

# 円形状多チャンネル熱線プローブによる 球後流中に存在する渦構造の実験的説明

関下 信正 (豊橋技科大)  
山田 裕二 (豊橋技科大)

蒔田 秀治 (豊橋技科大)  
川崎 繁 (豊橋技科大)

## Experimental Investigation of Vortical Structure in the Wake of a Sphere by Multi-Hotwire Probes

N. Sekishita\*, H. Makita\*, Y. Yamada\* and S. Kawasaki\*

\*Toyohashi University of Technology

### ABSTRACT

Vortical structure was investigated in the wake of a sphere for  $Re=20000$  in a low turbulence wind tunnel by using a circumferentially located multi-hotwire probe. The coherent vortices were generated in the near-wake recirculating region of  $X/D \approx 0 \sim 1.8$  just behind the sphere, where  $D$  was the sphere diameter. The vortices grew downstream to be large-scale coherent structures inclined outwardly. The coherent structures had the meridian scale of about  $90 \sim 135^\circ$  and streamwise scale of about  $2D$ . They became staggeredly arranged and passed alternately on opposite sides of the wake. These structures had Strouhal number of about 0.18 but rotated randomly around the axis of the wake.

Key Words: Wake, Sphere, Vortex Structure, Vortex Shedding, Hot-Wire Measurement

### 1. はじめに

球後流は、レイノルズ数 ( $Re=U_\infty d/\nu$ ,  $U_\infty$ : 主流速,  $d$ : 球直径,  $\nu$ : 動粘性係数) が  $Re \leq 800$  の場合、層流状態であり、一つの  $Re$  数に対してストローハル数<sup>(1)(2)</sup> ( $St=fd/U_\infty$ ,  $f$ : 渦放出周波数) が一つ存在する。この  $Re$  数範囲の後流中に形成される渦構造は、 $130 \leq Re \leq 300$  で蛇行し始め、 $300 \leq Re \leq 420$  でヘアピン渦の頭部が一方に並んでそれらがつながった構造にあり、そのような渦構造が  $420 \leq Re \leq 800$  では蛇行することが報告されている<sup>(2)</sup>。さらに、数値計算<sup>(3)~(5)</sup>によっても渦構造の詳細な形状が分かっている。

一方、 $800 \leq Re \leq 6000$  の遷移領域では、一つの  $Re$  数に対して high mode および low mode と呼ばれる二つの  $St$  数が同時に存在し<sup>(1)</sup>、 $Re$  数が数千以上になると high mode の  $St$  数が消えて、 $Re \geq 20000$  で  $St$  数が  $Re$  数に依存せず、 $St$  数はほぼ一定になる<sup>(2)</sup>。この遷移および乱流状態の渦構造に関しては、Achenbach<sup>(6)</sup>、Taneda<sup>(7)</sup>、坂本ら<sup>(2)</sup>による渦モデルが報告されているのみであり、今だ不明な点が多い。

本研究では球後流中の3次元的な渦構造を解明することを目的とし、I型熱線プローブを円形上に配置した多チャンネル計測結果<sup>(8)</sup>とスモークワイヤー法を応用して二方向か

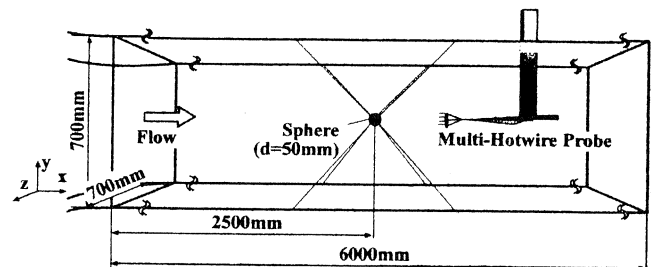


Fig.1 Experimental Setup.

らの同時に撮影した可視化実験を行った。

### 2. 実験装置・方法

本実験では吹出し型低乱風洞 (10m/s 時の乱れ強度  $u'/U < 0.06\%$ ) を使用し、8本のナイロン線 (直径 0.1mm) で測定胴 (0.7m × 0.7m × 6m) の断面中央に球体 (直径  $d=30, 50$ mm) を設置した (図1)。本実験のレイノルズ数は  $Re=2000, 5000, 10000, 20000, 30000$  である。球中心を座標原点とし、流れ方向、鉛直方向、水平方向をそれぞれ  $x, y, z$  とする。

計測には8本のI型熱線 (線径  $5\mu\text{m}$ , 長さ 1mm) の受感部を円上 ( $45^\circ$  毎) に配置した直径の異なる3種類 (直径  $0.7d, 0.9d, 1.1d$ ) の円形プローブと定温度型熱線流速計を用いた。また、これらの信号の位相差を調べるために3本のI型熱線を直線状 ( $0.1d$  毎) に配置した縦型プロ

ープも用いた。熱線流速計からの信号は A/D 変換器で DSP に取り込んだ。A/D 変換のサンプリング周波数  $f_s$  は渦放出周波数  $f$  を用いて  $f_s = f \times 40$  ( $Re=2000$ ),  $f_s = f \times 20$  ( $Re=2000$  以外) とし、サンプル点数は 10000 点とした。

流れの可視化はスモークワイヤ法を応用し、煙線(ニクロム線、直径  $50 \mu m$ )を  $x/d = 1.02$ ,  $y/d = 0$  の点を通る位置に水平、 $x/d = 1$ ,  $z/d = 0$  の点を通る位置に鉛直、すなわち十字形に設置し、発煙油として流動パラフィンを使用した。測定胴の上部および側面部に 2 台のカメラとスリット ( $0.5mm \times 60mm$ ) のついたストロボを 3 台ずつ設置した。負荷電圧と発煙時間、ストロボの発光タイミングを適当に調整し撮影を行った。

3. 実験結果及び考察

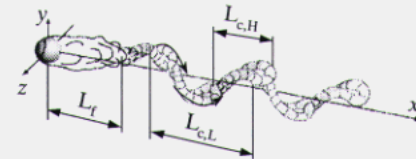
表 1 に渦放出周波数が最も顕著に観察される位置  $x_f/d$ ,  $y_f/d$ 、および、その位置におけるストローハル数  $St$  を示す。レイノルズ数  $Re \geq 10000$  の場合、 $St$  数は一つで、かつ、 $St$  数  $\approx 0.18$  であることから乱流状態であることがわかる。一方、遷移状態のレイノルズ数  $Re = 2000, 5000$  での  $St$  数は二つ存在し、小さい方の  $St$  数が Low mode、大きい方の  $St$  数が High mode に起因するものである。

表 1 には、渦形成領域の範囲  $L_f$ 、High mode に起因するスケール  $L_{c,H}$ 、および、Low mode に起因するスケール  $L_{c,L}$  も示してある。坂本ら<sup>(2)</sup>によると、Low mode は渦構造の蛇行による変動に、High mode は球表面からはく離する vortex sheet の脈動に基づく筒状の渦の放

Table 1  $St$  Number and Length of Coherent Structures.

$Re$	$St$	$x_f/d$ $y_f/d$	$L_f/d$	$L_{c,H}/d$	$L_{c,L}/d$	$\frac{L_{c,L}}{L_{c,H}}$
2000	0.22	2.5	3.0	-	3.4	-
	0.42	0.4		2.3*	4.6*	2
5000	0.18	1.7	1.8	0.6	4.5 <sup>(8)</sup>	8
	1.08	0.5		0.9*	5.7*	6
10000	0.17	-	1.9	-	4.8	-
20000	0.18	1.13 0.47	1.9	-	4.7	-
30000	0.19 <sup>(8)</sup>	2.1 <sup>(8)</sup> 0.45 <sup>(8)</sup>	1.9	-	4.8 <sup>(8)</sup>	-

\*:Evaluated from  $St$  number.



出に起因するものであるが、High mode に関しては、表 1 下の図のように、渦形成領域の筒状の渦が流下し、蛇行した渦構造を形成する小規模構造であると考え、表 1 の  $L_{c,L}/L_{c,H}$  から、蛇行した大規模渦構造中に  $Re = 2000$  では小規模構造が 2 個(図 7 a)、 $Re = 5000$  では 6 ~ 8 個(図 7 b)入っていると予想される。なお、遷移状態の  $Re = 2000, 5000$  では  $L_f$ 、 $L_{c,H}$ 、 $L_{c,L}$  は変化しているものの、乱流状態の  $Re \geq 10000$  では  $L_f$ 、 $L_{c,L}$  とともにほぼ一定の  $L_f/d \approx 1.9$ 、 $L_{c,L}/d \approx 4.8$  である。

図 2(a), (b), (c)はそれぞれ  $Re=2000$ , 5000, 20000 の可視化写真である。 $Re=2000$ (図 2a)の可視化写真では渦形成領域の内部構造をよく観察でき、この形状は Achenbach<sup>(4)</sup>が報告

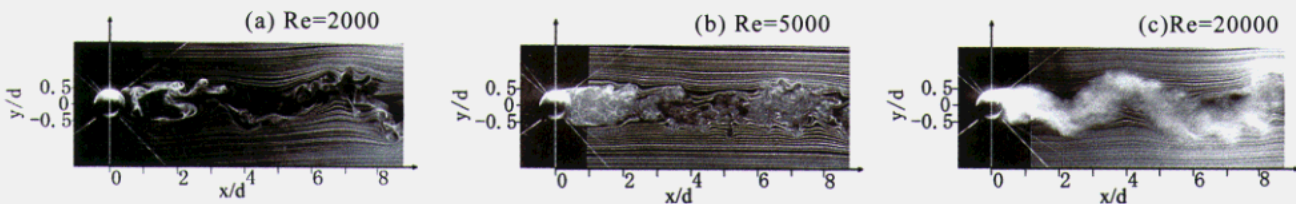


Fig.2 Flow Patterns Obtained by the Smoke-Wire Method.

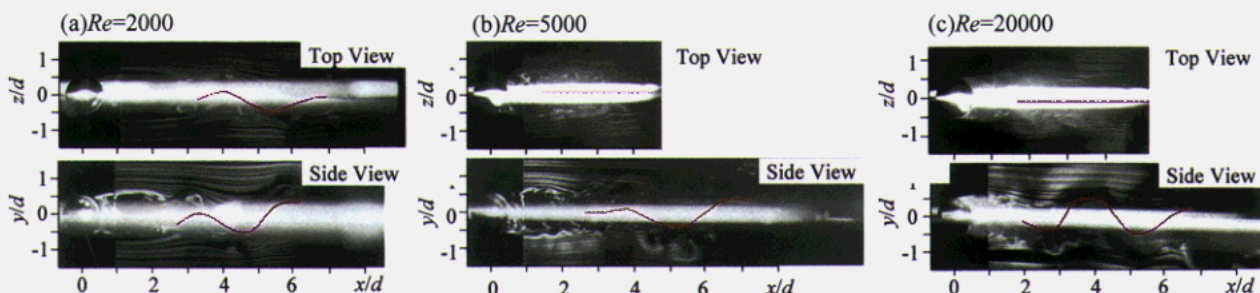


Fig.3 Flow Patterns obtained by the Smokewire Method.

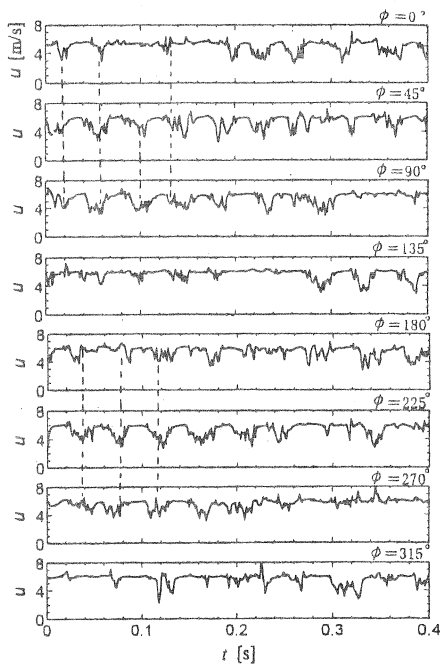


Fig.4 Instantaneous velocity fluctuation.

した  $Re=1000$  の Vortex Loop と良く似ている。 $Re=20000$ (図 2c)では渦形成領域は乱流化しているため全体が煙に覆われている。なお、 $Re=10000, 20000, 30000$  については同様な傾向が得られた。

図 3 は上および横の 2 方向から同時に撮影した可視化写真である。2 方向から同時に撮影しているために、写真中央部に白いストロボ光が入ってしまい少々見にくいので、写真の中に渦構造の中心線を引いてある。図 3 (a)の  $Re=2000$  の場合、上および横方向どちらから撮影した渦構造も蛇行しており、両者は位相が約  $90^\circ$  ずれている。この  $Re=2000$  では、後述する計測結果と含めて考察すると、 $Re=2000$  の渦構造は螺旋型(図 6 a)であると考えられる。

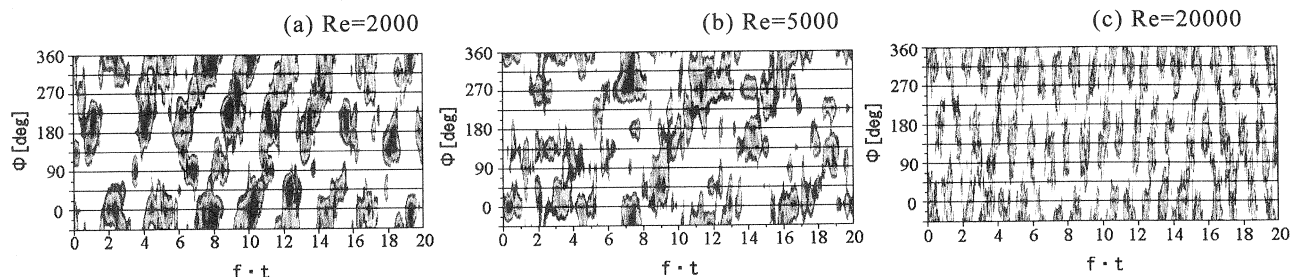
$Re=5000$  では、図 3 (b)に示すように片方から見たときのみ蛇行している場合や両方とも直線的な場合がほぼ同じ確率で観察され、

図 5 (b)の計測結果からも他の  $Re$  数のように常に特徴的な構造が続くものではなかった。

図 3 (c)に示すように、 $Re=20000$  では真直ぐと蛇行の組み合わせが観察でき、また、図 5 (c)から  $\phi \doteq 90 \sim 135^\circ$  の幅をもった減速領域が  $180^\circ$  ずれた反対側の位置にも存在し、それらが時間の経過に伴って交互に観察できることから、この  $Re$  数の渦構造は蛇行型(図 6 c)であると考えられる。なお、ここでは示さないが  $Re=10000, 30000$  においても同様な傾向が得られた。

$Re=20000$ 、 $X/D=4$  の断面において、8 本の I 型熱線からなる円形プローブによって計測された瞬間速度変動を図 4 に示す。図中の角度  $\phi$  は、上流側から円形プローブをみて、時計方向に周方向角度をとったものであり、真上 ( $Y$  軸の正の方向)を  $\phi = 0^\circ$  とした。 $t \doteq 0 \sim 0.2$  s における各 I 型熱線の速度変動に注目してみると、 $\phi = 0, 45, 90^\circ$  の波形は類似していることから、この時間においては同一の渦構造が通過したものと考えられる。また、 $\phi = 0, 45, 90^\circ$  の波形と半周期異なる同様な波形が  $\phi = 180, 225, 270^\circ$  の I 型熱線で捕らえられており、このことから、一つの秩序構造の周方向スケールは  $90^\circ$  程度であり、その様なスケールを持つ 2 つの秩序構造が  $X$  軸を挟んで相対して存在し、それらは交互に通過していることがわかる。この様な状態がいつまでも続くわけではなく、 $t \doteq 0.2$  s 以降の各 I 型熱線の速度変動から、秩序構造の通過位置が動いていることもわかる。

図 5 は、直径  $0.9d$  の円形プローブで計測した瞬間速度変動 ( $\{u - U_L\} / U_\infty$ ,  $U_L$ : 局所平均流速)の分布図である。縦軸は各 I 型熱線の周方向角度  $\phi$ 、横軸は渦放出周波数  $f$  で無次元化した時刻である。図中の黒い領域は局所平均流速  $U_L$  よりも遅い減速領域を表しており、時間方向に白と黒のパターンが変化することが渦の通過を意味している。 $Re=2000$ (図 5 a)

Fig.5 Contours of Instantaneous Velocity Fluctuation by the 0.9d Probe at  $x/d=4$ .

■ :  $(u - U_L) / U_\infty < 0$ , □ :  $(u - U_L) / U_\infty > 0$ .

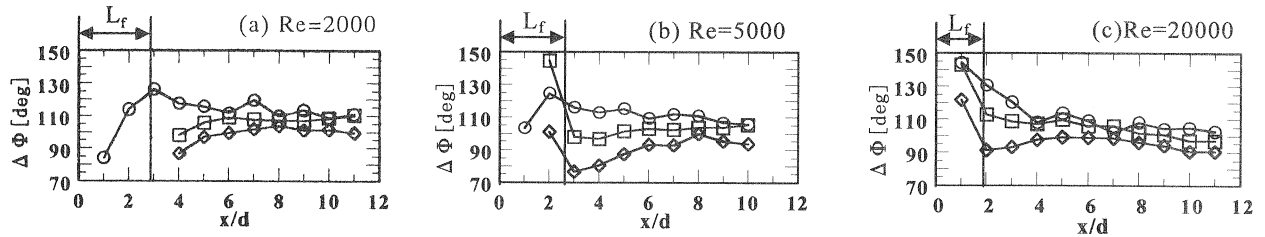


Fig.6 Streamwise Changes of the Mean Circumference Angel of the Coherent Structure.

○ : 0.7d Probe, □ : 0.9d Probe, ◇ : 1.1d Probe.

では減速領域が時間と共に周方向  $\phi$  に連続して移動していることから、 $Re=2000$  ではらせん状の渦構造が通過していることが分かる。なお、その回転方向はランダムであった。 $Re=20000$  (図 5 c) では  $\phi \approx 90 \sim 135^\circ$  の幅をもった減速領域が  $180^\circ$  ずれた反対側の位置にも存在し、それらが時間の経過に伴って交互に現れていることから、渦構造が蛇行していると考えられる。 $Re=5000$  (図 5) では渦構造のパターンは  $Re=2000$  や  $Re=20000$  ほど明確ではない。また、ここでは示さないが縦型プローブの結果を見てみると、0.9d プローブの信号に対して 0.7d, 1.1d プローブとも同期しており、さらに他のプローブの傾向は 0.9d プローブの結果 (図 5) と同様であった。

3 種類の円形プローブによって計測した瞬間速度変動をもとに平均周方向幅  $\Delta\Phi$  を求めた。その流れ方向変化を図 6 に示す。渦形成領域 ( $x < L_f$ ) では各プローブの測定値がばらばらにしているが、それよりも下流では 1.1d, 0.9d, 0.7d と後流の内部に近いほど  $\Delta\Phi$  が大きくなっている。 $Re=2000, 5000$  における  $\Delta\Phi$  は下流 ( $x/d \geq 8$ ) においてそれぞれほぼ一定値を示している。一方、 $Re=20000$  (図 4c) の  $\Delta\Phi$  は渦形成領域より下流で徐々に減少しており、大規模渦は徐々に崩壊している。今後は熱線プローブの空間分解能を高め、大規模渦の内部構造を明らかにする予定である。

#### 4. おわりに

球後流の渦構造を円形プローブと煙線法によって調べた結果、以下の結論を得た。

- (1) 渦形成領域の長さは遷移  $Re$  数 ( $Re=2 \times 10^3, 5 \times 10^3$ ) で約 2.7d、乱流状態の  $Re$  数で約 2.0d であった。
- (2)  $Re=2 \times 10^3$  では 1 周期約 4.2d の流れ方向スケールと、約  $110^\circ$  ( $x/d \geq 8$ ) の平均周方向スケールを持ったらせん状の大規模渦構造が時々回転方向を変え、流下している。
- (3)  $Re=5 \times 10^3$  ではらせん型の渦構造と交番渦が混

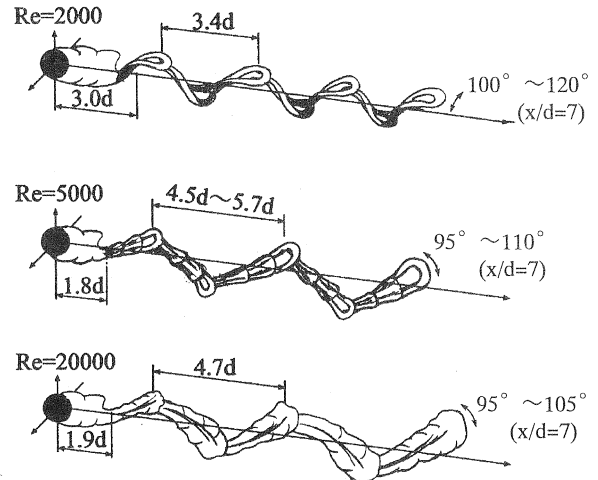


Fig.7 Vortex Structures Depend on Reynolds Number in the Wake of a Sphere.

ざり合っており、定常的に明確な構造を持たない大規模渦が流下している。

- (4) 乱流状態 ( $Re=2 \times 10^4$ ) では 1 周期約 4.9d の流れ方向スケールと約  $100^\circ$  ( $x/d=8$ ) の平均周方向スケールをもった大規模渦構造が蛇行し、徐々に崩壊しながら流下している。

#### 参考文献

- (1) Möller W., Phys. Zschrift (1938), Nr.2, 39.Jahrgang, 57.
- (2) 坂本・羽二生・中村, 機論, (1998), 55-515, 1889.
- (3) Tomboulides, A.G., Orszag, S.A., & Karniadakis, G.E. AIAA (1993), Paper 93-0546, Jan.
- (4) Rajat M., AIAA, (1999), vol.37, No.3: Tech. Notes, 388.
- (5) Shirayama S. and Kuwahara K., AIAA, (1987).
- (6) Achenbach E., J. Fluid Mech. (1974), vol.62, part2, 209.
- (7) Taneda S., J. Fluid Mech. 85-1 (1978), 187-192.
- (8) 蒔田・他 3 名, 日本機械学会東海支部第 49 期総会講演会講演論文集 No.003-1, (2000), 1-2.