

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03875

研究課題名（和文）複数のスカラーが形成する密度成層流体中の乱流輸送：差分拡散のメカニズムと定量評価

研究課題名（英文）Turbulence transport in a density stratified fluid generated by multiple scalars: mechanism of differential diffusion and quantitative evaluation

研究代表者

沖野 真也 (Okino, Shinya)

京都大学・工学研究科・講師

研究者番号：30711808

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：熱塩成層流体における減衰乱流の直接数値計算を行ない、小スケールにおける不安定性が乱流の減衰に及ぼす影響を調べた。温度成層または塩分成層が不安定である場合には、温度の拡散スケール付近でポテンシャルエネルギーが生成される。塩分成層が不安定であり、流れがフィンガー型不安定である場合、初期攪乱が減衰した後に再度流れが発達し、鉛直方向に長く伸びた密度分布（ソルトフィンガー）が形成される。一方、温度成層が不安定であり、流れが拡散型不安定である場合には、ポテンシャルエネルギーは短時間で著しく増大する。ただし、不安定性の強い場合を除き、運動エネルギーの減衰という観点では浮力比依存性はあまり見られなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

表層混合層を除く海洋は、温度と塩分によって形成される熱塩成層流体であり、ここでは、温度と塩分の分布による海水の密度差のために、千年スケールの長い時間をかけて地球を巡る流れ（熱塩循環）が駆動されている。熱塩循環は地球規模の極めて大きな熱量や炭素の輸送を担うため、地球温暖化などの気候変動とも密接に関わっており、その予測は重要である。本研究で得られた、熱塩成層流体中の乱流拡散に関する知見は、全球気候モデルの高精度化に寄与するものである。

研究成果の概要（英文）：Direct numerical simulations of decaying turbulence in thermohaline stratified fluids are performed to investigate how instabilities occurring at small scales affect the decay of turbulence. When either the temperature or salt stratification is unstable, potential energy is produced near the diffusive scale of temperature. When the salt stratification is unstable and the flow is subject to the fingering instability, the flow develops again after the initial perturbation decays, forming a vertically elongated density profile (salt fingers). On the other hand, when the temperature stratification is unstable and the flow is subject to the diffusive instability, the potential energy increases significantly in a short time. However, the buoyancy ratio dependence of the decay of the kinetic energy is not very significant, except in the case with strong instability.

研究分野：流体物理学

キーワード：熱塩成層流体 トフィンガー 減衰乱流 高シュミット数 二重拡散対流 直接数値計算 レーザー誘起蛍光法 ソル

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

夜間の大気、あるいは表層混合層を除く海洋には、鉛直下方ほど密度の大きい、密度成層が形成される。特に、海洋における密度成層は主に熱と塩分によって形成されており、熱塩成層と呼ばれる。水中における塩分の拡散係数は熱の約 $1/100$ であり、塩分の拡散スケール(バチエラスケール)は熱の拡散スケールの約 $1/10$ である。熱と塩分の両方の効果によって形成される鉛直密度分布が静的に安定であっても、両者の拡散スケールの違いに起因して、不安定性や対流が生じることが知られている。そのような対流は二重拡散対流と呼ばれ、従来、線形安定性解析によって説明されてきた。全球気候モデルの高精度化のためには、熱塩成層流体中の乱流拡散についての定量的な評価が不可欠であるが、二重拡散対流の非線形発展、および乱流との相互作用について調べた研究は限定的であった。

2. 研究の目的

(1) 熱塩成層乱流の直接数値計算

熱塩成層流体における減衰乱流の直接数値計算を行ない、小スケールにおいて生じる不安定性が乱流の減衰にどのような影響を及ぼすかを調べることを目的とした。これまでに実施されてきた線形安定性解析は無小擾乱の発達・減衰を調べる手法であるのに対し、本研究では攪乱の非線形的な時間発展を調べることで、その振幅を定量的に評価した。

(2) 塩分成層乱流の水槽実験

最近実施された塩分成層乱流の直接数値計算(Okino & Hanazaki, J. Fluid Mech., 2020)の結果を水槽実験により検証することを目的とした。これまで、密度成層乱流の実験ではほとんどの場合、塩水が用いられてきた。塩分のような高シュミット数のスカラー場にはコルモゴロフスケールよりも非常に小さなスケールの構造が作られるが、そのような構造が浮力によってどのような影響を受けるかを調べた。

3. 研究の方法

(1) 熱塩成層乱流の直接数値計算

周期境界を有する立方体領域中の流体運動を取り扱う。流体は温度($Pr = 7$)と塩分($Sc = 700$)によって鉛直(z^*)方向に一様に成層しているものとする(すなわち、静止状態における温度と塩分の鉛直分布を \bar{T}^*, \bar{S}^* とするとき、 $d\bar{T}^*/dz^* = \text{const.}$, $d\bar{S}^*/dz^* = \text{const.}$)。密度成層に対する温度と塩分の寄与は浮力比 $R_\rho = [\alpha^*(d\bar{T}^*/dz^*)]/[\beta^*(d\bar{S}^*/dz^*)]$ を用いて表される。ただし、 $\alpha^*(>0)$ は熱膨張係数、 $\beta^*(>0)$ は塩分収縮係数である。本研究では、減衰乱流、すなわち初期攪乱の時間的な減衰過程を計算の対象とした。初期速度場として等方的な攪乱を与えるが、初期温度場と塩分場には攪乱を与えない。

系を支配する方程式は、連続の式、ナビエ・ストークス方程式、温度攪乱と塩分攪乱の輸送方程式と状態方程式である。フーリエ・スペクトル法によって支配方程式の直接数値計算を実施した。非線形項の評価の際に生じるエイリアス誤差は $3/2$ 則によって除去した。また、時間積分は4次精度のルンゲ・クッタ法により実行した。計算に用いる格子点数は初期には 4096^3 点とし、時間の経過とともに高波数成分が減衰するため、途中で格子点数を 2048^3 点に減らして計算を続けた。

本研究では、初期攪乱の rms (二乗平均平方根) 速度と積分長に基づく初期レイノルズ数を $Re_0 = U_0^* L_0^*/\nu^* = 50$ に固定し、流れの浮力比依存性および初期フルード数(密度成層の強さの尺度であり、 $Fr_0 = U_0^*/(N^* L_0^*)$ と定義される)依存性を調べた。ただし、 U_0^* は初期 rms 速度、 L_0^* は初期攪乱の積分長、 $N^*(= \sqrt{-(g^*/\rho_0^*)(d\bar{\rho}^*/dz^*)})$ はプラント・バイサラ振動数である(g^* は重力加速度、 ρ_0^* は基準密度)。浮力比の値に応じて、流れは次のような特徴をもつ(Radko, Double-Diffusive Convection, 2013)。

浮力比が $R_\rho = \pm\infty$ のとき、温度成層は安定であり、塩分成層は中立である。すなわち、塩分は浮力の影響を受けないパッシブスカラーとして振る舞う。

浮力比が $1 < R_\rho < \infty$ のとき、温度成層は安定、塩分成層は不安定である。特に、 $1 < R_\rho < Sc/Pr (= 100)$ のとき、静止流体はフィンガー型の不安定性を有する。

浮力比が $0 < R_\rho < 1$ のとき、塩分成層は安定、温度成層は不安定である。特に、 $(1 + 1/Sc)/(1 + 1/Pr) (\approx 0.876) < R_\rho < 1$ のとき、静止流体は拡散型の不安定を有する。

(2) 塩分成層乱流の水槽実験

底面が $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ の水槽中に高さ 28 cm の塩分成層流体を2タンク法によって作成する。水槽中で正方格子(格子間隔: $M^* = 4.0 \text{ cm}$, 格子太さ: $d^* = 0.4 \text{ cm}$)を水平方向に一定速度で移動させることによって乱流を励起する。格子によって励起された乱流を対象に、密度場と速度場がいかにして減衰するかを調べた。

密度場はレーザー誘起蛍光法(LIF)によって測定し、レーザー光源には連続発振レーザー

(Spectra-Physics/ Millennia eV, 発振波長: 532 nm) 蛍光染料にはローダミン 6G (吸収ピーク波長: 530 nm, 蛍光ピーク波長: 560 nm) を使用した。CCD カメラ (2048 × 2048 pixel, HiSense 4MC, Dantec Dynamics; C9300-024, Hamamatsu Photonics; 12bits, 11Hz) には焦点距離 50 mm の対物レンズを取り付け、18 cm × 18 cm の領域を撮影する。レンズにはレーザー光波長を遮断し、蛍光波長のみを透過させるためにバンドパスフィルタ (中心波長: 562 nm, 半値全幅: 46 nm) を装着した。速度場は粒子画像流速測定法 (PIV) によって測定し、レーザー光源にはダブルパルスレーザー (Dantec Dynamics/ Litron Lasers, Nd:YAG, 発振波長: 532 nm)、トレーサー粒子にはアクリルエマルジョン (紺青) を用いた。CCD カメラには焦点距離 105 mm の対物レンズを取り付け、4 cm × 4 cm を撮影領域とした。

系の挙動を決定する無次元パラメータは、格子レイノルズ数と格子フルード数であり、それぞれ、 $Re_M = U^* M^* / \nu^*$ と $Fr_M = U^* / (N^* M^*)$ と定義される。本研究では、格子速度を $U^* = 8.0$ cm/s、プラント・バイサラ振動数を $N^* = 0.30, 0.56, 1.01$ rad/s と設定することで、 $Re_M = 3200$ における流れのフルード数依存性 ($Fr_M = 2, 4, 7$) を調べた。

4. 研究成果

(1) 熱塩成層乱流の直接数値計算

温度成層が安定、塩分成層が中立である場合

温度 (密度) 成層が弱い (初期フルード数が大きい) 場合には、温度と塩分 (パッシブスカラー) の乱流拡散係数は顕著に異なるが、温度成層が強くなる (初期フルード数が小さくなる) と、その差はほとんど見られなくなる。乱流拡散係数の差は、成層乱流のプリミティブ波数において持続的に生じる逆勾配のスカラフラックスの強さの差に起因することが分かった。強い温度成層流体において、温度と塩分の乱流拡散係数に違いが現れなくなる理由は、スカラ (温度および塩分) 攪乱の高波数への輸送に比べ、低波数における浮力振動が短時間で起こることで、コルモゴロフスケール以下の小スケールのスカラ攪乱、および逆勾配のスカラフラックスがほとんど生じなくなるためである。

温度成層が安定、塩分成層が不安定である場合

線形安定性理論によると、塩分成層が不安定である場合には、広い浮力比の範囲 ($1 < R_\rho < 100$) にわたって静止流体は不安定である。実際に直接数値計算によって有限振幅攪乱の時間発展を調べると、温度の拡散スケール付近でポテンシャルエネルギー (密度攪乱の二乗に比例する量) が生成されることが確認できた。ポテンシャルエネルギーは持続的に生成され、長時間後に鉛直方向に長く伸びた密度分布 (いわゆるソルトフィンガー) が形成される (図 1a)。

塩分成層が安定、温度成層が不安定である場合

前項の場合と同様に、温度の拡散スケール付近におけるポテンシャルエネルギーの生成があり、ポテンシャルエネルギーは初期に著しく増大する。静止流体が拡散型の不安定にある場合 ($0.876 < R_\rho < 1$) の密度場の特徴は、密度攪乱の大きな領域 (図 1b の青) と小さな領域 (図 1a の赤) が近接している構造が多数見られ、その構造が水平方向に伸びていることである。このことは、局所的に密度勾配が非常に大きくなっていることを表しており、海洋においてしばしば観測される階段状の密度分布 (Tait & Howe, Nature, 1971) の形成と関連する可能性がある。

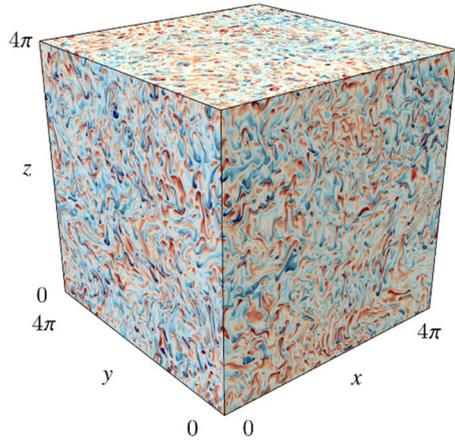
にて述べた通り、フィンガー型不安定や拡散型不安定の場合には小スケールにおける持続的なポテンシャルエネルギー生成があるが、生成されたポテンシャルエネルギーは鉛直密度フラックスを介して運動エネルギーへと変換される。しかしながら、浮力比が $R_\rho \approx 1$ であるような不安定性の強い場合を除き、運動エネルギーの減衰という観点では浮力比依存性はあまり見られなかった。

(2) 塩分成層乱流の水槽実験

本研究では、塩分成層乱流の密度場、特に、コルモゴロフスケール以下の小スケールにおける密度攪乱の減衰過程に焦点を当てて解析を行った。格子による攪乱を加えた後、はじめポテンシャルエネルギーの分布は等方的であり、薄くシート状に引き伸ばされた構造が形成される (図 2a) また、ポテンシャルエネルギーのスペクトルには、波数の -1 乗に比例した領域が現れる。これは、Batchelor (J. Fluid Mech., 1959) による等方乱流中のパッシブスカラーの -1 乗則と同等のものであり、浮力の及ばない小スケールにおいて、密度攪乱がパッシブスカラーと同様の振る舞いをすることを表している。

時間が経過して、浮力の影響がコルモゴロフスケール以下の小スケールにまで及ぶと、ポテンシャルエネルギーの分布には微細な構造が集まった扁平な大スケール構造が見られるようになる (図 2b)。このとき、ポテンシャルエネルギースペクトルには、プリミティブ波数 ($k_p^* = \sqrt{N^* / \nu^*}$) 付近における急速な減少が見られ、プリミティブ波数よりも低波数と高波数に一つずつピークが現れた。こうした特徴は、当研究グループの最近の数値計算結果 (Okino & Hanazaki, J. Fluid Mech., 2020) とよく一致している。

(a)



(b)

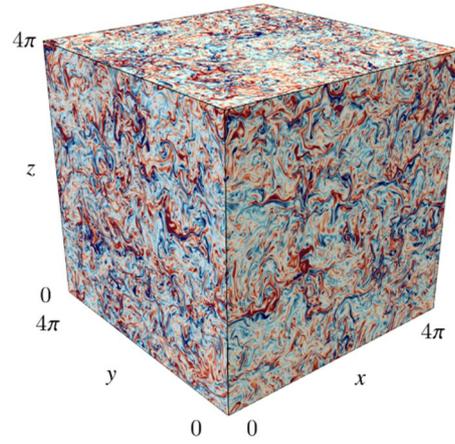
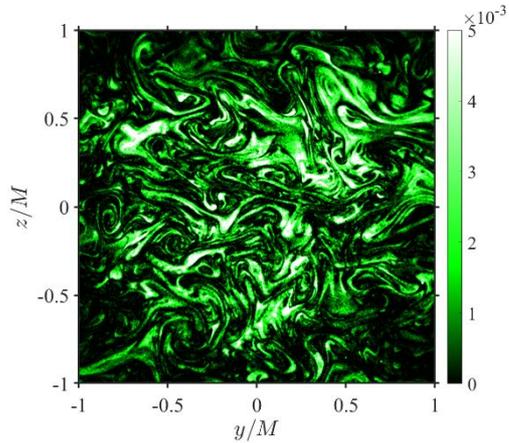


図1 . 密度攪乱の空間分布。(a)フィンガー型不安定にある場合、 $R_\rho = 2, t = 20$ 、(b)拡散型不安定にある場合、 $R_\rho = 0.9, t = 10$ 。赤(青)は負(正)の密度攪乱を示す。いずれの場合にも、初期フルード数は $Fr_0 = 1$ 。

(a)



(b)

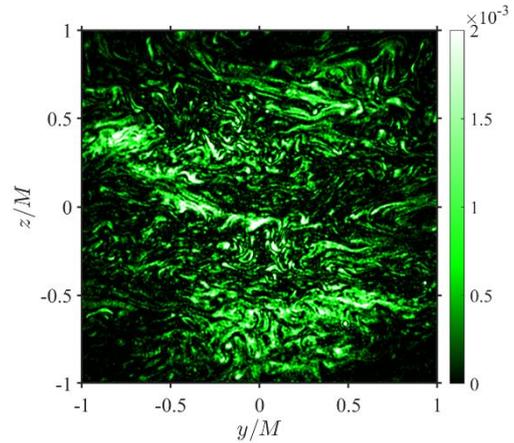


図2 . ポテンシャルエネルギーの鉛直面内分布の時間変化。(a) 減衰初期、(b) 減衰終期。格子フルード数は $Fr_M = 7$ 。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shinya Okino, Soichiro Minakami, Yuki Imanishi & Hideshi Hanazaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Small-scale density fluctuations in grid-generated turbulence in a salt-stratified fluid	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 12th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 S. Okino & H. Hanazaki
2. 発表標題 The buoyancy-ratio dependence of decaying turbulence in a thermohaline stratified fluid
3. 学会等名 ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2023（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 間瀬敬太郎, 沖野真也, 花崎秀史
2. 発表標題 塩分成層流体における格子乱流の密度場計測
3. 学会等名 日本流体力学会年会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 沖野真也, 花崎秀史
2. 発表標題 熱塩成層乱流の直接数値計算
3. 学会等名 日本流体力学会年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ayush Prajuli, Shinya Okino, Hideshi Hanazaki
2. 発表標題 成層せん断乱流の数値シミュレーション
3. 学会等名 日本流体力学会年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 沖野真也
2. 発表標題 高シュミット数のスカラーによって形成される密度成層流体中の減衰乱流に関する研究
3. 学会等名 日本流体力学会年会2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 沖野真也, 花崎秀史
2. 発表標題 温度成層流体におけるパッシブスカラーの乱流拡散
3. 学会等名 日本流体力学会年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水上奏一郎, 沖野真也, 花崎秀史
2. 発表標題 塩分成層流体中の格子乱流とそのフルード数依存性について
3. 学会等名 日本流体力学会年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Prajuli, A. Nakamura, S. Okino & H. Hanazaki
2. 発表標題 Growth and decay of stratified and sheared turbulence
3. 学会等名 日本流体力学会年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Okino, S. Minakami, Y. Imanishi & H. Hanazaki
2. 発表標題 Small-scale density fluctuations in grid-generated turbulence in a salt-stratified fluid
3. 学会等名 12th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古原百華, 間瀬敬太郎, 沖野真也, 花崎秀史
2. 発表標題 塩分成層流体における格子乱流の速度場と密度場の計測
3. 学会等名 第61回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	花崎 秀史 (Hanazaki Hideshi) (60189579)	京都大学・工学研究科・教授 (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------