

斜面上に表層放出される二次元密度噴流に関する研究

Study on Two-Dimensional Buoyant Surface Jet
Discharged on Sloping Bottom

有田 正光*・樺沢健一郎**・廣沢 佑嘯***

By Masamitsu Arita, Kenichiro Kabasawa and Yusuke Hirotsawa

The interactions between two-dimensional buoyant surface jet and bottom slope are studied experimentally. Experiments are conducted at various outlet densimetric Froude numbers and bottom slopes. Configuration of density interface caused by the interactions between bottom slope and buoyant surface jet are classified into five types and classification diagram is proposed. Ultimate densimetric Froude number of three types is found about 0.50~0.55. Generation of large scale internal waves are also reported.

Keywords: Buoyant Jet, Stratified Flow, Environmental Hydraulics

1. はじめに

表層放出密度噴流の具体例としては洪水時における河川水の海域への拡がりや発電所から放出される温排水の放流の問題などがあげられる。これらは斜面上へ表層放出される密度噴流であるにもかかわらず従来の研究の多くは理論もしくは実験技術上の観点から半無限水深水域への表層放出密度噴流の拡がりの問題として取り扱ってきた^{1)・2)・3)・4)}。一方、斜面上における表層放出密度噴流の拡がりや剥離点の条件について取り扱った研究としてSafaie⁴⁾の研究が挙げられるものの斜面と表層放出密度噴流の干渉の詳細はほとんど明らかにされていないと考えられる。本研究は三次元的水域に表層放出される密度噴流の斜面との干渉を念頭に置きながら、より基礎的な鉛直二次元の場合について検討する。鉛直二次元密度噴流の斜面上での挙動についての研究例は極めて少なく著者等の知る範囲では僅かにBaddour-Chu⁵⁾、Stefan-Hayakawa⁶⁾の研究が挙げられるのみである。Baddour-Chuは斜面と密度噴流の間に極めて薄い密度楔の存在を報告しているが、これは彼らの実験条件の範囲でのみ見られる現象であると考え事が妥当であろう。また、Stefan-Hayakawaは斜面勾配が 2.3° より大きい場合は斜面は密度噴流の挙動に影響を与えないと報告している。両研究とも斜面の効果に主眼を置いた研究ではなく、それらによって明らかにされている知見は極めて少ない。

本報は以上の点を念頭に置いて斜面上に表層放出される鉛直二次元密度噴流の挙動の詳細を明らかにするための実験的検討結果について報告するものである。

*	正会員	工博	東京電機大学助教授	理工学部建設工学科	(〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町)
**	学生員		東京電機大学大学院	建設工学専攻	(同上)
***	正会員		東京電機大学講師	理工学部建設工学科	(同上)

2. 考える流れの場と座標系

図-1 に本研究において考察する鉛直二次元の流れの場の模式図と座標系を示す。同図に示すように斜面勾配: S を持つ斜面上に密度噴流が表層放出される。表層放出された密度噴流は斜面と干渉しながら流動し、剥離点: Se で斜面から剥離する。斜面から剥離した密度噴流は連行を伴いながら流動し、上層厚一定の最終流動状態に至る事となる。図-1 における記号はそれぞれ、 h = 上下層水深、 ρ = 水の密度、 T = 水温、 F_d = 上層密度フルード数 $= q / (g' h^3)^{1/2}$ 、 q = 上層流量、 $g' = \varepsilon g$ 、 $\varepsilon = \Delta \rho / \rho_2$ 、 $\Delta \rho = \rho_2 - \rho_1$ 、 g = 重力の加速度、である。また、添字、0, 1, 2, f はそれぞれ、放出口 ($x=0$)、上層、下層、最終流動状態、における値である事を示している。

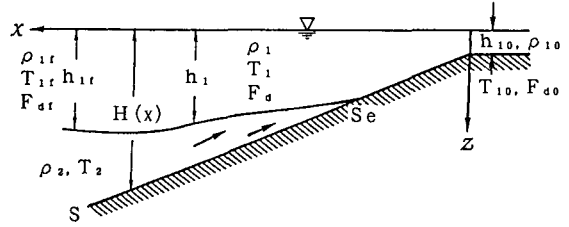


図-1 考える流れの場と模式図

3. 実験装置および実験方法

使用した実験装置は図-2 に示すように幅: 5cm, 長さ: 150cm, 高さ: 20cmの透明アクリル製の実験水路部に貯水槽を接続したものである。実験においては冷水を満した実験水槽中に水路部上流端より計量、計温された温水を斜面上に放出した。この種の実験においては下層連行水のわずかな不足や壁面せん断力に起因する内部跳水が発生し易い。この事を念頭において、図-2 中に示すように貯水槽下部より全域密度噴流型の連行量相当分を若干上回る冷水を補給するとともに、実験

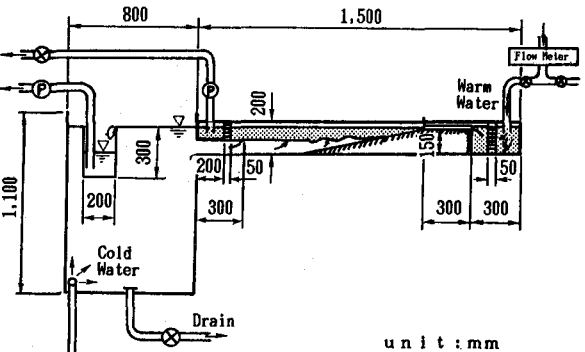


図-2 実験装置

水路下流端より上層温水を強制的に取水した。なお、実験において流況は上層もしくは下層を染料によって可視化する事で把握した。温度はサーミスタで計測し、また流速は可視化された流況のビデオ画像より読みとった。一連の実験は放出密度フルード数: F_{d0} と斜面勾配: S を種々変化させて実施した。

4. 実験結果および考察

以下に実験結果とそれに対する考察を示す。また、本章において示す可視化写真の実験条件一覧を表-1 に示す。同表において、 u_0 = 放出流速、 Re_0 = 放出レイノルズ数、である。

	F_{d0}	S	u_0 (cm/s)	h_{10} (cm)	T_2 (°C)	T_{10} (°C)	Re_0
Photo. 1	1.5	1/3	7.1	2.8	8.5	41.5	3,611
Photo. 2	9.5	1/3	25.0	0.8	8.5	42.0	3,611
Photo. 3	7.8	1/4	22.2	0.9	8.0	42.5	3,612
Photo. 4	5.8	1/5	18.2	1.1	9.1	42.5	3,612
Photo. 5	4.1	1/7	13.3	1.5	7.0	37.6	3,608
Photo. 6, 7	25.0	1/4	33.3	0.7	8.8	24.0	4,199

表-1 実験条件一覧

4・1 密度界面形状の形態分類

斜面上に表層放出される密度噴流の密度界面形状は放出密度フルード数: F_{d0} と斜面勾配: S によって極めて大きな変化を示す事が実験により明らかになった。一連の実験より密度界面形状を図-3 に示す様に分

類した。以下にそれぞれのタイプの流況の特徴の概要と可視化写真を示す。

タイプⅠ：図-3 A, 写真-1 に示すように放出口近傍における密度噴流の斜面への付着領域（O-S_e区間）が存在しないかもしくは極めて小さなタイプである。この場合は斜面が密度噴流の密度界面形状に及ぼす効果は無視するかあるいは極めて小さい。また、このタイプの密度界面は全体として下に凸となり、連行量は斜面の無い場合の密度噴流（つまり、全域密度噴流）の連行量にはほぼ等しくなる。

タイプⅡ：図-3 B, 写真-2 に示すように密度噴流は放出口近傍で斜面に沿って流動するが、斜面から剥離後は連行現象による下層低圧部の効果が強く密度界面形状が全体として上に凸の形状を示す。また上層には連行渦が発生する。この連行渦および低圧部の挙動は極めて不安定であり、下流側にスケールの大きな密度界面波をしばしば発生させる。発生した密度界面波の発生例を写真-3 に示す。この密度界面波の発生メカニズムは構造物の後部に発生するカルマン渦のそれに類似していると考えられる。

タイプⅢ：図-3 C, 写真-4 に示すようにO-S_e区間が比較的長く、斜面からの剥離後は下層に薄い密度楔の侵入を伴いながら流動する。また、密度界面形状は全体として下に凸となる。このタイプの流動はBaddour-Chu⁵⁾が斜面と密度噴流の干渉の結果生ずると報告している現象と同一であると考えられる。

タイプⅣ：図3-D, 写真-5 に示すように上層は斜面に付着し上層厚を増大させながら流動し、ほぼ最終上層厚に達した位置で斜面から剥離して一定上層厚となるタイプであり、流況は極めて静穏なものとなる。このケースでは、下流側に密度界面波の発生が見られず、また、上下層の混合はほとんど生じない。

タイプⅤ：図-3 E, 写真-6 に示すように

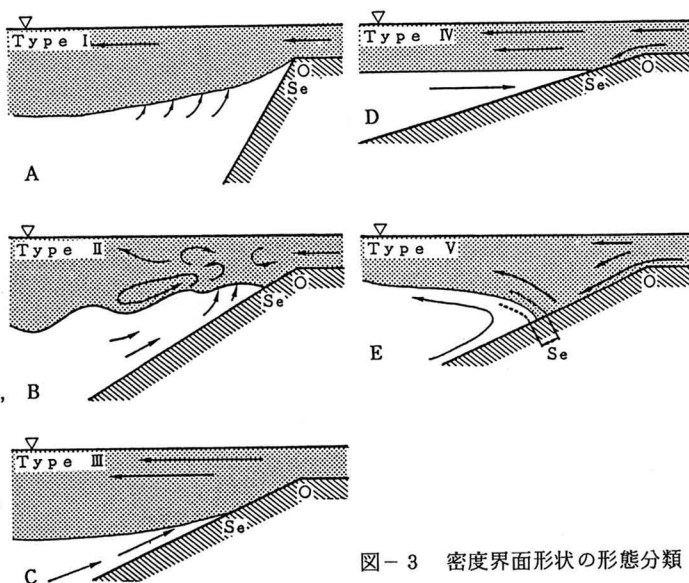


図-3 密度界面形状の形態分類

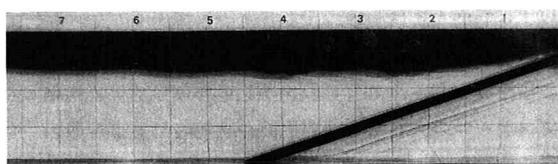


写真-1 ($F_{d0}=1.5$, $S=1/3$, Type I)

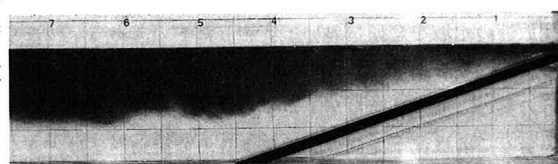


写真-2 ($F_{d0}=9.5$, $S=1/3$, Type II)

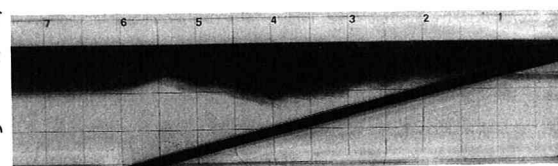


写真-3 ($F_{d0}=7.8$, $S=1/4$, Type II)

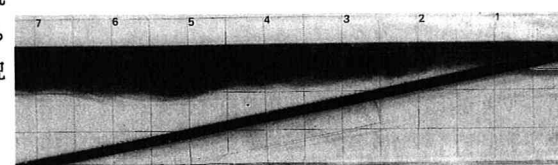


写真-4 ($F_{d0}=5.8$, $S=1/5$, Type III)

密度噴流が斜面に付着しながら最終上層厚より大きくなる位置まで流動し、斜面から剥離後は上層厚が最終上層厚となるよう急激に薄くなるタイプである。この現象は上層流が斜面と干渉し、コアンダ効果によって上層流の流軸が斜面に向かって曲げられる事によって生ずるものである。このタイプでは上層の斜面からの剥離点： S_e において強い乱れを伴う密度カレントが発生する。この密度カレントの挙動は不安定なものであり、成長減衰を繰り返して剥離点の位置が周期的に変動する事が観察された。この様に不安定な密度カレントの挙動により下流側にしばしばスケールの大きな密度界面波が間欠的に発生させられる事が認められた。なお、上層流の流軸が底面方向へコアンダ効果によって曲げられる様子の可視化写真を写真-7に示す。

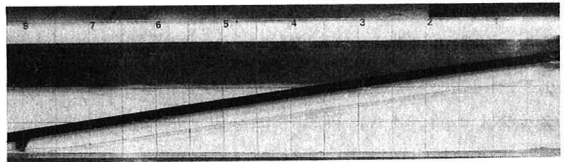


写真-5 ($F_{a0}=4.1$, $S=1/7$, Type IV)

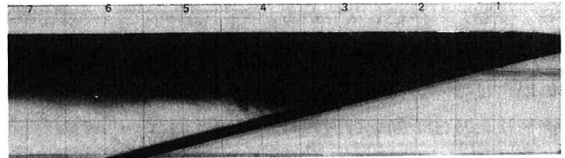


写真-6 ($F_{a0}=25.0$, $S=1/4$, Type V)

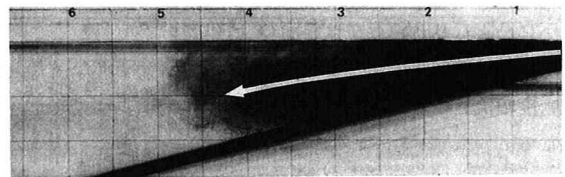


写真-7 ($F_{a0}=25.0$, $S=1/4$, Type V)

以上に斜面と密度噴流の干渉によって生ずる密度界面形状の流動形態を5種のタイプに分類

する事を提案し、それぞれのタイプの特徴について議論した。なお、タイプIIおよびタイプVにおいて下流側でスケールの大きな密度界面波が誘起される事を報告したが、この密度界面波の発生メカニズムが現場の温排水中に存在すると報告されている周期的な温度変動（例えば、Scarpace-Green⁷⁾）の成因となっている可能性があり、今後に残された課題である。

ところで、以上に議論した流動形態分類は実験方法に示したように密度噴流の自由な連行を保証するような開放性の水域を念頭において実施したものである。つまり半無限水域においては全域密度噴流となるケースの斜面勾配の効果について調べたものである。一方、表層放出される密度噴流の下流側に堰を設置したり連行の為の下層の補給量が不足する場合などは内部跳水を伴う事が知られている⁸⁾。斜面上に表層放出される場合もこの様な下流側の条件によりその流動形態は大きな影響を受ける事となる。つまり、下流側の条件で定まる最終流動上層厚が上流側の放出条件と斜面勾配で定まる最終流動上層厚に比較して大きい場合は放出口地点もしくは流動過程で内部跳水を引き起こす事となる。しかしながら下流側条件を制御した場合の斜面と表層放出密度噴流との干渉については別途詳細な検討が必要であり本報の目的とするところではないので別の機会に検討する事とした。

4・2 $S - F_{a0}$ 図上での流動形態分類

図-4は前節で提案した5種の流動形態の $S - F_{a0}$ 図上における出現領域を示すものである。以下に同図より得られる知見について斜面勾配で領域分割して議論する。

$S \leq 0.2$: この領域では F_{a0} の増加に従ってタイプIII $\rightarrow$ IV $\rightarrow$ Vと変化し、タイプI, IIは発生しない。また、さらに S の小さい $S \leq 0.15$ ではタイプIVもしくはタイプVの流動形態となるが、特にタイプIVの流動形態の発生が支配的となる。

$0.2 < S \leq 0.3$: 種々の流動形態の混在する領域である。流動形態は F_{a0} の増加に従ってタイプIII $\rightarrow$ II $\rightarrow$ III $\rightarrow$ IV $\rightarrow$ Vと変化し、タイプIの出現領域は極めて小さい。

$S > 0.3$: この領域では F_{a0} の増加に従ってタイプI $\rightarrow$ II $\rightarrow$ III $\rightarrow$ IV $\rightarrow$ Vとすべての流動形態が出現するが、タイプIII, IVの出現領域は極めて狭いことが特徴である。また、 S の増加にともなってタイプIの出現領域が急激に大きくなってゆく様子が分かる。この事から F_{a0} が比較的小さい場合は $S = 0.3$ が斜面勾配が表層

密度噴流の挙動に影響を与えるかどうかを判定するための指標となりうる。

ところで、Stefan-Hayakawa⁶⁾は斜面勾配が 23° の場合 ($S \sim .42$) は下層水の上層への混合は $S = \infty$ のケースとはほぼ一致し、斜面勾配が 5.75° の場合 ($S = .1$) は上下層の混合は生じないと報告している。彼らの実験における F_{do} の範囲 ($0 < F_{do} < 10$) を念頭におけば図-4よりそれぞれタイプ I, タイプ IV に対応しており、著者等の実験結果との整合性が明らかである。なお、図-4の作成に当たってはそれぞれのタイプの出現領域境界付近ではしばしば写真による判定が困難であった。このことから将来的には多くの追加実験に基づいてより精度の高い図表とする事が望まれる。

4・3 流動過程における上層厚と上層流量

本節においては流動過程における上層厚と上層流量について議論する事とする。なお、上層流量: q_1 、上層水深: h_1 はそれぞれ $q_* = q_1/q_m$, $h_* = h_1/q_m$ と無次元化する。ここに、 $q_m = q_0 F_{do}^{2/3} (1 + 1/2 \cdot F_{do}^{-2})$, $h_m = h_0 F_{do}^{4/3} (1 + 1/2 \cdot F_{do}^{-2})$ である。図-5は $F_{do} \sim 7$ と固定し、斜面勾配: $S = S = \infty, 1/3, 1/4, 1/5, 1/7$ と変化させた場合の無次元化された上層厚と上層流量の実験結果を $h_* - q_*$ 図中にプロットしたものである。図中の曲線: O-B-A-O は有田-Jirka-玉井の理論曲線⁸⁾であり、曲線: O-A は全域密度噴流の流動過程の軌跡を、曲線: O-B-A は噴流混在型内部跳水の最終到達地点を示している。以下に斜面勾配毎に図-4を参照しながら実験結果について議論する。なお、図中のプロット: $\diamond$; 1 は $F_{do} \sim 7$ の密度噴流の放出口地点を示している。また、 $\rightarrow$ はそれぞれの実験ケースの流動過程を示している。

$S = \infty$: $\bullet$ の場合は噴流始点: $\diamond$; 1 より実験によって得られた流動過程全域において自由密度噴流の理論曲線とその軌跡 (1 $\rightarrow$ 2 $\rightarrow$ 3) が良く一致している事が分かる。本ケースの流動形態はタイプ I となる。

$S = 1/3$: $\triangle$ の場合は噴流始点: $\diamond$; 1 よりほぼ全域密度噴流の理論曲線と一致して流動 (1 $\rightarrow$ 2) した後には若干の混合を伴いながら上層厚が急激に大きくなる事が認められる (2 $\rightarrow$ 4)。このケースは図-4よりタイプ II の流動となっている。

$S = 1/4$: $\blacksquare$ の場合は放出後直ちに上下層混合の不足により全域密度噴流の理論曲線より離れ (1 $\rightarrow$ 5) 流動の後、急激に上層厚が大きくなる領域に至る (5 $\rightarrow$ 6)。このケースの流動形態は $S = 1/3$ と同様にタイプ II であるがタイプ III に近く全域密度噴流の理論曲線と一致する領域が出現しない。

$S = 1/5$: $\circ$ の場合の流動形態はタイプ III に属する。放出後直ちに極めて小さな混合を伴いながら上層厚が急激に大きくなっている事が分かる。(1 $\rightarrow$ 7)。タイプ III の流動は下層に流速は早いが非常に薄い連行層

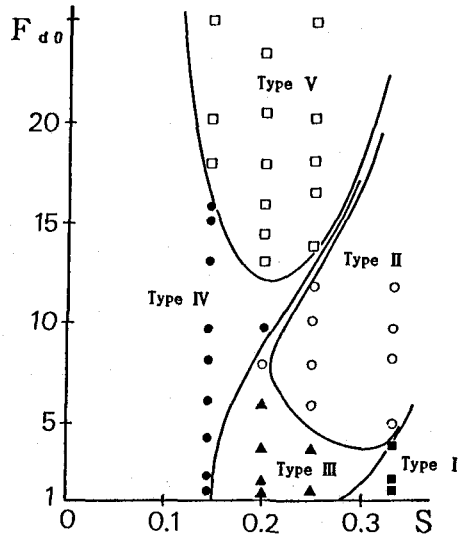


図-4 密度界面形状の形態分類図

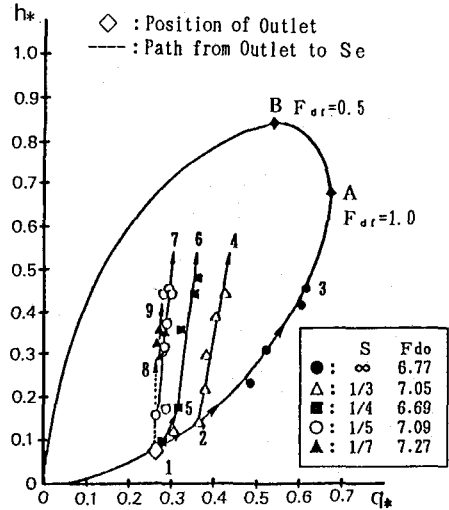


図-5 各種タイプの流動過程

を伴うがそれによる上下層混合は小さい事を示している。

$S=1/7$:▲の場合の流動形態はタイプⅣである。同図に密度噴流の斜面への付着領域(O-Se)の流動過程を波線で示している(1→8)。同図より放出された密度噴流は長い付着領域を経由した後、ほとんど混合を伴わず上層厚が大きくなっている様子が分かる(8→9)。

以上に述べたように斜面勾配は上層厚および上下層混合の流動過程に非常に大きな影響を与える。なお、図-5にはタイプⅤのデータが欠落しているが、タイプⅤの場合は混合を伴わないO-Se区間の流動過程が長く、また斜面からの剥離地点では密度カレントの発生に伴う局所的な強い混合が生ずる事が特徴となる。

4・4 密度噴流の最終流動条件

前節までに斜面勾配が密度噴流の密度界面形状および上層厚と上層流量の流動過程に与える効果について述べた。本節においては最終流動つまり十分下流において上層厚および上層流量が一定となる流れの領域の流動条件について h_*-q_* 図上で検討する。図-6は斜面勾配および放出密度フルード数を変化させた場合に得られる無次元最終上層厚: h_{*f} および無次元最終上層流量: q_{*f} を h_*-q_* 図中にプロットしたもので、図中の実験データに付した数値は各データの F_{*0} の値である。同図に示すように実験条件は $S=1/4, 1/5, 1/7$ および $2.0 < F_{*0} < 8.0$ である。また、図中の $F_{*f}=0.5, 0.55, 1.0$ を示す実線は定義より、 $F_{*f} = (q_{*f} / h_{*f})^{3/2}$ で計算されたものである。

図-6より F_{*f} の値は F_{*0} と S によらず $0.50 < F_{*f} < 0.55$ のほぼ一定値となっている事が分かる。同図のデータはタイプⅡ, Ⅲ, Ⅳを含んでいるが(図-4参照), それぞれのタイプの密度界面形状および上層厚と上層流量の流動過程が大きく異なる事を念頭におけば興味のある結果である。

なお、タイプⅠについては過去に検討がなされており、最終流動状態の上層密度フルード数: F_{*f} は流速分布形状の違いに応じて $0.792 < F_{*f} < 1.0$ となる^{8), 9)}。また、タイプⅤは下流側の流況が不安定であった為、データの精度に難点がありデータは図中にプロットされていないがタイプⅡ, Ⅲ, Ⅳと同様な最終流動条件に至るものと考ええる。

ところで、密度噴流が斜面勾配の影響を受ける場合は F_{*f} の値が $0.5 < F_{*f} < 0.55$ のほぼ一定値となる事を示した。現在のところこの理由については不明である。しかし、半無限水深水域に表層放出される密度噴流が下層連行流量の欠損により噴流混在型内部跳水の流動形態をとるとき、上層流れの流速分布を矩形分布で近似できると仮定すれば最終流動状態の上層厚が最大値をとるような流れの F_{*f} の値が $F_{*f}=0.5$ となるという研究結果⁸⁾ との数値上の一致は興味深い。この $F_{*f}=0.5$ の流れは $dh_*/dq_*=0$ の条件を満足する特殊な流れであり、その物理的な意味については今後の検討が待たれる。

5. 総括

本研究は斜面上に表層放出される鉛直二次元密度噴流と斜面との干渉についての実験的検討結果を示すものである。研究の結果得られた知見について以下に総括する。

①密度噴流と斜面との干渉によって生ずる流動形態は密度界面形状の観点から大きく5種のタイプに形態分類できる。また、5種のタイプの出現領域を $S-F_{*0}$ 図上で明らかにした。それによれば $S < 0.15$ ではタイプⅣが $S > 0.3$ ではタイプⅠが支配的になる事が分かった。

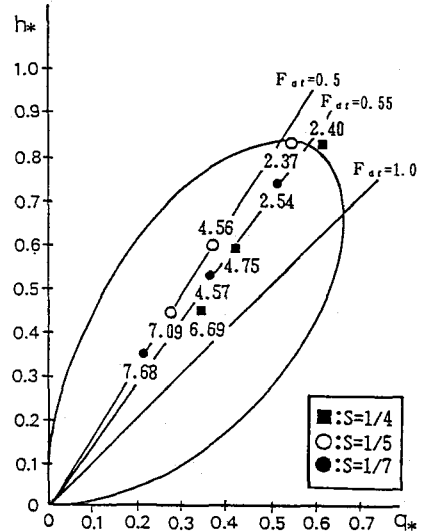


図-6 最終流動条件

②斜面勾配が流動過程に与える影響をタイプ I, II, III, IV について $h_* - q_*$ 図上で議論した。それによれば各種タイプの流動過程における上層流量および上層厚は大きく異なる事が分かった。

③表層放出密度噴流が斜面勾配の影響を受けるとき、斜面勾配は密度界面形状および上層厚と上層流量の流動過程に極めて大きな影響をあたえるにもかかわらず、最終上層密度フルード数: F_{ar} は、 $0.50 < F_{ar} < 0.55$ のほぼ一定値となる事が明らかになった。

参考文献

- 1) Stolzenbach, K.D. and Harleman, D.R.F.: An analytical and experimental investigation of Surface discharge of heated Water, M.I.T. Ralph M. Parsons Lab. Rep. No.135, 1971.
- 2) Prych, E.A.: A warm water effluent analysed as a buoyant jet, Sverrigas Meteorologiska Och Hydrologiska Institute, Serie Hydrologi, No.21, 1972.
- 3) 林泰造・有田正光: 温度密度流の拡がりに関する予測モデルの研究, 第20回水理講演会論文集, pp.161-172, 1976.
- 4) Safaie, B.: Mixing of buoyant surface jet over sloping bottom, Jour. of the Waterway Port Coastal Eng. Div., ASCE, 105, No. WW4, pp.357-373, 1979.
- 5) Baddour, R.E. and Chu, V.H.: Buoyant surface discharge on a step and on a sloping bottom, McGill Univ. Rep.78-3, 1978.
- 6) Stefan, H. and Hayakawa, N.: The two-dimensional buoyant surface jet and internal hydraulic jump, St. Anthony Falls Hyd. Lab. Rep. 16130FSU, 1971.
- 7) Scarpace, F.L. and Green, III: Dynamic surface temperature structure of thermal plumes, Water Resources Research, No.1, Vol.9, pp.138-153, 1973.
- 8) 有田正光・Jirka, G.H・玉井信行: 二次元表層放出密度流の流動形態と混合に関する研究, 土木学会論文集, 第375号/II-6, 1986.