

— 解 説 —

二重拡散対流ノート 第 1 部 歴史と概要*

吉田 次郎[†]

要 旨

このノートでは海洋中での微細混合過程に特異な役割を果たしている二重拡散対流について、これまでに得られた知見を解説します。本稿はその第 1 部として二重拡散対流研究の歴史的発展とその主な特徴について述べます。

キーワード：二重拡散対流，ソルトフィンガー，Diffusive 型対流，負の密度拡散，階段構造

1. はじめに

海洋では水温と塩分によって密度場が決定され、通常は重力的に安定した成層構造になっていますが、フロント域での水温逆転、塩分極小、高緯度域での水温逆転など、複雑な構造を示すこともあります。熱帯から亜熱帯にかけての海域では海面からの蒸発が活発で、1,000 m 深付近まで上層は高温高塩、下層は低温低塩な構造を示す海域があります。このとき塩分分布は重力的に不安定な成層構造ですが、水温分布の安定成層が勝り、総体としての密度分布は安定成層構造となっています (図 1)。この構造は大西洋では深層まで至りますが、北太平洋西部では北太平洋中層水 (North Pacific Intermediate Water: NPIW, 図 1 の北太平洋の 650 dbar 付近に見られる塩分極小が特徴) が存在しますので、深層までには至らないことが特徴

です。一方、高緯度海域の上層では、水温逆転が存在し、上層が低温低塩、下層が高温高塩な構造を示す場合があります。図 2 では 100 dbar 付近から、北太平洋では 200 dbar、北大西洋では 400 dbar 付近まで深いほど水温が高くなる構造となっています。この場合水温分布は重力的に不安定な成層構造ですが、塩分分布の安定成層が勝り、総体としての密度分布は安定成層構造となっています。

このような成層構造を示す海域では重力的に安定であるにもかかわらず、熱と塩の分子拡散係数 (それぞれ k_T , k_S)。以降、本解説では拡散係数はすべて分子拡散についてのものを指すこととします) の違い ($k_T \approx 100 k_S$) に起因する対流、即ち二重拡散対流 (Double Diffusive Convection: 以降 DDC と省略します) が発生する可能性があります。図 1 の成層構造ではソルトフィンガー型対流 (Salt Finger Convection: 以降 SF と省略します)、図 2 の水温逆転構造付近では Diffusive 型対流 (Diffusive Convection: 以降 DC と省略します) が発生する可能性があります。

DDC は海洋中において

① 加熱・冷却・風応力などの浮力強制を必要とせず、

* 2025 年 1 月 9 日受領 2025 年 7 月 16 日受理
著作権：日本海洋学会，2025 年

[†] 東京海洋大学船舶海洋オペレーションセンター
〒108-8477 東京都港区港南 4-5-7
e-mail: jiro@kaiyodai.ac.jp

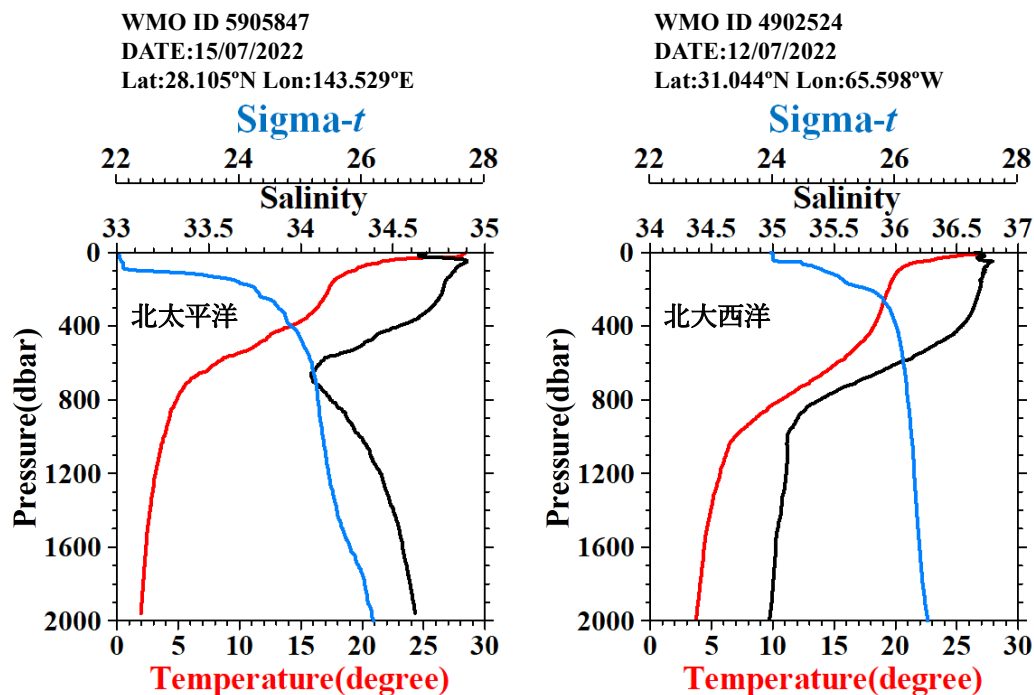


図1 北太平洋（左）と北大西洋（右）の中緯度域に展開したアルゴフロートで得られた水温（赤），塩分（黒），密度（青）の鉛直分布。

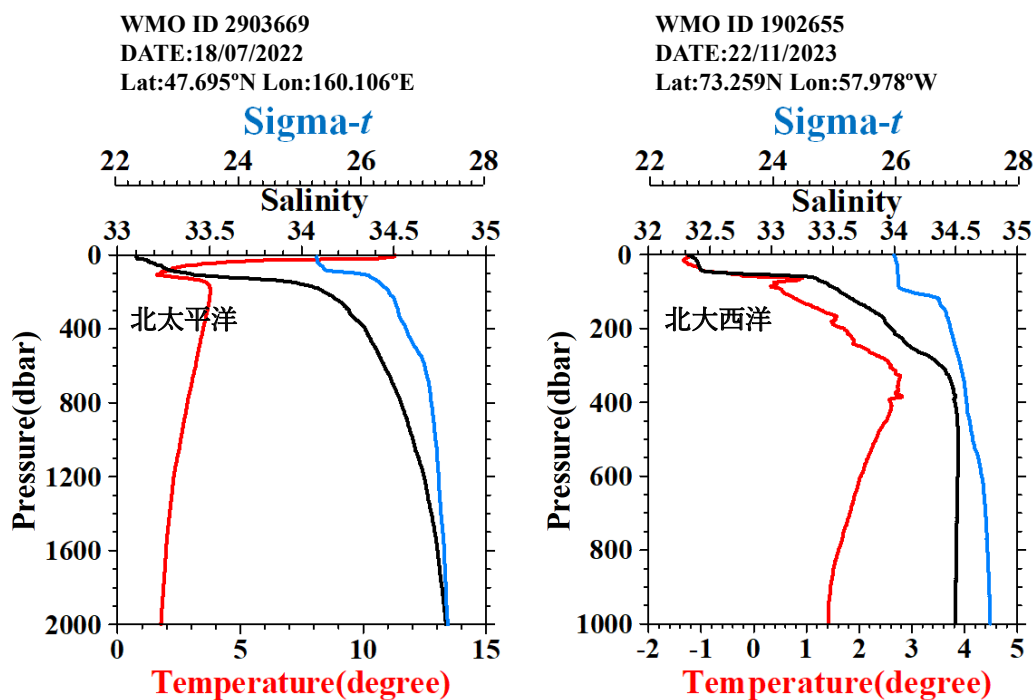


図2 北太平洋（左）と北大西洋（右）の高緯度域に展開したアルゴフロートで得られた水温（赤），塩分（黒），密度（青）の鉛直分布。

重力的に安定な成層状態で鉛直混合が生じし、熱・塩分の鉛直輸送が効率的に行われる

- ② 外力強制による対流 (Forced Convection) 混合と異なり、系のポテンシャルエネルギーが減少する (負の密度拡散が生じる)
- ③ 数 m から数十 m の厚さスケールを持つ階段状構造を作り出し、海域によっては数年にわたって存在する
- ④ 水塊の貫入現象を伴うことがある

といった特徴を持っています。①, ②, ③の特徴は海洋中の数 mm から数十 m にわたる鉛直混合過程, ④は数 km から数十 km にわたる大規模な水平混合過程を促進するものであり、海洋の大規模循環構造を調節し、気候を制御する上で重要な役割を果たすと考えられます。この4点については後の第3章で詳しく考えます。

DDC は後述するように 1950 年代に“発見”され (Stommel *et al.*, 1956), その後多くの人々が研究に携わってきました。その概要は英文では Turner (1974, 1985), Huppert and Turner (1981), Schmitt (1994), 和文では増田 (1975), 柳瀬 (1988), 筆者ら (吉田・長島, 1990; 長島ら, 1997) の解説がありますが、今回ここ 30 年ほどの間に蓄積された新たな知見を元に解説を試み、海洋混合過程研究に資するものとしたと考えました。本第1部では、まず研究の始まり、次いで DDC の特徴を上記①~④に基づいて解説します。以降「海洋観測で捉えられた DDC」, 「DDC の理論的取り扱い」について順次解説する予定です。

2. DDC 研究の始まり

2.1. Woods Hole 海洋研究所での議論

DDC は純粋な思考実験からその存在を予言されたという点で、極めて特異な対流現象です。多分 1955 年頃と思われますが、Woods Hole 海洋研究所のどこかで、Stommel と Arons がバミューダ海域で深海底の圧力変化を簡単に測定できる方法について議論していたそうです (エピソードは Arons による Stommel の業績紹介 (Arons, 1980), 図3は Ruddick and Gargett (2003) より)。

(Stommel) 深海に長いチューブを入れ、深海水を汲

み上げることによって測定できないだろうか? (図3

(a)) バミューダでは淡水は手に入りにくいから、ポンプで海水をくみ上げれば良いんじゃないか。汲み上げられた深海水はすぐ温められ、また塩分値が小さいから、十分に海水面より高く上がるのではないだろうか (図3 (b))。

(Arons) この海域の低塩分水はほぼ無限だから、ポンプを止めた後、蛇口を付けて開ければ深海水が上がり続けるのでは (図3 (c))。『*Hank, if I open the faucet, it will run forever*』

彼らは Blanchard の実験室に走り、蓄電池の入れ物に成層を作製し、図3 (c) 右のように流れが発生することを確認したそうです。その後 Stommel らは厳密な室内実験 (図4) を行い、下層の低塩分水が実質的に永久に噴出し続けることから、‘Perpetual Salt Fountain’ と命名しました (Stommel *et al.*, 1956)。この実験の詳細は以下の通りです。

- ガラス管 A の中央まで暖かい真水で満たす。次に色を付けた密度の大きな冷たい同じ量の真水 (図4で下方の影がついた水です) を上層の暖かい水と混ぜられないように、下方の B の穴から注入する
- ガラス管 A の中央にガラス管 C (管内に二次流が発生するのを防ぐために上端を細くしてある) をその上端を指でふさぎながらゆっくり上方から挿入する。実験者は管 C の下端が管 A 内の暖真水と冷真水の境界面より下部に達するまで挿入し、そこで指を離して C の管内が下層の色つき水で満たされるようにする。その後ゆっくり管 C を持ち上げる
- これらの操作をゆっくり行うことにより、管 C 内の水は周囲の同じ深さの水と同じ温度となる。管 C の先端が上層の水面より下になっても、管 C 内の色付き水は暖真水と冷真水の境界面より上に持ち上がったままで静止状態になる。この状態になってから数分後、管 C 内には小さな二次流と循環が存在するが、これは管内外の温度差によるゆっくりとした加熱と冷却によるものである
- この段階で管 C の外側の色のついていない上層に、少量の暖かい塩水をかき混ぜながら、管 C 外側の管 A 内の二層系の安定を損なわないように加える
- このことにより管 A 底部の圧力が高くなり、すぐに

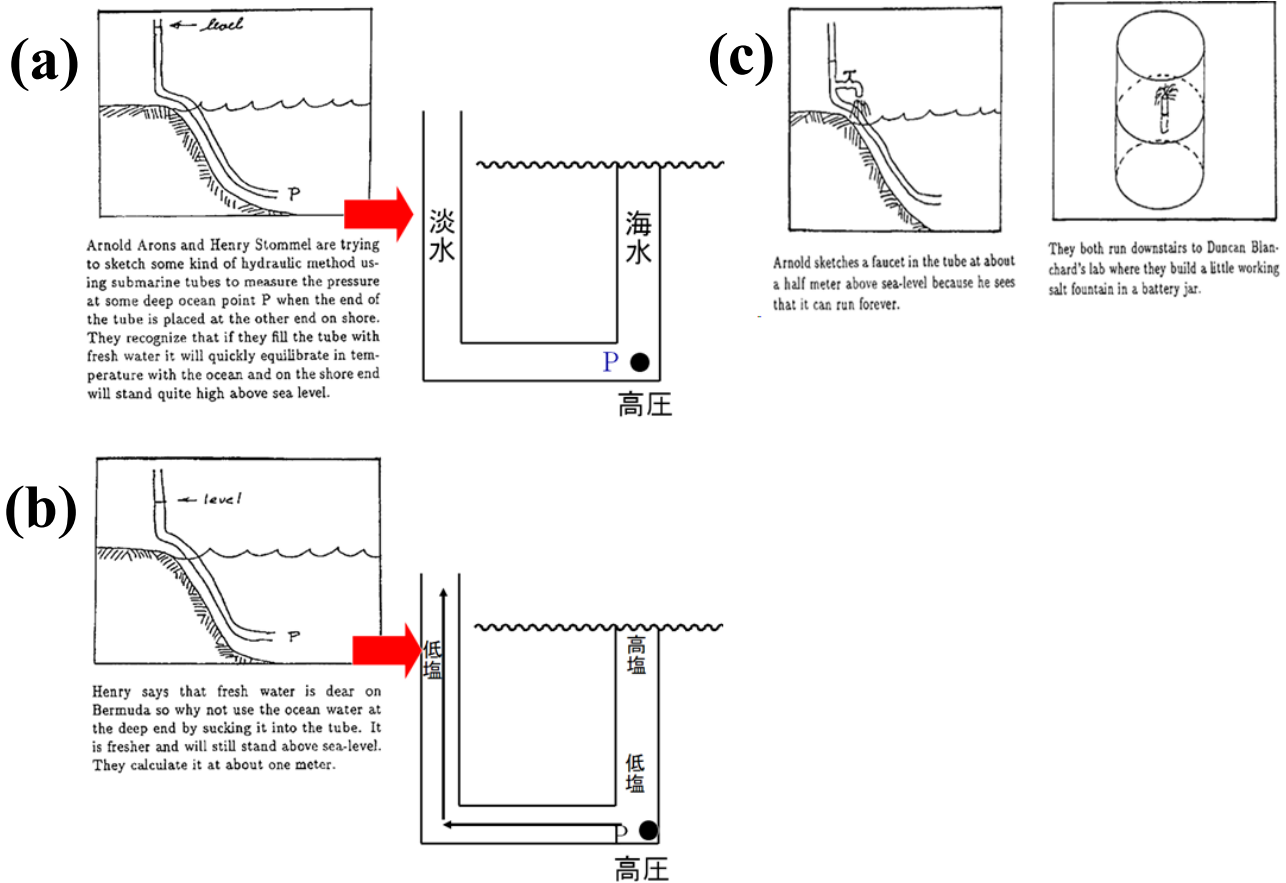


図3 (a) 当時の Stommel のスケッチ。P 点の圧力変化を測りたいと考えました。(b) チューブの中を深層の低塩分の海水で満たせば、上層の海水の温度にすぐ馴染むので、地上のチューブ端で十分に海水面より高くなり、P 点の圧力を推定できるのではないかと考え、大体 1 m 位は上昇すると計算。(c) 左の図は地表の蛇口から海水が出続ける想像図。彼らは Blanchard の実験室に走り、蓄電池の入れ物に上層が高温高塩で下層が低温低塩の成層を作製し、右の図のようにガラス管から下層の低温低塩水が出続けることを確認したそうです (Elsevier の許可を得て Ruddick and Gargett, 2003 より転載。©2003)。

管 C 先端から下層の低温な真水のジェットが出始める。上昇する下層の真水は（周囲の上層の水から暖められるが、塩分のやりとりはないため）管 C 先端から出続け、上層の上に三番目の層として温められた色つきの真水がたまる（図 4 で管 A の上の影がついた部分）。この実験は当初高温であった上層水の温度が（周りから冷やされて）下がり、実験条件が維持されなくなると停止する

Stommel らはこの成層状態（上層が高温高塩、下層が低温低塩）が維持される現実の海域では、このジェット (Salt Fountain：不安定な塩分成層の位置エネルギーか

ら流れが生み出されることからこう名付けられています）は永遠に噴出し続けると述べています。また、このシステムが深海の栄養塩豊富な海水を上層にもたらすシステムとして有効で、良い漁場をもたらすのではないかと指摘しています。しかし、Groves (1959) は典型的な海洋構造場を考え、深海からの flow rate が $5 \times 10^3 \text{ cm}^3/\text{s}$ になると見積もり、深海の栄養塩に富んだ海水を表層付近に持ってきて、漁場として活用するにはあまりにも不十分と結論づけています。1971 年に Stommel と Howard は、マルティニーク島沖の深海に熱伝導性のプラスチックチューブ (1,000 m) を挿入する実験を行い、60 cm/s

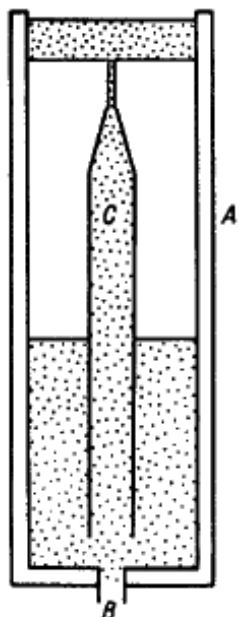


Fig. 1. Laboratory experiment to demonstrate the salt fountain, showing outside glass tube A, with hole in the bottom for filling B, and inner glass tube C to produce the fountain. The shading indicates the coloured water after the fountain has been in operation for some time.

図4 Stommel *et al.* (1956) が用いた実験装置。影が付いた下の層は低温な真水で、付いていないその上の層は高温の塩水。図は流れ (Salt Fountain) が発生してからある程度時間が経った後、上層の高温の塩水の上に、影が付いた下層からの低温な真水が温められて貯まり三層になった状態 (Elsevier の許可を得て Stommel *et al.*, 1956 より転載。©1956)。

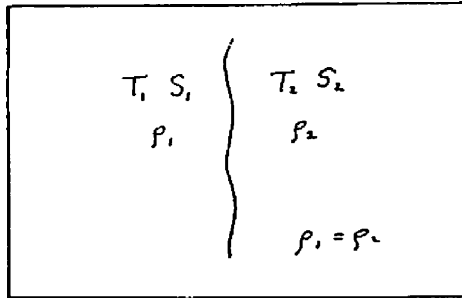
に及ぶ上昇流を確認しました。しかし、波が高いため、この流れが実験室で見たのと同じメカニズムで発生したものであることまでは確認できなかったということです (Huppert and Turner, 1981 による)。結局、Stommel はこの研究の継続を断念しました。ちなみに 2002 年頃に東北大学の円山教授 (当時) が中心となって、この原理を用いた海洋肥沃化計画 (ラピュタ計画) が行われましたが (https://www.jsme-fed.org/newsletters/2010_9/no5.html#ctop)、人為的な環境変化に関する各国間の合意形成が難しいことから、現在は中断しているようです。

2.2. DDC 研究の進展

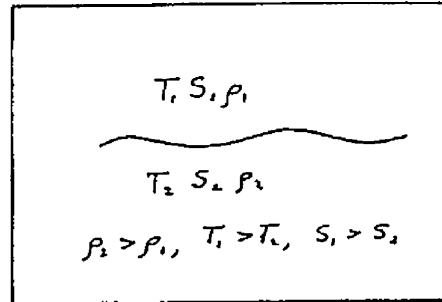
Stommel らの思考実験、並びに室内実験では、熱は伝わるが物質 (塩分) は伝わらないチューブを仮定していました。Stern (1960) は熱の拡散係数 ($k_T = 1.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$) と塩分の拡散係数 ($k_S = 1.3 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$, 20°C , 35‰) の値。この数値は Stern が用いたものです) の相違 ($k_T \div 100 k_S$) に注目し、チューブは必須ではなく、線形安定論を用いて、重力的に安定な場合に対流現象が存在することを示しました。このことにより研究が進展することになります。Stern はどのようにして拡散係数の相違に気づくことになったのでしょうか。以下は Ruddick and Gargett (2003) の記述から引用します。

1960 年の春に Stommel と Stern が黒板の前で図 5 上左のように左右の流体の密度は等しいが、水温、塩分が異なる場合に、どういった対流が起きるか考えていました。彼らは熱の拡散係数が塩分より大きいことは認識していましたが、図 5 上左の場合について考えているときには適当な数値モデルは構築できていませんでした。その後図 5 上右の場合を考えたとき、Rayleigh-Bénard 対流と同等に考えられることに気づきました。Stern が算数を始めましたが、Stommel は (もし Rayleigh-Bénard 対流と同様だとすれば) 生成される対流セルが大きくなりすぎることが気になり、その中に含まれる (拡散が効く微細な縦横スケールが同程度の) 粒状構造のようなものを想像しました。

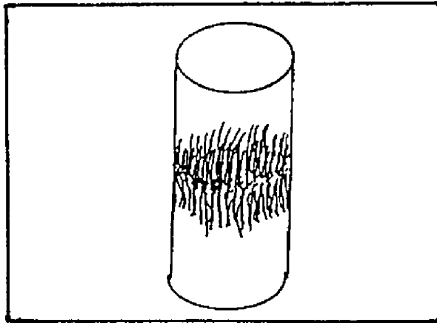
そこで、とにかくこの状況を Faller の実験室で作ったところ、長くて細いフィンガーが生成されました (図 5 下左)。どうも Stommel たちが大騒ぎをしたらしく、これを聞きつけた Malkus がやってきて、最大成長速度を持つ定常な SF の有限振幅解のフィンガーセルの幅が 1 cm より小さいこと (図 5 下右) を見いだしたそうです (このエピソードは Faller, 1992 より)。おそらく、これは次元解析を行い、最大成長率を持つ解の波数 (k) が、塩分の拡散係数を無視して (多分この計算の時には熱の拡散係数より十分小さいとして)



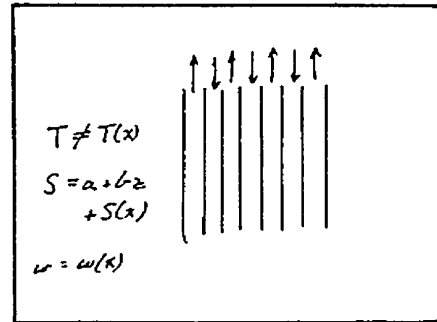
Melvin Stern and Henry Stommel are standing at the blackboard trying to formulate a convection problem in which two fluids of the same density but different temperatures and salinities are initially at rest and separated by a vertical interface. They know that the thermometric conductivity is greater than the salt diffusivity, but can't settle on an analytical model.



Suddenly they remember the equivalent Rayleigh convection problem with the gradients vertical instead of horizontal. Melvin begins the algebra; Henry worries that the cells will be too big and visualises some sort of small granular structure.



Running to Allan Faller they do an experiment in the sink and to their surprise find long thin fingers.



Willem Malkus across the hall hears the ruckus, walks in and quickly works out the steady state finite amplitude salt finger solution with maximum velocity. They check out the numbers and it seems to work!

図5 二重拡散対流の理論構築に至る Stommel のスケッチ (Elsevier の許可を得て Ruddick and Gargett, 2003 より転載。©2003)。

$$\begin{aligned}
 k^{-1} &= \left(\frac{g \alpha \bar{T}_z}{\nu k_T} \right)^{-\frac{1}{4}} \Rightarrow \frac{2\pi}{k} = 2\pi \left(\frac{g \alpha \bar{T}_z}{\nu k_T} \right)^{-\frac{1}{4}} \\
 &= 2\pi \left(\frac{980 \times 2.62 \times 10^{-4} \times \frac{20}{3 \sim 6}}{10^{-2} \times 1.5 \times 10^{-3}} \right)^{-\frac{1}{4}} \quad (1) \\
 &= 0.3 \text{ cm} \sim 0.15 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

と (1) 式で与えられるとしたと思われます ($\bar{T}_z$: 水温鉛直勾配 (鉛直軸は上向きを正とします。数値は Stern (1960) より), g : 重力加速度, α : 熱膨張係数 $= 2.62 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$, ν : 分子粘性係数 $= 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ です。この式の導出は第3部で説明する予定です)。実際に彼らが計算に用いた数値は分かりませんが, 上の実験内容でも 1 インチ/4 セルですので, 0.5 cm 程度になります。この発見に関わったのは Stommel, Arons, Stern, Blanchard,

Faller, Malkus です。ちなみに当時の WHOI にはこの他, Veronis, Bolin, Webster などが在籍し, この実験の後全員でこの発見を検証し, この功績は Stern に帰すとし, 彼が論文をまとめることになったそうです (Faller, 1992)。Stern (1960) は上層が高温高塩, 下層が低温低塩な連続成層を考え, Salt Finger の理論解を提出し, その逆の場合に振動解が存在する (DC) ことは脚注で述べています。ちなみに, Stern は Malkus の連れ合い (J. Malkus, 気象学者) に勧められて, 1950 年頃から WHOI に籍を置いたようです。1954 年から 1959 年にかけては論文を書かず, この 1960 年の論文が彼の個人としての最初の重要な功績となりました。彼が Salt Finger の名付け親と言われています (Veronis, 2011 より)。

しかしながら, Stommel らの実験は世界最初の実験では無く, 19 世紀半ばにオーストラリアのシドニー在住の Jevons が熱と砂糖を成層の構成要件として用いた実験を行っていることが指摘されています (Huppert and Turner, 1981。以下は Schmitt (1995ab) から引用します)。Jevons (1857) は巻雲の生成過程に興味を持ち, ビーカー中で上層に高温高砂糖水, 下層に低温低砂糖水を設置する実験を行いました。彼は熱と砂糖の拡散係数の違い (熱の拡散係数は砂糖の拡散係数の 300 倍ほど) に気づいており, 以下のように現象を説明しています。

“しかし, これらの上下層では, 境界面を通して熱が素早く伝わり, 平均温度となる傾向がある。このような場合, 上層の砂糖を含む液体の密度が, 下部の砂糖を含まない流体の上面よりも僅かに大きくなり, その結果下層に沈む。このように, 上層の下面の一部は下層に絶えず沈み, 反対に下層の上面の一部は境界面を通して上昇する。この動きは, 実験が示すように, 微細で糸のように細い流れによって起こる”。このように SF を観測し, そのメカニズムを正しく理解していたにも関わらず, この研究は忘れ去られていました。

Rayleigh は 1880 年頃に Jevons の実験を再現し (Rayleigh, 1883), SF のキノコ状の構造を観察しました。Rayleigh はこの実験では拡散係数の相違に気づいておらず, SF の発見には至りませんでした。同様に Ekman は死水 (dead water) に関する研究 (Ekman, 1906) で, 移動する船の背後に出来る内部波を可視化するために,

ミルクを海水の上に置くという実験を行い (今日でも SF のデモンストレーションで用いられます), ミルクフィンガーを観察していますが, その後この現象を追求しませんでした (Radko, 2013 より)。Rayleigh はソルトフィンガー発見の代わりに, 安定成層中で鉛直変位を受けた流体塊が振動する周波数である Brunt-Väisälä frequency, そして今日では Rayleigh-Taylor 不安定と呼ばれる現象を発見しています。Brunt (1927), Väisälä (1925), Taylor (1950) らの論文の 40 から 60 年以上も前の発見です。

その後, 1962 年から Woods Hole 海洋研究所に着任した Turner が Stern の振動解の条件にも注目し, Stommel と一緒により厳密な実験を行い, 初めて DC を生成しました (Turner and Stommel, 1964)。実験条件は図 6 に示しました。Rayleigh-Bénard 対流が生起する条件下でも実験を行っていますが, ここでは SF と DC の結果を図 7 に示します。左が SF の場合で, 細長いセル (フィンガー) 上方に伸張していく様子と, 右の DC の場合に, 時間と共に多数の成層が発達する様子が示されています。

この後 Turner は DC で生成される境界面を通しての熱塩分輸送の研究を進めますが (Turner, 1965), Stommel は共著者になることを拒否したそうです。これは Stommel のスタンスでありまして, Turner は「彼にはよくあることだが, 彼はある問題に没頭して, 人々を熱狂させるが, その後自分自身は身を引いて, 残っている未発見なことを我々に発見させる」, と述べています (McDougall の Turner へのインタビュー, 2004 より)。

3. DDC の特徴

ここでは第 1 章で述べた DDC の特徴について考えます。

① 加熱・冷却などの浮力強制を必要とせず, 重力的に安定な成層状態で生起し, 熱・塩分の鉛直輸送が効率的に行われる

一般に重力的に不安定な層が形成されたとき (重い流体層が軽い流体層の上に置かれた場合や, 地表がスポット状に温められた場合) には, その不安定を解消するために運動が生じます。Rayleigh-Bénard 対流は一樣流体または成層流体が上面 (下面) から冷却 (加熱) を受け

In water with a combined vertical (z positive upward) temperature gradient (dT/dz) and salinity gradient (dS/dz) we can distinguish four cases:

Case	dT/dz	dS/dz	$d\rho/dz$
1	+	-	-
2 $\left\{ \begin{array}{l} a \\ b \end{array} \right.$	+	+	-
3 $\left\{ \begin{array}{l} a \\ b \end{array} \right.$	-	-	-
4	-	+	+

図6 Turner and Stommel (1964) が行った実験成層条件。 z 軸は鉛直上向きで鉛直勾配の正負を（-）と（+）で示しています。Case 1 は上層が高温低塩、下層が低温高塩な重力的に安定な成層。Case 2a は上層が高温高塩、下層が低温低塩で重力的に安定な成層で、SF が発生する成層。Case 2b は Case 2a と同様の水温塩分成層ですが、重力的に不安定な成層。Case 3a は上層が低温低塩、下層が高温高塩で重力的に安定な成層で、DC が発生する成層。Case 3b は Case 3a と同様の水温塩分成層ですが、重力的に不安定な成層。Case 4 は上層が低温高塩、下層が高温低塩の重力的に不安定な成層。Case 2b, Case 3b, Case 4 は Rayleigh-Benard 対流が生起する重力的に不安定な成層です（Turner and Stommel, 1964 より）。

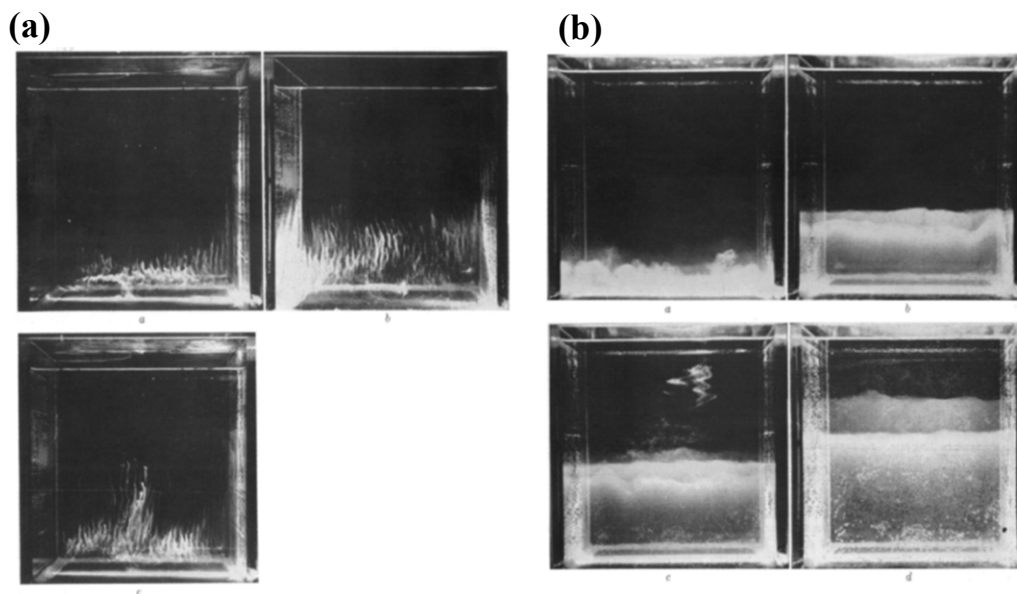


図7 (a) Case 2a : SF の場合。下層に冷水、その上に少量の塩を含んだ暖かい水を配置。蛍光剤であるフルオレセイン染料を下層に注入することにより、細長い冷水の SF セルが立ち上がる様子が、上左、右、下左の順に可視化されています。(b) Case 3a : DC の場合。塩分成層の下方を一定温度で熱しています。同様に下層に注入されたフルオレセイン染料が下層の乱流混合層の存在を示しています（上左）。その後、この層の上に新たな層が発達し二層（上右）、更に三層（下左）と発達しています。下右の写真では幾つかの層が一緒になり三つの深い層が残っている様子がわかります（Turner and Stommel, 1964 より）。

るときに生じ、上昇流・下降流が対になったセル状の渦構造をとることが知られています。また、Rayleigh-Taylor 不安定では上層に重い流体、下層に軽い流体を置くことにより鉛直対流が生じます。DDCはこのような境界を通じた外部からの浮力強制を必要とせず、不安定成層要因 (SF では塩分不安定成層, DC では水温不安定成層) に含まれるポテンシャルエネルギーが、熱と塩分の拡散係数が相違することにより解放され発生します。どのようにして対流は起こるのでしょうか？以下に二層流体の場合を模式的に示します。

● SF の場合 (図 8 (a) ~ 図 8 (d))

最初は静止している界面が、熱が塩分より約 100 倍速く拡散することから、微小な擾乱が成長し、波打った状態が始まります (図 8 (a))。図 8 (b) において左側上昇部 ($w' > 0$, 青矢印) では水温塩分偏差は負 ($T' < 0$, $S' < 0$, 周囲の高温高塩水に比して), 右側の下降部 ($w' < 0$, 赤矢印) では水温塩分偏差は正 ($T' > 0$, $S' > 0$, 周囲の低温低塩水に比較して) となります。図 8 (c) において左側の上昇部では、低温低塩な流体粒子 (青い

丸) は周囲の高温高塩水により暖められます (周囲水と同じ温度になる) が、塩分はそれほど拡散しない (周囲水と同じ塩分にはなりにくい) ので周囲より軽くなります。右側の下降部では、高温高塩な流体粒子 (赤い丸) は周囲の低温低塩水により冷やされます (周囲水と同じ温度になる) が、塩分はそれほど拡散しない (周囲水と同じ塩分にはなりにくい) ので、周囲より重くなります。ここでそれぞれ矢印の向きは拡散の方向で、大きさは拡散による輸送量の違いを表している事に注意してください。この結果図 8 (d) のように上昇するセルと下降するセルが形成されます。

● DC の場合 (図 9 (a) ~ 図 9 (d))

最初は静止している界面が、熱が塩分より約 100 倍速く拡散することから微小な擾乱が成長し、波打つことは同じです (図 9 (a))。図 9 (b) の左側上昇部 ($w' > 0$, 赤矢印) では水温塩分偏差は正 ($T' > 0$, $S' > 0$, 周囲の低温低塩水に比して), 右側の下降部 ($w' < 0$, 青矢印) では水温塩分偏差は負 ($T' < 0$, $S' < 0$, 周囲の高温高塩水に比して) となります。図 9 (c) 左側の上

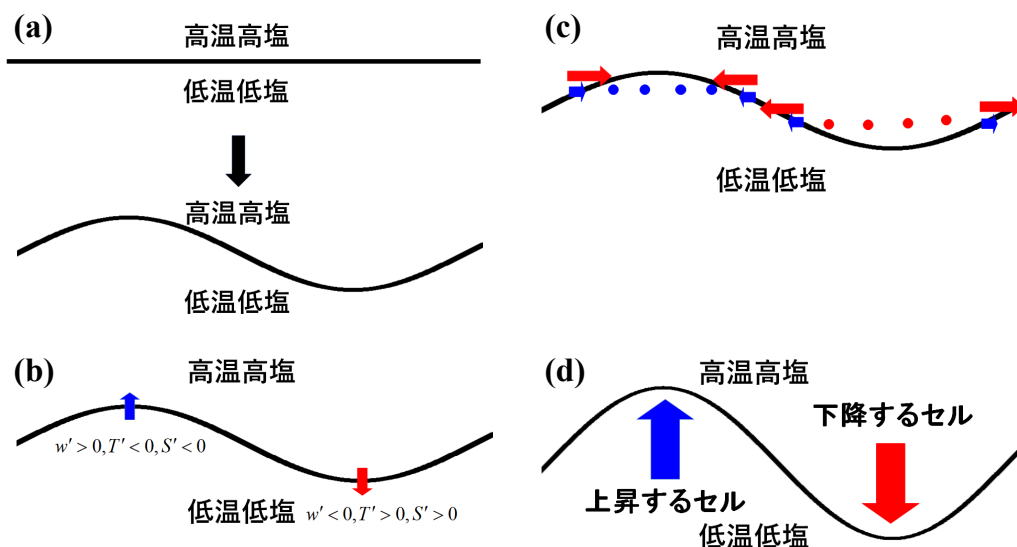


図 8 (a) SF 発生初期境界面の変化。(b) SF 発生初期諸量の変化 (w' : 鉛直速度, T' : 水温, S' : 塩分。変化量をダッシュで表しています)。上向きの青い矢印は下層の低温低塩水, 下向きの赤い矢印は上層の高温高塩水の変位方向を表しています。(c) SF 発生初期の水平方向の水温塩分拡散の様子。青丸は低温低塩, 赤丸は高温高塩な流体粒子を表します。横向きの赤い矢印は水平方向の熱拡散方向, 青い矢印は水平方向の塩分拡散方向をそれぞれ表し, 矢印の大きさで熱の分子拡散 > 塩分の分子拡散を表しています。(d) 上昇し続けるセルと下降し続けるセルが形成されます。

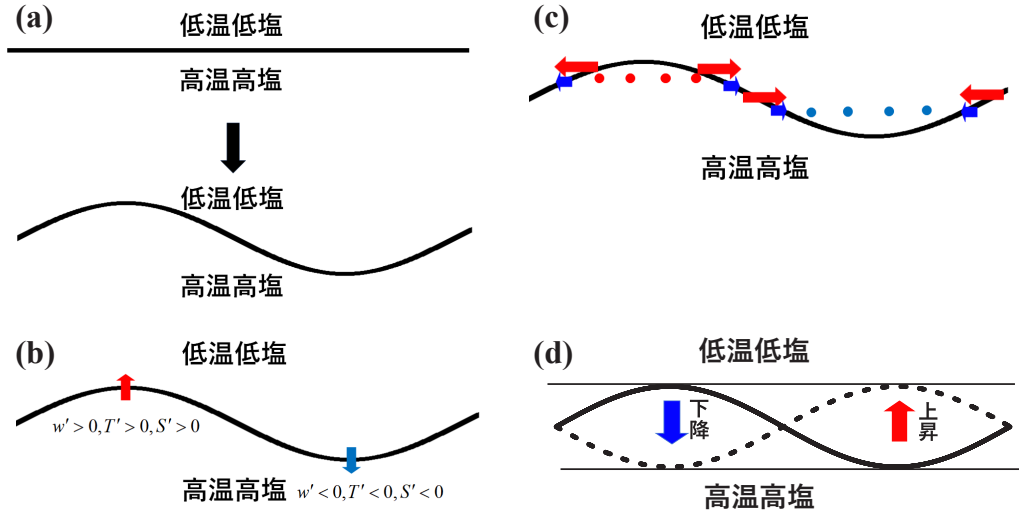


図9 (a) DC 発生初期境界面の変化。(b) DC 発生初期諸量の変化。上向きの赤い矢印は下層の高温高塩水，下向きの青い矢印は上層の低温低塩水の変位方向を表しています。変量の定義は図8と同様です。(c) DC 発生初期の水平方向の水温度塩分拡散の様子。横向きの矢印，赤丸，黒丸の意味は図8と同様です。(d) 当初上昇した左側のセルは下降し（青い下向き矢印），右側の下降したセルは上昇し（赤い上向き矢印），点線の状態に遷移します。下降したセルは再び暖められ上昇し，上昇したセルは冷やされて下降します。この振動運動を繰り返すことにより混合層ができあがります。

昇部では，高温高塩な流体粒子（赤い丸）は周囲の低温低塩水に熱を拡散します（周囲水と同じ温度になる）が，塩分はそれほど拡散しない（周囲水と同じ塩分にはなりにくい）ので周囲より重くなります。右側の下降部では，低温低塩な流体粒子（青い丸）は周囲の高温高塩水より暖められます（周囲水と同じ温度になる）が，塩分はそれほど拡散しない（周囲水と同じ塩分にはなりにくい）ので，周囲より軽くなります。ここでそれぞれ矢印の向きは拡散の方向で，大きさは拡散による輸送量を表している事に注意してください。その結果上昇していた左側のセルは下降し，下降していた右側のセルは上昇します。その後，下降した左側のセルでは暖められて上昇し，右側のセルは冷やされて下降します。この振動運動の振幅が拡大しながら，混合層ができあがります（図9 (d)）。このように分子レベルでの拡散係数の相違により自律的に対流が生じる（Self-driven Convection）ことが特徴です。

それぞれの場合の成層状態を図10に示します。上段がSFで，下段がDCです。ここで $(\bar{\rho})$ は水平平均場を表します。また， (T_0, S_0) 近傍での密度 (ρ) の温度と

塩分への依存性は (T_0, S_0) での熱膨張係数 α と塩分収縮係数 β を用いて， $\bar{\rho} = \rho_0 \{1 - \alpha(\bar{T} - T_0) + \beta(\bar{S} - S_0)\}$ と書けます。それぞれ密度に換算した不安定成層要因（SF： $\beta d\bar{S}/dz > 0$, DC： $\alpha d\bar{T}/dz < 0$ ）に安定成層要因（SF： $\alpha d\bar{T}/dz > 0$, DC： $\beta d\bar{S}/dz < 0$ ）が打ち勝って（SF： $|\alpha d\bar{T}/dz| > |\beta d\bar{S}/dz|$, DC： $|\beta d\bar{S}/dz| > |\alpha d\bar{T}/dz|$ ），安定密度成層（ $d\bar{\rho}/dz < 0$ ）を形成しています。DDCの生成条件は，水温塩分の鉛直勾配（密度に換算した）で(2)式のように与えられます（この条件については第3部で説明する予定です）。

$$\text{SFの生成条件：} 1 < R_\rho = \frac{\alpha \frac{d\bar{T}}{dz}}{\beta \frac{d\bar{S}}{dz}} < \frac{k_T}{k_S} \approx 100, \quad (2)$$

$$\text{DCの生成条件：} 0 < R_\rho = \frac{\alpha \frac{d\bar{T}}{dz}}{\beta \frac{d\bar{S}}{dz}} < 1$$

ここで， R_ρ は密度比（Density Ratio）と呼ばれる無次元数です。SFとDCで密度比の範囲が大きく異なります。

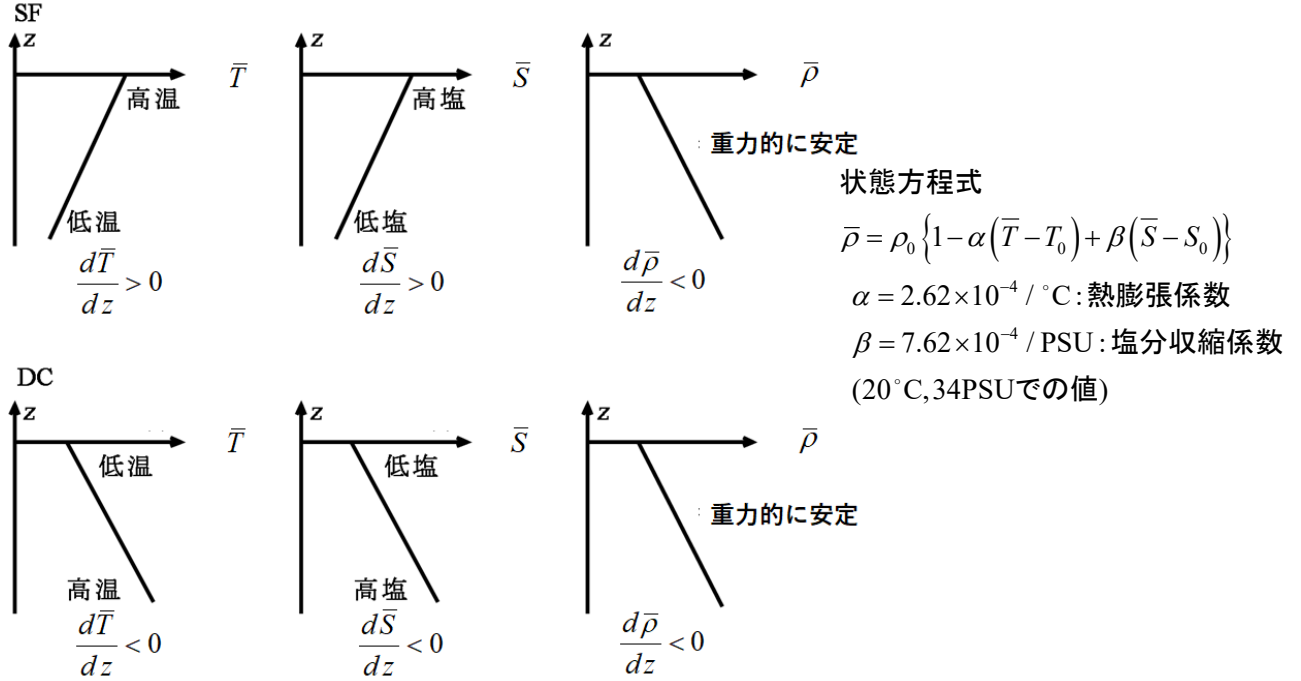


図 10 DDC が発生するときの成層状態。熱膨張係数と塩分収縮係数は水温・塩分値によって変化します。ここでは代表的な値を示しています。

すが、どちらも重力的には安定な状態です。 $\alpha d\bar{T}/dz > 0$, $\beta d\bar{S}/dz < 0$ の場合に R_ρ は負の値をとりますが、やはり重力的に安定な状態です（この場合には、温度塩分共に安定成層です）。SF が生起するような成層状態で $\beta d\bar{S}/dz > \alpha d\bar{T}/dz$ の場合 R_ρ は 1 より小さい正の値をとりますが、不安定な塩分勾配が安定な水温勾配を上回り重力的に不安定となります。また、DC が生起するような成層状態で $\beta d\bar{S}/dz > \alpha d\bar{T}/dz$ の場合（両者とも負であることに注意してください）、 R_ρ は 1 より大きい正の値をとりますが、不安定な水温勾配が安定な塩分勾配を上回り重力的に不安定となります。このように密度逆転がある場合には、密度比だけでは DDC が生じるかどうか判断できなくなります。 R_ρ は値が大きく変化し、その正負によって成層状態を把握することが難しいため、Ruddick (1983) は両方の対流を特徴付けるシンプルなパラメータ (3) 式を提案しました。

$$Tu = \tan^{-1} \left(\frac{\alpha \frac{d\bar{T}}{dz} + \beta \frac{d\bar{S}}{dz}}{\alpha \frac{d\bar{T}}{dz} - \beta \frac{d\bar{S}}{dz}} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{R_\rho + 1}{R_\rho - 1} \right) \quad (3)$$

$45^\circ < Tu < 90^\circ$: SF, $-90^\circ < Tu < -45^\circ$: DC,
 $-45^\circ < Tu < 45^\circ$: 安定, それ以外の角度 : 重力的に不安定

Tu をターナーアングル (Turner Angle) と呼びます。密度逆転が存在する場合、ターナーアングルは $-90^\circ < Tu < 90^\circ$ 以外の値を取り、密度比を用いる場合より容易に重力的に不安定かどうか判断できることになります。SF は $1 < R_\rho < 2$ ($72^\circ < Tu < 90^\circ$), DC は $0.5 < R_\rho < 1$ ($-90^\circ < Tu < -72^\circ$) で活発になる事が知られています（詳しくは Nakano and Yoshida, 2019）。図 11 は三陸沖の CTD 観測データの一例です。80 dbar 以深で水温塩分鉛直分布に多くの逆転構造が見えますが、密度鉛直分布は下方ほど値が大きくなる重力的に安定な成層となっています。密度比は水温塩分の微細な変化に応じて

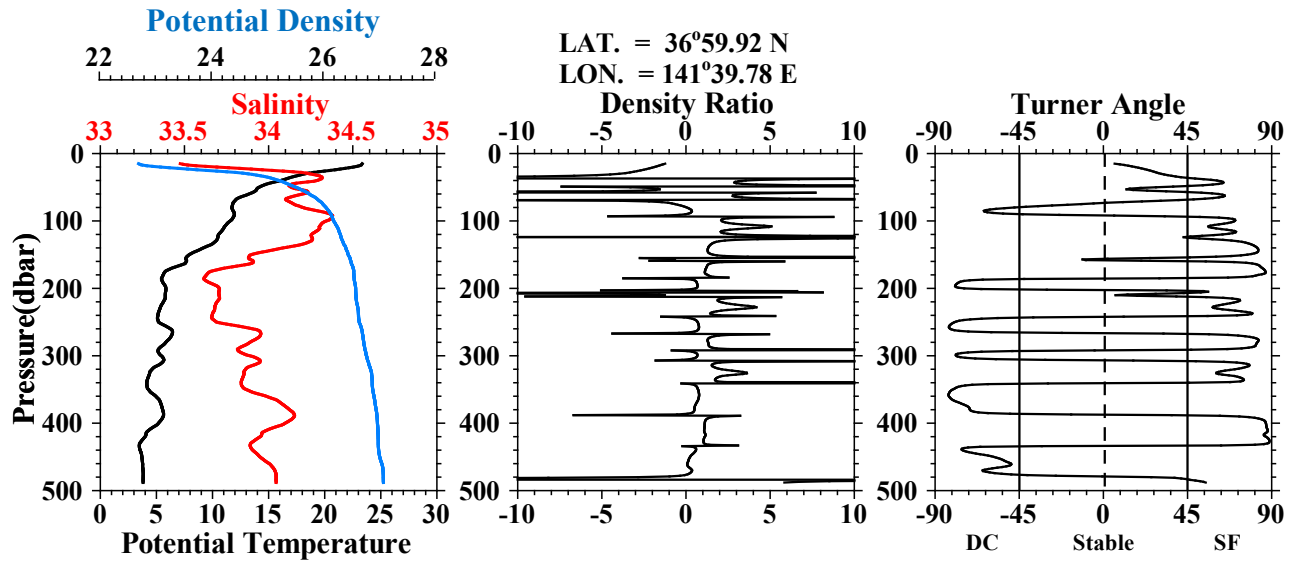


図 11 三陸沖観測データの一例。(a) ポテンシャル水温 (黒), 塩分 (赤), ポテンシャル密度 (青), (b) 密度比, (c) ターナーアングルの鉛直分布。SF, DC, 安定成層が入り組んでいることがわかります。

大きく変化するため、成層構造を一見して把握するのが難しくなりますが、ターナーアングルの鉛直分布では SF 層, DC 層, 安定層が鉛直方向に交互に現れている様子をはっきりと示すことが出来ます。ターナーアングルを構成する水温塩分の (密度に換算した) 鉛直勾配を縦軸横軸に配置すると、安定成層, SF, DC, 不安定成層を一つの円グラフ上で扱うことが出来ます。これを Circle Diagram と呼びます (図 12 (a))。実際に Circle Diagram を, T - S Diagram 中の 3 点 (20°C , 37 PSU , 15°C , 36 PSU , 5°C , 35 PSU) を選び、重ねて書いたのが図 12 (b) です。Circle Diagram の $R_{\rho}=1$ の直線は T - S Diagram 中では等密度線の接線方向と一致します。図 12 (a) ではこの傾きは 1 ですが, T - S Diagram 中での傾きは, 図 10 に示した状態方程式を密度一定の下, S に関して微分すると, $\partial \bar{T} / \partial \bar{S} |_{\rho} = \beta / \alpha$ となります。このため $R_{\rho}=1$ の直線が等密度線に接するように Circle Diagram の縦横比を調節して配置してあります。これは単に縦横比を変えただけですので本質には変化はなく, それぞれの楕円の中心付近の色分けした領域近傍での SF 層, DC 層の分布を見ることにより水塊が安定もしくは不安定であるかどうか吟味することができます。

ここで注意すべきことは, 密度に寄与する成分が二つ

以上あり, それぞれの拡散係数が異なっていれば, 熱と塩分で成層していなくても, 二重拡散対流は起こり得るということです。Stern and Turner (1969) はこの点に注目し, 塩と砂糖を密度に寄与する成分として選びました。砂糖の拡散係数は塩分の拡散係数の $1/3$ なので, 熱-塩分の二重拡散系が, 塩分-砂糖の二重拡散系で置き換えられることになります。すなわち塩分が熱の役割, 砂糖が塩分の役割を果たすわけです。室内実験では水槽からの熱の損失が大きく制御が難しく, また, 塩-砂糖系では対流が比較的ゆっくり進行することから, 多くの実験が塩-砂糖系で行われ, 二重拡散対流の理解が飛躍的に増大することとなりました。図 13 は塩-砂糖系の室内実験で観測された SF と DC の例です。熱-塩系と比べて SF の構造が整然としていることがわかります。

② 外力強制による対流 (Forced Convection) と異なり, 系のポテンシャルエネルギーが減少する (負の密度拡散が生じる)

Turner は Stommel の勧めもあり (McDougall の Turner へのインタビュー, 2004 より), Woods Hole 海洋研究所から Cambridge 大学へ異動した後も二重拡散対流研究を進め, まず鉛直方向への熱塩分輸送過程に重きを置いた研究を行いました。彼は上層が低塩で下層が高塩な安定

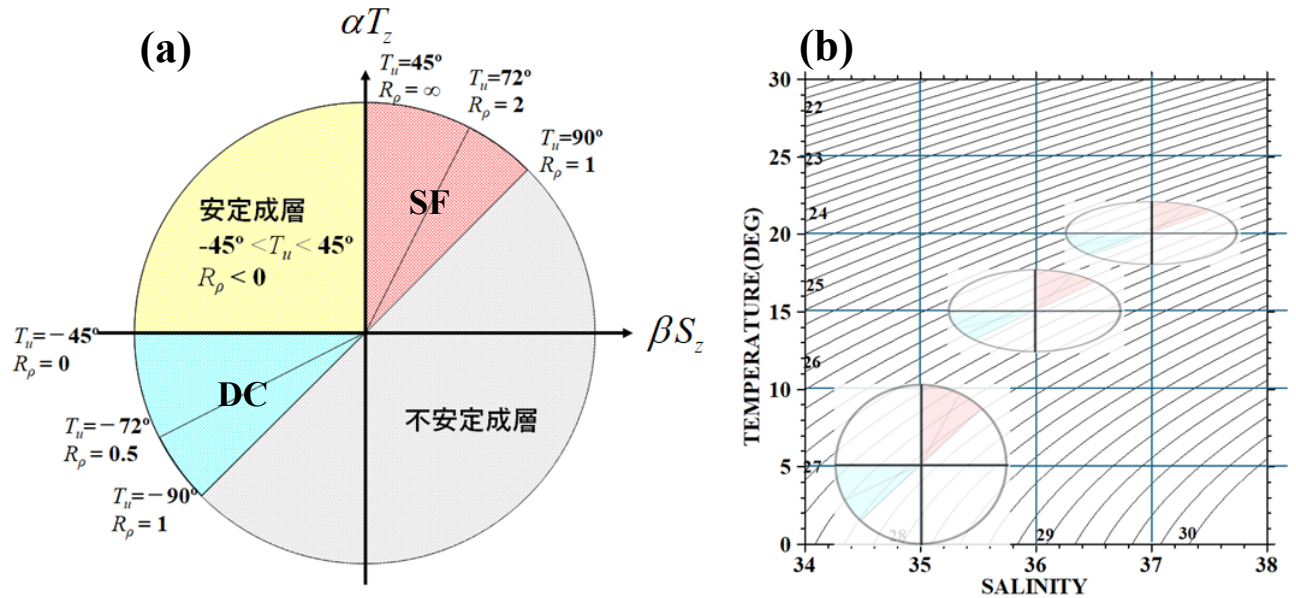


図 12 (a) Circle Diagram (密度に換算した水温鉛直勾配を縦軸，塩分鉛直勾配を横軸にとってあります)。SF の領域 ($45^\circ < T_u < 90^\circ$)，安定成層の領域 ($-45^\circ < T_u < 45^\circ$)，DC の領域 ($-90^\circ < T_u < -45^\circ$)，不安定成層の領域を色分けしてあります。(b) T - S Diagram と Circle Diagram の関係。Circle Diagram の $R_\rho = 1$ の直線が， T - S Diagram 中の等密度曲線の接線方向と一致します。図 12 (a) ではこの傾きは 1 ですが， T - S Diagram 中での傾きは， $\partial T / \partial S|_\rho = \beta / \alpha$ となるので， $R_\rho = 1$ の直線が等密度線に接するように Circle Diagram の縦横比を調節して配置してあります。

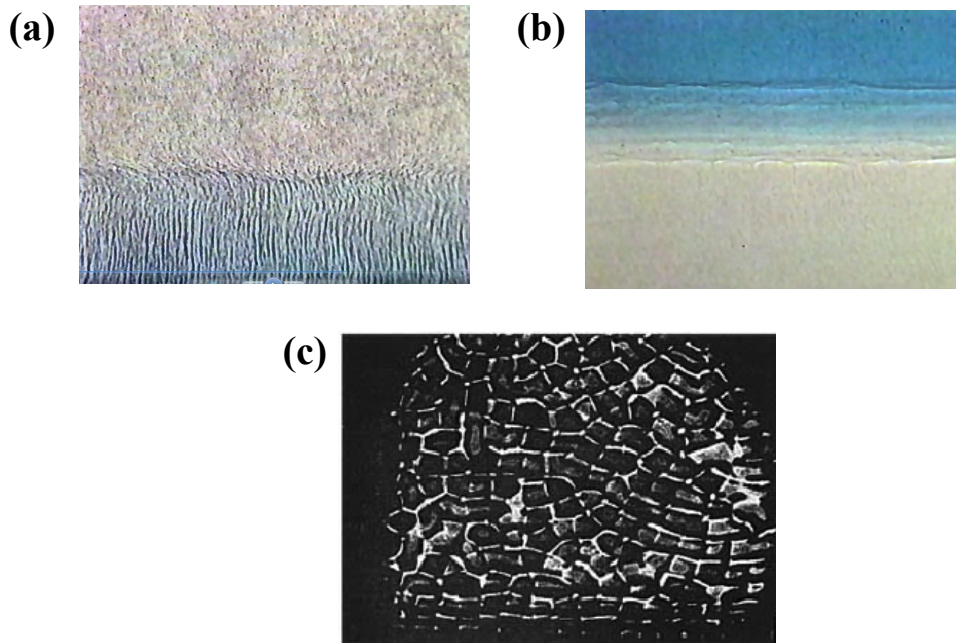


図 13 塩-砂糖系で観察された (a) SF，(b) DC，(c) 上から見た SF の Cell 構造 (Shirtcliffe and Turner, 1970 より転載。2006 © Cambridge University Press，許可を得て複製)。

二層流体を作成し、その下部を温めて DC (Turner, 1965), また、上層が高温で下層が低温な安定二層流体を作成し、その上層表面に浮かべたフロートを通して、塩分を含んだ水を流して（もちろん下層より軽くなるように）SF (Turner, 1967) を発生させて、実験を行いました。Turner は以下のように実験設定に細心の注意を払い、鉛直方向の輸送過程を調べました。水温測定にはサーミスタとバルブ温度計、塩分測定に電気伝導度計とサンプル抽出を併用し、上下層の水温、塩分（電気伝導度から計算）の時間変化からそれぞれの鉛直輸送量を測定しています。1965 年の実験では側面と上部を断熱材で覆い、側面からの熱損失を防いでいます。1967 年の実験では熱損失補正を最少にするために、下層の水温と実験室内の温度差がな

いときに、下層の水温測定と塩分測定のためのサンプル水抽出を行っています。1965 年の実験では、熱伝導のみによる熱輸送を理論的に求めた補正、1967 年の実験では、塩分を含まない実験を行い、熱伝導のみによる熱輸送を測定しての補正をそれぞれ行い、DDC のみによる鉛直熱輸送を厳密に評価しています。Turner はそれぞれの対流で、密度に換算した不安定成分の鉛直輸送量（SF では塩分輸送： βF_S , DC では熱輸送： αF_T ）に対する安定成分の鉛直輸送量（SF では熱輸送： αF_T , DC では塩分輸送： βF_S ）の比で表される密度フラックス比：Density Flux Ratio ($\gamma = \alpha F_T / \beta F_S$: SF, $\gamma' = \beta F_S / \alpha F_T$: DC) を密度比 R_ρ の関数として図 14 のように求めています。ここで二層流体系の場合、上下層間の水温差、塩分差をそれぞれ ΔT , ΔS と

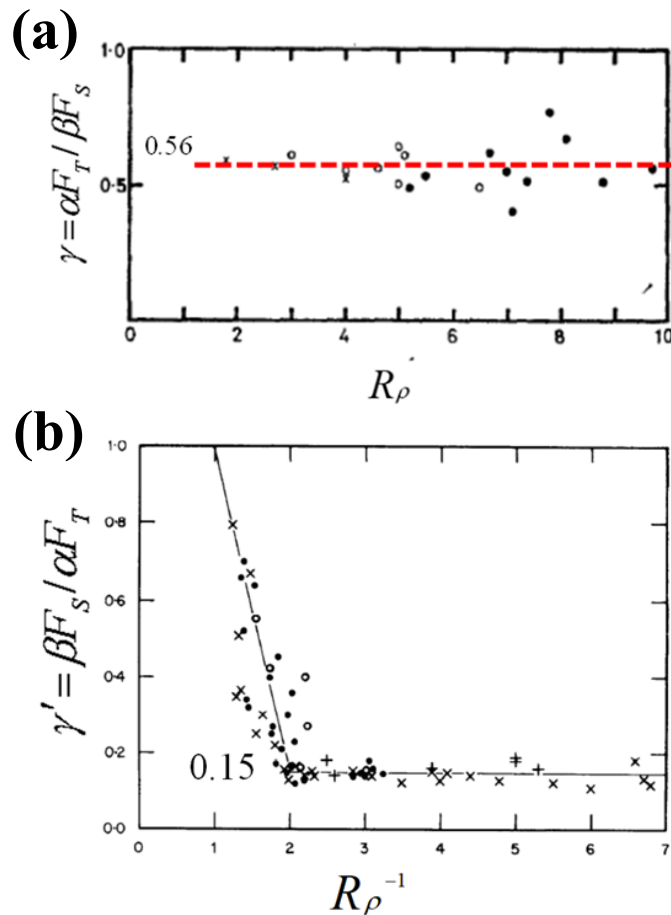


図 14 密度比 R_ρ に対する密度フラックス比 (a) SF (Elsevier の許可を得て Turner, 1967 より転載。©1967), (b) DC (Elsevier の許可を得て Turner, 1965 より転載。©1965)。横軸は R_ρ^{-1} となっていること、また密度フラックス比の定義が SF と DC で異なることに注意して下さい。

すると密度比は $R_\rho = \alpha \Delta T / \beta \Delta S$ で定義されます。

SF の場合、安定成分の輸送量は不安定成分の輸送量に比べ半分程度 ($\sim 0.56 : R_\rho > 2$, 図 14 (a)), DC では $1/6 \sim 1/7$ 程度 ($0 < R_\rho < 0.5$, 図 14 (b)) となっており、不安定成分のポテンシャルエネルギーが効率よく解放されることを意味します。このとき成層はどのように変化するのでしょうか。それぞれの場合を図 15 (SF), 図 16 (DC) に示します。

(SF の場合)

- 初期の状態 (図 15 上) で、上層の密度に換算した水温の単位は 2, 下層は 12 とします (上層高温, 下層低温)。塩分では上層のそれは 8, 下層は 0 とします (上層高塩, 下層低塩)。合算した密度場は上層では 10, 下層では 12 であり、その差は 2 で安定成層と

なっています。 $\alpha \Delta T = 10$, $\beta \Delta S = 6 \Rightarrow R_\rho = \alpha \Delta T / \beta \Delta S = 10/6 = 1.66$ なので SF が起きる状態となっています。

- SF は上下層で塩分が一樣になる (図 15 下中央) と終息するので、下層に向かって、4 密度単位が輸送されます。この時 Turner の実験結果から密度フラックス比 0.5 とすると、この間に密度単位に換算した水温は 2 輸送されます (上層は冷やされ重くなり、下層は温められ軽くなる。図 15 下左)。この結果、上層の密度単位は 8, 下層は 14 で、その差は 6 となるので、成層が強化されることがわかります (図 15 下右)。

(DC の場合)

- 初期の状態 (図 16 上) で、上層の密度に換算した水温の単位は 10, 下層は 0 とします (上層低温, 下層

Salt Finger発生時（上）と終息時（下）の成層状態 Density Flux Ratio $\gamma = \alpha F_T / \beta F_S = 0.5$ と仮定

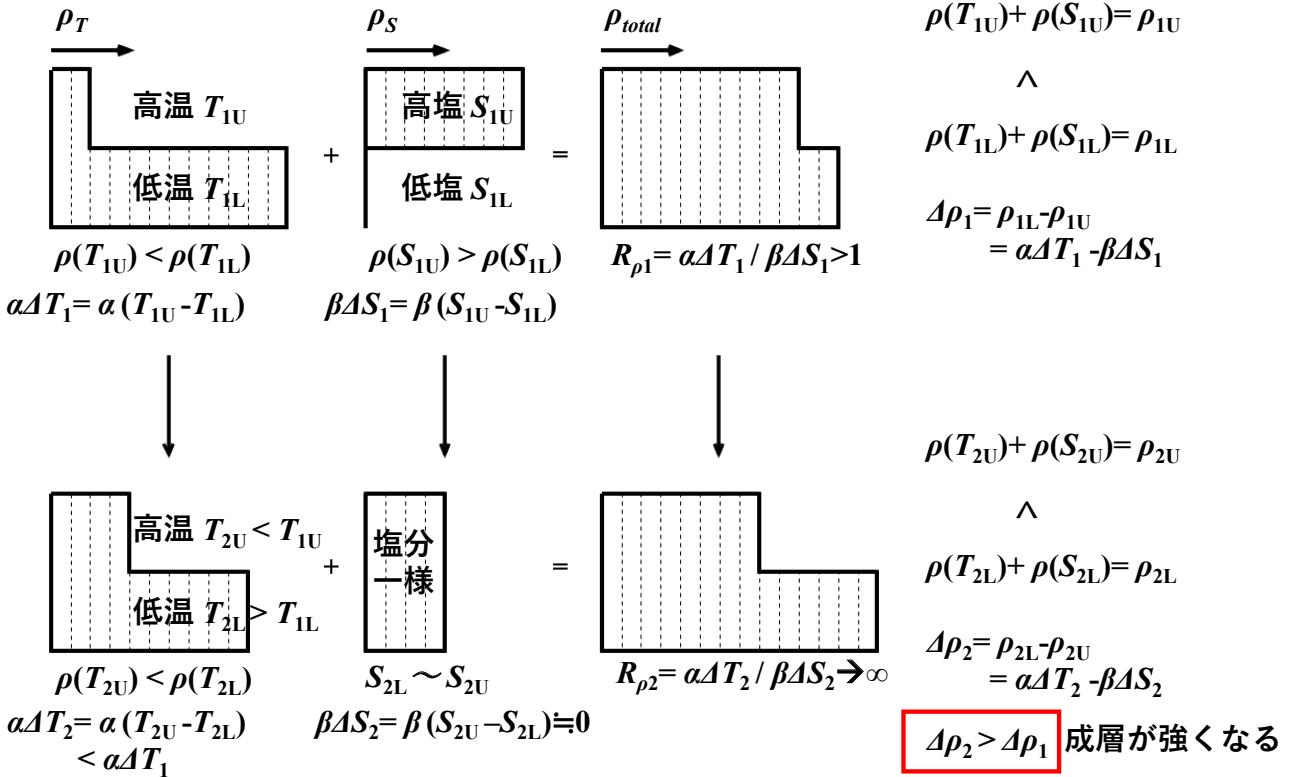


図 15 SF 発生時（上）と終息時（下）の成層構造。短冊一つが水温、塩分が寄与する一つの密度単位を表すものとしています。

Diffusive Convection発生時（上）と終息時（下）の成層状態 Density Flux Ratio $\gamma' = \beta F_S / \alpha F_T = 0.2$ と仮定

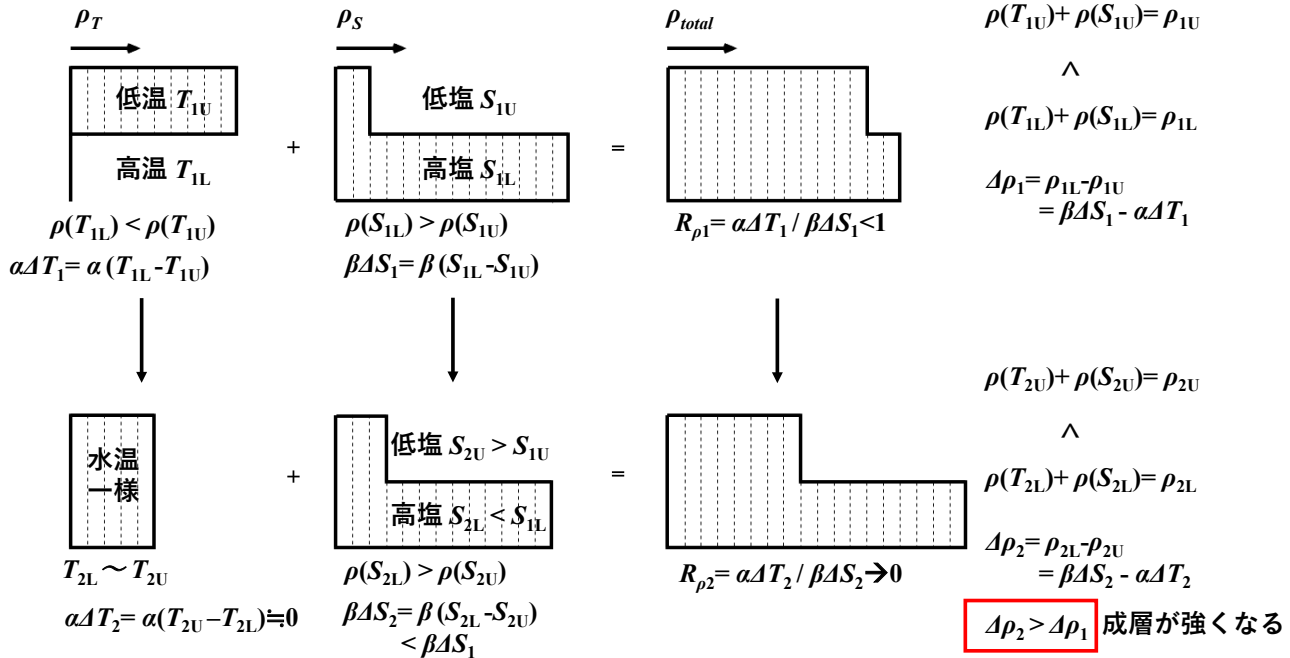


図 16 DC 発生時（上）と終息時（下）の成層構造。短冊一つが水温、塩分が寄与する一つの密度単位を表すことは図 15 と同様です。

高温)。塩分では上層のそれは 2, 下層は 14 とします。合算した密度場は上層では 12, 下層では 14 であり, その差は 2 で安定成層となっています。 $\alpha \Delta T = 10$, $\beta \Delta S = 12 \Rightarrow R_\rho = \alpha \Delta T / \beta \Delta S = 10 / 12 = 0.82$ ので DC が起きる状態となっています。

- DC は上下層で水温が一様になる (図 16 下左) と終息するので, 下層に向かって, 5 密度単位が輸送されます。この時 Turner の実験結果から密度フラックス比 0.2 とすると, この間に密度単位に換算した塩分は 1 輸送されます (上層は塩分が輸送され重くなり, 下層は塩分が減少し軽くなる。図 16 下中央)。この結果, 上層の密度単位は 6, 下層は 18 で, その差は 12 となるので, 成層が強化されることがわかります (図 16 下右)。

このように水温塩分は SF, DC どちらの場合も, 高い値を持つ方から低い方への拡散が起きますが, 密度に関しては低い方 (上層) から高い方 (下層) に向かって

負の密度拡散が起きます。下層が重くなることから, 系全体の重心が下がるので, DDC の場合, 系の位置エネルギーは減少することになります。機械的混合の場合は重心が上がるので位置エネルギーは上昇します。

- ③ 数 m から数十 m の厚さスケールを持つ階段状構造を作り出し, 海域によっては数年にわたって存在する
Turner らは二重拡散対流の室内実験で対流の進行につれて階段状構造が形成されることを見いだしていました (SF: Turner, 1967, Stern and Turner, 1969; DC: Turner, 1965, 1968, 図 17)。

これらの構造はスケールが小さく, 海洋中に存在するかどうか, また, 存在するとしても観測できないのではないかという疑いがありました。1960 年代ではナンセン採水器に転倒温度計を付けての離散的な水温観測と, 採水サンプルの塩分測定 (当時は塩素量測定) が主流であり, 微細な構造を把握することは不可能でした。しかしながら, 1960 年度後半から STD (Salinity, Tempera-

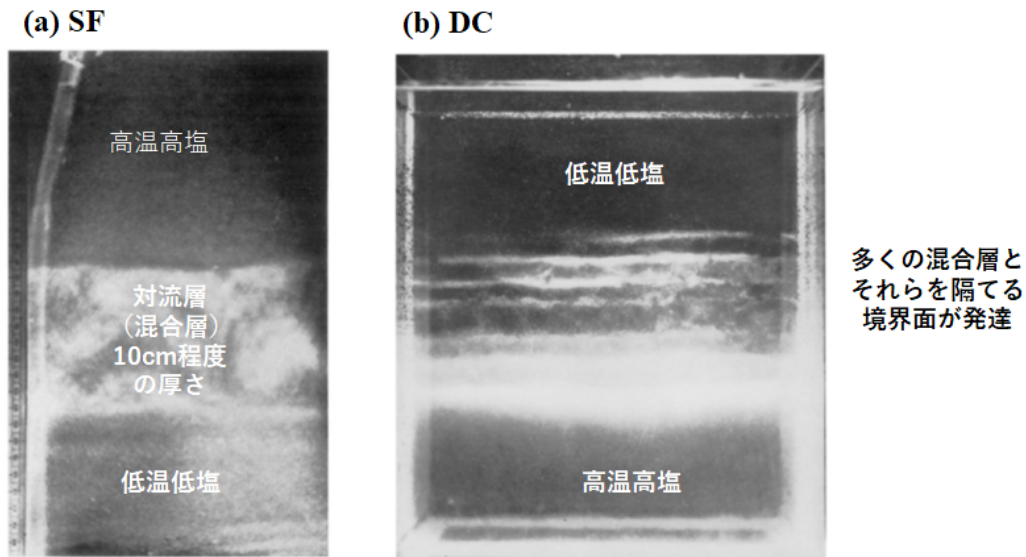


図 17 (a) 水温塩分一様勾配下（上層高温高塩，下層低温低塩）での SF による対流層の形成（Elsevier の許可を得て Stern and Turner, 1969 より転載。©1969），(b) 塩分一様勾配を下から熱した場合の DC による層構造の形成（Elsevier の許可を得て Turner, 1965 より転載。©1965）。境界面が発達しています。混合層厚は 10–12 cm 程度。

ture and Depth profiler) が導入されることにより，塩分微細構造観測が可能となり，海洋中の二重拡散対流の証拠が示されることとなりました。

Cooper and Stommel (1968) は大西洋のパミューダ沖での STD 観測から，水温塩分鉛直分布に 10 m 程度の厚さの階段状構造を見だし，SF により作られた可能性を示唆しました（図 18）。また，Neal *et al.* (1969) は北極海の観測から，上層が低温低塩層で下層が高温高塩層内に図 19 のような厚さ 10 m にも及ぶ階段状構造を見だし，DC により生成されたものと考えました。

階段構造はどのようにして生成されるのでしょうか。

(SF の場合)

Stern (1969) が提案した“Collective Instability (集合不安定)”に基づき，以下のような状況を考えることにします

1. 温度勾配のある安定した温度成層の上に，等温等塩分の層を置きます。下層の塩分は上層の塩分より少なく (ΔS)，どちらも均質であるとしします。重力的に安定であるために，境界面を挟んで水温差（上層が高温： ΔT ）がついています（図 20 (a) 左）。
2. 図 8 で示したように，境界面が波打ち SF が発達を

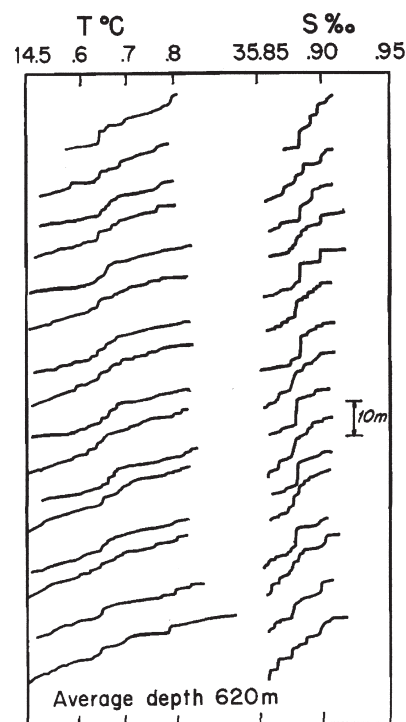


図 18 パミューダ近海で観測された水温塩分階段状構造 (Cooper and Stommel, 1968 より。AGU より許可を得て転載)。

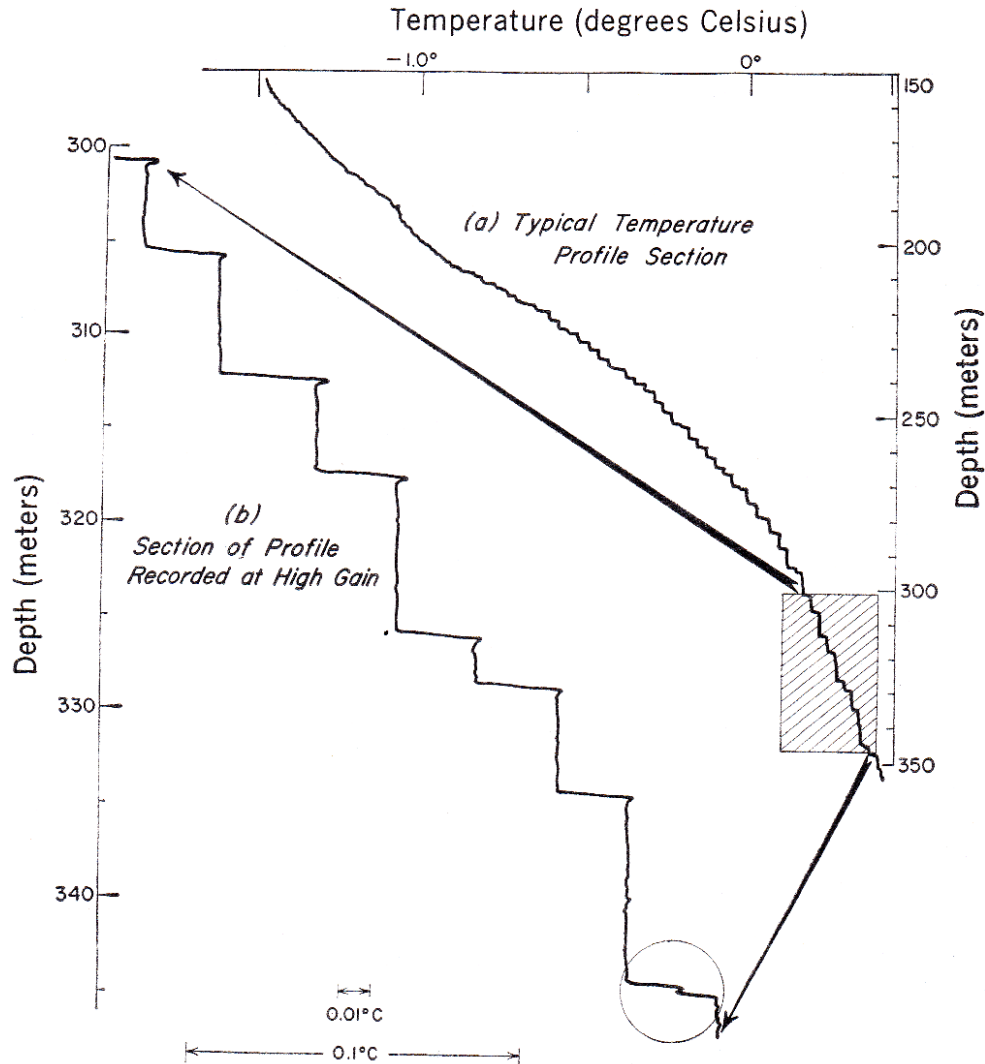


図19 北極海での階段状構造 (Neal *et al.*, 1969 より The American Association for the Advancement of Science の許可を得て転載)。

始めます。温度成層が強い場合 (図 20 (a) 右), 周囲水との温度差が大きいため, 熱が水平方向に効果的に拡散され, SF により下方へ塩が効果的に輸送されます。この結果, SF セルは下方に発達し続け, 長い背の高いフィンガーを形成されます。この場合階段状構造は発達しません。

3. 温度成層が弱い場合 (図 20 (b) 左) 周囲水との温度差が小さいため, 熱が水平方向に効果的に拡散されず, 浮力フラックスの収束が生じ, SF セルが不安定となり, 崩壊し混合層が生じます (図 20 (b) 右)。

この動きは繰り返し下方に向かって生じるので, 多くの階段構造が生じます。

温度成層が強い図 20 (a) の場合, SF が進行し水温成層が弱まると, 図 20 (b) の状態に移行し, SF が崩壊する可能性があると考えられます。図 21 に塩-砂糖系の室内実験で得られた図 20 (a), (b) の場合の SF 層の様子を示しました (Krishnamurti, 2003)。

(DC の場合)

図 9 で示したように, 塩分安定成層も下部が温められと境界面が波打ち, 温められた流体粒子は上方へ上昇

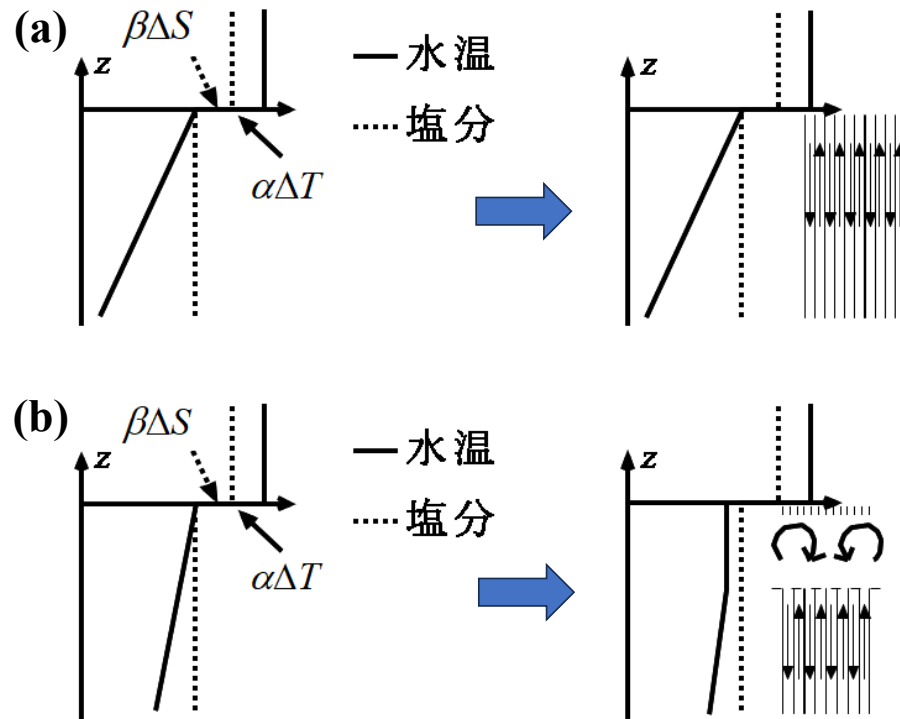


図 20 SF での階段構造形成のメカニズム。(a) 水温鉛直勾配が強い場合、(b) 水温鉛直勾配が弱い場合。

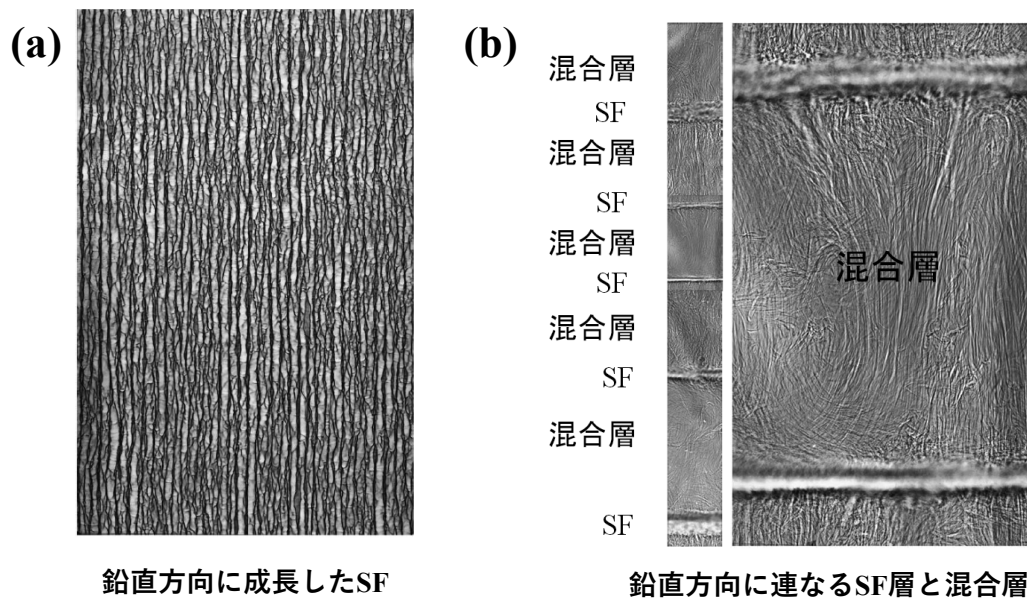


図 21 塩-砂糖系での SF。(a) 図 20 (a) の場合、写真の中は 8.5 cm。(b) 図 20 (b) の場合。左の幅の狭い写真 (SF, 混合層が交互に見えています) の長さは 101 cm。その右は上から 3 番目の混合層の拡大写真です。上下の SF 層はぼやけて見えています (Krishnamurti, 2003 より。2003 © Cambridge University Press, 許可を得て複製)。

します。塩よりも熱の拡散が速いため、粒子は急速に冷やされるが、塩は失われず重くなり下降します（図 22 (a)）。下降した粒子は温められ再び上昇します。Turner (1965, 1968) は、このことを繰り返してシャープな境界面を上を持つ混合層が形成される（図 22 (b)）と説明しています。

その後多くの階段構造形成メカニズムが提唱されていますが、詳しくは第 3 部で説明します。

④ 水塊の貫入現象を伴うことがある

1940 年に開発された MBT (Mechanical BathyThermograph, Spilhaus, 1940) が普及するにつれ、水温の微細な構造が観測されるようになりました (MBT の詳細については Descriptive Physical Oceanography, Chapter S 16 - Instruments and Methods (Talley *et al.*, 2011) を参照してください)。MBT を用いて Roden (1964) は太平洋で多数の水温逆転層を観測しています。彼はその

成因を確定できませんでしたが、今日でいう二重拡散対流による自律的な (Self-driven) 水塊の貫入現象と考えていたようです (Ruddick and Richards, 2003 より)。日本の微細構造観測の草分けである永田豊は、MBT を用いた大島沖合の観測 (Nagata, 1967)、三陸沖合の観測 (Nagata, 1970) で水温逆転層の連なり (図 23, 24) を捉えています。しかしながら、塩分の微細な観測を併せて行うことは出来なかったため、こういった逆転層は内部波の碎波によって局所的に一樣な水塊が形成され、そこに生じた水平方向の密度差によって駆動されるものと考えていました。その後 STD の導入と共に塩分逆転構造が観測されるようになりました。Stommel and Fedorov (1967) はチモール海近辺で高温高塩分な構造 (図 25 左、赤丸で囲ってあります) を 10 数 km にわたって、またミンダナオ島近海 (図 25 右) で高塩分な水塊が連なっている様子を観測しています。彼らはこの貫入現象の原因を特定出来ませんで

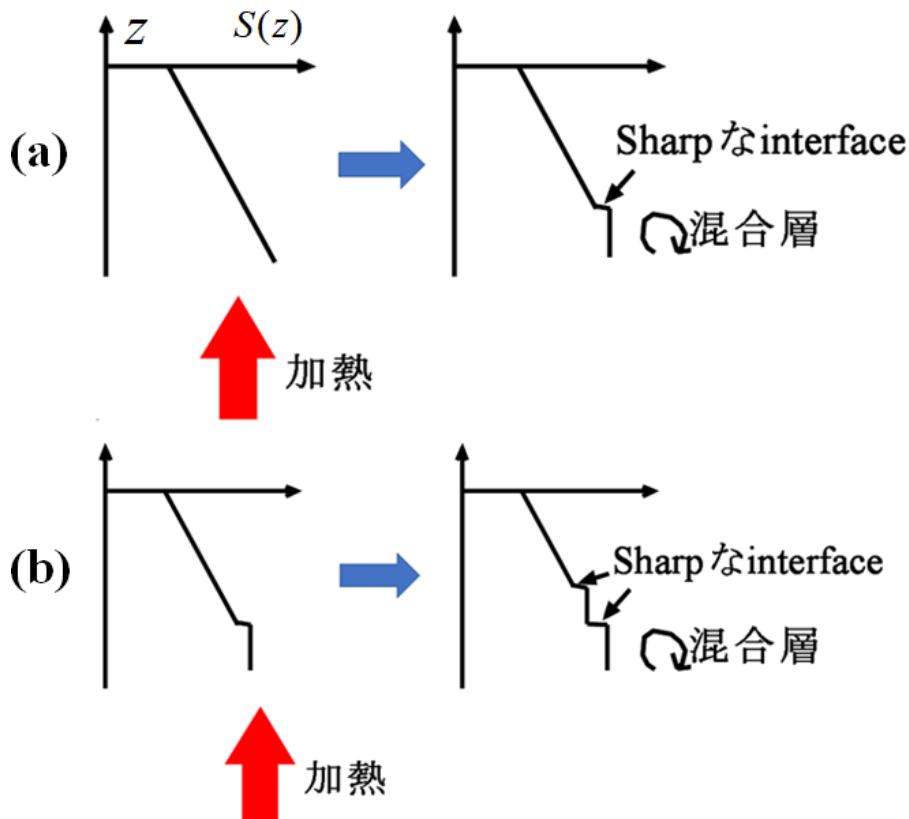


図 22 DC での階段構造形成のメカニズム。(a) 最初の混合層の発達、(b) 二番目の混合層の発達。階段構造が形成されます。

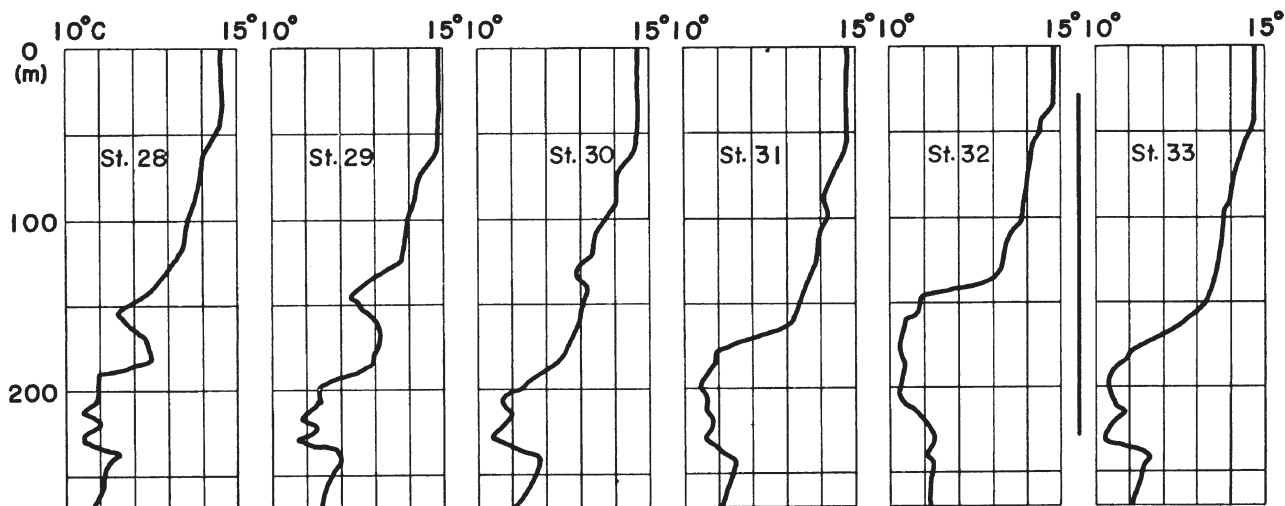


図 23 大島沖合の観測で捉えられた水温逆転層。St. 31 から St. 32 の距離は 7 km 程度 (Nagata, 1967 より。日本海洋学会より許可を得て転載)。

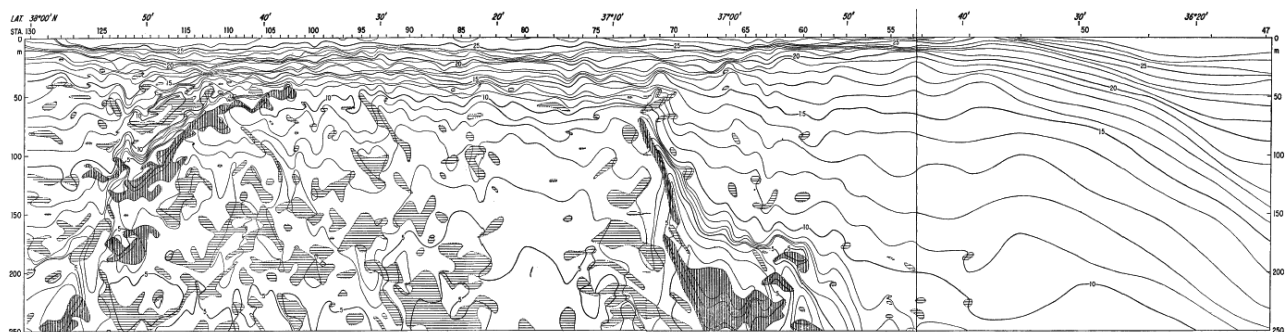


図 24 三陸沖合の観測で捉えられた水温逆転層。ほぼ一マイル間隔の観測。2°C以上の温度逆転にハッチ。逆転層が数マイルにわたって連なっています (Nagata, 1970 より)。

したが、Roden (1964) と同様に二重拡散対流が原因である可能性を指摘しています (Radko, 2013 より)。こういった観測はその後数多く蓄積されました。二重拡散対流によると考えられる貫入現象は室内実験でも再現されています。Turner and Chen (1974) は DC が発生する成層状態にある水槽内に、金属板を斜めに挿入し水平貫入を観測しました (図 26)。金属板が境界となるため、DC による鉛直輸送が阻害され、境界に沿った流れが強制的に発生し、不安定になり横方向への貫入が発生すると考えました。その後 Turner (1978) は塩分成層中に砂糖水 (高温高塩水に相当します) を強制的に注入することによって、DC 層、SF 層を上下に有する複数の貫入現象が発生し、

上昇しながら成層中を進行することを示しました (図 27)。

Ruddick and Turner (1979) はより精密化された実験を行いました (図 28)。水槽左に砂糖成層 (熱-塩系での高温高塩分水に対応)、右に塩分成層 (低温低塩分水に対応) を作成し、左右の密度を一致させ (左右の圧力差が無いように)、仕切り板を取り除き、貫入現象を発生させています。Turner (1978) の実験とは異なり、水平方向の圧力勾配がないため、駆動する外力が存在しません。両方に共通する特徴として、高温高塩な貫入水は上向きに傾きながら図右へ進行し (これを tilt と呼びます)。また低温低塩な貫入水は下向きに傾きながら図左へ進行しました。即ち密度場を横切るような貫入であ

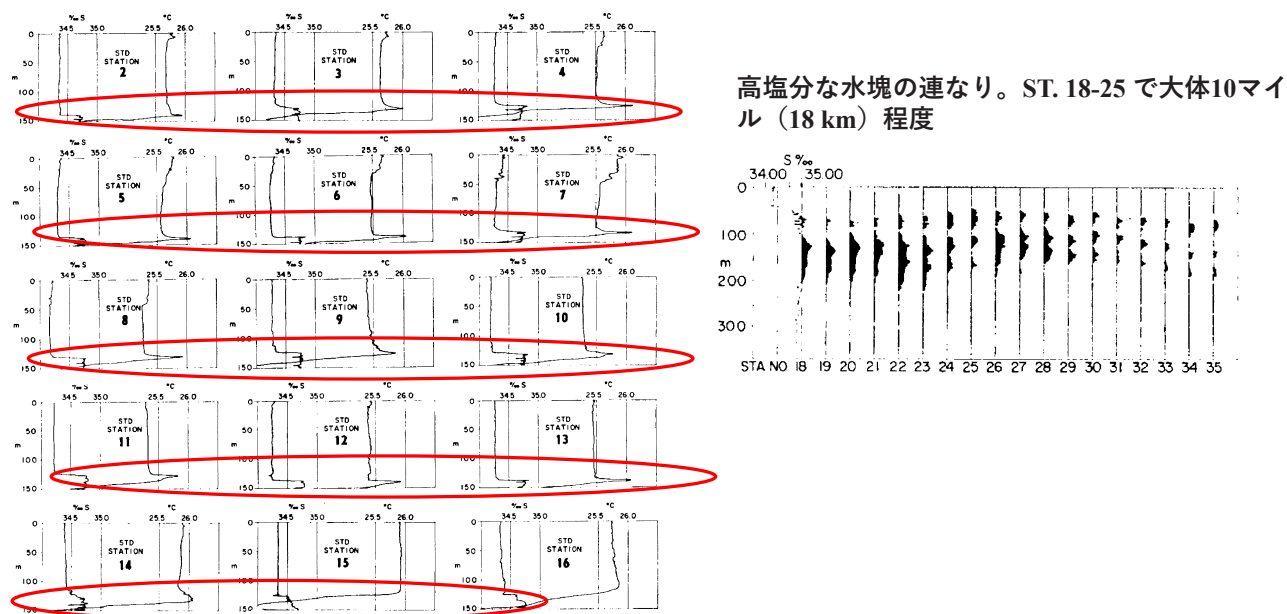


図 25 チモール海，ミンダナオ島近海で観測された高温高塩水塊（赤丸で囲ってあります）。左の図に示された各測点での鉛直分布の左側が塩分，右側が水温です。右の図では高塩分な水塊が測点間で連なっている様子がわかります。STA 18-25 で大体 10 マイル (18 km) 程度の拡がりです (Stommel and Fedorov, 1967 より)。

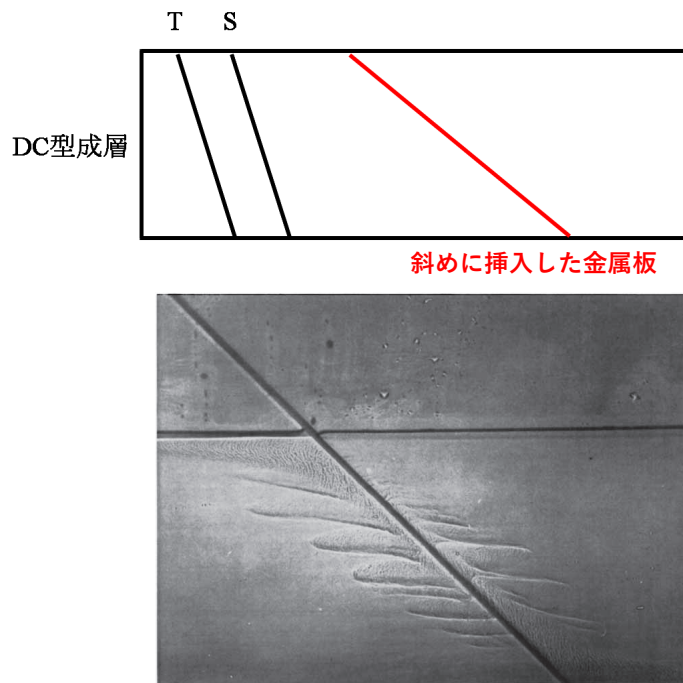


図 26 Turner and Chen (1974) による貫入実験。塩分と砂糖を用いて DC が生起する成層を作成し，金属板を斜めに挿入し水平貫入を観測しました (Turner and Chen, 1974 より。2006 © Cambridge University Press, 許可を得て複製)。

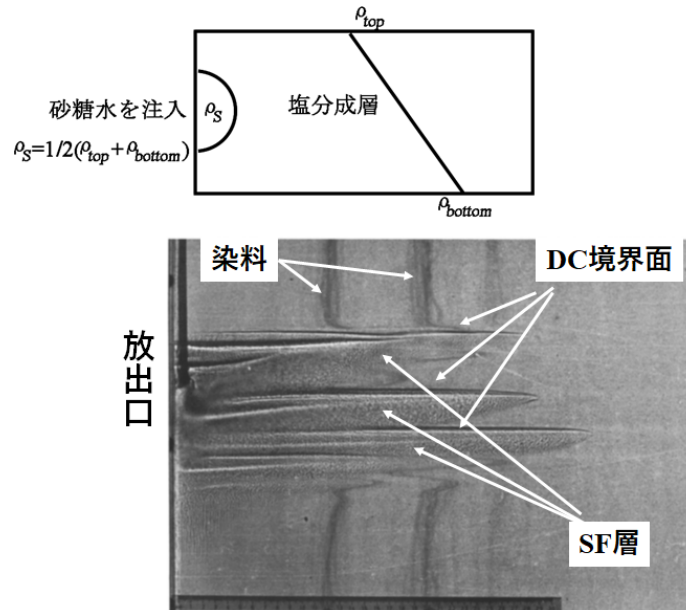


図 27 Turner (1978) による貫入実験。(上) 実験装置の模式図。強制的に砂糖水を塩分成層中に注入して貫入を発生させています。(下) 貫入層の様子。放出口付近で強い鉛直混合が生起し、その後 DC 境界面・SF 層を上下に伴いながら複数の貫入層が上昇しながら進行しています。これに伴う速度シアにより染料がジグザグ模様になっていることがわかります (Turner (1978) より。AGU より許可を得て転載)。

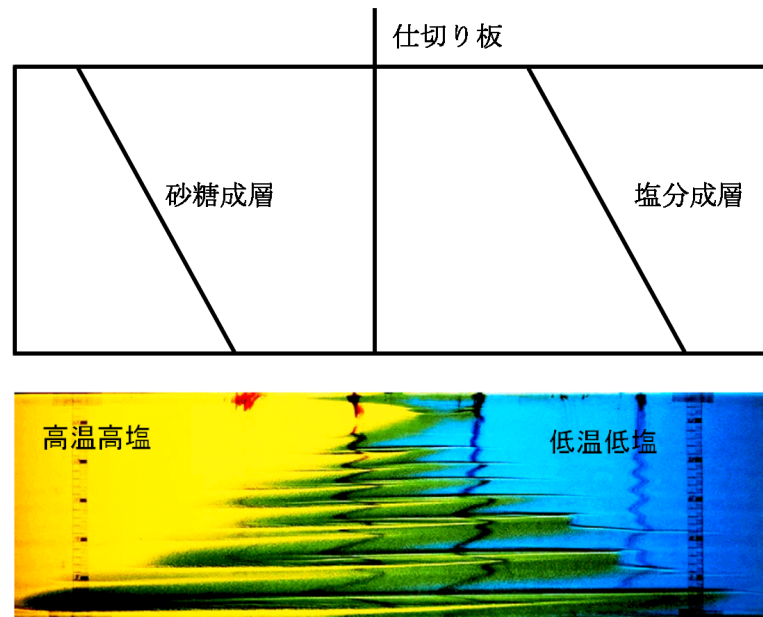


図 28 Ruddick and Turner (1979) による貫入実験。なるべく擾乱を起こさないようにゆっくりと仕切り板を引き抜きます。その結果、高温高塩な貫入が上に DC 境界面、下に SF 層を伴いながら低温低塩側に上昇しながら進行し、一方低温低塩な貫入が上に SF 層、下に DC 境界面を伴いながら高温高塩側に下降しながら進行します。このような層がいくつも重なり、それに伴うシアにより、投入された染料にジグザグ模様が生じています。(下の写真は Elsevier の許可を得て Ruddick, 2003 より転載。©2003)

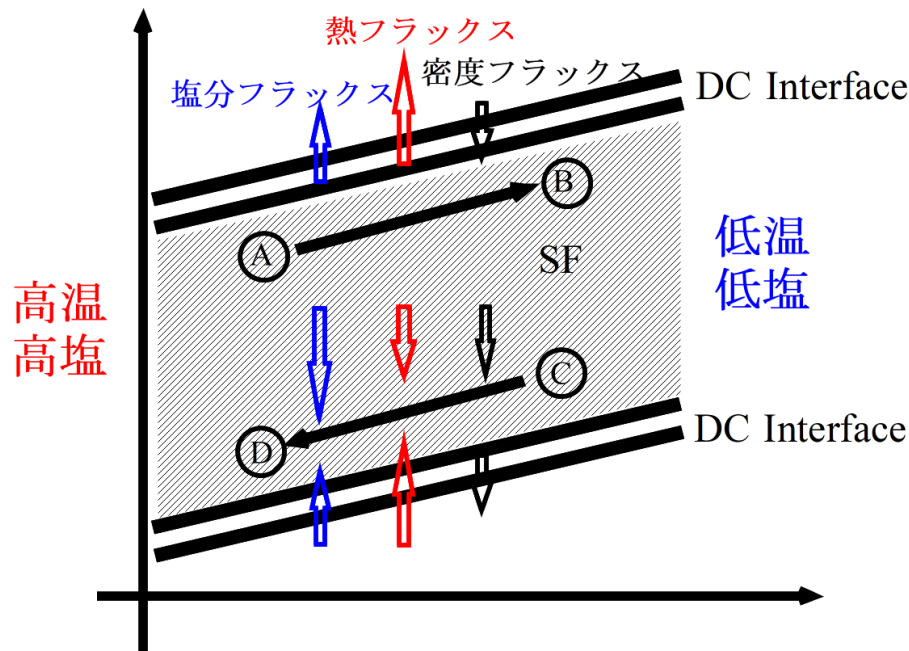


図 29 Ruddick and Turner (1979) による貫入実験の模式図。高温高塩貫入は $A \rightarrow B$ へ向かうにつれ、軽くなりながら上昇。低温低塩貫入は $C \rightarrow D$ へ向かうにつれ、重くなりながら下降します。矢印の大きさを密度に換算した熱・塩分フラックスの大きさを表しています。

り、高温高塩な水塊は軽くなりながら、低温低塩な貫入は重くなりながら進行することを意味します。これは SF と DC による鉛直方向の密度輸送が異なることに起因するものです。その様子を模式的に示すと図 29 のようになります。矢印の大きさを密度に換算した熱・塩分・密度フラックスの大きさを示しています。すなわち、高温高塩貫入は上方の DC 層から密度輸送を受けますが、SF 層から下方への密度輸送がより大きいため、軽くなりながら進行します。低温低塩貫入はこの逆に重くなりながら進行します。

これらの貫入は鉛直方向に交互に現れ、水平方向に進むことから相互貫入 (Interleaving) と呼ばれました。二重拡散貫入は、密度に寄与する成分が一つの場合の貫入現象とは大きく異なるもので、鉛直的な輸送現象によって水平的な輸送が起こることを意味し、海洋における物質輸送過程に重要な意味を持つと考えられています。余談ですが、1978 年に吉田はオーストラリア国立大学に Turner 教授を訪問する機会を得ました。その時にサバティカルで在籍していた Ruddick に図 28 の実験

を見せてもらい、まるでバベルの塔のようだと感想を述べましたが、全く英語が通じませんでした。しかし、この経験がその後二重拡散対流研究を始めるきっかけとなったかなと思います。また、Turner が永田先生の図 24 を取り出して、これは「二重拡散貫入の良い例だよ、とても良い観測だ」と指摘されたことに強い印象を受けました。Stern (1967) は Stommel and Fedorov (1967) の観測に触発され、このような貫入現象が水平方向に密度差 (圧力勾配) がない場合に、二重拡散対流により自律的に発生することを理論的に導いています (第 3 部で説明します)。

4. まとめ

以上が二重拡散対流研究の歴史的経緯とその際だった特徴です。今日では、CTD や XBT などの海洋観測機器の発達と共に、海洋観測を通して、DDC によると考えられる特異な海洋構造が数多く発見されています。そこで次の第 2 部では実際の海洋中での二重拡散対流の証

抛となるような構造, 現象について触れることにします。

謝 辞

本論文改訂に当たり, 匿名の査読者から貴重な助言をいただきました。ここに記して感謝いたします。

References

- Arons, A.B. (1980): The scientific work of Henry Stommel. P. 14–18. In *Evolution of Physical Oceanography*, edited by B.A. Warren and C. Wunsch, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA.
- Brunt, D. (1927): The period of simple vertical oscillations in the atmosphere. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, **53**, 30–32. doi.org/10.1002/qj.49705322103
- Cooper, J.W., and H. Stommel (1968): Regularly spaced steps in the main thermohaline near Bermuda. *J. Geophys. Res.*, **73**, 5849–5854. doi.org/10.1029/JB073i018p05849
- Ekman, V.W. (1906): On dead water. In *The Norwegian North Polar Expedition 1893–1896: Scientific Results*, vol. 5, edited by F. Nansen, Christiania, Norway: J. Dybwad.
- Faller, A.J. (1992): A tribute to Henry Stommel. *Oceanus*, **35** (Special issue), 30–33.
- Groves, G.W. (1959): Flow estimate for the perpetual salt fountain. *Deep-Sea Res.*, **5**, 209–214. doi.org/10.1016/0146-6313(58)90013-3
- Huppert, H.E., and J.S. Turner (1981): Double-diffusive convection. *J. Fluid Mech.*, **106**, 299–329. doi.org/10.1017/S0022112081001614
- Jevons, W.S. (1857): On the cirrous form of cloud. *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, **14**(90), 22–35. doi.org/10.1080/14786445708642347
- Krishnamurti, R. (2003): Double-diffusive transport in laboratory thermohaline staircases. *J. Fluid Mech.*, **483**, 287–314. doi.org/10.1017/S0022112003004166
- 増田章 (1975): 熱塩対流. 海洋科学, **7**, 30–35.
- McDougall, T.J. (2004): Professor Stewart Turner, geophysicist. <https://www.science.org.au/learning/general-audience/history/interviews-australian-scientists/professor-stewart-turner>
- Nagata, Y. (1967): On the structure of shallow temperature inversions. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **23**, 221–230. doi.org/10.5928/kaiyou1942.23.221
- Nagata, Y. (1970): Detailed temperature cross section of the cold-water belt along the northern edge of the Kuroshio. *J. Mar. Res.*, **28**, 1–14. https://elischolar.library.yale.edu/journal_of_marine_research/1170
- 長島秀樹・吉田次郎・長坂猛 (1997): 海洋中の二重拡散対流による物質輸送, *ながれ*, **16**, 28–39. doi.org/10.11426/nagare1982.16.28
- Nakano, H., and J. Yoshida (2019): A note on estimating eddy diffusivity for oceanic double-diffusive convection. *J. Oceanogr.*, **75**, 375–393. doi.org/10.1007/s10872-019-00514-9
- Neal, V.T., S. Neshyba, and W. Denner (1969): Thermal stratification in the Arctic Ocean. *Science*, **166**, 373–374. doi.org/10.1126/science.166.3903.373
- Radko, T. (2013): *Double-Diffusive Convection*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 344 pp. doi.org/10.1017/CBO9781139034173
- Rayleigh, Lord (1883): Investigation of the character of the equilibrium of an incompressible heavy fluid of variable density. *Proc. London Math. Soc.*, **14**, 170–177. doi.org/10.1112/plms/s1-14.1.170
- Roden, G.I. (1964): Shallow temperature inversions in the Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.*, **69**, 2899–2914. doi.org/10.1029/JZ069i014p02899
- Ruddick, B.R. (1983): A practical indicator of the stability of the water column to double-diffusive activity. *Deep-Sea Res.*, **30**, 1105–1107. doi.org/10.1016/0198-0149(83)90063-8
- Ruddick, B.R. (2003): Laboratory studies of interleaving. *Prog. Oceanogr.*, **56**, 549–547. doi.org/10.1016/S0079-6611(03)00031-4
- Ruddick, B.R., and J.S. Turner (1979): The vertical length scale of double-diffusive intrusions. *Deep-Sea Res.*, **26A**, 903–913. doi.org/10.1016/0198-0149(79)90104-3
- Ruddick, B.R., and A.E. Gargett (2003): Oceanic double-diffusion: introduction. *Prog. Oceanogr.*, **56**, 381–393. doi.org/10.1016/S0079-6611(03)00024-7
- Ruddick, B., and K. Richards (2003): Oceanic thermohaline intrusions: observations. *Prog. Oceanogr.*, **56**, 499–527. doi.org/10.1016/S0079-6611(03)00028-4
- Schmitt, R.W. (1994): Double diffusion in oceanography. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **26**, 255–285. doi.org/10.1146/annurev.fl.26.010194.001351
- Schmitt, R.W. (1995a): The salt finger experiments of Jevons (1857) and Rayleigh (1880). *J. Phys. Oceanogr.*, **25**, 8–17. doi.org/10.1175/1520-0485(1995)025<0008:TSFEOJ>2.0.CO;2
- Schmitt, R.W. (1995b): Why didn't Rayleigh discover salt fingers. P. 3–9. In *Double-diffusive Convection*, edited by Alan Brandt and H.J.S. Fernando, Geophysical Monograph Ser., 94. AGU.
- Shirtcliffe, T.G. L., and J.S. Turner (1970): Observations of the cell structure of salt fingers. *J. Fluid Mech.*, **41**, 707–719. doi.org/10.1017/S002211207000085X
- Spilhaus, A.F. (1940): A detailed study of the surface layers of the ocean in the neighborhood of the Gulf Stream with the aid of rapid measuring hydrographic instruments. *J. Mar. Res.*, **3**, 51–75. https://elischolar.library.yale.edu/journal_of_marine_research/561
- Stern, M.E. (1960): The 'salt fountain' and thermohaline convection. *Tellus*, **12**, 172–175. doi.org/10.3402/tellusa.v12i2.9378
- Stern, M.E. (1967): Lateral mixing of water masses. *Deep-Sea Res.*, **14**, 747–753. doi.org/10.1016/S0011-7471(67)80011-1
- Stern, M.E. (1969): Collective instability of salt fingers. *J. Fluid Mech.*, **35**, 209–218. doi.org/10.1017/S0022112069001066
- Stern, M.E., and J. S. Turner (1969): Salt fingers and convecting layers. *Deep-Sea Res.*, **16**, 497–511. doi.org/10.1016/0011-7471(69)90038-2
- Stommel, H., A.B. Arons, and D. Blanchard (1956): An oceanographical curiosity: the perpetual salt fountain. *Deep-Sea Res.*, **3**, 152–153. doi.org/10.1016/0146-6313(56)90095-8
- Stommel, H., and K.N. Fedorov (1967): Small scale structure in temperature and salinity near Timor and Mindanao. *Tellus*, **19**, 306–325. doi.org/10.3402/tellusa.v19i2.9792
- Talley L.D., G.L. Pickard, W.J. Emery, and J.H. Swift (2011): *Descriptive Physical Oceanography: An Introduction* (Sixth Edition). Elsevier, Boston, 560 pp. doi.org/10.1016/C2009-0-24322-4
- Taylor, G.I. (1950): The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes. *Proc. Royal Society, A201*, 192–196. doi.org/10.1098/rspa.1950.0052

- Turner, J.S. (1965): The coupled turbulent transports of salt and heat across a sharp density interface. *Int. J. Heat Mass Transfer*, **8**, 759–767. doi.org/10.1016/0017-9310(65)90022-0
- Turner, J.S. (1967): Salt fingers across a density interface. *Deep-Sea Res.*, **14**, 599–611. doi.org/10.1016/0011-7471(67)90066-6
- Turner, J.S. (1968): The behaviour of a stable salinity gradient heated from below. *J. Fluid Mech.* **33**, 183–200. doi.org/10.1017/S0022112068002442
- Turner, J.S. (1974): Double-diffusive phenomena. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **6**, 37–56. doi.org/10.1146/annurev.fl.06.010174.000345
- Turner, J.S. (1978): Double-diffusive intrusions into a density gradient. *J. Geophys. Res. Oce.*, **83**, 2887–2901. doi.org/10.1029/JC083iC06p02887
- Turner, J.S. (1985): Multicomponent convection. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **17**, 11–44. doi.org/10.1146/annurev.fl.17.010185.000303
- Turner, J.S., and H. Stommel (1964): A new case of convection in the presence of combined vertical salinity and temperature gradients. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **52**, 49–53. doi.org/10.1073/pnas.52.1.49
- Turner, J.S., and C. F. Chen (1974): Two-dimensional effects in double-diffusive convection. *J. Fluid Mech.*, **63**, 577–592. doi.org/10.1017/S0022112074001790
- Väisälä, V. (1925): Über die Wirkung der Windschwankungen auf die Pilotbeobachtungen. *Soc. Sci. Fenn. Commentat. Phys.-Math.*, **2**(19), 19–37.
- Veronis, G. (2011): A Tribute to Melvin E. Stern. *J. Mar. Res.*, **69**, 3–20. https://elischolar.library.yale.edu/journal_of_marine_research/313
- 柳瀬真一郎 (1988): 二重拡散対流のカオス. *ながれ*, **7**, 3–14. doi.org/10.11426/nagare1982.7.3
- 吉田次郎・長島秀樹 (1990): 海洋中の二重拡散対流. *ながれ*, **9**, 93–114. doi.org/10.11426/nagare1982.9.93

Double Diffusive Convection Note

Part I. History and Overview

Jiro Yoshida[†]

Abstract

Herein, research results on double-diffusive convection, which plays a distinctive role in fine mixing processes in oceans, are described. The first part describes the historical research development and main characteristics of double-diffusive convection.

Key words: Double diffusive convection, Salt fingers, Diffusive type convection,
Negative density diffusion, Staircase structure

(Corresponding author's e-mail address: jiroy@kaiyodai.ac.jp)
(Received 9 January; accepted 16 July 2025)
(doi: 10.5928/kaiyou.34.5_149)
(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2025)

[†] Center for Marine Research and Operations, Tokyo University of Marine Science and Technology, 4-5-6, Konan, Minatoku, Tokyo 108-8477, Japan
e-mail: jiroy@kaiyodai.ac.jp