

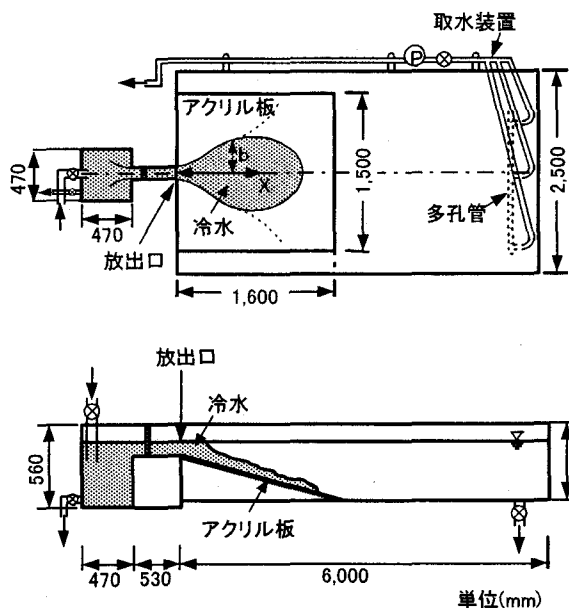


図-2 実験装置

れた後、放出口から距離 L_p だけ流下した地点で水面下に潜り込み、最終的には斜面上を傾斜密度流として流動する問題を考える。ここに、 Fo は $Fo = U_o / \{(\Delta \rho_o / \rho_a) g H_o\}^{1/2}$ で定義される放出密度フルード数、 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、図-2に示すような $6.0\text{m} \times 2.5\text{m} \times 0.52\text{m}$ (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 $b_o = 5\text{cm}$ の開水路、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し、負の浮力を持つ三次元表層放出密度噴流を再現した。なお、実験中の平面水槽内の水深は水槽の下流端に設置した取水装置(多孔管方式)を作動させることにより、ほぼ一定に保たれている。実験条件は $S = 1/4 \sim 1/\infty$ 、放出流量 $Q = 0.05 \sim 0.30 \text{ l/s}$ 、放出温度差 $\Delta T_o = 4.0 \sim 6.0^\circ\text{C}$ 程度、 $Fo = 1.5 \sim 10$ 程度とし、また、 H_o は全ケースを通じて 4.0cm に固定した(H_o は前述の水槽内水深の制御に伴って、全実験時間にわたってほぼ一定値に保たれている)。

なお、後章で引用する過去に実施した(鉛直)二次元の実験では、長さ: 150cm 、高さ: 20cm 、幅: 5cm の水槽が使用された。実験では、水路上流端に設置した放出口(水深: $1.4 \sim 8.6\text{cm}$)より濃度 0.3% の塩水が淡水中に表層放出され、負の浮力を持つ二次元表層放出密度噴流が再現された。なお、実験装置・要領の詳細については文献 5)を参照されたい。

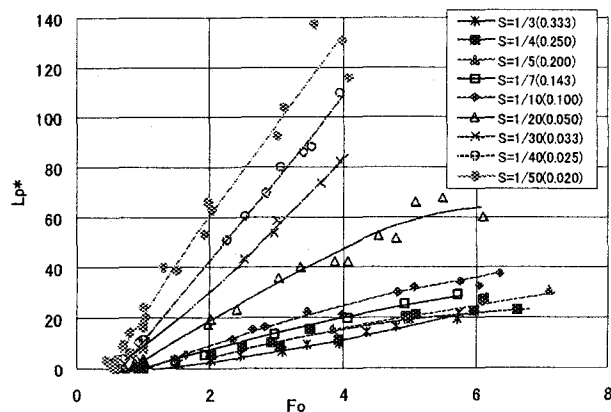


図-3 S をパラメータとした L_p^* と Fo の関係 (二次元)

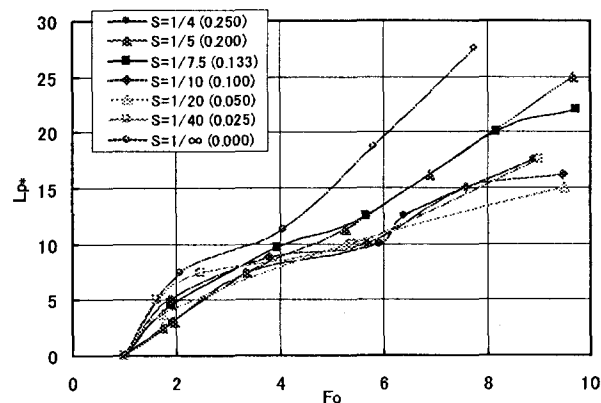


図-4 S をパラメータとした L_p^* と Fo の関係 (三次元)

3. 実験結果と考察

本章では、潜り点位置と流動形態分類について過去に実施した二次元の結果と比較し、三次元現象の特徴について考察する。

(1) 潜り点位置

図-3は二次元の場合について、無次元化された潜り点距離(放出口から潜り点までの長さ) L_p^* ($= L_p/H_o$) (図-1参照) と Fo との関係を S をパラメータにして示したものである⁵⁾。同図に示すように、 L_p^* の値は Fo の増大とともに大きくなるが、これは Fo が大きいほど密度流効果が小さくなる(噴流的特性が強くなる)ためである。また、 L_p^* の値は S が小さくなるにつれて大きくなることが分かる。これは、 S が小さいほど鉛直方向の流動空間が狭くなるので、流下に伴う流れの慣性力の低下の程度が弱くなり、噴流的特性が強くなるためである。

図-4は三次元の場合について、 L_p^* と Fo の関係を S をパラメータにして示したものである。同図より、 L_p^* の値は二次元の場合に比較して大幅に小

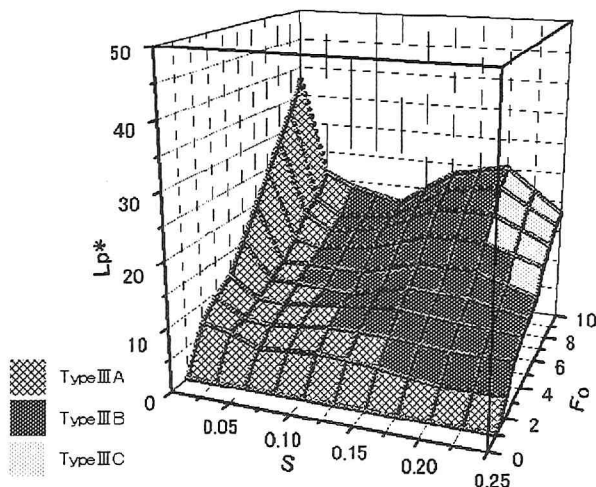


図-5 Fo - S - Lp^* の関係の三次元表示 (三次元)

さくなっていることが分かる。これは、三次元の場合には、負の密度流効果によって密度噴流が横断方向へ広がるために、流れの慣性力が放出口から短い距離で弱くなり、潜り込み易くなるためである。また、 Lp^* の値は Fo が増大するにつれて大きくなっているが、これは二次元の場合と同様に Fo の増大に伴って噴流的特性が強くなるためである。

一方、 Lp^* と S との関係について見れば、 Lp^* の値は S の増大に対して単調に減少しておらず、複雑な挙動を示していることが分かる。図-5は Lp^* の Fo と S による変化をより詳細に明らかにするために、 Lp^* の値を Fo - S 平面上で三次元的に描いたものである。同図より、 Lp^* の値は $Fo \leq 4$ 程度では S の増大に伴ってほぼ単調に減少するのに対し、 $Fo \geq 4$ 程度では S の増大に伴って一旦減少した後に増大し、 $S=0.175 \sim 0.200$ 付近でピークをとった後に再び減少する。本章では、このような Lp^* の Fo - S 平面上での複雑な挙動の原因は Fo と S の値に応じて密度噴流の流動形態が変化するためであると考え、以下で考察する。そのために、まず、著者等の過去の研究⁵⁾によって得られている二次元の場合の流動形態について整理する。

(2) 二次元密度噴流の流動形態分類

著者等の研究⁵⁾によれば、鉛直二次元の場合の流動形態は4種のタイプに分類できる(写真-1参照)。以下に、それぞれのタイプの特徴と出現条件の概略について説明する。なお、二次元の流動形態分類に当たっては、Jirka and Arita¹³⁾が提案した密度流先端部に対する接近流の流速分布によって、流動形態が密度楔もしくは密度カレントのどちらかをとるという概念を使用している。なお、両流動形態の流れのメカニズムは互いに大きく異なっている(詳細については文献 13), 14)を参照されたい)。

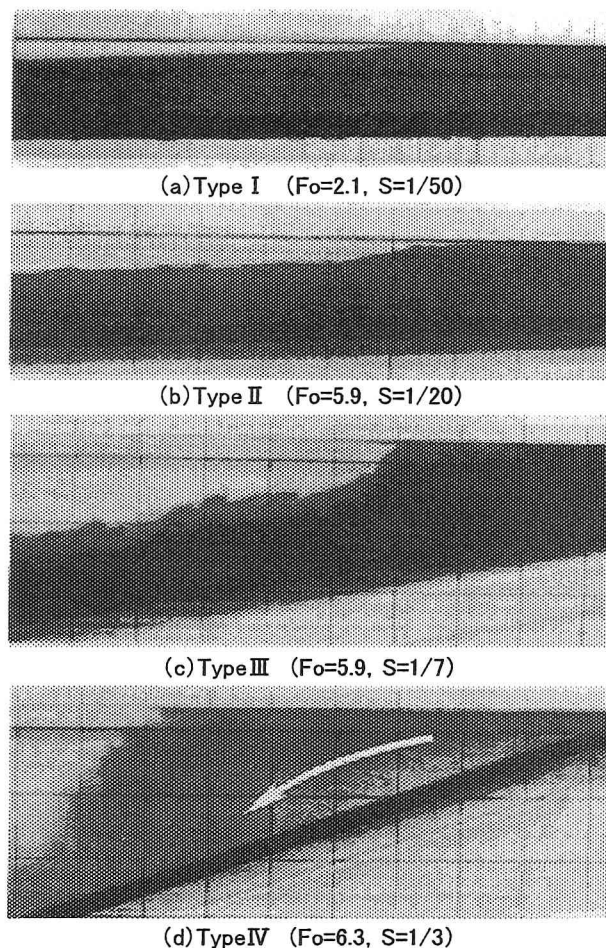


写真-1 各種流動形態の可視化写真 (二次元)

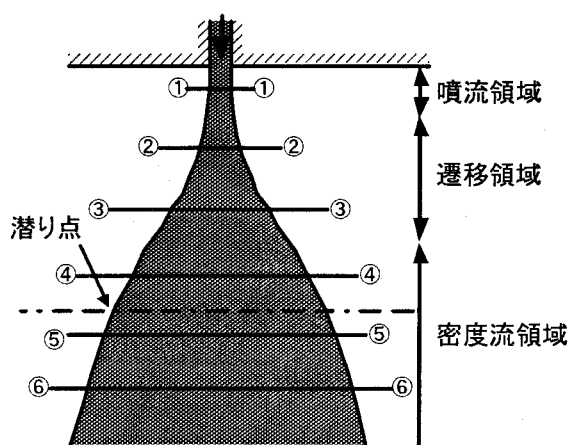
① Type I : 流況は極めて静穏であり、上下層の混合はほとんど生じない。また、潜り点近傍の密度界面形状は密度楔のそれとなる(周囲水が密度楔として潜り点に向かって侵入する)。このタイプは S および Fo が極めて小さい場合に出現し易い(写真-1(a)参照)。

② Type II : 周囲水の密度楔部分が短く、その下流に密度カレントが接続しているタイプである。このタイプは Fo および S が Type I より大きい場合に出現し易い(写真-1(b)参照)。

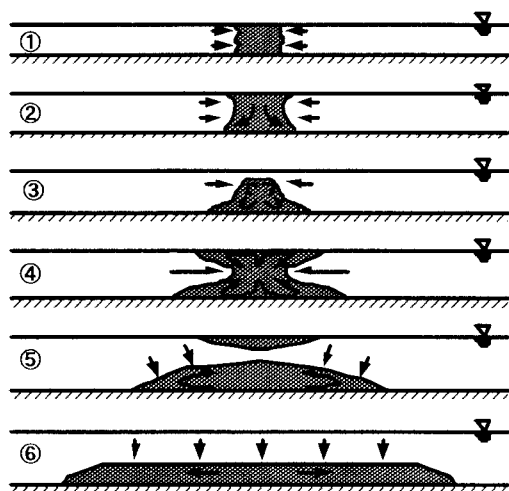
③ Type III : 上下層の強い混合を伴いながら、周囲水が密度カレントとして侵入するタイプである。このタイプでは、潜り点の密度フルード数 Fp が $Fp \sim 0.5$ となり、 Fo もしくは S が Type II より大きい場合に出現し易い(写真-1(c)参照)。

④ Type IV : 底面付近にコアンダ効果による低圧部が形成され、潜り点において密度噴流が急激に潜り込むタイプである。このタイプは Fo および S が Type III より大きい領域で出現する(写真-1(d)参照)。

このように、鉛直二次元の場合には Fo および S の値に応じて流動形態が大きく変化する。また、 S の値が一定程度以上であれば、 Fo の増大に伴って



(a) 平面図



(b) 横断面図

図-6 三次元密度噴流の流動・拡がりのメカニズム

流動形態が Type I → Type II → Type III → Type IV と変化する。なお、次項で述べる三次元の場合の流動形態分類においては、ここで示した二次元の結果を念頭に置いている。

(3) 三次元密度噴流の流動形態分類

三次元密度噴流の流動形態分類を実施するために、まず、流下に伴う流動・拡がりのメカニズムの変化について著者等の研究^{11)・12)}をもとに簡単に総括する。

図-6に示すように、三次元密度噴流は流下とともに、均質噴流的特性の強い噴流領域から遷移領域を経て密度流効果の卓越する密度流領域に至る。このとき、放出直後の噴流領域では横断面形状はほぼ矩形となり、密度流効果が小さいために均質噴流と類似の強い水平連行が生ずる。その下流の遷移領域では、流れの慣性力が徐々に弱まり、密度噴流の底層が重力の作用によって拡がり始めるとともに、表層の水表面下への一時的沈み込みが生じる。さらに下流の密度流領域に入ると、底層が負の密度流効果で横断方向へ大きく拡がるとともに、密度噴流の表層

の再浮上によって表層でも横断方向への拡がりが観察されるようになる。結果として、中間層に顕著なくびれが形成され、密度噴流は表層流と底層流に完全に分岐する。その後、密度噴流は潜り点に達し、表層流は中間層流とともに底層へ潜り込んでいく。

なお、この表層流が水表面下へわずかに沈み込んだ後に再浮上し、水表面へ再付着する現象は著者等によって初めて観察されたものである^{11)・12)}。著者等はこの再浮上・再付着現象について、①密度噴流がわずかに沈み込んだ状態で、密度噴流と水表面との間の狭い空間の圧力が連行現象によって低下すること（コアンダ効果）、②密度噴流の横断面内に形成される上下一対ずつの縦渦（図-6の断面③参照）のうち、表層付近に形成される一対の縦渦の誘導速度が上昇流を駆動すること、の2つが原因となると推察している。

ここで、三次元密度噴流の特徴をより明確にするために、二次元の場合との比較を行う。まず、二次元の場合は三次元の場合と異なり、水平方向の連行現象および密度流効果による横断方向への拡がりが生じない。つまり、放出された二次元密度噴流は縦断面内にはのみ拡がりながら、徐々に慣性力が低下し、やがて水表面下へ静穏に潜り込む。その結果、写真-1に示すように潜り込み現象は全体としてシンプルなものとなる（コアンダ効果や縦渦による再浮上・再付着現象などが生じない）。一方、三次元の場合には噴流領域において水平連行が生じ、強い希釈と乱れが発生する。また、流下に伴って流れの慣性力が低下するとともに密度流効果が強くなり、底層・表層における水平方向の拡がりや再浮上・再付着現象などが生じ、流況は複雑なものとなる（図-6参照）。

ところで、二次元の場合には潜り点近傍において、周囲水の水表面にゴミ等が滞留し易くなる。その結果、潜り点近傍における密度噴流の流速分布には表層近傍に欠損部が形成され、周囲流れの流動形態は密度楔となり易い。つまり、潜り込み現象としては前述の Type I が出現し易いと考えられる（図-7(a)参照、特に S が小さい湖沼の平水時には Type I が出現しやすい）。一方、三次元の場合には潜り点近傍における周囲水は横断方向にも流動しうるのでゴミ等が滞留しにくく、密度噴流の流速分布には欠損部が生じにくい。結果的に、潜り込み現象としては周囲流れが密度カレントとなる Type III が出現することが一般的と考えられる（図-7(b)参照）。また、三次元では二次元の場合に出現する4種のタイプのうち、潜り点近傍の流動形態が密度楔となる Type I, II のみならず、Type IV についても、水平方向の連行が許されるために低圧部が発生しにくくなり、ほとんど出現しないと考えられる。実際に、今回実

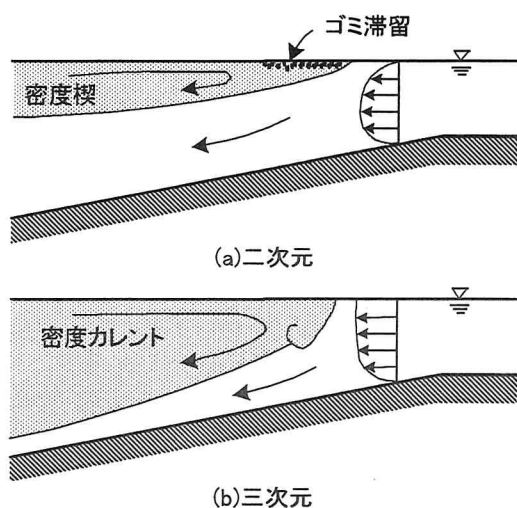


図-7 二次元と三次元の流動形態の違い

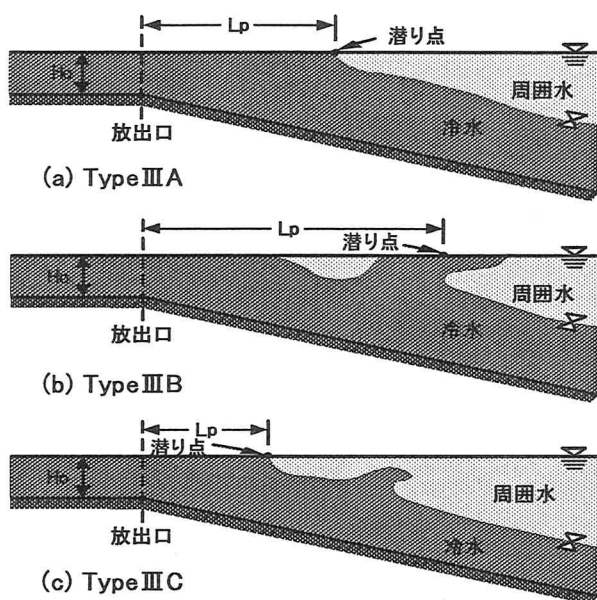


図-8 三次元の場合の流動形態分類
(流軸上縦断面内の流況)

施した実験においても観察された潜り込み現象は Type III のみであった。

三次元の場合の潜り点近傍の流動の特徴として、遷移領域から密度流領域にかけての再浮上・再付着現象が挙げられることを既述した。しかし、実験的観察によれば、この再浮上・再付着現象の強さは Fo と S によって異なり、このことが流況を大きく変化させていると考えられる。そこで、ここでは三次元密度噴流に表れる Type III の潜り現象を、その流況に応じて Type III A ~ III C の 3 種に分類することとした (図-8 参照)。また、図-5 中には流れの可視化結果 (写真-2 参照) より判断したそれぞれのタイプの Fo - S 平面上での出現領域を示している。以下に、それぞれのタイプの特徴について述べる。

① Type III A: 密度噴流は一定の距離流下した後に単純に潜り込む。つまり、このタイプでは再浮上・再付着現象は生じず、潜り点に至った密度噴流は

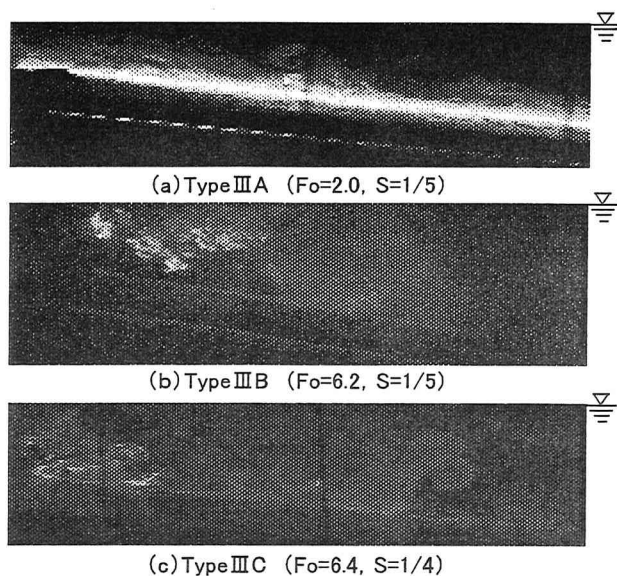


写真-2 各種流動形態の可視化写真
(三次元：流軸上縦断面内の流況)

水表面下に潜り込んだ後、そのまま底層密度流へと移行する。同タイプは Fo または S が小さい領域で出現する (図-5 参照)。

② Type III B: 密度噴流は一旦沈み込んだ後に再浮上し、水表面に再付着する。つまり、このタイプでは、三次元の場合に特徴的な再浮上・再付着現象が典型的に表れる。また、再浮上・再付着現象によって潜り点が下流に移動するので、Type III A に比較して Lp^* の値が大きくなることが特徴である。

③ Type III C: 密度噴流は一旦沈み込んだ後に再浮上するが、浮上力が小さく水表面への再付着には至らないタイプである。しかし、再浮上する密度噴流によって水表面下で間欠的なスケールの大きい内部波が発生し、下流の底層密度流に間欠的で強い攪乱がもたらされることが特徴である。このタイプは Fo , S がともに大きいときに出現する (図-5 参照)。

(4) 各種流動形態の出現領域に関する追加的考察

ここでは、以上の流動形態分類に基づいて実施した、図-5 中の出現領域分割について追加的に考察する。

まず、図-5 中で $Fo \leq 2$ または $S \leq 0.050$ の領域について考える。この領域では、密度噴流の再浮上・再付着が生じない Type III A が出現する。このタイプでは、 S の増大に伴って密度噴流の鉛直方向の流動空間が大きくなるので、 S が大きいほど流れの慣性力の低下が激しく、放出されてから短い距離で潜り込みを開始する。つまり、 S の増大に伴って Lp^* が単調に減少することになる ($S \leq 0.050$ の領域)。

また、このタイプは前述のように Fo または S が小さい領域で出現するが、両領域での状況は異なることに注意が必要である。 Fo が小さい場合には、

そもそも放出される密度噴流の負の密度流効果が強く、このことに起因して放出直後に潜り込む。一方、 S が小さい場合には、強い水平連行と乱れを伴いながら流下し、流れの慣性力が十分に低下した（密度流効果が強くなった）後に潜り込みに至る。ここでは、一旦潜り込みを開始するとそのまま単純に潜り込むことから、両者をともに Type IIIA に分類しているが、実際にはその流況は大きく異なる。つまり、 Fo が小さい場合の潜り込み現象は極めて静穏であるのに対して、 S が小さい場合は放出されてから潜り点に至るまで強い乱れを伴う。さらに、 S が小さい場合についての詳細な実験的観察によれば、放出された密度噴流が一種の脈動流として流動した後に潜り込みを開始すること、また、この脈動流は（鉛直方向に軸を持つ）大規模渦に伴う間欠的な水平連行の結果として生ずるものであることが分かった。

つぎに、図-5中で $Fo \geq 2$, $S \geq 0.050$ の領域について考える。同領域では Lp^* の値が S の増大に伴って増大し、ピークをとった後に再び減少している。このピークは密度噴流の再浮上・再付着現象に起因すると考えられる。つまり、図-5に示すように Lp^* が大きい $0.125 \leq S \leq 0.200$ の領域は Type IIIB の出現領域となる。さらに、 S が大きく、 $S \geq 0.200$ となる領域で Lp^* の値が減少するのは、 S の増大に伴って鉛直方向の流動空間が大きくなり、再浮上力が密度噴流を水表面に再付着させるには不十分となるためである。従って、出現する流動形態は Type IIIC となる。

要するに、 Fo が比較的大きいとき、 S の増大につれて鉛直方向の流動空間が大きくなり、流動形態は Type IIIA $\rightarrow$ Type IIIB $\rightarrow$ Type IIIC と変化し、 Lp^* の値は減少 $\rightarrow$ 増大 $\rightarrow$ 減少と変化する。なお、図-5中の各種流動形態の出現領域分割の境界線は概略のものであることに注意が必要である。

4. 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無次元潜り点距離 Lp^* と流動形態分類に関する実験的検討を取りまとめたものである。実験結果より、 Lp^* の値は二次元のケースより大幅に小さくなるとともに、 Fo - S 平面上で複雑に変化することを明らかにした。また、密度噴流の水表面への再浮上・再付着現象を念頭に置いて流動形態を 3 種に分類し、 Fo - S 平面上での出現領域を示した。さらに、 Lp^* の値の Fo - S 平面上での複雑な変化は Fo , S による流動形態の変化に起因することを指摘した。

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) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 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) 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.
- 10) 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.
- 11) 中井正則, 有田正光, 梅基 淳: 負の浮力をもって斜面上に表層放出される三次元密度噴流の流動・拡がり機構について, 可視化情報, 第20巻, 第78号, pp.47-53, 2000.
- 12) 中井正則, 有田正光, 田原定憲: 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, 水工学論文集, 第46巻, pp.1217-1222, 2002.
- 13) Jirka, G. H. and Arita, M.: Density currents and density wedges: boundary layer influence and control methods, J. Fluid Mech., Vol.177, pp.187-206, 1987.
- 14) 有田正光, 中井正則: 密度カレントの挙動に関する研究, 応用力学論文集, 土木学会, 第1巻, pp.665-672, 1998.

(2002. 9. 30受付)