円形状多点 I 型熱線による球後流の螺旋・交番型渦構造の計測

Multi-Hotwire Measurement of Helical and Staggered Vortices in the Wake of a Sphere

正 蒔田 秀治 (豊橋技科大)

○学 曾我 洋太 (豊橋技科大)

正 関下 信正 (豊橋技科大)

学 長谷川 京子 (豊橋技科大)

Hideharu MAKITA, Toyohashi University of Technology, Tenpaku-cho 1-1, Toyohashi, Aichi 441-8580, Japan

Hiroataka SOGA, Toyohashi University of Technology

Nobumasa SEKISHITA, Toyohashi University of Technology

Kyoko HASEGAWA, Toyohashi University of Technology

Vortical structures were experimentally investigated in the wake of a sphere by multi-hotwire measurements and flow visualizations. Two kinds of the Strouhal numbers were observed in the range of $Re=800\sim7000$: the low mode St number kept almost constant of $St_L \approx 0.2$ and the high mode St number increased discontinuously with increasing the Re number. A helical-type low mode structure composed of 2~3 high mode vortices was observed for $Re \leq 2000$. A staggered-type I structure with 2~6 high mode vortices existed for $Re=1700\sim3800$. A staggered-type II structure containing of 4~8 high mode vortices for $Re=2400\sim7000$. For $Re \geq 7000$, the inside of the low mode structure became turbulent due to the interaction between the high mode vortices, then the low mode structure was basically staggered-type. Wavelet analyses showed that the whole number of the high mode vortices contained in the low mode structure increased with the Re number.

Key Words: Wake, Sphere, Vortex Structure, Helical-Type Vortex, Staggered-Type Vortex, Hotwire Measurement

1. 緒言

球後流の渦構造に関して, Achenbach⁽¹⁾は球表面近傍に 4 本の I 型熱線を設置し, $Re=5 \times 10^4$ ($Re=U_\infty d/\nu$, U_∞ : 主流流速, d : 球の直径)では剥離点が回転しており, $Re=10^3$ では vortex loop が連なっている渦構造を提案した. Taneda⁽²⁾は可視化実験を行ない, $10^4 \leq Re \leq 3.8 \times 10^5$ の後流は蛇行し, その蛇行面が球中心を通る流れ方向軸まわりに不規則に回転していることを示した. 坂本ら⁽³⁾は, $Re \leq 800$ の渦構造と vortex loop の放出過程を主に報告した. Yun ら⁽⁴⁾は, LES によって $Re=10^4$ における後流の大規模構造が螺旋形状であることを示した.

また, 渦放出周波数 f について, $800 \leq Re \leq 7000$ の遷移域では, low mode および high mode と呼ばれる 2 つのストローハル数 $St (=fd/U_\infty)$ が存在する⁽⁵⁾. low mode のストローハル数 St_L は Re 数に依存せず, ほぼ一定値($St_L \approx 0.2$)であるのに対し, high mode のストローハル数 St_H は Re 数と共に単調に増加⁽³⁾することが知られているが, 著者ら⁽⁶⁾はこれを否定する実験結果を得た. すなわち, 遷移域($800 \leq Re \leq 7000$)で Re 数と St 数の関係を実験的に調べ, Re 数の増加と共に St_H 数が階段状に増加することを示した. なお, $Re \geq 7000$ の場合, 球後流の内部は乱流状態になり, St_H 数は確認されず St_L 数のみとなる.

この St 数が上述した渦構造とどのように対応しているのかはこれまで明らかになっていなかったが, 我々は, 上述の St_H 数の傾向から, 整数個の high mode に対応する小規模構造によって low mode に対応する大規模構造が構成されているという仮説を提案し⁽⁶⁾, 球後流の渦構造の解明を行っている. 本報では, 大規模構造のより詳細な形状, および, 一つの大規模構造中の小規模構造の個数, その時間的な変化などを解明することを目的として, 円形状に配置した多点 I 型熱線による計測, および, 2 方向同時動画撮影を行った.

2. 実験装置および実験方法

本実験では, 図 1 に示すように, 低乱風洞($u'/U_\infty=0.06\%$)の測定胴の断面中央に, 8 本の糸(線径 0.08mm)で $d=50.1$ mm, 真球度 0.004mm の球を吊るした. 各実験条件下でも球は振動せず, 支持法や支持糸からの渦放出(最大流速時に $Re \approx 33$)による渦構造への影響がないことを確認した. 座標原点を球の

Fig. 1 Experimental setup.

Fig. 2 Circumferentially located Multi-probe.

Fig. 3 Re number dependence of St number.
 present work based on visualization ;
 ●: high mode, ■: low mode
 present work based on hotwire measurements ;
 ■: low mode, ●: first high mode, ●: second high mode
 other works ;
 ×, ---: Achenbach⁽¹⁾, ---: Sakamoto et al.⁽³⁾, +: Möller⁽⁵⁾

Fig. 4 Vortex structures in the near wake of a sphere.

Fig. 5 Flow patterns taken by high speed video cameras.

Fig. 6 Contour maps of the instantaneous velocity fluctuation measured by a circumferentially located multi-probe at $x/d=4.0$.

Fig. 7 Vortex Structures.

中心とし, x , y , z 軸を図中に示す.

多点計測には, 図 2 に示すように, 24 本の I 型熱線プローブを 15° 毎に円形状(直径 $1.1d$)に並べた円形プローブを用いた. この円形プローブの中心を x 軸上に設置し, $x/d=1.0 \sim 7.0$ の断面を $Re=2000, 3300, 5000, 20000$ の 4 条件で計測した.

可視化実験には煙線法を採用し, 2 本のメッキ煙線⁽⁷⁾(線径 $100\mu m$)を水平方向($x/d=1.2, y/d=0$)と鉛直方向($x/d=1.23, z/d=0$)に十字型に設置した. 同期をとった 2 台の高速度カメラ($125 \sim 500$ frame/s)を測定窓の上方および側方に設置し, 4 台のハロゲンライトを用い, $Re=2000 \sim 20000$ の 18 条件で撮影した.

3. 実験結果と考察

3-1 Re 数と St 数の関係 図 3 に Re 数と St 数の関係を示す.

Table 1 Various types of coherent structures⁽⁸⁾.

Re	coherent structure
1700~2000	helical-type
1700~3800	staggered-type I
2400~7000	staggered-type II
$Re \geq 7000$	turbulent staggered-type

St 数の算出には単一 I 型熱線による速度変動のスペクトル解析によって得られたピーク周波数を用いた. 図 3 では, 既報⁽⁶⁾と同様に, Re 数の増加とともに St_H 数が階段状に増加しており, $low\ mode$ に対応する大規模構造は整数個の $high\ mode$ に対応する小規模構造で構成されるという上述の仮説を支持する結果を得た. そこで, 本報では各々の構造(図 4a)を low

Fig. 8 Wavelet analysis of velocity fluctuations.

mode 構造, および, high mode 構造と呼ぶ. なお, 3-3 節で後述するが, $Re \geq 7000$ において St_H 数は観測されなかった.

3-2 St 数と渦構造の関係 図4に, 球近傍におけるhigh mode 構造の一例を示す. 球近傍のhigh mode 構造は, $Re=2000$ (図4a)では渦形成領域の一部が伸びるようにヘアピン状の構造が, $Re=5000$ (図4b)では渦形成領域を包むように半リング状の構造が形成され, 周期的に下流に放出される. これらの放出周波数の平均値を球近傍の動画撮影から算出した結果, それは図3の St_H 数とほぼ一致⁽⁹⁾することから, St_H 数はヘアピン状構造や半リング状構造の放出周波数を表している. また, low mode 構造の無次元渦放出周波数は図3の St_L 数に対応することも確認した⁽⁹⁾.

3-3 渦構造の Re 数依存性 既報⁽⁸⁾で, low mode 構造は Re 数によって表1のように分類されることを報告した. それぞれの構造を説明するため, 動画撮影から選んだ瞬間写真を図5に示す. 上の写真は上方から, 下の写真は側方から同時撮影したものである. 写真中の赤線は瞬間写真から目視で判断した後流の中心軸である. 図5(a)の $Re=2000$ では, 上方, 側方の両方とも後流の中心軸が蛇行し, 図中の破線に示すように, 蛇行の頂点が $1/4$ 波長ずれており, low mode 構造は螺旋型である. この構造を円形プローブで捉えた結果を図6(a)に示す.

計測断面は $x/d=4.0$ である. 図6の縦軸は各プローブの周方向角度, 横軸はlow modeの渦放出周波数 f_L で無次元化した時間である. 等値線は瞬間流速 u から局所平均流速 U_L を引いた値である. 図中の分布は時間経過に伴って増速と減速を繰り返しており, その周期はほぼlow modeの周期に対応している. 図6(a)では, 減速領域が斜めにつながっており, low modeの一周期中にlow mode構造が円形プローブを1回転しながら通過したことを示している. 図5(a)とともに考えると, low mode構造が螺旋形状であることが分かる. なお, 螺旋形状の反対回りを示す分布も観測されており, 螺旋型構造の回転方向は時間によって不規則に変化している.

$Re=2000$ では, 上述した螺旋型と交番型I構造が混在(表1)しており, 図5(b)の場合, 上方から撮影した写真では後流の中心軸がほぼ真直ぐであり, 側方からの写真では大きく蛇行している. 図6(b)は $Re=2000$ の多点計測の結果であり, 減速領域が千鳥状に分布している. 例えば, 図中の枠で囲った時間帯では $\phi \approx 45 \sim 135^\circ$ と $\phi \approx 225 \sim 315^\circ$ の周方向に約 180° ずれた位置にlow modeの半周期ごとに減速領域が交互に分布している. 図5(b)とともに考えると, この構造は, ヘアピン渦(high mode構造)の脚部が次のヘアピン渦の頭部とつながり全体として蛇行したlow mode構造をしており, これを交

番型 I 構造(図 7b)と呼んでいる。なお、図 6(b)の千鳥状の分布が生じる周方向角度は不規則であり、交番型 I 構造を維持しながら蛇行面は不規則に回転している。

図 5(a), (b), (d)と比較して、図 5(c)に示す $Re=5000$ の場合、二方向の写真とも蛇行が比較的小さく、これを交番型 II 構造⁽⁸⁾と呼ぶ。多点計測の結果(図 6c)では複雑な分布をしているが、low mode 一周期を示した拡大図では、low mode 半周期中に複数個の high mode 構造を示す分布(図中の丸印)が周方向に約 180° ずれた位置に観察された。図 5(c)と合わせて考えると、これは、図 7(c)の low mode の半周期中に複数個のヘアピン渦同士が脚部がつながり、その頭部が同じ方向を向き、次の半周期では同様の構造が反対方向を向いた交番型 II 構造⁽⁸⁾を捉えたものと考えられる。なお、3-2 節で述べたように、 $Re=5000$ における渦形成領域での high mode 構造は半リング状であるが、これが流下に伴って傾き、球遠方ではヘアピン状になると考えている。

$Re=20000$ の可視化写真(図 5d)では、low mode 構造の内部が乱雑化している。 $Re \geq 800$ で Re 数の増加に伴い、一つの low mode 構造中に存在する high mode 構造の個数が増加(図 3)するため、 $Re=20000$ では high mode 構造同士が相互干渉して high mode 構造が壊れた結果、low mode 構造の内部が乱流化し、 St_H 数が観察されなくなったと考えられる。なお、low mode 構造の形状は、図 5(b)と同様に、後流の中心軸が一方は真直ぐで他方が大きく蛇行している(図 5d)。この構造は、図 6(d)に示すように、low mode の半周期ごとに周方向に約 180° ずれて千鳥状に分布していることから確認され、 $Re=20000$ の後流中には乱流交番型構造⁽⁶⁾が存在する。なお、図 6(d)に示すように、千鳥状分布が生じる周方向の位置が不規則に変化していることは、蛇行面が時間とともに変化していることを示している。

3-4 low mode の一周期中の high mode の個数 n_H 一つの low mode 構造を構成する high mode 構造(図 4a)の個数 n_H 、および、その時間的変化を考察するために、瞬間流速から局所平均流速を引いた速度変動成分 u' を wavelet 解析

$$w(a, b) = \frac{1}{a^{1/2}} \int \phi\left(\frac{t-b}{a}\right) u'(t) dt \quad (1)$$

した。マザーウェーブレット $\phi(t)$ には Gabor 関数

$$\phi(t) = \frac{1}{\pi^{1/4}} \left(\frac{\omega_0}{\sigma} \right)^2 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\omega_0}{\sigma} \right)^2 t^2 + j\omega_0 t \right] \quad (2)$$

を用い、wavelet 係数の実部の等値線を図 8 に示す。図中の横軸はスペクトル解析から得た low mode の渦放出周波数 f_L で無次元化した時間、縦軸は周波数である。図中にはスペクトル解析から得た low mode, high mode の渦放出周波数 f_L , f_H の線を示してある。二つの f_H が存在する場合、第一 high mode の渦放出周波数を f_{H1} 、第二 high mode の渦放出周波数を f_{H2} とした。一つの秩序構造がプローブを通過して増減速した時、wavelet 解析の等値線では一組の赤、青の分布に対応する。

$Re=2000$ では、wavelet 解析結果より主に $n_H=2$ 個であったが、3 個のものも稀に観察された。その一例として、図 8(a-1)の矢印で示した区間では一つの low mode 構造が通過する時間帯を示しており、破線に示す f_H 付近の high mode に対応する wavelet 係数の分布から、2 個の high mode 構造が通過している。同様の構造が同時刻での周方向角度が 180° ずれたプローブでも観察(図 8a-2)される。なお、 n_H が奇数個である場合、low mode 半周期中の high mode 構造の個数が偶数個と奇数個で一つの交番型構造を構成する可能性があり、その場合には、球後流の x 軸まわりの対称性が失われることが懸念されるが、今後、この点に関して high mode の個数と渦構造の関係をさらに調べていきたい。

$Re=3300$ では、wavelet 解析から $n_H=4, 5, 6$ 個の構造が観

察でき、一例として図 8(b)に、一つの low mode 構造が通過する時間帯に 4 個の high mode 構造が観察される場合を示す。wavelet 係数は平均的には f_{H1} または f_{H2} の線上に分布している。しかし、high mode 構造に対応する wavelet 係数の分布は、図 8(b)のように f_{H1} より低周波側に、図 8(c)のように f_{H2} より高周波側に表れる場合もある。これらは、high mode 構造の渦放出周波数が n_H に依存し、 n_H が多い場合には高周波側に、少ない場合には低周波側にシフトするものと考えられる。また、low mode 構造の周期に関して、図 8(b)では low mode の一周期に比べ、矢印で示す一つの low mode 構造が通過する時間帯が長い。これは、整数個の high mode 構造によって一つの low mode 構造を構成することから、大規模構造の波長も変化したためであると考えられる。

$Re=5000$ では、wavelet 解析によって $n_H=6, 7, 8$ 個のパターンが存在し、図 8(d)では low mode 一周期中に 6 個の high mode 構造が、図 8(e)では 8 個の high mode 構造が観察される。high mode の周波数シフトに関しては、図 8(e)のように、 f_{H1} および f_{H2} の線上に high mode 構造に対応する wavelet 係数の分布が存在する割合は、全解析時間中に約 30% の割合で観察された。その他の変調する場合(約 70%)の一例を図 8(d-1)に示す。高周波側から低周波側へ high mode の周波数が変調しており、同時刻での円形プローブの反対側での結果(図 8d-2)では反対に低周波側から高周波側へ変調している。この要因として、前述した半リング状構造が傾くことや、渦スケールの変化、また、多点 I プローブが固定位置であるのに対して、渦構造の三次元性のために渦構造を正確に捉えられていない恐れがあり、この点についてもより詳細に調べていきたい。

4. 結言

$Re=2000 \sim 20000$ の球後流について、円形プローブによる計測と可視化実験を行ない、以下の結論を得た。

- (1) high mode の St 数に対応する整数個の小規模構造によって、low mode に対応する大規模構造が構成される。球近傍で形成された小規模構造は、 $Re=2000$ ではヘアピン状、 $Re=5000$ では半リング状である。また、大規模構造は、 $Re \leq 2000$ では螺旋型、 $Re=1700 \sim 3800$ では交番型 I、 $Re=2400 \sim 7000$ では交番型 II、 $Re \geq 7000$ では乱流交番型である。
- (2) 一つの low mode 構造中の high mode 構造の個数 n_H は、 $Re=2000$ では $n_H=2 \sim 3$ 個、 $Re=3300$ では $n_H=4 \sim 6$ 個、 $Re=5000$ では $n_H=6 \sim 8$ 個となり、 Re 数の増加に伴い n_H は増加する。ただし、同一 Re 数において、 n_H は常に一定ではない。
- (3) high mode の渦放出周波数 f_H の時間平均値は一定であるが、 f_H は n_H に依存して変化し、 n_H が多いと高周波側に、少ないと低周波側に変調する。また、low mode の波長も、 n_H の変化に応じてわずかに変化する場合がある。

本研究を遂行するにあたり、協力していただいた本田技研工業の藤田泰寛氏に感謝の意を表する。

引用文献

- (1) Achenbach, E., J. Fluid Mech., 62-2(1974), 209-221.
- (2) Taneda, S., J. Fluid Mech., 85-1(1978), 187-192.
- (3) 坂本・羽二生・中村, 機論, 55-515(1989), 1889-1895.
- (4) Yun, G., Kim, D., Choi, H., Physics of Fluids, 18, 015102(2006).
- (5) Möller, W., Physik. Zeitschr., 2-39(1938), 57-81.
- (6) 蒔田・関下・川崎, ながれ別冊, 21(2002), 158-159.
- (7) 関下・蒔田・大江・伊藤, 機論 B 編, 67-661(2001), 2243-2250.
- (8) 蒔田・藤田・関下, 機講論, No.04-25(2004), 223.
- (9) 蒔田・長谷川・関下・曾我, 日本流体力学会年会, (2006).