軸対称物体の後流構造に関する研究*

谷口清一^{*1}, 松村昌典^{*1}
森平祥裕^{*2}, 宮越勝美^{*1}

Study on the Wake Structures of an Axisymmetric Body

Seiichi TANIGUCHI, Masanori MATSUMURA,
Yoshihiro MORIHIRA, and Katsumi MIYAKOSHI

The wake structures of a circular cylinder having a finite length were experimentally investigated using a hot-wire anemometer and analyzing the data by means of the phase-averaging technique. The cylinder was installed at the centre of the test section of the wind tunnel such as its axis was in the direction of the main flow. It was found that the shedding vortexes consisted of hair-pin type vortex tubes and had the double-sided structures. Furthermore, the presence of such structures was confirmed by the flow visualization using the dye-injection method.

Key Words: Turbulence, Wake, Three-dimensional Bluff Body, Coherent Structure, Phase Averaging, Hair-pin Typed Vortex, Vorticity

1. 結 言

軸対称物体の後流には、二次元物体に見られるカルマン渦列とは異なったヘアピン状の放出渦が形成される。これには、物体形状、迎え角の有無あるいは浮力などによって一方向の指向性を持つ場合(single-sided structure)と二方向に交互に放出される場合(double-sided structure)⁽¹⁾が報告されている。

渦構造の解明には、流れ場全体を直視できる可視化法が有効であり、この方法によってPerry-Lim⁽²⁾, Xia-Huang⁽³⁾, Taneda⁽⁴⁾は複雑な三次元放出渦の発見および解釈を行っている。しかし、この方法は構造の定量的情報を与えるものではなく、そのためには速度ベクトルの直接測定を行う必要がある。Perry-Watmuff⁽⁵⁾は放出渦の指向性を持たせるために、扁平だ円体を採用し、このだ円体の長軸と短軸を含む面と一致する後流断面の速度ベクトルを測定した。さらに、得られたデータに位相平均操作を適用して放出渦の構造(組織的構造)がヘアピン状渦であることを指摘するとともに、Critical point theory に基

づくフローパターンの説明を行った。しかし、ヘアピン状渦は三次元構造であり、全体像を得るためには積層的に渦を切断して測定を行い、最終的にこれらの要素を組合せて評価する必要がある。

本研究では、三次元後流内にある組織的構造を詳細に探ることを目的として、対象物体として直径と長さが等しい鈍頭円柱を取り挙げた。鈍頭円柱はその主軸が主流方向と一致するように風洞測定部内に設置して、熱線流速計を用いて後流の測定を行い、位相平均法による解析を行って三次元組織的構造を詳細に調べた。特に、三次元像を正確に得るために、流速測定断面には渦の特徴を最もよく示す複数の位置を選んだ。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置 実験は700×700 mmの正方形断面、長さ7 mの測定部を有する低速回流形風洞で行った。この風洞測定部内における一様性は良好であり、乱れ割合は本実験で採用した主流速度 $U_0=8$ m/s において、 U_0 の0.2%以下であった。供試円柱は図1に示すように、直径 d と長さ l とが等しく71.5 mmであり、測定部入口から700 mmの位置において測定部中央に、主軸が主流方向と一致するように取付けた。鈍頭円柱は、0.5 mmのピアノ線によって測定部の側

* 昭和63年10月2日 北海道支部第29回講演会において講演, 原稿受付 昭和63年3月12日。

^{*1} 正員, 北見工業大学 (〒090 北見市公園町165)。

^{*2} 学生員, 北見工業大学大学院。

面パネルに固定した。本実験では組織的構造を明らかにするために物体に主流方向の振動（以下強制縦振動という）を与えた。その加振機構は、物体前面中央に取付けた0.3 mmのピアノ線を風洞縮流部前方にある小形のプーリを介して風洞の外側に取り出し、プランジャの一端に固定した。このプランジャはフィードバック機構で回転数を制御することができるDCモータのカム機構によって変位が与えられる。なお、円柱直径 d を代表寸法とするレイノルズ数 $Re (=U_0 d/\nu; \nu$ は流体の動粘性係数)は 3.8×10^4 である。

速度ベクトルはX形熱線流速計を用いて測定した。X形センサによる流速の測定は円柱後面から $x/d=5$ の下流において、 z 軸に平行な線上（以下水平断面）および y 軸に平行な線上（以下垂直断面）の原点を含む $(-2.2 \sim 2.2)d$ の範囲で行った。なおX形センサの移動ピッチは6 mmである。

2.2 速度ベクトルの分解 図1に鈍頭円柱に関する座標系および速度ベクトルの定義を示す。座標系は鈍頭円柱の後端面の中心を原点として、鈍頭円柱主軸方向（主流方向と一致）を x 軸、それと直角方向を y 軸および $x-y$ 平面と垂直方向に z 軸をとる。 x, y, z 軸方向の瞬時速度をそれぞれ U, V, W とすれば、これらは時間平均成分 $\bar{U}, \bar{V}, \bar{W}$ 、変動成分 u, v, w に分解できる。すなわち、

$$\begin{aligned} U &= \bar{U} + u \\ V &= \bar{V} + v \\ W &= \bar{W} + w \end{aligned} \quad (1)$$

とする。さらに、 u, v, w は

$$\begin{aligned} u &= \langle u \rangle + u' \\ v &= \langle v \rangle + v' \\ w &= \langle w \rangle + w' \end{aligned} \quad (2)$$

と表すことができる。ここに、 $\langle \rangle$ は組織的構造に対応する位相平均量であり、 $'$ はそれに重畳する不規則変動速度である。

2.3 位相平均法 Davies⁽⁶⁾が乱流後流内の組織的構造の抽出に位相平均法を用いて以来、この手法は

図1 鈍頭円柱の座標系

周期的変動のある流れ場の解明に数多く利用⁽⁷⁾⁽⁸⁾されてきているので、ここではその具体的な説明は省略する。位相平均を行うための基準信号については種々の方法⁽⁶⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾が考えられている。本研究では位相のずれを少なくするために被解析信号とできる限り近い位置、つまり、測定断面内の x 軸と近い点 $(x/d, y/d, z/d) = (5.0, -0.08, 0.14)$ にX形センサを設置して得られる速度 w を基準信号とした。この w のパワースペクトルの解析結果を図2に示す。○は鈍頭円柱を静止させた場合、●は $U_0=9$ m/sにおいて静止鈍頭円柱からの放出渦周波数 $f_k=18.6$ Hz、振幅 $a/d=0.1$ で鈍頭円柱に縦振動を加えた場合である。後者では $U_0=8 \sim 10$ m/sの範囲で加振周波数と放出渦周波数が一致するロックイン現象が認められる。つまり、鈍頭円柱を強制的に加振することによって、後流の組織的構造をより鮮明にさせ、解析時に位相のずれを少なくするものと考えられる。したがって、本研究では上述した強制縦振動を鈍頭円柱に与え、すべての測定を行うことにした。

3. 実験結果および考察

図3(a)～(d)に $x/d=5.0$ の垂直断面を通過する放出渦の渦度を等高線の形で示す。渦度は水平面〔図3(a), (b)〕および垂直面〔図3(c), (d)〕のそれぞれに関して、

$$\begin{aligned} \langle \omega_y \rangle &= \partial \langle U \rangle / \partial z - \partial \langle W \rangle / \partial x \\ \langle \omega_z \rangle &= \partial \langle V \rangle / \partial x - \partial \langle U \rangle / \partial y \end{aligned} \quad (3)$$

で与えられる。ここに、 x はTaylorの渦凍結の仮説を

図2 渦放出周波数と主流速度との関係 (f_m : 強制縦振動周波数)

用いると,

$$x = U_c \phi / (2\pi f_k) \dots\dots\dots (4)$$

となる。ここに、 U_c は渦移動速度、 ϕ は基準信号の位相角である。 U_c は次のように決定した。図3(a), (b)に示すように複数の水平断面の等渦度分布を求めた結果、図3(a)に存在する V_1, V_2 の位置において最も大きな渦度になることがわかった。この V_1, V_2 はPerry-Watmuff⁽⁵⁾が指摘する二方向放出渦(ヘアピン状渦)の頂部に相当し、強い巻込みがあることを示している。ヘアピン状渦の移動速度は渦の各部分で異なる可能性がある。しかし、本研究では全体の渦構造を同一基準で評価するために、 V_1, V_2 およびこれらと対をなす V'_1, V'_2 における速度 $\bar{U} + \langle u \rangle$ の平均値を放出渦の移動速度 U_c とした。その大きさは $0.895 U_0$ である。図3(a), (b)によると $V_1 \sim V_2$ がほぼ π の位相差で千鳥形に配列している。また、図3(a), (b)を比較すると流れの中心(x 軸)から遠くに行くにつれて最大渦度は減少する。一方、図3(c), (d)では最大渦度を与える位置(以下渦管の中心という) $a \sim b'$ は $y = 0$ の直線を中心として対称にあることがわかる。これらの図において、たとえば渦管の中心 a, a' は図3(a), (b)の V_1 と連続しており、ヘアピン状渦の脚部に対応する。また、これらの図からわかるように渦管中心

に存在する渦度の大きさは二次元物体のカルマン渦列の値(垂直平板⁽⁷⁾:約0.9, 円柱⁽¹¹⁾:約1.1, いずれも下流 $x/d=8$ における渦中心での絶対値)と比較してかなり小さい値であることがわかる。

次に、前述した渦移動速度 U_c で x 方向に移動する座標系から観察した速度ベクトル分布を図4に示す。これらの図には、図3の等渦度分布、速度ベクトル分布および後で示す可視化写真(図5)を総合評価して、最も適切と考えられる仮想上の流線(以下単に流線という)を併記した。図4(a), (b)のフローパターンはPerry-Watmuff⁽⁵⁾が明らかにしている扁平だ円体の長軸と短軸を通る垂直断面の後流にほぼ一致しており、二次元物体後流に形成されるカルマン渦列のパターンに類似していることが確認される。図4(c)はヘアピン状渦の下部を、図4(d)は頂部近くの状態を示すものである。図4(c)では脚部に相当する一対の渦管(a, a')の背後にそれぞれのサドル点(s_1, s'_1)が存在している。しかし、図4(d)に示すように頂部付近ではこれら二つのサドル点はなくなり、それに代わって S_{01} のサドル点が表れる。この S_{01} への流入、流出状態を考えれば、 S_{01} を通り渦管(a, a')を取り囲む渦面の存在が考えられ、この断面のフローパターンは二次元渦対によって誘起される流れ場⁽¹⁾にほぼ一致する。また、

(a) $\langle \omega_y \rangle d/U_0$ (水平面, $y/d=0.0$)

(c) $\langle \omega_z \rangle d/U_0$ (垂直面, $z/d=-0.35$)

(b) $\langle \omega_y \rangle d/U_0$ (水平面, $y/d=-0.35$)

(d) $\langle \omega_z \rangle d/U_0$ (垂直面, $z/d=0.70$)

図3 等渦度分布 (○:渦中心, ●:サドル点, 等高線間隔=0.04)

図 4(d)に認められるサドル点 S_{01} , S_{02} は図 4(a)におけるサドル点 S_1 , S_2 にほぼ一致するものであり, S_{01} , S_{02} (あるいは S_1 , S_2) から流出した流体はヘアピン頂部への巻き込み渦に取り込まれているものと後流中央部

に取り込まれ上流に向かう流れに分かれる。一方, S_1 , S_2 に対応する図 4(a)の c , c' を見ると, この水平面にはサドル点が存在しなく上向きのみ流れ状態になっていることがわかる。

(a) 水平面($y/d=0.0$),ベクトル $(\bar{U} + \langle u \rangle - U_0, \langle w \rangle)$

(c) 垂直面($z/d=-0.35$),ベクトル $(\bar{U} + \langle u \rangle - U_0, \langle v \rangle)$

(b) 水平面($y/d=-0.35$),ベクトル $(\bar{U} + \langle u \rangle - U_0, \langle w \rangle)$

(d) 垂直面($z/d=-0.70$),ベクトル $(\bar{U} + \langle u \rangle - U_0, \langle v \rangle)$

図 4 速度ベクトルと仮想流線 (○:渦中心, ●:サドル点, →:仮想流線)

(a) 全体写真

(b) 垂直断面写真($x/d=5.0$)

図 5 放出渦の可視化観測

図5に風洞実験の場合と同一の寸法比を持つ鈍頭円柱 ($d=30\text{ mm}$, $Re=700$) の可視化観測結果を示す。この写真〔図5(a)〕では鈍頭円柱から上下の2方向にヘアピン状の渦が周期的に放出され、その頂部 (A, C, D) で巻込みの存在を確認することができ、前述した測定結果を裏付けている。図5(b)は円柱下流 $x/d=5$ における流れと垂直な断面を通過する渦構造を連続して撮影したものである。A~Dは図5(a)の同一記号で示される断面に対応する。A, Dはヘアピン状渦の頂部、Bは脚部の状態を示している。特に、Aでは下流につながる下向渦の脚部付け根部分を認めることができる。また、図5(a)からもわかるように、この放出渦はD以降において崩壊し始めることが認められ、カルマン渦列と比較して不安定な構造であるものと考えられる。

4. 結 論

一様流中で、その主軸を主流方向と平行に設置した鈍頭円柱 (軸長と直径とが同一) の後流の構造を位相平均法によって明らかにし、次に示す結論を得た。

鈍頭円柱後流に形成される放出渦は周期性をもつ明りょうな二方向性のヘアピン状の構造である。しかし、この渦はカルマン渦列に比べて周期的変動速度およびそれに基づく渦度は小さく、早期にその形状を崩壊し

ランダムな流れに移行する。ヘアピン状渦の対称面において上流および下流側に存在するサドル点はその流れ状態が異なる。特に上流側のサドル点ではこの点を通り、ヘアピン状渦を取り囲むような渦面が存在する。

終わりに、実験装置の作成に協力をいただいた北見工業大学 堂田誠治氏および実験の遂行に協力をいただいた北見工業大学大学院生 笠充彦、吉開幹大の両君に深く感謝する。

文 献

- (1) Perry, A. E., ほか2名, *J. Fluid Mech.*, 101-2(1980), 243-256.
- (2) Perry, A. E. and Lim, T. T., *J. Fluid Mech.*, 88-3(1978), 451-463.
- (3) Xia, X. J. and Huang, Z., *Proc. 3rd Asian Congr. Fluid Mech.*, (1986), 439-442.
- (4) Taneda, S., *J. Fluid Mech.*, 85-1(1978), 187-192.
- (5) Perry, A. E. and Watmuff, J. H., *J. Fluid Mech.*, 103(1981), 33-51.
- (6) Davies, M. E., *J. Fluid Mech.*, 75-2(1976), 209-231.
- (7) Kiya, M., and Matsumura, M., *Bull. JSME*, 28-240(1985), 1054-1061.
- (8) 谷口・ほか3名, 機論, 54-498, B (昭63), 256.
- (9) Cantwell, B. and Coles, D., *J. Fluid Mech.*, 136(1983), 321-374.
- (10) 早川・ほか2名, ながれ, 5-1(昭61), 54-63.
- (11) 木谷・松村, 機論, 51-463, B(昭60), 775-782.