

内部跳水の流動形態 — とくに反転流域の特性

Internal Hydraulic Jump—Flow Properties in Reverse Flow Region

大阪大学工学部 正 員 室田 明

大阪大学工学部 正 員 中辻 啓二

大阪大学大学院 学生員 ○中村圭二郎

1. 緒論

開水路での跳水がその界面上にローラーと称される反転渦動を有するのに対して、液-液二層流の内部跳水は主流部に沿った逆向きの流れ、すなわち反転流を有しており、両者の流動形態ならびに混合機構は著しく異なる。この反転流域の存在が内部跳水特有の現象であるにもかかわらず、従来の解析においてあまり考慮されることはなかった。従来の一連の研究では、理論的には開水路跳水と同様に内部跳水前後の運動量保存則から平均量特性を求める手法¹⁾²⁾³⁾がとられ、跳水の内部機構は議論されない。連行量を配慮して解析するとき⁴⁾⁵⁾⁶⁾、その理論展開に行きづまりを生じる。連行を考慮するための種々の試みはあるが、説得力のある理論展開はみられない。実験的にみれば、内部跳水は乱れ強度の大きい、エネルギー損失の大きい不連続過程であるにもかかわらず、連行率（あるいは混合率）が極端に小さいのは理解し難い事実であり、内部跳水の内部機構、とくに反転流が何らかの寄与を果たしているものと予想される。

そこで、本研究では内部跳水の界面に存在する反転流域の流動に着目して、その水理特性を実験的に明らかにするとともに、上下流体間の混合に果たす役割を実験事実に基づいたモデルを構築して検討する。

2. 実験装置と実験方法

実験水路は図-1に示す長さ600cm、高さ50cm、幅15cmの透明なアクリル製の二次元水路であり、水路床勾配は水平である。密度差は塩分濃度によって与えた。放流形式は上層淡水、下層塩水であり、それぞれヘッドタンクとの水頭差により供給した。流量調節はバルブによっておこない、フロート式面積流量計を用いてその流量を測定した。

流速と塩分濃度はそれぞれ一方熱線流速計（日本科学工業製）と電導度式塩分濃度計を用いて計測した。とくに反転流域の流速の値は小さく、熱線流速計では精度良い計測が不可能であることから、水素気泡発生装置（計測技研製）を併用して測定した。このことにより、跳水内部の流動を正確に把握することが可能となった。

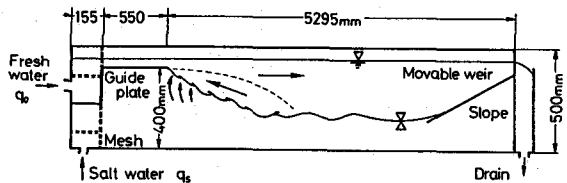


図-1 実験水路と内部跳水の概観

実験は、まず下流側堰高を所定高さに調節した水路に、所与の濃度の塩水を供給することからはじめる。塩水が下流端堰から溢流した後、所定流量の淡水を表層放流した。同時に、淡水流量と同量の下層塩水流量を補給するようにバルブを調整する。その時の淡水表層流は放流口近傍では密度噴流の挙動を示し、下流側では内部跳水を発生させる。この下流側に生じた内部跳水を下層塩水供給量を徐々に減少させることによって放流口側に移動させて、放流口端で完全内部跳水を生起させた。反転流域の始端位置が放流口端と一致する完全跳水を実験対象とした理由は以下のとおりである。(Ⅰ)広範囲の密度フルード数の内部跳水の実験が可能となる。(Ⅱ)噴流状態から遷移する内部跳水では、その時間・空間的定常性を得にくい。(Ⅲ)跳水始端での水理諸量を計測し易く、初期条件を定めるのが容易である。(Ⅳ)流動形態が噴流状態から遷移する内部跳水と基本的に同一であり、水理学的に相似である。

さて、得られた内部跳水の流動が普遍妥当なものか、実験装置固有のものなのかを、実験に先立って十分

に吟味しておく必要がある。ことに、後述する反転流動はその規模・強度ともに予想以上に大きく、その成因として水路下流端での放流水束の反射あるいは放流口端での負圧等の可能性が考えられる。そこで、種々の放流条件、ならびに密度噴流から内部跳水への遷移位置を変える予備実験を繰り返した結果、図-1の模式図にみられる顕著な反転流域の存在は内部跳水固有の現象であることが確認された。

表-1に、実験条件を示す。密度フルード数 F_{d0} は開水路跳水の形態分類と対応させて2～15の範囲を選んだ。また、ここに H_0 は放流口水深、 U_0 は放流口流速、 ρ_0 、 ρ_s はそれぞれ放流淡水、下層塩水の密度を表わす。

表-1 実験条件

Run	H_0 (cm)	U_0 (cm/s)	ρ_0 (gr/cm ³)	ρ_s (gr/cm ³)	F_{d0}
2200	3.20	21.0	1.00220	1.02270	2.65
1026	1.85	11.5	0.99980	1.00245	5.25
2100	1.70	25.0	1.00220	1.01105	6.55
3100	1.10	34.0	1.00270	1.01340	10.08
3026	1.87	27.0	0.99940	1.00180	12.89
3050	1.10	35.0	1.00210	1.00770	14.30

3. 実験結果

得られた主な結果を表-2に示す。ここに、添字 c は内部跳水の終了位置での水理諸量を示す。また、 ξ は H_c/H_0 の共役水深、 η は塩分濃度の希釈率より算出した連行比 $(\rho_c - \rho_0)/(\rho_s - \rho_c) = q_s/q_0$ を表わす。 q_s は下層塩水の連行流量、 q_0 は淡水放流流量である。 L_c は内部跳水の終了位置までの流程距離である。このときの終了位置は跳水にともなう界面低下の終了位置で定義しており、平均界面位置を目視観測によって読みとることにより決定した。

表-2 実験結果

F_{d0}	ρ_c (gr/cm ³)	η	H_c (cm)	ξ	L_c (cm)
2.65	1.00414	0.105	8.90	2.78	30
5.25	1.00006	0.163	13.20	7.14	60
6.55	1.00463	0.379	13.30	7.82	80
10.08	1.00583	0.413	15.00	13.64	85
12.89	1.00017	0.379	28.37	15.17	100
14.30	1.00334	0.284	24.40	22.18	100

(1) 内部跳水の基本特性

図-2は内部跳水前後の水深の共役関係を表わす。図中のプロットは予備実験の結果を含む実験結果を示す。また、実線は跳水前後に運動量保存則を適用し、連行を無視したときに得られる式(1)の共役関係を表わす。この関係式は開水路跳水と類似の式である。

$$\xi = \frac{1}{2} \left\{ -1 + \sqrt{1 + 8 F_{d0}^2} \right\} \quad (1)$$

既往の研究によれば、内部跳水の共役関係は式(1)をやや上回る傾向を示す。本実験の結果もおおむねその傾向を満たしている。このことは内部跳水がわずかな連行しか生じないことを示唆しており、もし連行を無視すれば当然の帰結としてエネルギー逸散 $\Delta E/E_0$ も密度フルード数の関数として一義的に求まることとなる。

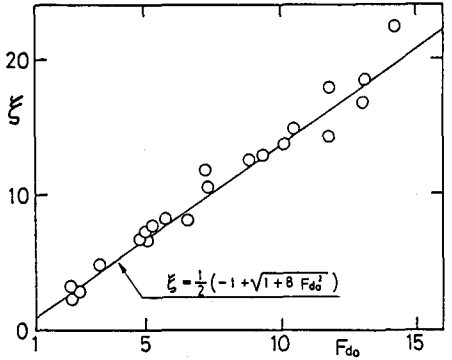


図-2 共役関係

図-3は跳水の長さ L_c と跳水後の水深 H_c との比 L_c/H_c と密度フルード数 Fd_0 との関係を示す。同図より、 L_c/H_c は $Fd_0=6\sim7$ 付近で極大値を有する凸型の分布性状を示しており、岩崎・上原⁷⁾の実験結果ともよく一致している。また、比較のために実験によって求められた開水路跳水における L_c/H_c とフルード数 F_0 の関係を図中に破線で示した。両者の傾向は低密度フルード数の領域では比較的よく一致する。しかし、開水路跳水の場合は $F_0>7$ の領域でも $L_c/H_c\approx 6$ でほぼ一定とみなしうのに対して、内部跳水の場合は高密度フルード数領域におけるその低減が著しい。これは本実験の L_c の定義の違いに原因しており、仮に反転流域の終端までの距離を L_c' と定義すれば、図中●印で示すように開水路跳水と類似の関係がもとまる。ただし、低密度フルード数の場合には L_c と L_c' は一致している。

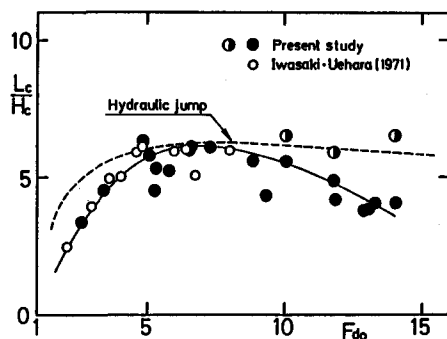


図-3 跳水の長さ

跳水の断面間に運動量保存則を適用し、密度、体積の連続条件を代入して、 η 、 ξ 、 Fd_0 を用いて整理すると以下の関係式を得る。ただし、下層塩水の水深は無限大と仮定している。誘導の詳細は省略する。

$$(1+\eta)\xi(1+2Fd_0^2) = \xi^3 + 2(1+\eta)^3Fd_0^2 \quad (2)$$

ここで連行なし、つまり $\eta=0$ を仮定すれば、式(1)が得られる。いま、連行による ξ の増分を連行なしの場合の ξ の $(k-1)$ 倍として次式のように表現する。

$$\xi = \frac{k}{2} \left\{ -1 + \sqrt{1 + 8Fd_0^2} \right\} \quad (3)$$

この関係式を式(2)に代入して、 k をパラメーターに連行比 η と密度フルード数 Fd_0 との関係を描いたのが図-4である。また、同図には実験値も併記している。同図より内部跳水の連行量は最大でも淡水放流流量の50%程度であることがわかる。この程度の連行では、 k の値は1.10~1.15しかとらず、連行による共役水深の増加は非常に小さい。(図-2参照)。また、 η は $Fd_0=10$ 付近で最大値となる凸型の分布を示す。一般に、跳水によるエネルギーの逸散量は密度フルード数の増大にともなって単調に増大する。逸散するエネルギーの一部が連行に寄与していると考えらるならば、高密度フルード数のRunでこのように η が低減する傾向を有していることは容易に認め難い実験事実である。このことに関しては、4のモデル化で検討する。

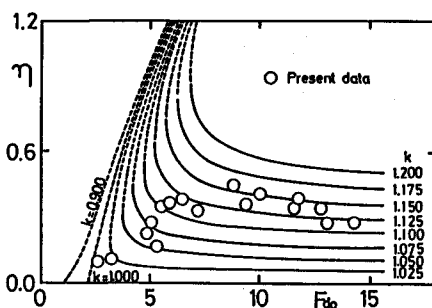


図-4 連行比 η

(2)内部跳水の流動形態

図-5は実測した流速 U 、密度差 $\Delta\rho$ ならびに密度変動 $\Delta\rho'$ の鉛直方向分布の流程方向変化の一例($Fd_0=12.89$)を示す。一連の実験結果より得られた内部跳水の流動形態ならびに混合特性をまとめると以下のようである。

- (i)内部跳水においては、開水路跳水にみられるようなフルード数による形態分類は認められず、密度フルード数 Fd_0 に無関係に図-5のような流動形態を示す。
- (ii)主流部流速の流程方向減速率は表層密度噴流のそれと比較して著しく大きい。
- (iii)流速 U ならびに密度差 $\Delta\rho$ の鉛直方向分布形には相似性が認められない。
- (iv)主流部の流量は下層塩水および反転流塊の集中的な連行によって跳水始端部で急激に増加するが、流下

とともに一様に減少する傾向がある。

(v)したがって、主流部において密度の増加する領域、すなわち連行領域は跳水始端部に限られる。

(vi)跳水主流部での混合は激しく、密度分布は $L_c/2$ の流程距離に達するまでに鉛直方向に一様となる。また、それ以降の下流域では密度分布の変化は認められない。

(3) 反転流域の流動特性

以上の流動特性に加えて、内部跳水特有の現象として主流部鉛直下方に拡がる反転流域の存在がある。

図-6、7は反転流域の層厚 H_r と反転流量 q_r の流程方向変化を示す。反転流域の流動特性に関する知見をまとめると以下のようなものである。

i) 反転流は表層放流水の鉛直下方に存在し、表層とは逆向きに跳水始端部に向かう流れであり、開水路跳水にみられるローラー、すなわち反転渦動とはその性質が異なる。

ii) 反転流域の規模(層厚および流量)は密度フルード数の増大とともに増加する傾向を有する。

iii) たとえば、高密度フルード数の場合には反転流域の層厚が放流口水深の約8倍、また表層主流部の層厚の約2倍にも達する大規模な流動である。

iv) 反転流量は跳水終端から主流部界面に沿って跳水始端へと遡上するにつれて徐々に増加し、主流部の連行領域にさしかかる位置で極大値となり、以降跳水始端にかけて急激に減少する。その流量の極大値は放流淡水流量の30～50%にも達する。

v) $Fd_0 > 9$ の Run (開水路跳水の分類にならえば強跳水に属する) では、反転流は跳水終端位置、すなわち界面低下の終了位置でもなお存在する。この反転流は図-3に示した $L_c'/H_c \approx 6$ の範囲まで認められる。しかしながら、その領域の流動は跳水終端部に卓越する界面波の進行に呼応して、流向が正負に変動する非常に不安定な交番流の特性をもっている。また、この流動は流下方向に界面波が減衰してゆくのにともなって次第に消滅する傾向にある。

つぎに、以上の議論に基づいて主流部と反転流域の流量の流程方向変化を模式化してみよう。図-8の横軸は放流口を原点とした流程距離、縦軸上方に主流部流量 q_m 、下方に反転流量 q_r を示す。前述したように、主流部流量は跳水始端部で急増し、以降跳水終端にかけてほぼ一様に減少する。このことは、主流部の流体塊が主流界面を通して反転流域へ放出されることを示唆する。このようにして主流外側へ放出された流体塊はその密度差のために二層間に滞留し、重力安定に支配されて主流界面沿いに遡上する。それゆえ、反転流量は主流部から一方的な流量の供給を受け、跳水終端部から徐々に増加しながら遡上をつづけて連行領域直前で極大値をとることになる。そして、連行領域では再び主流部へと再連行される結果、反転流量は急激に減少する。

表層放流水と周囲環境水間の混合という観点からみれば、このような反転流域の存在は跳水主流部の活性

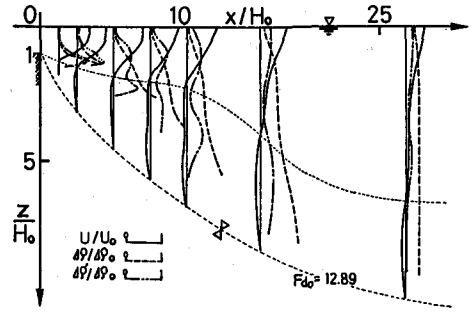


図-5 U , $\Delta\rho$, ρ' の流程方向変化

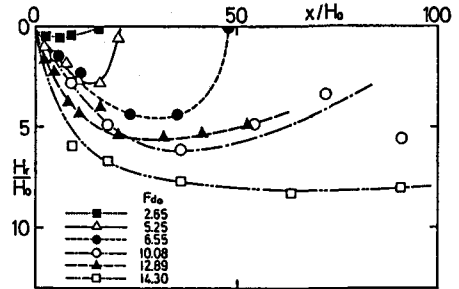


図-6 反転流域の層厚の流程方向変化

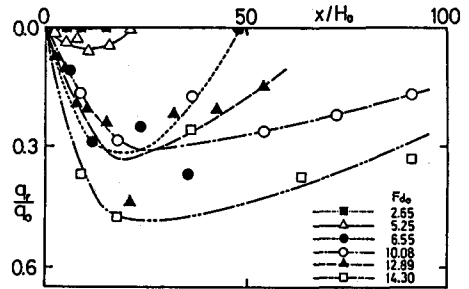


図-7 反転流量の流程方向変化

を周囲環境水から遮断する一種の緩衝帯としての役割を果たしており、この領域における周囲環境水の連行を阻害しているものと考えられる。さらに、この反転流は跳水始端部へと流動し、連行領域で主流部に再連行されることによってひとつの循環を形成する。

4. 流量収支に基づく連行モデル

本章では、図-4に示した連行比 η と密度フルード数 Fd_0 との関係、とくに高密度フルード数領域における η の低減傾向を反転流域の特性を考慮したモデルを構築することによって合理的に説明する。モデル化にあたっての仮定は以下のとおりである。

①反転流の成因である主流部からの流体塊の放出と主流界面からの周囲環境水の連行という相反する作用はそれぞれ跳水内部に存在する異なるスケールの渦動の働きによってもたらされる。

②跳水内部の渦動の強度は各流程での平均流からの逸散エネルギー ΔE に比例する。これより、主流部単位長さあたりの放出流量 Q_R 、連行流量 Q_E ともに ΔE に相関すると考える。

③逸散エネルギー ΔE は跳水始端から終端にかけて単調に減少する。

④モデル化を行なう跳水は跳水終端と反転流域の終端の一致する安定な内部跳水である。

図-9は以上の仮定に基づく流量収支モデルを示す。図中の曲線 Q_{RI} は主流部からの放出流量を表わす。まず、区間 $[L_E, L_C]$ に着目する。この区間では $Q_{RI} > Q_E$ である。すなわち、主流部より放出される流量が界面からの連行量を上回って、結果的に反転流域の増加をもたらす。その流量増加分は曲線 Q_{RI} と Q_E で囲まれる面積で表わされる。つぎに、区間 $[0, L_E]$ に着目する。この区間では逆に $Q_{RI} < Q_E$ であり、主流部への周囲環境水の連行が生じる。総連行量は曲線 Q_E と Q_{RI} で囲まれる面積に相当する。ところが、先の区間 $[L_E, L_C]$ で生じた反転流塊が主流界面沿いに遡上してきて、この区間で周囲環境水よりも優先的に再連行されることから、結局図中の斜線部の流量が相殺されて（再連行に費やされる）、実質的な連行が抑制される。このことから、高密度フルード数領域では反転流量が増大し（図-7）、それが連行領域を直接的に脅かすことによって、連行比 η が減少するものと思われる。

一方、曲線 Q_{RS} は潜り跳水の例である。この場合、下流域に生じた大量の反転流塊を受け入れるだけの連行能力が跳水始端部になく、再連行されない余剰の流塊が放流口近傍に充満してゆくことになる。すなわち、表層放流水が放流口端で段落ちとなる潜り跳水の現象をこのモデルによりうまく説明できる。

5. 連行量の算定

図-10は、以上のモデルに基づき、下層塩水の連行量と反転流量の和で表わした総連行量と密度フルード数との関係を示したものである。図中の点線 α は実験結果より求めた反転流量の極大値 q_{rmax} と淡水放流流量 q_0 との比 q_{rmax}/q_0 を示す。また、破線 $\Delta E/E_0$ は跳水にともなう連行を無視したときに得られる跳水断

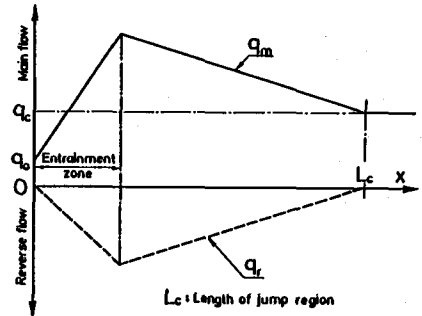


図-8 主流部と反転流域の流量の変化の模式図

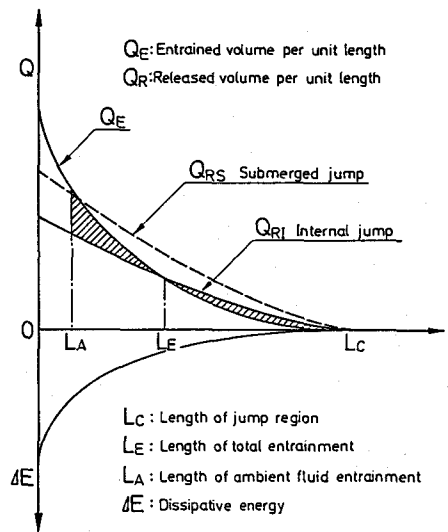


図-9 流量収支モデル

面間の逸散エネルギーを示す。図-4の連行比 η と α の和で表わされる総連行量 $(\eta + \alpha)$ 曲線と密度フルード数の関数である $\Delta E/E_0$ 曲線は非常に類似していることがわかる。このことは、跳水断面間で逸散するエネルギーに比例して総連行が生じていることを推量させる。

そこで、同図に示す $(\eta + \alpha)$ とエネルギー逸散 $\Delta E/E_0$ の間に以下に示す線型関係を仮定した。

$$(\eta + \alpha) = a(\Delta E/E_0) + b \quad (4)$$

ここに、

$$\Delta E/E_0 = \{(F_{d0}^2 + 2)\xi^2 - 2\xi^3 - F_{d0}^2\} / (F_{d0}^2 + 2)\xi^2 \quad (5)$$

上式に、実験によって得られた η 、 α 、 F_{d0} を代入することにより、 $a=1.0$ 、 $b=-0.128$ を得た。

図-11の実線は式(4)を用いて算出した η と密度フルード数 F_{d0} の関係を示す。図中の旗印のある記号は実線の算定に用いた実験値である。式(4)は広範囲の密度フルード数での実験結果をよく説明しており、反転流動を考慮した単純な流量収支の関係から内部跳水の連行量特性を十分に示すことができた。

6. 結 論

本研究では、これまでほとんどふれられることのなかった内部跳水の流動形態ならびに混合機構の実験的解明をおこなった。その結果、内部跳水に付加的な渦動と考えられてきた反転流域の流動は実際は表層流との間で大規模な循環を形成しており、非常に大きな強度を有していることがわかった。さらに、この反転流は跳水表層流の活性を周囲環境水から遮断して抑制するばかりでなく、連行領域を脅かすことによって周囲環境水の連行を直接的に阻害し、内部跳水の混合希釈特性にも多大の影響を及ぼしていることが明らかとなった。逸散するエネルギーが莫大なのに対して連行量が比較的少ない実験事実はこの反転流の存在に原因しているものと考えてよい。最後に、反転流域の再連行過程を考慮した流量収支モデルを展開することにより、内部跳水の連行量特性を説明した。今後は、さらに跳水の内部機構の詳細な解明をおこない、反転流の発生機構と内部跳水の連行機構を明らかにしてゆく方針である。

参考文献

- 1) Yih, C.S. & Guha, C.R.; Tellus., Vol. 7, No. 3, 1955, pp. 358-366.
- 2) 浜田徳一; 第5回海岸工学講演会講演集, 1958, pp. 7-11.
- 3) 岩崎敏夫; 水工学シリーズ66-15, 1966.
- 4) Wilkinson, D.C. & Wood, I.R.; J. of Fluid Mech., Vol. 47, 1971, pp. 241-256.
- 5) Stefan, H. & Hayakawa, N.; Water Resources Bulletin, Vol. 8, No. 3, 1972, pp. 531-545.
- 6) 中村 充・乃万俊文・龍富士夫; 第25回海岸工学講演会論文集, 1978, pp. 456-459.
- 7) U.S. Bureau of Reclamation; Hydraulic Laboratory Report. No. Hyd-399, 1955.
- 8) 岩崎敏夫・上原忠保; 第18回海岸工学講演会論文集, 1971, pp. 299-304.

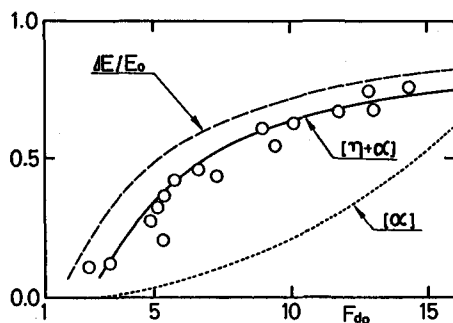


図-10 総連行量と逸散エネルギー

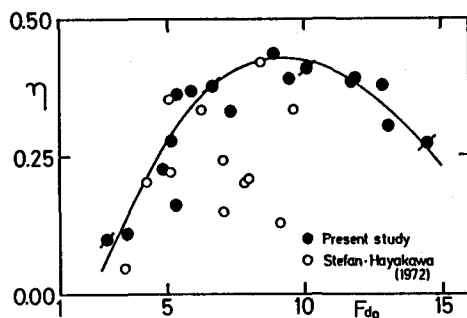


図-11 連行量の算定曲線