

東京大学大学院 学生員 浅枝 隆  
 東京大学工学部 正 員 玉井信行  
 東京大学大学院 学生員 高橋由多加

1. はじめに 貯水池などでは濃度と熱の二つの拡散要因が考えられるが、ここでは従来の成果がかなりまとめられている熱塩二重拡散過程を、一般的現象の第一段階として取り扱った。熱塩二重拡散現象については、Turner, Verousらによって実験的、理論的な研究がなされているが、取り扱った条件や精度の面から以前多くの問題が残されているといえる。熱塩二重拡散現象を分類すると表1のようになるが、安定な成層の状態から表面の冷却過程に起こる現象は3aにあたる。ここではその現象を、安定成層を下から加熱することによりモデル化した。

表-1

| CASE | $\frac{dT}{dz}$ | $\frac{dS}{dz}$ | $\frac{d\rho}{dz}$ |
|------|-----------------|-----------------|--------------------|
| 1    | +               | -               | -                  |
| 2 a  | +               | +               | -                  |
| b    | +               | +               | +                  |
| 3 a  | -               | -               | -                  |
| b    | -               | -               | +                  |
| 4    | -               | +               | +                  |

Z: 鉛直上向き

2. 実験及び実験装置 実験に用いた水槽の概略をFig-1に示す。水槽の側壁は熱の出入りを少なくするために二重壁としてあり、オイルタンク中の油温は一定に保てるようになっている。また水槽底の加熱は油温が所定の温度に達した後に行なった。測定は温度についてはサーミスタ温度計を、塩分については温度補償回路内蔵の導伝率計を用い、それらをトラバースさせることにより分布図を得た。実験開始時における塩分による密度分布は上方に向かって線形に減少する分布とした。

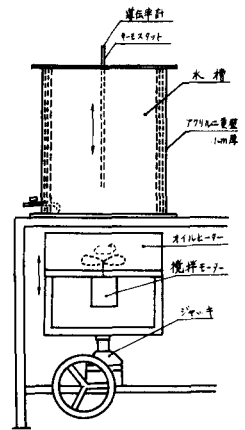


Fig-1

3. 密度分布の時間的变化 加熱開始後の塩分及び熱による密度の時間的变化をFig-2に示す。加熱開始後短時間のうちに底板付近に密度一定の混合層が形成される。その後、さらに上方に熱が伝わるに従って順次混合層が形成されていき、ステップ構造を呈するようになる。こうした構造は、Turner (1968)の実験や海洋での観測にもみられ、二重拡散特有の現象と思われる。またステップ構造の形成過程においては、混合層同士が融合しあってその層厚を増加させていくことが確認された。しかも、この融合は熱の供給の多い最下層周辺で顕著に起こっていること、さらに、層内にはゆっくりとした対流が観察され、その対流によって混合が促進されていることが明らかとなった。

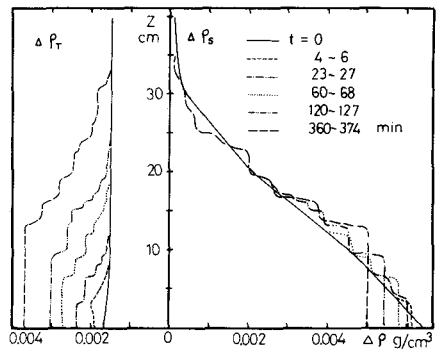


Fig-2

4. 混合層の形成限界 混合層が形成される限界については、熱塩分が線形に分布している場合について 線型安定性理論により次の関係式が得られる。

$$Ra = \frac{Pr}{1 + Pr} Rs + \frac{27}{4} \pi^4 \quad (1)$$

ここに、 $Ra, Rs$ は 熱及び塩分における Rayleigh 数 ( $Ra = g \frac{d\rho_T}{dz} \cdot d^4 / \nu \kappa$ ,  $Rs = -g \frac{d\rho_S}{dz} \cdot d^4 / \nu \kappa$ ;  $\rho_T$ : 温度による密度増加分,  $\rho_S$ : 塩分による密度増加分,  $d$ : 代表スケール,  $\nu$ : 動粘性係数,  $\kappa$ : 熱分子拡散

係数),  $Pr$  は Prandtl 数をあらわす。今回の実験について、こうした限界 Rayleigh 数について整理すると Fig-3 のようになる。ここで代表スケールについては 混合層形成後の層厚を用いた。図中の曲線は、式(1)の關係を示すものであり、また Shirtcliffe (1969) の実験結果も同時に掲載した。温度分布は完全に線型とはいえないが、熱の拡散速度が大きいために、時間の経過とともに線型に近くなるので (1) の条件をかなりよく満たしていることがいえる。

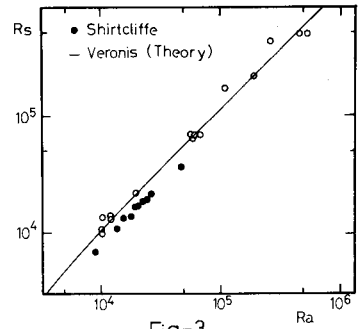


Fig-3

5. 混合層の代表量 限界 Rayleigh 数を越え、混合層が形成された状態においては、層の形状はポテンシャルエネルギー最小の最も安定した状態へ移行していくと考えられる。この場合、対流の流速は非常に小さく運動エネルギーは無視できる程度であり 混合層の上部境界面を通しての熱及び塩分の移動が無視できる範囲では、過剰温度、過剰塩分の分布は Fig-5 のように長方形に近似できる。この時 ポテンシャルエネルギー  $E$  及び連続式は次式となる。

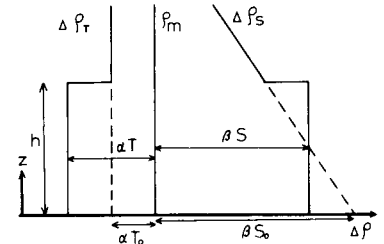


Fig-4

$$E = g \int_0^h \beta S z dz + g \int_0^h \alpha (T - T_0) z dz + g \int_0^h \beta \left\{ S_0 + \frac{ds}{dz} z \right\} z dz \quad (2)$$

$$S - S_0 = \frac{1}{2} h \frac{ds}{dz}, \quad Q = \rho c h (T - T_0) \quad (3)$$

ここに、 $Q$  は加えられた熱の総量を、 $\alpha, \beta$  は熱による体膨張係数、塩分による密度増加係数を表す。 $E$  を最小にする条件  $\partial E / \partial h = 0, \partial^2 E / \partial h^2 > 0$  を考慮すると (2), (3) 式より、

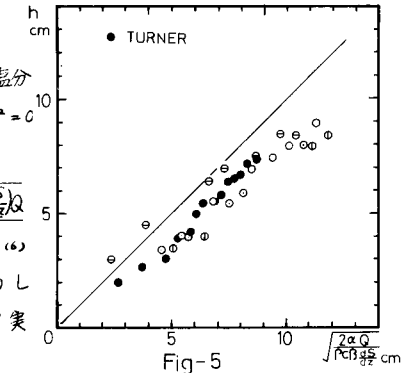


Fig-5

$$h = \sqrt{\frac{2 \alpha Q}{\rho c \beta \frac{ds}{dz}}} \quad (4) \quad T - T_0 = \sqrt{\frac{\beta \left( \frac{ds}{dz} \right) Q}{2 \rho c \alpha}} \quad (5) \quad -\Delta \rho_s = -\beta (S - S_0) = \sqrt{\frac{\alpha \beta \left( \frac{ds}{dz} \right) Q}{2 \rho c}} \quad (6)$$

が得られる。これらと実験結果を比較したものが Fig-5~7 であるが、こうした予測とよく一致していることがわかる。また (4), (6) 式より、Turner が実験的に見出した  $\alpha \Delta T = -\beta \Delta S$  の関係が得られる。

6. 結論 塩分による線型な安定成層を下から加熱することによる混合層の形成過程について次のような結果を得ることができた。

- ① 熱の拡散に従い階段状の混合層が形成され、それらは互いに融合しあって層厚を増す。
- ② 混合層の形成限界については、線型安定性理論の結果がよくあてはまる。
- ③ 鋳削された混合層形成後の水理量は、ポテンシャルエネルギー最小の原理からの予測によく一致する。

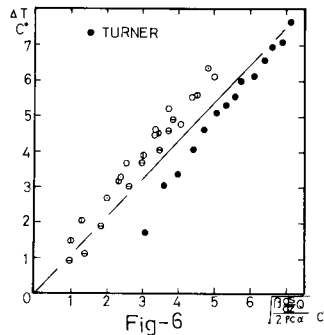


Fig-6

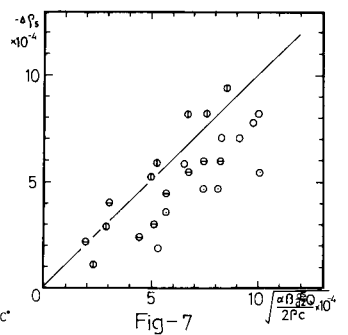


Fig-7

参考文献 Turner, J. S. (1968) J. Fluid Mech., 33

Veronis, G. (1965) J. Mar. Res., 23 Shirtcliffe, T. G. L. (1969) Int. J. Heat Mass Transfer, 12

なお 本研究を行なうにあたり、鹿島学術振興財団の助成を得た。