

様式 C-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成22年5月24日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2009

課題番号：19360084

研究課題名（和文）熱塩二重拡散系の成層乱流におけるスカラー散逸構造の非相似性

研究課題名（英文） Dissimilar scalar dissipation structures in stratified turbulence with differential diffusion of heat and salinity

研究代表者

花崎 秀史（HANAZAKI HIDESHI）

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60189579

研究成果の概要（和文）：

直接数値シミュレーション、塩水水槽実験、および、RDT 理論により、成層流体にパッシブスカラーを加えた系、及び、アクティブスカラーが2種ある系における、スカラースペクトルの速度場スペクトルとの非相似性の起源を調べた。その結果、オズミドフスケールがコルモゴロフスケールよりも小さければ、アクティブスカラーの攪乱がコルモゴロフスケール近傍で散逸することがわかった。

研究成果の概要（英文）：

The origin of dissimilarity between scalar and velocity spectra in stratified turbulence has been investigated by direct numerical simulation, stratified tank experiments and rapid distortion theory when there is a passive scalar or when there are two active scalars. The results show that when the Ozmidov scale is smaller than the Kolmogorov scale, variance of the active scalar dissipates near the Kolmogorov scale.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	8,300,000	2,490,000	10,790,000
2008年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
年度			
年度			
総計	15,300,000	4,590,000	19,890,000

研究分野：環境流体工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：成層流体、乱流熱物質輸送

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。このうち例えば、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($Sc=600$)の乱流拡散係数は、経験式に依存しており、気候モデルの一つの大きな不確定要因となっている。

本研究では、熱と塩分など、分子拡散係数の異なる2種類の物質によって密度成層した流体中のスカラー拡散を、大規模数値計算、塩水水槽実験、理論によって総合的に解明する。こうした二重拡散成層流体におけるスカラーのカスケード・散逸構造とその輸送との関連はこれまで全く未知であり、その解明は、気候モデルの改良の他、結晶成長制御、燃焼機構の解明につながる。

2. 研究の目的

研究開始前、研究代表者は、二重拡散成層流体において、浮力を通じて速度場に影響を与えるアクティブスカラーと、速度場に追従するパッシブスカラーでは、分子拡散係数が同じであってもその微細構造やスペクトルに大きな違いがあることをDNSにより発見した。高シュミット数のパッシブスカラーのスペクトルは、高波数まで減衰しないが、高アクティブスカラーのスペクトルは、運動エネルギースペクトルと同等の波数(Kolmogorovスケール)で減衰してしまう。

これは、過去半世紀にわたって定説とされてきたG. K. Batchelorによる「スカラー拡散の相似性」が、パッシブスカラーについては成立するが、アクティブスカラーでは成立しないことを示している。

以上のことを踏まえ、本研究では、Kolmogorovスケール近傍におけるカスケード・散逸構造を解析すると同時に、それらが

実用上重要なマクロな量である乱流スカラー拡散係数(フラックス)やレイノルズ応力に与える影響を解明する。

明らかにすべき点としては、例えば、

(1) 二重拡散流体でない通常の成層流体でも非相似性は現れるか?

(2) 非相似性の現れる原因の解明

(3) 非相似性が乱流拡散係数(スカラーフラックス)に与える影響などが挙げられる。

(1)は、二重拡散系のみならず、成層を作るアクティブスカラーが一種類の通常の成層流体でも非相似性が成立するかの検証である。これまで世界で行われてきた成層乱流のDNSは殆どすべて $Pr=1$ に対してのものであり、速度場とスカラー場のスペクトル差はほとんど出現しない状況での結果である。しかし、通常の成層乱流でも、二重拡散系と同様の非相似性が生じると予測される。

その根拠は、上記課題(2)で解明する予定の「非相似性の現れる原因」にある。成層流体では、運動エネルギーの他に位置エネルギーが存在し、両者がエネルギーを成層の強さに比例する浮力振動数で周期的にやりとりする。それによって、実験やDNSで従来観測されてきたような熱フラックスの時間振動、あるいは逆勾配拡散(熱フラックスの向きの逆転)が生じる。このエネルギー交換の存在により、アクティブスカラーが持つ位置エネルギーは、運動エネルギーがKolmogorovスケールで減衰するのに伴い散逸してしまうと考えられる。これにより、アクティブスカラーはKolmogorovスケール以下の小スケールでは存在できなくなると考えられる。

課題(3)は、応用上最も重要である。二重拡散乱流においては、2つのスカラーの乱流拡散係数は等しくとられることが多い。海洋大循環モデルにおいても、渦拡散モデルにおいて温度と塩分に同じ値が用いられている。しかし、それは高レイノルズ数の極限でのみ成立する。現実の海洋でも実質的なレイノルズ数は意外に小さく、分子拡散の効果は無視できないと考えられるようになってきている。結晶合成などの工学応用においてはレイノルズ数が低いいため、分子拡散の効果は

さらに重要である。本研究では、スカラー散逸の非相似性が乱流拡散係数に与える影響を解明し、乱流モデルの改良に寄与する。

3. 研究の方法

(1) DNS

スペクトル法による直接数値シミュレーションを周期境界条件のもとで行う（一様だが非等方性の乱流）。まず、通常の成層流体（アクティブスカラーのプラントル数 $Pr \gg 1$ ）にパッシブスカラーを加えた系を対象とする。

いくつかの特徴的な例を中心に計算を行い、非相似性の起源とその性質を解明する。なお、スペクトル法の空間解像度は、 Pr , Sc の値に応じて、 256^3 , 512^3 , 1024^3 の3種類を用いる。

(2) 塩水水槽実験

塩分成層流体（鉛直密度勾配一定）を用いた水槽実験を行う。塩分成層作成には、2タンク法を用いる。塩水タンクと真水タンク B と試験水槽の底を直列につなぎ、タンク B から試験水槽への定量ポンプによる送出につれて、タンク A の塩水がタンク B に流入し、タンク B の塩分濃度、したがって、試験水槽に流入する塩分濃度が上昇する。これにより、鉛直密度勾配（塩分濃度勾配）が一定の成層流体が作成できる。

次に、鉛直方向に縦に伸びた平板で作成した柵（熊手のような形状）を水平移動させて乱れを生成し、水槽の中央付近での速度場、塩分濃度場の時間発展を、PIV 法、LIF 法によって計測する。

また、成層流体では深さによって密度が異なり、それによってレーザー光の屈折率が変化して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、refractive index matching を行う。具体的には、タンク B に初期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の増加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（深さによらず）常に一定に保つ。

(3) RDT 理論 (Rapid Distortion Theory) 成層流体に対する RDT 理論は、浮力効果（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り、特に、成層の強い場合に DNS や実験との一致が良好であることが知られている。成層流体中のパッシブスカラー拡散に関する RDT 理論を用いて、初期スペクトル形などの詳細まで DNS と完全にそろえた条件下でエネルギー、フラックス、スペクトルとその時間変化を比較し、RDT 理論の適用性を確認しながら、同時に DNS、水槽実験の結果の解釈を行う。

4. 研究成果

(1) DNS

DNS による、通常の成層乱流+パッシブスカラーの構造の解明のため、スペクトル法による直接数値シミュレーションを周期境界条件のもとで行った（一様だが非等方性の乱流）。まず、通常の成層流体にパッシブスカラーを加えた系を対象とし、特徴的な例を中心に、非相似性の起源とその性質を解明した。成層の強さ（フルード数 Fr 依存性）による非相似性の変化を検証した。また、成層乱流に特有のオズミドフ (Ozmidov) スケールと非相似性の関連を調べた。成層乱流では、Ozmidov スケールが重要である。Ozmidov スケールは、浮力項と慣性項の大きさが釣り合うスケールであり、それより大きいスケールでは浮力効果が卓越する。(Ozmidov スケール) < (Kolmogorov スケール) の場合には、速度場が全てのスケールで浮力の効果を強く受けると考えられ、同時に非相似性の主要な原因となることを示した。

次に、アクティブスカラーが2種ある場合についての解析を行った。その結果、成層がある程度強く、オズミドフスケールがコルモゴロフスケール（運動エネルギーが散逸するスケール）よりも小さければ、浮力による位置エネルギーが運動エネルギーに変換されてしまうことにより、アクティブスカラーの位置エネルギーも運動エネルギーと同じコル

モゴロフスケール近傍で散逸することがわかった。

(2) 塩水水槽実験

塩分成層流体（鉛直密度勾配一定）を用いた水槽実験を行った。塩分成層作成には、2タンク法を用いた。次に、乱流格子を水平移動させて生成した乱れについて、水槽の中央付近での速度場、塩分濃度場（蛍光染料ウラニン）の時間発展を計測した。特に、LIF（レーザー誘起蛍光法）を用いたパッシブスカラー（蛍光染料）の variance のスペクトルの測定法の確立し、運動エネルギースペクトルとのスペクトル形の比較を行うことに成功した。その結果、アクティブスカラーは、高シュミット数のパッシブスカラー ($Sc=600$) とは異なる散逸スケールを持つことを示唆する結果を得られた。これは、直接数値計算の結果を支持するものである。

塩分濃度に比例する蛍光染料の濃度を測定することにより、染料の蛍光強度分布から塩分濃度分布を換算・推定した。ただし、LIFの定量的な信頼性を上げるためには、レーザー強度の時間安定性、空間的安定性のより詳細な解析が必要であることも同時に示唆された。

(3) RDT 理論

RDT 理論 (Rapid Distortion Theory) による解析として、成層流体中のパッシブスカラー拡散に関する RDT 理論を用いて、初期条件を DNS と完全にそろえた条件下でのエネルギー、フラックス、スペクトルを計算し、その適用性の確認と、DNS、水槽実験の結果の解釈を行った。また、DNS の結果をもとにして、成層の強さがどの程度弱ければ Batchelor の相似則が成立するか (RDT 理論の成立条件) についての詳細な検討を行い、同時に DNS との直接比較を行った。その結果、基本的にはフルード数 Fr が小さい場合に、RDT 理論が定量的に妥当な結果を与えることを明らかにした。

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 8 件)

H. Hanazaki, T. Miyao & T. Okamura, Double-period oscillation of passive scalar flux in stratified turbulence. *Advances in Turbulence*, 査読有, vol.12, 2009, pp. 447-448.

H. Hanazaki, Slowly oscillating modes in the passive scalar diffusion in stratified turbulence. *Physics of Fluids*, 査読有, vol.20, 2008, 055106.

H. Hanazaki, Effects of the slow modes in the differential diffusion in stratified sheared turbulence. *Proc. IUTAM Symposium on Computational Physics and New Perspectives in Turbulence*, 査読有, 2008, pp. 397-401.

[学会発表] (計 8 件)

H. Hanazaki & T. Okamura, Slow oscillation of passive scalar fluxes in stratified turbulence. 62th Annual Meeting of the American Physical Society Division of Fluid Dynamics. 2009年11月22日, ミネアポリス, アメリカ合衆国.

H. Hanazaki, K. Konishi & T. Miyao, Absence of small-scale fluctuations of high-Prandtl number buoyant scalars in stratified turbulence. 7th EUROMECH Fluid Mechanics Conference, 2008年9月15日, Manchester, UK

H. Hanazaki, K. Konishi & T. Miyao, Absence of small-scale fluctuations of high-Prandtl number scalars in stratified turbulence. 22nd International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 2008年8月26日, Adelaide, Australia.

H. Hanazaki & K. Konishi, Differential diffusion in double-diffusive stratified

turbulence. The 11th European Turbulence Conference, 2007 年 6 月 25 日, Porto, Portugal.

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・准教授
研究者番号：60189579

(2) 研究分担者

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

(H20→H21：連携研究者)

(3) 連携研究者

無し