

II-111

鉛直噴流の衝突による塩分密度境界面での水質混合

大阪大学大学院 学生員 吉田 弘  
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  
建設省 正員 黒川 純一良

1. はじめに; 従来、水表面における風応力や太陽放射エネルギーによる熱対流に代表される自然擾乱のモデルとして、振動格子や熱フラックスの供給を用いた水理実験は数多く行われてきた。しかしダムや貯水池自然湖沼の水質が大きな社会問題となりつつある昨今、水質混合現象を人為的に制御する必要性はますます高まりつつある。混合の促進には水塊を直接、密度界面に衝突させるのが効率的と考えられる。本研究では塩分密度成層場において密度境界面に鉛直噴流が衝突する際に生ずる界面での鉛直混合現象を対象とし水理実験を行った。本文では界面上での水理量から定義したりチャードソン数及び連行係数による混合量の定量的評価について報告する。

2. 実験の概要; 実験は、図-1に示す透明アクリル製の鉛直一次元水槽(260mm×260mm×504mm)を用いて行った。まず水槽内に塩分二成層場を作成し、水槽上部に設置した小型ポンプによって水槽内の水を循環取水し噴流として密度境界面に衝突させた。ただしこの時取水による水平方向の不均一性が生ずるのを防ぐため、取水口を内壁上部の4箇所に分散配置している。流量とポンプの負荷電圧とは線形関係にあることを確認しておりスライダックで電圧を変化させることによって流量を制御した。水槽内の濃度分布は塩分濃度計を鉛直方向に走査させることによって計測し、得られたデータをデータレコーダーに収録した後、AD変換を施して処理し空間的、時間的な補間から鉛直濃度分布を求めた。

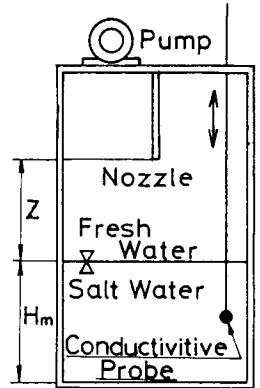


図-1 実験水槽と諸量の定義

3. 現象の概要; 塩分濃度計より得た密度構造の経時変化例を図-2に示す。計測濃度は初期相対密度差 $\epsilon_0$ で規準化した相対密度差 $\hat{\epsilon}$

$$\hat{\epsilon} = \left\{ \frac{\rho(S) - \rho(S_0)}{\rho(S_0)} \right\} / \epsilon_0 \quad (0 \leq \hat{\epsilon} \leq 1)$$

に換算され、 $\Delta \hat{\epsilon} = 0.05$ 間隔毎に $\hat{\epsilon}$ の等値線の経時変化例が描かれている。ここに、 $s$ :ある時間・ある高さでの塩分濃度、 $s_0$ :規準濃度である。時間 $t$ は $\epsilon_0 g$ 及び初期流下長 $Z_0$ (図-1参照)を用いて無次元化を施し、無次元時間 $\hat{t}$ として以下の如く定義する。

$$\hat{t} = \sqrt{\epsilon_0 g / Z_0} \cdot t$$

初期は比較的明瞭な界面を持つ二成層を形成しているが、時間経過と共に混合された水塊が滞留し上下層の中間密度を有するほぼ均質な中層が発達して三成層を形成する。この間も鉛直噴流塊の衝突によって密度界面での混合が促進されしだいに侵食され下層は最終的には完全に混合される。定性的な観察に依ると、噴流は上層界面を突抜け下層界面に衝突すると下層へ貫入し、この際に生ずる水平方向の浮力勾配により復元し、界面上を水平に拡がる。この一連の挙動の中で主たる連行は貫入部分で生じている。

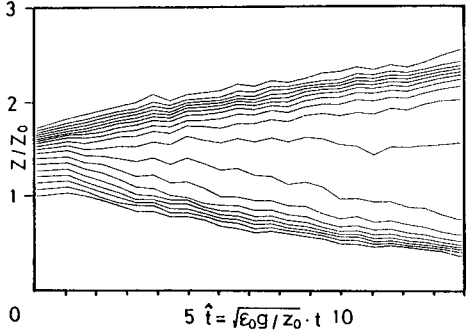


図-2 密度構造の経時変化例

4. 解析手法; 本研究では界面位置を鉛直濃度分布形より一義的に定義することを考え、図-3に示す様に分布形を5本の直線で近似し、それらの交点AとB、及びCとDの midpointの水深を以って、それぞれ上側界面 $H_U$ 、下側界面 $H_D$ と定義した。可視化により求めた目視界面位置と本定義法による界面位置はおおむね良く一致しており本定義法は妥当であると考えられる。次に界面上における長さスケール及び速度スケールを定義するにあたり、中層内の密度はほぼ均一とみなせることから、噴流の解としてGortler<sup>1)</sup>(1942)の理論を採用した。長さスケール $l$ には噴流の界面上における半値半幅をとり、速度スケール $u$ には中心軸上流速を

用いておりそれぞれ次式の通りである。

$$l = 0.0848z \quad ; \quad u = \frac{3}{8\pi} \frac{M}{E_0 z} \quad ; \quad E_0 = 0.0161\sqrt{M}$$

ここに  $z$  は噴出口から下側界面までの距離を表す。 $M$  は界面上における噴流の運動量を表し、噴流が中層内で浮力を受けることにより生ずる運動量の損失を考慮している。一方成層強度  $\epsilon$  は図-3 中での C、D 及び上層での濃度  $S_C$ 、 $S_D$  及び  $S_0$  を密度に換算した  $\rho_C$ 、 $\rho_D$  及び  $\rho_0$  を用いて以下の様に表される。

$$\epsilon = \frac{\rho_D - \rho_C}{\rho_0} \quad ; \quad \rho = \alpha S + \beta \quad (\alpha, \beta : \text{換算係数})$$

また下層流体の進行速度を下側界面位置の時間変化率  $dH_m/dt$  で与えたとリチャードソン数及び進行係数  $E$  が次式の通り表される

$$Ri = \frac{\epsilon g l}{u^2} \quad ; \quad E = \frac{dH_m}{u} \frac{dt}{dt}$$

5. 実験結果と検討; 本実験及び並行して行った水温成層場における実験結果について、リチャードソン数と進行係数の関係を図-4 に示す。実験値には多少のばらつきがあるものの全般的に見てほぼ次式の関係有する。

$$E = C_1 Ri^{-3/2} \quad C_1 = 1.37 \times 10^{-4}$$

$$E = C_2 Ri^{-1} \quad C_2 = 5.11 \times 10^{-4}$$

これらは振動格子を擾乱源とした場合、水温成層場では -1 乗則、塩分成層場では -3/2 乗則にそれぞれ従うことと相似な関係である。

噴流の下層流体内への貫入量  $\Delta h$  と場の長さスケール  $l$  との比より界面変形量  $\Delta h/l$  を定義し、これとリチャードソン数との関係を水温成層及び塩分成層の双方について示したのが図-5 である。両者はほぼ次式に示す関係を有する。

$$\Delta h/l = C \cdot Ri^{-1} \quad C = 1.57 \times 10^{-1}$$

これは、Linden<sup>2)</sup>(1973) が塩分成層場において行った Vortex Ring の衝突による実験結果と同様、界面変形量は界面上におけるリチャードソン数の -1 乗に比例することを表している。Vortex Ring の衝突の際に生ずる界面変形進行過程と本実験現象とは相似な機構を有すると思われる。

6. まとめ; 塩分成層及び水温成層の双方について、進行則及び界面変形量の結果から、乱れの生成機構は異なっても現象を支配する進行則は共通であることが確認できた。今後は実貯水池との相似性等を検討し水温成層の制御工法についても検討する。

参考文献 1) 水理公式集

2) Linden P.F.: J. Fluid Mech., vol.60, pp.407-480, 1973

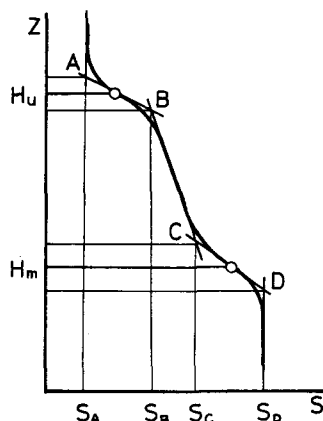


図-3 界面の定義

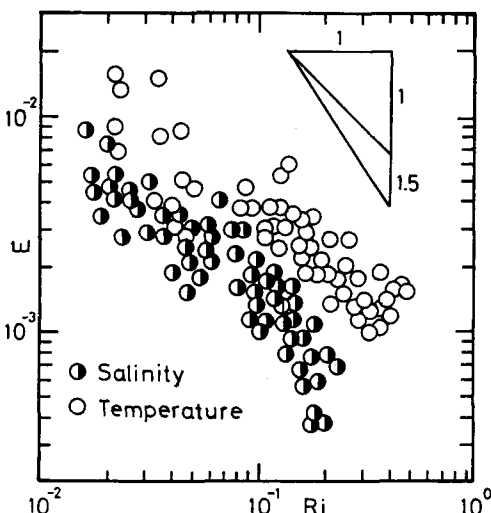


図-4 進行則

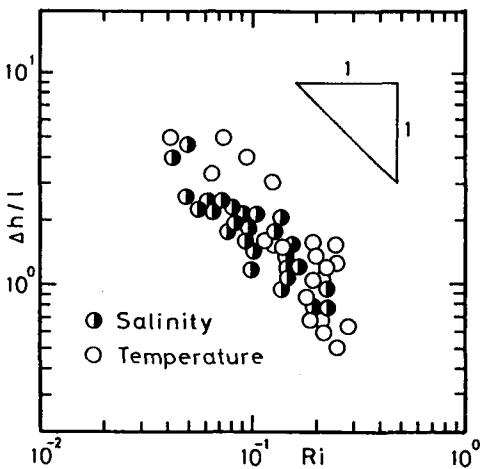


図-5 界面変形量