

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 27 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23740354

研究課題名(和文) 二重拡散対流による層状構造の発生と発展

研究課題名(英文) Dynamics and structure of double-diffusive intrusions

研究代表者

野口 尚史 (Noguchi, Takashi)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：10447906

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)：異なる温度・塩分を持つ水塊が接する熱塩前線面では二重拡散対流という微細な対流現象が生じ、両側の水塊が薄い層に分かれて互いに貫入しあう。水平混合の担い手である貫入は海洋循環の理解に重要であると考えられている。

本研究では、まず貫入層の内部の運動を理解するため、理論的なモデルを作った。フィンガー対流・拡散型対流・循環による鉛直シアの3つの素過程による密度輸送の関係式を組み合わせ、層の時間発展を定性的に説明できた。また、貫入層の先端で変形された成層を初期場とした対流の発生についても数値的に調べた。室内実験では微細なフィンガー対流を解像する観察を行なうため、レーザーを用いた光学的観測を試みた。

研究成果の概要(英文)：The interior dynamics of the double-diffusive intrusions emerge from a thermohaline front is investigated using numerical simulations, theoretical modelling, and laboratory experiments. In the two-dimensional direct numerical simulations which can explicitly resolve finger and diffusive convections, a reversal of the slope of the intrusions is observed as the compositional density differences across the front increases. These results are also confirmed in the laboratory version of the experiments, which use two sugar and salt stratifications. A mechanistic model of intrusive layers was devised by parameterising small-scale convective transports in terms of large-scale quantities. An attempt of laser scattering observation was also made in the laboratory tank to detect temporal evolution of fingers.

研究分野：地球流体力学

キーワード：混合 対流 二重拡散対流

様式 C-19、F-19、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 二重拡散対流とは、分子拡散係数が異なる2つの成分によって密度成層している流体で生ずる対流運動であり、全体が静力学的に安定な密度成層をしていてもいずれか片方の成分による密度成層が不安定な成層をしていれば生じるのが特徴である。不安定成層しているのが拡散が速い方の成分(海洋の場合は熱)の場合を拡散型対流(Noguchi and Niino, 2010a,b)、遅い方の成分(塩分)の場合をフィンガー対流と呼ぶ。

例えば黒潮と親潮のように異なる水塊が接する海域は、多くの場合、水平方向に密度はほぼ等しいが温度と塩分とが勾配を持った「熱塩前線」になっている。このような前線は静力学的には安定だが二重拡散対流に対して不安定となり、両側の水塊が多数の層に分かれて相互に貫入する運動が生じることが知られている。貫入層の内部は細長いフィンガー対流が埋めつくし、層どうしは拡散型対流が作るシャープな密度境界面によって仕切られている(図1)。貫入層が作られると、物質の水平混合効率が大きく増加するだけでなく、鉛直拡散係数も大きく変化する。したがって、層構造自身はスケールは小さくとも、深層循環に伴う湧昇や中層水の形成など海洋の基本過程に大きな影響を与え、層構造の空間構造とその振舞いを知ることが中規模・大規模の海洋循環の理解にとって重要な課題であった。

またこの貫入運動は、貫入層の厚さに比べてはるかに微細な規模のフィンガー対流や拡散型対流の集成的な密度輸送により駆動されており、スケールが大きく隔たった現象どうしの強い相互作用の結果生ずる現象という意味で物理学的視点からも非常に興味深い問題である。

実際の海洋での層状構造は、水平方向に数 km 程度の連続性を持つことが多いと考えられているが、従来はその構造を短時間に3次元的に観測する手段がなく、実態は明らかにならなかった。ところが近年、研究代表者は海洋地質学の研究者らと共同観測を行ない、海水中の密度の層状構造

を反射法地震探査によって可視化できることを示した(Tsuji *et al.*, 2005; Nakamura *et al.*, 2006; 湊ら, 2009)。反射法地震探査とは、音波が物質の境界面で反射する性質を利用して、海底下の地層構造を調査するための手法である。研究代表者のグループでは親潮・黒潮のフロント面で観測を行っていた。同時期に海外でも複数のグループがこの手法による観測を開始するなど、地質学と地球流体力学との分野横断的研究がさかんになってきていた。とくに meddy と呼ばれる、地中海から流出した高温高塩水がレンズ状の渦となって大西洋をさまよう現象が注目を集めていた。この渦の辺縁は熱塩フロントになっており、フロントでの混合はこの渦の寿命をコントロールしていると考えられるため、貫入の輸送特性は重要であった。

これらの観測がもたらす新しい結果によって熱塩フロントでの貫入現象は再び注目を集めはじめていたが、そのメカニズムは明らかになっていない点が多く残されており、次節で述べるように、申請者は基礎的過程に関して数多くの問題を提案した。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、まず貫入現象を室内実験・数値実験によって再現し、その観察・解析を行なう。基本的には、塩と砂糖を用いた室内実験および2次元の直接数値シミュレーションで再現が可能になっていた。本研究課題では、高精度に成層を作成・計測できる室内実験装置を開発すること、数値計算コードの高精度化を行ない、理想化した状況での貫入現象を再現することを初期段階の目標としていた。そしてこれらの研究基盤をもとに以下の具体的な課題を考察することが目的であった。

(1) 鉛直シア中での二重拡散対流

2次元数値実験で再現された貫入層では、微細なフィンガー対流が層内の水平流で傾けられているのが分かる(図1)。実際は3次元性によりフィンガー対流は単に傾いただけでなく‘鉛直シア流中のロール状対流’の構造をもっているはずである。このため2次元の実験では密度の鉛直輸送などが

正しく評価できていない可能性があるが、これまで現実的な解像度での3次元の実験は行なわれていない。本課題ではシアが二重拡散対流による鉛直輸送をどのように変化させるのかまず調べた。

(2) 貫入層スケールでの鉛直・水平密度フラックス大きいスケールで見れば、水平貫入はフロントの両側での流体の組成だけで規定される運動である。フロントを挟んでの溶質の濃度差および鉛直成層の強さをパラメータとしたときに平均的な輸送がどう表わされるか、パラメータ表現を求めることを次の目的とした。

(3) スケール間の相互作用の数理モデルの提案
フィンガー対流の密度輸送は鉛直シアによって変わることは上で述べたが、水平貫入においてはこの鉛直シア自体が二重拡散対流の集合的な密度輸送によって駆動されている。したがってスケールの異なるこれら2つの流れの強さは何らかのパラメータ表現をもとにして、簡単なメカニスティックなモデルにまとめられる可能性がある。数値データの単なるフィッティングではなく、むしろ物理的意味のはっきりした表現を用いることで、見通しが良い結果を得ることを目的とした。

(4) フィンガー対流の集合不安定
フィンガー対流自体の振舞いで、より詳しく調べるべき課題が残っている。フィンガー対流は鉛直に細長いセル状の対流運動であるが、集合不安定と呼ばれる座屈のような不安定を起こして崩壊するため、ある長さにまでしか成長できないと考えられている(図1でも各層の中央高さあたりに屈曲したフィンガー対流が見られる)。鉛直でないフィンガーの密度輸送特性はまだ良く分かっていない。運動量も輸送されると考えられているが、これも良く分かっていない。実際の現象(室内実験)でフィンガー対流の振舞いを調べることも目的であった。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、まずフィンガー対流・拡散型対流を解像する2次元鉛直面での直接数値シミュレーションを用いて、理想的な状況での貫入現象を再現し、貫入層の構造の詳細な描像を得る。それに

基き、水平貫入層の単純化モデルを提案する。

(2) 本研究の二重拡散対流のように2種類の溶質(あるいは温度)の分子拡散係数の違いにより運動が生じるような系では、数値シミュレーションはどちらの拡散も陽的に取り扱うほうが良く、計算は(陰解法を用いる場合と比べて)時間がかかる。また、現象が、拡散が支配的な微小スケールと、それを多数含む大スケールの相互作用として起こるため、微小スケールを解像しつつ大スケールを計算領域に収めねばならない。このため、計算速度が速くメモリが大きい計算サーバを購入した。

(3) アクリル製水槽中に食塩と砂糖を溶質とした密度成層を作り、シャドウグラフなどの可視化によって対流運動を観察する。微細なフィンガー対流と大規模流れによるせん断の関係を調べる。

4. 研究成果

(1) 数値シミュレーションの結果から、熱塩フロントを挟んでのT,Sの差が小さいときと大きいときでは生じる貫入層の内部の対流の構造が大きく異なることが確かめられた。また、微細運動が大スケールの運動を駆動する密度輸送の詳細な過程が明らかになった。とくに、フィンガー対流による鉛直密度輸送で運ばれた密度アノマリが層の内部の循環で水平に輸送されるというこれまでの描像は正しくなく、むしろせん断で傾けられたフィンガー対流による水平輸送が卓越していることが分かった。これらの結果について国際学会および国内学会で発表した。

(2) 次に、(1)で得られた新たな描像を元に、準定常な層内での対流による輸送のバランスを簡単な数理モデリングを行なって調べることができた。まず貫入する層の内部の微細スケール対流と層の傾き・層内の循環との関係を理解するため、理論的なモデルを作った。これは素過程であるフィンガー対流・拡散型対流・循環による鉛直シアの3者による集合的な密度輸送の関係式を既存の理論を用いて表現し、それらを結び付けたものである。二重拡散対流による輸送は熱対流の理論の拡張と考えた。また変形を受けるフィンガーは臨界安定

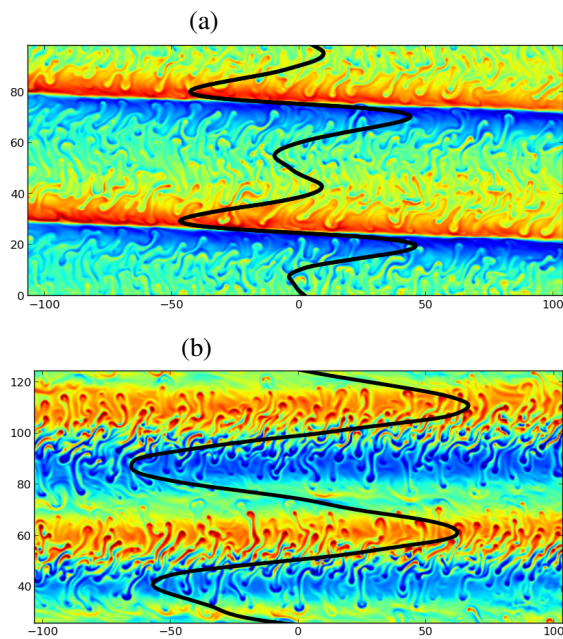


図 1

の状態にあると考えてせん断と輸送の関係を定めた。これらを総合した結果、定性的ではあるが、層の時間的发展を説明できることが分かった。これらの結果について国際学会および国内学会で発表した。

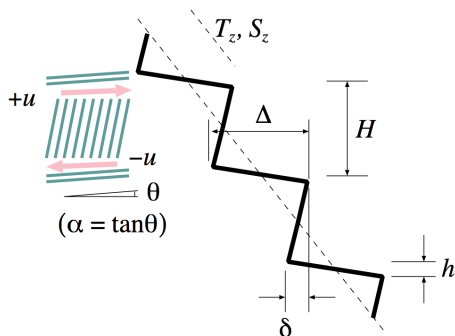


図 2

(3) また、貫入層の先端では貫入層内の移流、および貫入運動により励起された内部重力波により、成層が変形されている。このような変形された成層を初期場とする二重拡散対流の発生についても数値的に調べた。

(4) またフィンガー対流を室内実験で再現し、振

舞いを観測することを試みた。実験水槽内で作られるフィンガーは太さが0.5mm程度の非常に微細な現象であり、せん断により容易に変形してしまうため、プローブを入れて観測することは適切でないことが分かった。水槽内に多数発生しているフィンガーを解像し、しかも非接触で観察を行なうため、レーザーの回折を用いた光学的観測を試みた。予備的な結果ではフィンガーの平均的な太さと傾きを検出できる可能性が認められた(図)。今後はこの手法の確かさを向上させ、フィンガーの長時間発展を観測することを目標としている。

(5) [研究成果の公開] 本研究課題を通じて得られた知見も含め、二重拡散対流の基礎的な性質から地球・惑星におけるはたらきまでを、地球流体の研究者を対象として「地球流体セミナー」において2日間にわたる集中講演を行なった。

<引用文献>

- ① T. Noguchi, H. Niino, Multi-layered diffusive convection. Part 1. Spontaneous layer formation. *J. Fluid Mech.*, **651**, 2010, 443-464
- ② T. Noguchi, H. Niino, Multi-layered diffusive convection. Part 2. Dynamics of layer evolution. *J. Fluid Mech.*, **651**, 2010, 465-481
- ③ T. Tsuji, T. Noguchi, 他 6 名, Two-dimensional mapping of fine structures in the Kuroshio Current using seismic reflection data, *Geoph. Res. Lett.*, **32**, 2005, L14609
- ④ Y. Nakamura, T. Noguchi, 他, Simultaneous seismic reflection and physical oceanographic observations of oceanic fine structure in the Kuroshio extension front, *Geoph. Res. Lett.*, **33**, 2006, L23605
- ⑤ 湊翔平, 辻健, 野口尚史, 他, 地震波海洋学における海水中の微細温度構造の推定, *物理探査*, **62**, 2009, 509-520

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Takashi Noguchi and Hiroshi Niino, Detailed inner structure of double-diffusive intrusions, *Proceed-*

ings to European turbulence conference 14, 査読有, 2013, 468. (http://etc14.ens-lyon.fr/openconf/modules/request.php? module=oc_program& action=view.php& id=468)

〔学会発表〕(計5件)

① 野口尚史、二重拡散対流による貫入の単純化モデル、日本地球惑星科学連合大会 2014、2014年04月28日 2014年05月02日、パシフィコ横浜(横浜市)

② 野口尚史、二重拡散対流による貫入の構造と密度輸送、日本流体力学会年会 2013、2013年09月12日 2013年09月14日、東京農工大学小金井キャンパス(東京都)

③ Takashi Noguchi and Hiroshi Niino Detailed Inner Structure of Double-Diffusive Intrusions, 14th European Turbulence Conference, 1-4 September 2013, Ecole normale superieure de Lyon (France).

④ 野口尚史、熱塩フロントの水平貫入のスケール間相互作用、第62回理論応用力学講演会、2013年03月06日 2013年03月08日、東京工業大学(東京都)

⑤ 野口尚史、二重拡散対流-実験室から惑星まで-、地球流体セミナー、2014年08月30日～09月02日、休暇村支笏湖(北海道)、<http://dennou-k.gfd-dennou.org/seminars/gfdsemi/arch.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野口 尚史 (NOGUCHI, Takashi)
京都大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：10447906

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし