

負の浮力を持って斜面上に表層放出される 三次元密度噴流の流動に関する実験的考察

AN EXPERIMENTAL CONSIDERATION ON THE BEHAVIOR OF THREE-DIMENSIONAL
NEGATIVE BUOYANT SURFACE JETS RELEASED ON A SLOPING BOTTOM

中井正則¹・有田正光²・田原定憲³
Masanori NAKAI, Masamitsu ARITA and Yasunori TAHARA

¹ 正会員 工博 東京電機大学助教授 理工学部建設環境工学科 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町)

² 正会員 工博 東京電機大学教授 理工学部建設環境工学科 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町)

³ 学生員 東京電機大学大学院理工学研究科建設工学専攻 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町)

This study deals with the behavior of three-dimensional negative buoyant surface jets released on a sloping bottom. Flow visualization and exhaustive thermometry were carried out to investigate the streamwise variations of the flow and spreading characteristics. The jet momentarily plunges and reattaches on a water surface, then, the great lateral spreading originates both in the surface and bottom layers, immediately before the complete plunging. This behavior is peculiar in the three-dimensional cases and plays an important role to the flow and spreading mechanism.

Key Words: *Three-dimensional negative buoyant surface jet, Jet-like spreading, Buoyant spreading, Momentary plunging, Reattachment*

1. はじめに

負の浮力を持って斜面上に表層放出される密度噴流は、洪水時における河川水の貯水池への流入や LNG プラントから海域への冷排水の放流などにおいて見られる現象であり、環境水理学上の研究課題である。このことから、従来より多数の研究が行われてきたものの、そのほとんどは鉛直二次元あるいは準三次元の場合について取り扱ったものである^{1)~9)}。

一方、完全な三次元現象、つまり、密度噴流が横断方向に大きく拡がる場合は現場ではよく見られる現象であるにもかかわらず、詳細な流動メカニズムに関する研究例は少なく、Hauenstein and Dracos¹⁰⁾, Tsihrintzis and Alavian¹¹⁾, Fleenor and Schladow¹²⁾らの研究が挙げられる程度である。著者等^{13)~14)}は三次元の場合について詳細な実験を行い、現象の概要の把握ならびに流動メカニズムの解明を試み、三次元現象に特有な流動メカニズムが存在することを指摘してきた。本論文は、著者らの既往の結果を整理するとともに、追加実験による新たな知見を加えて、負の浮力を持って表層放出される三次元密度噴流の流動メカニズムについて総合的に考察したものである。

2. 考える流れの場と実験の概要

図-1に本研究で取り扱う現象の模式図および記号・座標系を示す。同図に示すように、負の浮力を持った三次元密度噴流が放出密度フルード数 F_o で斜面勾配 S の斜面上に水平に放出され、放出口から距離 L_p だけ流下した後に水面下に潜り込み、斜面上を傾斜密度流として流下する問題を考える。ここに、 F_o は $F_o = U_o / \{(\Delta \rho_o / \rho_a) g H_o\}^{1/2}$, U_o は放出流速, $\Delta \rho_o (= \rho_o - \rho_a)$ は放出口における密度差, ρ_o は放出水の初期密度, ρ_a は周囲水の密度, H_o は放出口水深, g は重力の加速度である。

使用した実験装置は約 $6.0\text{m} \times 2.5\text{m} \times 0.6\text{m}$ (縦×横×高さ) の平面水槽である。水槽には、密度噴流を放出するための幅 $b_o = 5\text{cm}$ の水路、および斜面を模擬するためのアクリル板を取り付けてある。実験では水で満たされた水槽中へ冷水を放出することにより負の浮力を持つ三次元表層放出密度噴流を再現し、流況の可視化および水温の測定を行った。

実験条件は、斜面勾配 S を $S=1/5, 1/10, 1/40$, 放出流量 Q を $Q=0.15 \sim 0.30\text{ l/s}$, 放出温度差 ΔT_o を $\Delta T_o = 4.0 \sim 6.0\text{ }^\circ\text{C}$ 程度, 放出密度フルード数 F_o を $F_o = 2.0 \sim 13.0$ 程度とした。

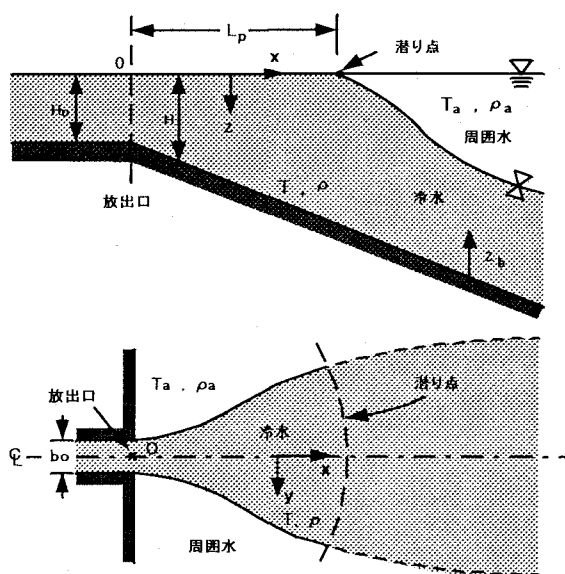


図-1 流れの模式図と座標系

また、放出口水深 H_0 は全ケースを通じて $H_0 = 4.0\text{cm}$ に固定した。なお、現地においても $S=1/2$ のような斜面勾配が大きい貯水池の観測例が報告されており¹²⁾、本実験で採用した斜面勾配 S の範囲は現地を念頭に置いたものである。

3. 実験結果と考察

本論文では、多数の実験ケースのなかから特に詳細なデータが得られている $F_0=6.2$, $S=1/5$ のケースを中心に考察を行い、必要に応じて他のケースとの比較を行う(実際には $F_0=6.2\sim 6.5$ であり、 F_0 に幅があるのは、実験を数回に分けて行ったためである)。なお、以下では特に断らない限り、実験結果はこのケースのものである。

図-2は密度噴流の放出開始後、十分な時間が経過して現象が定常状態に達した時の横断面内流況の変化を染料によって可視化した写真である。同図より、放出口の極く近傍($x/H_0=1.25$)では横断面形状がほぼ矩形となっていること、放出口から若干離れた位置($x/H_0=5.0$)では中間層に弱いくびれが形成されること、さらに放出口から離れると($x/H_0=10.0$)、重力による底層水の底面近傍での大きな拡がりとともに、中間層の明瞭なくびれ、および表層水の水面近傍での大きな拡がりが観察されることが分かる。この中で図-2(c)に示す水面近傍での大きな拡がりは、密度が周囲水より大きな中間層水を重力に逆らって浮上させる流動メカニズムが存在することを示すものであり、著者等によって初めて指摘されたものである¹⁴⁾。なお、このように流れの挙動が表層、中間層、底層でそれぞれ異なることは後述するように、非常に重要な意味を持つと考えられる。

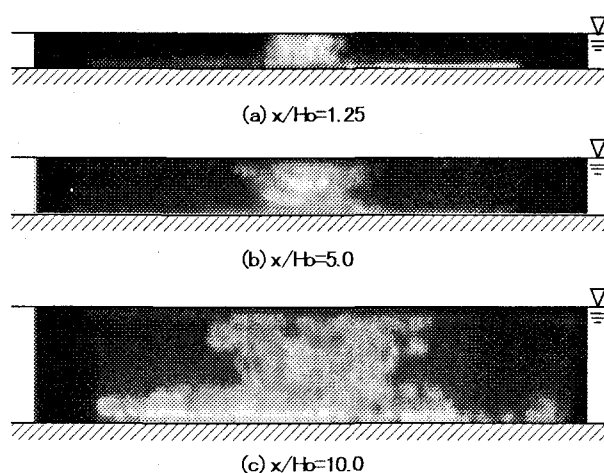


図-2 密度噴流の横断面内流況の可視化
($F_0=6.5$, $S=1/5$)

図-3は流軸上縦断面内における表層流の可視化連続写真(約0.5s間隔)である。同図より、(a)で沈み込んでいた表層流が(b)~(d)で再浮上・再付着し、(e)ではそれが消失して(a)と同様な流況に戻っていることが分かる。つまり、放出された密度噴流は重力の効果により一旦沈み込み、その後に再浮上して水表面へ再付着する。詳細な観察により、この「一時的沈み込み→再浮上→再付着」という一連のプロセスは間欠性を伴うものの、ほぼ同じ位置で繰り返され、一時的沈み込み点・再付着点の時間的変動は小さいことが確認されている。なお、表層流は再付着後にすぐ下流で完全に潜り込み、底面に沿って流動するようになる。

本ケースおよび他のケースの可視化写真を総合して判断すると、本ケースのように F_0 が比較的小さく、 S が大きい場合には表層流の再浮上・再付着は流下方向に一回のみ見られる現象である。一方、 F_0 が大きく、 S が小さい場合には、(流下方向に)数回に及ぶ表層流の再浮上・再付着が繰り返される可能性がある。なお、この現象のメカニズムとそれが流況に及ぼす影響については、後章で考察する。

つぎに、密度噴流の流動メカニズムをより詳細に検討するために、水温の時系列データから流れ場の様子を推察することを試みた。用いた物理指標は相互相関係数 $R_c(\tau)$ 、乱れ強度 α の 2 つであり、それぞれ次式で定義される。

$$\text{Re}(\tau) = \frac{\overline{\{T_1(t) - \overline{T_1}\}} \overline{\{T_2(t + \tau) - \overline{T_2}\}}}{\sqrt{\overline{\{T_1(t) - \overline{T_1}\}^2}} \sqrt{\overline{\{T_2(t) - \overline{T_2}\}^2}}} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{\Delta T^2}}{\Delta T} \quad (2)$$

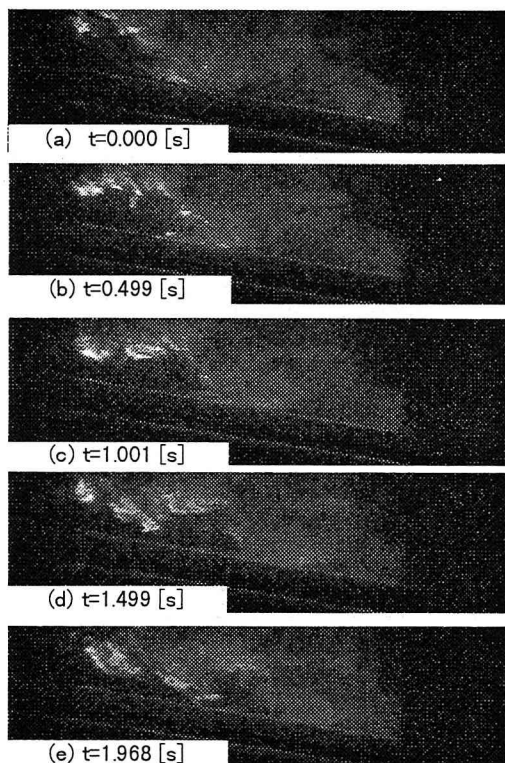


図-3 密度噴流の流軸上縦断面内流況の可視化 ($F_0=6.2$, $S=1/5$)

ここに、 $\Delta T = T_a - T$ 、 T_a は周囲水温、 T は密度噴流の局所水温、 ΔT は ΔT の乱れ成分、 t は時間、 τ は遅れ時間、 $\bar{}$ は時間平均、添字 1, 2 は上下方向に隣接する任意の 2 点を表している(上側の点を 2, 下側の点を 1 とする)。なお、実験においてはサーミスタ型水温計を使用して 0.1s 間隔でデータを収集し、1 点当たりのサンプリング時間は 30s とした。

まず、流軸上縦断面内の鉛直流を調べるために、鉛直方向に隣接する 2 点間(間隔1.0cm)の水温変動の相互相関係数 $R_c(\tau)$ を式(1)より求めた。このとき、求められる $R_c(\tau)$ の値が大きいことは隣接 2 点間の相互の関係(正の相関)が強いことを表し、また、 τ が正の場合は上昇流を、負の場合は下降流を表す。図-4はその結果を示している。図中の数値は鉛直方向の隣接 2 点間の相互相関係数 $R_c(\tau)$ が最大になる遅れ時間 τ_m (単位: s) を、また、矢印は両点間の流れの方向を表している。ただし、同図では $R_c(\tau)$ の最大値 R_{cmax} が 0.5 より大きい場合のみを、2 点間に相関があると見なし抽出している。物理的には、 τ_m が小さいことは上昇流もしくは下降流の速度が大きいことを示しており、その値は $1/\tau_m$ (cm/s) で近似できる。

図-4をもとに、以下の様に流れ全体を流下方向に 3 領域に分割したうえで、それぞれの領域の特性について論ずる。

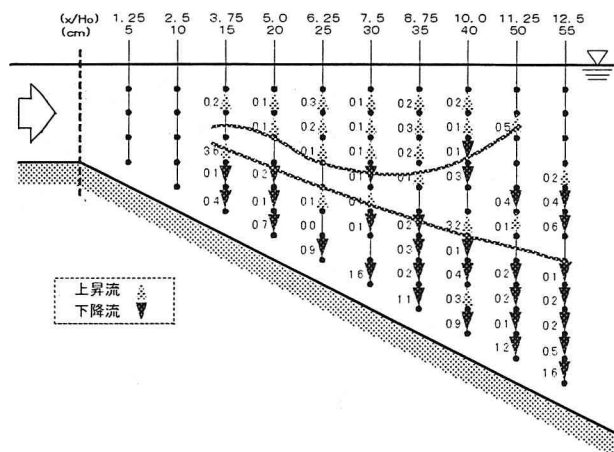


図-4 流軸上縦断面内の遅れ時間 τ_m と上昇流・下降流の分布 ($F_0=6.2$, $S=1/5$)

注：図中に表層・中間層・底層の境界の概略を実線で示している。

① $x/H_0 \leq 2.50$ ：放出口近傍領域であり、そこではすべての点で $R_{cmax} < 0.5$ であった。これは、隣接 2 点間の水温変動の相関が弱く、上昇流もしくは下降流が弱いことを意味している。

② $2.50 < x/H_0 \leq 8.75$ ：放出口から若干離れたこの領域では極く底層を除いて、隣接 2 点間に $\tau_m \leq 0.3s$ の強い相関が生じている。また、表層では上昇流が、底層では下降流が生じている。つまり、この領域では流れが上下に分岐していることが分かる(それぞれを表層流、底層流と呼ぶ)。さらに、表層流と底層流の間には上下方向の流れがほぼ停止する中間層の存在が認められる。なお、底面の極く近傍には $\tau_m = 0.4 \sim 1.6s$ の緩やかな下降流が生じている。

③ $x/H_0 \geq 10.00$ ：流れの可視化より本ケースの再付着点は、 $x/H_0 = 10$ 程度であることが分かっている。それより若干下流で表層流は潜り込みを開始し、中間層の流れおよび底層の流れと合体して、全体として完全な傾斜密度流として斜面上を流下するようになる。これを反映して、 $x/H_0 \geq 10.00$ では下降流が卓越している。なお、この領域では中間層が厚くなっており、底層のみならず、中間層にも重力に基づくと思われる強い下降流が生じていることが認められる。

図-5は流軸上縦断面内における乱れ強度 α の測定結果を示している。同図より、 α の値は底層近傍で小さいことが分かるが、これは斜面に沿って安定した流れが形成されているためである。一方、表層近傍では底層近傍より乱れが強いことが分かる。また、再付着点近傍 ($8.75 \leq x/H_0 \leq 12.5$) では、表層流の一時的沈み込み・再浮上・再付着と関係していると考えられる強い乱れが認められる。

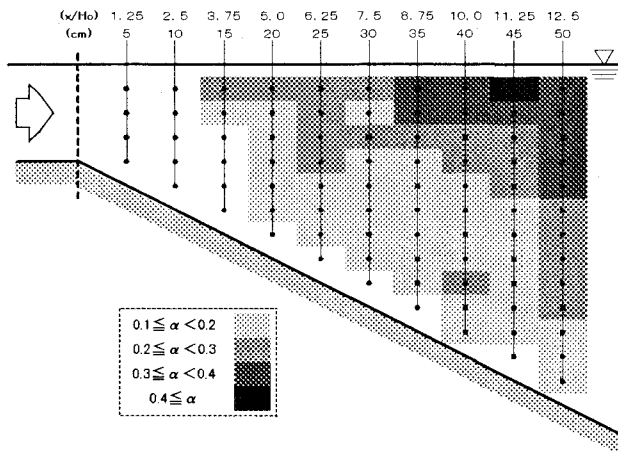


図-5 流軸上縦断面内の乱れ強度 α の分布
($F_0=6.2$, $S=1/5$)

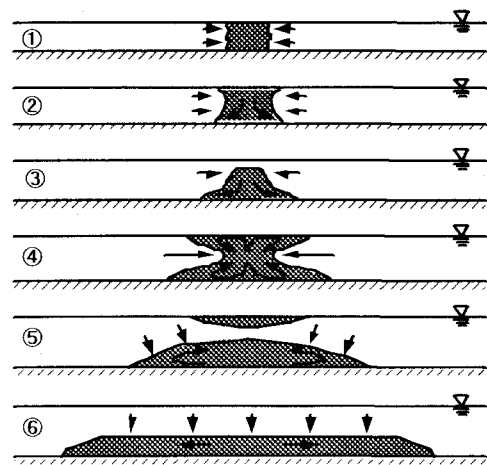
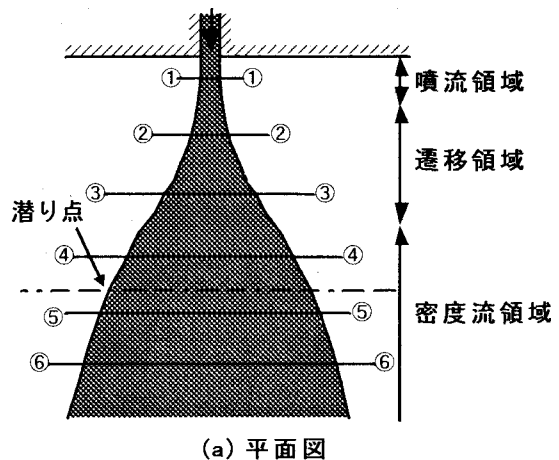
4. 密度噴流の拡がり特性

ここでは、以上の実験結果に基づいて負の浮力を持って斜面上に表層放出される三次元密度噴流の流動・拡がり特性を、流れが表層、中間層、底層に分離されることを念頭において論ずる。

図-6は密度噴流の流動・拡がり特性を模式的に描いたものである。同図に示すように密度噴流は放出直後には噴流的特性を示し、横断面形状はほぼ矩形である。また、流れは均質噴流と類似の挙動を示し、強い水平連行が生ずる(この領域を噴流領域と称する。図-6の断面①および図-2(a)参照。図-4では $x/H_0 \leq 2.50$ の領域に対応する)。

流下とともに徐々に慣性力が弱まり、密度噴流は遷移状態へ移行する(この領域を遷移領域と称する)。遷移領域に入ると、密度噴流の底層が重力の作用によって拡がり始め、中間層から底層へ向かう流れが生じる。また、それに伴って中間層に弱いくびれが生じる(断面②および図-2(b)参照。図-4では $3.75 \leq x/H_0 \leq 6.25$ 程度の領域に対応する)。このとき、流軸上では底層付近で下降流が生ずるとともに表層付近では上昇流が生じており(図-4参照)、これによる表層近傍での拡がりも中間層のくびれを引き起こす原因になると考えられる。なお、この領域でも依然として強い水平連行現象が観察される。さらに流下すると、この弱いくびれは底層の拡がりとともに消失し、横断面形状は釣鐘型となり、密度噴流は水表面から剥離して一旦沈み込む(断面③参照。図-4では $x/H_0 = 7.5$ 程度に対応する)。

遷移領域を過ぎると、密度噴流の慣性力はさらに弱まり、密度流的特性(密度流効果が卓越する)が現れる(この領域を密度流領域と称する)。つまり、この領域では、底層に負の浮力を持つ三次元密度噴流



(b) 横断面図

図-6 密度噴流の流動・拡がり機構

としての横断方向の大きな拡がりが生じる。また、断面③で一時的に沈み込んだ密度噴流が重力に抗して再浮上・再付着し、水表面近傍にも大きな拡がりが生じる(このメカニズムについては、次章で考察する)。そして、中間層に顕著なくびれが形成される(断面④および図-2(c)参照。図-4では $8.75 \leq x/H_0 \leq 10.0$ 程度の領域に対応する)。その後、密度噴流は表層流と底層流に完全に分岐し、底層流は中間層流とともに斜面に沿って流動する。一方、表層流は若干下流で下方へ潜り込む。ただし、表層流の水塊の一部は水表面近傍に取り残される(断面⑤参照。この水塊はいずれ周囲水中に拡散・消失する)。この現象は再付着現象に伴うものであり、間欠的なものである。そして最終的に、表層流は中間層流および底層流と一体となり、完全な傾斜密度流として斜面上を流下するようになる(断面⑥参照)。

ところで、噴流領域、遷移領域、密度流領域の各領域は、断面平均密度フルード数 F_d によって分割可能であると考えられる。つまり、放出口近傍の F_d が大きい領域は噴流領域となり、流下による F_d

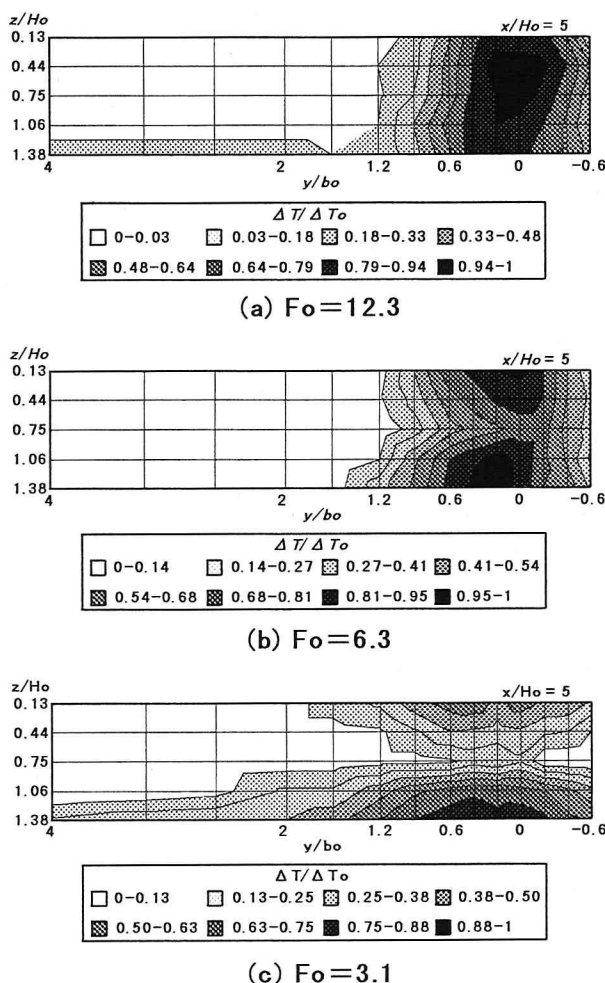


図-7 Fo による密度噴流の横断面形状の変化 ($S=1/10$, $x/H_o=5.0$)

の低下に伴って遷移領域、密度流領域へと移行していく。したがって、放出密度フルード数 Fo が大きい場合には噴流領域は長くなり、 Fo が小さい場合には噴流領域が短く、直ちに遷移領域、密度流領域へと遷移することになる。一方、斜面勾配 S については、その値が小さいほど鉛直方向の拡がりが増加するので、流下方向に長く噴流領域が出現することになる。

このことを調べるための実験結果を図-7に示す。同図は、斜面勾配 S 、放出口からの無次元距離 x/H_o をそれぞれ $S=1/10$, $x/H_o=5.0$ に固定して(実験ではいずれのケースも $H_o=4\text{cm}$ であるので、 $x=20\text{cm}$ の定点の結果である)、 Fo を 3.1, 6.3, 12.1 と変化させた場合の無次元水温差 $\Delta T/\Delta T_o$ ($\Delta T = T_a - T$): 局所水温差, T : 密度噴流の局所水温, T_a : 周囲水温, ΔT_o : 放出口における水温差 ΔT のコンターラインを示している。なお、コンターラインは各点の 30s 間の計測結果より求めたものである。

図-7(a) ($Fo=12.1$) では横断面形状はほぼ矩形であるのに対し、図-7(b) ($Fo=6.3$) では中間層に弱いく

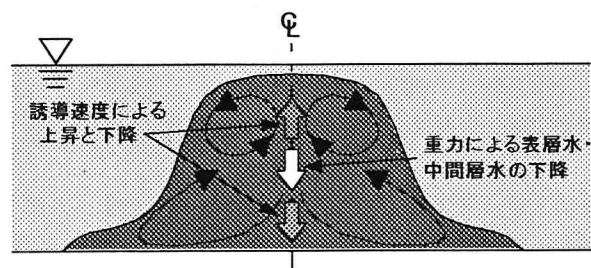


図-8 密度噴流の横断面内に形成される縦渦(遷移領域)

びれが、図-7(c) ($Fo=3.1$) では強いくびれが生じていることが分かる(図-7(a) で y/bo の底層に $\Delta T/\Delta T_o$ がやや大きい領域が出現しているが、これは測定誤差によるものである)。つまり、図-7(a), (b), (c) はそれぞれ図-6の断面①, ②, ④に対応しており、それぞれ噴流領域、遷移領域、密度流領域に属している。この実験結果より、 Fo の増大に伴って噴流領域が長くなり、遷移領域・密度流領域への移行が遅れることが分かる。なお、実験結果の詳細については、文献 14) を参照されたい。

5. 密度噴流の再浮上・再付着のメカニズム

本章では、密度噴流の一時的沈み込み・再浮上・再付着のメカニズムについてより詳細に考察するために、図-8に示すような流れの慣性力が弱くなり、密度噴流が(一時的に)下方へ沈み込み始めた状態、つまり、図-6の断面③の場合を考える。ただし、以下の記述は十分な測定事実に基づいたものではなく、流れの可視化結果をもとに組み立てた物理的考察であり、いわば仮説にすぎないことを予め断っておく。

この僅かに沈み込んだ状態において、密度噴流に対して表層周囲水の鉛直下向きの連行が生じる。このときの連行速度は密度噴流と水表面との間の空間(周囲水領域)が狭いために大きくなり、表層周囲水の圧力が低下し、一旦沈み込み始めた密度噴流は表層へ引き戻される。つまり、密度噴流は一種のコアング効果によって水表面に再浮上・再付着すると推察できる¹¹⁾。

一方、この他の密度噴流の再浮上・再付着の原因として、横断面内に形成される縦渦が考えられる。図-2(b)に見られるくびれ現象および図-4の放出口近傍での上下層の分離現象からも推察できるように、密度噴流の横断面内には、放出直後に表層と底層にそれぞれ一対の縦渦が形成されている。このうち、底層の一対の縦渦は重力による密度流の沈み込み(下降流の形成)と底層での横断方向への拡がりが増加する原因となっている。また、底層の拡がりの先端部には

カルマンヘッドを伴う密度カレントが形成され、そこで生じる反転流が縦渦を強化していると考えられる。一方、表層の一对の縦渦は底層の縦渦の補償流として駆動されることが考えられる。この様にして形成される表層と底層の一对の縦渦は密度噴流の流動・拡がりに大きな影響を及ぼす。

ここで、遷移領域において縦渦が密度噴流の挙動に与える効果を具体的に考える。同領域において推察される縦渦の様子を図-8に示す。同図に示すように、底層の縦渦によって駆動された表層の一对の縦渦は、密度噴流の一時的沈み込みに伴う表層の拡がり幅の縮小によって、スケールが小さくなるとともに渦度が強くなる。その結果、表層の縦渦によって流軸上付近に生じる、誘導速度による上昇流が強化され、密度噴流を再浮上・再付着させる一因になりうると考えられる(一方、下層では一对の縦渦によって、既述の重力(負の浮力)による下降流に加えて誘導速度による下降流が生じる。図-8参照)。

実際には、コアンダ効果と渦の誘導速度の相乗効果によって密度噴流の再浮上・再付着現象が生ずるものと考えられる。なお、この再浮上・再付着時に流軸上に生ずる強い上昇流が密度流領域における表層の大きな拡がりをもたらすことになる。また、このとき表層水が中間層から流量の補給を受けることや重力による中間層水の下降などの原因により、中間層は急激に厚くなるとともに幅が小さくなる。

6. まとめ

本研究は、負の浮力を持って斜面上に表層放出される三次元密度噴流の流動メカニズムを実験的に検討したものである。検討の結果、密度噴流は流下に伴って表層流と底層流に分岐し、弱いくびれを持つ中間層が形成されること、また、下流側では表層流が一時的に沈み込んだ後に再浮上・再付着することなど、三次元現象に特有の複雑な挙動が明らかになった。

なお、表層流の一時的沈み込み後の再浮上・再付着は、コアンダ効果と渦の誘導速度の相乗効果によってもたらされることが考えられるが、両者の寄与の度合いや定量的評価については今後に残された検討課題である。

謝辞

本研究の途中でカールスルーエ大学 Jirka 教授より、同教授自身が斜面上に放出した三次元均質噴流において、横断面形状のくびれ現象を観察したことがあるとの指摘を受けた。彼はくびれ現象の原因は横断面内に形成される二次流ではないかと考えているとのことであった。本研究において観察された2

種類のくびれ現象も、横断面内に形成される二次流に起因している可能性は否定しきれず、これについては今後の検討課題としたい。

参考文献

- 1) Turner, J. S. : Buoyancy effects in fluids, Cambridge Univ. Press, pp.178-186, 1973.
- 2) 福岡捷二, 福岡祐介, 中村健一 : 2次元貯水池密度流の潜り込み水深と界面形状, 土木学会論文報告集, 第302号, pp.55-65, 1980.
- 3) Akiyama, J. and Stefan, H. G. : Plunging flow into a reservoir : Theory, J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol.110, No.4, pp.484-499, 1984.
- 4) Johnson, T. R., Farrell, G. J., Ellis, C. R. and Stefan, H. G. : Negatively buoyant flow in a diverging channel. I : Flow regimes, J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol.113, No.6, pp.716-730, 1987.
- 5) Stefan, H. G. and Johnson, T. R. : Negatively buoyant flow in a diverging channel. III : Onset of underflow, J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol.115, No.4, pp.423-436, 1989.
- 6) 福岡祐介 : 乱流モデルによる傾斜壁面密度噴流の解析, 土木学会論文集, 第399号(II-10), pp.65-74, 1988.
- 7) 石川忠晴, 長尾正之, 長島伸介 : 小川原湖に発生する傾斜ブルームの連行係数に関する考察, 水工学論文集, 第40巻, pp.595-600, 1996.
- 8) 有田正光, 塚原千明 : 貯水池密度流の潜り点の水理条件に関する実験的研究, ながれ, 第15巻, 第5号, pp.409-416, 1996.
- 9) Lee, H. Y. and Yu, W. S. : Experimental study of reservoir turbidity current : J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol.123, No.6, pp.520-528, 1997.
- 10) Hauenstein, W. and Dracos, T. : Investigation of plunging density currents generated by inflows in lakes, J. Hydr. Res., Vol.22, No.3, pp.157-179, 1984.
- 11) Tsihrintzis, V. A. and Alavian, V. : Spreading of three-dimensional inclined gravity plumes, J. Hydr. Res., Vol.34, No.5, pp.695-710, 1996.
- 12) Fleenor, W. E. and Schladow, S. G. : Mixing in the plunge zone of lake inflows, Proc. 5th Int. Sym. on Stratified Flows, pp.307-312, 2000.
- 13) 有田正光, 中井正則, 渡辺 徹, 梅基 淳 : 負の浮力を持って斜面上に表層放出される三次元密度噴流に関する実験, 水工学論文集, 第42巻, pp.535-540, 1998.
- 14) Arita, M., Nakai, M. and Umemoto, J. : Flow and spreading of three-dimensional negatively buoyant surface jets discharged on a sloping bottom, Proc. 5th Int. Sym. on Stratified Flows, pp.1099-1104, 2000.

(2001. 10. 1受付)