

海洋と室内実験に見る二重拡散対流

東大・海洋研 野口 尚史 (Takashi Noguchi)

東大・海洋研 新野 宏 (Hiroshi Niino)

1 二重拡散対流

1.1 2成分系の対流

二重拡散対流は2種類の溶質の濃度（あるいは温度と溶質の濃度）によって密度が決まる流体において2つの溶質の拡散係数の違いを原因として起きる対流運動で、温度のみによって流体の密度が決まる熱対流の場合と大きく異なる多様な興味深い現象が生ずる。

2成分系の例として海水を考えることにする。海水の密度は図1のように主に温度 T と塩分 S によって決まる。図1から、低温域を除けば密度は良い近似で T, S について線形で表せることがわかる。式で書くと

$$\rho = \rho_0(1 - \alpha T + \beta S)$$

となり、正の係数 α, β をそれぞれ熱膨張係数、塩分収縮係数と呼ぶ。 α, β の値は

$$\begin{aligned}\alpha &= -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_S \sim 2.6 \times 10^{-4} \text{K}^{-1} \\ \beta &= +\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial S} \right)_T \sim 7.6 \times 10^{-5} \%^{-1}\end{aligned}$$

である。つまり、密度で見ると温度 1K の差はほぼ 0.03% の塩分差に相当している。

二重拡散対流を引き起こすもっとも重要なポイントは密度を決める2つの成分の拡散の速さが異なっているということである。海水の塩分と温度の拡散係数 κ_T, κ_S の値は、

$$\kappa_T = 1.40 \times 10^{-3} \text{cm}^2 \text{s}^{-1} \quad (20^\circ \text{C})$$

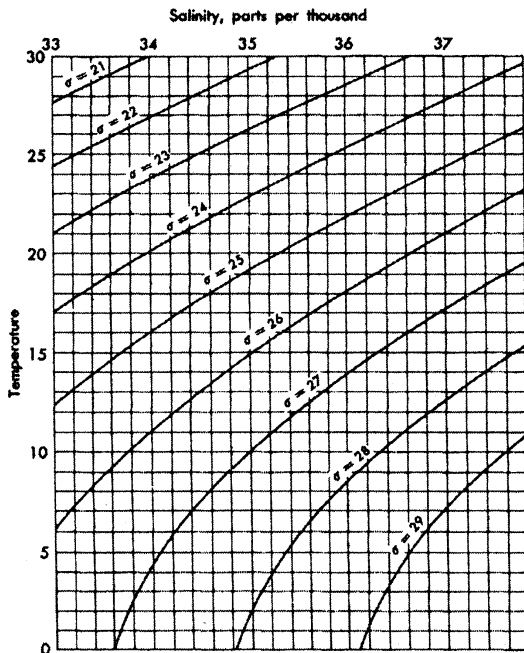


図 1: 1 気圧のもとでの海水の密度。縦軸は温度 (°C)、横軸は塩分 (重量千分率) である。σ は $1000(\rho - 1)$ で定義される密度である (von Arx, 1962)。

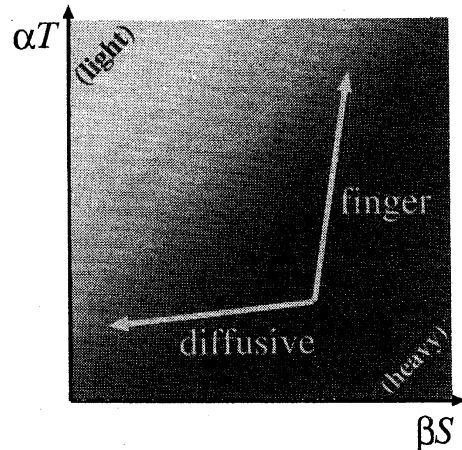


図 2: 温度・塩分平面で表した成層状態。影が濃いほど密度が大きい。直線上の各点は矢印の向きに上方の状態を表している。

$$\kappa_S = 1.51 \times 10^{-5} \text{cm}^2 \text{s}^{-1} \quad (25^\circ\text{C}, 3\%)$$

である。2つの拡散係数の比 τ は Lewis 数と呼ばれ、

$$\tau \equiv \frac{\kappa_S}{\kappa_T} \sim 10^{-2}$$

程度の値である。つまり、海水では熱の拡散に比べて塩分の拡散は 100 倍も遅い。

室内実験では側壁から熱が逃げてしまうなど、温度を精密に制御した実験を行なうことが困難なため、砂糖と食塩を使って研究を行うことが多い。砂糖-塩系の場合では砂糖の方が拡散が遅く、 $\tau \sim 0.3$ 程度である。熱-塩系の場合よりも拡散係数の違いは小さいが、熱-塩系と同様の二重拡散対流を実現することができ、二重拡散対流に関する重要な知見が得られる。

これら2成分系では、初期の密度成層は安定であっても2つの成分の鉛直分布の仕方によっては各成分の拡散係数の違いを原因として対流が発生することがある。図2は、そのような場合の温度・塩分の鉛直分布の例を温度・塩分平面上に矢印で示したもので、矢印の先端ほど上方の状態を示している。この2つの矢印はいずれも上方ほど密度が小さくなっているので安定な密度成層を表しているが、温度と塩分のどちらかの成分だけに注目すると一方が不安定な成層をしているという状態である。したがって、この不安定成分の位置エネルギーが解放されると運動が発生することが期待できるが、そのためにはもう一方の成分が作る安定成層の復元力に打ち勝つメカニズムが必要である。

成層を潜在的に不安定にしている成分が熱か塩分かで対流の様相は大きく異なる。拡散の遅い成分[海洋では塩分]が不安定要因になっている場合を finger 型、逆に拡散の速い成分[熱]が不安定要因の場合を diffusive 型と呼んでいる。以降、用語の便宜のため拡散の速い成分、遅い成分をそれぞれ熱と塩分で代表させて、二重拡散対流の性質を説明する。

1.2 Finger 型対流

Finger 型対流は上ほど高温高塩、下ほど低温低塩になっている成層で発生する。図3左に模式的に示したように、上層が高温高塩、下層は低温低塩で、かつ密度で見ると下層が大きいような2層の流体を考えよう。この境界面に小さな凹凸を与えたときの時間変化を観察する。拡散の速い熱は境界面を通して周囲に速やかに一様化する。このため、例えば上向きに変位した下層の流体はあたためられて今までより軽くなり、さらに上昇する。逆に下向きに変位した上層の流体は冷やされて今までより重くなる。したがって境界面の凹凸は不安定であり、時間とともに発達することになる。

十分発達が進むと、2つの層の間に細長い上昇流と下降流のセルが交互に並んだ一種の

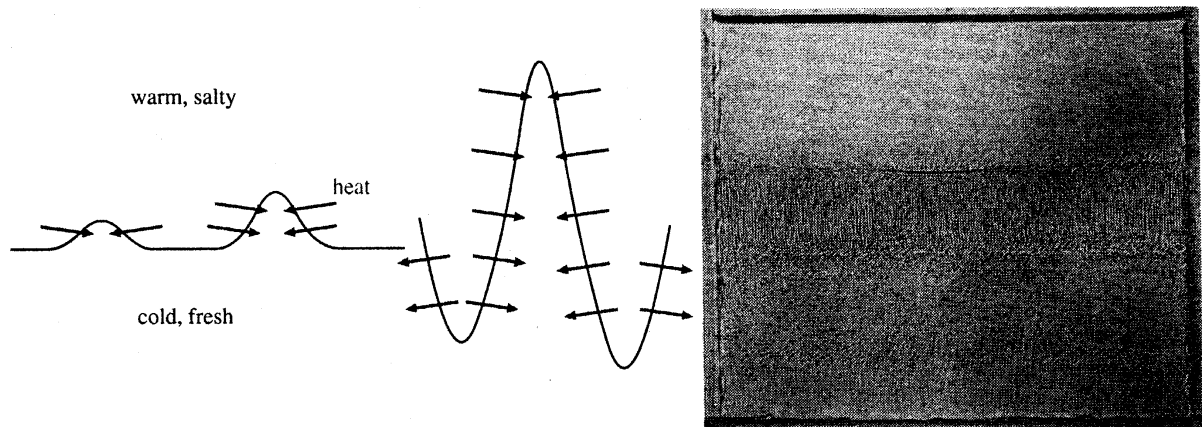


図 3: Finger 型対流の概念図 (左) と実際の対流の写真 (右)。写真は Shirtcliffe and Turner, 1970 より。

混合層が生じることになる。これらのセルでは隣合うセル間で熱の拡散により浮力が生じ、この浮力による運動エネルギー生成と粘性散逸との釣合がとれた状態になって準定常な運動をしている。‘finger’の名称はその細長いセルの形状から与えられている。

1.3 Diffusive 型対流

Diffusive 型対流は finger 型対流と逆に上が低温低塩、下が高温高塩になっている成層で発生する。ここでも安定な密度成層をした 2 層流体で考える。この場合、境界面を通してまず熱が拡散する。このため上層で境界面付近の密度が小さくなり、ちょうど底面から加熱された流体の熱対流の問題と同様にプリュームが成長する。プリュームは上昇してゆくとまわりは冷たいので熱を失う。通常の熱対流ではこのような場合、熱を失っても浮力は 0 にしかならないが、diffusive 型対流では境界面を通してわずかに受け取った塩分のために、熱を失うと負の浮力を持つようになる。このため、プリュームはある高さまでしか到達しない。境界面からこの高さまではプリュームによってかきまぜられ、混合層が作られる。一方、境界面では安定な密度勾配が強化される。境界面の上下では活発な混合が起こ

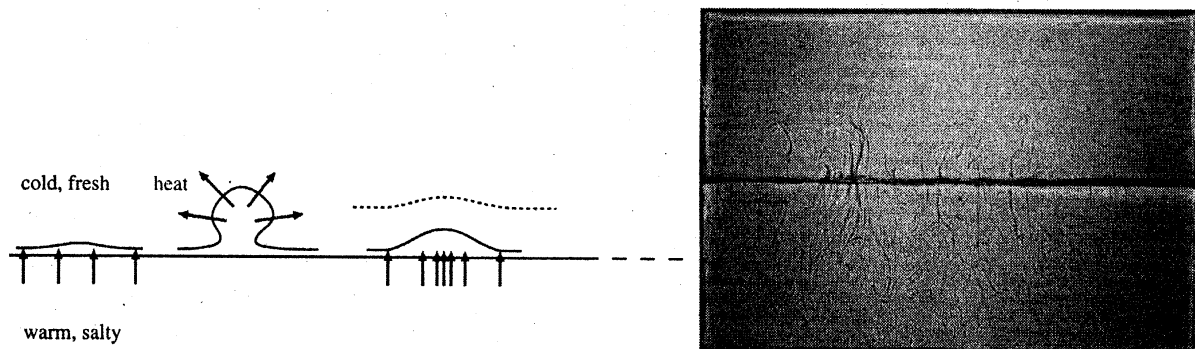


図 4: Diffusive 型対流の概念図 (左) と実際の様子の写真 (右)。写真の例では上下層での塩分・温度のコントラストが大きく、生じたプリュームは水面 (底) 近くまで達している。写真は Turner, 1995 より。

り、境界面では長い時間、温度・塩分勾配も急なまま保たれる。

境界面のある点を通した上向きの熱フラックスは上層では正、下層では負で同じ大きさの浮力をもたらす。したがって現象は上下対称であり、同じ点からプリュームが上下にのびている (図 4)。

1.4 二重拡散対流による質量輸送

個々の finger 型あるいは diffusive 型の対流の集まりをより大きなスケールで見ると、境界面で発達した対流現象は各層間での熱や塩分の輸送に貢献する渦拡散の働きを考えると考えられる。それぞれの型の対流での輸送の特性は二重拡散対流がかかわる大きなスケールの運動を考慮するとき重要となる。

finger 型では、熱-塩系で行なった室内実験により T と S による密度の鉛直輸送フラックス $\alpha F_T, \beta F_S$ の比が求められている (Turner, 1967)。それによると、各成分ごとにみた上下層での密度差 $\alpha \Delta T, \beta \Delta S$ の比 (密度アノマリ比) が $2 < \alpha \Delta T / \beta \Delta S < 10$ 程度の範囲では

$$\frac{\beta F_S}{\alpha F_T} \sim 0.56$$

である。これは、塩分はそのまま移流によってほとんど運ばれるのに対し、熱は移流で運ばれたものが隣合う逆向きの流れのセル間で拡散によってほとんど交換されてしまい正味の輸送は小さくなるため、と解釈できる。

これに対し、diffusive 型では、同じく熱-塩系での実験から得られた T と S による密度の鉛直輸送フラックスの比は、 $\beta\Delta S/\alpha\Delta T < 2$ で

$$\frac{\beta F_S}{\alpha F_T} \sim 0.15$$

となっている (Turner, 1965)。

したがって、finger 型で主に輸送されるのは S であり、diffusive 型で主に輸送されるのは T であるといえる。二重拡散対流は不安定要素を効率的に解消するようにはたらくということもできる。さらに、対流が生ずる前と後での密度分布の変化で見ると、いずれの型の対流も対流が起きた後に安定成層が強まる方向に推移していることは興味深い。

1.5 貫入 (interleaving) 現象

二重拡散対流がより大きなスケールの運動と密接な相互作用を起こして生ずる現象の 1 つとして水平方向への貫入現象があげられる。ここでは前節で述べた境界面を通した浮力の輸送の finger 型と diffusive 型での違いが重要な役割を果たす。

問題設定として、図 5 のように塩分と温度の組成が異なるが、密度成層は等しい 2 種類の安定な成層流体を仕切り板の左右に入れた水槽を考える。仕切り板をはさんでどの高さでも左右の密度が等しいので、仕切り板の両側で圧力差はない。この状態で仕切りを外した後の運動を観察する。

図 5 の例では、どの高さでも左側は右側に比べて高温高塩であるような成層になっている。ここで模式図のように右側から高温高塩側に少し飛び出した低温低塩水を考える。す

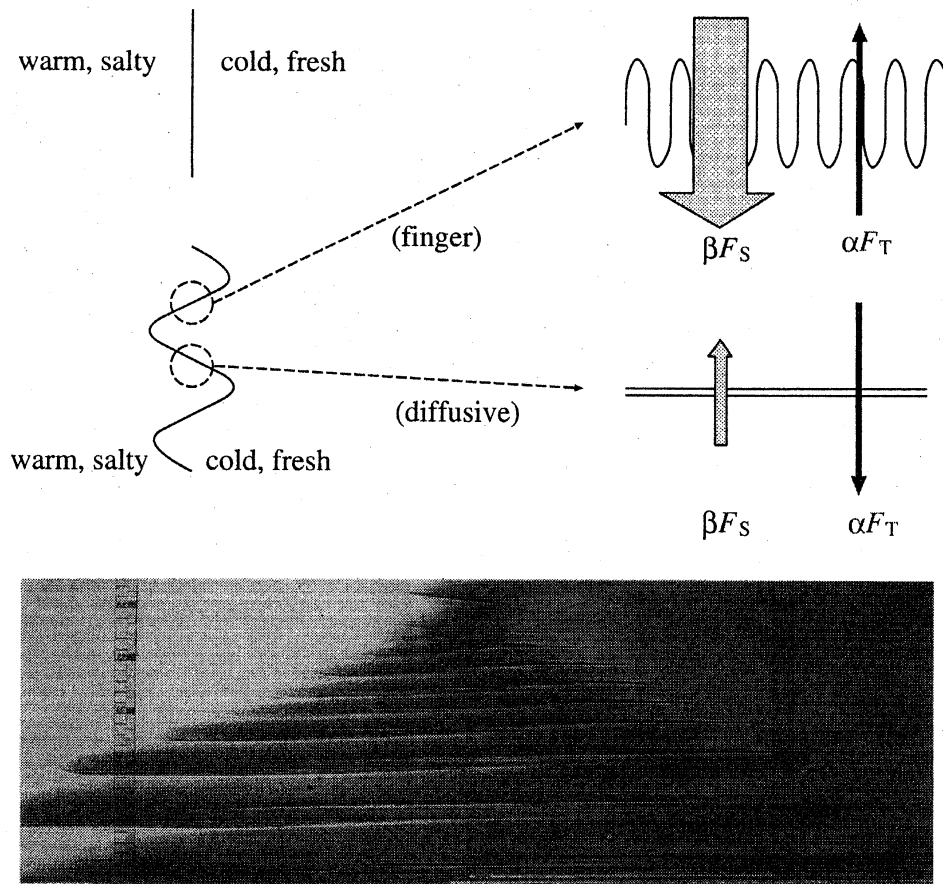


図 5: 二重拡散による貫入現象。下の写真は Ruddick and Turner(1979) より。この例では仕切りの左右での ΔS が高さにつれて変化しているので貫入層の厚さが上下で異なっている。

るとこの部分の上面では finger 型、下面では diffusive 型の対流が起こる境界面になる。前節で見たように密度の輸送フラックスは上面の finger 型対流による塩分の下向き輸送が下面の diffusive 型対流による熱輸送よりも大きいので、飛び出した部分はしだいに重くなり、さらに高温高塩側に沈み込みながら貫入してゆく。左側から低温低塩側に飛び出した高温高塩水は逆に軽くなり、少しずつ上昇しながら右側へ進み貫入してゆく。

このように finger による質量輸送が卓越する現象では大きいスケールで見ると塩分の不均一性が速く解消される。このため、貫入により水平に移流された流体が持ちうる密度アンモリはたかだか $\alpha\Delta T (= \beta\Delta S)$ の程度となる。したがって、この場合の貫入層の厚さ d

は、 $\beta\Delta S$ の密度アノマリを持つ流体が基本場の成層の中を鉛直方向に動ける距離

$$d \sim \frac{\beta\Delta S}{\rho^{-1}\partial\rho/\partial z}$$

程度のものとなる (Ruddick and Turner, 1979; Niino, 1986)。

2 海洋中の二重拡散対流

2.1 二重拡散対流に起因すると考えられる海洋現象 [鉛直微細構造]

海洋中の密度成層は鉛直方向に数 10m 程度の小さなスケールで見てもなめらかではなく、いくつかの海域ではむしろ階段状の微細構造を持つことが古くから観測されていた (Tait and Howe, 1968; Neal *et al.*, 1969)。この原因の一つとして二重拡散対流による機構が考えられている。例えば、このような微細構造が観測されている赤道域や地中海では日射と蒸発によって上層が高温高塩になっており、finger 型対流の存在の可能性を示唆しているためである。

海洋の鉛直微細構造の原因としては内部重力波の碎波なども考えられる。しかし、鉛直分解能が非常に小さい (~ 数 mm) 特殊な測器や光学的測器による地中海などの海域での観測結果には、そこでの微細構造が二重拡散対流によって作られた可能性が見られている。図 6 は地中海東部の成層が階段状になっている部分で、ソルトフィンガーと見られる構造を撮った写真で、比較のために実験室の水槽で作ったソルトフィンガーを同じ測器で撮影したものと類似の特徴を持っている (Williams, 1975)。

さらに大きなスケールの現象と二重拡散対流による輸送との関わりについてはまだ決定的な結論はないが、finger 層・diffusive 層の形成による鉛直混合や二重拡散貫入による水平混合は各種水塊の寿命などに大きくかかわってくる (Hebert, 1989; Hebert, Oakey and

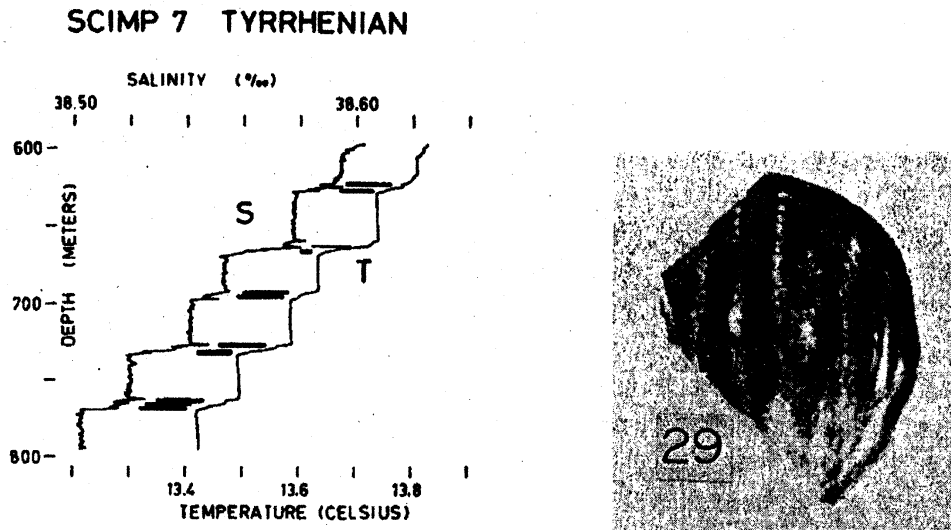


図 6: Tyrrhenia 海 (地中海東部) で観測された成層の階段状構造 (左) とその段のところで撮影されたソルトフィンガーの映像 (右)(Williams,1975)。左図中で黒い帯をつけたところはこのようなソルトフィンガーが見られた場所を示している。

Ruddick,1990) と思われ、海洋大循環にも影響を及ぼす可能性がある (Garrett and Holloway,1992) と考えられている。

3 二重拡散対流の室内実験

室内実験を用いた二重拡散対流の研究は過去にも数多くあるが、ここでは著者らの行なっている実験についてその映像を中心に紹介する。

側壁加熱による貫入現象 (図 7)

深さ 30cm, 奥行き 10cm の水槽に砂糖で作った一様な密度成層流体を入れ、平面状の電気ヒーターを鉛直に立てる。ヒーターの加熱をはじめると間もなくほぼ厚さがそろった対流層が左右に現れ、次第に横に伸びてゆく。時間とともに隣の対流層と合体しながら鉛直スケールを拡大し、やがて一定の鉛直スケールを持った対流層に落ち着く。この層の鉛直

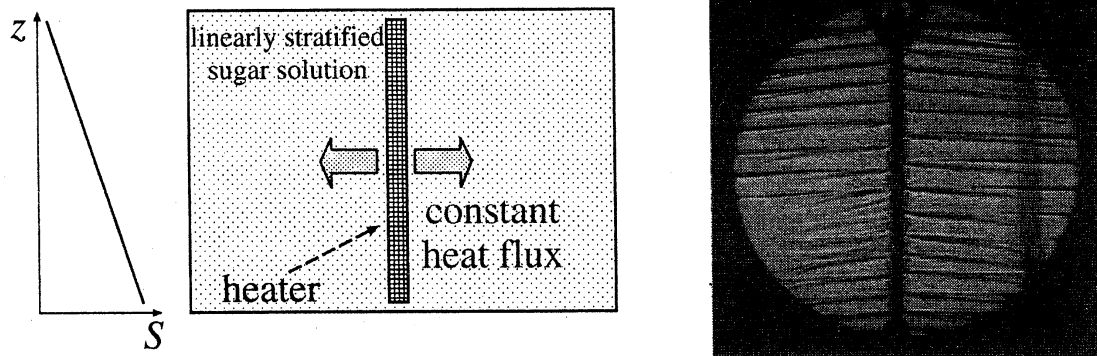


図 7: 一様成層流体の側壁を加熱し始めた時の貫入現象。初期には一様な砂糖の成層がある (左)。写真では水槽の中央に仕切りとして入れた平板ヒーターの面に平行な方向から透かして見ている (右)。シュリーレン法による可視化を行なっているため、密度勾配の大きいところが黒く見えている。写真の丸い視野の直径は 20cm である。

スケールは温められて軽くなった流体粒子が周りの成層中を昇ることができる距離程度である。

連続成層からの finger 発生 (図 8)

従来 finger 型対流に関する多くの実験は 2 層で行なわれてきたが、連続成層からの対流の発生の観察はあまり行なわれていない。どこから対流が起こり、どのように発達するかは興味深い問題である。

水槽に成層流体を満たしてしばらくするとさまざまな場所から finger が発達するが、発生する場所の鉛直方向の距離はほぼ等間隔であった (図 8 右)。最初発生したそれぞれの finger の存在する領域は時間とともに水平方向に伝播し、まず水平方向にほぼ一様な finger 層を形成した。その後 finger 層は次第に厚みを増して上下の層とつながり、最終的には水面から底面まで一続きとなったセルも見られた。今後は連続成層の実験装置を用いて finger の安定性、質量輸送フラックスなどを順次調べていく予定である。

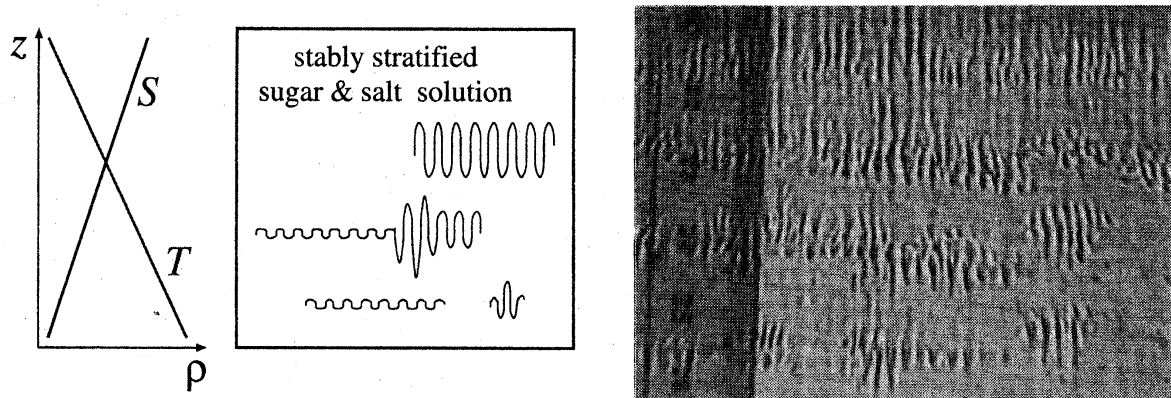


図 8: 一様な安定密度成層からの finger の発生。初期には不安定な塩分成層をより強い温度成層で安定化させている (左)。写真の視野の縦の長さはほぼ 6cm である (右)。可視化はシャドウグラフ法 (密度の 2 階微分が濃淡として見える) で行なっている。

参考文献

- Gargett, A.E. and G.Holloway(1992). Sensitivity of the GFDL ocean model to different diffusivities for heat and salt. *J.Phys.Ocean.*, **22**, 1158–1177.
- Hebert, D.(1989). Estimates of salt finger fluxes. *Deep-Sea Res.*, **35**, 1887–1901.
- Hebert, D., N.Oakey and B.R.Ruddick(1990). Evolution of a Mediterranean salt lens. *J. Phys. Ocean.*, **20**, 1468–1483.
- Neal, V.T., S. Neshyba and W.Denner(1969). Thermal stratification in the Arctic Ocean. *Science*, **166**, 373–374.
- Niino, H.(1986). A linear stability theory of double-diffusive horizontal intrusions in a temperature-salinity front. *J.Fluid Mech.*, **171**, 71–100.
- Ruddick, B.R. and J.S.Turner(1979). The vertical length scale of double-diffusive intrusions. *Deep-Sea Res.*, **26**, 903–913.
- Shirtcliffe, T.G.L. and J.S.Turner(1970). Observations of the cell structure of salt fingers. *J.Fluid*

Mech., **41**, 707-719.

Tait, R.I. and M.R.Howe(1968). Some observation of thermo-haline stratification in the deep ocean. *Deep-Sea Res.*, **15**, 275-280.

Turner, J.S.(1965). The coupled turbulent transports of salt and heat across a sharp density interface. *Int.J.Heat Mass Trans.*, **8**, 759-767.

Turner, J.S.(1967). Salt fingers across a density interface. *Deep-Sea Res.*, **14**, 599-611.

Turner, J.S.(1995). Laboratory models of double-diffusive processes. *Geophys. Monogr.*, **94**, *Double-Diffusive Convection*, American Geophysical Society., 11-29.

von Arx, W.S(1962). *An Introduction to Physical Oceanography*, Addison-Wesley Publ. pp.422.

Williams, A.J.III(1975). Images of ocean microstructure. *Deep-Sea Res.*, **22**, 811-829.