

球後流の 3 次元渦構造の可視化

Visualization of vortex structure transition at sphere wake

- 石浦 ユミ 1, 工学院大学大学院機械工学専攻, 東京都新宿区西新宿 1-24-2, yu.ishiura@gmail.com
 金野 祥久 2, 工学院大学 機械工学科, 東京都八王子市中野町 2665-1, konno@researchers.jp
 飯田 明由 3, 豊橋技術科学大学機械工学系 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1, iida@me.tut.ac.jp
 Yumi Ishiura 1, Kogakuin University, 1-24-2 Nishi-Shinjuku, Shinjyuku-ku, Tokyo, 163-8677 Japan
 Akihisa Konno 2, Kogakuin University, 2665-1 Nakano, Hachioji, Tokyo, 192-0015 Japan
 Akiyoshi Iida 3, Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibarigaoka, Toyohashi, Aichi 441-8580 Japan

In order to understand vortex structures and transition phenomena in the wake of a sphere at low Reynolds numbers region, unsteady flow simulations were conducted focusing on the relationship between the Low mode and the High mode vortex structures. Since the frequency ratio of the High mode to Low mode (H/L) is integer; the Low mode structure seems to be made from aggregation of the High mode vortices. Two types of vortex structure (helical and alternative motion) are visualized by using iso-surface of the second invariant. The results show the conditions of vortex formation are also related to H/L.

1. はじめに

2 次元物体の下流には, 規則的な渦列—カルマン渦列が形成されることが知られている. カルマン渦列の構造はレイノルズ数に依存し, 一般に低いレイノルズ数ほど秩序だった構造がみられるが, 比較的高いレイノルズ数においても秩序だった構造が保たれることが確認されている. これらの渦列は流体騒音や空力加振の原因となることもあり, 渦構造に関する研究は工学的な観点からも重要である. カルマン渦列の構造やレイノルズ数依存性は古くから研究されている課題であるが, たとえば臨界レイノルズ数付近の渦の挙動や渦構造の三次元化の問題など明らかになっていない課題も多い.

球後流にできる三次元的な渦構造についてもレイノルズ数に依存することが知られているが^{(1),(2)}, 渦構造の決定機構や遷移過程などについては不明なことも多い. したがって, 球後流の渦構造や渦構造の遷移過程を調べることは, 三次元的な流れ場を理解する上で重要であると考えられる.

本研究では球後流の渦構造のレイノルズ数依存性を調べるため, 数値解析により球後流の渦構造を求め, 蒔田らの実験結果と比較することにより, 渦構造のレイノルズ数依存性について検討した.

2. 解析手法

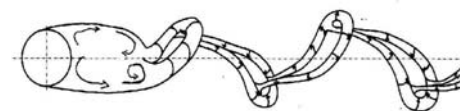
蒔田らは, 風洞実験により球後流の流れ場の構造について系統的な研究 (レイノルズ数 $Re = 2000$ から 8000) を行い, 球の後流には, 図 1 に示すような螺旋構造渦, 交番構造渦 I, 交番構造渦 II の 3 つのモードが存在すること示した. また, 後流の渦構造は大規模渦構造 (Low mode 渦) と, 大規模渦構造を形成する小さな渦 (High mode 渦) からなり, Low mode 渦は High mode 渦が複数集まって形成されることから, High mode の周波数 f_H は Low Mode 周波数 f_L の整数倍となることを示した.

蒔田らの実験によれば, 螺旋構造渦と交番渦構造のどちらが支配的となるかはレイノルズ数に依存するが, 螺旋構造渦と交番構造渦が交互に出現することがあることが確認されている. これらの渦構造が出現する頻度やタイミング, モードが切り替わるメカニズムについては不明であり, これらの課題について数値解析による検討を行いたいというのは本研究のモチベーションである.

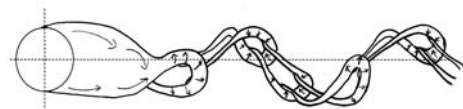
流れの解析には 3 次元非圧縮ナビエ・ストークス方程式を基礎式とする非定常流れ解析ソフト FrontFlow/blue を使用した. 解析は (はく離点直前位置における) 球表面の境界層厚さ δ を

$$\delta/D = \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{Re_d}} \quad (1)$$

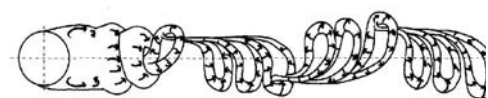
と仮定し, 境界層厚さ δ の内部に 20 点の格子点を設けて行った. 境界層内のメッシュを基準にメッシュのアスペクト比を 5 以下に設定し, さらに境界層から外部に向けて格子のストレッチングが 1.1 以下になるようにメッシュを生成した. 特に渦構造の 3 次元的な遷移課程がメッシュに依存しないようにするため, メッシュの大きさや歪, 対象性などについて検討を行った.



Alternatives Structure: Type I ($n_H=2$)



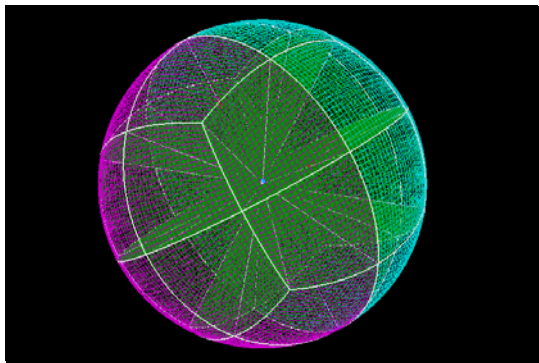
Helical Structure ($n_H=3$)



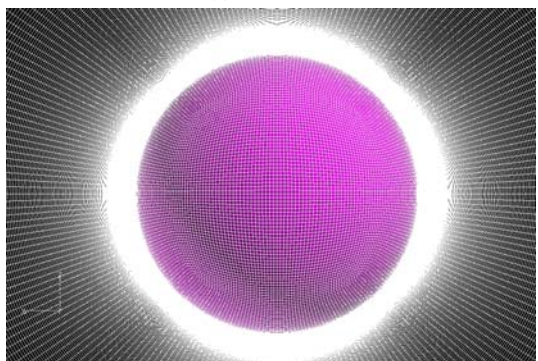
Alternatives Structure: Type II ($n_H=6$)

Fig.1 Schematics of vortex structures in a wake of a sphere
 解析は $Re = 2000$ 及び 3000 の二つのケースについて行った. 先に示したように渦構造の遷移課程を調べることから, メッシュ依存性を避けることを目的にできるだけ格子依存性の少ない対称的なメッシュを作成することを目指し, 図 2(a)に示すように球表面を 24 のブロックに分割し, 各ブロック内をできるだけ正方形に近いセルに分割し, それを半径方向に放射上に伸ばした六面体メッシュを作成した. 解析領域は球の直径の 30 倍である. 図 2(b)(c)に解析メッシュを示す. 初期格子点数を 800 万点とし, 解析の途中から格子点間隔を二分割するリファイナー処理を行い, 最終的な格子点数を 6 千 400 万点として解析を行った. 平均速度分布や渦放出周波数, 流体力, 圧力係数などの解析結果は実験と良く一致することを確認したが, 速度勾配テンソルの第二不変量を求めてみると, 格子依存性が存在することが確認された. 図 3 に解析結果

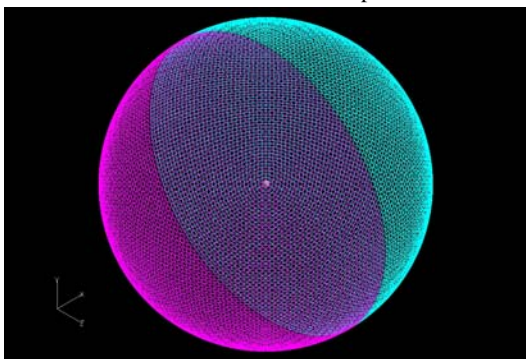
の一例を示す。球表面の境界層、圧力分布や第 2 不変量の分布などが捉えられていることがわかる。しかし、球表面の第二不変量の分布には先に示したブロック分割にそった物理量の変化が見られる。速度変動や渦放出周波数のデータから、メッシュのトポロジーの影響が解析に大きな影響を及ぼしている可能性は小さいと考えられるものの、メッシュのトポロジーの影響が皆無とは言えないため、これとは別に非構造格子による解析も行った。



(a) basic blocks



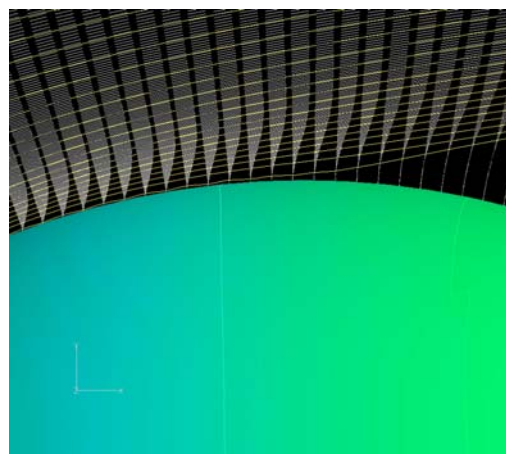
(b) near the surface of a sphere



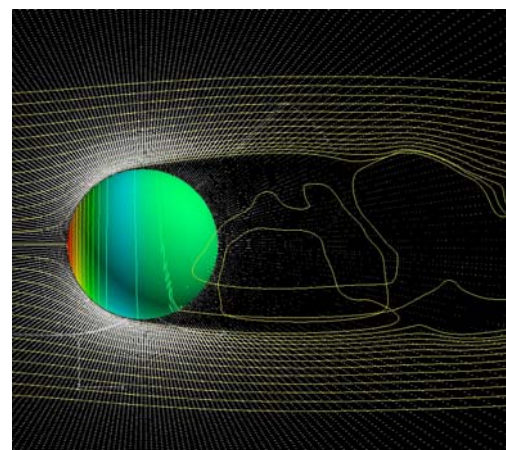
(c) Overview of simulation region (Pink: Inlet, Blue: Free outlet)

Fig. 2 Computational mesh for simulation of flow around a sphere (structured grid)

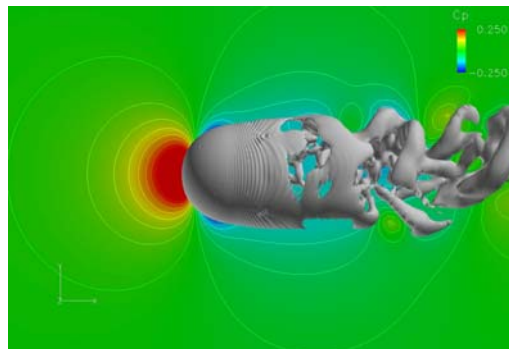
非構造格子を用いた解析では、図 4(a)に示した境界層厚さ内部に 20 層のプリズム格子を配置した。格子厚さに対する三角形要素の各辺のアスペクト比が 10 以下となるように球表面に格子を配置した。またプリズム格子の外側にはテトラメッシュを配置した。テトラメッシュのアスペクト比は 3 以下、メッシュの拡大率は 1.1 以下となるように設定した。解析領域は流れ方向に直径の 22 倍、鉛直方向及び水平方向に球の直径の 10 倍とし、球は入口から流れ方向に 7D の位置に設置した。図 4 に使用した非構造メッシュ (リファイナーをかける前のメッシュ) を示す。リファイナーをかけた後の非構造メッシュの節点数は約 300 万、要素数は 1500 万である。本報告では主に非構造解析の結果を用いて報告する。



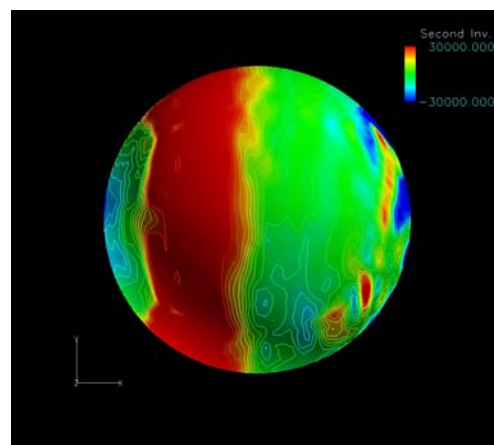
(a) Velocity vectors around the surface



(b) Surface pressure and stream lines

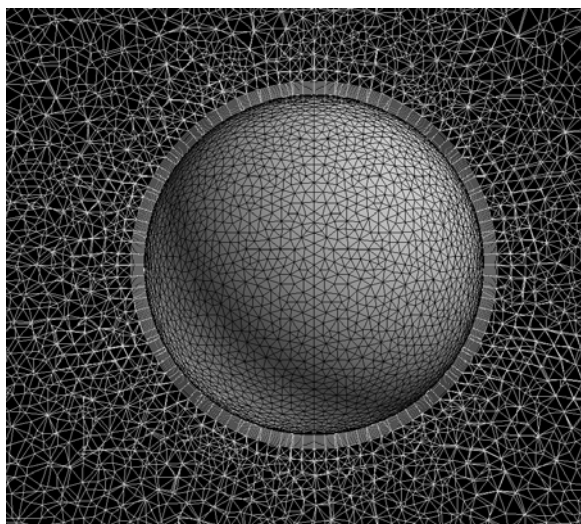


(c) Iso-surface of the second invariant around the sphere

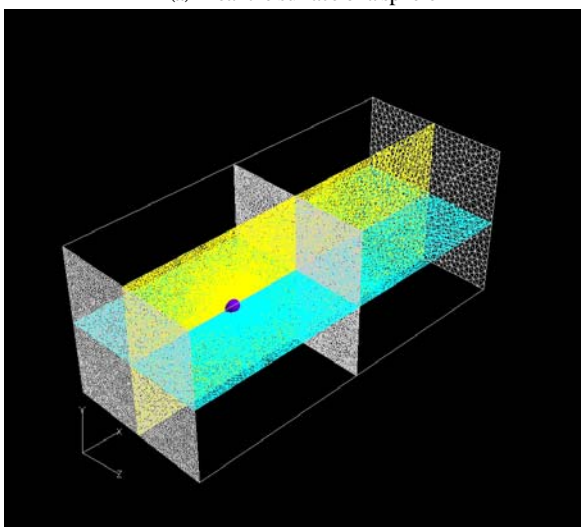


(d) Contour of second invariant on the surface of the sphere

Fig. 3 Simulation results of flow around a sphere (Structured grid)



(a) near the surface of a sphere



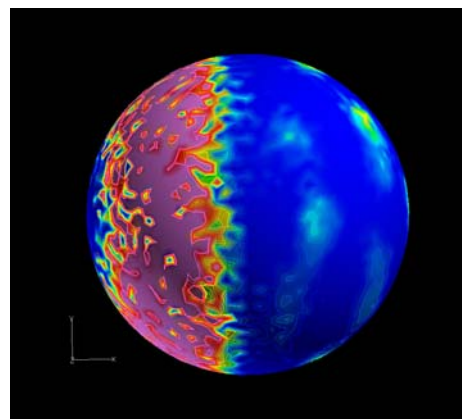
(b) Overview of simulation region (Pink: Inlet, Blue: Free outlet)

Fig. 4 Computational mesh for simulation of flow around a sphere (unstructured grid)

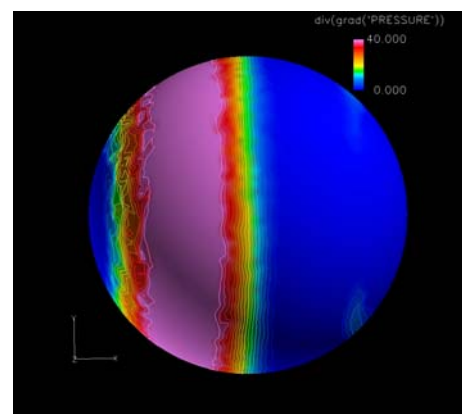
図 5 に球表面の第 2 不変量の分布を示す。テトラメッシュのみの場合は、メッシュ形状の影響が解析結果に現れていることがわかる。ただし、構造格子のようにメッシュ分割のトポロジーの影響というよりも個々のメッシュのばらつきの影響が大きい。表面にプリズムメッシュを用いた場合は、個々のメッシュのゆがみの影響や Grid のトポロジーの問題が抑制されていることがわかる。ただし、非構造メッシュの場合、要素数に対して節点数が少ないので、後流の渦構造を捉えるにはさらに大規模な解析が必要となる。

3. 解析結果

図 6 に球後流の流れ場の卓越周波数とレイノルズ数の関係を調べた実験結果を示す。球後流の全体的な構造に相当する Low Mode 渦の無次元周波数はレイノルズ数の広い範囲にわたり 0.15 程度でほぼ一定である。一方、Low Mode 内にあるより小さな渦構造はレイノルズ数により段階的に変化する。従来は、High mode はレイノルズ数の増加に伴い直線的に増加すると考えられていたが、High Mode 渦の周波数は階段状に変化することがわかる。これは蒔田ら⁽³⁾が示したように High Mode 渦の周波数が Low Mode 渦の周波数の整数倍になっており、Low Mode 渦が High Mode 渦が集まって形成されていることを示している。



(a) Tetra mesh



(b) Prism mesh + Tetra mesh

Fig. 5 Contour of the second invariant of the velocity gradient around a sphere

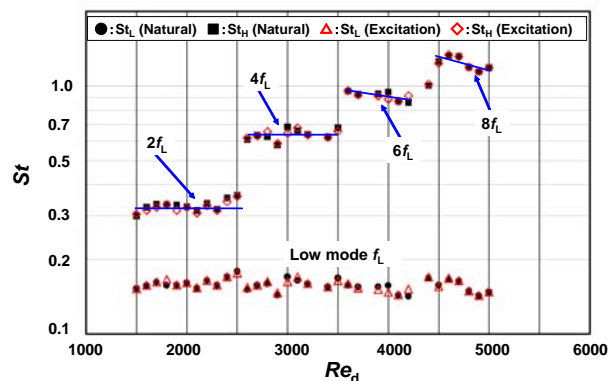


Fig. 6 Reynolds number dependence on shed vortex frequency and the relationship between low and high mode frequencies in the wake of a sphere

図 7 に球後流 ($x/D=3.5$)における速度変動スペクトルの解析結果を示す。 $Re = 2000$ 及び 3000 の場合の両者ともに無次元周波数 0.15 付近にピークが存在し、実験で得られた Low mode 渦の無次元周波数である 0.15 とほぼ一致することがわかる。

実験では High mode 渦と見られる渦放出周波数が $2f_L$ と $3f_L$ に観察されたが、解析結果では、 $2f_L$ と $3f_L$ にわずかにピークが見られるのみである。ヘキサメッシュを用いた解析では $2f_L$ から $4f_L$ にピークが見られたことから、この結果は非構造格子の解像度の問題によるものと考えられる。したがって、High mode をより詳しく調べるにはさらに細かいメッシュが必要と考えられる。

の場合、最初の三周期では螺旋構造渦が観察される、その後、渦構造は複雑になり明確な構造が見られなくなるが、6 周期目から 8 周期目にかけて交番振動が観察される。

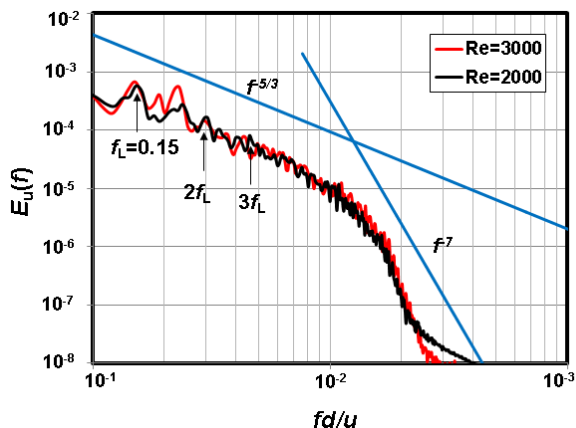


Fig. 7 Power spectra of velocity fluctuation behind a sphere

図 8 に球後流の速度分布の瞬時値を示す。実験では 12 本の I 型熱線に円形状に並べたアレイプローブを用いて、球後流の瞬時速度分布を求めた。横軸は時間に相当し、縦軸は位置座標に相当する。低速部（青い部分）が斜めになっているのは渦構造が螺旋状に回転しながら移動していることを示しており、低速部分が上限にある場合は渦が交番振動していることを示している。

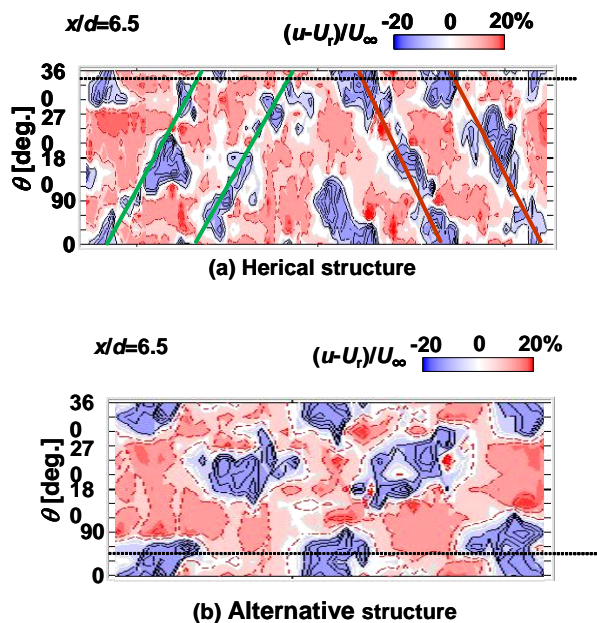


Fig. 8 Instantaneous velocity field in the wake of a sphere, measured by multi hot wires (Experiment, Re = 2000)

図 9 に球後流の計測断面 ($x/d=3.5$) を渦が通過する際の様子を示す。計測断面には流れ方向の速度分布を示す。球後流の大規模な渦構造が計測断面を通過する際に、低速部が観察されることがわかる。この図では計測面付近における大規模渦構造はひとつであり、この渦が螺旋状に回転しながら下流に移動するため、図 8 に示したような速度場の時空間分布図が得られる。

図 10 に、図 8 の数値解析結果と同様に球後流の瞬時速度場の時空間分布を示す。ただし、数値解析の場合、解析格子の粗さの問題から $x/d=6.5$ の位置では渦の減衰がやや大きいことから、 $x/d=3.5$ のデータを用いた。

Re = 2000 及び 3000 のどちらの場合にも螺旋渦構造、交番渦構造の両方が観察された。たとえば、Re=2000 の場合、最初の 2 周期は螺旋渦構造、その後、交番渦が 1 周期観察されるが、再び螺旋構造渦が観察された後に、交番型が 3 周期観察される。Re=3000

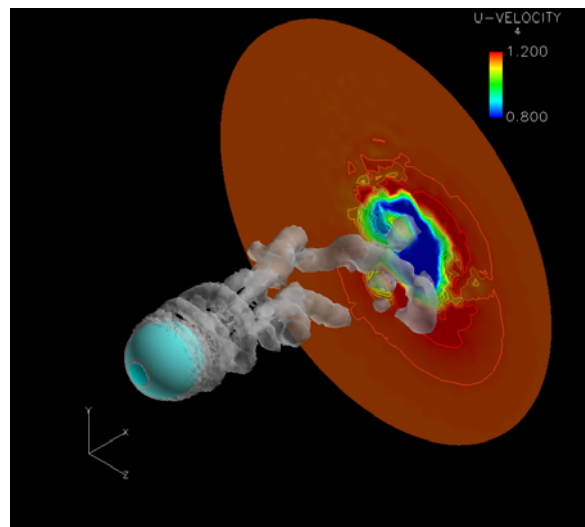
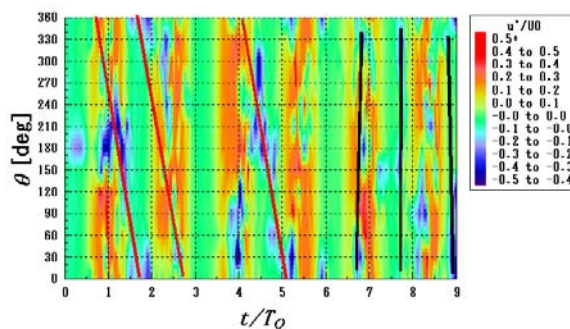
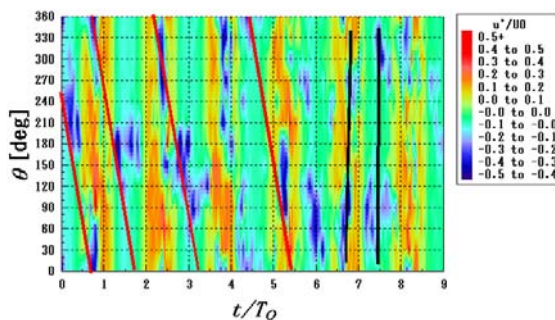


Fig. 9 Contour of instantaneous velocity (x-direction) and iso-surface of the second invariant of velocity gradient (Simulation, Re = 3000)

いずれのケースでもモードが切り替わる前の渦構造は螺旋型とも交番型にも相当しない不安定なモードが存在する。このモードの切り替わりが何故生じるのか、どのような条件で生じるのかははっきりとしないが、数値解析でもモードの変化を捉えることができた。解析を始めるにあたり最初の疑問はメッシュ依存性などから、このようなモードのスイッチングが起こらないため、どちらかのモードのみ存在するのではないかと考えられたが、解析結果からモードのスイッチングを再現できることが確認された。



(a) Re = 2000

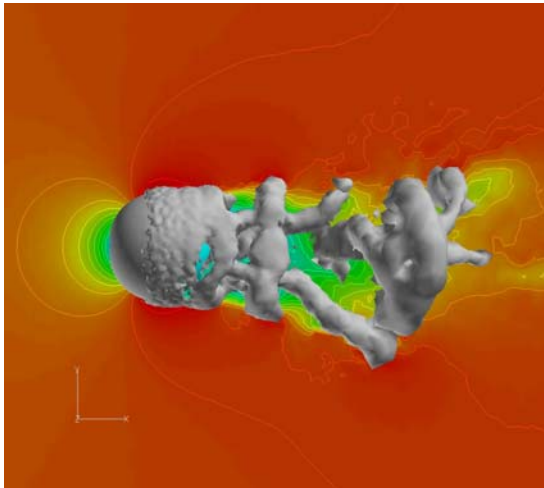


(b) Re = 3000

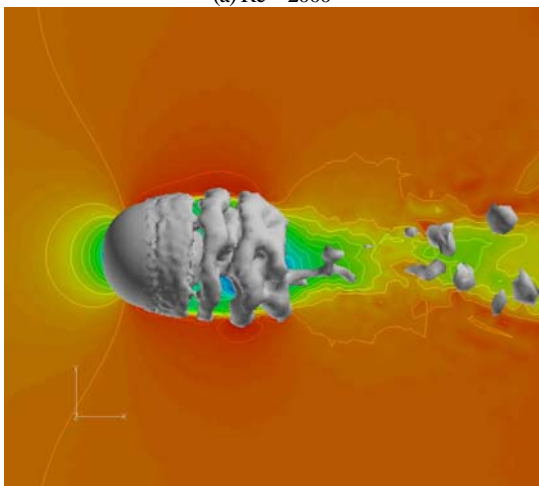
Fig. 10 Instantaneous velocity field in the wake of a sphere, measured by multi hot wires (Simulation)

実験では渦の構造を可視化することは難しいが、数値解析の場合、渦構造を可視化することが可能である。渦構造の可視化結果として速度勾配テンソルの第2不変量の等値面の分布を図11に示す。Re = 2000 の場合、下流に大きな渦が見られるが、Re = 3000 の場合は、球から放出された渦輪の形状を維持しており、球の後流 3d 付近以降は明確な渦構造が見られなかった。

ただし、渦構造は時間とともに変化しているため、一枚のスナップショットだけ判断することは難しくさらに多くのデータの取得が必要である。



(a) Re = 2000



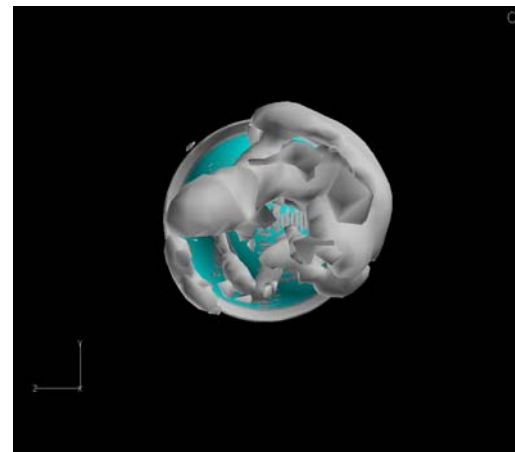
(b) Re = 3000

Fig. 11 Contour of the averaged velocity (x-direction) and iso-surfaces of the second invariant of the velocity gradient around a sphere

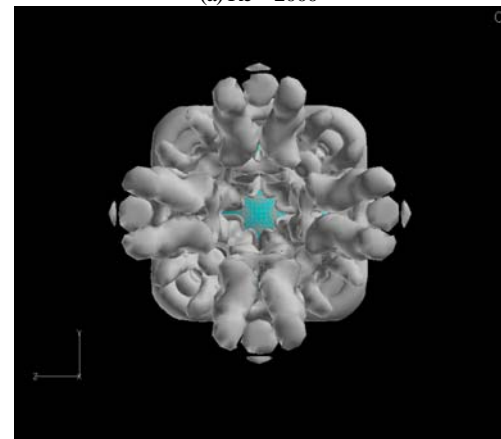
図 12 に示すように Re = 3000 の場合に、上下左右対称に規則正しい渦放出が観察されていたが、このような状態が定常的に続くというわけではなく、先に示したように螺旋状に回転するケースも見られた。したがって、図 10 の説明でも示したように、より詳しく調べるためには、実験に匹敵するような長時間の解析を行う必要がある。

Low mode 渦の無次元周波数が 0.15 であることから、渦の放出周期は無次元時間で 7 程度である。今回の解析は無次元時間で 140 の解析を行ったことから、渦の放出回数は 20 回程度である（予備計算では無次元時間 500 まで行い、渦の放出回数を 70 回程度まで調べたが、20 回と 70 回では大きな差はなかった）。数値解析としては長周期の解析であるが、実験では数百、数千のオーダーで渦が放出され、それを長時間観察して、渦構造の遷移や変化を見ている。たとえばスペクトル解析の平均回数などにも解析時間の影響があると考えられる。今回得られた解析結果だけでは、螺旋構

造渦から交番構造渦へ遷移やレイノルズ数の影響を明らかにすることはできないが、今後、解析規模をさらに拡大してこれらの現象について調べていきたい。



(a) Re = 2000



(b) Re = 3000

Fig. 12 Iso-surfaces of the second invariant of the velocity gradient around a sphere (Rear view)

4. まとめ

レイノルズ数 2000 及び 3000 の球後流の流れ場を数値解析により調べ、以下の知見を得た。

- (1) 球後流の渦構造が螺旋型になる場合と交番型になる場合があることを数値解析で再現できることを確認した。
- (2) Low mode の無次元周波数は 0.15 程度であり、実験値と一致する。High mode の無次元周波数は Low mode の整数倍であるが、実験ほどははっきりとした渦構造は観察されなかった。これは解析メッシュの粗さによる分解能の不足のためと予想される。
- (3) 構造格子メッシュ(六面体)では速度変動テンソルの第 2 不変量にノイズが乗ることがあり、この問題を避けるためにプリズムメッシュとテトラメッシュを使用した結果、グリッドの影響を最小限に抑えることができた。

参考文献

- (1) Möller, W., Experimentelle Untersuchung zur Hydrodynamik der Kugel, *Physikalische Zeitschrift*, 39, (1938) pp.57-81.
- (2) Taneda, S., Visual observations of the flow past a sphere at Reynolds number between 10^4 and 10^6 , *J. Fluid Mech.*, 85-1 (1978), pp.187-192.
- (3) 蒔田ら, 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, 日本機械学会流体工学部門講演論文集 (2006), p.1104.