

## わたしたちの研究（19）流体物理学研究室



花崎秀史

沖野真也

(S59/1984卒) (H18/2006卒)

### 1. 本研究室の概要と研究紹介

機械理工学専攻 流体理工学講座 流体物理学研究室では現在、流体運動の基本要素である渦や波動の力学に注目しながら、鉛直方向に密度差のある成層流体や、遠心力やコリオリ力を受ける回転流体の流れなどを研究しています。工学的には、成層流体は、淡水化プラント、原子力プラント、液化天然ガスタンクなどの大型施設、回転流体は、円管や円筒内の旋回流などに生じます。一方で、成層流体や回転流体は、大気海洋力学、もっと広くは惑星流体力学の骨格を形成しており、地球流体という名称もしばしば使われます。そして、これらの研究は、地球温暖化などの気候変動の数値予測モデルの基盤ともなります。昨年のノーベル物理学賞の受賞対象に気候モデル（Princeton大学の真鍋淑郎博士ら）が選ばれたことは、驚きであると同時に、半世紀以上にわたる予測精度の向上によって、気候モデルが科学（物理学）として認知されるレベルに到達したことを印象付けるものでした。我々の研究室では、成層流体や回転流体とその中での渦や波動の研究を通じて、地球流体現象を根本から理解し、その成果を工学的な問題の他、大気・海洋現象の理解と予測へ展開することを目指しています。

さて、鉛直方向の密度差のある成層流体中では、流体塊が何らかの原因で鉛直変位すると、浮力を復元力とする鉛直振動が生じます。その振動が「内部重力波」と呼ばれる波動の起源です。例えば大気中では、内部重力波は、数10km以下の水平スケールで重要です。一方、大きな水平スケール（～100km以上）では、地球の自転によるコリオリ力の効果が顕著になります。そして、1000km程度以上のスケールになると、中緯度の偏西風とも関係の深い「ロスビー波」と呼ばれる波動が重要となります。一方、遠心力は、円管や円筒内の旋回流で重要となり、遠心力を復元力とする「慣性波」が生じます。このように、成層流体や回転流体中に

は様々な種類の「波動」が発生し、通常の流体のような「渦だけ」とは異なる世界が広がります。渦と波の2つが車の両輪として働くのが、成層流体や回転流体、あるいは地球流体ということになります。以下に、当研究室の代表的な研究例をいくつか紹介します。

1つ目は、成層流体中を鉛直移動する物体まわりの流れです。従来、成層流体の流れは、大気や海洋の流れにおける山越え気流や海嶺を過ぎる流れ（いずれも水平スケールが10km以上）がそうであるように、水平流れを中心に研究されてきました。大きいスケールでは確かに水平流れが卓越します。しかし、小さいスケールでは、速度の鉛直成分が同等以上に重要となります。成層流体中を鉛直移動する物体には、例えば、大きさが1cmの以下の海洋プランクトン、あるいは、海洋中を浮遊しながら観測を行う数10cmスケールのフロート（深海観測機器、特にArgo floatによる国際観測プロジェクト）、などがあります。これらは、一見地味ですが、プランクトンの鉛直移動は、海洋中の炭素循環の大きな部分を占めていると考えられており、海洋大循環の計算に取り入れられています。また、フロートは、近年の海洋観測の主要な手段となっていて（海洋中は電波が届かないので衛星観測できない）、その移動を設計の段階で予測することは非常に重要です。海洋中の流れの観測は、大気の観測に比べて格段に難しいため、未知の部分が非常に多いのです。また最近では、メキシコ湾などの海底油田の事故による油滴の上昇もしばしば問題となっています。

図1は、成層流体中を球が鉛直下方に移動したときにできる流れを蛍光染料により可視化したものです。室内実験には、塩分濃度差によって作成した成層流体を用いています。静止状態では、等密度面（塩分の等濃度面）は水平です。しかし、球が下降によって軽い流体を下に引き込むと、等密度面も下方に変位します。このとき、球面付近での塩分の分子拡散のために密度（塩分濃度）は流れに沿って保存せず、下方に引き込まれて周囲の流体よりも軽くなった流体が浮力によって上昇し、鉛直流（ジェット）を形成します。鉛直密度差が大きい場合には（左端の図）、ジェットは細く、かつ、非常に高速（球の速度の6倍など）になります。

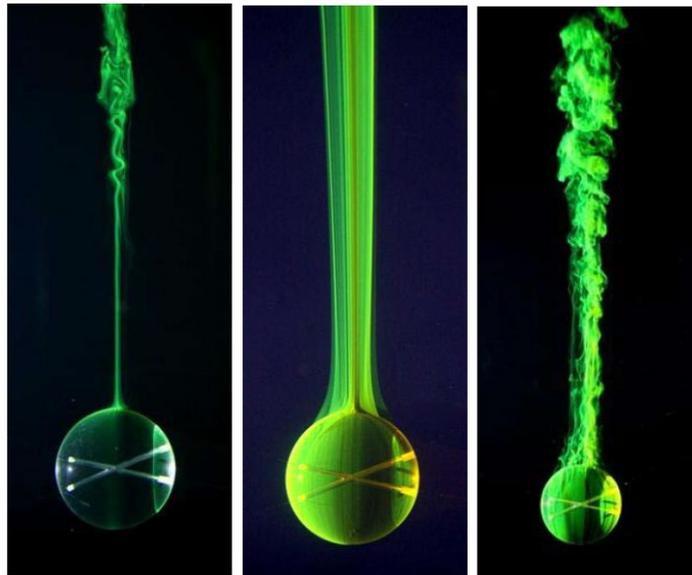


図1 成層流体中を下降する球まわりの流れ（蛍光染料による可視化）。左端が鉛直密度差の影響が最も大きく、右端が最も小さい（Journal of Fluid Mechanics (2009), vol. 638, pp. 173-197）。

図2は、図1の左端（密度差の効果が最大）の場合の流れをシャドウグラフ法によって可視化したもので、こちらには、球の上方の少し離れたところにbell型の構造が現れます。染料の可視化では見えない奇妙な構造ですが、これは波動の一種

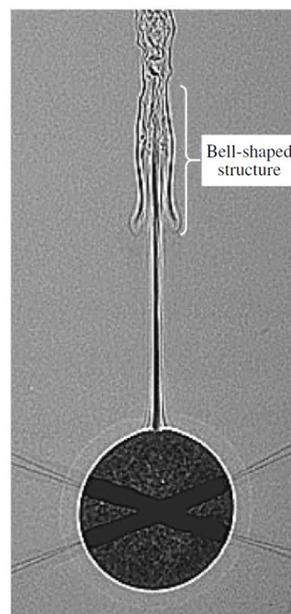


図2 鉛直降下する球の後方（上方）に現れるbell型の構造（シャドウグラフ）。図1の左端の図に対応（Journal of Fluid Mechanics (2017), vol. 826, pp.759-780）。

である「内部重力波」の影響です。このように、成層流体では、波動が重要な働きをしています。なお、20年以上前に鉛直運動の論文を最初に発表したときには

全く注目されなかったのですが、ここ数年、様々な応用が注目されるにつれて、類似の研究をする人が急に増えてきたように思います。

2つ目は、波動そのものの研究です。図3は、密度一様の流体中に、表面張力を持つ水面波が励起されたときの時間発展を、Euler方程式を解いて計算した結果です。水平座標 $x=0$ の所に底面地形があり、左から右に向かう主流があります。このとき、一定の条件を満たせば、上流側( $x<0$ )に孤立波と呼ばれる大振幅の非線形波が周期的に放出されます。同時に、それよりも速い速度で短波長の表面張力波が上流伝播します（図の左の方で細かいギザギザに見えていますが、正弦波に近い波です）。本研究室では、水面波や内部重力波など、様々な波動を研究しています。

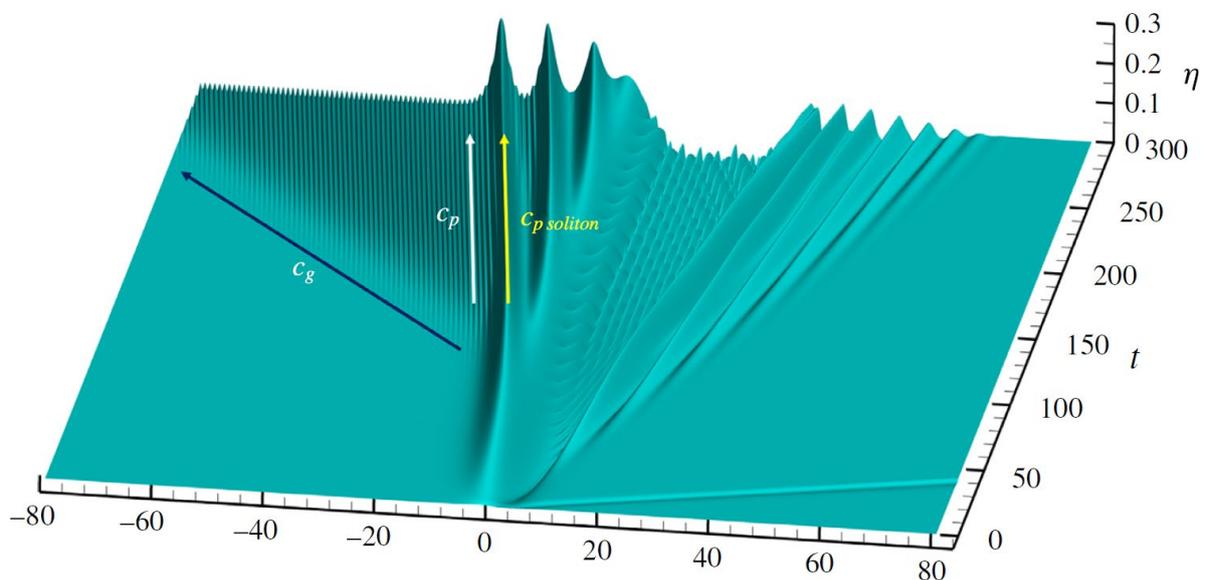


図3 底面地形によって励起された、表面張力効果を持った水面波の伝播。横軸が水平座標 $x$ 、縦軸が時間 (Journal of Fluid Mechanics (2017), vol. 810, pp.5-24)。

3つ目は、乱流です。乱流は、運動量・熱・物質の著しい輸送を担う現象で、流体力学における一大テーマです。本研究室では、成層効果が乱流の挙動にどのように影響するかを数値計算と室内実験により調べています。大気や海洋の成層は熱や塩分によって形成されますが、このうち、塩分の拡散係数は非常に小さいため、塩分攪乱の最小スケールは、流体運動の最小渦のスケールの約1/30しかありません。このため、数値計算・室内実験のいずれにおいても、塩分濃度場を解像することは非常に困難です。図4は、塩分濃度攪乱の空間分布を大規模なスーパーコンピューターを用いて計算した結果です。ただし、成層（あるいは浮力）の効

果が現れるまでには一定の時間がかかるため、初期には（左端の図）、塩分分布は成層の効果をほとんど受けません。そのため、一様密度の流体中と同様に薄いシート状の構造が形成されます。その後（中央の図）、成層効果が流体の鉛直運動を抑制するようになると、水平で扁平な構造が現れます。それをさらに4倍に拡大して見ると（右端の図）、扁平な構造は、小さな筋状の構造が集まってできていることがわかります。これは、塩分のように拡散係数の小さい物質が成層流体を形成している場合に特有の現象であることもわかってきました。

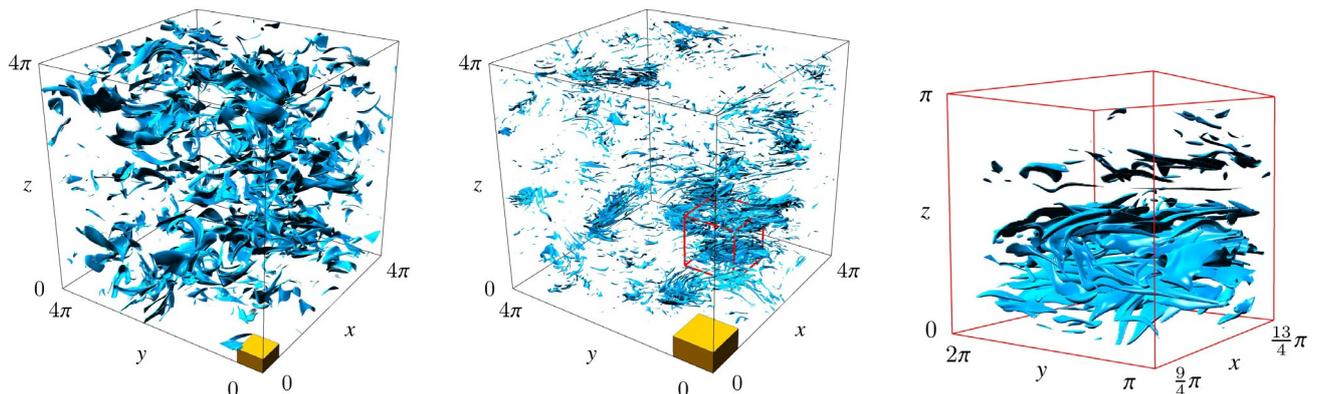


図4 塩分成層乱流における塩分攪乱の空間分布の時間変化。（左図）減衰初期、（中央図）減衰終期、（右図）中央図の赤枠内の拡大（Journal of Fluid Mechanics (2020), vol. 891, A19）。

## 2. 教員の紹介

教授の花崎は、東京大学の工学部物理工学科を1984年に卒業しました。物性物理が中心の学科ですが、現在は、光科学や量子情報も盛んに研究しているようです。その関係で、卒業論文では、ペロブスカイト型の構造を持った超電導物質（Ba, Pb, Bi, Oの合金）のトンネル効果の実験を行いました。トンネル接合の作製が難しいのと、実験者の技量の問題？により、期待したようなデータは全く得られなかったことを覚えています。そのわずか数年後、上記と組成が少し異なるだけの物質で、ノーベル賞の対象となる高温超電導フィーバーが起こり、所属していた田中昭二教授の研究室の皆さんは、院生も含め世界的な競争の中心となりました。よい意味でたいへん驚きました。一方で、花崎はその後、修士課程で高見穎郎教授の研究室に入り、流体の数値計算をするようになりました。今でこそスーパーコンピューター全盛ですが、当時は、東大の大型計算機センターに日立の初代ベクトル型スーパーコンピューターS810が入ったばかりのころでした。CPU time 1時間で約1万円で、短時間だと単価がさらに10倍にもなるため、いかに短

い計算時間（少ない金額）で研究を進めるかに頭を使いました。計算結果の図を緑線で表示できる「高級な」モニターは学科に1台で、そのため、助手の人に負けないように朝1番を目指して大学に行く、という時代でした。大学の大型計算機センターの使い勝手の良い端末も朝から（全学レベルの）先着順で奪い合いでしたし、センターに1台しかないレーザープリンターの出力順番待ちもありました。データの保管には、直径25cmくらいの重たい磁気テープをいくつか「かついで」隣のキャンパスの大型センターまで行く必要がありました。さいわい当時は、流体の数値計算自体がまだ普及しておらず、流れが計算できるだけで自分も感動できたとし、実際、「数値計算」というだけで一定の評価が得られる時代だった気がします。学問的にどうかはともかくとして。。。修士修了後、現在の茨城県つくば市（当時は新治郡）にある国立環境研究所に研究員として採用され、大気環境部で大気の流れに関連する成層流体や回転流体の研究を始めました。道路を挟んで隣には気象庁の気象研究所もあり、気象を専門とする方たちとの交流は、ものの考え方を含め、大変勉強になりました。その後、1997年からの東北大学流体科学研究所助教授を経て、2004年に京都大学に助教授として参りました。2010年に教授に昇任し、現在に至っています。東京、つくば、仙台での経験が、多様性や客観性につながればと思っています。

講師の沖野は、2006年に京都大学工学部物理工学科を卒業後、同大学院工学研究科航空宇宙工学専攻にて、2008年に修士課程を修了、2011年に博士後期課程を修了し、博士（工学）を取得しました。永田雅人先生（本学名誉教授）の指導のもと、流れの安定性と解の分岐という基礎的な問題に取り組んだ経験は当研究室における研究活動にも生かされているものと思います。2011年から2年間は三菱電機（株）先端技術総合研究所にて、タービン発電機の冷却や高効率化といった工業上の諸問題に取り組みました。その後、2013年に当研究室助教として着任、2021年に講師に昇任し、現在に至っています。

以上が当研究室のご紹介となります。今後ともよろしくお願い申し上げます。