

鉛直噴流の衝突に伴う密度界面変形部の水理特性

Hydraulic Characteristics in Depressed Density Interface Induced by Vertical Impinging Jet

徳島大学工学部 正員 端野 道夫 Michio HASHINO

徳島大学工学部 正員○吉田 弘 Hiromu YOSHIDA

徳島大学工学部 正員 岡部 健士 Takeshi OKABE

Hydraulic characteristics inside the depressed density interface induced by vertical impinging jet is studied experimentally. The relationship between the integral time-scale and predominant period of interfacial fluctuation is found to be similar to the experimental result with oscillating grid. The most turbulent energy is occupied by the component of predominant period. From measurement of flow velocity, the integral time-scale is proportional to Brunt-Baisala frequency and the predominant period. The characteristic length scale defined by the predominant period and turbulent intensity is almost identical to root mean square of interfacial fluctuation at the edge of interface and to nominal width of jet at initial position of interface. The characteristic length-scale mentioned above is closely related to the entrainment process at the edge of interface

keyword: density interface, jet, impingement, depression.

1. はしがき

近年、ダム貯水池において発生している富栄養化などの水質問題に対する改善方策の一つとして鉛直方向の水質混合を促進し、貯水池水を混合希釈する方法が考えられる。この場合、水塊を直接に密度界面に対して衝突させるのが効果的と考えられることから、噴流を密度界面に直角に衝突させた際に生起する水質混合現象を対象として、混合量を定量評価する試みが行われてきた。¹⁾²⁾ しかしながら解析上、混合過程をブラックボックスとして取り扱っており、その機構については明らかと言い難い。しかるに、実際現象への適用に当たっては多数の物理学的要因が輻輳することを考えれば、何よりもまず、混合機構の基礎的な理解が不可欠であり、噴流が密度界面を突き抜けて活発に混合に寄与している部分（以後、この部分を密度界面変形部分と称する）の流動特性を定量的に把握することが肝要である。

本研究は噴流が密度界面に直角に衝突する際に生起する鉛直混合現象を対象とし、その混合過程を把握するための第一歩として、密度界面変形部に着目し有機染料および油滴トレーサーを用いて界面変動ならびに流れ場の可視化実験を行った。密度界面は混合現象と密接にかかわる箇所であることから界面の変動特性を捉えることによって混合に寄与する変動成分の定量評価を行った。また、同時に流れ場の可視化より流れの立場から変動特性を捉え、界面変動の結果と総合して混合に寄与する変動成分の把握を試みるとともに、その他の擾乱因によって生起する混合現象との類似性、相違性から混合機構の解明を試みた。

2. 実験装置および方法

実験は図-1に示す木製水槽（縦1800mm、横1600mm、高さ 600mm）を用いて行った。内容は大きく二つの実験に分かれる。一つは密度界面をメチレンブルー溶液で可視化して界面変動特性を調べるものであり、もう一つは噴流内に油滴トレーサーを混入することで界面変形部の流動を可視化する実験である。いずれの実験においても、まず水槽内に所定密度差の塩分二層系を作成する。次に電気伝導度計を鉛直方向に走査して水槽内の密度分布を計測し、分布形より初期の密度界面位置を決定する。本実験は比較的底面積の大きな水槽を用いており、解析の対象となる時間も初期の数分に限定されているため鉛直混合の促進による密度界面の低下量ならびに混合層の増加量はほとんど無視できる。

2.1 界面の可視化実験

密度分布形の計測後、水槽の上部に設置した小型ポンプで上層水を循環取水し、噴流として密度界面に対して直角に衝突させる。ただし、取水により生ずる水平方向の不均一性を除去するために、取水口は内壁上部の4箇所に分散配置してある。放流量とポンプの負荷電圧とはほぼ線形関係にあり、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。放流開始と同時に放流口のところでメチレンブルー溶液を噴流内に混入する。メチレンブルーは噴流内で拡散し噴流が界面に衝突して変形する様子が容易に可視化される。水槽側面の内で2面はガラス張りにしてあり、ここを通して界面をビデオカメラで撮影した。得られた界面の画像はパーソナルコンピュータで画像解析され、 $\Delta t = 0.1$ 秒毎の噴流中心軸上における界面変位の時系列データとして記録される。実験条件は2.2の流動の可視化実験と併せて表-1に示す。

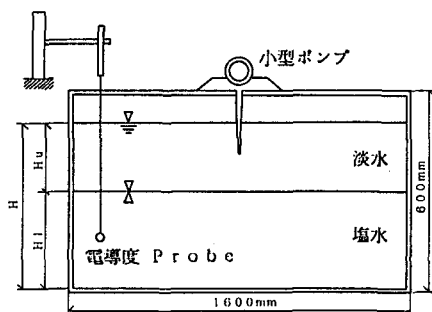


図-1 実験水槽

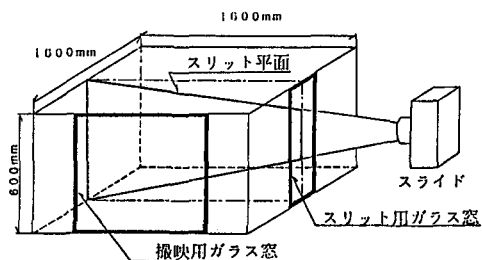


図-2 可視化手法

2.2 流動の可視化実験

界面の可視化実験と同様に行う。このとき放流口のところで油滴トレーサを注射器によって混入させる。この油滴トレーサはクロロベンゼン（比重1.105～1.115）とキシレン（比重0.8611～0.8802）を適量ずつ混合し、蛍光塗料を少量添加して作成される。作成時の直径は概ね2mm程度。密度は混合によって生ずる混合水塊の密度とほぼ一致するように調整される。撮影に際しては室内を減光し、図-2のようにスライド映写機によるスリット光を用いて水槽内に噴流中心軸を含むスリット平面を作成する。トレーサがスライド光を受けてスリット平面内で発光して描く軌跡を映写用のガラス窓を通してビデオカメラで

表-1 実験条件

CASE	流量 cm ³ /s	相対密度差	流下長 cm	下層厚 cm	全水深 cm	リチャードソン数
A	4.494	0.01099	24.7	19.8	44.5	0.19943
B	2.540	0.01	13.8	30.8	54.0	0.09906
C	4.440	0.00969	22.9	21.6	52.8	0.14362
D	3.778	0.00170	15.1	29.9	52.1	0.01001
E	2.373	0.00360	12.1	32.9	55.1	0.02753
F	2.182	0.00360	15.0	30.1	50.6	0.06138

（ただし流動の可視化は CASE B、Cのみ）

撮影しテープに記録する。得られたトレーサの軌跡は $\Delta t = 0.1$ 秒毎に一旦ビニールシートへ転写された後、デジタイザによって軌跡の起点、終点が抽出されて最終的に Δt 間の移動距離 Δl として整理される。なお、予めスリット平面内のスケージングのためにスリット平面と同じ位置で要素長1cmの格子板が撮影されており、離散化されたトレーサデータから各格子点での代表値として $\Delta l / \Delta t$ より流速ベクトルが計算される。ただし、解析には大量のトレーサデータが均等にスリット平面内に分布している必要があるため、今回は2ケースのみを対象とした。

3. 現象の概要

図-3に界面変形部における流動を模式的に示す。最初、(a)密度界面に衝突した噴流は、(b)下層に貫入し、噴流の運動量と周囲から受ける浮力とが釣り合う位置で貫入を停止し、(c)界面から下層へ突出する部分が発生する。その後、浮力によって元の位置に向かって復元するが(d)、その際に突出した部分が下層水を巻き込むようにして取り込む(e)。この現象がBainesら¹⁾によって「噴流の先端部が重い下層流体をすくい上げるような機構である。」と指摘された連行形態に相当すると考えられる。最後に、連行により生成された混合水塊は、密度界面付近を水平に拡がる(f)。連行の規模は概ね1cm程度で約1秒程度かかって終了しており、現象が集中的に生起しているこの部分の流動特性を定量的に把握することが必要である。

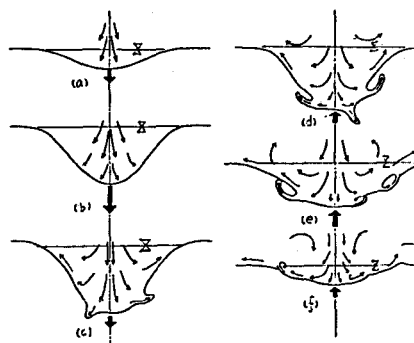


図-3 現象の模式図

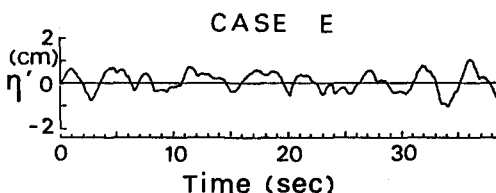


図-4 界面変動の時系列

4. 界面変動特性

図-4に初期界面位置からの変位量 Δh より求めた界面変動量 $\eta' (= \Delta h - \overline{\Delta h})$ の時系列の例を示す。各々細かい変動成分は乗っているものの概ね基本は正弦的な変動であることが読み取れる。

図-5は界面の最大変形量 h_m を噴流の半値半幅 l で規格化し(1)式で定義されるリチャードソン数 R_i との関係を描いたものである。 h_m は R_i の-1乗に比例していることがわかる。

$$R_i = \frac{\varepsilon g l}{u^2} \quad (1)$$

ここに、 l :噴流の半値半幅、 ε :界面での相対密度差、 g :重力加速度である。

図-6は界面変動量のr.m.s.である $\eta' (= \sqrt{\overline{\eta'^2}})$ と密度界面上における噴流の半値半幅 l とを比較したものである。界面変動のr.m.s.は噴流の半値半幅とほぼ比例関係にあり、リチャードソン数に依らない。つまり、貫入水深規模、界面先端での変動強度規模のいずれにおいても界面変動に関する空間スケールは噴流の半値半幅によって規定されており、 η' の絶対値は半値半幅のおよそ0.5倍となっている。半値半幅 l に較べて η' が少し小さくなっている理由としては、下層内へ貫入した噴流の界面への衝突や周囲水から受ける浮力の作用などが考えられる。

図-7には界面変動の自己相関係数 R_η を示す。いずれのケースも R_η にはほぼ等間隔でピークが現れており

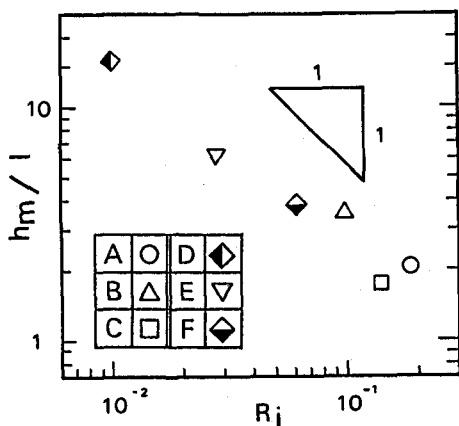


図-5 界面最大変形量と半値半幅の関係

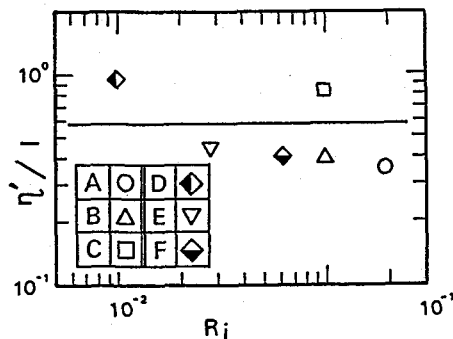


図-6 界面変動強度と半値半幅の関係

基本周期である τ_p にその倍周期成分が重畳された構造になっている。(3)式のように、自己相関係数をこれが初めてゼロになる $\tau = \tau_p$ まで積分して得られる積分時間スケール T と(2)式で計算される密度場のブルートサイラ周期 t_B とを比較したのが図-8である。

$$t_B = \sqrt{\frac{l}{\varepsilon g}} \quad (2)$$

$$T = \int_0^{\tau_p} R_n(\tau) d\tau \quad (3)$$

リチャードソン数に依らず、 T は t_B のおよそ2倍となっており、界面変動の時間スケールは密度場のサイラ周期に強く依存している。界面の最大変形量の結果も考え合わせると、変形した界面は、Linden³⁾の行った渦輪の界面に対する衝突・変形・復元過程に関する実験結果と類似性を有している。

図-9は密度界面における組織的な渦動成分と見られる卓越周期 τ_p と積分スケール T との関係を示したものである。図中には浦、小松、松永⁴⁾が振動格子を擾乱源として用いた実験結果を実線で示している。 τ_p と T はほぼ(4)式の関係を示す。

$$\tau_p = 6.05 \cdot T \quad (4)$$

上式は浦、小松、松永らの結果($\tau_p = 6.10 \cdot T$)とほぼ一致している。

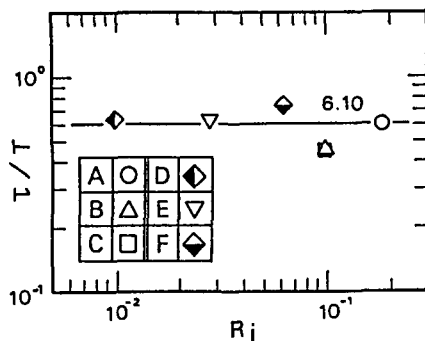


図-9 卓越周期と積分時間スケールとの関係

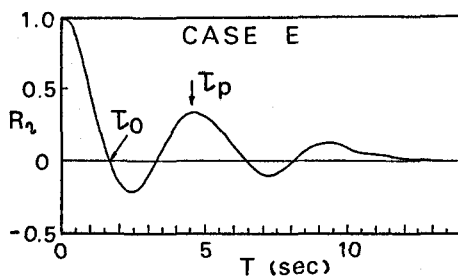


図-7 界面変動の自己相関係数

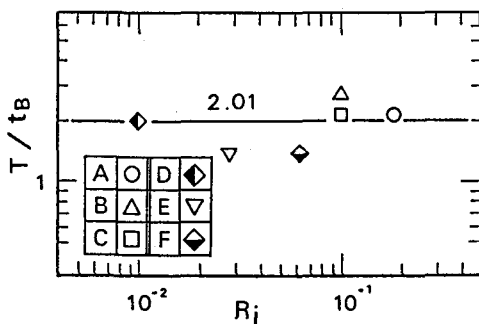


図-8 積分時間スケールとサイラ周期の関係

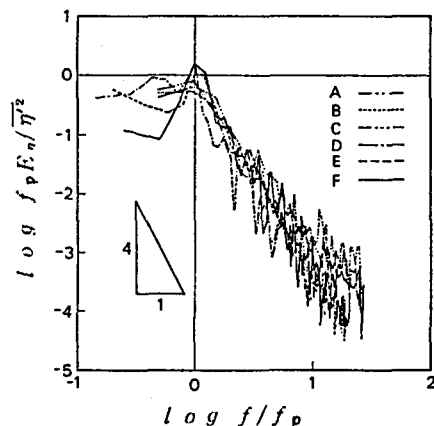


図-10 界面変動のエネルギースペクトル

図-10は界面変動のエネルギースペクトル E である。縦軸 E は η'^2 / f_p で、横軸 f は $f_p (= 1/\tau_p)$ でそれぞれ規格化されている。スペクトルのピークはほぼ f_p に一致していることから界面変動のエネルギーのうち、かなりの部分が τ_p スケールの変動成分によって占められていることを表す。またスペクトルは $f > f_p$ の領域において概ね f^{-4} に比例している。これは一般に認められている風波のエネルギースペクトル特性($E \propto f^{-5}$)に近く、このことから界面変動が重力波的であることが示される。本実験の結果は振動格子を用いた実験結果と定性的に一致することから、両者は擾乱因は異なっても互いに同じような乱流構造を有しており、これより τ_p スケールの渦動成分が界面先端での連行機構と密接に関連していると考えられる。

5. 界面変形部の流動特性

図-11はCASE Bの平均流速ベクトル図である。縦軸は放流口からの距離 y を放流口と界面との距離 y_0 で、横軸は噴流中心軸からの距離 x を半値半幅 l でそれぞれ規格化されており $y/y_0=1.0$ の箇所が界面位置に相当する。下層内に貫入した噴流が力学的に中立な位置で流向を転換して元の位置まで復元していく様子が明瞭に表されている。

図-12は連行現象と密接に関連していると考えられる界面の先端付近($x/l=0$ 、 $y/y_0=1.5$)における鉛直方向流速 u 、水平方向流速 v に関する変動成分 $u' (=u-\bar{u})$ ならびに $v' (=v-\bar{v})$ の時系列である。

図-13は u 、 v の自己相関係数 $R_u(\tau)$ 、 $R_v(\tau)$ である。自己相関係数にはおのおのについて明瞭な卓越周期 τ_{pu} 、 τ_{pv} が認められる。 R_u 、 R_v より変動の積分時間スケール T_u 、 T_v がそれぞれ次式を用いて計算される。

$$T_u = \int_0^{\tau_0} R_u(\tau) d\tau \quad (5)$$

$$T_v = \int_0^{\tau_0} R_v(\tau) d\tau \quad (6)$$

ここで、 τ_0 は自己相関係数 R_i が初めてゼロになるまでのタイムラグである。

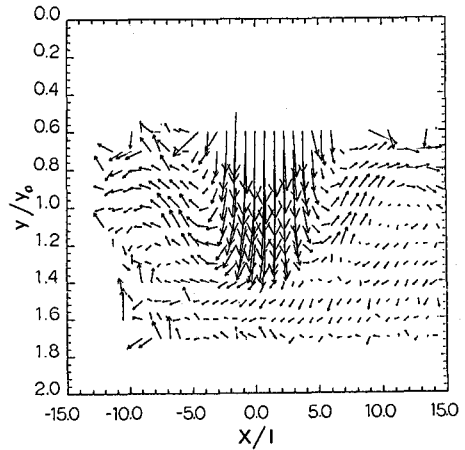


図-11 平均流速ベクトル図

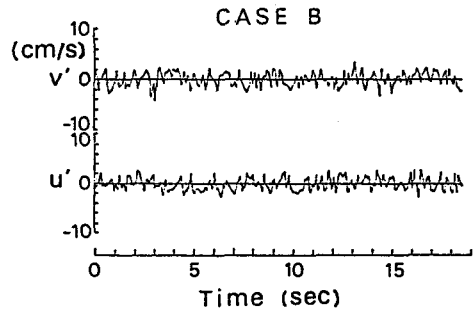


図-12 流速変動の時系列

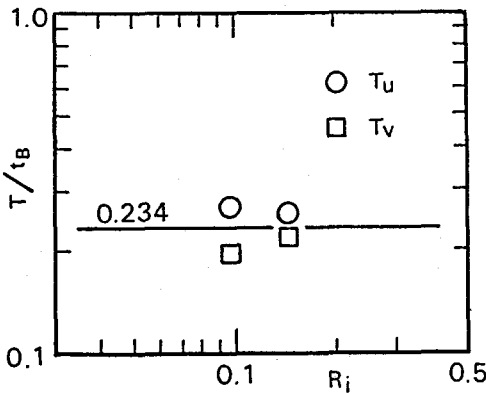


図-14 積分時間スケールと
バイサラ周期の関係

図-14は積分時間スケール T_u 、 T_v と(2)式であらわされる密度場のバイサラ周期 t_B とを比較したものである。値にはばらつきが見られるものの、概ね T は t_B に比例しており(7)式の関係がある。

$$T = 0.234 \cdot t_B \quad (7)$$

密度場の積分時間スケールはバイサラ周期に依存しており、リチャードソン数などの運動学的なパラメータには依存していないことがわかる。また、前述の卓越周期 τ_0 と積分時間スケール T との関係を示した

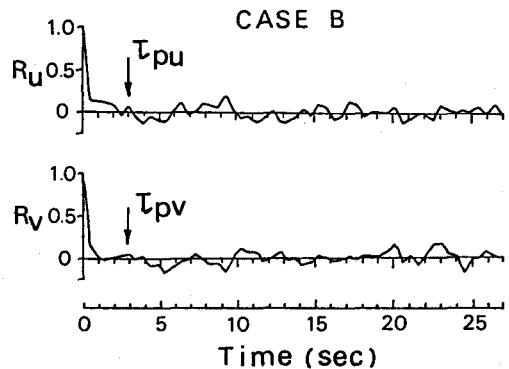


図-13 流速変動の自己相関係数

のが図-15である。やはり、 τ_p は T に比例しており両者の間には次式の関係が成立している。

$$\tau_p = 6.08 \cdot T \quad (8)$$

(5) 式は4. 界面変動特性で得られた結果とほぼ一致している。時間スケールに関しては水平方向と鉛直方向では相互に大きな差異は見られない。こうして流れ場の流動特性からも2つの異なった変動時間スケールの存在が示された。

次に、密度場の代表速度スケールとして変動強度 $\sqrt{u'^2}$ および $\sqrt{v'^2}$ を考え、これに卓越周期を乗ずることによって卓越周期 τ_p に対応する長さスケール l_u, l_v をそれぞれ考える。

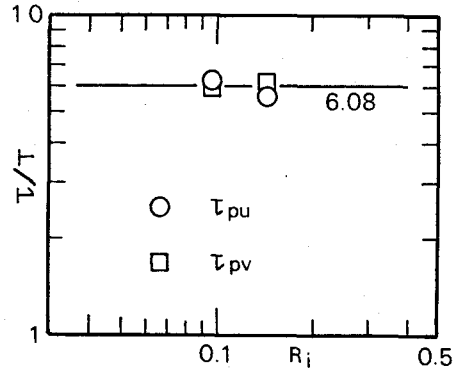


図-15 卓越周期と積分時間スケールの関係

表-2 乱流諸量の比較

CASE	$\sqrt{u'^2}$ cm/s	$\sqrt{v'^2}$ cm/s	τ_{pu} sec	τ_{pv} sec	l_u cm	l_v cm	η' cm	l cm
A	0.7076	0.7455	0.6	0.4	0.4246	0.4422	0.4764	1.170
B	1.902	1.871	0.7	0.6	1.3314	1.1226	1.4601	1.733

表-2は得られた界面先端付近での長さスケール l_u, l_v を噴流の半値半幅、界面の変動強度とそれぞれ比較してみたものである。先端では、それぞれの方向による大きさの差異はみられない。また、鉛直方向のスケールはほぼ界面の変動強度と一致することから本実験の妥当性が検証されるとともに、卓越周期に関する変動スケールの重要性が認識できよう。

6. むすび

界面変動ならびに界面変形部内での流動を捉えることにより界面先端での流動を支配する変動スケールとしては界面変動強度 η が相当すること、振動格子を擾乱因とする実験結果との比較から、この η が組織的な乱流構造に相当することが明らかになった。可視観測の結果より、下層内へ貫入した噴流が界面で周囲流体を連行する時間ならびに規模は、概ね卓越周期に関する変動特性とほぼ一致している。以上より、噴流の衝突による密度界面での混合過程は、振動格子を擾乱因とする混合過程と類似した界面変動特性を有している。振動格子により発生する組織的な変動スケールが、本実験では噴流の半値半幅に相当していると考えればよい。今後は以上をふまえ、連行機構と乱流変動量との関係を明らかにし、連行機構のモデル化によって混合過程の説明を行うことが課題である。

謝辞

本研究の遂行にあたり神戸大学土木工学科道奥助教授には貴重な助言を頂いた。また、当時本学学生の今川徹広氏には実験、データ整理において献身的な協力を得た。以上ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Baines, W.D.: Jour. of Fluid Mech., Vol.68, Part2, pp309~321, 1975
- 2) 室田、道奥、吉田：第32回水理講演会論文集、pp269~274, 1988
- 3) Linden, P.F.: Jour. of Fluid Mech., Vol.60, pp467~480, 1973
- 4) 浦、小松、松永：土木学会論文集、第345号/II-1, pp91~99, 1984