

密度躍層に衝突する鉛直密度噴流の流動形態

福島 祐介*・萩原 達司**

Flow Patterns of Vertical Plume Colliding with Density Stratified Layer

Yusuke FUKUSHIMA and Tatsuji HAGIHARA

A density stratification caused by vertical distributions of temperature and/or turbidity is often observed in a reservoir or a lake. To improve the water quality in a reservoir, the investigation of mixing mechanism near the density stratified layer is necessary. In this study, the experiment on the flow dynamics of the starting vertical plume colliding with the density stratified layer is carried out to clarify the mechanism of the mixing. The three typical flow patterns of the starting vertical plume in a stratified environment are observed in the experiments. The flow patterns are mainly dependent on the density of inflow and the density distribution in the tank. The measurement of the velocity and density distributions makes it clear that the mixing mechanism is strongly affected by the flow pattern.

Key words: density stratification, density stratified layer, vertical plume, mixing at interface

1. はじめに

貯水池では、温度差や濁度などが水深方向に分布し、密度成層化していることが多い^{1),2)}。密度分布の急変している層は密度躍層と呼ばれ、この付近で流入水と貯水池水が複雑に流動する。成層した貯水池では流入水の停滞が長期にわたるため、濁水の長期化や水質汚濁などの問題が発生する。このような貯水池での水質汚濁を防止するためには、密度躍層付近の流動機構を知ることが必要不可欠である。成層場に流入する鉛直密度噴流は、成層した貯水池内に流入する濁水の流動を単純化したもの¹⁾と考えられる。一般に、密度成層場に流入する密度噴流は、密度躍層付近で流入流体の密度と周囲流体の局所的な密度との相対的大きさが変化するため、一様流体中における密度噴流と比べさまざまな流動形態をとる。

本研究の目的は、密度躍層をもつ周囲水中に鉛直密度噴流を流入させたときに現れる様々な流動機構を解明することである。このため、淡水と塩水の二成層をもつ水槽中に上部から塩水による鉛直密度噴流を流入

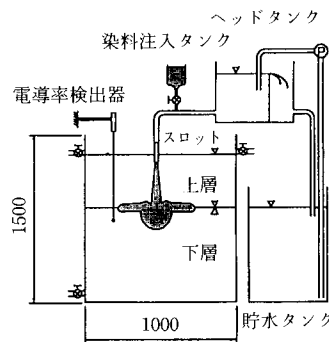


Fig. 1 Experimental apparatus.

させ、流入水と周囲水の密度の違いによって現れる密度流現象をビデオ撮影し、その流動形態の違いを把握する。さらに、流速分布・密度分布の測定を行い、密度躍層付近での流動機構と界面での混合機構を明らかにする。本研究の一部は参考文献^{3),4)}に発表済みであり、本論文はその後の知見をとりまとめ、発展させたものである。

2. 実験装置および実験方法

実験装置は、Fig. 1に示すように横幅100cm、高さ150cm、縦幅15cmの亚克力製水槽を用いた。本実験は二次元として扱うため、ヘッドタンクからスロットまでの導水装置は4本の細管を導水管として、流入水

原稿受付：平成8年6月5日

*長岡技術科学大学環境・建設系

**長岡技術科学大学大学院

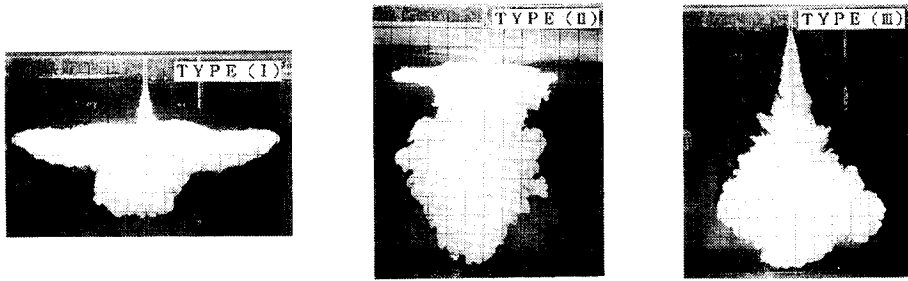


Fig. 2 Flow patterns of vertical plumes (a) Type I , (b)TypeII and (c) TypeIII.

を均等分布した。さらにスロット開口部にハニカムを設けて整流し、流れが二次元となるようにした。密度噴流の流量は、導水管途中に設けた調整式バルブで変化させた。

水槽中の下層に塩水をため、上層に淡水（水道水）を静かに注ぎ淡塩二成層を形成させた。下層の塩水の塩分濃度を調整することにより、任意の密度差を持つ淡塩二成層を作成することができる。流動特性を把握するための実験では、下層流体の密度を一定とし、流入水（密度噴流）の密度を変化させた。流速分布、密度分布の測定では、流入水の密度を一定とし、下層流体の密度を変化させた。

平均流速分布の測定には水素気泡法を用いた。密度分布の測定ではサイフォンにより採水を行い、導電率計により電気伝導度を測定し、さらに密度に換算した。

3. 流動形態の分類

成層場における鉛直密度噴流の流動形態を把握するため、流入水を着色しそれを写真撮影したものをFig. 2(a), (b), (c)に示す。

今回の実験で得られた流動形態は大きく分類して3つに分類される^{31,41,5)}。第一は、流入水の密度が下層の密度に比べて小さく、密度躍層に衝突した流入水が、そのまま密度躍層に沿って中層密度流となる形態である (Fig. 2(a)Type I)。第二は、流入水が密度躍層に貫入した後、貫入部の外側に沿って浮上しやがて中層密度流を形成する形態である (Fig. 2(b)Type II)。第三は、流入する流体の密度が下層の密度より大きく、一様流体中に流入する密度噴流と同じように流下を続ける形態である (Fig. 2(c)Type III)。

これらの流動形態は、躍層到達時の流入噴流の密度と上層の密度との相対密度差 ϵ_0 と周囲水の上層と下層の相対密度差 ϵ_2 の相対的な密度の大きさに関係する。すなわち、Type I および Type II では、 $\epsilon_0 < \epsilon_2$ で

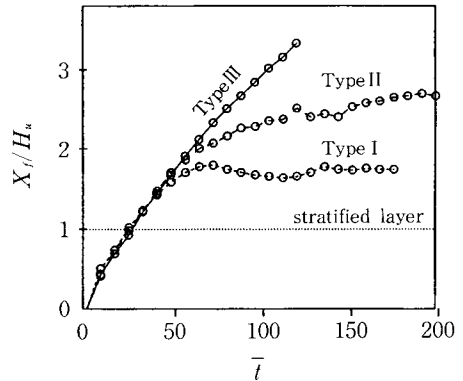


Fig. 3 Time variation of the front distance.

あるのに対し、Type IIIでは $\epsilon_0 > \epsilon_2$ である。すなわち、Type I, Type IIは流入水の密度が下層水の密度より小さい負の密度噴流で、Type IIIは正の密度噴流である。

Fig. 3にType I, Type II, Type IIIの典型的な流下距離の時間変化を示す。図中縦軸は先端部の位置 X_f を上層水深で H_1 で無次元化した X_f/H_1 であり、横軸は無次元時間 \bar{t} である。ここで、無次元時間 \bar{t} は流入水の密度フラックス $B_0 = \epsilon_{00} g u_{m0} b_0$ と流入する噴流幅 b_0 に時間 t を用いて、 $\bar{t} = t \times (B_0/b_0^3)^{1/3}$ と定義される。Type I では、噴流の先端が躍層に到達した後、先端位置はほとんど一定になる。これに対して、Type IIIでは、密度躍層に到達した先端部はわずかに勾配が緩くなるが進入を続けている。

Fig. 4にType I, Type II, Type IIIの無次元先端移動速度を示す。噴流が躍層に到達した ($X_f/H_1 = 1.0$) 後、負の密度流となるType I, IIでは先端移動速度は急激に小さくなり、無次元流下距離 $X_f/H_1 = 1.8$ のところで零になる。正の密度流となるType IIIでは先端移動速度は躍層に到達した後わずかに減少するだけである。

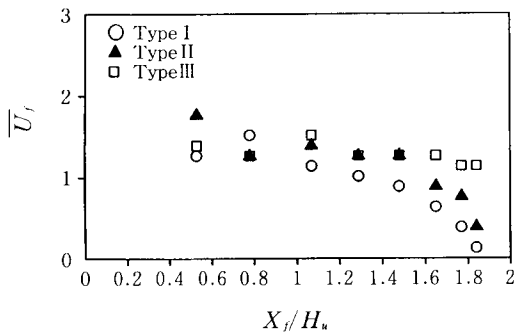


Fig. 4 Non-dimensional travel distance versus non-dimensional front speed of plumes.

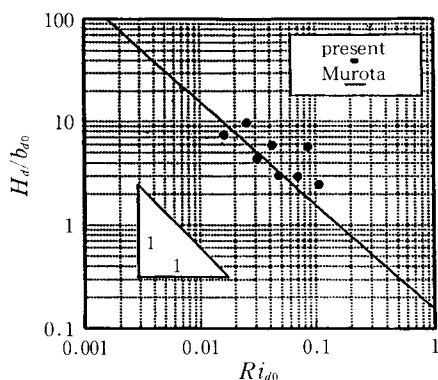


Fig. 5 Relations between the non-dimensional intrusion depth H_d/b_{d0} and the layer average Richardson number Ri_{d0} .

4. 鉛直密度噴流の貫入部の流動

これまでみてきたように、流入噴流の躍層到達時の密度が下層流体の密度に比べて大きいType IIIでは噴流はそのまま流下を続けるが、Type I, IIでは噴流は下層に進入した後、上昇し有限な進入距離を保つ。ここではこの有限な進入距離を貫入深さと呼ぶことにする。貫入深さとは、Fig. 6の密度躍層（図中xで示されている）から噴流の下端までの距離をいう。

次に、貫入部の流動特性を調べるため、Fig. 6に示す位置で流速分布を測定した結果について述べる。Fig. 7に貫入部をもつType Iの流速分布を示す。この場合、噴流は密度躍層を貫入するが噴流の密度が下層の密度に比べて小さいので、貫入した噴流を構成する流体が貫入部の外側から浮上する。流速分布は最下層（ $x_d/H_d=0.68$ ）では下方の流速となっている。測定位置が上方にゆくに従って、上向きの流速の範囲

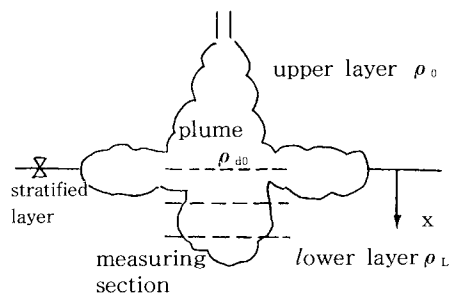


Fig. 6 Schematic view of the flow pattern Type I, and the locations of velocity and density measurements.

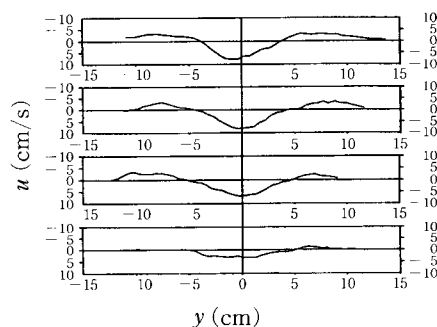


Fig. 7 Velocity distribution in the intrusion part of Type I.

が広がってゆく。

Fig. 5に貫入深さ H_d を躍層位置での噴流幅 b_{d0} で無次元化し、層平均リチャードソン数 Ri_{d0} に対してプロットしたものを示す。ここで、層平均リチャードソン数は次式で定義される。

$$Ri_{d0} = \frac{\epsilon_{s0} g b_{d0}}{U_{d0}^2} \quad (1)$$

ここで、添え字 $d0$ は密度躍層位置での緒量であることを示す。 U_{d0} は密度躍層位置での密度噴流の流速、 $\epsilon_{s0} = (\rho_2 - \rho_{d0}) / \rho_2$ は噴流の密度 ρ_{d0} と下層の密度 ρ_2 との相対密度差、 g は重力加速度である。

同図には室田・道奥⁶⁾による実験式も示してある。今回の貫入深さの実験値は室田・道奥の実験式⁶⁾で近似されることと分かる。実験値について無次元貫入長 H_d/b_{d0} とリチャードソン数 Ri_{d0} との回帰式を求めると、

$$H_d = c_1 Ri_{d0}^{0.92} \quad (2)$$

を得る。以上のように貫入深さは密度躍層位置での噴

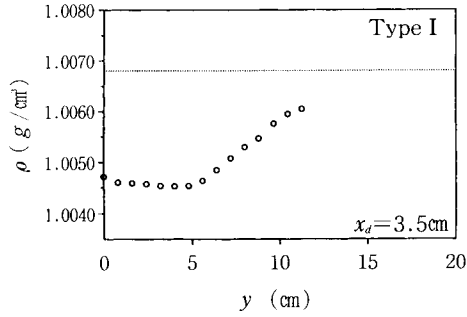


Fig. 8 Density distribution in the intrusion part of Type I .

流の幅，相対密度差と噴流と下層との相対密度差 ϵ_{10} によって決まることが示された。

また，Fig. 3 に示されたように，貫入深さは初期には大きく，時間の経過とともに僅かに減少した後一定値に近づく，初期貫入深さ H_{dm} と平均貫入深さ H_d の比はリチャードソン数 Ri_{d0} に無関係に一定になり，次式で近似される。

$$H_{dm}/H_d = 1.2 \quad (3)$$

Fig. 8 に Type I の密度分布の測定結果を示す。図中直線は下層の密度である。これによると，密度噴流の密度は下層流体の密度により小さくなっており，負の密度噴流であることが示される。一様流体中の密度噴流の密度分布はガウス分布で近似される⁷⁾。一方，Type I の密度分布は中心軸付近で一様となり，ガウス分布とは大きく異なる分布形状を示している。

5. 中層密度流の流動特性

Type I, Type II では流入した密度噴流が躍層に衝突した後，水平方向に躍層中を流動し，中層密度流を形成する。ここでは，今回の実験で得られた中層密度流の特性について述べる。Fig. 9 は，中層密度流の進入距離を経過時間に対して図示したものである。この図より，今回の中層密度流の進入距離は，ほぼ時間 t の $5/6$ 乗 ($T^{5/6}$) に比例していることが分かる。この結果は水平方向へ拡がる密度噴流と類似している（玉井²⁾）。

次に，中層密度流の部分の平均流速分布について述べる。Fig. 10 に Type I の中層密度流の流速分布の測定例を示す。これより，中層密度流の流速分布は，中心軸で最大値となり，進行方向へ凸型となった上下にほぼ対称の分布形をなすことがわかる。

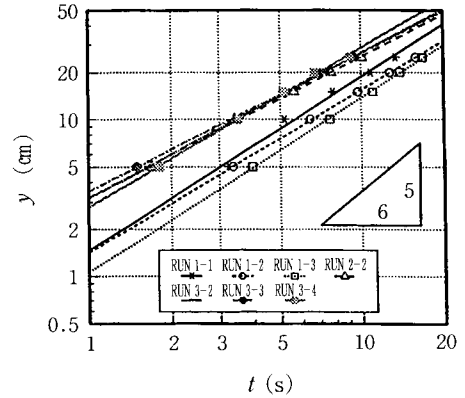


Fig. 9 Time variation of the front position of the interflow.

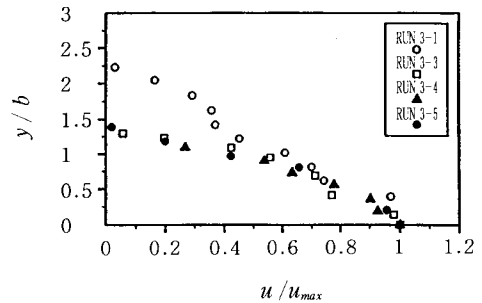


Fig.10 Velocity distribution of the interflow.

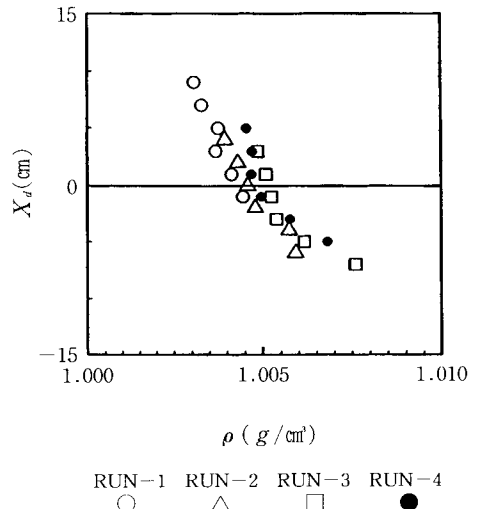


Fig.11 Density distribution of the density interflow.

Table 1. Estimation of mixing ratio λ for various experimental conditions.

Run	Q_1 cm/s	Q_2 cm/s	Q_0 cm/s	δQ cm/s	λ
1-4	1.8	6.6	2.7	7.5	2.8
3-1	1.6	16.7	4.1	15.9	3.9
3-3	5.0	11.3	4.1	17.2	4.2
3-4	2.1	10.0	4.1	10.0	2.5
3-5	2.6	15.4	4.1	16.6	4.1

次に、下層密度を系統的に変化させ、そのときの中層密度流の平均密度分布を測定した。これにより下層の密度が中層密度流に与える影響について考察する。Fig.11に中層密度流の平均密度分布の測定例を示す。ここでRun 1, 2, 3, 4は下層流体の塩分濃度を0.8%, 1.0%, 1.3%, 1.5%としたときの中層密度流の密度分布である。このように下層の密度を変えたにも関わらず、中層密度流の密度分布には大きな違いは見いだされない。この原因としては、これらの実験において流入密度噴流の密度を一定としたこと、及び中層密度流の連行・混合が小さいことが理由としてあげられる。

6. 密度噴流による周囲水の混合

密度噴流の流動特性を把握するうえで、密度噴流による周囲水の混合機構を知ることは重要である。ここでは、前節までの結果を基に密度噴流全体での混合量を検討する。

6. 1 混合量と混合率の算定

流速分布の測定より、流入密度噴流の流量を Q_0 、中層密度流の流量を Q_1 、鉛直密度噴流の流量を Q_2 を求めた。このとき、混合量 δQ 及び混合率 λ は次式で表される。

$$\delta Q = 2Q_1 + Q_2 - Q_0 \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{2Q_1 + Q_2 - Q_0}{Q_0} = \frac{\delta Q}{Q_0} \quad (5)$$

Table 1に式(4), (5)を用いて算定した混合率 λ の計算結果をまとめて示す。Fig.12に負の相対密度差 $-\epsilon_{s0}$ と混合率 λ の関係を示す。これにより負の相対密度差が増加するに従って混合率が増加していることがわかる。Table 1より明らかなように、混合率に対する寄

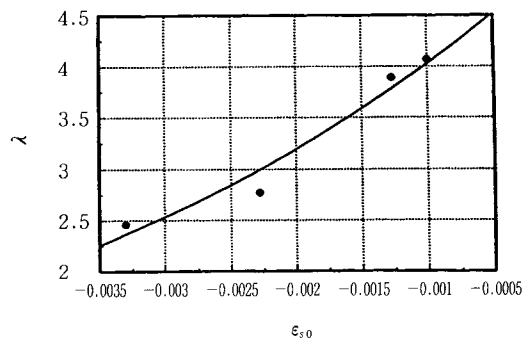


Fig.12 Relation between the negative relative density difference and the mixing ratio.

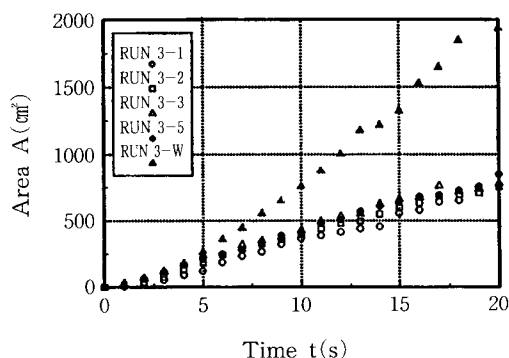


Fig.13 Time variation of areas of plumes.

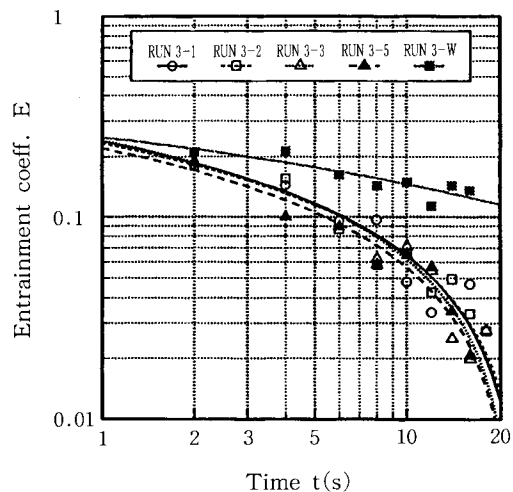


Fig.14 Time variation of the entrainment coefficient.

与は中層密度流 Q_1 より貫入部の流量 Q_2 の方が大きいことから、この場合の主たる混合は貫入部すなわち鉛直密度噴流フロント部で行われているといえる。

6. 2 連行係数

密度噴流全体の混合量を求めるため、水槽の側面からモータードライブカメラを用いて1秒ごとの密度噴流の流動形状を撮影した。これより密度噴流全体の形状の面積の時間変化を求めた。その結果をFig.13に示す。この面積の差とその時間間隔から混合量を求めた。混合量を δQ 、貫入部、中層部を含む噴流外縁の周囲長を S_f 、流入鉛直噴流の最大速度を U_{max} とすると、連行係数 E は次式で求められる。すなわち、

$$E = \frac{\delta Q}{S_f U_{max}} \quad (6)$$

である。このようにして求めた連行係数を経過時間に対して示したものがFig.14である。この図には周囲水の密度が一樣な鉛直密度噴流の連行係数 (Run3-W) も示している。また、下層の密度が変化している場合も含まれている。この図より、連行係数 E は周囲水が一樣な場合と成層している場合で異なり、一樣な場合の連行係数 E は、成層している場合に比べて大きいこと、成層している場合の連行係数に対して下層の密度の影響は小さいことがわかった。

7. おわりに

今回の実験で得られた主な結論は以下のようである。

(1)貫入深さは、層平均リチャードソン数に依存する。最大貫入深さと平均貫入深さとの比はリチャードソン数に関係せず一定である。

(2)貫入部の流速分布は密度躍層での上層と下層の密度分布によって変化することが示された。

(3)中層密度流の進入距離は従来の研究結果と同様、経過時間 t のほぼ5/6乗に比例する。

(4)負の相対密度差が大きくなるにつれて貫入部の混合率は増加する。

(5)鉛直密度噴流による連行係数は経過時間とともに減少する。すなわち、鉛直密度噴流による混合機構は貫入部の大きさに依存することがわかった。

最後に、本研究を遂行するにあたり、実験補助・資料整理を手伝って頂いた、本学大学院修士生の三尾孝一、直昇一郎の両君に対し深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 福嶋祐介, 村田和夫, 荒井健: 成層化した二次元貯水池に流入する密度流の実験的研究, 土木学会論文報告集, 第293号, pp.65-77, 1980.
- 2) 玉井信行: 密度流の水理, 技報堂出版, pp.154-155, 1980.
- 3) 三尾孝一, 福嶋祐介, 早川典生: 密度躍層に衝突する平面二次元密度噴流の流動特性, 土木学会第49回年講, 第II部, pp.474-475, 1994.
- 4) 萩原達司, 福嶋祐介, 早川典生, 直昇一郎: 成層場に流入する鉛直密度噴流の流動機構, 土木学会第50回年講, 第II部, pp.544-545, 1995.
- 5) 福嶋祐介: 成層中の平面二次元密度噴流と軸対称密度噴流, 長岡技術科学大学研究報告, 第13号, pp.79-89, 1991.
- 6) 室田明, 奥道康治, 吉田弘: 鉛直密度噴流の衝突による密度境界面での水質混合と混合水塊の挙動, 第32回水理講演会論文集, pp.269-274, 1988.
- 7) 福嶋祐介: $k-\epsilon$ 乱流モデルによる平面二次元密度噴流と噴流の相似解析, 土木学会論文集, 第405号/II-11, pp.147-154, 1989.