

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13685

研究課題名(和文) 熱塩成層流体における乱流拡散現象の理解

研究課題名(英文) Turbulence diffusion in thermohaline stratified fluids

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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：シュミット数が700の密度成層流体における減衰乱流の直接数値計算を世界に先駆けて実施した。はじめ、密度攪乱の二乗に比例するポテンシャルエネルギーのスペクトルには、よく知られたバチェラーの-1乗則が見られるが、時間が経過し、成層効果がコルモゴロフスケール以下にまで及ぶと、ポテンシャルエネルギーのスペクトルは平坦となる。これは、成層乱流のプリミティブスケールにおいて、逆勾配鉛直密度フラックスが顕著となり、ポテンシャルエネルギーが運動エネルギーへと持続的に変換されるためである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

乱流によって輸送される熱・塩分・染料といった高シュミット数のスカラーのパワースペクトルについては、Batchlor (1959)の理論的研究が定説であるが、これはスカラーが流体運動に影響を及ぼさないパッシブスカラーに対するものである。一方、浮力を介して流体運動に影響するアクティブスカラーのパワースペクトルについてはほとんど未知であった。本研究課題を通して新たに得られた知見は、液相における化学反応など、高シュミット数のスカラーが関与する様々な流れの挙動予測に寄与することが期待できる。

研究成果の概要(英文)：We have conducted direct numerical simulations of decaying turbulence in a density-stratified fluid with a Schmidt number of 700 for the first time in the world. The early spectrum of the potential energy, which is proportional to the square of the density fluctuation, shows the well-known Batchelor -1 power law. As time passes, the stratification effect extends down to the Kolmogorov scale, and the potential-energy spectrum becomes flat. That is because the counter-gradient vertical density flux becomes significant at the primitive scale of stratified turbulence, where the potential energy is converted into the kinetic energy persistently.

研究分野：流体物理学

キーワード：密度成層乱流 高シュミット数 逆勾配拡散 鉛直密度フラックス 直接数値計算 減衰乱流 バチェラー
スケール 浮力

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。

1. 研究開始当初の背景

鉛直下方ほど密度が大きい、安定な密度成層は、大気や海洋をはじめとする我々の身の回りのあらゆる流体に見られ、その運動に大きな影響を与えている。密度成層は熱や塩分などのスカラーによって形成されるが、液体中ではその分子拡散は遅く、シュミット数の値はそれぞれ、 $Sc = 7$ (熱) と $Sc = 700$ (塩分) である。これまでの密度成層流の室内実験の多くは、成層流体を容易に作成・維持できる塩分成層を用いて行われてきた。

高シュミット数の効果は、コルモゴロフ・スケール以下の小スケールに現れる。Batchelor (1959) のパッシブスカラーの乱流輸送に関する理論によれば、塩分の散逸スケール (バチェラー・スケール) はコルモゴロフ・スケールの $1/Sc^{1/2} \approx 1/30$ であり、そのような非常に小さなスケールを実験や数値計算で解像することは極めて困難である。そのため、密度成層乱流の数値計算は、ほとんどの場合 $Sc \approx 1$ に限定されてきた。その結果、多数存在する塩分成層乱流の室内実験と直接比較ができる数値計算の結果が存在しない、という状況にあった。

2. 研究の目的

本研究では、水中の塩分に相当するシュミット数 700 までの値に対して、密度成層乱流のシュミット数依存性を大規模直接数値計算により調べた。その目的は、これまで全く未知であった、コルモゴロフ・スケールよりも小スケールで起こる、高シュミット数のスカラー輸送に対する密度成層の効果をはっきりと明らかにすることである。

3. 研究の方法

周期境界を有する立方体領域中の流体運動を取り扱う。静止状態において、流体は鉛直 (z^*) 方向に一樣な密度成層を形成しているものとする ($d\rho^*/dz^* = \text{const.}$)。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一方、初期密度場には攪乱を与えなかった。

系を支配する方程式は、連続の式、ナビエ・ストークス方程式と密度攪乱の輸送方程式である。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。計算には最大で 4096^3 点の格子点を用いるが、時間が経過し、高波数成分が減衰した後は、格子点数を 2048^3 点に減らして計算を続けた。

系を支配する無次元パラメータは次の三つである：初期レイノルズ数 $Re_0 = U_0^* L_0^* / \nu^*$ 、初期フルード数 $Fr_0 = U_0^* / (N^* L_0^*)$ 、シュミット数 $Sc = \nu^* / \kappa^*$ 。ただし、 U_0^* は初期 rms 速度、 L_0^* は初期攪乱の積分長、 $N^* (= \sqrt{-(g^* / \rho_0^*) (d\rho^* / dz^*)})$ はブラント・バイサラ振動数である (g^* は重力加速度、 ρ_0^* は基準密度)、初期フルード数は、密度成層の強さの尺度である。以後、アスタリスク付きの物理量は有次元量を、アスタリスクなしの物理量は $U_0^*, L_0^*, -L_0^* d\rho^* / dz^*$ によって無次元化された量を表すものとする。

本研究では、以下の二項目について調べた。

(1) 密度成層乱流のシュミット数依存性

初期レイノルズ数を $Re_0 = 100$ 、初期フルード数を $Fr_0 = 1$ と固定し、シュミット数を $Sc = 1, 7, 70$ と変化させた。

(2) 塩分成層乱流の直接数値計算

シュミット数を、塩分に相当する $Sc = 700$ 、初期レイノルズ数を $Re_0 = 50$ と固定し、初期フルード数を $0.1 \leq Fr_0 \leq 5$ の範囲で変化させた。

4. 研究成果

(1) 密度成層乱流のシュミット数依存性

まず、ポテンシャルエネルギー (密度攪乱 ρ' の二乗に比例する量) 分布のシュミット数依存性を図 1 に示す。浮力の影響が大スケールに限定される初期には、シュミット数の差による違いが顕著に表れている (図 1 の上段)。すなわち、シュミット数が大きいほど、バチェラー・スケールは小さくなるため、より小さなスケールの密度攪乱が作られている。特に、 $Sc = 70$ における構造に注目すると、密度攪乱は薄いシート状に引き伸ばされている様子が見られる。これは、コルモゴロフ・スケールのひずみ速度により流体要素が変形することで小スケールのスカラー攪乱が生じる、という Batchelor の描像とも整合し、平均スカラー勾配をもつ等方乱流中のパッシブスカラー場の構造 (Brethouwer *et al.* 2003) とも類似している。さらに、対応するポテンシャルエネルギースペクトルには波数の -1 乗に比例する領域も確認できる。

乱れが時間とともに減衰し、鉛直運動を抑制する浮力の効果がより支配的になると、やがて大スケールの構造は水平方向に伸びた扁平な形をとるようになる (図 1 の下段)。このとき、シュミット数依存性は、減衰初期ほど顕著には見られない。 $Sc = 70$ の場合に限り、水平方向の細い筋状の構造が多数見られるが、このことは、高シュミット数の効果は鉛直構造にのみ現れ、水平構造の大きさはシュミット数にほぼ無関係となることを示している。本研究では、そのような構

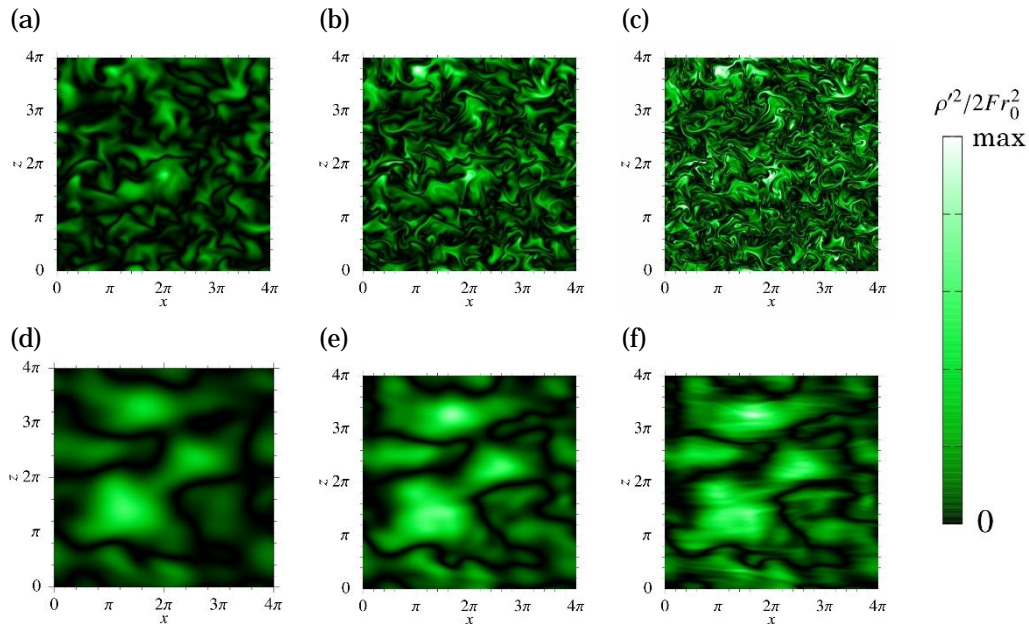


図 1 鉛直面内のポテンシャルエネルギー $\rho'^2/(2Fr_0^2)$ の空間分布。(a) $Sc = 1, t = 4$; (b) $Sc = 7, t = 4$; (c) $Sc = 70, t = 4$; (d) $Sc = 1, t = 40$; (e) $Sc = 7, t = 40$; (f) $Sc = 70, t = 40$.

造が作られる理由を、流体要素の変形が水平流の鉛直せん断に支配されている、という直接数値計算の結果に基づいた理論により説明づけた (詳細は、Okino & Hanazaki 2019)。

(2) 塩分成層乱流の直接数値計算

続いて、水中の塩分に相当する、シュミット数 $Sc = 700$ の密度成層乱流の直接数値計算を世界に先駆けて実行した。まずは、初期フルード数 $Fr_0 = 1$ に対する結果から述べる。図 2 に、浮力の影響がコルモゴロフ・スケールにまで及んだ後の時刻における、ポテンシャルエネルギーの空間分布を示す。 $Sc = 700$ の場合の特筆すべき点は、ポテンシャルエネルギーが大きな値をもつ領域は空間のごく一部に集中した、雲のような構造をしていることである。雲状構造は扁平で、その大きさは積分長程度である。さらに、個々の雲状構造は、多数の筋状の成分から形成されている。

これに対応して、ポテンシャルエネルギースペクトルにも特異な形状が現れる (図 3 a)。オズミドフ波数 (図中の黒丸: 成層効果が及ぶ最小スケールの逆数) がコルモゴロフ波数 (図中の白丸) よりも小さい時刻では、成層効果はコルモゴロフ・スケールにまで及んでおらず、コルモゴロフ波数以上で Batchelor の -1 乗則が見られる。しかしながら、時間が経過し、オズミドフ波数がコルモゴロフ波数を上回ると、ポテンシャルエネルギースペクトルに折れ曲がりが生じる。また、その折れ曲がり、コルモゴロフ波数とオズミドフ波数が一致する波数にて起こっている。なお、コルモゴロフ波数とオズミドフ波数が一致する波数は、浮力振動数 N^* と流体の動粘性

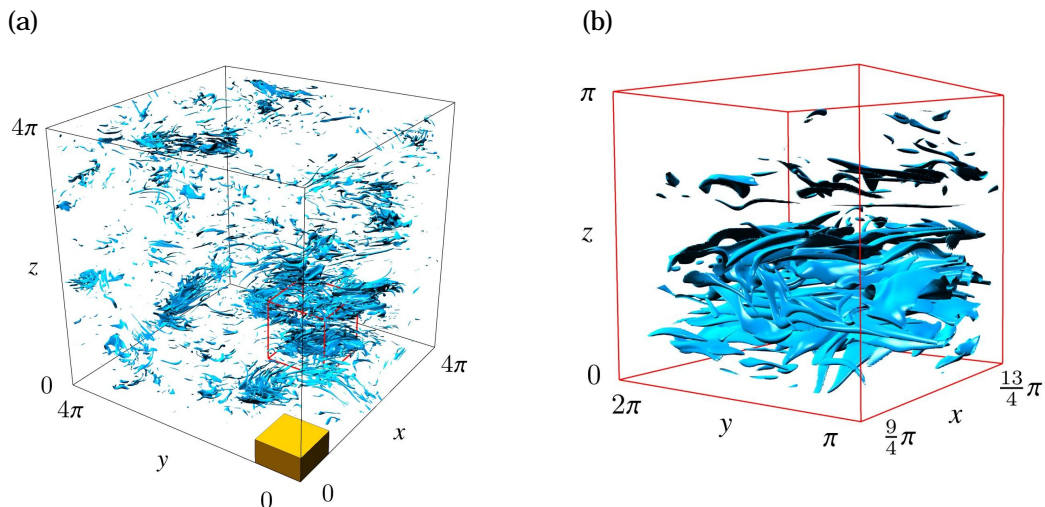


図 2 . 塩分成層乱流 ($Sc = 700$) におけるポテンシャルエネルギーの等値面 ($Fr_0 = 1, t = 20$)。 (a) の黄色い直方体の縦横と高さは、それぞれ水平方向と鉛直方向の積分長を表す。 (b) は、 (a) の赤い立方体部分の拡大図。

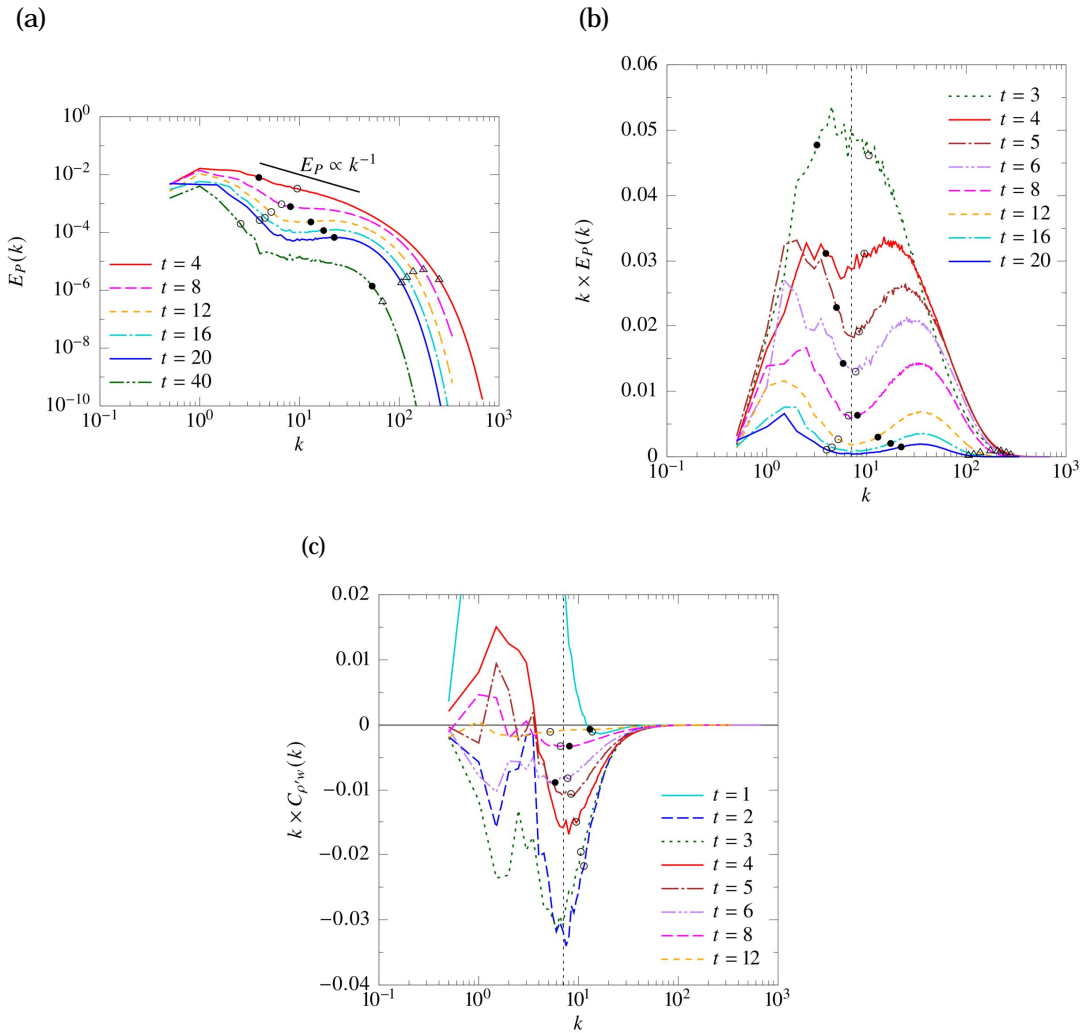


図3．塩分成層乱流 ($Sc = 700, Fr_0 = 1$) における (a) ポテンシャルエネルギースペクトル、(b) ポテンシャルエネルギーのプレマルチプライドスペクトル、(c) 鉛直密度フラックスのコスペクトル。白丸 (\circ) はコルモゴロフ波数、黒丸 (\bullet) はオズミドフ波数、三角 (\blacktriangle) はバチェラー波数を表す。鉛直破線はプリミティブ波数 $k_p = 7.1$ を表す。

係数 v^* だけで決定され、プリミティブ波数 ($k_p^* = \sqrt{N^*/v^*}$) と呼ばれる。

ポテンシャルエネルギーのプレマルチプライドスペクトル(図3b)からは、空間分布(図2)との対応を明確に見てとることができる。初期 ($t = 4$) には、 -1 乗則に対応する平坦な領域 ($k \times E_p \approx \text{const.}$) が見られるが、その後、プリミティブ波数付近のポテンシャルエネルギーは急速に減少し、大小二つのスケールにピークが生じる。低波数 ($k \sim 1.5$) のピークは雲状構造の積分長に、高波数 ($k \sim 40$) のピークは雲状構造を形成する筋の太さに対応する。つまり、プリミティブ波数付近の成分だけが限定的に欠落した結果、二つの特徴的なスケールをもつ雲状構造が現れた、ということになる。こうした現象は、 $Sc \leq 70$ の場合には見られず、コルモゴロフ・スケールとバチェラー・スケールの差が非常に大きい、超高シュミット数の成層乱流に固有の特徴であると言える。

プリミティブ波数においてポテンシャルエネルギーが減少する原因は、ポテンシャルエネルギースペクトルの収支を調べることで、逆勾配の鉛直密度フラックスにあることが分かった。すなわち、鉛直密度フラックスのコスペクトルは、プリミティブ波数において常に負の(逆勾配の)ピークをもっており(図3c)、ポテンシャルエネルギーから運動エネルギーへの変換が継続的に起こっている。なお、小スケールにおいて持続する逆勾配の鉛直密度フラックスは、水槽実験 (Komori & Nagata 1996) でも観測されている。また、プリミティブ波数において逆勾配の鉛直密度フラックスが生じる理由は、線形理論 (RDT; Hanazaki & Hunt 1996) によって説明することができる (Okino & Hanazaki 2020)。

次に、塩分成層乱流の初期フルード数依存性について述べる。初期フルード数が大きい(密度成層が弱い)場合 ($Fr_0 = 3, 5$) のポテンシャルエネルギースペクトルの振舞いは、 $Fr_0 = 1$ の場合と同様であった。一方、初期フルード数が小さいと ($Fr_0 = 0.3$)、低波数でのエネルギー変換が短時間で起こり、ポテンシャルエネルギーはコルモゴロフ波数以上の高波数へとあまり輸送されなくなる(図4a)。このことは、強い密度成層流体において、シュミット数効果が現れにくくなることを意味している。その結果、鉛直密度フラックスのコスペクトル(図4b)にも特徴が

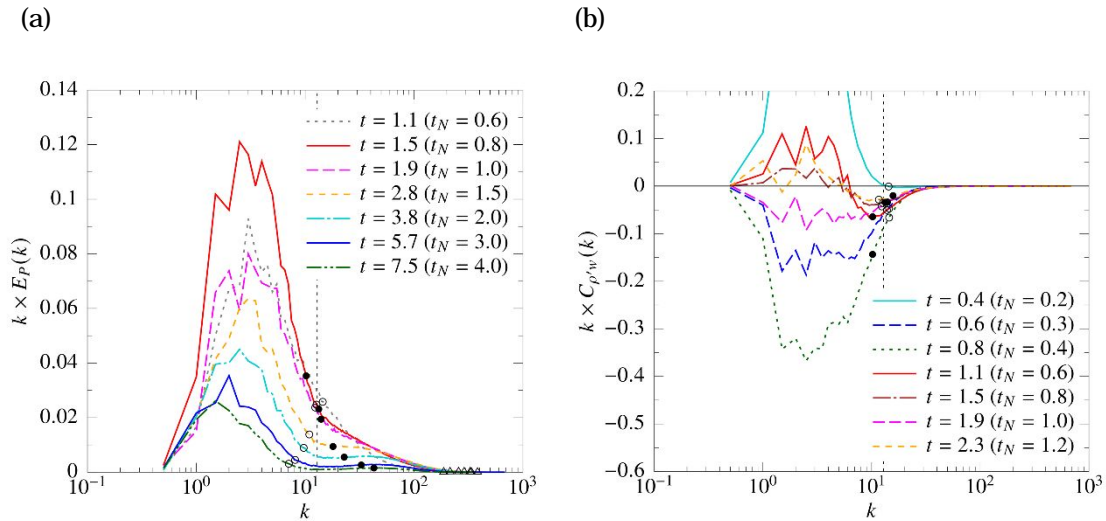


図4．初期フルード数 $Fr_0 = 0.3$ の塩分成層乱流 ($Sc = 700$) における (a) ポテンシャルエネルギーースペクトル、(b) 鉛直密度フラックスのコスペクトル。白丸(○)はコルモゴロフ波数、黒丸(●)はオズミドフ波数、三角(△)はバチェラー波数を表す。鉛直破線はプリミティブ波数 $k_p = 13$ を表す。 t_N は浮力周期によって無次元化した時間 ($t_N = N^*t^*/(2\pi) = t/(2\pi Fr_0)$) である。

表れる。すなわち、低波数 ($k \sim 2$) における時間的な振動(浮力振動)の振幅に比べ、プリミティブ波数付近における逆勾配フラックスのピークは非常に小さく、小スケールにおけるポテンシャルエネルギーから運動エネルギーへの持続的な変換がほとんど起こっていないことが分かる。

<引用文献>

- Batchelor, G. K., Small-scale variation of convected quantities like temperature in turbulent fluid. Part 1. General discussion and the case of small conductivity, *J. Fluid Mech.* 5 (1959) 113-133.
- Brethouwer, G., Hunt, J. C. R. & Nieuwstadt, F. T. M., Micro-structure and Lagrangian statistics of the scalar field with a mean gradient in isotropic turbulence, *J. Fluid Mech.* 474 (2003) 193-225.
- Okino, S. & Hanazaki, H., Decaying turbulence in a stratified fluid of high Prandtl number, *J. Fluid Mech.* 874 (2019) 821-855.
- Komori, S. & Nagata, K., Effects of molecular diffusivities on counter-gradient scalar and momentum transfer in strongly stable stratification, *J. Fluid Mech.* 326 (1996) 205-237.
- Hanazaki, H. & Hunt, J. C. R., Linear processes in unsteady stably stratified turbulence, *J. Fluid Mech.* 318 (1996) 303-337.
- Okino, S. & Hanazaki, H., Direct numerical simulation of turbulence in a salt-stratified fluid, *J. Fluid Mech.* 891 (2020) A19.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Okino Shinya, Hanazaki Hideshi	4. 巻 874
2. 論文標題 Decaying turbulence in a stratified fluid of high Prandtl number	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 821 ~ 855
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/jfm.2019.471	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Okino Shinya, Hanazaki Hideshi	4. 巻 891
2. 論文標題 Direct numerical simulation of turbulence in a salt-stratified fluid	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/jfm.2020.146	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Okino Shinya, Hanazaki Hideshi	4. 巻 -
2. 論文標題 Decaying turbulence in a salt-stratified fluid	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 11th 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14件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 沖野真也
2. 発表標題 塩分成層流体における減衰乱流の直接数値計算と室内実験
3. 学会等名 京都大学数理解析研究所研究集会「乱流の普遍性：空間次元依存性」（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 塩分成層乱流における小スケールの塩分攪乱の統計的振る舞い
3. 学会等名 第98期日本機械学会流体工学部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村葵、沖野真也、花崎秀史
2. 発表標題 成層せん断乱流の直接数値シミュレーションと線形過程
3. 学会等名 第98期日本機械学会流体工学部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 沖野真也、花崎秀史
2. 発表標題 高プラントル数の成層乱流における逆勾配密度フラックス
3. 学会等名 日本流体力学会年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村葵、沖野真也、花崎秀史
2. 発表標題 成層せん断乱流の直接数値シミュレーション
3. 学会等名 日本流体力学会年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 水上奏一郎、今西雄暉、沖野真也、花崎秀史
2. 発表標題 密度成層流体中に励起した格子乱流の速度場・密度場同時計測
3. 学会等名 日本流体力学会年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 沖野真也、花崎秀史
2. 発表標題 高プラントル数のスカラーが形成する密度成層流体中の減衰乱流
3. 学会等名 第56回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 沖野真也、花崎秀史
2. 発表標題 塩分成層乱流のフルード数依存性
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Okino & H. Hanazaki
2. 発表標題 Decaying turbulence in a salt-stratified fluid
3. 学会等名 11th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP11) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Hanazaki & S. Okino
2. 発表標題 Decaying turbulence in a stratified fluid generated by a high-Prandtl-number scalar
3. 学会等名 17th European Turbulence Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今西雄暉, 高橋充, 沖野真也, 花崎秀史
2. 発表標題 成層流体における格子乱流の速度場及び密度場
3. 学会等名 第55回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 沖野真也, 花崎秀史
2. 発表標題 塩分成層流体における減衰乱流
3. 学会等名 日本流体力学会年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今西雄暉, 高橋充, 沖野真也, 花崎秀史
2. 発表標題 減衰する成層乱流の速度場と密度場の計測
3. 学会等名 日本流体力学会年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 沖野真也, 花崎秀史
2. 発表標題 塩分成層流体における塩分攪乱の局在化
3. 学会等名 2018年度日本機械学会年次大会
4. 発表年 2018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

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