

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

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THREE-DIMENSIONAL NEGATIVELY
BUOYANT SURFACE JETS DISCHARGED ON A SLOPPING BOTTOM

有田正光¹・中井正則²・渡辺 徹³・梅基 淳⁴

Masamitsu ARITA, Masanori NAKAI, Toru WATANABE and Jun UMEMOTO

¹正会員 工博 東京電機大学教授 理工学部建設工学科(〒350-02 埼玉県比企郡鳩山町)

²正会員 工博 東京電機大学助手 理工学部建設工学科(〒350-02 埼玉県比企郡鳩山町)

³学生員 東京電機大学大学院 建設工学専攻(〒350-02 埼玉県比企郡鳩山町)

⁴東京電機大学学生 理工学部建設工学科(〒350-02 埼玉県比企郡鳩山町)

Behavior of three-dimensional negatively buoyant surface jets discharged on a slopping bottom was experimentally investigated by flow visualization, velocity and temperature measurement. Spreading, plunging conditions, streamwise variations of velocity and density excess were made clear from the experimental results conducted under variable conditions of densimetric Froude number (F_0) and a bottom slope (S). Two different spreading, namely jet-like spreading and buoyant spreading occur, and their relative strength which depends strongly both on F_0 and S governs flow behavior.

Key Words : *Three-dimensional dense jets, plunging, jet-like spreading, buoyant spreading, inclined plumes*

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の工学的応用例としては、洪水時における河川濁水の貯水池への流入や LNG タンクから海域への冷排水の放流などの問題がある。貯水池密度流の挙動を知ることは貯水池の管理、河川環境の保全上必要である。また、LNG タンクからの冷排水の挙動を知ることは環境問題のみならず、生態系保全の観点からも必要である。このように、本問題は工学、環境学および生態学の観点から重要な問題であると考えられる。

二次元現象を対象にして、密度噴流の潜り点の条件について多くの研究が実施されてきた。福岡・福岡・中村¹⁾は Benjamin の cavity flow の理論を応用して潜り点の水理条件を求めた。Akiyama and Stefan²⁾は潜り点水深は放出密度フルード数、初期混合率、貯水池の底面勾配、総抵抗係数(=底面抵抗係数+界面抵抗係数)で表現できるとしている。

また、有田・塚原³⁾は潜り点近傍の流動形態が放出密度フルード数と斜面勾配によって変化し、それにより潜り点の水理条件が大きく変化すると考え、理論的・実験的検討を行っている。一方、二次元の場合の潜り点下流の底層傾斜密度流の挙動についても、実験・理論・数値解析・現場観測の観点から多くの検討がなされてきている⁴⁾⁶⁾。

以上の一連の研究によって二次元の場合の現象については、かなり明らかになってきていると考えられる。一方、三次元の場合については Hauenstein and Dracos⁷⁾, Tsihrintzis and Alavian⁸⁾の研究が挙げられる程度であり、現象の全体像およびその物理機構が十分に明らかになっているとは言い難い。また、理論構築のための基礎データはほとんど提供されていない。

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を実験的に取り扱い、その流動機構を明らかにするとともに、高精度の予測モデルの構築に必要な基礎データを提供しようとするもので

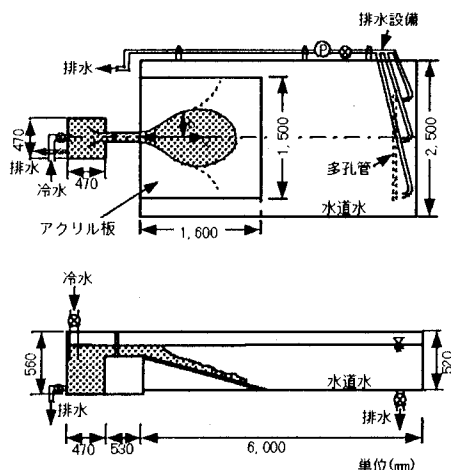


図-1 実験装置

ある。

2. 実験装置・実験方法と考える流れの場

実験には約6.0m×2.5m×0.6mの平面水槽を用いた(図-1参照)。水槽の上流側には底面を模擬するための160cm×150cmのアクリル板を設置した(任意の斜面勾配が設定可能である)。また、計温・計量された冷水を放流するための直線水路(幅5cm)がアクリル板の上流端に接続されている(放出水と周囲水との密度差は水温によってつけている)。放出口は鉛直方向に1cm毎に仕切られ、各層から染料水を放出することによって上層、中間層、下層のそれぞれの流況が可視化できるように設計されている。なお、実験中の水槽内水深を一定にするために水槽の下流端に排水装置(多孔管)を設置した。

実験においては、染料による流況の可視化を行うとともに、プロペラ流速計による流速測定およびサーミスタ型水温計による水温測定を実施した。表-1に今回実施した実験ケースの一覧を示す。同表に示すように斜面勾配 S は $S=1/10$, $1/40$ の2通り、放出密度フルード数 F_0 は $F_0=2.0\sim 8.0$ 程度とした。また、放出口水深 H_0 は $H_0=4.0\text{cm}$ (全ケースを通じて一定)とした。

図-2は考える流れの場の模式図と座標系を示している。同図に示すように負の浮力を持った密度噴流が放出密度フルード数 F_0 で斜面勾配 S の斜面上に放出される。ここに、 F_0 は $F_0=U_0/\{(\Delta\rho_0/\rho_a)gH_0\}^{1/2}$ であり、また、 U_0 は放出流速、 $\Delta\rho_0=\rho_0-\rho_a$ 、 ρ_a は周囲水の密度、 ρ_0 は放出水の密度、 H_0 は放出口水深、 g は重力の加速度である。また、放出された密度噴流は距離 L_p の位置で潜り込み、斜面上を傾斜密度流として流れる。

表-1 実験ケース一覧

実験項目	Run	底面勾配 S	流量 $Q(\text{g/s})$	周囲水温 $T_a(^{\circ}\text{C})$	放出水温 $T_0(^{\circ}\text{C})$	放出密度フルード数 F_0
流況の可視化	1	1/10	0.10	25.7	22.3	2.8
	2	1/10	0.20	25.6	22.0	5.4
	3	1/10	0.25	25.7	22.0	6.6
	4	1/40	0.10	25.7	22.1	2.7
	5	1/40	0.20	25.6	22.2	5.5
	6	1/40	0.25	25.7	21.9	6.5
水温の測定	7	1/10	0.10	25.0	22.0	2.9
	8	1/10	0.20	25.0	22.0	5.9
	9	1/40	0.10	25.8	22.0	2.6
	10	1/40	0.20	25.7	22.0	5.3
	11	1/10	0.20	26.8	22.0	4.6
	12	1/40	0.20	26.6	22.0	4.7
流速の測定	13	1/10	0.15	25.8	22.0	3.9
	14	1/10	0.25	25.8	22.0	6.5
	15	1/40	0.15	25.1	22.0	4.4
	16	1/40	0.25	25.0	22.0	7.4

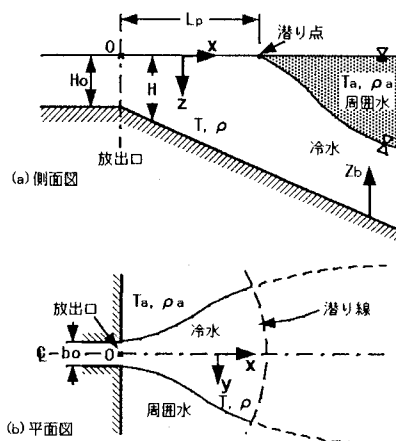


図-2 考える流れの場の模式図

3. 実験結果と考察

本章においては、1)流況の全体像、2)放出口ー潜り点近傍の流況、ならびに3)潜り点下流(傾斜密度流)の流況に分けて、実験結果とその考察を示す。

(1) 流況の全体像(概要)

写真-1に一例としてRun4($F_0=2.7$, $S=1/40$)における密度噴流の平面的拡がりを示す。なお、(a)、(b)はそれぞれ水表面近傍(表層)の拡がり、および斜面近傍(底層)の拡がりを示している。同写真より、表層では噴流的な拡がりを、底層では水平方向への拡がり特徴的な密度流的拡がりを示していることが認められる。これは、 F_0 が小さいために、底層において密度流効果が効いているからである。

上記のケース以外にも同様の可視化実験を多数行い、一般的な密度噴流の拡がりの様子が図-3のように得られた。図-3(a)は水平面内の流況を、図-3(b)

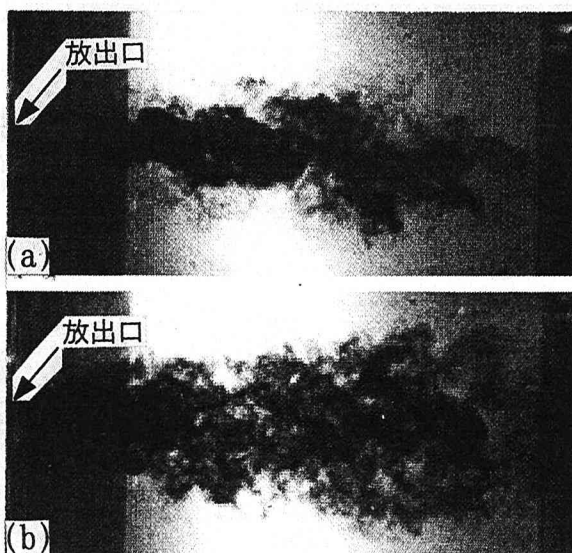


写真-1 密度噴流の平面的拡がり
(Run4: $F_o=2.7$, $S=1/40$)

は横断面内の流況を示している。以下に、流況の概略を簡条書きにして示す。

(a) 放出直後(断面①)は噴流としての特性が強く、密度流としての特性は現れない。従って、平面的には噴流として拡がり、また、横断面内においては表層から底面まで矩形の形状となっている。

(b) 放出口より若干流下すると(断面②)、表層近傍では依然として噴流的拡がりを示すが、底面近傍では密度流的な水平方向の拡がりが見れる。

(c) 放出口より離れて潜り点に近づくと(断面③)、噴流としての特性が弱くなり、密度流としての水平方向の拡がりが増大になる。

(d) 潜り点を超えると(断面④)、流れは表層から剥離し、傾斜密度流へと移行していく。

(e) 放出口より十分離れると(断面⑤)、噴流的特性を完全に失い、流れは傾斜密度流となる。

以上のように、密度噴流は大まかには表層近傍の噴流的部分と底層近傍の密度流的部分から構成されており、放出口近傍では前者の特性が、放出口より離れると後者の特性が強くなる。また、この両特性の相対的強さは F_o および S により大きく支配されるが、これについては以下の実験結果と併せて議論していく。ちなみに、両特性の F_o および S への依存性は正の浮力を持って斜面上へ放出される密度噴流の場合についても観察されている⁹⁾。

図-4は放出口から潜り点までの無次元距離 $L_{p*}=L_p/H_o$ に関する実験結果を示している。図中には有田・塚原³⁾の二次元の場合の結果も併せて示した。同図のように二次元の場合は F_o が大きいほど L_{p*} は大きくなる。また、 S が小さい方が L_{p*} が大きいこと

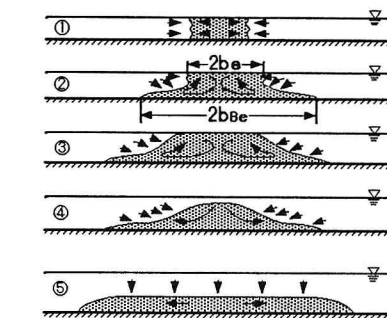
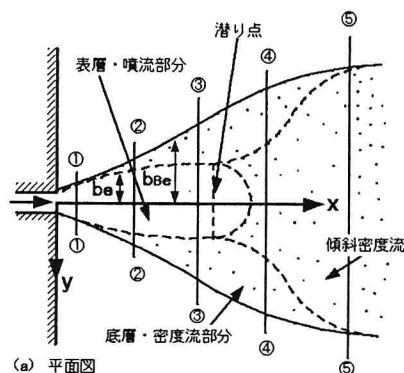


図-3 流況の模式図

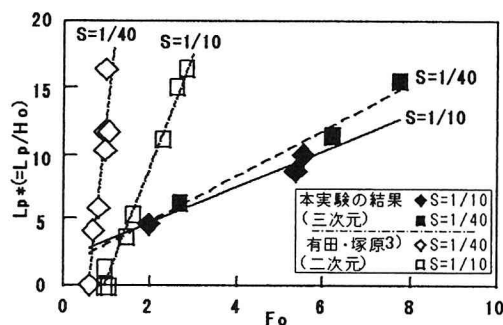


図-4 無次元潜り点距離 L_{p*}

が認められる。これは F_o が大きいほど、また S が小さいほど噴流的特性が卓越するためである。三次元の場合も二次元の場合と同様に F_o が大きいほど L_{p*} は大きくなるが、 S による変化は顕著でない。これは三次元の場合には S が小さく噴流的特性が強くなると、より強い水平連行を伴うためである。

(2) 放出口ー潜り点近傍の流況

図-5はRun9 ($F_o=2.6$, $S=1/40$) の無次元軸上偏差温度 $\Delta T/\Delta T_o$ ($y=0\text{cm}$) の鉛直分布を示している。ここで、ある点の偏差温度 ΔT は $\Delta T=T_a-T$ (T_a :周囲水温, T :その点の水温) で定義されており、 ΔT_o は放出口での偏差温度である。また、縦軸は鉛直距離 z をそこでの水深 H で無次元化したものである。同図より潜り点までの偏差温度の鉛直分布は水深方向にほぼ一様であることが認められる。ここでは紙面の都合で割愛するが、その他のケースにおいても放出

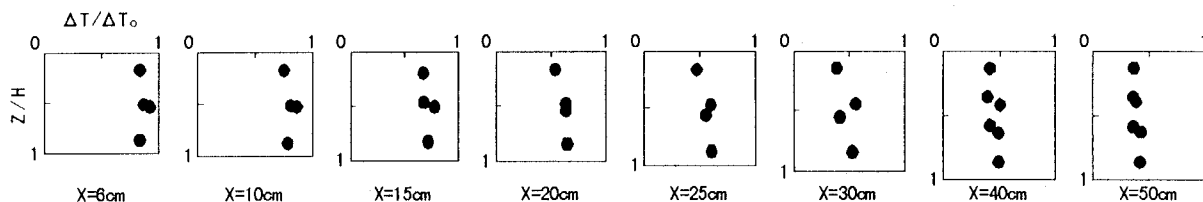
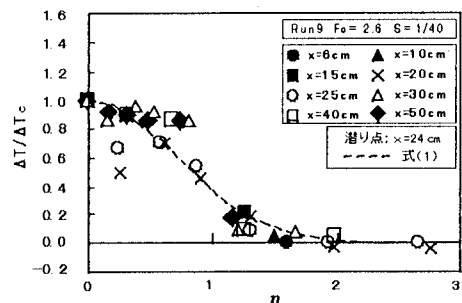
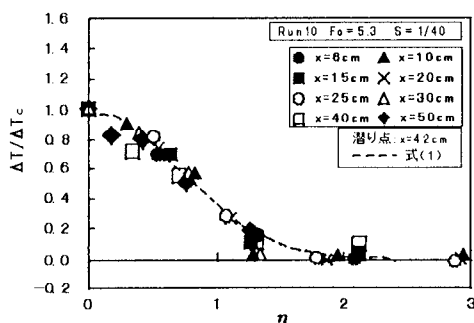


図-5 無次元軸上偏差温度 $\Delta T/\Delta T_0$ の鉛直分布 (Run9: $F_0=2.6$, $S=1/40$, 潜り点 $x=24\text{cm}$)



(a) Run9 ($F_0=2.6$, $S=1/40$)



(b) Run10 ($F_0=5.3$, $S=1/40$)

図-6 表層における無次元偏差温度 $\Delta T/\Delta T_c$ の横断方向分布

ロ-潜り点近傍における偏差温度の鉛直分布はほぼ一様になっていた。また、その傾向は S が小さいほど強いものであった。

図-6はRun9, 10の表層 ($z=0.7\text{cm}$) における無次元偏差温度 $\Delta T/\Delta T_c$ の横断方向分布を示している。 ΔT_c は表層 ($z=0.7\text{cm}$) における中心軸上 ($y=0\text{cm}$) の偏差温度であり、横軸 η は y を中心軸 ($y=0\text{cm}$) から $\Delta T/\Delta T_c=1/e$ (e は自然対数の底) となる位置までの距離 b で除したものである。なお、図中には次式で表されるガウス分布も挿入してある。

$$\Delta T/\Delta T_c = \exp(-\eta^2), \quad \eta = y/b \quad (1)$$

Run9(図-6(a)) では、放出口-潜り点 ($x=24\text{cm}$) において $\Delta T/\Delta T_c$ の分布が式(1)にあまり適合していない。一方、Run10(図-6(b)) では、放出口-潜り点 ($x=42\text{cm}$) のみならず、潜り点を越えた位置 ($x=50\text{cm}$) においても多少のばらつきはあるものの、 $\Delta T/\Delta T_c$ の分布が式(1)に比較的良好に一致している。両結果よ

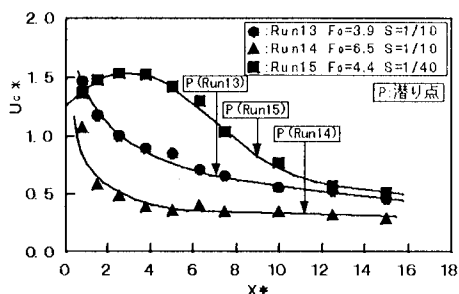


図-7 表層における無次元軸上流速 U_{c*} の流下方向変化

り、放出口-潜り点の $\Delta T/\Delta T_c$ の横断分布は、 F_0 が大きい場合には噴流的特性が強いために概ね式(1)で表現できる(自己相似性が成立する)が、 F_0 が小さくなると密度流的特性が強くなり式(1)からずれていくと言える。

図-7にプロペラ流速計で測定した表層 ($z=0.7\text{cm}$) における無次元軸上流速 $U_{c*}=U_c/U_0$ の流下方向変化 (Run13, 14, 15) を示す。ただし、 U_c , U_0 はそれぞれ表層軸上流速、放出流速であり、横軸の x^* は $x^*=x/H_0$ である。また、図-4の回歸直線より求めた各実験ケースの潜り点位置を図中に矢印で示している。同図の3ケースの比較より、潜り点上流では F_0 が大きいほど U_{c*} の低減率が大きくなることがわかる。これは流れが噴流的特性を持ち、強い水平連行を伴うためである。また、3ケースともに放出直後に $U_{c*}=1.0\sim 1.5$ という放出流速 U_0 より大幅に大きな値をとっていること、しかもこの現象は F_0 および S が小さい方が出現しやすいことが認められる。これと同様な放出口近傍における加速現象は正の浮力を持って半無限水深の水域に放出される密度噴流の場合についても報告されている。しかし、本実験における加速現象は極めて強いものであり、これは底面の効果に起因していると考えられる。その物理的メカニズムについては今後の詳細な検討が待たれる。

図-8は表層 ($z=0.7\text{cm}$) における無次元軸上偏差温度 $\Delta T_c^*=\Delta T_c/\Delta T_0$ の流下方向変化 (Run8, 9, 10) を示している。なお、各実験ケースの潜り点の位置を図中に矢印で示している。同図より S が小さい場合 ($S=$

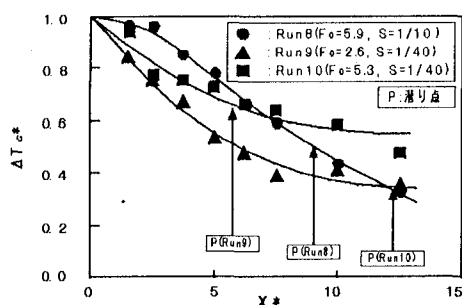


図-8 表層における無次元軸上偏差温度 ΔT_c^* の流下方向変化

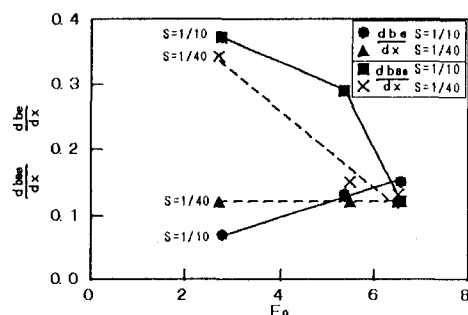


図-9 表層および底層における密度噴流の拡がり率

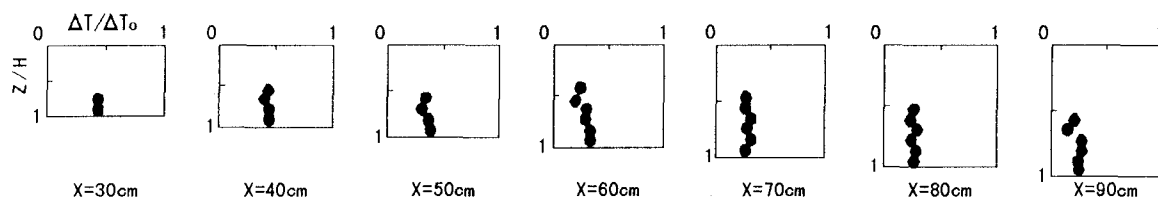


図-10 無次元軸上偏差温度 $\Delta T/\Delta T_0$ の鉛直分布(Run11: $F_0=4.6$, $S=1/10$, 潜り点 $x=33\text{cm}$)

1/40)には ΔT_c^* は F_0 の影響をあまり受けないことがわかる。これは S が小さいと F_0 によらず噴流の特性が卓越するためである。一方、Run8, 10の比較より、 F_0 がほぼ一定の場合には S が小さい方が ΔT_c^* の低減が強いことが認められる。これは S が小さいほど噴流の特性が強くなり、強い水平連行を伴うことを意味している。

図-9は染料により可視化された表層および底層における密度噴流外縁の拡がり率 db_e/dx , db_b/dx (b_e , b_b はそれぞれ表層および底層の拡がり半幅; 図-3参照)を示している。なお、 db_e/dx は放出口-潜り点における平均値を、また db_b/dx は潜り点のすぐ手前における値を示している(db_e/dx は、放出口-潜り点においてほぼ一定値であった)。同図より F_0 の増大にともなって表層の拡がり率 db_e/dx は増加し、底層の拡がり率 db_b/dx は減少することがわかる。これは F_0 が大きい場合に噴流の特性が表れるためである。また、 F_0 が大きい場合には、 db_e/dx と db_b/dx は同じ程度であるのに対して、 F_0 が小さい場合には密度流的特性によって db_b/dx が db_e/dx に比較して大幅に大きくなっている。この前者の結果は図-3の断面①の状態に、後者の結果は断面②、③の状態にそれぞれ対応している。さらに、 F_0 が一定の場合には S が大きい方が db_e/dx は小さく、 db_b/dx は大きいことが認められる。これは S が大きい方が密度流効果が強いことを示唆している。

(3) 潜り点下流(傾斜密度流)の流況

図-10は中・下層($z_b \leq 12.5\text{cm}$)における無次元軸

上偏差温度 $\Delta T/\Delta T_0$ の鉛直分布(Run11)である。偏差温度 ΔT は放出口での偏差温度 ΔT_0 で、鉛直距離 z はそこでの水深 H でそれぞれ無次元化されている。同図には $x=90\text{cm}$ までの実験値が示されているが、 $x=90\text{cm}$ においても $\Delta T/\Delta T_0$ の鉛直分布は一定状態に達していない。また、底面からかなり離れた位置においても偏差温度 ΔT は0になっていない。他の実験ケースにおいても同様の結果を得ている。このことより、 $x=90\text{cm}$ では傾斜密度流は十分に発達しておらず、傾斜密度流が確立するためには潜り込み後に相当長い流下距離が必要と考えられる。

図-11はRun11, 12の底層($z_b=0.5\text{cm}$)における無次元偏差温度 $\Delta T/\Delta T_{bc}$ の横断方向分布を示している。 ΔT_{bc} は底層($z_b=0.5\text{cm}$)における軸上偏差温度であり、 η_b は y を中心軸($y=0$)から $\Delta T/\Delta T_{bc}=1/e$ となる位置までの距離 b_b で除したものである。また、図中には次式で表されるガウス分布も挿入してある。

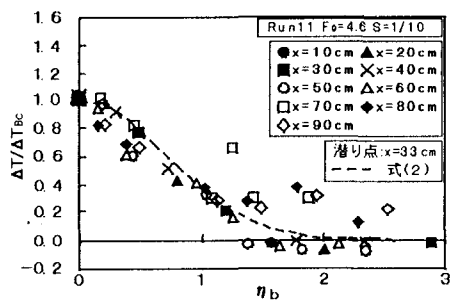
$$\Delta T/\Delta T_{bc} = \exp(-\eta_b^2), \quad \eta_b = y/b_b \quad (2)$$

なお、両実験ケースは F_0 がほぼ同じであり、 S のみが異なっている。同図より、両ケースともに(S にかかわらず)潜り点上流を含めて全領域で $\Delta T/\Delta T_{bc}$ の分布が式(2)によく一致していることが認められる。

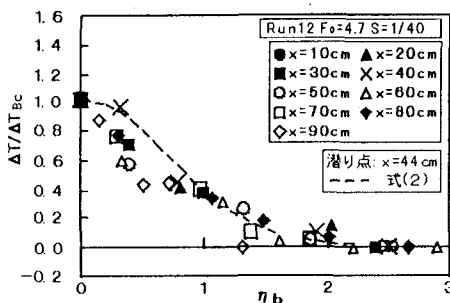
4. おわりに

本研究により得られた知見を以下に列挙する。

(1) 負の浮力を持って斜面上に表層放出される密度噴流は噴流的特性と密度流的特性を合わせ持っている。一般に放出口近傍では噴流的特性が、放出口よ



(a) Run11 ($F_o=4.6, S=1/10$)



(b) Run12 ($F_o=4.7, S=1/40$)

図-11 底層における無次元偏差温度 $\Delta T/\Delta T_{bc}$ の横断方向分布

り離れると密度流の特性が卓越する。さらに、 F_o が大きいほど、また S が小さいほど噴流的特性が強くなる。

(2) 噴流的特性が卓越する場合、二次元流では潜り点の位置 L_p が S が小さいほど放出口から離れるが、三次元流では水平連行を伴うために S の効果は小さく、潜り点の位置は S の影響をあまり受けない。

(3) 一方、密度流の特性が卓越する場合は水平方向の拡がりが大きくなる。また、放出口から潜り点までの距離 L_p は極めて短くなる。

(4) 表層および底層における偏差温度 $\Delta T/\Delta T_c$ 、 $\Delta T/\Delta T_{bc}$ の横断分布はガウス分布と良く一致する。ただし、 F_o が小さい場合には密度流の特性が強くなるので、表層の分布($\Delta T/\Delta T_c$)はガウス分布からずれる。

(5) F_o が小さく、また S が小さい場合には放出口近傍において著しい加速現象が観察される。類似の加速現象は正の浮力を持って半無限水深の水域に表層放出される密度噴流においても出現するが、本実験で観察した加速現象はこれよりはるかに強いものである。これは底面の効果に起因していると考えられる。

が、詳細なメカニズムについては今後の課題である。
(6) 表層および底層の拡がり率 db_e/dx 、 db_{be}/dx の結果より、密度噴流が噴流的特性と密度流の特性の両方を合わせ持つという概念の妥当性が補強された。

本論文は負の浮力を持って斜面上に放出される密度噴流の問題を実験的に取り扱ったものである。1. で示したように三次元の場合については従来ほとんど研究がなされておらず、流れの物理機構は十分に明らかになっていない。本実験はさらに追加検討すべき点があるものの、予測モデル構築のための貴重な基礎データを提供し得たと考えている。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 福嶋祐介, 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.
- 2) Akiyama, J. and Stefan, H. G.: Plunging flow into a reservoir: Theory, J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol. 110, No. 4, pp. 484-499, 1984.
- 3) 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.
- 4) 秋山壽一郎, 浦勝, 斉藤俊一郎, 富岡直人: 傾斜重力密度流の連行係数に関する統一的考察, ながれ, 第16巻, 第2号, 149-161, 1997.
- 5) 福嶋祐介: 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, No. 399/II-10, pp. 65-74, 1988.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) Tsihrintzis, V. A. and Alavian, V.: Spreading of three-dimensional inclined gravity plumes, J. Hydr. Res., Vol. 34, No. 5, pp. 695-710, 1996.
- 9) 有田正光, 廣沢佑喃: 斜面上での表層放出平面密度噴流の拡がりに関する実験的検討, 土木学会第47回年次学術講演会概要集第II部, 1992.

(1997. 9. 30受付)