

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月24日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22360078

研究課題名（和文） 成層乱流中のアクティブスカラー多重拡散

研究課題名（英文） Multiple diffusion of active scalars in stratified turbulence

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

研究成果の概要（和文）：

分子拡散係数の異なる2つの物質が共存する成層乱流中の乱流拡散を、水槽実験、数値計算、及び、乱流理論により解析した。水槽実験においては、屈折率の一様化、乱流格子の改良などにより、従来の数倍の時間にわたって乱流統計量の測定に成功した。これにより、運動エネルギーと位置エネルギーの時間周期的な交換、鉛直密度フラックスの振動現象を明確に捉えることに成功した。

研究成果の概要（英文）：

Turbulent diffusion in stratified turbulence with two different molecular diffusion coefficients has been investigated by water tank experiments, numerical simulations and the rapid distortion theory. In water tank experiments, the method of reflective index matching is established, and a new shape of turbulence grid has been developed to measure the statistics of turbulence for a several times longer period than the previous studies. Then, the periodic exchange of kinetic and potential energy and the oscillation of vertical density flux could be clearly observed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	10,600,000	3,180,000	13,780,000
2011年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2012年度	2,100,000	630,000	2,730,000
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：成層乱流、レーザー誘起蛍光法、粒子画像計測法

1. 研究開始当初の背景

分子拡散係数の異なる2つの物質が共存する系における乱流拡散は、結晶合成、高分子溶液系、燃焼、海洋大循環など、工学・環境問題をはじめとする多くの系において重要である。例えば、約1500年をかけて全海洋を循環する深層海洋大循環は、地球温暖化を始めとする長期の気候変動を支配しているが、海洋大循環モデルで最も重要な、熱塩

二重拡散系における熱($Pr = 6$)と塩分($Pr = 600$)の乱流拡散係数は、観測に基づく経験式に頼っており、気候モデルの最大の誤差要因となっている。

2. 研究の目的

本研究では、熱・塩分・浮遊砂塵のような密度成層の形成に寄与するアクティブスカラーが2種類存在する場合を含めた、成層乱流

中のスカラー多重拡散を、水槽実験 (PIV, LIF)、数値計算 (直接数値シミュレーション)、及び、RDT 乱流理論 (Rapid Distortion Theory) により解明する。例えば、複数アクティブスカラーが持つ、多重散逸スケール効果、相互作用効果、多重成層効果による乱流構造の特異性を解析し、それらが実用上重要なマクロな統計量である乱流スカラー拡散係数や位置エネルギー・運動エネルギーに与える影響を解明し、多重拡散乱流モデル構築のキーポイントを解明する。

3. 研究の方法

(1) 水槽実験

密度場と速度場の同時測定を、レーザーシート光を用いて、鉛直断面、及び、水平断面について行う。密度場の測定にはレーザー誘起蛍光法 (LIF) を用いる。具体的には、蛍光染料を塩分と比例した濃度で初期に流体に溶かし、蛍光強度を測定することによりその濃度を測定する。その染料濃度と塩分濃度が比例することを利用し、塩分濃度、すなわち、流体密度を測定する。速度場の測定には PIV (粒子画像計測法) を用いる。ハーフミラーを用いて光を2つに分け、2台の CCD カメラを用いて、LIF と PIV の同時測定を行う。例えば、鉛直に立った乱流格子を水平移動させ、鉛直断面内の流れについて測定を行い、鉛直運動エネルギー、密度攪乱による位置エネルギー、鉛直密度フラックス、及び、それらのスペクトルの時間変化を解析する。

(2) 数値計算

スペクトル法による直接数値シミュレーションを、立方体内で3方向周期境界条件のもとで行う。

(3) 理論

成層乱流に対して RDT (急速変形理論) を適用する。この理論は、支配方程式における浮力の線形効果に着目し、任意の初期条件に対する非定常解を求めるものである。

4. 研究成果

本研究では、密度成層の形成に寄与するアクティブスカラー、あるいはパッシブスカラーが、2種類存在する成層乱流中のスカラー多重拡散を、水槽実験、数値計算、及び、乱流理論により解析した。

(1) 水槽実験

まず、成層流体を作成する際、流体内部の「屈折率の一樣化」の手法を確立した。成層流体では深さによって密度が異なり、それによって光の屈折率が変化し、レーザー光が直進しないという問題が生じる。本研究ではそ

れを避けるため、「屈折率の一樣化」の手法を確立した。具体的には、塩水と真水を混ぜて成層流体を生成する際、初期に塩水に一定濃度のエチルアルコールを混ぜ、タンク内の塩分濃度増加・温度低下による屈折率の増加をアルコール濃度の低下で相殺し、試験水槽に入る塩水の屈折率を常に一定に保つ手法を確立した。

次いで、実験に用いる蛍光染料の選定を行った。当初は、パルスレーザーである Nd-YAG レーザー (波長 532nm) を用いる予定であったため、その波長に対応するローダミン 6G を用いる予定であった。しかし、パルスレーザーは 1% 程度の出力不安定が避けられないことがわかったため、連続発振の固体 CW レーザー (488nm) に変更した。それに伴い、染料をピロメテン 556 に変更したが、レーザー光の長時間照射による光脱色 (Photobleaching) が無視できないレベルで見られ、精度の点ではなお不十分であった。そのため、さらに染料を変更し、ローダミン 110 (吸収波長 496nm, 蛍光波長 520nm) を用いることとした。

上記の手法の確立の結果、従来の回流水槽や風洞を用いた実験と比べ、浮力振動の周期を単位とする浮力時間で数倍の時間にわたって実測することに成功した。それにより、運動エネルギーと位置エネルギーの時間周期的な交換、鉛直密度フラックスの振動現象、及び、それらの位相のずれ、を明確に捉えることに成功した。さらに、従来、乱流生成のために格子を移動させると初期の成層場が変化してしまう問題が知られ、これにより、繰り返し実験によるアンサンブル平均が困難となっていたが、移動格子を改良すること、その問題を解決できた。

(2) 数値計算

2つのスカラーが密度成層に均等に寄与する場合など、典型的な場合についての解析を行った。エネルギー収支の解析により、複数アクティブスカラー S と T の存在により生じる位置エネルギーが、運動エネルギー KE、及び、位置エネルギーの総和 PE を構成する他の2種の位置エネルギーと相互作用する過程を解析した。また、複数スカラーが存在する場合のシュミット数あるいはプラントル数の違いによる変化を調べた。

また、成層乱流中で流体に乗って動くパッシブな粒子の運動をラグランジュ的に追跡し、粒子拡散のプラントル数 Pr、レイノルズ数 Re 依存性についての解析を行った。その結果、ラグランジュ的な水平拡散は Pr に依存しないが、鉛直拡散においては、分子拡散が効いてくる長い時間スケールでは Pr 依存性が現れ、高プラントル数の方が鉛直変位の2乗平均が小さくなることなどがわかった。

(3) 乱流理論

乱流理論に関しては、複数のスカラーが存在する場合の成層乱流に対する RDT 理論を構築し、数値解を求めると同時に、数値計算結果のプラントル数依存性を RDT 理論を用いて説明することができた。

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 3 件)

(1)H. Hanazaki & S. Nakamura, Numerical simulation of jets generated by a sphere moving vertically in stratified fluids. Bulletin of the American Physical Society. 査読無, vol. 57 (17), 2012, p.144.

(2)H. Hanazaki, K. Shimobata & H. Yoshikawa Generation of a buoyant jet by a sphere moving vertically in a stratified fluid. Bulletin of the American Physical Society, 査読無, vol. 56 (18), 2011, pp. 208.

(3)H. Hanazaki, H. Yoshikawa & T. Okamura, Generation of a jet by a sphere descending in stratified fluids. Bulletin of the American Physical Society, 査読無, vol. 55 (16), 2010, p.270.

[学会発表] (計 13 件)

(1)間野洋嗣, 花崎秀史, 減衰する成層乱流の鉛直構造. 第 90 期日本機械学会流体工学部門講演会, 同志社大学, 2012 年 11 月 17 日~2012 年 11 月 18 日, 同志社大学, 京都.

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

(3)土田善幸, 花崎秀史, 成層乱流中の粒子拡散京都大学工学研究科高等研究院 流体理工学研究部門 第 4 回公開セミナー. pp. 33-38, 2012. 3. 2, 京都大学.

(4)H. Hanazaki (招待講演), Generation of a jet by a sphere moving vertically in stratified fluid. Japan-Korea CFD Workshop in 25th Symposium of Computational Fluid Dynamics, 2011. 12. 20, Osaka University.

(5)土田善幸, 花崎秀史, 減衰する成層乱流の数値シミュレーション, 第 25 回数値流体力学シンポジウム, 2011. 12. 19, 大阪大学コンベンションセンター.

(6)K. Shimobata, H. Yoshikawa & H. Hanazaki, Numerical study of a jet generated by a sphere moving vertically in stratified fluids. The Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow -2011, 2011. 9. 23, Kyoto.

(7)H. Hanazaki, K. Shimobata & H. Yoshikawa, Vertical jet generated by a sphere moving vertically in stratified fluids. 7th International Symposium on Stratified Flows. 2011. 8. 25, Rome, Italy.

(8)花崎秀史 (招待講演), 安定に密度成層した流体の流れ. 第 6 回非線形テクノサイエンス講演会, 2011 年 3 月 30 日, 大阪大学.

(9)土田喜幸, 花崎秀史, 減衰する成層乱流中のスカラー拡散とスペクトル. 日本機械学会関西支部第 86 期定時総会講演会, 2011 年 3 月 20 日, 京都.

(10)加畑精一, 花崎秀史, 減衰する成層乱流中の塩分濃度場の測定. 日本機械学会関西支部第 86 期定時総会講演会, 2011 年 3 月 20 日, 京都.

(11)津田慎也, 岡村徹, 花崎秀史, 成層乱流中の塩分濃度場と速度場. 第 88 期日本機械学会流体工学部門講演会, 2010 年 10 月 30 日, 米沢.

(12)H. Hanazaki & H. Yoshikawa, Generation of jets by a sphere moving vertically in stratified fluids. 10th Kyoto-Seoul-Tsinghua Three Asian University Thermal Engineering Conference. 2010. 10. 24, Beijing, China.

(13)H. Hanazaki & T. Okamura, Vertical jet generated by a sphere descending in stratified fluids. The 8th Euromech Fluid Mechanics Conference. 2010. 9. 15, Bad Reichenhall, Germany.

[その他]

ホームページ:

<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

宮崎 武 (MIYAZAKI TAKESHI)
電気通信大学・電気通信学研究科・教授
研究者番号：50142097