

鉛直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
Vertical Mixing Induced by Impinging of Jet upon Density Interface
and Resultant Horizontal Spread of Diluted Water

大阪大学工学部 正 員 室田 明 A. Murota
大阪大学工学部 正 員 道奥 康治 K. Michioku
大阪大学大学院 学生員 吉田 弘 H. Yoshida

1. はしがき

近年、ダム貯水池で発生している富栄養化や長期濁水化現象は深刻化の一途をたどっており、今日大きく社会問題化するまでに至った観がある。これに対応する水質改善対策は次の2つに大別される。1つは貯水池内の密度成層を積極的に利用して、目標水質の水を得る選択取水の方法であり、もう1つは逆に鉛直方向の水質混合を人工的に促進し、貯水池水質を改善する方法である。本研究では、後者の立場に立ち密度境界面に対して直角に噴流を衝突させることにより生起する密度境界面での水質混合現象を対象として水理実験を行ない混合量の定量的評価と混合後の水塊の挙動特性について検討を行なった。まず、層体積の変化から混合量を評価し得るように、鉛直混合量に関する実験は小さな水平面積を有する鉛直一次元水槽を用いて準一次元的に行なった。次に実際現象に対応させるために、水平方向に十分な広がりをもつ三次元水槽で実験を行ない噴流衝突後の流動に視点をおいて、密度成層内における混合水塊の水平方向の伝播特性を解明するため、密度フロントの伝播に関する水理実験を行なった。これらの結果をもとに噴流の衝突・混合・水塊の伝播という一連の現象を総合的に評価し貯水池内の密度成層の人工制御という観点から基礎的な知見を得たので報告する。

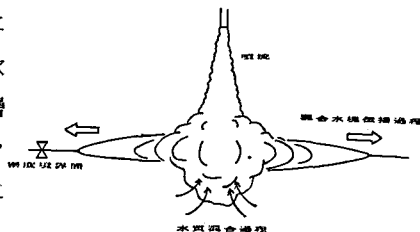


図-1 現象概要図

2. 水質混合過程に関する実験

(1) 実験方法

実験は図-2に示す透明アクリル製鉛直一次元水槽(260mm×260mm×504mm)を用いて行なった。まず水槽内に水温差及び塩分濃度差による二成層場を作成し、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じるのを防ぐため、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。

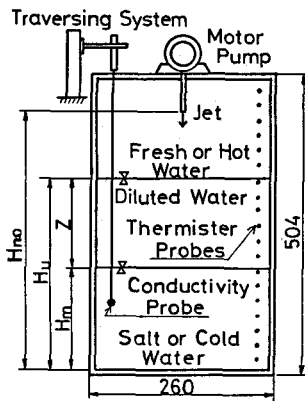


図-2 実験水槽

水槽内の鉛直水温分布は鉛直方向に配置した30個のサーミスタプローブによって計測した。また、鉛直濃度分布は電導度計プローブを鉛直方向に走査させることにより計測し、得られたデータをデータレコーダーに収録した後に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。

(2) 現象の概要

塩分二成層場における実験において電導度計より得た密度構造の経時変化例を図-3に示す。計測濃度は初期相対密度差 ϵ_0 で規準化した相対密度差：

$$\epsilon = \left\{ \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right\} / \epsilon_0$$

に換算され、 $\Delta \epsilon = 0.05$ 間隔毎に ϵ の等値線の経時変化が描かれている。ここに、 S : ある時間ある高さでの塩分濃度、 S_0 : 基準濃度である。時間 t は初期浮力差 $\epsilon_0 \cdot g$ 及び初期流下長 Z_0 を用いて無次元化を施し、無次元時間 t として次式の如く定義する。

$$t = \sqrt{\epsilon_0 \cdot g / Z \cdot t}$$

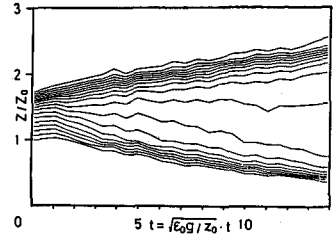


図-3 密度構造経時変化

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、時間の経過ととも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境界面での混合が促進し下層は次第に侵食されて最終的には完全に混合される。定性的な観察によると噴流は上層界面を突き抜け下層界面に衝突し、ある有限水深まで貫入する。その後周囲流体から受ける浮力差により復元し界面を水平に拡がる。下層界面における連行現象は主にこの貫入部分で局所的・集中的に生起している。これは水温成層場の実験ケースにおいても同様に観察された。

(3) 解析手法

密度界面位置を水温分布あるいは濃度分布から客観的に定義することを考えて H_u

図-4に示す様に鉛直分布形を5本の直線で近似し、それらの交点AとB、CとDの中点にあたる水深を以てそれぞれ上側界面 H_u 、下側界面 H_m 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の経時変化例を図-5に示す。双方はよく一致しており本定義法の妥当性を裏付けている。

ところで、図-3に示す様に中層はほぼ均一とみなせる。そこで、基本的には均質噴流に関するGörtler¹⁾の理論解より密度界面位置における半値半幅 l と中心流速 u を算定し、これらを以て各々界面連行を規定する長さや速度のスケールとした。しかし、時間と共に中層密度が増加し噴流水塊との密度差が大きくなると厳密には噴流が中層内

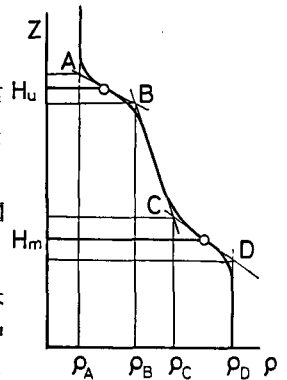


図-4 界面定義

を流下する際に浮力を受け運動量が減衰する。そこで図-6に示すコントロールボリュームを想定し、浮力による運動量の欠損を考慮した速度スケールを以下の様に評価する。まず図-5を参考にして運動量の釣合は式(1)のようになる。

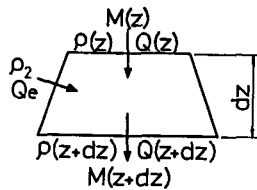


図-6 コントロールボリューム

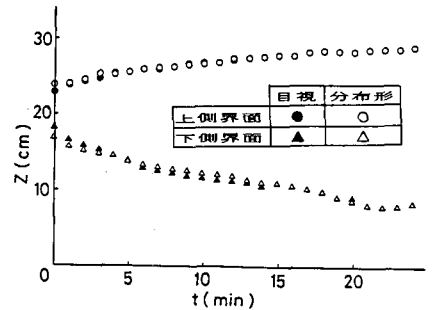


図-5 界面経時変化

$$\frac{dM}{dz} = -\sqrt{M_0(H_{n0} - H_u)} (\rho_2 - \rho_3) \frac{Z}{\sqrt{M}} \quad (1)$$

上側界面における運動量 M_0 を境界条件として用いて積分すると中層内における運動量 M の流下方向変化を表現する次式を得る。

$$M = [M_0^{\frac{3}{2}} + C \{H_u^2 - H_m^2 + 2 \cdot H_{n0} (H_u - H_m)\}]^{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

$$C = 5.419 \times 10^{-3} \cdot \sqrt{M_0(H_{n0} - H_u)} (\rho_2 - \rho_3) \pi \quad (3)$$

ここに、 M_0 : 初期運動量、 H_u : 上側界面位置、 H_m : 下側界面位置、 H_{n0} : 放流口位置、 ρ_2 : 中層密度、 ρ_3 :

上層密度、 g ：重力加速度である。結局、混合量を規定する長さスケール 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 としては上述の様に浮力効果を考慮した運動量から算定される界面位置での中心軸上流速を用いてそれらは各々次式の様に表される。

$$l=0.085\ z\ ,\ u=\frac{3}{8\ \pi}\cdot\frac{M_0}{\epsilon_0\ Z}\ ,\ \epsilon_0=0.0161\sqrt{M_0}\tag{4}$$

ここに z は放流口から下側界面までの距離を表す。 M は式(2)(3)で定義される運動量欠損効果を考慮にいれた噴流の運動量である。一方、界面の相対密度差 ϵ は水温成層場及び塩分成層場について各々図-3中におけるC点、D点及び上層における密度 ρ_C 、 ρ_D 及び ρ_0 を用いて次式の如く表される。

$$\epsilon=\frac{\rho_D-\rho_C}{\rho_0}\ ,\ \rho=\begin{cases} \alpha_T\cdot T+\beta_T & \text{(水温成層場)} \\ \alpha_S\cdot S+\beta_S & \text{(塩分成層場)} \end{cases}\tag{5}$$

成層強度を表すリチャードソン数 Ri は式(5)の l と上式の ϵ とから次式の様に定義される。

$$Ri=\frac{\epsilon\ g\ l}{u^2}\tag{6}$$

下層からの連行流量 Q_e は下側界面の時間変化率 dH_m/dt と水槽底面積との積で与える。従って体積連行係数 E は Q_e と噴流の流量 Q とから次式の如く定義する。

$$E=Q_e/Q\tag{7}$$

(4) 実験結果と考察

水温成層場及び塩分成層場における水理実験結果より得られたリチャードソン数 Ri と連行係数 E との関係²⁾³⁾を図-7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みてほぼ次式の関係性を有する。

$$\begin{aligned} E&=C_1\cdot Ri^{-1} & C_1&=2.16\times10^{-2}\ \text{(水温成層場)} \\ E&=C_2\cdot Ri^{\frac{3}{2}} & C_2&=1.98\times10^{-3}\ \text{(塩分成層場)} \end{aligned}\tag{8}$$

上述の連行則は振動格子を擾乱源として水温・塩分の成層場において得られた連行特性と各々同じべき乗則に従っている。従って、異なる擾乱因により誘起されるこれら2つの混合過程間の力学的な相似性が示唆される。

連行過程における分子拡散性の影響を調べるために先述の長さスケール l と速度スケール u 及び分子拡散係数 κ を用いて次式のペクレ数 Pe を定義する。

$$Pe=\frac{u\cdot l}{\kappa}\tag{9}$$

ペクレ数 Pe をパラメータとして図-7の連行則を再整理したものを図-8に示す。塩分成層と水温成層との間には大きな Pe の差があるが各々の実験範囲では E と Pe との相関は小さく、リチャードソン数のみで混合量に關与するパラメータと考えてよいであろう。

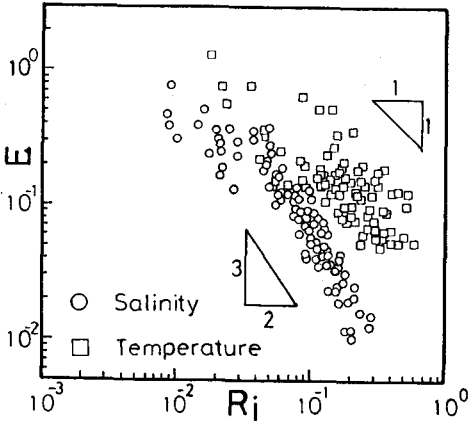


図-7 連行則

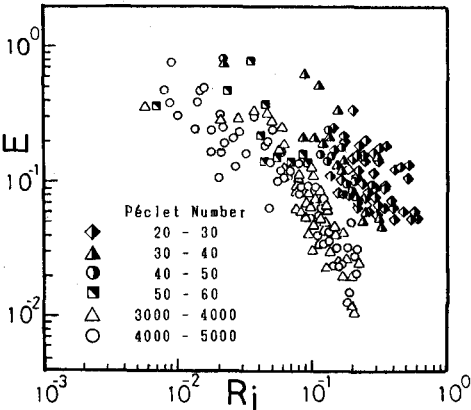


図-8 ペクレ数による再整理

2.(2)で述べた様に、下層流体との水質混合の大部分は噴流塊の貫入部分において集中的に生起していると考えられる。従って噴流の貫入量もまた混合量と同様にリチャードソン数に強く依存しているものと考えられる。そこで噴流の下層への貫入量 Δh を特性長 l によって無次元化しリチャードソン数 Ri との関係を図-9に示す。 $\Delta h/l$ とリチャードソン数はほぼ次式の関係有する。

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

同図より $\Delta h/l$ は Vortex Ring の衝突による密度境界面の貫入変形量⁴⁾と同様にリチャードソン数の-1乗に比例することを示しており、Vortex Ring の衝突変形過程と噴流による現象との相似性が示唆される。

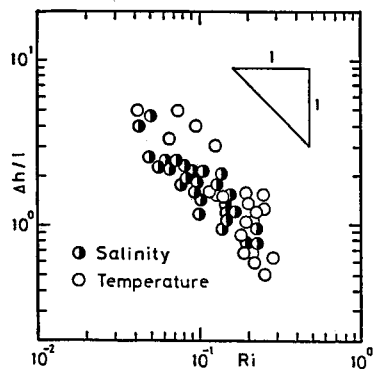


図-9 界面変形量

3. 混合水塊の伝播特性に関する実験

(1) 実験方法

実験は図-9に示す鋼製の三次元水槽(3000mm×4000mm×500mm)を用いて行なった。実験は塩水の表面へ淡水を放流する予備的な(A)表面フロント流の実験と混合水塊の伝播過程と直接対応させるために行なった中間密度水の塩淡水層境界面への衝突により生起する(B)内部フロント流の実験の二通りについて行なった。

(A) 表面フロント流の実験；

あらかじめ水槽内に塩水を満たした後に水槽隅角部に設置した放流口から水表面へ淡水を放流する。

(B) 内部フロント流の実験；

水槽内に塩淡水二成層を作成し、水槽中央でノズルから鉛直下向きに均質噴流を放出して密度界面に衝突させ、混合を生起させる。衝突部から発生する混合水塊は、密度境界面に沿って水平軸対称に広がる内部フロント流を形成する。フロントの伝播特性はビデオカメラによって収録し、画像解析システムを用いて解析した。時々刻々の密度分布は電導計プローブを鉛直方向に走査させることにより計測する。

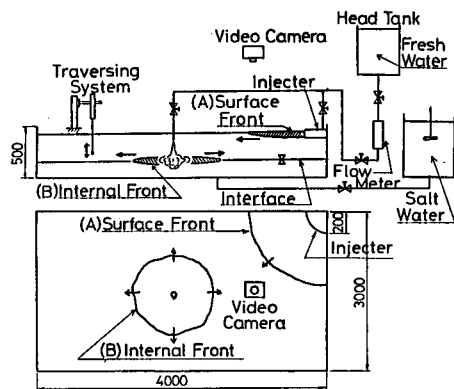


図-10 実験水槽

(2) 伝播特性に関する解析手法

混合水塊の流動は、周囲流体との浮力差によって駆動する重力フロント流でありその伝播特性は、重力・慣性力・粘性力間の相互バランスによって支配される。放流直後は流体の有する慣性力が卓越し、これと重力とのバランスによって流動が支配されるが、流下とともに慣性が減少し、粘性抵抗の寄与が相対的に大きくなり重力と粘性力とのバランスによる流れとなる。そこで、各力成分のオーダーを比較し(Ⅰ)「重力と慣性力が支配する領域」及び(Ⅱ)「重力と粘性力が支配する領域」の各々の場合について伝播則を導出する⁵⁾。

(A) 表面フロント流

各力の評価にあたって以下の仮定を設ける。

- 1) フロント流体による周囲流体の連行は無視する。(図-12・密度構造を参照)
- 2) 流動は半径方向のみを考えた水平一次元流とし、円周方向、鉛直方向の流速成分は無視し圧力勾配は変化しない。
- 3) 静水圧分布を仮定する。

上記の仮定の下に連続式及び一次元運動方程式の積分から得られる各力の成分は、およそ次の様な関数形を持つものと考えられる。

〈体積保存式〉

$$Q \cdot t \sim h_0(R^2 - R_0^2) \quad (11)$$

〈重力項: F_g 〉

静水圧の仮定より水平方向の圧力勾配は $\partial p / \partial r = \Delta \rho g \partial h / \partial r$ の様に与えられるのでこれをフロント体積について積分すると重力項 F_g が次式で表現できる。

$$F_g \sim \Delta \rho g h_0^2 R \sim \Delta \rho g \frac{Q^2 t^2 R}{(R^2 - R_0^2)^2} \quad (12)$$

〈慣性力項: F_i 〉

流体の速度を U とし、 $U \sim R/t$ であるとおけば (11) を考慮して次の様になる。

$$F_i \sim \rho_1 U^2 h_0 R \sim \rho_1 \frac{R^3 Q}{t (R^2 - R_0^2)} \quad (13)$$

〈粘性力項: F_v 〉

染料の Streak Line を用いて流速分布を可視化した結果から水表面での速度勾配を $\partial u / \partial z = U / h_0$ で与えると粘性力 F_v は次式で表現することができる。

$$F_v \sim \mu \frac{\partial u}{\partial z} (R^2 - R_0^2) \sim \mu \frac{(R^2 - R_0^2)^4}{Q \cdot t} \quad (14)$$

以上より F_g と F_i 間、 F_g と F_v 間のオーダー比較を行ない、(I) 「重力-慣性力領域」及び(II 重力-粘性力領域)についての伝播則がそれぞれ得られる。

(I) 重力-慣性力領域

$$(R^2 - R_0^2) \left(1 - \frac{R_0^2}{R^2}\right) \sim (g' Q)^{\frac{1}{2}} \cdot t^{\frac{3}{2}} \quad (15)$$

(II) 重力-粘性力領域

$$(R^2 - R_0^2)^4 \left(1 - \frac{R_0^2}{R^2}\right) \sim \left(\frac{g' Q^3}{\nu}\right) \cdot t \quad (16)$$

(B) 内部フロント流の場合

動力学的には表面フロント流の場合と相似であり、伝播特性は(15)式、(16)式で表現し得るがフロント流量 Q_f 及び有効重力加速度 g' が異なる。図-13に示す流れ場の場合、静力学的な釣り合いより $\lambda = h_1/h_2 = (\rho_3 - \rho_2)/(\rho_2 - \rho_1)$ なるパラメータが導出され、これを用いると水平流動に対して有効な重力加速度は、 $g' = \lambda / (1 + \lambda) (\rho_2 - \rho_1) g$ として与えられる。噴流の連行流量はGörtlerの理論によると

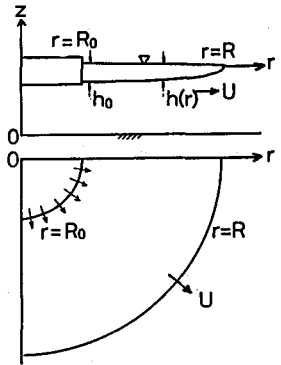


図-1-1 表面フロント流

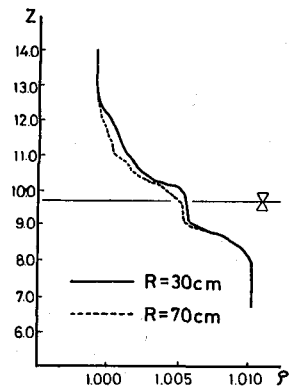


図-1-2 密度構造

$Q_{ent} = 0.405\sqrt{M_0} z$ で与えられるが、連行量に関する検証実験を別途
を別途行なったところ $Q_{ent} = 0.172\sqrt{M_0} z$ を得た。これらの差は乱流噴
流として十分に発達していないことに原因があると思われる。更に、衝突
による連行量を (8) 式で評価し、放流量を Q_0 とすると衝突後内部フロ
ント流として輸送される流量は結局 $Q_f = (Q_0 + 0.172\sqrt{M_0} z)(1+E)$ と
なる。一方、目視観測によれば、混合水塊は滞留することなく拡がってい
るので流量 Q_f は、ほぼ時間的に一定とみなしうる。なお、フロント流と
しての Virtual Source: R_0 は目視より決定した。

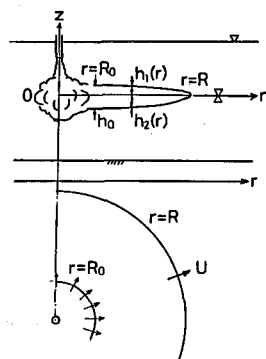


図-1 13 内部フロント流

(3) 伝播特性に関する実験結果と考察

表面フロント流及び内部フロント流の双方について

$R^2 - R_0^2$ と t の関係を図-14に示す。長さスケールには
 $\tilde{L} = (Q^5 / \nu^3 g')^{1/5}$ 、時間スケールには $\tilde{T} = (Q / \nu g')^{1/2}$ を
用い各物理量を無次元化してある。 $\hat{t} = t / \tilde{T} < 1.0$ では
 $R^2 - R_0^2$ は t の $3/2$ 乗に比例 (すなわち $R \sim t^{3/4}$) し
 $\hat{t} > 1.0$ では t の 1 乗に比例 (すなわち $R \sim t^{1/2}$) する
ことがわかる。(12) 式と (13) 式を等置すると $\tilde{T}$ が得られる
ことから $\tilde{T}$ は (I) 「重力-慣性力領域」から (II) 「重
力-粘性力領域」への遷移時間を表している。図-14より
初期は粘性抵抗力に比べて慣性力が卓越し重力とバランス
しつつ流れるが $\hat{t} = 1.0$ 付近において支配力の大小関係が
逆転し以後は粘性抵抗力が重力とのバランスによって流れ
するという流動形態を取る。

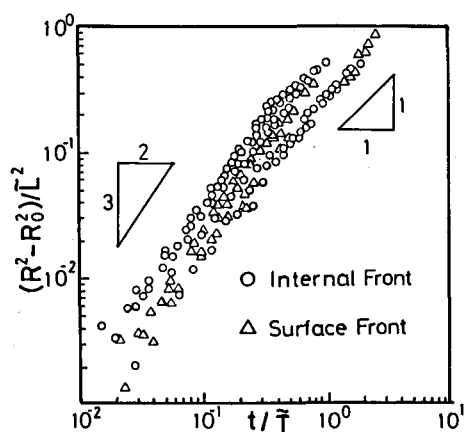


図-1 14 伝播則

4. むすび

本研究では噴流水塊の衝突による水質混合現象を論じ、界面変形と連行過程が既往の振動格子擾乱による
連行過程と類似の混合特性を有することを示した。

噴流の衝突による水質混合促進工法として、プロペラ水流による貯水池水質の改善が試験的に行なわれて
いる。水流の持つ動力学特性と水質混合量との関係を理論的に評価することは成層の人工制御工法の効率化
を図る上で不可欠である。

(参考文献)

- 1) 例えば水理公式集
- 2) 室田明・道奥康治・黒川純一良・吉田弘：第41回土木学会年次講演会
- 3) 室田明・道奥康治・黒川純一良・吉田弘：昭和61年度土木学会関西支部年次講演会
- 4) P.F.Linden : J. Fluid Mech., vol.60, pp.467-480, 1973
- 5) N.Didden and T.Maxworthy : J. Fluid Mech., vol.121, pp.27-42, 1982