

大阪大学工学部 正員 道奥康治

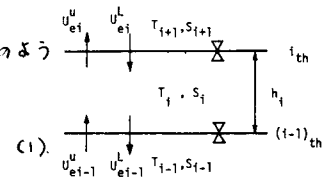
大阪大学工学部 正員 室田 明

1. はじめに 濁水成層化した貯水池・温排水処理の行なわれる感潮部・河口湖等、利水に供される水域においても多層成層を形成する場合は数多くあり、特に初流効果が小さい場合熱外力による自然対流が密度成層の鉛直混合過程に対して支配的である。底面加熱による塩分成層の対流問題は海洋微細構造を対象として従来から多くなされており、Huppert & Linden¹⁾は界面での熱・塩フラックスに関する実験式を基盤としたモデルにより線型塩分分布からステップ構造形成に至る過程の説明を試みた。熱・塩対流での混合はLinden²⁾が示したように熱擾乱による連行フラックスと二重拡散フラックスの総和であると考えられることより、本研究では連行に伴う体積収支を考慮に入れたモデル化を行ない多段階構造での界面の移動・融合形態に対する説明を試みた。同時に濁水層のごとく密度勾配急変点を有する密度場へ問題を拡張し、混合過程におよぼす密度勾配の影響も明らかにした。

2. モデルの概要

(1) 保存則； ステップ構造の対流層内では塩分・温度ともに一樣と考え図-1のように第*i*番目の対流層における塩分・温度・体積の各保存式を次式のようにおく。

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} h_i T_i \\ h_i S_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{u}_{ei-1} T_{i-1} - \bar{u}_{ei} T_i - \bar{u}_{ei-1} T_i + \bar{u}_{ei} T_{i+1} + F_{s,i-1}^A - F_{s,i}^A \\ \bar{u}_{ei-1} S_{i-1} - \bar{u}_{ei} S_i - \bar{u}_{ei-1} S_i + \bar{u}_{ei} S_{i+1} + F_{s,i-1}^A - F_{s,i}^A \end{pmatrix}$$



ここに $\bar{u}_{ei}$ は連行速度、 $F_{s,i}^A$ ($F_{s,i}^d$) は各々二重拡散による熱(塩分)フラックスをあらわし、図-1 第*i*層での保存則上付添字の*u*は上向き、*d*は下向き、下付添字は対流層の番号をあらわしている。

(2) 連行速度 $\bar{u}_{ei}$ および二重拡散フラックス $F_{s,i}^A$ ； 既往の研究により得られた(塩分/熱)フラックスと界面安定度 $R_F = \beta \Delta S / \alpha \Delta T$ の関係 $\beta F_s / \alpha F_T = f(R_F)$ と熱フラックス則 $\alpha F_T = F(R_F, \Delta T)$ および Linden の定義による $F_s(F_T) = \bar{u}_{ei} \Delta S (\Delta T) + F_{s,i}^d(F_T^d)$ の関係を用いて連行速度 $\bar{u}_{ei} = f_u(R_F, \Delta T)$ 、二重拡散フラックス $F_{s,i}^A = f_d(R_F, \Delta T)$ を算出する。ここに α 、 β は状態方程式中の温度・塩分に関する膨張係数、 ΔS 、 ΔT は界面での塩分濃度差・温度差である。次に二成層においてはより乱れの大きな層が他の層を侵食することが明らかにされており、界面移動が連行速度の上方向成分 $\bar{u}_{ei}^u$ と下方向成分 $\bar{u}_{ei}^d$ との差異によって生ずると考え $\bar{u}_{ei}^u / \bar{u}_{ei}^d = (U_{in} / U_i)^n$ と仮定する。ここで U_i は界面近傍の乱れ速度と関連をもつと思われる各層の overall な乱れ強度である。さらに界面を固定平行平板とみなし熱対流における無次元乱れエネルギーと Rayleigh 数の関係に倣い $U_{in} / U_i = \{(T_i - T_{in}) h_{i-1} / (T_{i-1} - T_{in}) h_i\}^{1/2}$ と仮定する。一般に $\bar{u}_{ei} / u \propto Ri^{n-1/2}$ であることからべき数 n は $-3/2$ 乗則に対する $n=4$ を採用する。このようにして連行速度の比 $\bar{u}_{ei}^u / \bar{u}_{ei}^d$ を求め先に得られた $\bar{u}_{ei}$ を $\bar{u}_{ei}^u = 2\eta / (\eta+1) \cdot \bar{u}_{ei}$ 、 $\bar{u}_{ei}^d = 2 / (\eta+1) \cdot \bar{u}_{ei}$ のように比例配分し(1)式中の連行による初流フラックス項が計算される。

(3) 多段階構造上端フロントでの限界 Rayleigh 数； フロント外縁での温度境界層の安定限界条件は Huppert & Linden と同様の境界層厚によって定義される有効 Rayleigh 数を用いる。限界値 R_c は層の発生ひん度、融合回数へ影響を与えるため Huppert & Linden の実験値との対比から妥当な R_c を決定する。図-2 は縦軸に新しい層の累加発生個数、横軸に無次元時間 t をとり三種類の R_c に対する計算値と比較したものである。同図から $R_c = 2.5 \times 10^4$ を採用する。(cf. Huppert & Linden では $R_c = 10^4$)

(4) 界面の移動・層の融合； 対流層の融合は界面が突然消滅する型 (type-A) と隣接する界面が近づき合い joint する型式 (type-B) が観測されている。type-A は界面での密度差が小さくなるために生ずる不安定でここでは $R_F = 1.5$ を限界条件

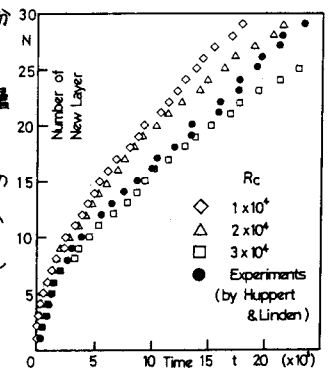


図-2 対流層の累加発生個数

とする。また、type Bは比較的大きな Re を保った状態での連行による層体積の減少と考えられ $h_{i=0}$ を限界値とする。

3. 計算結果と考察

まず本モデルの妥当性を検証するため図-3において線型塩分濃度分布を底部加熱した場合の各水深での温度の時間変化をHuppert&Lindenの実験値と比較する。各諸量は熱供給量と初期塩分濃度勾配を用いて無次元化している。熱供給開始から温度上昇開始までの時間遅れ等により実験値と計算値に多少時間のずれはあるが、大略の傾向は合致している。その他、層数・フロントの上昇速度・界面位置等についても実験値との良い一致を得た。次に混合過程におよぼす初期密度分布の影響を検討するため、模型実験を想定した条件(全水深 $h=40\text{ cm}$ 、上端下端の初期塩分浮力差 $S_0=(S_2-S_1)/S_1=0.02$ (S_1 :塩分密度, S_2 :淡水密度)、熱供給量 $H/\rho_1 C=0.05\text{ cm}^2\text{C/s}$ (H :単位面積・時間あたりの熱供給フラックス, C :比熱))に対し初期塩分浮力分布 $S(z)$ が線型分布の場合とtanh-分布の場合についての成層構造の時間変化を比較する。図-4は温度 $T(^{\circ}\text{C})$ ・塩分浮力 S の分布形、図-5は界面位置(実線)・層数・下端での塩分浮力 $S_b(t)$ (一点鎖線)・温度 $T_b(t)$ (二点鎖線)の時間変化をあらわしている。これらの図から多段階構造の形成過程はもちろんのこと、体積収支を考慮に入れたことにより二種類の融合型式・融合前の界面の初動等が合理的に再現されていることがわかる。なお、上端では断熱され成層内に貯熱されるとしており初期の間は数回の融合をともない層数が増加していくがフロントが上側境界に達した後は層数が減少し最終的に全層が一様に混合する。図-5(a)には $U_0=0$ すなわち二重拡散項のみの場合の界面位置の変化を点線で併記し連行による寄与分が大きいことが示される。また(a),(b)の比較から初期分布形での勾配急変点の有無による界面位置・層数・フロントの上昇速度および $S_b(t)$ の差異が顕著にあらわれていることがわかる。特にtanh-分布の場合は線型分布に比べ S_b の減少が小さく、このことは例えば温排水による塩分成層破壊をとむう感潮部や表層冷却による濁質変化を生ずる湖沼貯水池での深層・表層の水質に及ぼす初期密度構造の影響を示唆するものである。

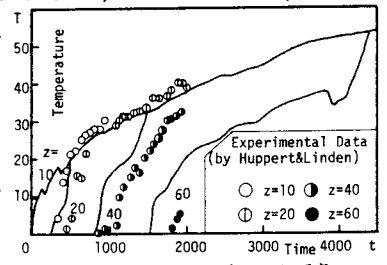


図-3 各水深での温度の時間変化

図-4は温度 $T(^{\circ}\text{C})$ ・塩分浮力 S の分布形、図-5は界面位置(実線)・層数・下端での塩分浮力 $S_b(t)$ (一点鎖線)・温度 $T_b(t)$ (二点鎖線)の時間変化をあらわしている。これらの図から多段階構造の形成過程はもちろんのこと、体積収支を考慮に入れたことにより二種類の融合型式・融合前の界面の初動等が合理的に再現されていることがわかる。なお、上端では断熱され成層内に貯熱されるとしており初期の間は数回の融合をともない層数が増加していくがフロントが上側境界に達した後は層数が減少し最終的に全層が一様に混合する。図-5(a)には $U_0=0$ すなわち二重拡散項のみの場合の界面位置の変化を点線で併記し連行による寄与分が大きいことが示される。また(a),(b)の比較から初期分布形での勾配急変点の有無による界面位置・層数・フロントの上昇速度および $S_b(t)$ の差異が顕著にあらわれていることがわかる。特にtanh-分布の場合は線型分布に比べ S_b の減少が小さく、このことは例えば温排水による塩分成層破壊をとむう感潮部や表層冷却による濁質変化を生ずる湖沼貯水池での深層・表層の水質に及ぼす初期密度構造の影響を示唆するものである。

【参考文献】 1) Huppert, H.E. and P.F. Linden; J.F.M., 95, 1979

2) Linden, P.F.; Deep-Sea Res., 21, 1974

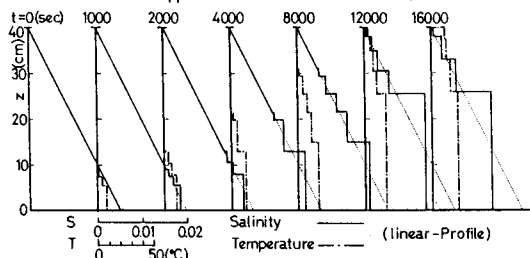


図-4(a) 塩分浮力・温度分布の時間変化(線型分布)

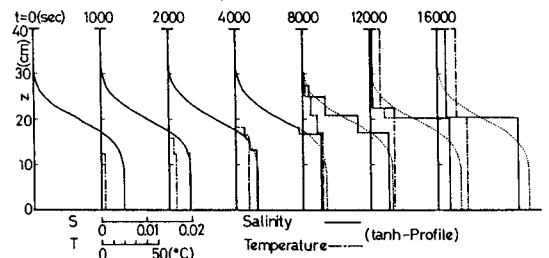


図-4(b) 塩分浮力・温度分布の時間変化(tanh-分布)

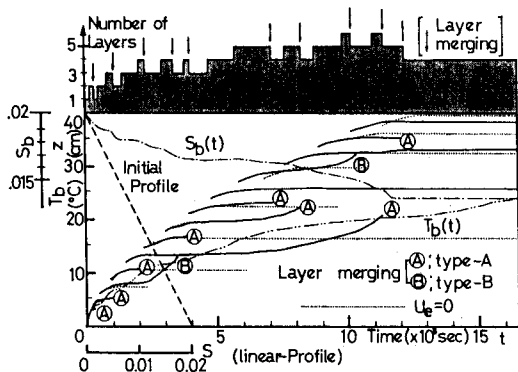


図-5(a) 界面位置・層数, $S_b(t)$, $T_b(t)$ の時間変化(線型分布)

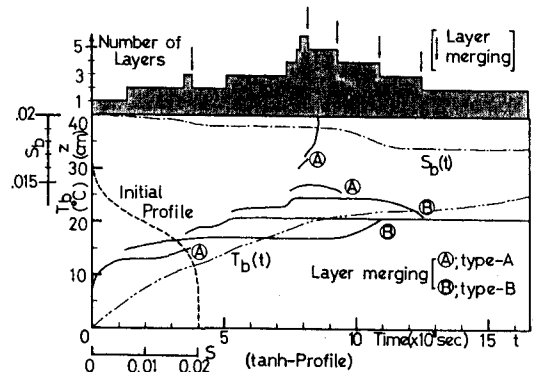


図-5(b) 界面位置・層数, $S_b(t)$, $T_b(t)$ の時間変化(tanh-分布)