

成層流体中の球の伴流

本地, 弘之
九州大学応用力学研究所 : 教授

<https://doi.org/10.15017/4743809>

出版情報 : 應用力學研究所所報. 65, pp.95-102, 1987-12. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



成層流体中の球の伴流*

本地 弘之**

概 要

リニアに密度成層した静止流体の中を一定速度で動く球の近くの伴流を電解沈殿法による流れの可視化の方法で調べた。実験範囲は $200 < R$ (レイノルズ数) < 600 , $0 < k$ (無次元浮力振動数) < 5 であった。実験の結果、球の伴流の R および k に対する依存性は水平円柱の伴流のものと基本的に異なること、また、球から離れて定在する渦バブル等多くの特異なパターンをもった伴流が形成されることが分った。

Key words: Stratified flow, Sphere wakes, Flow visualization

1. はじめに

物体のまわりの成層流は、流体の鉛直流れが制約される中で内部波が形成されるので、流体力学的に興味ある系である。また、物体のまわりの成層流は地球流体力学の研究対象でもある。特に、孤立した山や海山のまわりの流れはよく調べられている¹⁾²⁾。島の後に形成された雲のカルマン渦列の写真はよくみかけるものの一つである。孤立した山や海山を室内シミュレーション実験向きにモデル化したものは、平らな床の上に円錐や半球を置いた模型である。実際、このような模型のまわりの流れについては多くの研究が行われてきており、最近ではこのような模型まわりの回転成層流に関しても実験が行われている³⁾。床上物体の背後の流れは極めて複雑である。それは物体から剥離した流れが床上の境界層と干渉し、複雑な構造をもった3次元流れが作られるからである。

本研究では、上述の床上物体模型をさらに単純化したものとして一個の球をとりあげ、そのまわりの成層流の構造を調べる。これはもちろん考える最も単純な模型である。しかしながら、球のまわりの成層流はふしぎとこれまでにあまり調べられた形跡がない。

球の伴流は、流体が成層しているときには、円柱の伴流(カルマン渦列状の伴流)に類似することがあることは知られている⁴⁾⁵⁾。流体の成層度が強いときにはいつもこのような渦列状伴流が形成される。一般には伴流の様子はレイノルズ数と成層度に応じて多様な形をとる。本研究の主な目的は、球の伴流の種々のタイプを流れの可視化の手法で観察した結果を示すことである。水平円柱をすぎる流れとの比

* 一部分は物理学会第42回年会(1987, 3, 28, 名古屋工業大学)において「球をすぎる成層流」として発表

** 九州大学教授, 応用力学研究所海洋境界力学部門

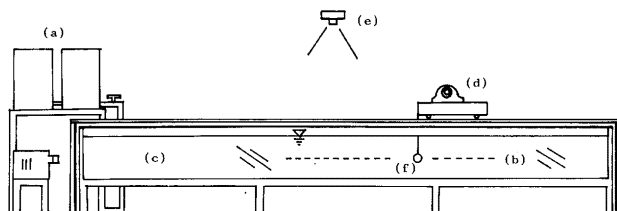


図1 成層流水槽：(a) 塩水・淡水貯水槽，(b) 照明水平面，(c) 水槽，(d) 曳航台車，(e) カメラ，(f) 球

較も行⁶⁾⁷⁾。

2. 実験の方法

流れの観察には図1に示す実験水槽を用いた。水槽の長さは3 m，幅は30 cm，深さは25 cmである。リニアな成層流体は，水槽の端にある二つの貯水槽内の食塩水と水を順次混合しながら，水槽の底から1～2時間かけてゆっくりと水槽内に流入させることによって作った。所定の水深20 cmまでの流入を終った後，水が落ちつくまで放置した。成層状態を示す塩分分布の一例を図2に示す。塩分分布はほとんど直線的であることが分かる。その後，球を一定速度で水槽の一端から他端へ曳航し，その間に流れの写真撮影を行った。大部分は，球の中心を通る水平断面内の流れを観察した。この場合，水槽の横または一端から水平なスリット光でその断面を照明し，水槽に対して静止した35ミリ・カメラで水槽の上部からその照明断面を見おろして撮影した。

流れの可視化には電解沈殿法を用いた。そのために，しんちゅう製の球はその全面にハンダのうすいコーティングを施しておいた。球と食塩水中の陰極の間に数VのDC電圧を印加するとき溶出する白いスモークは流れ模様を鮮明に可視化した。

本実験では主としてスモークは球の全面から一様に出るようにした。このようにしても，鉛直断面内の流れの詳細な観察は困難であった。電解沈殿法によるスモークは水よりも少し重い。流体が成層しているときにはスモーク粒子に働く浮力は高さで変化する。さらに，スモークの出方も深い方ほど効率が良い。リー波を除いては流れ模様の鉛直方向での変化はスケールが小さく，鮮明な可視化はできなかった。

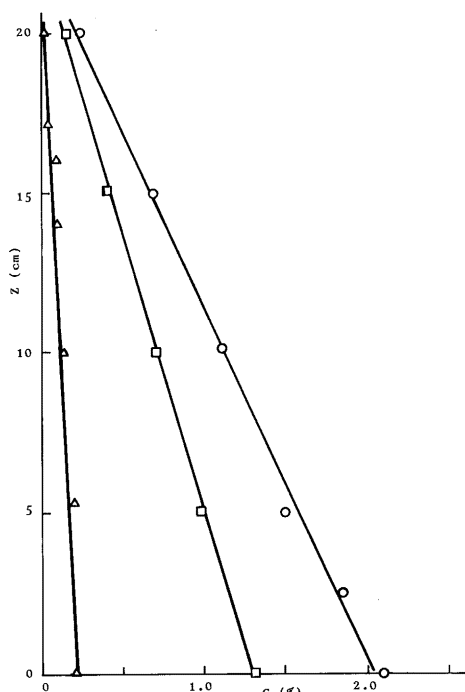


図2 塩分濃度 (C) プロファイルの実測例：Z は水槽底面からの高さ

た。リー波の可視化には後に一例を示すようにレーキからスモークを出す方法を用いた。

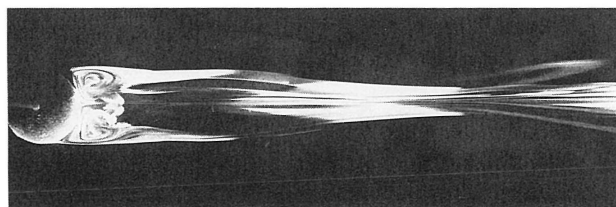
3. 実験結果

球をすぎる成層流はレイノルズ数 $R(=UD/\nu)$ と無次元浮力振動数 $k(=ND/U)$ で決まる。ここで、 U は球の速さ、 D はその直径、 N は浮力振動数 ($N^2 = -g\Delta\rho/\rho_0H$; g は重力加速度、 ρ は食塩水の密度、 ρ_0 は表面水の密度、 H は水深 20.0 cm)、 ν は流体の動粘性係数である。

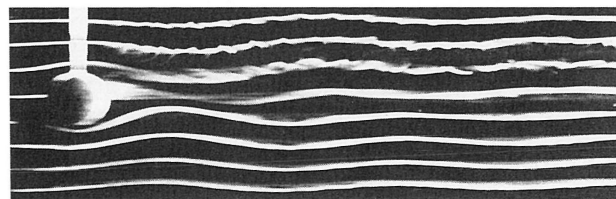
図 3 は、同じ R と k の値における流れの (a) 水平および (b) 鉛直断面内の流れ模様を示す。ただし、(b) では上に記した通りレーキからスモークを出している。水平面のパターン (a) では、リー波によって縦方向にくびれる部分のスモークが途切れるところが周期的に現われることが分かる。 R の値は実験範囲の中では比較的高いのであるが、側面の流れのパターン (b) にはリー波以外の構造はほとんど何もみられない。中心線より上の筋が乱れているのは球の支柱が流れを乱しているからである。

以下に示す流れ模様はすべて球の赤道を通る水平断面内の流れである。図 4 は $k \approx 0.86$ において R を変化させたときの流れを示す。球の直後にはいずれの場合にも双子渦が付着している。(a) の流れは、 $R < 40$ における円柱をすぎる一様流体の流れと類似している。このことは、この流れは 2 次元であることを意味している。すなわち、流体は成層に抗して上下に動いて球を乗り越えることができず左右に分かれて流れるだけであるから、どの水平断面でみてもその断面の局所的な直径をもった円柱の流れと類似したものとなる。

しかし、 R が大きくなるにつれてまず遠方下流の流れ模様が変化する。図 4 (a) では一本の白い筋であったものが、(b) では左右 (写真では上下) に分かれて「ツバメの尾」を形成する。双子渦の流れ方向の長さは少し短くなり、球の両側から剝離した分岐流線が交わるべき後方岐点を同定できなくなる。



(a) 水平面



(b) 鉛直面

図 3 水平面および鉛直断面内の球のまわりの流れ: $R=586$, $k=1.22$

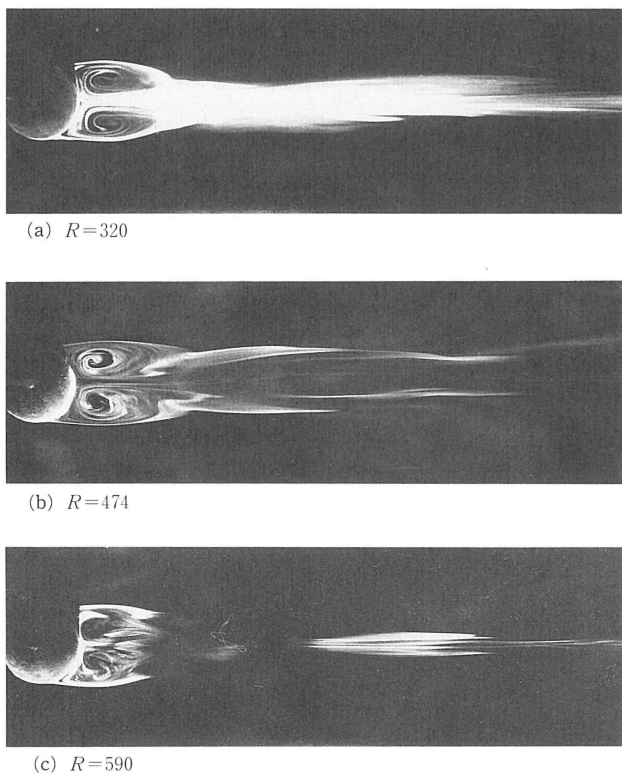
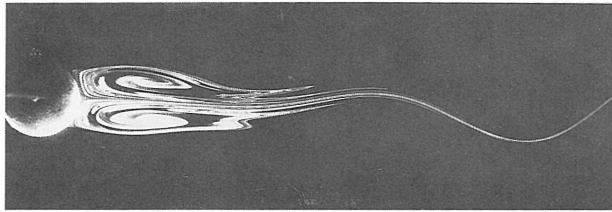
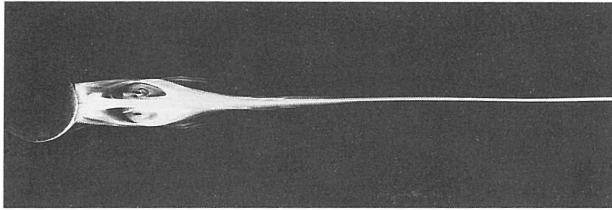
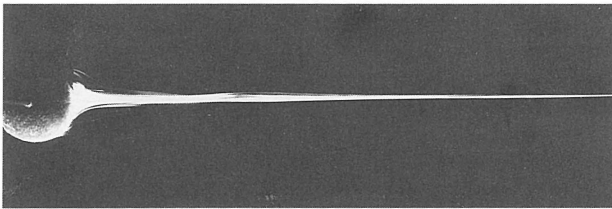
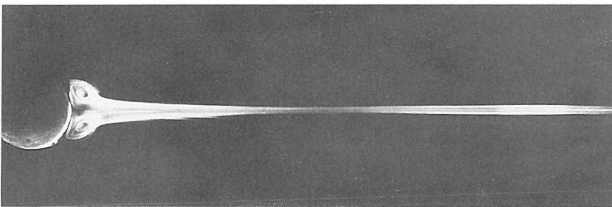


図4 $k=0.86$ における球の伴流の R による変化

さらに R が大きくなるとツバメの尾は合体して再び一本の白い筋となるが、1D~3D の間のスモークは見えなくなる。これはリー波の形成による。双子渦の長さはさらに短くなり、後方岐点も消失して双子渦の後は強引に引きちぎられたようになる。 k を固定した場合、リー波が形成されるためには R が大きい必要がある。 R 、つまり U が大きくないと流体は球を乗り越えて流れないので、流れは2次元になるからである。

次に、 $R=200$ を固定して k を変えたときの流れの変化を図5に示す。強成層 $k=3.56$ の(a)では、流れは2次元となり、球直後には双子渦が付着している。遠方下流では一本の筋となった伴流は左右にゆれている。これはさらに下流ではカルマン渦列状の流れ模様を呈する。 k が少し減少した(b)では下流伴流のゆれは止まるが、双子渦が下流でふくらむ形をとる。さらに k が減少した(c)では双子渦はほとんど消失し、伴流は一本の白い線となっている。 $k=1.34$ の(d)になると球直後に再び双子渦が形成され、後方伴流の筋はリー波の形成が顕著になるため3.2D付近で途切れてみる。このように R を固定したときリー波が形成されるためには成層度が緩和される必要がある。その理由は、流体が球を乗り越えて3次元に流れることが可能になる必要があるからである。

前の図5の場合よりも少し大きい値 $R=362$ を固定して、 k を変化させたときの流れの変化を図6に

(a) $k=3.56$ (b) $k=2.61$ (c) $k=1.96$ (d) $k=1.34$ 図5 $R \approx 200$ における球の伴流の k による変化

示す。強成層 (a) では円柱から下流側に少し離れたところに双子渦 (実際はバブルが上下につぶれたもの) が形成される。 k が少し減少すると, (b) に示すようにこのような双子渦は消失し, 伴流は途中にくびれをもった一本の白い筋となる。さらに k が減少すると, (c) に示すようにこのくびれの部分からスモークが消え, 円柱に付着した双子渦がめだつようになる。

流れ模様を $k-R$ 面上で粗く分類して示したものが図7である。強成層が k 大, 弱成層が k 小, 大流速が大 R , 小流速が小 R に対応する。非成層一様流体 ($k=0$) の場合の球の伴流は $R=130$ まで層流渦バブルが保たれ, それ以上の R ではバブルがゆれ始めてやがて崩れる⁸⁾。成層流体の場合, k が非常に

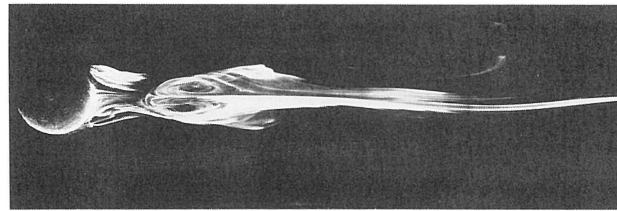
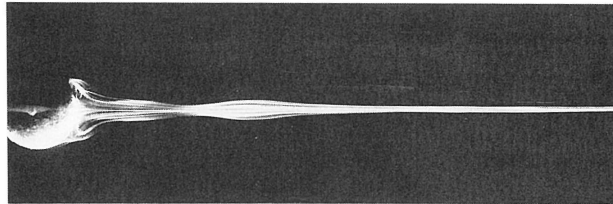
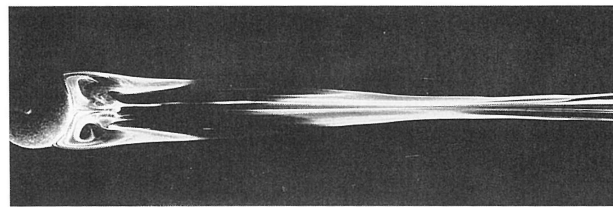
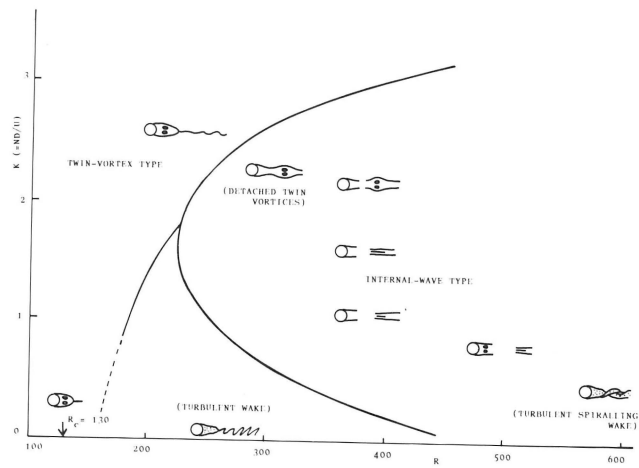
(a) $k=2.18$ (b) $k=1.97$ (c) $k=1.09$ 図6 $R=362$ における球の伴流の k による変化

図7 球の成層伴流の分類

大きいとき R の大小にかかわらず流れは 2 次元的となり、円柱の伴流に類似したカルマン渦列状の流れ模様が形成される。

$R \leq 210$ のとき、 k が次第に小さくなると球の流れ模様は渦列型から双子渦型に移行する。 $k=1.6$ 付近で双子渦は消失するが、それより k が小さくなると再び形成されるようになる。 $R \geq 210$ のとき、 $k=1.6$ 付近を中心とする $R \geq 95k^2 - 305k + 460$ の範囲で内部波型の伴流が形成される。この型の伴流はリー波の影響を受けたものであり、下流に引いた筋が途中で途切れる特徴がある。このような伴流では円柱直後に双子渦を伴う。 $R=300$ 、 $k=2.5$ 付近では円柱から下流側に少し離れたところに孤立した双子渦が形成されることは先にのべた通りである。 $R \sim 600$ 程度になるとスパイラル状の尾をもった乱流伴流が形成される。以上が、今回実験した R と k の範囲における球の成層伴流のおおまかな分類と挙動である。

4. お わ り に

ここで、球の成層伴流と水平円柱のそれとの定性的な比較を行っておく。水平円柱は水槽の全幅にわたって存在するわけで、流体は成層度の強弱、流速の大小にかかわらず必ず円柱を乗り越えて下流に流れなければならない。しかし、球の成層流では、流体は成層度の強弱、球の速さに応じて球の側面を流れる度合と、球を上下に乗り越えてリー波を作りながら流れる度合とが異なってくるので流れはより複雑になる。

リー波が形成されず流れが 2 次元的になる状況では、流れ模様は円柱のそれと類似する。ただ、流れの R 依存性において、円柱では R が小さいほどリー波の影響が顕著であるのに対して、球では R が小さすぎると流れは球を乗り越えられずリー波が形成されないもので、リー波に関する限り流れの R 依存性は円柱と球では逆になっている点異なる。

なお、本論文の内容と関連のある流れ模様の写真が参考文献 (9) に掲載されている（ここでは k の代りにフルード数 $F=1/k$ の値が与えられている）。本論文で扱った球の伴流をさらに成層回転流体系で調べてみることは、地球流体力学の立場から興味ある問題となる。

この実験を行うにあたっては文部省科学研究費の援助を受けた。

参 考 文 献

- 1) Pattiaratchi, C., James, A., and Collins, M.: Island wakes and headland eddies: A comparison between remotely sensed data and laboratory experiments, *J. Geophys. Res.* **92**, C1 (1986) 783-794.
- 2) Falconer, R. A. and Mardapitta-Hadjipandeli, L.: Bathymetric and shear stress effects on an island's wake: A computational model study, *Coastal Eng.* **11** (1987) 57-86.
- 3) Boyer, D. L., Davies, P. A., Holland, W. R., Biolley, F., and Honji, H.: Stratified rotating flow over and around isolated three-dimensional topography, *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A* **322** (1987) 213-241.
- 4) Berger, E. and Wille, R.: Periodic flow phenomena, *Annual Rev. Fluid Mech.* **4** (1972) 313-340.

- 5) Tritton, D. J.: *Physical Fluid Dynamics*, Van Nostrand Reinhold Co., Wokingham, 1977, Chap. 16.
- 6) Honji, H. and Kamachi, M.: Wakes of a circular cylinder in stratified fluids, Rep. Res. Inst. Appl. Mech., Kyushu University **31**, 98 (1984) 89-95.
- 7) 本地弘之: 連続成層流体中の渦列, 応用力学研究所報 **60** (1984) 393-401.
- 8) Taneda, S.: Studies on wake vortices (III)-Experimental investigation on the wake behind a sphere at low Reynolds numbers, Rep. Res. Inst. Appl. Mech., Kyushu University **4**, 16 (1956) 99-105.
- 9) Honji, H.: Near wakes of a sphere in a stratified fluid, Fluid Dynamic Res. **2** (1987) 75-76.
(昭和 62 年 5 月 27 日 受理)