

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17972

研究課題名(和文) 密度成層流体における鉛直流の三次元的解析

研究課題名(英文) Three dimensional analysis of the vertical jet in a density stratified fluid

研究代表者

沖野 真也 (Okino, Shinya)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：30711808

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：塩分成層流体中を一定速度で降下する球まわりの流れをシャドウグラフ法とPIV法によって調べた。球の上方に生じる軸対称ジェットの太さは、次元解析から得られる予測と一致し、(フルード数/レイノルズ数)の平方根で見積もられる。フルード数が0.1以下の極めて強い密度成層流体において、レイノルズ数が50程度の低レイノルズ数であっても、ジェットが乱流化することを発見した。三次元直接数値計算により、フルード数が10よりも大きい流れを計算し、先行する実験により観測されていた渦放出を伴う流れを再現することに成功した。

研究成果の概要(英文)：The flow around a sphere descending at a constant speed in a salt-stratified fluid is investigated by the shadowgraph method and the PIV method. The thickness of the axisymmetric jet behind the sphere is estimated by the square root of the Froude number divided by the Reynolds number in accordance with the prediction by a dimensional analysis. We have found that the jet becomes turbulent in a very strongly stratified fluid (at the Froude number less than 0.1) even though the Reynolds number is as small as 50. Our direct numerical simulations have reproduced the non-axisymmetric/axisymmetric vortex shedding at the Froude number larger than 10, which was observed by the previous experiments.

研究分野：流体力学

キーワード：密度成層 高シュミット数 ジェット 乱流遷移 内部重力波

1. 研究開始当初の背景

大気・海洋には温度や塩分による鉛直方向の密度勾配が存在し、このような流体は密度成層流体と呼ばれる。大気・海洋のような地球規模の流れにおいては、流れの水平スケールは鉛直スケールに比べて十分大きいため、これまでの研究では大気・海洋学的に注目すべき水平流に主な焦点が当てられてきた。一方、成層流体中における鉛直流に対しても、小さいスケールに目を向けると重要な応用先が存在する。例えば、海洋観測フロートや海洋炭素循環の担い手のひとつであるマリンスノーの鉛直移動は密度成層の影響を大きく受けていると考えられる。

密度成層流体中を鉛直移動する物体まわりの流れの研究は、Mowbray & Rarity (1967) の実験と線形理論に端を発する。そこでは、一定速度で鉛直移動する球の後流をシュリーレン法によって可視化し、得られた内部重力波のパターンが線形理論とよく一致することが示された。その後、Hanazaki et al. (2009) は広範なパラメータ領域 (レイノルズ数 Re とフルード数 Fr) に対して、シャドウグラフ法による流れの可視化を行ない、後流を7パターンに分類した。ここで、レイノルズ数は $Re=2aW/\nu$ 、フルード数は $Fr=W/(Na)$ で定義される無次元パラメータである (a : 球の半径、 W : 球の鉛直速度、 ν : 動粘性係数、 N : 浮力振動数)。しかしながら、そのような流れの速度場をレイノルズ数、フルード数に対して系統的に測定し、パラメータ依存性を調べた研究は存在しない。

また、Torres et al. (2000) は、フルード数が小さいとき (密度成層が強いとき) に生じる軸対称性の高い流れを対象として、軸対称性を仮定した直接数値計算を実施し、球の背後に強い鉛直流 (ジェット) が生じることを示した。Hanazaki et al. (2009) の可視化実験では比較的大きなフルード数に対し、複数パターンの三次元流れが発見されている。しかしながら、そのような構造を捉えうる、軸対称性を課さない直接数値計算についての研究例はない。

2. 研究の目的

(1) 水槽実験

塩分成層流体中を一定速度で降下する球まわりの流れを PIV 法により測定する。対象とする流れは比較的小さいフルード数に生じる軸対称ジェットとし、その鉛直速度や太さがフルード数・レイノルズ数にどのように依存するかを調べる。さらに、これまで調べられてこなかったフルード数が 0.1 以下の、密度成層効果が非常に強い場合の流れについて、シャドウグラフ法と PIV 法を用いて調べる。

(2) 直接数値計算

三次元直接数値計算により、フルード数が比較的大きな流れを計算し、Hanazaki et al.

(2009) による先行研究で観測された三次元構造をもつ流れを再現することを試みる。

3. 研究の方法

(1) 水槽実験

底面が 80cm × 80cm の水槽中に高さ 88cm の塩分成層流体を 2 タンク法によって作成する。直径が 4cm または 5cm の球を使用する。球は細いワイヤーによって昇降装置に取り付けられ、一定速度で鉛直方向に移動することができる。

本研究では、シャドウグラフ法による流れの可視化と PIV 法による速度場の測定を行った。流れ場は CCD カメラ (2048pixel × 2048pixel, HiSense 4MC, Dantec Dynamics; C9300-024, Hamamatsu Photonics; 12bits, 11Hz) によって撮影した。撮影には焦点距離の異なる二種類の対物レンズを用いた (AI Micro-Nikkor 105mm f/2.8S と Nikkor 50mm f/1.2)。PIV における光源は Nd-YAG レーザー (Dual Power 65-15, Dantec Dynamics; Nano S PIV, Litron Lasers; 532nm, 65mJ, 15Hz) を使用した。

(2) 直接数値計算

連続の式、ブシネスク近似を施したナビエ・ストークス方程式、密度の輸送方程式を、有限差分法により解く。流体の密度変化は塩分によってもたらされるとし、シュミット数は $Sc=700$ とした。対流項の離散化には三次精度上流差分を、それ以外の項には二次精度中心差分を用いた。時間発展は、陰的オイラー法により行った。格子点数は、動径方向に 1000 点、天頂角方向に 360 点、方位角方向に 60 点とした。また、球面に形成される境界層とジェットを十分に解像できるように、球面近傍と球の鉛直上方の格子間隔は十分に小さくしている。

4. 研究成果

(1) 室内実験

速度場のパラメータ依存性

まず、フルード数 $0.4 \leq Fr \leq 2$ 、レイノルズ数 $80 \leq Re \leq 550$ に対する速度場のパラメータ依存性を調べた。ただし、速度場のレイノルズ数依存性は顕著ではなかったため、本項では $Re=220$ と固定した上でのフルード数依存性を中心に記す。このパラメータにおいては、軸対称性の高い流れが現れることが先行研究から知られている (Hanazaki et al. 2009)。

図 1 に球の中心を通る鉛直断面における鉛直速度のフルード数依存性を示す。赤の実線は鉛直速度が零の等高線を表す。鉛直速度が正になる領域と負になる領域が鉛直方向に交互に現れている。これは、球の移動によって引き起こされる内部重力波を示している。フルード数の増加につれて (すなわち密度成層が弱くなるにつれて) 等高線の間隔が広がっていることが分かる。本実験で得ら

れた内部重力波のパターンは、破線で示される Mowbray & Rarity (1967) による線形理論とよく一致している。

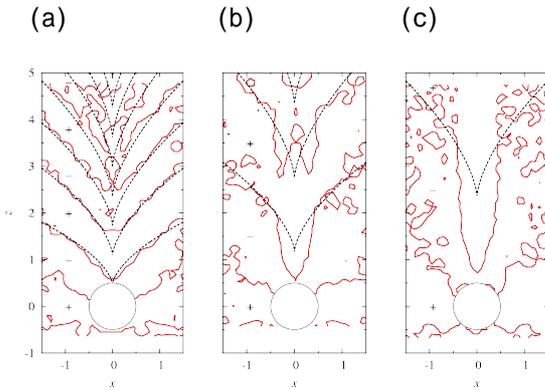


図1 . 鉛直速度のフルード数依存性. 赤実線, 破線はそれぞれ実験, 線形理論による鉛直速度が零の等高線を示している. (a) $Fr=0.4$, (b) $Fr=1.0$, (c) $Fr=2.0$. $Re=220$.

図2 は長焦点距離のレンズを用いて、 $Fr=0.4$ における球近傍の速度場を測定した結果である。ここで見られる特徴は、球の上方に生じる強い鉛直流（ジェット）の存在である。ジェットの速度は、球の降下速度の約5倍にも達している(図3)。本実験の結果(図2 a)は、図2 (b)に示す軸対称性を仮定した数値計算結果ともよく合っている。

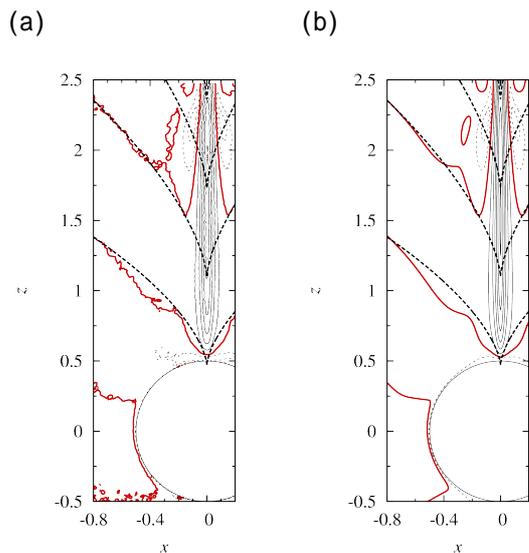


図2 . $Fr=0.4$ における鉛直速度の等高線. (a) 実験, (b) 数値計算. 赤実線, 細実線, 細破線はそれぞれ, 零, 正, 負の等高線. 太破線は線形理論による. $Re=220$.

図3 に鉛直速度が最大値をとる高さにおける鉛直速度分布のフルード数依存性を示す。フルード数の減少とともに、ジェットにおける鉛直速度は大きく、ジェットの太さは

細くなっていることが分かる。実験結果と数値計算結果は概ねよく一致しているが、ジェットの中心付近では、実験による鉛直速度は数値計算に比べ若干小さい値をとる。この差は、実験で現れる流れはわずかに三次元性を含んでいるのに対し、比較に用いた数値計算結果は軸対称性を仮定しているために生じたと考えられる。

ジェットの太さを、鉛直速度が最大値をとる高さにおける半値半幅で定義すると、ジェットの太さは(フルード数/レイノルズ数)の平方根におよそ比例することが分かった。これは、ジェットの太さが、浮力振動数と動粘性係数を用いた次元解析から決まる長さスケール程度であることを意味する。

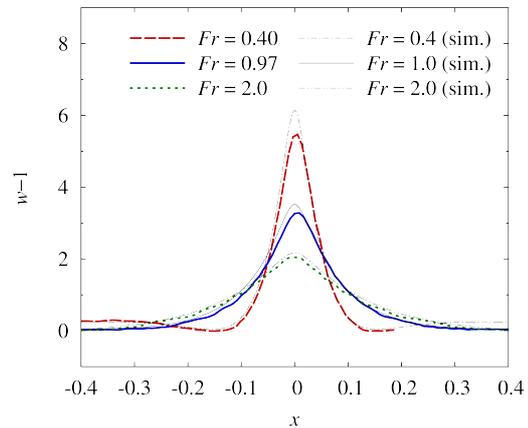


図3 . 鉛直速度が最大値をとる高さにおける鉛直速度の分布. $0.4 \leq Fr \leq 2$. $Re=220$. 黒線は軸対称性を仮定した数値計算結果.

強成層流体中に生じる不安定ジェット
前項の結果から、フルード数が小さくなるにつれて(密度成層効果が強くなるにつれて)、ジェットにおける鉛直速度は大きく、ジェットの太さは細くなることが分かったので、さらに低いフルード数に対する流れを調べた。ここでは、球の降下速度を小さくすることによって、低フルード数の流れを実現した。本節では $Re=50$ に対する結果を示す。

図4 にシャドウグラフ法によって観測された鉛直ジェットを示す。左から、 $Fr=0.12$, 0.067 , 0.04 である。 $Fr=0.12$ では前項で対象としたような軸対称性の高い定常なジェットが見られる。 $Fr=0.067$ を下回ると、ジェットは安定性を失い、非定常的に蛇行する様子が見られた。さらにフルード数を小さくすると、図4 (c)に示すように、ジェットは乱流化した。

図5 は、低フルード数($0.04 \leq Fr \leq 0.12$) における、平均鉛直速度分布を示す。 $Fr=0.12$, 0.08 ではジェットは定常・軸対称であり、フルード数の減少とともに鉛直速度は増加する。しかしながら、ジェットが安定性を失った後の $Fr=0.057$ では鉛直速度は小さくなっ

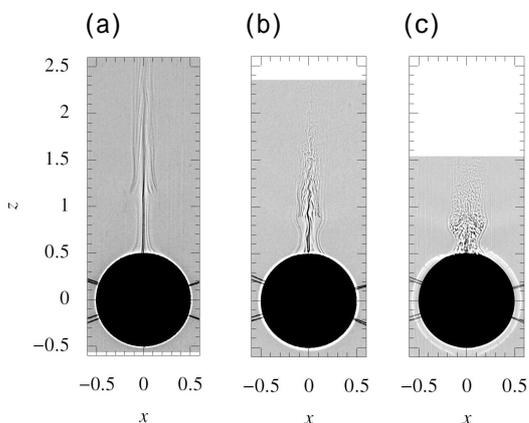


図4．シャドウグラフ法によって観測された鉛直ジェット．(a) $Fr=0.12$ ，(b) $Fr=0.067$ ，(c) $Fr=0.040$ ． $Re=50$ ．

ている。蛇行ジェット ($Fr0.057$ -b) では、鉛直速度の減少量はわずかであるが、乱流ジェット ($Fr0.057$ -a) では鉛直速度は大幅に低下し、ジェットの太さも太くなっている。さらにフルード数を下げると、鉛直速度は再び増加する ($Fr0.040$)。

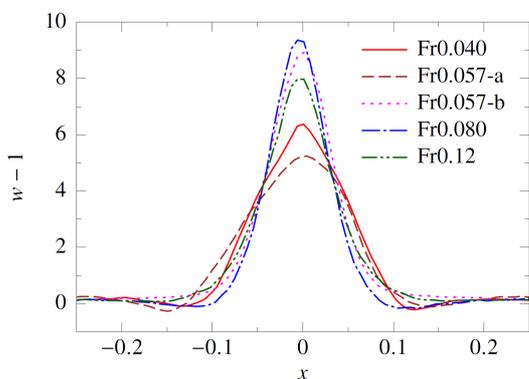


図5．鉛直速度が最大値をとる高さにおける平均鉛直速度の分布． $0.04 \leq Fr \leq 0.12$ ． $Re=50$ ．

最大鉛直速度のフルード数依存性をまとめたのが図6である。 $0.08 \leq Fr \leq 0.14$ (黒丸) ではジェットは安定であり、その最大速度はフルード数の減少とともに単調に増加する。 $Fr=0.067$ を下回ると、ジェットの不安定化が起こり、鉛直速度は低下する。蛇行ジェット (青四角) においては、フルード数を減少させると、最大速度も漸減する。一方、ジェットが乱流へと遷移すると (赤丸)、鉛直速度は大幅に減少する。ジェットが蛇行状態を保つか、乱流へと遷移するかは、水槽中の初期攪乱に依存するものと考えられる。

(2) 直接数値計算

レイノルズ数を $Re=500$ と固定した上で、成層効果があまり顕著ではない高フルード数の流れ ($Fr=10, 30, 50$) を計算した。

図7に速度勾配テンソルの第二不変量の

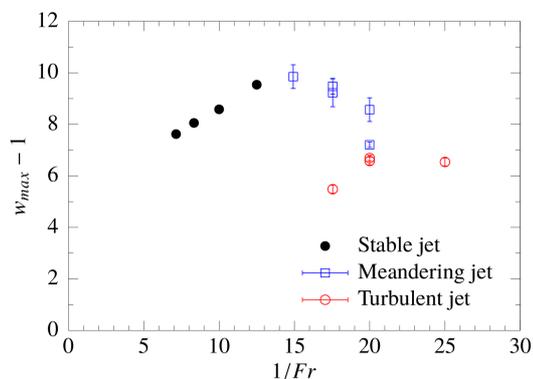


図6．最大鉛直速度のフルード数依存性． $Re=50$ ．エラーバーは時間平均値からの標準偏差を表す．

等値面を示す。これは球の後流に形成される渦構造の可視化となっている。最も成層の弱い $Fr=50$ ではヘアピン型の渦放出が見られた。これは一様密度流体において見られるヘアピン渦と類似の構造であるが、図7(a)の渦構造は鏡像対称性を有する点で異なっている。また、 $Fr=30$ における蛇行する流れは、密度一様の場合に見られる double thread と呼ばれる構造とよく似ている。 $Fr=10$ においては、トーラス型の渦が周期的に放出されるという、特徴的な現象が確認された。以上の3種類の流れはいずれも Hanazaki et al. (2009) のシャドウグラフ法により可視化された流れの構造 (Type F: 片側に周期的な節をもつ流れ, Type E: 緩やかに蛇行するジェット, Type D: 周期的な節もつジェット) に対応するものである。

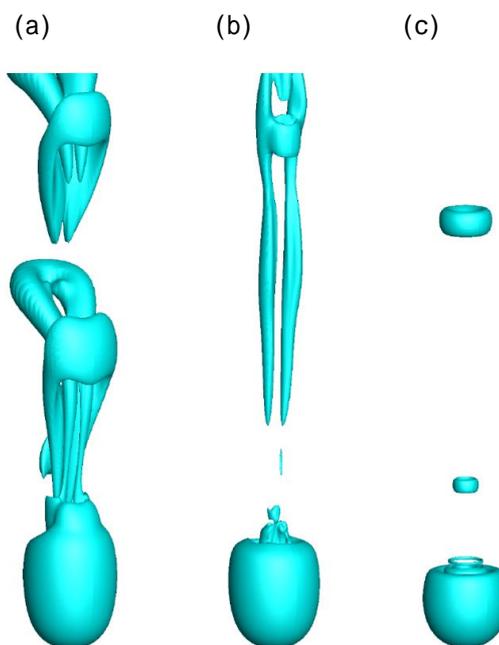


図7．速度勾配テンソルの第二不変量の等値面．(a) $Fr=50$ ，(b) $Fr=30$ ，(c) $Fr=10$ ． $Re=500$ ．

<引用文献>

Mowbray, D. E. & Rarity, B. S. H., The internal wave pattern produced by a sphere moving vertically in a density stratified liquid, J. Fluid Mech. 30 (3), 1967, 489-495.

Hanazaki, H., Kashimoto, K. & Okamura, T., Jets generated by a sphere moving vertically in a stratified fluid, J. Fluid Mech. 638, 2009, 173-197.

Torres, C. R., Hanazaki, H., Ochoa, J., Castillo, J. & Van Woert, M., Flow past a sphere moving vertically in a stratified diffusive fluid, J. Fluid Mech. 417, 2000, 211-236.

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)

S. Okino, S. Akiyama & H. Hanazaki, Velocity distribution around a sphere descending in a linearly stratified fluid, J. Fluid Mech. 826, 2017, 759-780, 査読有.

DOI: 10.1017/jfm.2017.474

[学会発表](計5件)

H. Hanazaki, S. Akiyama & S. Okino, Velocity distribution around a sphere descending in a salt-stratified water, 70th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, 2017.

松本光平、新井一馬、沖野真也、花崎秀史、成層流体中を鉛直移動する球まわり流れのラグランジュ的解析、日本流体力学会年会2017、2017年

沖野真也、塩分成層流体中の乱流と物体まわりの流れ、機械学会関西支部流体力学懇話会第180回研究会、2016年

秋山真作、和氣悠将、沖野真也、花崎秀史、強い成層下での球の鉛直移動による流れ、日本流体力学会年会2016、2016年

和氣悠将、秋山真作、野口真之介、沖野真也、花崎秀史、強成層の流体中を鉛直移動する球まわりの流れ場、第53回日本伝熱シンポジウム、2016年

6. 研究組織

(1)研究代表者

沖野 真也 (OKINO, Shinya)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：30711808