた渦発生体の形状を示す。図2(a)は断面形状が直角三角形で代表長さが幅 $d=15$ mmの三角柱である。図2(b)は図2(a)と同様の三角柱に厚さ0.5 mmで幅15 mmの平板を間隔 s だけ隔てて設置した平板付三角柱である。

2.2 測定方法 座標系は、三角柱断面形の直角を有する頂点の対辺の中心に原点を取り、流路の中心軸にそって x 軸、三角柱の軸方向に y 軸、これらと直角な方向を z 軸とする。

基準熱線プローブは、渦発生体の上流で渦発生体のまわりの流れを乱さない位置、すなわち、 $x=-117$ mm, $y=0$ mm, $z=-20$ mmに設置されている。渦検出プローブは、スペクトルが明りょうに現れる位置、すなわち、 $x=33$ mm, $y=0$ mm, $z=15$ mmの位置に固定されており、出力をFFTアナライザによってスペクトル解析し、渦放出周波数を測定した。

可視化による渦放出の観察は測定部を透明なアクリル管とし、スモークワイヤ法により行った。ワイヤは直径0.1 mmのニクロム線で、これを y 軸に垂直な平面内で、三角柱の角部から z 軸に対して上流方向約35°傾けて設置した。

3. 実験結果および考察

3.1 三角柱からの渦放出

3.1.1 無次元化パラメータ 脈動流中の三角柱からの渦放出周波数 f と脈動周波数 F との比 f/F は前報⁽⁷⁾と同様、次式で示される4個のパラメータに依存する。

$$\frac{f}{F} = g\left(\frac{Ud}{\nu}, \frac{d}{D}, \frac{\Delta U}{Fd}, \frac{Fd^2}{\nu}\right) \dots\dots\dots (1)$$

Ud/ν , d/D はレイノルズ数とブロッケージ比であり、 $\Delta U/Fd$, Fd^2/ν は、それぞれ脈動振幅パラメータ、脈動周波数パラメータである。脈動振幅パラメータは平均速度で動く座標系からみたときの流体粒子の振動の振幅と代表長さの比であり、脈動周波数パラメータは脈動の速度成分によるレイノルズ数といえる。

ここでは、脈動の周波数は正弦波的な流速変化を示す161 Hzに固定したが、脈動周波数パラメータ Fd^2/ν を 2.40×10^3 に固定し、レイノルズ数を $2.5 \times 10^3 \sim 1.8 \times 10^4$ の範囲で、脈動振幅パラメータ $\Delta U/Fd$ を $0 \sim 4.3$ の範囲でそれぞれ独立に変化させ、渦放出周波数を測定した。また、ブロッケージ比は約0.21と一定である。

3.1.2 渦放出周波数に対するレイノルズ数と脈動

振幅パラメータの影響 脈動流中の三角柱からの渦放出周波数は、後流の渦放出スペクトル分布のピークより求めた。

まずレイノルズ数の影響を調べる。図3は脈動の周波数を正弦波的な流速変化を示す161 Hzに固定し、したがって、脈動周波数パラメータ Fd^2/ν を 2.40×10^3 に固定し、また、ブロックage比 d/D は0.21と一定の場合の振動数 f/F のレイノルズ数による変化を $\Delta U/Fd$ をパラメータにして示したものである。 $\Delta U/Fd=0$ 、つまり脈動がない場合、このレイノルズ数の範囲でストローハル数は一定で渦放出周波数の変化は直線的である。脈動振幅パラメータ $\Delta U/Fd$ が大きくなるに従って、分布は直線から離れる傾向となる。すなわち、レイノルズ数の増加につれて $f/F=0.5$ までは $\Delta U/Fd$ による差はないが、 $f/F=0.5$ において、レイノルズ数と脈動振幅パラメータ $\Delta U/Fd$ が増加しても $f/F=0.5$ の一定値を保つ。レイノルズ数がさらに増加すると、 $\Delta U/Fd$ とともに大きくなるあるレイノルズ数の所から再び f/F は増加を始める。そして脈動振幅パラメータ $\Delta U/Fd$ が大きい場合には、 $f/F=1$ の所で再びレイノルズ数の増加によらず $f/F=1$ の値を一時的に保つ。レイノルズ数がさらに増加すると $\Delta U/Fd=0$ の直線に漸近する傾向を示す。 $f/F=0.5, 1$ の一定値を維持するのは渦放出周波数の同期現象である。このような振動数 f/F の変化は定性的には前報⁽⁷⁾の円柱の場合と同じであるが、三角柱の場合、直線からのずれが小さく、同期現象を生ずるレイノルズ数範囲が狭い。これは、三角柱を過ぎる流れでは離点が固定されているためと考えられる。一般に、定常流中では離点が固定されていることによって渦放出特性が安定化することが知られている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。三角柱を渦発生体とした場合、脈動流中においても離点が

固定されやすく、定常流中と同様の傾向が生じたとと思われる。

次に、脈動振幅パラメータが渦放出周波数に及ぼす影響について調べる。図4はレイノルズ数をパラメータとし、振動数比 f/F の脈動振幅パラメータによる変化を見たものである。 $\Delta U/Fd$ が零のときは、脈動がない場合で、レイノルズ数の増加とともに f/F は増加する。全体的に $\Delta U/Fd$ が増加すると f/F が減少する傾向がある。ただし、詳細に見ると、レイノルズ数が 5.91×10^3 と 6.95×10^3 の場合は、 $\Delta U/Fd$ が大きくなるにつれて f/F は穏やかに減少し、ある位置から急に $f/F=0.5$ となり、以後、 $\Delta U/Fd$ によらずその値を維持する。またレイノルズ数が 10.8×10^3 と 11.9×10^3 の場合は、脈動振幅パラメータ $\Delta U/Fd$ が大きい所で $f/F=1$ の一定値となる。これらの現象も定性的には円柱の場合と同様である。

これまで振動数比 f/F の変化をレイノルズ数および脈動振幅パラメータを用いて調べてきたが、実際問題への応用という観点からは、渦放出周波数に関して通常用いられるパラメータであるストローハル数の変化を示しておくのが有用であろう。この場合、本研究で想定している脈動流中での渦式流量計にとって、ストローハル数がどの程度の速度変動まで一様流中の値と同じ値を示すかということが重要であり、脈動の流速振幅と時間平均流速との比 $\Delta U/U$ の影響を調べることが有用である。このような観点より、脈動流中の渦放出ストローハル数 St の $\Delta U/U$ に対する変化をレイノルズ数をパラメータとして図5に示した。 $\Delta U/U$ が約0.08以下ではレイノルズ数によらず St の変化は少ないが、 $\Delta U/U$ が0.08以上になると、レイノルズ数が小さいほど、 St は $\Delta U/U$ の小さい所から減少を始めている。

図3 レイノルズ数に対する渦放出周波数の変化 ($Fd^2/\nu=2.40 \times 10^3$, $d/D=0.21$)

図4 脈動振幅に対する渦放出周波数の変化 ($Fd^2/\nu=2.40 \times 10^3$, $d/D=0.21$)

図5 $\Delta U/U$ に対するストローハル数の変化
($Fd^2/\nu=2.40 \times 10^3$, $d/D=0.21$)

前報⁽⁷⁾で明らかにした脈動流中における円柱からの渦放出の場合の結果を図5と比較すると、円柱も三角柱もストローハル数の変化の傾向は定性的には同様である。しかしながら、レイノルズ数によらず St がほぼ一定となる $\Delta U/U$ の範囲は、三角柱の場合のほうが円柱に比べて長く、また、ほぼ同じレイノルズ数における変化も少ない。さらに、 St が一定となる同期現象は、三角柱の場合には $\Delta U/U$ の大きな所でしか生じず、またその範囲も狭いと言える。

以上の結果より、脈動流中の渦放出周波数の特性は渦発生体の形状によって異なり、三角柱は円柱に比べレイノルズ数と脈動振幅の影響を受けにくいことが明らかになった。これは前述のように三角柱の場合には離点が固定されているためと考えられる。

3・2 平板付三角柱からの渦放出 3・1節では、脈動流中での静止三角柱からの渦放出特性を明らかにし、円柱の場合と異なることを示した。ここでは、渦放出を制御することを目的として三角柱の後方に平板を挿入し、その渦放出特性を調べる。

3・2・1 定常流中における渦放出特性の変化 図6は、 $Re=11.7 \times 10^3$ の定常流中において、図2(b)に示す三角柱と平板との間隔 s を0～15.5 mmまで変化させた場合の後流の周波数スペクトル分布である。スペクトルピークの位置は s によって変化している。

スペクトルピークの位置から求められるストローハル数 St_0 の s/d に対する変化は、レイノルズ数をパラメータとして図7のようになる。 St_0 は s/d の増加とともに増加し、ある s/d において最大値をとり、それ以降減少する。レイノルズ数による変化は s/d が0から0.3までほとんどない。

このようなストローハル数 St_0 の s/d による変化を

図6 三角柱と平板の間隔による周波数スペクトル

図7 三角柱と平板の間隔によるストローハル数の変化

明らかにするため、可視化観察を行った。図8は $Re=4.05 \times 10^3$ の一様流中で、図8(a) $s/d=0$ 、図8(b) $s/d=0.5$ 、図8(c) $s/d=0.77$ (図7で St_0 の最大値となる s/d の場合)、図8(d) $s/d=1.7$ の場合の代表的な渦放出のビデオ静止画像である。図中、三角柱は白く囲っており、板の位置は矢印で示した。図8(a)の流れ場は、平板がない場合とほとんど同じである。図8(b)の場合は、三角柱と平板の間に交互に入り込む渦の変動が顕著であり、図8(c)では、その変動が小さくなっている。さらに図8(d)では、三角柱と平板の間の流れはよどみ部を形成している。

Roshko⁽¹¹⁾は各種の形状の柱体からの渦放出を調べ、代表長さとしては離流線間の幅を用いれば、そのストローハル数は物体形状によらないことを見出している。したがって本実験の場合、平板の下流の後流

(a) $s/d=0$ (b) $s/d=0.5$ (c) $s/d=0.77$ (d) $s/d=1.7$ 図 8 代表的な渦放出の可視化写真
($Re=4.05 \times 10^3$)

の幅,あるいは離流線間の幅が s/d によりどのように変化するかを調べることがまず必要と思われる。図 8(a)~(d)の静止画像のみからは判断できないが、一連のビデオ画像を観察すると、三角柱と平板の間隔が 0 から大きくなるにしたがって平板の下流の後流域の幅が次第に狭くなり、図 8(c)の状態で最小となり、さらに間隔 s を大きくすると幅が広くなること

図 9 レイノルズ数に対するストローハル数の変化

が明らかとなった。これをはく離流線の挙動から見ると以下のように考えられる。すなわち、三角柱からはく離流線は平板により内側に曲げられるが、 s/d が小さい間は平板に衝突する頻度は比較的少ないであろう。したがってこの場合、流線が曲げられた分だけ後流の幅は狭くなると考えられる。 s/d が大きくなるとはく離流線が平板に衝突する頻度が増加し、時間平均的にはく離流線は平板によどみ点を形成するようになる。これは図 8(d)の流れに相当する。このような状態になると、 s/d の増加にしたがって平均よどみ点は平板の中心方向に移動し、後流の幅は逆に増加するようになる。以上より、本報で用いたストローハル数 St_0 は図 7 に示すように変化すると考えられる。

図 9 はレイノルズ数に対するストローハル数 St_0 の変化を s/d をパラメータにして示したものである。 s/d によってストローハル数の値が異なるが、さらにレイノルズ数に対する変化の傾向がかなり異なることが解る。 s/d が 0 から 0.233 までの範囲では、レイノルズ数によらず St_0 の値はほぼ一定とみなしてよい。しかし、 s/d が 0.367 から 0.7 では、レイノルズ数が 3×10^3 から 10^4 に増加するとともに St_0 の値は徐々に増加する。また、この St_0 の変化は s/d が大きいほど大きい。レイノルズ数が 10^4 以上になると、 St_0 の値はわずかなではあるがレイノルズ数の増加とともに減少する。さらに間隔が大きくなると、 St_0 が最大値を示す所(図 7)を境にして、 $s/d=0.833$ の場合のように逆にレイノルズ数の増加とともに St_0 の値は減少している。

このようなレイノルズ数に対するストローハル数の変化の傾向の違いの多くの要因は、平板付三角柱が本実験での円管側壁の影響を受けており、 s/d が 0.367 以上においては、レイノルズ数に依存してはく離流線の曲げられる程度が変化すると考えられる。結局は、Roshko が示した後流の幅と関係するものであるが、後流の幅の変化は三角柱後流に挿入した平板と、本実験のような側壁の影響に起因していると考えられる。

図 10 脈動振幅に対するストローハル数の変化

3・2・2 脈動流中のストローハル数の変化 次に、脈動流中での平板付三角柱からの渦放出特性について調べる。実験に用いた平板付三角柱の s/d は代表として $s/d=0.167$ を用いた。この理由は s/d がこの値のときに、定常流の場合のストローハル数がレイノルズ数によらず一定であり(図 9)、この要件を満たす渦式流量計が、脈動流中でどのような特性を示すかを調べることがまず必要であると考えられるからである。

図 10 は $\Delta U/U$ に対する渦放出のストローハル数 St と、脈動がない場合のストローハル数 St_0 の比 St/St_0 の変化を、レイノルズ数が図 10(a) 7980、図 10(b) 10700 および図 10(c) 15700 の場合について示したものである。脈動周波数はやはり正弦波的な流速変化が得られる $F=161$ Hz である。比較のため、円柱、三角柱の場合も示した。どのレイノルズ数、またどの形状の渦発生体においても $\Delta U/U$ が大きくなると St/St_0 の値は $St/St_0=1$ の直線より減少しているが、円柱、三角柱、平板付三角柱の順にその変化の程度は

小さくなっており、平板を取り付けたことにより、渦放出周波数を広い範囲で一定にするという効果が見られる。また各渦発生体ともレイノルズ数の小さい程、 St/St_0 の減少の程度が大きい。

4. 結 論

脈動流中で使用する渦式流量計に関連し、三角柱および平板付三角柱からの渦放出特性について実験的に調べ、以下のことを明らかにした。

(1) 三角柱の場合、振動数比 f/F のレイノルズ数による変化は脈動振幅パラメータ $\Delta U/Fd$ が大きいほど、脈動振幅のない場合のレイノルズ数に対する直線的な依存性から次第に離れて行く。レイノルズ数によらず振動数比が一定となるいわゆる同期現象は、 $f/F=0.5$ において生じた。さらに、脈動振幅パラメータが大きい場合には $f/F=1$ においても同期現象が確認された。このような f/F の変化は定性的には円柱の場合と同じであるが、三角柱の場合は直線からのずれが少なく、また同期現象を生ずるレイノルズ数範囲も小さい。これは、三角柱においては離点が固定されているためと考えられる。

(2) 三角柱の場合、レイノルズ数一定のもとで脈動振幅パラメータ $\Delta U/Fd$ を増加させると、振動数比 f/F は脈動のない場合の値より緩やかに減少する。さらに脈動振幅パラメータを増加させると、あるレイノルズ数以下では急に $f/F=0.5$ の一定値を示す。大きなレイノルズ数では $f/F=1$ の一定値を示す場合と示さない場合がある。これはレイノルズ数に依存する。これらの現象も定性的には円柱の場合と同じである。

(3) 平板付三角柱の場合、定常流中の渦放出のストローハル数は三角柱と平板との間隔によって変化し、ある位置で最大値を示す。またこの最大値を示す s/d を境にしてストローハル数のレイノルズ数による変化の傾向が異なる。この変化は後流の幅の変化によって定性的に説明できる。

(4) 脈動流中の円柱、三角柱および平板付三角柱における St/St_0 は、 $\Delta U/U$ が大きくなると $St/St_0=1$ の直線より減少していくが、円柱、三角柱、平板付三角柱の順にその変化程度は小さくなる。

文 献

- (1) 土屋・ほか 2 名, 機誌, 72-607 (1969), 1072.
- (2) 山崎・ほか 2 名, 計測と制御, 10-3 (1971), 173.
- (3) Barbi, C., ほか 2 名, *J. Fluid Mech.*, 170 (1986), 527.
- (4) Armstrong, B. J., ほか 2 名, *Phys. Fluids*, 29-7 (1986), 2095.
- (5) 鈴木・ほか 2 名, 機論, 57-535, B (1991), 849.

(6) 鈴木・ほか2名, 機論, 57-535, B (1991), 855.	(9) 日本工業規格, JIS Z 8766-1989 解説.
(7) 伊藤・ほか2名, 機論, 60-572, B (1994), 20.	(10) 山崎, 計測と制御, 27-2 (1988), 147.
(8) Igarashi, T., <i>Proc. Int. Symp. Fluid Control Meas.</i> , 2 (1985), 1003.	(11) Roshko, A., <i>MACA, Technical Note</i> , No. 3196 (1954).
-