

平板上の半球周りの流れの構造について Flow Structure around a Hemisphere on a Flat Plate

東京大学土木工学科	正 員	玉井 信行
東京大学土木工学科	正 員	浅枝 隆
東京大学 大学院	学生員	○田中 規夫

1. はじめに

河道内の構造物や河床波周りの流れ、山や建物周りの流れなどのような平板上の3次元的な形状をした物体周りの流れは、水理学、環境工学における多くの問題に関わっている。このような流れは、周囲の流れに強い速度勾配が存在するために物体周辺に強い二次流が発生することや、物体背後の剝離渦も複雑な形状をしていることなどにより極めて複雑な流れとなる。そこで、本研究では3次元の物体の代表として半球を選び、特に、半球背後の剝離渦と半球前面部に生じる馬蹄形渦に着目し、その渦構造を可視化を通して定性的に解明すること、および、剝離渦の放出周期性を定量的に評価することを試みた。

2. 実験装置および実験方法

実験には、全長 280cm、幅30cm、高さ30cm、水路勾配 1/600のポンプ環流型水路を使用した。導流部には、3次元ベルマウスおよび整流板を取りつけ、流れを整流した。半球は発泡スチロール製で、半径が2cm、3.5cmの2種類を使用し、整流板から80cmの位置の水路中央に接着した。渦の断面構造の可視化のためのトレーサーとしては、アルミ粉および塩化ビニール粉の2種類を使用した。また、3次元構造については、剝離域内にウォーターブルーを注入し、放出される渦を可視化した。このような方法により、主流と剝離域から放出された流れとを区別して観察した。渦の放出周期に関しては、可視化により渦が10個発生する時の秒数を5回計測しその平均値より求めた。また一方で、渦の生成部および放出部において、レーザードップラー流速計(LDA)により流速を計測し、サンプリング間隔10msで5000個のデータをサンプリングし、流速変動に関するスペクトル解析をMEMを用いて行ない、可視化により得られたものと比較した。なお、生成部とは剝離点付近を、放出部とは自由流線の再付着点付近で再付着点より下流をさすものとする。

3. 半球背後の剝離渦の構造について

Reynolds数 Re は、式(1)のように定義する。

$$Re = UR/\nu \dots (1)$$

ここに、 U は断面平均流速、 R は半径、 ν は水の動粘性係数を示す。

Re が200 から12000 で実験を行なった結果、放出渦の構造は以下に示す図-1,2のようなものであることが明らかになった。

図-1は $Re < 2000$ の時のものである。生成される渦は、半球を取り囲む様にして半ドーナツ形状をしており、それが流下方向に対してほぼ1列となって放出される。放出渦の間隔は、 Re が大きくなるに従って狭くなっていく。

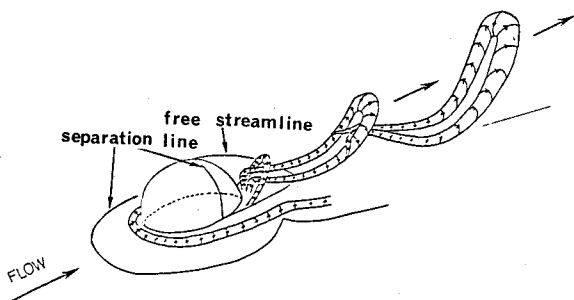


図-1: 剝離渦のモデル(1)

剝離域から放出される渦は馬蹄型に引き伸ばされながら、流されていく。しかも馬蹄型に引き伸ばされた渦管の足の部分は、次の渦の頭部に内側から巻きついている。渦のフロントの部分は、斜め上方に引き伸ばされるようにして、流れていく。写真-1は、 $Re=900$ の時に、半球後方の剝離渦を可視化したもので、半ドーナツ状の渦輪が、明瞭にとらえられている。渦の足は、→の部分で次の渦に巻きついている。

図-2は $Re > 2000$ の時のものである。生成される渦の間隔が極めて狭くなり、剝離域の中に渦が2、3個作られるようになると、放出部で次の渦が前の渦に上から巻きつくように合体して、大きな渦となって、剝離域から放出される。ここで図-2にBと示したのが、合体した渦である。合体した大きな渦の上流には、それに巻きつくようにして放出される渦C（これは、放出部で合体していない渦）があり、それらによって一つの塊としての渦Dが構成される。渦Dは、平面的には2列をなし、左右交互に放出される。これは、円柱背後のKarman渦に類似している。渦Dを構成する渦の数は2個から4個である。写真-2,3に合体する時の連続写真を、写真-4に合体する時の半球中央断面の写真を示す。（写真-2,3では、渦1、渦2が合体し渦3となっている。写真-4では、渦A、渦Bが、合体する直前の状態である。）

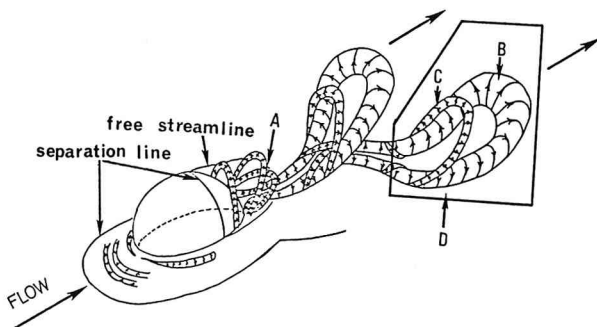


図-2: 剝離渦のモデル(2)

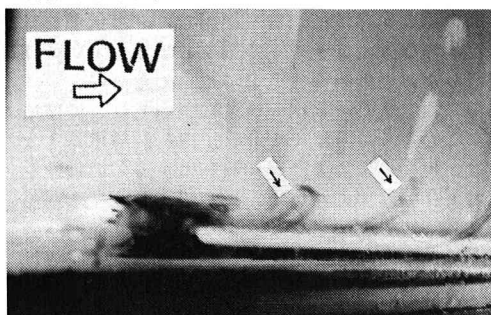


写真-1: 剝離渦 ($Re=900$)

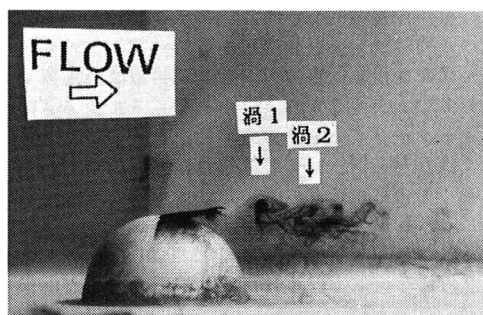


写真-2: 合体前 ($Re=2600$)

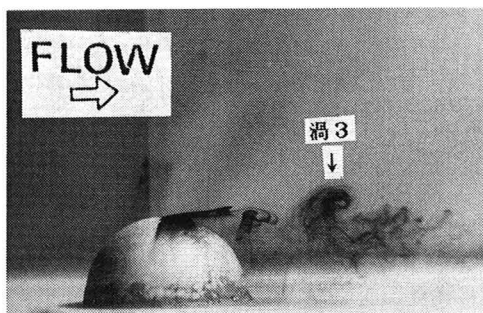


写真-3: 合体後 ($Re=2600$)

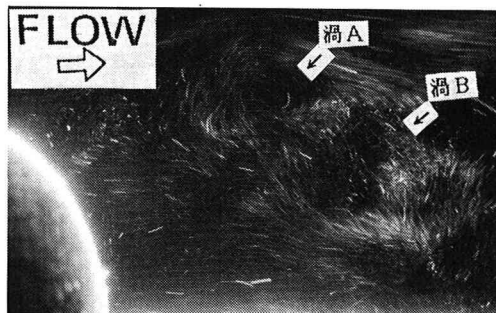


写真-4: 合体の瞬間 ($Re=5000$)

4. 剝離渦の放出周波数の変化について

図-3は、Strouhal数 St の Re による変化を示したものである。ここで、 St を、式(2)のように、定義する。

$$St = fR/U \dots (2)$$

ここに、 f は渦放出周波数、 U は断面平均流速、 R は半球の半径を示す。

この図によると、 Re が2000くらいまでは生成される渦の St および剝離域から放出される渦の St は1対1で、かつ St は Re が大きくなるにつれて上昇する。これは可視化により観察された渦の間隔が狭まるという事実により決まるものである。また、 Re が2000を越えた付近から生成される渦の St (以後 St_g とする)は Re が大きくなるにつれて上昇するが、放出される渦の St (St_s とする)は減少する。生成される渦と放出される渦の St の比 St_g/St_s は、2から4程度の値となる。これは、 Re が2000付近で渦の合体が起こり、2、4個の渦で一つの塊としての渦を構成するためである。

次にスペクトル解析の結果を示す。図-4は、 $Re=900$ の時のスペクトル解析の例である。この図において、ピークをとるときの周波数から、 St を計算すると0.41となり、可視化観察と一致する。また、図-5は、 $Re=5425$ の時、すなわち渦の合体が起こる領域におけるスペクトル解析の例である。この図で、A線は渦の合体が起こる前の地点におけるスペクトル、B線は渦の合体がおこった後の地点におけるスペクトルを表わす。この図より St を求めると、生成部では、 $St_g=0.61$ 、放出部では $St_s=0.29$ となる。また、生成部と放出部の St の比 $St_g/St_s=2.1$ となり可視化観察とほぼ一致する。

5. 半球前面部の渦構造について

接近流が、壁面近傍において強い速度勾配を持っているため、半球周辺に強い二次流が生じ半球前面部にも逆流域が生じる。この逆流域の中には、複数列の渦が存在する(写真-5,6 参照)。さらに、これらの渦は図-1,2に示したように、半球を取りかこんで下流に放物線状に引き伸ばされている。

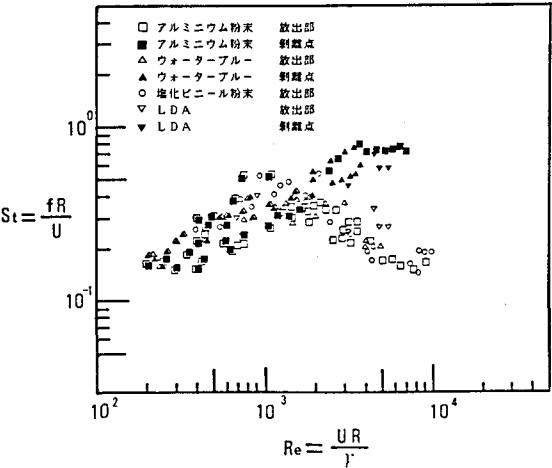


図-3: Re と St の関係

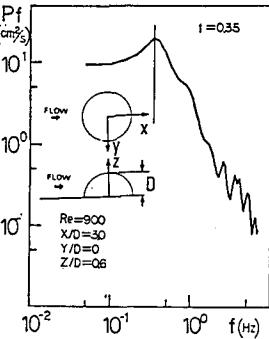


図-4: スペクトル(1)

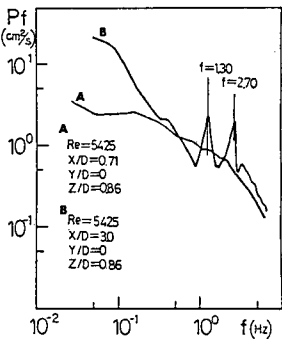


図-5: スペクトル(2)

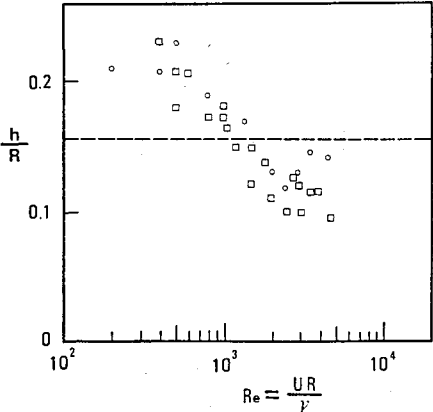


図-6: Re による渦の高さの変化

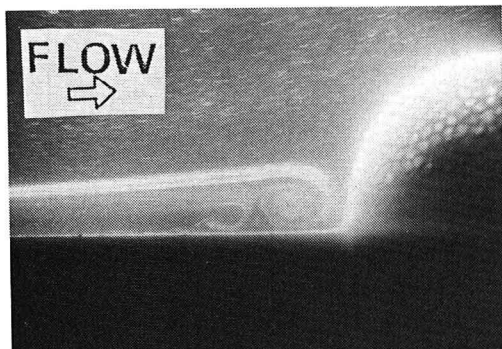


写真-5: 前面馬蹄型渦(1) ($Re=700$)

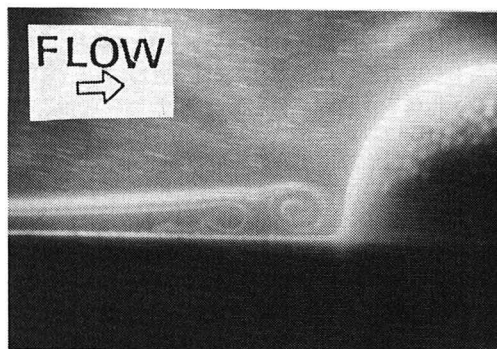


写真-6: 前面馬蹄型渦(2) ($Re=1400$)

図-6～図-9において および は、半径がそれぞれ、2.0cm、3.5cm の半球を示すこととする。

図-6、7 に、半球に最も近い渦の中心高さ h 、および、半球前面部の剝離領域の渦み点の高さ l を、それぞれ R で無次元化し、 Re に対して示す。Fraenkel²⁾が、平板上の半円柱について解析的に求めたものを参考として点線で示す。この図によると無次元化した渦の高さ h/R 、および、渦み点高さ l/R は、 Re が大きくなるにつれて減少する。これは、半円柱の場合と異なる傾向を示すが、大きさはほぼ同じ値をとることがわかる。

図-8は、半球前面部の渦の数の Re による変化を示す。点線は、渦の数が変動していることを表す。この図によるとある Re までは、2種類の半球とも、渦の数は Re が上昇するにつれて増加することがわかる。しかしながら、渦の数がジャンプする時の遷移する Re は、 R の大きい半球のほうが低い。これは、図-7に示したように半径で無次元化された渦み点高さは Re により漸減する関数であるために、実際の剝離域の厚さは、それぞれの半径によって変化すること、従って、渦み点高さにおける流速はそれぞれの半球の場合によって違うことが理由と考えられる。そこで、実際の剝離域までの高さ l 、および、剝離域上端の渦み点高さでの流速 $U(l)$ を用いた有効レイノルズ数

$$Re_{eff} = U(l)l/\nu \dots \dots (3)$$

で整理したものを図-9に示す。この図より、半球前面部に生じる馬蹄型渦の数は有効レイノルズ数 Re_{eff} によって極めてよく整理できることが

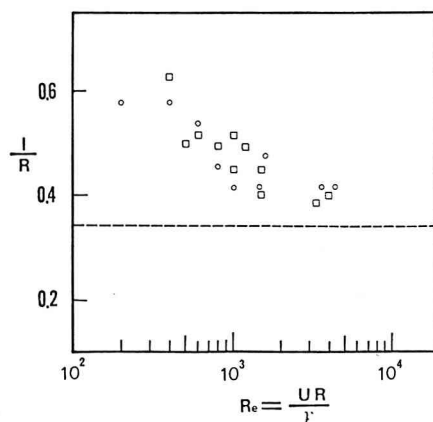


図-7: Re による渦み点高さの変化

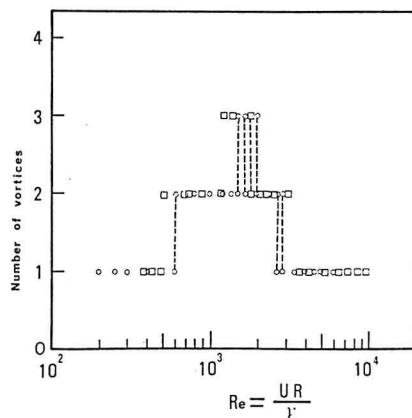


図-8: Re による渦の数の変化

わかる。

また、図-8において、 Re がある値を超えると渦の数が減少するのは、以下のような理由と考えられる。渦の数は、ある Re までは単調に増加するが、この範囲の Re においては、渦の位置が比較的安定している。しかし、その限界値を超えると、各々の渦は乱れにより変動するようになる。渦の変動する強さは Re が大きくなるにつれて強くなるのに対し、渦の間隔は渦の数が増加するにつれて狭くなる。そのため、隣接する渦どうしが合体し、渦の数が減少するものと考えられる。

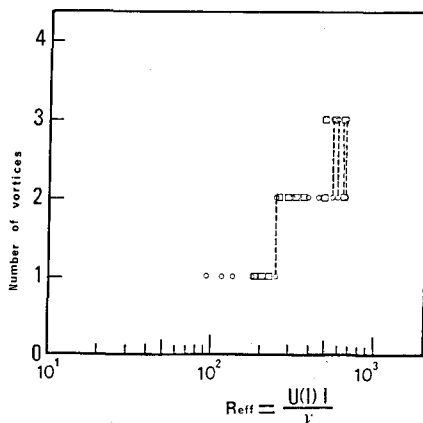


図-9：有効 Re による渦の数の変化

6. 流線の変化について

流れの中に存在する特異点には、図-10に示すように、node点(n)、saddle点(s)、half-node点(n')、half-saddle点(s')があり、これらの間には、式(4)に示す関係のあることが知られている³⁾。

$$(\sum n + \sum n'/2) - (\sum s + \sum s'/2) = 0 \quad (4)$$

ここに、 $\sum n, \sum n', \sum s, \sum s'$ は、それぞれnode点、half-node点、saddle点、half-saddle点の個数を示す。図-11～図-15は、 Re が変化した時の半球前面部（写真-5,6参照）および後方における流線の変化を可視化した写真をもとに描いたものであるが、式(4)の関係性をすべて満たしている。

図-11は、 $Re < 500$ の時のもので、半球前面部には、馬蹄型渦によるnodeは1つ存在する。

図-12は、 $500 < Re < 1000$ の時のもので、半球前面部には、馬蹄型渦によるnodeが2つ存在する。馬蹄型渦によるnodeの間には逆向きのnodeが1つ存在する。

図-13は、 $1000 < Re < 2000$ の時のもので、半球前面部には馬蹄型渦によるnodeが3つ存在している。

図-14は、 $2000 < Re < 4000$ の時のものである。 Re が2000を越えると、半球前方のnode点の位置の変動は激しくなる。また、半球後方では、剝離域内に剝離渦によるnodeが3つ以上存在し、流線は非常に複雑なものとなる。合体の前後では図-10の流線パターンから図-9の流線パターンへと変化する。

図-15は、 $Re > 4000$ の時のものである。node点は、次々に半球におしよせては、流されていっている。

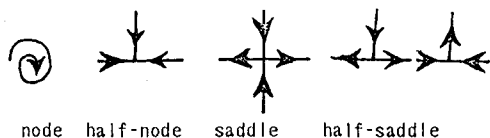


図-10：特異点

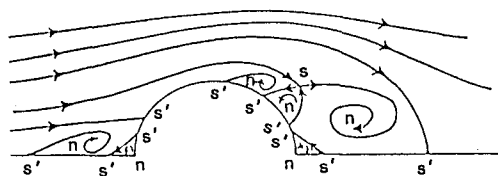


図-11：流線 (1) ($Re < 500$)

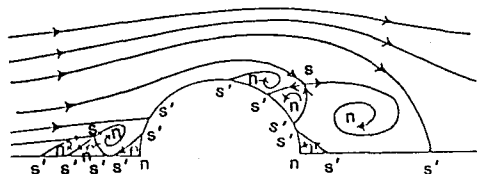


図-12：流線 (2) ($500 < Re < 1000$)

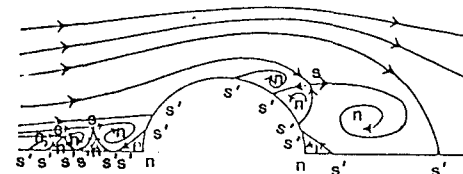


図-13：流線 (3) ($1000 < Re < 2000$)

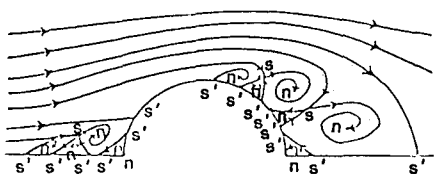


図-14：流線 (4) ($2000 < Re < 4000$)

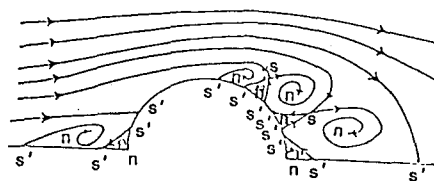


図-15：流線 (5) ($4000 < Re$)

7. おわりに

半球の周りの流れを、半球背後の剝離渦と半球前面部の馬蹄型渦に着目して、調べた結果、半球後方で生成される渦については、剝離域で生成される渦は、半ドーナツ形状であること、および、剝離域から放出される渦の構造は、 $Re=2000$ までは、剝離域で生成されたものがそのまま放出されるが、 2000 を超えると数個の渦が剝離域で合体して放出されることが明らかになった。渦が合体することは、生成される渦の St が、放出される渦の St の $2 \sim 4$ 倍に達することによって確認された。また、半球前面に生じる馬蹄型渦については、ある Re までは、渦の数が増加するが、限界値を超えると減少することが、明らかになった。実験を行った範囲では、その渦の数、および、形態により5段階に分類できることが判明した。

引用文献

- 1) S.Okamoto: Turbulent Shear Flow Behind Hemisphere-Cylinder Placed on Ground Plane, Turbulent Shear Flows 3. (Springer-Verlag, New York, 1980) 171-185.
- 2) L.E. Fraenkel: On Corner Eddies in Plane Inviscid Shear Flow, J. Fluid Mech. 11 (1961) 400-406.
- 3) J.C.R. Hunt, C.J. Abell, J.A. Peterka and H. Woo: Kinematical studies of the flows around free or surface-mounted obstacles; applying topology to flow visualization, J. Fluid Mech. 86 (1978) 179-200.