

## 二次元表層放流密度流の形態分類

### THEORETICAL CLASSIFICATION OF TWO-LAYERED STRATIFIED FLOW DISCHARGED AT WATER SURFACE

室田 明\*・中辻啓二\*\*・中村圭二郎\*\*\*

By Akira MUROTA, Keiji NAKATSUJI and Keijiroh NAKAMURA

This paper examines classification of rapidly varied flows in a two-layered density stratified system with surface layer flowing, and the other stagnant. The analogous phenomena in open channel hydraulics are transient ones from a supercritical to a subcritical flow regime. In density stratified flows, the phenomena present remarkably different flow regimes according to some form of the upstream and downstream conditions. It is shown, on the basis of theoretical and experimental knowledges about the internal hydraulic jump, that relationships between the densimetric Froude number at the outlet, depth ratio of downstream surface layer relative to outlet depth, flow rate of entrainment of lower salt water, and types of flow are defined qualitatively.

#### 1. 緒 言

表層放流された密度流の混合特性はその流動形態によって規定される。それゆえ、表層放流密度流の諸形態を明確に示すことは工学的に重要である。流動形態を流れの支配断面間の水深増加割合との関係から明らかにする試みは、これまでにもたびたび行われてきた<sup>1)~3)</sup>。ここでは、流れが表層密度噴流、内部跳水および潜り内部跳水の3形態に大別される。おのおのの流動形態に関する知見、ならびに各流動形態のもとで流れが達成可能な混合率や水深増加割合は放流密度フルード数の関数として表現されている。しかしながら、内部跳水という密度界面の不連続現象に関してはこれまで理論的検討のみが先行し、その現象を正確にとらえようとする試みはほとんど行われることがなかった。そのために、表層密度噴流と内部跳水との定性的・定量的な相違が一連の形態分類ではきわめて曖昧に記述されており、それらは表層放流密度流の基礎方程式の解の解釈にも誤謬をもたらす結果となっている。

そこで、本研究においては、著者らの一連の研究<sup>4),5)</sup>によって得られた内部跳水の流動形態ならびに混合特性に関する知見を基礎に、表層放流密度流の形態分類をあらためて行う。すなわち、表層放流密度流を表層密度噴流、遷移型内部跳水、完全内部跳水および潜り内部跳水の4つの特徴的な流動形態に大別し、各流動形態と混合率、水深増加割合との関係を流れの支配断面間の体積・質量・運動量の保存則に基づく理論的考察から明らかにする。また、表層放流密度流の流動形態に重要な影響を及ぼす流れの下流側支配条件を実験的に明確にする。

#### 2. 表層放流密度流の流動形態

静止した周囲環境水中に密度流的に射流状態（すなわち密度フルード数  $F_d$  が 1.0 以上）で表層放流された流れは、一般に表層密度噴流と称される流動形態を示す。密度噴流は密度界面上に潜在する組織的な大規模渦動を介して周囲環境水を活発に連行し、流下とともに緩やかに水深を増大させる<sup>6)</sup>。このような流れは、流下の途中にその疎通を妨げるような障害が存在しない限り、射流の状態を維持しながら流下を続ける。流れの密度フルード数は流下につれてしだいに 1.0 に漸近していく。ところが、流下の途中に水路の急縮部や堰のような障害が存在し、そこで密度流的に常流状態（すなわち、 $0.0 < F_d$

\* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科  
(〒565 吹田市山田丘 2-1)

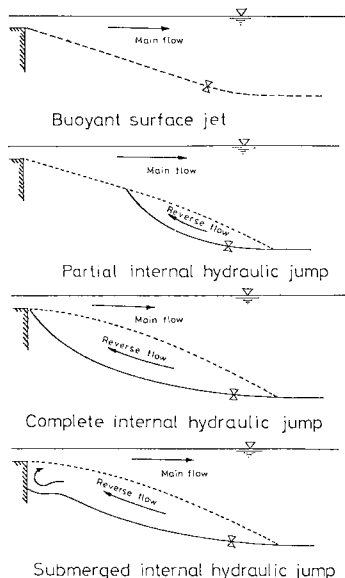
\*\* 正会員 工博 大阪大学助教授 工学部土木工学科(同上)

\*\*\* 学生会員 大阪大学大学院工学研究科前期過程(同上)

<1.0) になると、流れは開水路跳水と類似の内部跳水とよばれる密度界面の不連続を生起する。このとき、流れは表層密度噴流の途中段階から内部跳水へと遷移する形態をとる。周囲環境水の連行は密度噴流領域で活発に起こるが、内部跳水領域ではほとんど観察されない。このような表層密度噴流の下流域に内部跳水が付随した流動形態を、以下では遷移型内部跳水と称することにする。

下流堰高の増大等により下流側の密度フルード数がさらに低下すれば、内部跳水は規模を増大しながらしだいに流れの上流方向へと移動する。これに伴って、周囲環境水の連行を生起する密度噴流の領域はそれだけ減少する。このような密度界面の不連続部の上流方向への移動現象は一般に内部段波と称される。流れの中に生起した内部段波は、段波前面の密度噴流の示す密度フルード数が段波前後の水深との共役関係を満たす位置まで、遡上を続ける。もし、放流された流れに上述の共役関係を満たすだけの密度フルード数を呈する位置が存在しないときには、内部段波は放流口端に衝突して潜水する。そして、そこに希釈水の滞留層が形成される。その流動形態は潜り内部跳水と称される。内部跳水に関する著者らの実験において実験条件として採用している完全内部跳水は、内部段波の先端位置が放流口端と一致した、時間的にも空間的にも定常な状態である。したがって、完全内部跳水は遷移型内部跳水から潜り内部跳水へと推移する際の臨界状態であるといえる。

以上に示した流動形態の遷移は Wilkinson・Wood<sup>7)</sup>の実験においても観察されており、その概要を示すと図一1のようである。射流状態で放流された表層密度流の



図一1 表層放流密度流の流動形態

流動形態は、流れの下流側の水利条件によって規定されて、上述の4形態のいずれかになる。

### 3. 表層放流密度流の基礎方程式

#### (1) 表層密度噴流および内部跳水の基礎方程式

図一2は表層密度噴流および完全内部跳水を含む遷移型内部跳水の解析モデルの概要とモデルに用いられる諸量を表わす。解析では、上層淡水放流・下層塩水静止の流動を取り扱うことにする。モデル化に際しては、以下に示す(I)~(IV)の仮定を導入する。

仮定(I) 密度流の任意の流下位置における流速、密度は矩形分布で近似する。

仮定(II) 下層塩水層の水深は無窮大とする。

仮定(III) 自由水表面の隆起ならびに密度流界面に働く静水圧偏差に起因する流下方向応力は、両層の相対密度差のオーダーであることから、これを無視する。また、

仮定(IV) 密度流の流下区間における壁面摩擦応力も一切考慮しない。

基礎方程式は、以下に示す支配断面間での体積ならびに質量の連続条件式と運動量保存方程式である。

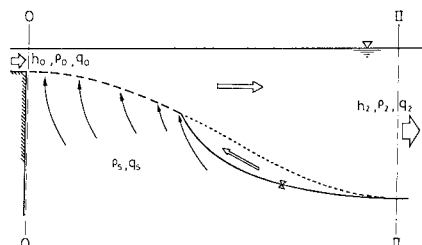
$$q_0 + q_s = q_2 \dots\dots\dots (1)$$

$$\rho_0 q_0 + \rho_s q_s = \rho_2 q_2 \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{1}{2} (\rho_s - \rho_0) g h_0^2 + \rho_0 \frac{q_0^2}{h_0} = \frac{1}{2} (\rho_s - \rho_2) g h_2^2 + \rho_2 \frac{q_2^2}{h_2} \dots\dots (3)$$

ここに、 $h$ 、 $q$ 、 $\rho$ はそれぞれ表層水深、単位幅流量、密度を表わす。また、添字0、2、sはそれぞれ放流口位置、跳水終端位置、下層塩水層を表わす。ただし、表層密度噴流の解析では、添字2は任意の流下位置に設定された検査断面を表わすことになる。なお、以下に示す基礎方程式の展開過程において、流れが内部跳水を含むか否か等、の支配断面間の流動特性の情報は一切必要としない。

式(1)、(2)を式(3)に代入し、密度差が小さいものと仮定して単純化すれば、共役水深比  $\xi (= h_2/h_1)$  に関する三次方程式が放流口位置あるいは跳水終端位置での密度フルード数  $F_{ai} (= q_i/\sqrt{(\Delta\rho/\rho_s) \cdot g h_i^3})$ 、 $i=0, 2$ を用いて次式のように表わされる。ここに、 $\eta_s (= q_s/q_0)$



図一2 解析モデルの概要(1)

は系全体の混合率であり、解を得るためにはこの  $\eta_s$  の値をあらかじめ任意に設定する必要がある。

$$\xi^3 - (1 + 2F_{d0}^2)(1 + \eta_s)\xi + 2(1 + \eta_s)^3 F_{d0}^2 = 0 \dots\dots\dots (4)$$

$$2F_{d0}^2 \xi^3 - (1 + 2F_{d0}^2)(1 + \eta_s)^2 \xi^2 + (1 + \eta_s)^3 = 0 \dots\dots\dots (5)$$

(2) 潜り内部跳水の基礎方程式

図-3は潜り内部跳水の解析モデルの概要を示す。モデル化に際しては、表層密度噴流、内部跳水の解析に用いられた仮定 (I)~(IV) のほかに、次の仮定を加える。

仮定 (V) 放流水束の相対密度差は常に下層塩水に対して定義される。

仮定 (VI) 滞留層内の密度は跳水終端位置での表層流の密度と等しい。

基礎方程式は支配断面間の体積ならびに質量の連続条件式 (1), (2) と次式に示す運動量保存方程式である。

$$\frac{1}{2}(\rho_s - \rho_0)g(h_0 + h_{sub})^2 + \frac{1}{2}(\rho_{sub} - \rho_0)gh_{sub}^2 + \rho_0 \frac{q_0^2}{h_0} = \frac{1}{2}(\rho_s - \rho_2)gh_2^2 + \rho_2 \frac{q_2^2}{h_2} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、添字 'sub' は放流口直下の滞留層の諸量を表わす。その他の添字、記号の意味は表層密度噴流と内部跳水の解析モデルに準ずる。

本来、潜り内部跳水の滞留層は内部段波、すなわち反転流塊の放流口端への衝突によって生起するものであるから、この動的特性は基礎方程式中に厳密に考慮する必要がある。しかしながら、滞留層内の流動に関する定量的な知識が現時点では皆無であることから、式 (6) において滞留層の存在は静水圧という形でのみ考慮されている。また、図-3からもわかるように、潜り内部跳水の概観は滞留層厚  $h_{sub}$  の変化とともに著しく変化する。この  $h_{sub}$  の変化は潜り内部跳水の混合特性にも大きな影響を及ぼすことが予想されるが、前述のように  $h_{sub}$  の大きさを解析的に規定する根拠は今のところ何もない。そこで本モデルでは滞留層厚  $h_{sub}$  を跳水後水深  $h_2$  と放流口水深  $h_0$  との差の  $\beta$  倍 ( $0 \leq \beta < 1$ ) として次式のように表わすことにする。

$$h_{sub} = \beta(h_2 - h_0) \dots\dots\dots (7)$$

また、滞留層内の密度に関しては仮定 (VI) を導入して、

$$\rho_{sub} \doteq \rho_2 \dots\dots\dots (8)$$

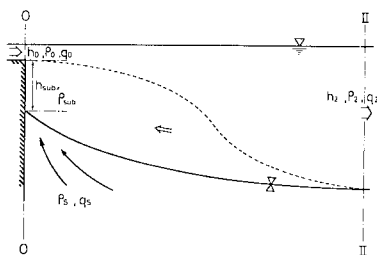


図-3 潜り内部跳水の解析モデル

とする。これは、滞留層が反転流の放流口端への衝突によって生起するという実験事実に基づくものである。とりわけ、混合率の小さいことが予想される潜り内部跳水の場合に、その仮定は近似的に成り立つものとする。

式 (7), (8) を式 (6) に代入し、これに式 (1), (2) を代入することにより次式を得る。

$$\{\beta^2(1 + 2\eta_s) - 1\} \xi^3 + 2\beta\{(1 - 2\beta)\eta_s + (1 - \beta)\} \xi^2 + \{(1 + \eta_s)(1 - \beta)^2 + \eta_s\beta^2 + 2(1 + \eta_s)F_{d0}^2\} \xi - 2(1 + \eta_s)^3 F_{d0}^2 = 0 \dots\dots\dots (9)$$

式 (9) は  $F_{d0}$  を用いて整理した潜り内部跳水の  $\xi$  に関する方程式である。なお、式 (9) に  $\beta=0$  を代入すれば、同式は滞留層の存在しない表層放流密度流の基礎方程式に一致する。

4. 解析結果

(1) 表層密度噴流および内部跳水

図-4は式 (4) に系全体の混合率  $\eta_s$  をパラメータとして代入することによって得られた表層放流密度流の共役水深比  $\xi$  と放流密度フルード数  $F_{d0}$  との関係を示す。なお、式 (4) ならびに図-4に示された解析結果は、Stefan・Hayakawa<sup>8)</sup>, Hayakawa<sup>9)</sup>の結果と基本的に同一である。

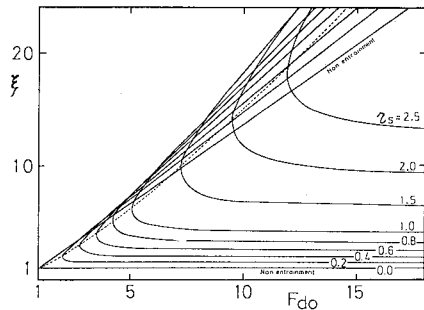


図-4 解析結果 (式 (4))

図-5は図-4をもとにして描いた、表層放流密度流の各流動形態に対応する支配断面間の水深比  $\xi (=h_2/h_0)$  と  $F_{d0}$  との関係を示したものである。曲線  $l_1$  は図-4の解析解の包絡線であり、表層放流された流れが遷移型内部跳水の形態をとる場合に得られる最大の共役水深比を示す。  $l_1$  は式 (4) において  $\partial \xi / \partial \eta_s = 0.0$  の条件のもとで次式のように求まる。

$$\xi = 2^{1/3} \frac{2F_{d0}^2 + 1}{3F_{d0}^{2/3}} \text{ for } l_1 \dots\dots\dots (10)$$

次に、曲線  $l_2$  は三次方程式 (4) の厳密解のうち重複解となる共役水深比であり、式 (11) で表わされる。この関係は玉井・有田<sup>3)</sup>によっても比力  $F_0$  の保存性に基づき  $\partial F_0 / \partial \xi = 0.0$  の条件より求められており、次式

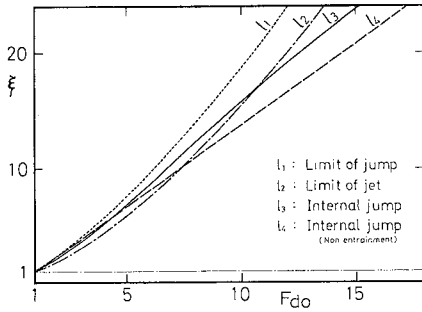


図-5 表層放流密度流の共役関係

が射流状態で流動する表層密度噴流の最終上層厚を与えることを報告している。

$$\xi = \frac{2 F_{do}^2 + 1}{3 F_{do}^{2/3}} \text{ for } l_2 \dots\dots\dots (11)$$

つまり、任意の放流密度フルード数  $F_{do}$  で放流された流れは流下とともに周囲環境水を逐次連行し、射流状態を維持しながら（上流側支配の流れとして）流動する。そして、曲線  $l_2$  の示す  $\xi$  の値まで水深を増大させることが可能である。曲線  $l_2$  は図-4 中に点線で示した。図-4 の任意の  $\eta_s$  の等値線に着目すれば、点線より下方の解は着目した  $\eta_s$  に対する密度噴流解を、上方の解は内部跳水解を表わすことになり、そのときの下流側検査断面での密度フルード数の値はそれぞれ  $F_{do} > 1.0$ ,  $1.0 > F_{do} > 0.0$  となっている。

曲線  $l_3$  は、著者らの内部跳水の実験で得られた完全内部跳水の混合率  $\eta_s$  と放流フルード数  $F_{do}$  との関係（図-6）を式（4）に代入することによって得られた完全内部跳水の共役関係を示す。また、曲線  $l_4$  は連行を無視したとき、すなわち式（4）に  $\eta_s = 0.0$  を代入した場合に得られる内部跳水解であり、それは開水路跳水に類似の共役関係式（12）となる。

$$\xi = \frac{1}{2} \{-1 + \sqrt{1 + 8 F_{do}^2}\} \text{ for } l_4 \dots\dots\dots (12)$$

ただし、射流状態で放流された流れが全く連行を伴わずに流下すること（ $\eta_s = 0.0$ ）は現実的にあり得ない。式（12）は単に理論的にのみ可能な流動条件である。

図-5 に示した曲線  $l_1 \sim l_4$  に基づいて、表層密度噴流

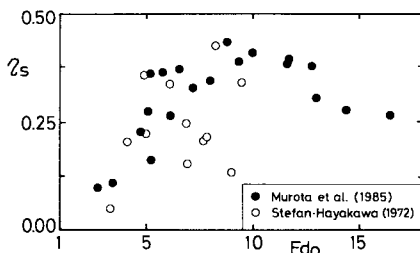


図-6 完全内部跳水の混合率

および内部跳水の共役水深比の解の存在領域を示すと以下のようになる。

- a) 表層密度噴流 :  $1.0 < \xi \leq l_2$
- b) 遷移型内部跳水 :  $\min[l_2, l_4] < \xi \leq l_1$
- c) 完全内部跳水 :  $\xi = l_3$

ここで、注意すべきことは遷移型内部跳水の解の領域が完全内部跳水の解を完全に包含している点と、表層密度噴流の解の領域とその一部が重複している点である。このことは以下のように説明される。

遷移型内部跳水の解の領域のうち、曲線  $l_1$  と  $l_2$  とで囲まれる領域における任意の  $\xi$  の値には常に異なる2つの  $\eta_s$  の値が対応している。これらを現象面で考えてみれば、それは内部跳水の前方の密度噴流域、すなわち周囲環境水を連行することが可能な領域の長い場合（ $\eta_s$  が大）と、短い場合（ $\eta_s$  が小）とに対応する（図-7(a) 参照）。つまり、任意の放流密度フルード数  $F_{do}$  で放流された流れが遷移型内部跳水の形態を示すとき、互いに等しい共役水深比  $\xi$  を示す2つの異なる流動状態、すなわち混合率  $\eta_s$  の大きい場合と小さい場合とが常に存在する。

また、 $l_2 > l_4$  を示す放流密度フルード数の大きい領域（ $F_{do} > 8$ ）では、遷移型内部跳水の解の領域は密度噴流の解の領域と一部で重複部を有する。同領域は、図-5 では曲線  $l_2$  と  $l_4$  で囲まれる部分（ $F_{do} > 8$ ）として表わされる。同領域における任意の  $\xi$  の値に対しても常に2つの異なる  $\eta_s$  の値が対応する。このうちの1つは遷移型内部跳水（ $\eta_s$  が小）、他方は密度噴流（ $\eta_s$  が大）の解である（図-7(b) 参照）。これは、任意の放流密度フルード数  $F_{do}$  で放流された、表層密度噴流の任意の検査断面における共役水深比  $\xi$  が同一放流条件下における遷移型内部跳水の共役水深比と等しい値を示す場合があることを示す。さらに、完全内部跳水の共役水深比の解が遷移型内部跳水の解の領域に完全に含まれることは、完全内部跳水が特殊な境界条件を与えられた遷移型内部跳水の一形態であることを示している。以上の議論より、表層放流密度流の各流動形態に対応する共役水深

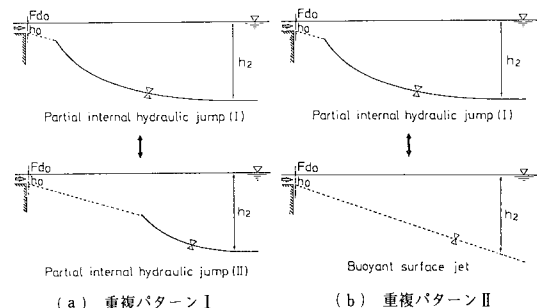


図-7 共役水深比の解の存在領域の重複

比の解の存在領域は互いに重複部を有することがわかる。

(2) 潜り内部跳水

図-8は式(9)に $\eta_s=0.0$ を代入し、 $\beta$ をパラメータとして得られた潜り内部跳水の共役水深比 $\xi$ と放流密度フルード数 $F_{d0}$ との関係を示す。同図より、 $\beta$ の値の増大とともに、つまり放流口直下の滞留層厚の増大とともに、任意の放流条件下の潜り内部跳水の共役水深比は単調に増大することがわかる。また、 $\beta \rightarrow 1.0$ のとき、 $\xi-F_{d0}$ の関係は縦軸に漸近してゆく。同図には示されていないが、式(9)で $\eta_s > 1.0$ とした場合の $\beta$ の任意の値に対する $\xi$ と $F_{d0}$ との関係は、図-4に示された滞留層の存在しない場合の表面放流密度流のそれと同様の傾向を示す。このことから、潜り内部跳水の共役水深比の最小値は式(9)で $\beta=0.0$ とした場合( $\eta_s > 0.0$ )に得られる遷移型内部跳水の解の領域の下限と一致し、最大値は無限大である。以上の解析結果に基づいて、定常状態にある潜り内部跳水の共役水深比の解の存在領域は次のように示される。

d) 潜り内部跳水： $\xi \geq \min[l_2, l_4]$

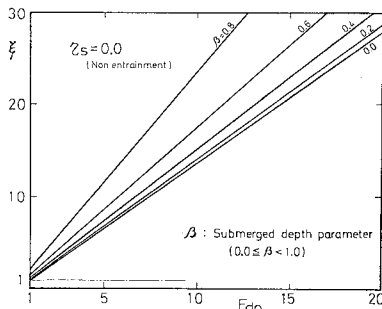


図-8 潜り内部跳水の共役関係

5. 各流動形態の遷移条件

式(4)と式(5)とを連立して解くことにより、遷移型内部跳水の放流条件 $F_{d0}$ と下流側支配条件 $F_{d2}$ との関係を表わすことができる。図-9は $F_{d0}$ と $F_{d2}$ との関係を系全体の混合率 $\eta_s$ の等値線として表わしたものである。同図より、混合率 $\eta_s$ の値は放流密度フルード数 $F_{d0}$ の増大とともに、単調に増大する傾向を有することがわかる。また、下流側密度フルード数 $F_{d2}$ の増大とともに、 $\eta_s$ の値は増大する傾向にある。任意の放流条件 $F_{d0}$ の下で得られる $\eta_s$ の最大値は $F_{d2}=1.0$ 、つまり全域の流動が密度噴流となる場合に生じており、これは玉井・有田<sup>3)</sup>の指摘と一致している。

図中の●印は完全内部跳水に対する著者らの実験値であり、図中の破線はその近似曲線を表わす。つまり、破線は任意の放流条件 $F_{d0}$ のもとで完全内部跳水を生じさ

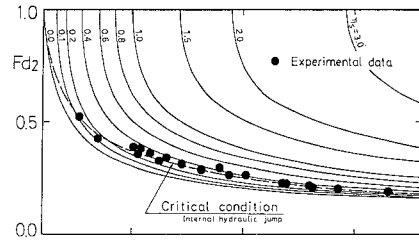


図-9  $F_{d0}$ と $F_{d2}$ との関係

せる下流側支配条件 $F_{d2}$ の値を示す。3.において議論したように、完全内部跳水は内部段波が放流口端で静止した、言い換えれば遷移型内部跳水が潜り内部跳水に移行する際の臨界状態である。したがって、図中の破線は流れが遷移型内部跳水であるか、あるいは潜り内部跳水であるかの臨界値を与えることになる。この臨界条件を示す $F_{d2}$ の値は $F_{d0}$ の増大とともに単調に減少することが同図よりわかる。

図-10は表面放流密度流の流動形態と混合率との関係を示す。図中の細い破線群は混合率 $\eta_s$ と放流密度フルード数 $F_{d0}$ との関係を下流側支配条件 $F_{d2}$ の等値線として表わしたものであり、これは図-9を書き改めたものである。同図からも、 $F_{d2}$ の値が大きいくほど、得られる混合率 $\eta_s$ の値も大きくなることがわかる。さらに、 $F_{d2}$ の値のわずかな変化によって、 $\eta_s$ の値に非常に大きな変化をもたらされることがわかる。このことは、下流側支配条件のわずかな違いによって、内部跳水の発生位置が大きく変化することを示唆している。

図中の $F_{d2}=1.0$ に対応する曲線 $l_2$ は表面密度噴流が限界状態に到達した際の $\eta_s$ と $F_{d0}$ との関係を示している。曲線 $l_2$ は式(11)の関係を式(4)に代入することによって、次式で与えられる。

$$\eta_s = \frac{2F_{d0}^2 + 1}{3F_{d0}^{4/3}} - 1 \quad \text{for } l_2 \dots \dots \dots (13)$$

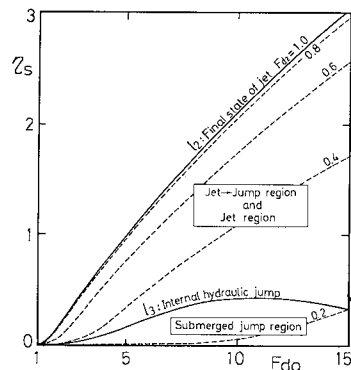


図-10 表面放流密度流の混合率

また、曲線  $l_3$  は図-6 に示された著者らの実験値を平滑化することによって描かれた完全内部跳水の混合率を示す。同図に基づいて表層放流密度流の流動形態を混合率と放流密度フルード数との関係で分類すれば、以下のようになる。

- a) 表層密度噴流 :  $0.0 < \eta_s \leq l_2$
- b) 遷移型内部跳水 :  $l_3 < \eta_s < l_2$
- c) 完全内部跳水 :  $\eta_s = l_3$
- d) 潜り内部跳水 :  $\eta_s < l_3$

完全内部跳水の連行領域は跳水先端部に限られること<sup>4)</sup>から、この跳水先端部が滞留層によって完全に被覆された潜り内部跳水の混合率は、完全内部跳水のそれと比較して小さいことが予想される。このことから、潜り内部跳水の混合率は定量的に上記 d) の関係を満たすものと推察される。

最大共役水深を示す曲線  $l_1$  は  $1.0 > F_{d2}$  であることから b) の範囲に入る。したがって、曲線  $l_1$  は同図中に表示できない。

### 6. 表層放流密度流の形態分類

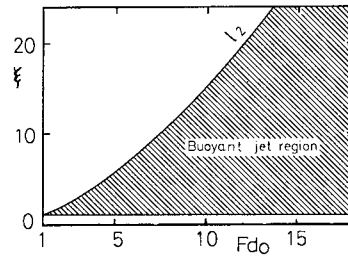
上述の議論のとおり、表層密度噴流と遷移型内部跳水の共役水深比の解の存在領域は重複部を有するため、一連の形態分類を単一座標平面上に描かれた曲線関係のみで表わすことには無理がある。そこで、以下ではそれを各流動形態ごとに分類して示すことにする。

図-11(a)~(d) は、それぞれ表層密度噴流、遷移型内部跳水 (理論的)、遷移型内部跳水 (現象論的)、完全内部跳水、潜り内部跳水の各流動形態における共役水深比  $\xi$  と放流密度フルード数  $F_{d0}$  との関係を示す。各図中の曲線番号は図-5 に準ずる。以下、各流動形態ごとに注釈を加える。

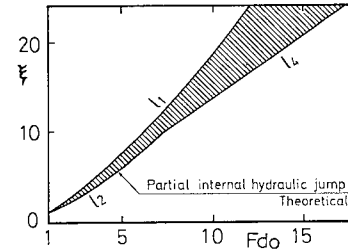
a) 表層密度噴流は理論上は  $F_{d2} = 1.0$  となる限界状態にまで遷移が可能である。したがって、放流後に限界状態に到達する以前の状態を含めれば、表層密度噴流の共役水深比  $\xi (\geq 1.0)$  は曲線  $l_2$  以下の値をすべてとり得る。

b) 理論的に得られる遷移型内部跳水の共役水深比の領域は、式 (5) に  $0.0 < F_{d2} < 1.0$  なる下流側支配条件を与えた場合に得られる  $\xi$  の解全体であり、図示された領域すべてである。

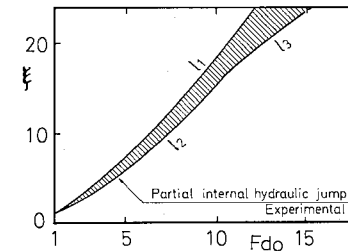
b') ただし、現実には跳水前部に密度噴流域を有する遷移型内部跳水の混合率が完全内部跳水のそれよりも小さくなることはあり得ない。したがって、実現象として得られる遷移型内部跳水の共役水深比の領域は、図-11(b) に示した理論解の領域から密度噴流の限界状態に対応する共役関係以下で、かつ完全内部跳水時の共役関係以下の領域を差し引いたもの、すなわち曲線  $l_1$  と



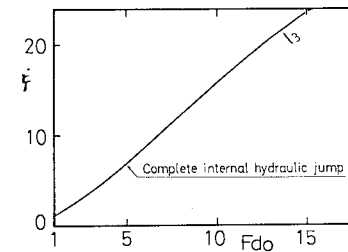
(a) 表層密度噴流



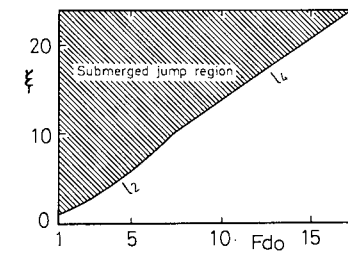
(b) 遷移型内部跳水 (理論的考察に基づく)



(b') 遷移型内部跳水 (実験結果に基づく)



(c) 完全内部跳水



(d) 潜り内部跳水

図-11 表層放流密度流の形態分類

$\min[l_2, l_3]$ とて囲まれる領域となる。

c) 完全内部跳水の共役関係は曲線  $l_3$  として表わされる。これは完全内部跳水が特殊な境界条件（跳水の先端と放流口端とが一致すること）を与えられた遷移型内部跳水の形態であるためである。

d) 潜り内部跳水の共役水深比の領域は、式(9)において混合率が  $\eta_s \geq 0.0$ 、パラメーター  $\beta$  が  $0 \leq \beta < 1$  で与えられたときに得られる  $\xi$  の解全体である。

## 7. 結 語

従来行われてきた表層放流密度流の形態分類は内部跳水に関する知見の欠如から必ずしも妥当なものとはいいがたかった。そこで、本報では著者らの一連の研究によって得られた内部跳水ならびに内部跳水を含む流れに関する定量的、定性的知見に基づいて、表層放流密度流の形態分類をあらためて行った。本研究で得られた主要な結果は以下のとおりである。

(1) 表層放流密度流は内部段波という非定常流動を介して、表層密度噴流から遷移型内部跳水、完全内部跳水、潜り内部跳水へと流動形態を様々に変化させる。

(2) 表層放流密度流が上記のいずれの流動形態をとるかは放流条件と下流側支配条件との関係により定まる。

(3) 流動形態は放流密度フルード数と支配断面間の混合率との関係から分類することが可能である。

(4) また、放流密度フルード数共役水深比との関係でも流動形態を分類することもできる。ただし、この場合には異なる流動形態を示す流れが相等しい共役水深比

を示すことがあり、注意を要する。

(5) 本論文において示された表層放流密度流の形態分類は従来のそれと比較して論理的で妥当である。

## 参 考 文 献

- 1) Stefan, H. : Stratification of flow from channel into deep lake, J. Hydraulics Div., Proc. ASCE, Vol. 96, No. HY 7, pp. 1417~1434, 1970.
- 2) 室田 明・中辻啓二・橋本長幸：表層密度流の界面における乱れ構造について，第23回水理講演会論文集，pp. 399~404, 1979.
- 3) 玉井信行・有田正光：表層放流二次元密度流の形態分類および最終上層厚について，第28回水理講演会論文集，pp. 121~127, 1984.
- 4) 室田 明・中辻啓二・中村圭二郎：内部跳水の流動形態一とくに反転流域の特性，第28回水理講演会論文集，pp. 321~326, 1984.
- 5) 室田 明・中辻啓二・中村圭二郎：内部跳水に観られる反転流動の混合機構に及ぼす役割，第29回水理講演会論文集，pp. 419~424, 1985.
- 6) 室田 明・中辻啓二・藪内生死：二次元表層密度噴流における大規模渦運動に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第339号，pp. 109~118, 1983.
- 7) Wilkinson, D.L. and Wood, I.R. : A rapidly varied flow phenomenon in a two-layer flow, J. Fluid Mech., Vol. 47, pp. 241~256, 1971.
- 8) Stefan, H. and Hayakawa, N. : Mixing induced by an internal hydraulic jump, Water Resources Bull. Am. Water Resources Assn, Vol. 8, pp. 531~545, 1972.
- 9) Hayakawa, N. : An analytical study of two-layered, rapidly varied flow, Proc. JSCE, No. 230, pp. 83~89, 1974.

(1985. 4. 8・受付)