テーパ円柱および段付円柱の後流渦*

福富 純一郎^{*1}, 中 瀬 敬 之^{*1}, 滝川 三左男^{*2}Vortex Wake from Tapered and Stepped Circular Cylinders
in a Uniform Flow

Junichiro FUKUTOMI, Yoshiyuki NAKASE and Misao TAKIKAWA

This paper presents an experimental study on the flow around tapered and stepped circular cylinders and the structure of the shedding vortices. The surface pressure distributions on the cylinder and the spectra of the wakes were measured for them. The main results are as follows. (1) In the case of the tapered circular cylinder, the shedding vortices are connected within some spanwise width. The break points of the cell appear in a spanwise surface pressure distribution before the separation point. (2) In the case of the stepped circular cylinder, the Strouhal number is larger than that of the straight circular cylinder in the region where the pressure balances spanwise in the wake. (3) In the case of the stepped circular cylinder, the shedding vortices from small and big cylinders are connected with each other for a diameter ratio of more than 0.64 and are broken for a diameter ratio of less than 0.56.

Key Words: Vortex, Wake, Separation, Circular Cylinder, Vortex Shedding Frequency, Three-Dimensional Effect

1. 緒 言

主流あるいは物体が三次元性を持つ場合、その後流の渦構造に関する研究は、工学上興味深い研究テーマの一つである。このテーマに関する従来の研究のうち物体が円柱形状のものについては、せん断流中の直円柱またはそれに類する二次元物体からの渦流出および後流に関するもの^{(1)~(5)}、一様流中のテーパ円柱の後流渦に関するもの^{(6)~(9)}、段付円柱後方の流れおよび後流渦に関するもの^{(10)~(12)}、流体中に端を持つ有限長円柱や壁と直円柱が干渉する場合の後流渦に関するもの^{(6)(13)~(15)}などがある。

このように、主流あるいは物体が三次元性を持つ場合の物体後流がかなり明らかにされつつあるが、後流渦の挙動は非常に複雑であり、その詳細が十分に明らかにされているとは言えない。

本研究では、一様流にある物体の三次元性が渦流出および後流に及ぼす影響を総合的に検討するため、平行壁間に支持されたテーパ円柱および段付円柱の両者を用い、それらの流出渦振動数、後流幅、後流渦の

時刻的挙動、物体表面の圧力分布などを調べ直円柱の場合と比較検討した。その結果、テーパ円柱のセルの切れ目がはく離以前のスパン方向の圧力分布に現れること、段付円柱において、八木田ら⁽¹¹⁾の示したストローハル数が直円柱値よりも減少する領域以外に直円柱値よりも増大する領域があることなどが明らかとなったのでここに報告する。

2. 実験装置および方法

本実験では、700 mm×700 mmの吹出し形低速風洞を用い、その出口に図1に示すテストセクションを設置し、その上下壁間に各種円柱を上壁側が細く、下壁側が太くなるように固定し、実験を行った。実験の主流風速 U は 16.1, 7.7 m/s であり、主流の乱れ度はそれぞれの場合に 0.46%, 0.40% であった。テストセクションの概要、座標系および測定システムを図1に示す。供試円柱の取付位置は、テストセクション入口部から 600 mm ($=12d_c$) とした。なお、供試円柱取付位置における上下壁の境界層厚さは、風速 16.1, 7.7 m/s で、それぞれ 13.4, 16.6 mm である。また実験のスパン中央の直径 d_c に基づくレイノルズ数 $Re_c (=Ud_c/\nu)$ は、 2.4×10^4 および 5.1×10^4 である。

実験に使用した各円柱(直円柱、テーパ円柱、段付円

* 原稿受付 平成4年7月13日。

^{*1} 正員、徳島大学工学部 (〒770 徳島市南常三島町2-1)。^{*2} 富士重工業(株)宇都宮製作所 (〒320 宇都宮市陽南1-1-11)。

柱)の寸法を図2に示す。各円柱のスパン中央の直径 d_c はすべて50 mmである。またその全長は、テストセクションの全高に等しい700 mmであり、すべての円柱の表面には、スパン方向20 mmごとに圧力測定用の直径1 mmの静圧孔をあけている。材質は直円柱、テーパー円柱がアルミニウム、段付円柱が黄銅である。各種円柱形状は図2中に示した記号で略記して表す。つまりCCは直円柱、TCはテーパー円柱、SCは段付円柱を表す。

後流渦の流出振動数は、I形熱線プローブを用いた熱線風速計からの信号を信号解析器により処理し求めた。信号解析では、フルスケール200 Hz、分解能0.8 Hzでの振動数解析結果を40回平均化処理した。後流渦振動数の測定位置は $X=2.0d_c$ 、 $Y=1.5d_c$ である。また後流渦が通過する位置は、 $X=200$ mmの一定の位置で、任意の Z に対して、 Y 方向に一定間隔(5 mm)で熱線センサプローブを走査させ、各 Y におけ

る振動数解析の結果得られる後流渦の特定の振動数パワーを40回平均で演算し、これらパワーの Y 方向分布より、そのピーク位置として定めた。そして図3に示すように、この位置を Y^* とし、これを後流幅の代表値とみなした。

3. 実験結果および考察

3.1 流出渦振動数 図4および図5に、テーパー円柱の後流渦の振動数(f :パワースペクトルのピーク振動数)、および局所直径 d に基づくストローハル

図3 後流幅の代表値 Y^*

図4 振動数分布(TC2)
(○: $Re_c=5.1 \times 10^4$, △: $Re_c=2.4 \times 10^4$)

図1 テストセクションおよび測定システム

図2 供試円柱

図5 ストローハル数分布(○: $Re_c=5.1 \times 10^4$, ●: $Re_c=2.4 \times 10^4$)
(二点鎖線: $Re_c=5.1 \times 10^4$, 一点鎖線: $Re_c=2.4 \times 10^4$ の直円柱値)

数 $S_t (=fd/U)$ のスパン方向の分布を示す。テーパ比の大きい TC 2 の振動数およびストローハル数分布より、時間平均的にみてスパン方向に等しい振動数を持つ後流渦、すなわちセルが存在する。これはせん断流中における二次元物体の後流中にセルが存在することを報告した Maull-Young の実験結果⁽¹⁾ に類似したものであるが、主流に渦が分布することのみが、セルの発生原因ではなく、一様流中でも、物体の三次元性によってセル構造が発生することを意味している。このセル構造は、TC 1 においてもまた Re_c が変わった場合にもほぼ同様な結果となっている。

図 5 においては、一点鎖線、二点鎖線で直円柱のストローハル数を示しているが、これらと比較することにより、テーパ円柱からの流出渦の振動数が、直円柱値からどの程度逸脱するかがわかる。

TC 1, TC 2 のストローハル数分布は、スパン上方に向かって局所直径が減少してゆくにつれ、ストローハル数が上昇する傾向がみられる。さらに最も下部に位置するセル内で、ストローハル数の最大値がほぼ直円柱値に近く、おのおののセル内でストローハル数は直円柱値よりも高い。しかし、振動数解析の結果、テーパ円柱からの流出渦の振動数は、後流中の測定でかなりの幅を持っており、物体の任意の断面より流出する渦の振動数がその幅で変動していると考えられる。

表 1 段付円柱の直径比

Diameter Ratio	SC 1	SC 2	SC 3
d_t/d_c	0.88	0.64	0.50
d_c/d_b	0.89	0.74	0.56

次に、段付円柱の後流渦の振動数から求めた、局所直径に基づくストローハル数のスパン方向の分布を図 6 に示す。図 6 中の記号は、○、●が $Re_c=5.1 \times 10^4$ の場合、△、▲が $Re_c=2.4 \times 10^4$ の場合を表すが、各段の値がわかりやすいように中段の値を●、▲で表している。また物体表面流れおよび後流に影響を及ぼすと思われる上、下段の直径比を表 1 に示す。なお、表 1 中の d_t は上段、 d_c は中段、 d_b は下段のそれぞれの直径を表す。図 6 のストローハル数の分布図よりその値と段付円柱の各段との関係が、直円柱値と比較することによって次のように分類できる。

- (1) ストローハル数が直円柱値と同じ領域
・・・ SC 1, 2, 3 の上段上部, SC 1, 2 の中, 下段
- (2) ストローハル数が直円柱値より減少する領域
・・・ SC 3 の中段下部, 下段
- (3) ストローハル数が直円柱値より増加する領域
・・・ SC 1, 2, 3 の上段下部, SC 3 中段上部

これらの群において、ストローハル数の分布のしかたの相違点は、(1), (2) 群が SC 3 の中段下部を除いて、スパン方向に二次元的に分布するのに対して (3) 群ではストローハル数の分布が二次元的でなくスパン方向に連続的に変化していることである。すなわち (3) の各段では、直径が同一であるにもかかわらずスパン方向に流出渦の振動数が変化しており、この部分にはテーパ円柱の後流中にみられると同様なスケールの小さなセルが存在するものと思われる。

(1) 群の SC 1~3 の上段上部のストローハル数が、直円柱と同じ値をとることについては、次のように考えられる。本実験では、供試円柱は、テストセクションのスパン全体にわたり固定されており、このため壁の

図 6 ストローハル数分布
(二点鎖線: $Re_c=5.1 \times 10^4$, 一点鎖線: $Re_c=2.4 \times 10^4$ の直円柱値)

存在によってスパン方向の流れがおさえられ、その結果、上段上部の物体表面では二次元的な流れを示すものと思われる。

これ以後の考察では、段付円柱を上3群に分類し、各項の実験結果と各群との対応について述べ、これら段付円柱に関する考察をテーパ円柱に照らし合わせていく。

3・2 後流幅 ここでは前述したように流出渦が通過する位置 Y^* を後流幅の代表値とみなして考察を行う。図7(a)にTC2の後流幅を示す。TC2の後流幅は、ストローハル数分布とは逆に、スパン上方に向かってほぼ直線的に狭くなる傾向がみられる。また上、下セルの境界では、上下流出渦が重複しており、後流中のある任意の Z の位置を、上方、下方のセルの2種類の渦が通過している。図7(a)においては、この2種類の渦のうち、パワースペクトルの第1のピーク振動数を○で、第2のピーク振動数を●で示している。また、この2種類の振動数の渦が検出される位置は図4、5の時間平均的なセルの境界にほぼ対応している。

一方、図7(b)に示す段付円柱においては、後流幅がスパン方向に内外に大きく変化している。その分布が直径比によらず不連続面を持つという物体形状そのものに依存している部分を除くと前述した3群との対応は次のようになる。(1)群に属する部分では、これら各部分より流出する渦は、SC1に代表されるのとはほぼ等しい位置を通過している。これに対して(2)群に属する部分では、後流幅はかなり外側を通過し(3)群に属する部分では、逆に、かなり内側を通過している。これより、ストローハル数が直円柱値よりも大きいことが、後流幅が小さいこと、ストローハル数が直円柱値よりも小さいことが、後流幅が大きいことに対応している。

図7 後流幅分布 ($Re_c = 5.1 \times 10^4$)

さらにSC1, SC2について、各段の局所直径が異なるにもかかわらず、後流渦がスパン方向にほとんど二次元的に流出している点が注目される。これはSC1, SC2の場合、後述するように渦がスパン方向に連なって流出するために、後流渦の循環もスパン方向にほぼ一定となることによるものと思われる。

3・3 後流渦の時刻的挙動 図8にTC2および段付円柱の後流渦波形を示す。後流渦波形は、任意の測定点での通過渦による速度変動を示すものであり、1個の渦は一つの山と谷に相当する。TC2の測定位置は、 $Z = 240 \sim 400$ mmで、振動数解析より得られる時間平均的なセルの境界は $Z = 320$ mmである。この測定領域では、上、下セルの境界は、波形上には明確に現れず、基本的には各位置での流出渦はスパン方向につながっており、不規則に、Y字形の渦の結合または渦信号波形の欠落がみられる。また、このような位置がスパン方向に移動していることは、テーパ円柱からの流出状態が、かなり不安定であることを示している。

一方、段付円柱の流出渦波形は、各段付円柱の、下側の不連続面を含んでサンプリングしたものである。SC1, SC2共に、不連続面上、下段より流出する渦は、コヒーレント性を保っており、これらは上下に連なっている。TC2でみられたのと同様に、段付円柱においても、間欠的に八木田ら⁽¹¹⁾の示したY字形の渦の結合または渦信号波形の欠落がみられる。これらの出現振動数は、各段付円柱の中、下段からの流出渦の振動数の差に等しい。また、これらの出現位置は、SC1, SC2で、不連続面より30, 70 mm程度下がっており、Koら⁽¹⁰⁾の示した細い円柱の太い円柱側への後流の広がりを示している。

Y字形結合は、不連続面上、下段からの流出渦がつながって流出する際、両者の振動数の差を満足すべく、結合するために起きる現象であると考えられる。上、下段より流出する渦がつながるためには、不連続面上ではなく離も上、下段からの渦流出にみあったものでなければならない。油膜法による流れの可視化のSC2不連続面付近のスケッチを図9(a)に示す。これによると上、下段のはく離線を、不連続面上のはく離線がつながるように現れ、上下段から渦が同時につながって流出していることを明示している。

図8(d)のSC3の後流渦波形では、すでに不連続面付近には、規則正しい明確な渦は存在せず、中、下段からの流出渦が不連続面で分断されているものと思われる。このときの不連続面付近の油膜法のスケッチを図9(b)に示す。また、発煙法による流れの可視化結

(a) TC 2

(b) SC 1

(c) SC 2

(d) SC 3

図 8 後流波形 ($Re_c = 5.1 \times 10^4$)

果より、不連続面付近に流入する主流は、下方の段上端部によどみ点を持ち、これより上方に流れる流体は段の角を回りきらず、ここではく離している、はく離した流れは、不連続面下流側に再付着しながら下段後流中に流入している、(2)群がこれに当たる。

実験の結果、SC 1, 2 の上、中段からの流出渦も結合しており、SC 3 のそれは分断されていることから、 $Re_c = 2.4 \sim 5.1 \times 10^4$ において、上下段からの流出渦は、直径比 0.56 以下ではとぎれ、後流中に主流が流入し、直径比 0.64 以上では、これらはつながり、周期的に上下段からの流出渦が Y 字形結合をされると考えられる。

(a) SC 2, 中, 下段 (b) SC 3, 中, 下段

図 9 段付近の油膜法スケッチ ($Re_c = 5.1 \times 10^4$) 図 10 表面圧力分布 (TC 2, $Re_c = 5.1 \times 10^4$)
(二点鎖線: 直円柱値) 図 11 圧力係数のスパン方向分布 (TC 2)
($Re_c = 5.1 \times 10^4$, 二点鎖線: 直円柱値)

3・4 表面圧力分布 TC 2 の $Z=220, 300, 460$ mm における各断面での 10° ごとの表面圧力係数 [$C_p = (P_s - P)/(1/2)\rho U^2$] の分布を図 10 に示す. TC 2 の表面圧力分布は, $\theta=30^\circ$ 以後, 全体に直円柱のそれよりも高い値を示すが, レイノルズ数の値に対応した subcritical な分布を示す. その圧力分布形状は, はく離点以後はスパン方向には変化がなく二次元的である. なお図 10 中, 二点鎖線は直円柱の圧力分布である.

図 11 に示す 30° ごとのスパン方向の表面圧力の変化では, 時間平均的セルの切れ目が $\theta=60^\circ$ の表面圧

力分布に現れていることが, 特徴的である. $\theta=90^\circ$ 以後のはく離点以後では, 表面圧力はスパン方向にバランスし, $\theta=180^\circ$ のベース圧力は, スパン方向にほぼ一定の値となっている. このことから, テーパ円柱後流中のセル構造の形成プロセスとして, すではく離以前の三次元的な表面流れに, その原因を持つものと考えられる.

図 12 に段付円柱の $Z=200, 300, 400, 500$ mm における 10° ごとの表面圧力分布を, また図 13 に 30° ごとの表面圧力分布の変化を示す. 先に示した三つの群と表面圧力分布との対応は次のようになる.

(a) SC 1

(b) SC 2

(c) SC 3

図 12 表面圧力分布(二点鎖線:直円柱値)
(○: $Re_c=5.1 \times 10^4$, ●: $Re_c=2.4 \times 10^4$)

(a) SC 1

(b) SC 2

(c) SC 3

図 13 圧力係数のスパン方向分布
($Re_c=5.1 \times 10^4$, 二点鎖線:直円柱値)

(1)に相当する部分では、その表面圧力分布は全体にレベルが高いもののほぼ直円柱(二点鎖線)と相似な分布を示している。さらに(1)に属し、図12に示されていない上段上部の表面圧力は、図13からわかるようにほぼ直円柱と同じ分布を示す。このように同じ(1)群でも圧力レベルに差があるのは後者が各段付上段上部で壁面の影響でスパン方向の流れが抑えられるのに対し、前者は、各段からの渦がスパン方向につながるため、その循環がスパン方向にほぼ等しく、すなわち、例えばSC1中、下段では、その直径に相当する円柱からのそれよりも循環が減少しているためと思われる。

(2)群では、SC3の $Z=200, 300\text{ mm}$ での表面圧力分布で全体のレベルが、直円柱値よりもかなり高く、はく離点も明らかに前進していることがわかる。これは前述した上下段からの流出渦が切れ、不連続面から主流が物体後方に流入し圧力を高め、後流幅を広げ、はく離点を前進させたと考えられる。図13の段付円柱の表面圧力の 90° 以後の分布からテーパ円柱の場合と同様に、不連続面で切れた物体表面の流れが、はく離した後、スパン方向にバランスすることがわかる。流出する渦がスパン方向に切れるか、結合するかにかかわらず、はく離後、後流中で圧力はスパン方向にバランスしている。

(3)群については、図12のSC3、 $Z=400\text{ mm}$ やSC2、 $Z=500\text{ mm}$ の圧力分布からわかるように直円柱値と比べ、明らかにハく離点が後方に移動している。このハく離点の後方への移動によって、図7(b)に示されたように後流幅が狭まり、あたかも実際より直径の小さい円柱より流出する渦のように振動数が増加し、ストローハル数が増大している。さらに図13のベース圧力($\theta=180^\circ$ の圧力)と(3)群との関係を見ると、これらの領域は、スパン方向の圧力のバランスの結果として、ベース圧力がスパン方向に傾きを持っている部分に対応している。

4. 結 言

一様流中にある円柱形状物体の三次元性が渦流出および後流に及ぼす影響を検討するため、平行壁間に支

持された種々のテーパ円柱および段付円柱について、 $Re_c=2.4\times 10^4$ および 5.1×10^4 においてそれらの流出渦振動数、後流幅、後流渦の時刻的挙動、物体表面の圧力分布などを調べ直円柱の場合と比較検討した。その結果、本実験範囲内で以下のことが明らかとなった。

(1) テーパ円柱において、スパン方向にセル構造がみられ、セルの境界では流出渦のY字形結合がみられる。また時間平均的なセルの切れ目が、はく離点以前のスパン方向の圧力分布に現れる。

(2) 段付円柱において、ベース圧力がスパン方向にこう配を持つ領域で、ストローハル数は直円柱値よりも増大する。

(3) 段付円柱において、直径比0.64以上では上、下段からの流出渦にはY字形結合がみられ、ストローハル数は直円柱値とほぼ等しい。

(4) 段付円柱において、直径比0.56以下では上、下段からの流出渦は切れており、不連続面からの主流の流入のため、下段でストローハル数は直円柱値よりも減少する。

文 献

- (1) Maull, D. J. and Young, R. A., *J. Fluid Mech.*, **60**(1973), 401.
- (2) Rooney, D. M. and Peltzer, R. D., *Trans. ASME, J. Fluid Eng.*, **103**(1981), 88.
- (3) Rooney, D. M. and Peltzer, R. D., *Trans. ASME, J. Fluid Eng.*, **104**(1982), 72.
- (4) Peltzer, R. D. and Rooney, D. M., *Trans. ASME, J. Fluid Eng.*, **107**(1985), 61.
- (5) Griffin, O. M., *Trans. ASME, J. Fluid Eng.*, **107**(1985), 298.
- (6) Gaster, M., *J. Fluid Mech.*, **38-3**(1969), 565.
- (7) 八木田・山岬, 機論, **45-392**, B(1979), 474.
- (8) 相原・ほか2名, 航空宇宙学会誌, **30-339**(1982), 213.
- (9) 平野・ほか5名, ターボ機械, **12-8**(1984), 463.
- (10) Ko, N. W. M., ほか2名, *Trans. ASME, J. Fluid Eng.*, **104**(1982), 223.
- (11) 八木田・ほか2名, 機論, **49-443**, B(1983), 1338.
- (12) 八木田・ほか2名, 機論, **55-518**, B(1989), 3044.
- (13) 岡本・八木田, 機論, **38-313**, B(1972), 2259.
- (14) Angrilli, F., ほか2名, *Trans. ASME, J. Fluid Eng.*, **104**(1982), 518.
- (15) 奥井・ほか2名, ターボ機械, **19-11**(1991), 701.