

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2015

課題番号：24656124

研究課題名(和文) 密度成層流体における鉛直流れとラグランジュ的鉛直拡散の解明

研究課題名(英文) Investigation of the vertical flow and vertical Lagrangian dispersion in a stratified fluid

研究代表者

花崎 秀史 (HANAZAKI, HIDESHI)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60189579

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：成層流体中を鉛直移動する球まわりの流れ場について、塩分成層流体を用いた実験、及び、数値シミュレーションを行なった。実験においては、レーザーを用いて微小な粒子の位置を測定することにより流速を計測する「粒子画像計測法」、及び、蛍光染料にレーザーを照射して蛍光強度の分布から染料の濃度分布を計測する「レーザー誘起蛍光法」を用いて塩分濃度分布の測定を行った。その結果、物体による鉛直方向への流体の引き込みと鉛直方向のジェットの生成が、球面上で塩分濃度が大きく変化する塩分境界層に支配されていることがわかった。

研究成果の概要(英文)：Experiments and numerical simulations have been performed on the flow around a sphere moving vertically in a salt-stratified fluid. In the experiments, PIV (particle image velocimetry) and LIF (laser induced fluorescence) are used to measure the fluid velocity and the concentration of salt. The results show that the vertical dragging of fluid by the sphere and the resultant generation of a vertical jet are governed by the boundary layer of salt concentration on the sphere surface.

研究分野：環境流体力学

キーワード：成層流体

### 1. 研究開始当初の背景

成層流体の研究は従来、水平流を中心に行われ、「鉛直流れ、あるいは、物体や粒子の鉛直移動」についての研究は殆ど行われてこなかった。これは、一つには成層流体が水平に層を成した流体であるため、言わば「水平に流れるのが当たり前」であるためである。例えば、大気や海洋の非常に大きいスケールの流れにおいても、(水平速度)  $\gg$  (鉛直速度) であり(例えばジェット気流や偏西風は水平流)、気象・海洋学においても水平流のみが研究されてきた。

これに対し、筆者らは最近、成層流体中の球の鉛直移動を水槽実験および数値計算により解析し、成層流体中を鉛直移動する物体の後流には、物体の移動速度の十倍にも達する速度を持った鉛直ジェットが生成され、流体の抵抗係数を数十倍も巨大化させることを発見した。鉛直ジェットは、弱い成層下でも発生するため、プランクトンのような小さい物体の運動にも大きな影響を与えると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究は、成層流体中の物体の鉛直移動に伴うジェットの生成と、微粒子の鉛直拡散を、水槽実験と数値計算の併用により解明する。

(1) 水槽実験においては、LIF (レーザー誘起蛍光法) 及び PIV (粒子画像速度計測) により、物体周りの流れ場の解析を行う。

(2) また、数値計算により、物体への抵抗力の解析と、粒子の鉛直拡散を解析する。

これらの結果は、成層流体分野における世界的に前例のない特異な流れ場の解明となる。

### 3. 研究の方法

流れの全体的なパターンを把握するのに適切なシャドウグラフ法その他、球の中心を通る鉛直断面内の測定に LIF (レーザー誘起蛍光法) と PIV (粒子画像速度計測) を用いる。

塩分成層の作成には 2 タンク法を用いる。すなわち、2 つのタンク (塩水タンクと真水タンク) から出てくる液体の混合比を徐々に変えることにより密度を変えて塩分成層流体を作成する。

LIF による塩分濃度 (流体密度) 計測には次の手法を用いる。まず、あらかじめ塩水タンクにのみ蛍光染料 (ウラニン) を入れておく。すると、2 タンク法による成層流体作成の過程で、ウラニン濃度と塩分濃度が比例した状態で成層流体が形成される。その結果、ウラニンの蛍光強度を測定すれば、それに比例した塩分濃度 (流体密度) を測定できる。

光源には、出力の安定した連続発振の固体レーザーを用いる。パルスレーザーを用いた場合、測定画面内での輝度分布自体がパルス毎に最大数%変化するためである。

また、密度差による屈折率変化があるとレーザーシート光が曲がるため、成層を作る際

にエチルアルコールが塩分の約 3 倍の重量だけ混ざるように調整する。これにより、屈折率を水槽全体で一様にする (屈折率マッチング)。

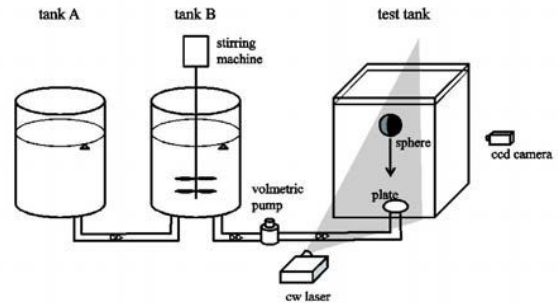


図 1 実験装置の概略図

### 4. 研究成果

#### (1) 塩分成層流体を用いた水槽実験

先行研究において、シャドウグラフ法により、成層流体中を鉛直降下する球の上方に鉛直ジェットが生成されることが明らかにされている。

本研究では、鉛直密度勾配が一定である塩分成層流体中において、球を鉛直方向に一定速度で移動させ、球表面近傍の鉛直断面内の密度場を、レーザー誘起蛍光法 (LIF 法) により測定した。

流体運動を支配する無次元パラメータは、フルード数  $Fr = W/Na$  ( $W$ : 球の鉛直運動速度,  $N$ : プラント・ヴァイサラ振動数,  $a$ : 球の半径), レイノルズ数  $Re = 2aW/\nu$  ( $\nu$ : 動粘性係数), シュミット数  $Sc = \nu/\kappa$  ( $\kappa$ : 密度の拡散係数) の 3 つである。また、 $N$  は  $N^2 = -(g/\rho)dp/dz$  で定義される。ただし、塩分の場合、 $Sc \approx 700$  (= 一定) であるため、この流体系は、2 つの可変パラメータ  $Fr$  および  $Re$  によって支配されている。

#### (2) 密度境界層 (LIF の結果、及び、数値計算との比較、)

図 2 において、ジェットの上部にベル状の構造が見られる。これは、内部重力波によって生じた下降流によってできたベル型構造である。密度成層流体では、上方の流体のほうが下方に比べて密度が小さい。従って、球の運動に伴って密度の小さい流体が下方に引き込まれることになる。図 2 より、周囲の流体に比べて密度の小さな上方の流体がジェットの内部に引き込まれていることが分かる。また、ジェットは、この写真の撮影範囲内で蛇行がなく、軸対称性が良好であることがわかる。

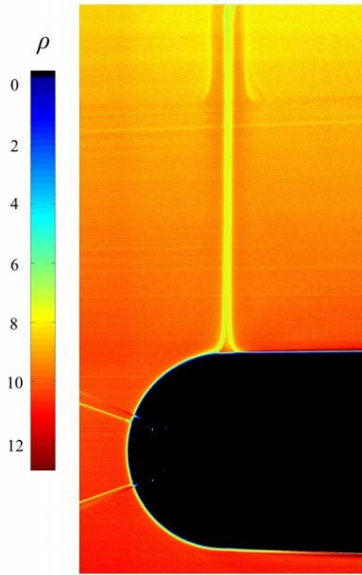


図2 LIFによって得られた塩分濃度分布 (Re=224, Fr=0.7).

図3 a,b は、球表面近傍における密度攪乱の分布のフルード数  $Fr$  による違いを表わしている。図3 (a)に比べ、図3 (b)の方が、球の表面近傍に存在する黄～緑色の領域(密度攪乱の大きい領域)が広い。つまり、 $Fr$  が大きいほうが、球の表面近傍で密度攪乱が存在する領域(=密度境界層)が厚いことが分かる。

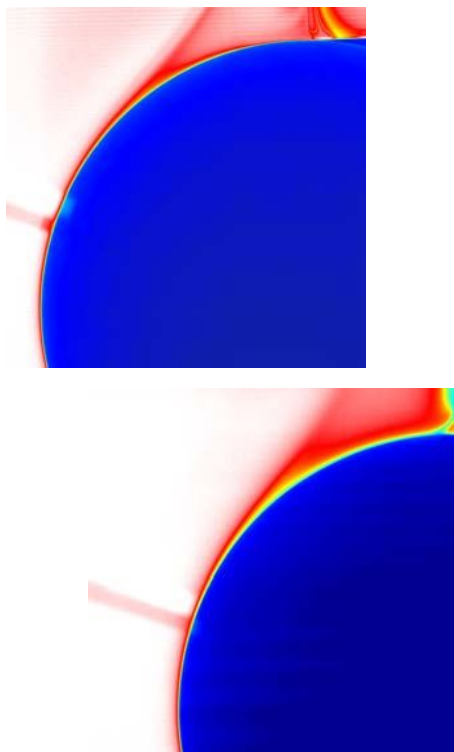


図3 球面付近の密度分布の拡大図。(a)Fr=0.3;(b)Fr=0.7。(a),(b)共に、Re=230。

## (2) 数値シミュレーション

通常のエイラー的な計算の他、流体粒子の流れに沿って移動されるラグランジュ的な計算を行い、ジェット形成過程の解析を行った。

図4に初期に球の下方の同じ高度にあった流体の流跡線(移動経路)を示す。流れの中心軸からの距離が小さい流体は、速度境界層内を通過して、やがて球の上方に達し、さらにジェットとなって上昇を続けることがわかる。ただし、中心軸に非常に近い所は通過せず、少し外側を上昇する。図4の赤線よりもさらに中心軸に近い、ジェットの最も中心部は、実は、初期に球の上側のよどみ点付近にあった流体によって形成されている。図5は、 $z=1.36$ にあった流体粒子を時間を前に遡って計算した結果(後方追跡)であり、流れの中心軸のごく近傍の流体(青色領域)は、球の上側よどみ点付近からやってきた流体で占められていることがわかる。

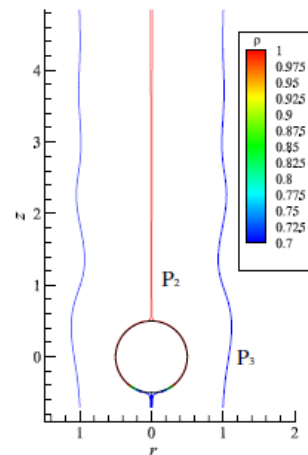


図4 初期に  $z=-0.7$  にあった粒子の流跡線。P2は流れの中心軸(z軸)からの初期の距離が  $r=0.013$  の(中心軸に近い)粒子、P3は、 $r=1.0$  の(中心軸から遠い)粒子。

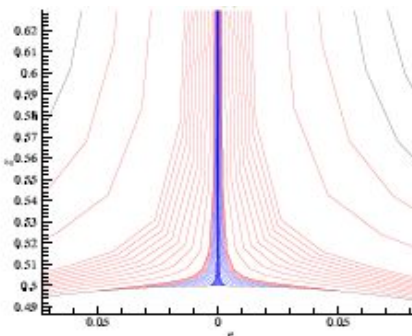


図5  $z=1.36$  にあった流体粒子を時間を前に遡って計算した結果(後方追跡)。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1件)

H. Hanazaki, S. Nakamura & H. Yoshikawa, Numerical simulation of jets generated by a sphere moving vertically in a stratified fluid. Journal of Fluid Mechanics. 765, pp. 424-451 (2015).

[学会発表](計17件)

S. Nakamura & H. Hanazaki, . Process of the jet formation by a sphere moving vertically in a stratified fluid. The 12th Kyoto-Tsinghua-Seoul National University Thermal Engineering Conference. pp. 61-64 (Kyoto, 11. 10-11, 2012).

H. Hanazaki & S. Nakamura, Numerical simulation of jets generated by a sphere moving vertically in stratified fluids. 65th Annual Meeting of the American Physical Society Division of Fluid Dynamics. Bulletin of the American Physical Society 57 (17), p. 144 (San Diego, USA, 11. 18-20, 2012).

S. Okino, S. Akiyama & H. Hanazaki, LIF Measurements of the flow around a sphere descending vertically in a stratified fluid. The 13th Tsinghua-Seoul-Kyoto Three Asian University Thermal Engineering Conference. pp. 63-66 (Beijing, 11. 16-17, 2013).

H. Hanazaki, S. Okino, S. Nakamura & S. Akiyama, Jets generated by a sphere moving vertically in stratified fluids. 66th Annual Meeting of the American Physical Society Division of Fluid Dynamics. Bulletin of the American Physical Society 58 (18), p.377 (Pittsburgh, USA, 11. 24-26, 2013).

S. Akiyama, S. Nakamura, S. Okino & H. Hanazaki, Experimental and numerical investigation of the flow behind a sphere moving vertically in a stratified fluid. The 15th International Heat Transfer Conference, IHTC15-9047, pp. 1-12 (Kyoto, Japan, 10-15 August, 2014).

S. Okino, S. Akiyama & H. Hanazaki, LIF measurements of the jet behind a sphere moving vertically in a stratified fluid. 10th European Fluid Mechanics Conference. p. 272 (Technical University of Denmark, Lyngby, 14-18 September, 2014).

K. Arai, S. Okino & H. Hanazaki,

Particle path analysis of the flow past a sphere moving vertically in a stratified fluid. The 14th Seoul National-Kyoto-Tsinghua University Thermal Engineering Conference. pp. 83-86 (Seoul, 10.30-11.1, 2014).

S. Akiyama, S. Okino & H. Hanazaki, LIF measurements of the flow past a sphere descending in a stratified fluid. 67th Annual Meeting of the American Physical Society Division of Fluid Dynamics. Bulletin of the American Physical Society 59 (20), p.133 (San Francisco, USA, 11. 23-25, 2014).

S. Akiyama, Y. Waki, S. Okino & H. Hanazaki, PIV measurements of the flow around a sphere descending in a salt stratified fluid. The 15th Kyoto-Tsinghua-Seoul National University Thermal Engineering Conference. (Kyoto, 12.12-13, 2015).

成層流体中を鉛直移動する球によるジェットの形成過程. (2012. 9. 16-18) (仲村将大, 花崎秀史) 日本流体力学会年会 2012 (高知大学)

成層流体中を鉛直移動する球まわりの密度分布. (2012. 11.17-18) (鈴江和昌, 花崎秀史) 第90期日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集. P. 187-188. (同志社大学)

成層流体中を鉛直移動する球まわりの密度場. (2013.3.12)(鈴江和昌, 花崎秀史) 京都大学工学研究科高等研究院 流体理工学研究部門 第5回公開セミナー. pp. 52-53. (京都大学)

成層流体中を鉛直移動する球まわりの密度境界層のLIFによる測定. (2013.9.12-14)(秋山真作, 鈴江和昌, 沖野真也, 花崎秀史) 日本流体力学会年会 2013 (東京農工大学)

成層流体中を鉛直移動する球によるジェットの形成(2013.10.16-18) (仲村将大, 沖野真也, 花崎秀史) 京都大学数理解析研究所共同研究集会「非線形波動現象の数理と応用」.

成層流体中を鉛直移動する球によるジェットの形成(2014.3.5) (仲村将大, 花崎秀史, 沖野真也) 京都大学工学研究科高等研究院 流体基礎工学研究部門 第1回公開セミナー. pp. 22-27. (京都大学)

成層流体中を鉛直移動する球まわりの流

れの流跡線解析. (2014.9.15-17) (新井一馬、沖野 真也、花崎 秀史) 日本流体力学会年会 2014 (東北大学)

強成層の流体中を鉛直移動する球まわりの流れ場 (2016. 5. 24-26) (和氣悠将、秋山真作、野口真之介、沖野真也、花崎 秀史) 第 53 回日本伝熱シンポジウム(大阪国際会議場：グランキューブ大阪)

〔その他〕

ホームページ等

京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻  
流体物理学研究室

<http://www.vortex.me.kyoto-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

花崎 秀史 (HANAZAKI, Hideshi)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60189579

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし