

二重拡散対流による水平貫入現象

京都大学大学院 工学研究科 野口 尚史 (Takashi Noguchi)
Graduate School of Engineering, Kyoto University

黒潮と親潮のように異なる水塊が接する海域は、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。このような前線は不安定で、二重拡散対流の効果により両側の水塊が多数の薄い層に分かれて相互に貫入する運動が生じる。室内実験・数値シミュレーションにより、理想的な状況での貫入現象を調べた。また実際の海洋で、二重拡散対流による水平貫入とみられる層状構造を音波の反射により観測した結果も紹介する。

1 はじめに

二重拡散対流は、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、いずれか片方の成分についてみたときに不安定な成層をしていれば全体が静力学的に安定な密度成層をしていても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(海洋の場合は温度)の場合を拡散型対流、遅い方の成分(塩分)の場合をフィンガー対流と呼ぶ。

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。このような前線は不安定で、二重拡散対流の効果により両側の水塊どうし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によってできたシャープな密度境界面によって仕切られている。

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合的な密度輸送により駆動されており、大きく異なる規模の現象どうしの強い相互作用の結果生ずる現象であるため、理論解析や過去の数値シミュレーションでは集合的效果のパラメタ化に頼らざるを得ず、結果がパラメタ化の表現に大きく依存してしまう問題があった。

本研究 [5] では、まず室内実験で貫入現象を再現し、観察した。次に、フィンガー対流・拡散型対流を解像しつつ貫入層スケールまで表現する2次元(水平-鉛直)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た。

実際の海洋で、二重拡散対流による水平貫入とみられる層状構造を、反射法地震探査という海底の地質構造を音波の反射で調べる手法を用いて可視化した結果についても紹介する。

2 熱・溶質の前線面での二重拡散対流

2.1 背景

海洋中では、たとえば黒潮と親潮といった異なる水塊が接する海域で、しばしば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。このような前線面は不安定で、二重拡散対流の効果により薄い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 [1, 2]。

貫入層の内部には、貫入層の厚さに比べてはるかに微細なスケールのフィンガー対流・拡散型対流が生じている。貫入運動はこの微細スケールの対流の集合的な密度輸送によって駆動されており、一方で貫入運動に伴う水平移流によって微細スケール対流の環境場が維持されている。貫入運動は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非常に興味深い現象である。

2.2 問題設定

2つの溶質 T, S によって密度成層した溶液が中央で鉛直に仕切られている。溶質 T, S は拡散係数が異なっている ($\kappa_T > \kappa_S$)。仕切りをはさんで左右で、それぞれの溶質による密度の鉛直勾配 $d\rho_T/dz, d\rho_S/dz$ および全密度 $\rho_T + \rho_S$ は等しいが、 ρ_T, ρ_S がそれぞれ Δ ずつ異なっている状況を考え、仕切りを取り外した後の運動を考察する。

初期には仕切りをはさんでの密度差が無いので、もし拡散が無ければ運動は生じない。また、a, b ともに、仕切りの左右いずれでも鉛直成層は二重拡散対流について絶対安定である。

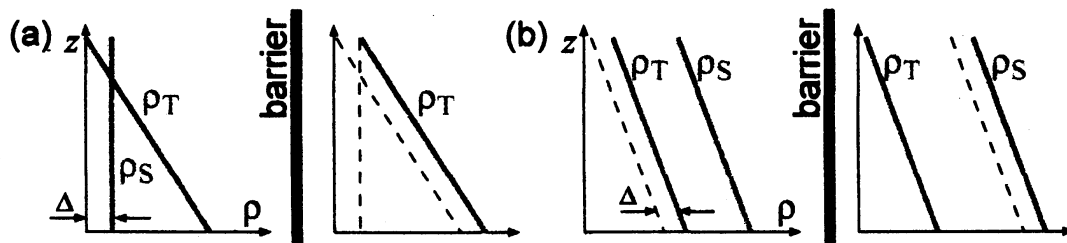


図 1: (a) 室内実験および (b) 数値実験での設定。

2.3 室内実験

本研究では、まず室内実験で貫入現象を再現し、観察した。水槽は 深さ 30 cm, 幅 7 cm, 長さ 200 cm のアクリル製で、中央の位置で板で仕切られている。仕切りの両側に砂糖水 (S) と食塩水 (T) とで Fig. 1a に示した連続成層を作る。全密度による浮力振動周期は 4.5 sec である。 Δ が (a) 0.01 g cm^{-3} と (b) 0.03 g cm^{-3} の2つの場合の実験を行った。

a 結果

仕切り板を引きぬいた際の擾乱は数 min で減衰し、その後実験 a では $\rho_S = 0$ の側に、実験 b では逆向きにそれぞれ傾いた貫入層が形成された (図 2)。実験 b では貫入層の内部に活発なフィンガー対流が見られ、貫入は実験 a に比べ 5 倍ほど速く進行した。

2.4 数値実験

室内実験では鉛直成層および前線面の精密な制御が難しく、意図しない初期擾乱の影響が避けられない [3]。そこで、フィンガー対流・拡散型対流まで解像する 2 次元 (水平-鉛直) 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た。

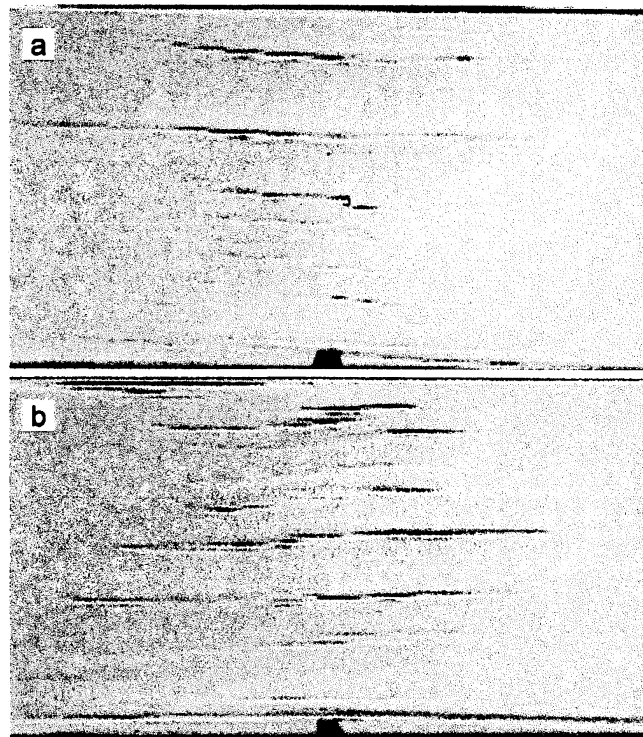


図 2: 室内実験でみられた水平貫入。可視化はシャドウグラフ法。
a) 前線面をはさんでの溶質の差が小さい場合、b) 大きい場合。

a 結果

Δ が (a)150 の場合と (b)400 の場合の結果を図 3 に示す。室内実験と同様に、 Δ を増すと層の傾きが反転した。フィンガー対流は b の方でより活発に起こっており、貫入層の内部で平均した鉛直密度輸送は a と b で 8 倍も異なっていた。層構造は内部での鉛直密度輸送により駆動されているので、微小スケールの対流運動が親の層構造そのものの形を変えてしまうという興味深い関係が示唆される。



図 3: 2 次元の数値実験で再現された水平貫入。可視化は、数値的に構成したシャドウグラフ法による。a) 前線面をはさんでの溶質の差が小さい場合 ($\Delta = 150$)、b) 大きい場合 ($\Delta = 400$)。

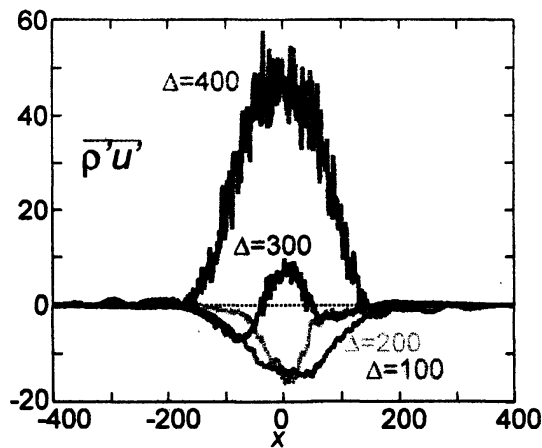


図 4: 数値実験での層内の水平密度輸送。

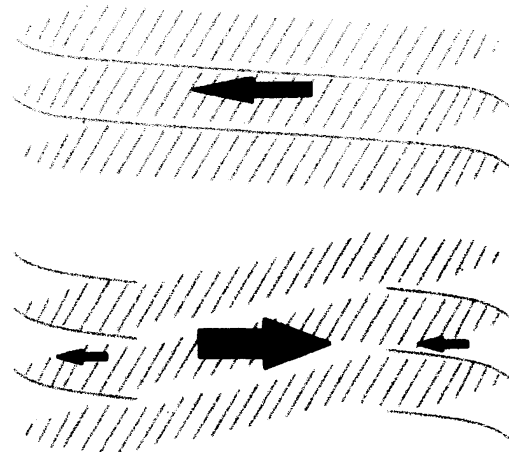


図 5: 層の傾きと水平密度輸送の関係の模式図。

b 輸送

数値実験の結果を用いて層内の水平密度輸送 $\overline{\rho'u'}$ を調べた。 $\rho'u'$ はそれぞれ密度と水平流速の水平平均からの偏差、上線は鉛直平均である。 Δ が小さいとき、層内の輸送は負であるが、 Δ が大きくなると、層の中央で輸送は正となることが分かった(図 4)。この輸送の正負の入れかわりは層の傾きの反転と同時に起こっていた。

Δ が大きい場合でも貫入層の先端では傾きが Δ が小さいときと同じ向きになっているが、この特徴も層内の輸送に表われていることが分かる。図 5 に模式図を示す。

3 海洋における二重拡散対流による水平貫入

3.1 海洋の層構造

海洋中の密度の鉛直分布は決して滑らかではなく、しばしば数 10m スケールの鉛直微細構造と呼ばれる階段状の密度分布が観測される。一般に、鉛直微細構造は水平方向に数 km 程度の連続性を持つ層状の構造をなしている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 次的に観測する手段がなく、実態は明らかになっていない。このような層構造の形成メカニズムの 1 つとして、上で述べた前線面(海洋の場合は「熱塩前線」と呼ぶ)での二重拡散対流による水平貫入が考えられている。

3.2 反射法地震探査

本研究では、海水中の密度の層状構造を反射法地震探査で可視化することを試みた。反射法地震探査は、音波が物質の境界面で反射する性質を利用して、海底下の地質構造を調査するために用いられている手法である。海面下数 m でエアガンなどにより強いパルス

状の音波を発生し、海底面や海底下にある地層境界から反射して戻ってきた音波をストリーマケーブル(ケーブルに水中マイクロホン列を収めたもの)などによって受信することで海底下の構造を得る。普通は海底面および海底下の地層境界からの強い反射波のみが使用されているのだが、ごくわずかの音波は海底に達する前に海水中の密度構造により反射されている。

反射法地震探査は、効率よく広範囲の鉛直構造を取得することができるため、今まではプローブによる鉛直1次元データでしか分かっていなかった海の密度構造が2次元・3次元的に、しかもこれまでにない高い水平解像度で得られるのが最大の利点である。また、過去に地質調査の目的で取得され、しかも不要なデータとして捨てられていた情報を使って海洋物理的観測を行えることも大きな特色である。

地質探査法のこのような用途は最近(2003年)になってようやく気付かれたものだが[6]、‘seismic oceanography’ というキャッチーな名前が付けられ、各国でさかんに観測が始まっている。

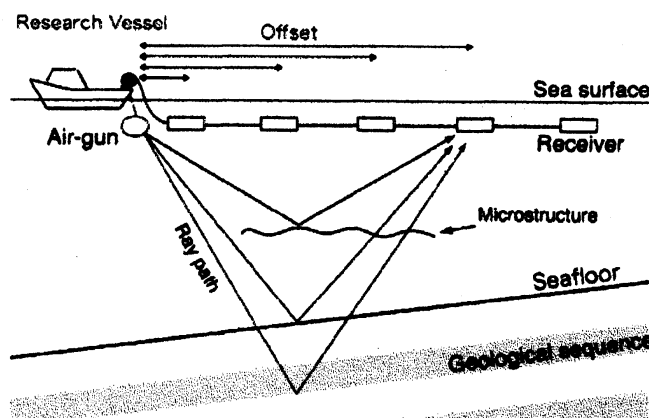


図 6: 反射法地震探査の模式図。

3.3 観測

黒潮流域である室戸沖(1999年,2006年9月)[7]および三陸沖(2005年8月)[8]で観測を行なった。黒潮は周囲に比べ高温高塩分であるため、黒潮の側面には大きな熱塩勾配が存在する。地震探査による遠隔観測と同時にCTD(塩分・温度・深度プロファイラ)およびXBT(投棄式温度プロファイラ)による現場観測を行ない、音波による層構造の検証およびその空間構造の可視化を行なった。

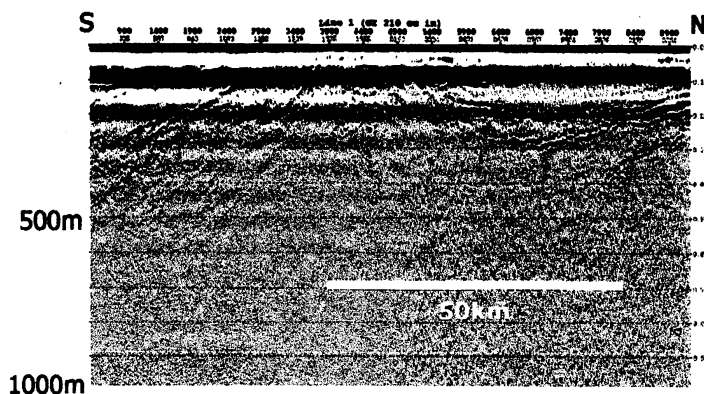


図 7: 地震探査による反射断面図。南(図の左)端が黒潮流軸。北側の構造は渦状擾乱によるものと思われる。

3.4 結果

深さ 200m 付近に非常に明瞭な多層の反射面(層構造)を見いだした。これらの層構造は鉛直スケール 50–100m をもち、驚いたことに水平方向に 100km 以上も連続していることが分かった。図 7 に 1 例を示す。層状の構造は流軸直下で下に凸となった、黒潮を取り囲むような構造をもっていた。いずれの海域でも、またそれぞれで数日おきに取得したどの地震探査データにも同じ特徴をもった反射面が見られ、層構造は黒潮流軸付近では非常に普遍的に存在することが分かった。反射面は同時プローブ観測で検出された温度・塩分の不連続面とよい一致を示した。

4 結論

室内実験および数値実験の結果、前線面を挟んでの温度・塩分の差が小さいときは拡散型対流、大きいときはフィンガー対流が密度輸送において支配的になり、貫入層がそれぞれ塩分が小さい側、大きい側に向かって傾斜することが確認された。この傾斜の反転は活発なフィンガー対流が層境界を壊すことによって起こり、大きな構造の変化を伴うものであることが分かった。

反射法地震探査という海底の地質構造を音波の反射で調べる装置を用いて、黒潮流域の三陸沖(2005 年)と室戸沖(1999 年、2006 年)で、層状構造の可視化を試みた。これらの海域では、厚さ数 10m の層状の構造が多数見つかり、水平方向に 100km 以上連続した構造も見られた。

参考文献

- [1] Turner, J. S., Double-diffusive intrusions into a density gradient, *J. Geoph. Res.*, **83** (1978), 2887–2901.
- [2] Niino, H., A linear theory of double-diffusive horizontal intrusions in a temperature-salinity front, *J. Fluid Mech.*, **171** (1986), 71–100.
- [3] Ruddick, B., Phillips, O. M., and Turner, J. S., A laboratory and quantitative model of finite-amplitude intrusions, *Dyn. Atmos. Ocean.*, **30** (1999), 71–99.
- [4] Ruddick, B., Laboratory studies of interleaving, *Prog. Oceanogr.*, **16** (2003), 529–547.
- [5] 野口尚史, 松田優也, 新野宏, 二重拡散対流による水平貫入の構造と力学, 日本流体力学会年会 2006 講演論文集, (2006), 154.
- [6] Holbrook, W. S. *et al.*, *Science*, **301** (2003), 821–824.
- [7] Tsuji, T. *et al.*, *Geoph. Res. Lett.*, **32** (2005), L14609.
- [8] Nakamura, Y. *et al.*, *Geoph. Res. Lett.*, **33** (2006), L23605.