

大阪大学大学院 学生員 中村 圭二郎
 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

1. まえがき ; 開水路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、液-液二層流の内部跳水は主流部に沿った反転流域を有し、両者の形態ならびに混合機構は著しく異なる。この反転流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ふれられることはなかった。本研究では反転流域の特性に着目した実験をおこない、混合機構に果たす役割について検討した。

2. 実験方法 ; 実験には長さ6m、幅15cm、高さ50cmの透明アクリル製水平矩形断面水路を用いた。放流形式は上層淡水流動、下層塩水静止である。流速の測定にはホットフィルムと水素気泡を併用し、跳水内部の流速の反転位置や界面位置を精度よく把握することに努めた。また、密度の測定には電導度式濃度計を用いた。実験は開水路跳水での流動形態の分類との対応を考慮して、密度フルード数 $F_{d0} = 2.65 \sim 14.30$ の範囲でおこなった。

3. 実験結果 ; 図-1は定点計測により得られた流速・密度分布の流程方向変化を示す。同図は $F_{d0} = 6.55$ の場合である。また、図-2、図-3に反転流域の広がりや反転流量の流程方向変化を示す。ここに添字0、rはそれぞれ放流口、反転流域での諸量を表わす。実験によって得られた知見をまとめると、以下のようである。①開水路跳水にみられるフルード数による形態分類は内部跳水では認められない。②反転流域の規模は F_{d0} に比例して増大する。③反転流量は

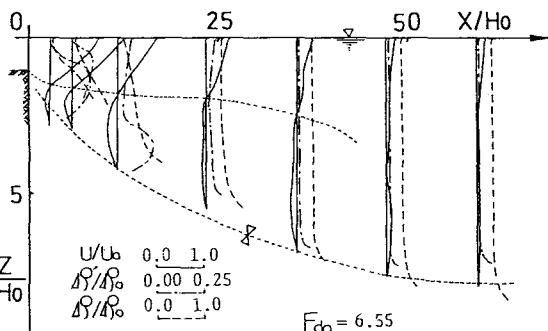


図-1. 流速・密度の流程方向変化

跳水終端部より漸増し放流量の3割程度にも達する。また、それは跳水始端部で急減する。④主流部流量は跳水始端から終端にかけてほぼ一様に減少する。⑤主流部流速の急減は噴流のそれに比べて急激である。また、流速分布はガウス分布を示さず、

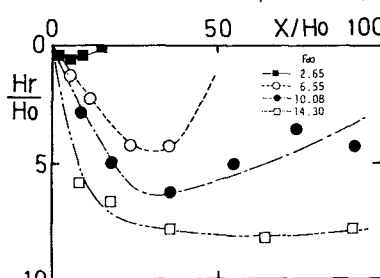


図-2. 反転流域の広がり

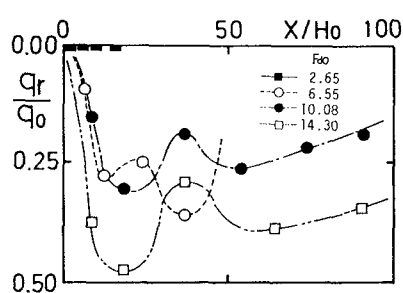


図-3. 反転流域流量

保存されることもない。⑥密度は跳水始端部で集中的に増加し、その後急速に混合されて跳水の中間位置付近で断面内一様の分布を示す。その値は流程方向に変化しない。

以上の知見に基づき跳水内部の流動形態を模式的に描いたのが図-4である。反転流の成因は、跳水の水深拡大作用によって主流部から鉛直下方へ放出された流体塊が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跳水始端へ逆流することにあると考えられる。

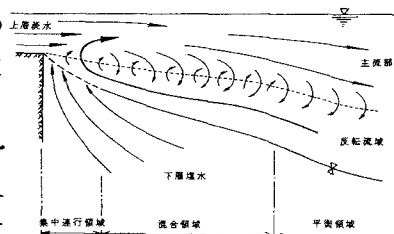


図-4. 放流口近傍の流動形態

この反転流の存在は跳水内部の擾乱を抑制するとともに、擾乱の拡大に対して一種の緩衝帯の役割を果たし、跳水界面からの連行を妨げる。図-2からもわかるとおり、この反転流塊は主流界面沿いに逆上しつづけ、

跳水の始端部で集中的に主流部へと再連行される。したがって、周囲流体(下層塩水)の連行も放流口直下の跳水始端部に局在化されるようである。

(1) 連行特性 ; 図-5は内部跳水の連行比 $\eta = q_r / q_o \times F_{d0}$ の関係を示す。早川¹⁾、中村²⁾の結果も同図に併記した。本実験結果から η は $F_{d0} = 10$ 付近でピークを有する凸形の分布を呈するものと予想される。最大値は0.4程度であり、早川の結果と一致する。

(2) 反転流と連行 ; 図-4より、反転流の成因は跳水の急激な水深拡大作用と深い関係があると思われる。そこで、逸散エネルギーに着目したモデル化を試みる。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流体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。つまり放出流量 Q_R 、連行流量 Q_E ともに ΔE に比例すると考える。③逸散エネルギーは跳水の始端から終端にかけて単調に減少する。④モデル化をおこなう跳水は、跳水の終端と反転流域の終端位置が一致する安定跳水タイプである。

図-6に以上の仮定に基づく連行領域モデルを示す。図中曲線 Q_{RC} は完全跳水を表す。まず、区間 $[L_e, L_c]$ に着目する。この区間では $Q_{RC} > Q_E$ である。すなわち、主流界面より放出される流量が界面からの連行量に勝っている。

したがって結果的に反転流塊を生じさせ、その総流量は曲線 Q_{RC} と Q_E で囲まれる面積で表わされることになる。つぎに、区間 $[0, L_e]$ に着目する。この区間では逆に $Q_{RC} < Q_E$ であり、主流部への周囲流体の連行が生じる。総連行量は曲線 Q_E と Q_{RC} で囲まれる面積である。ところが、先の区間で生じた反転流塊は主流界面上を遡上してくるため、それがこの領域で再連行することとなり、結局斜線部の流量が相殺されて(再連行に費やされる)、実質的な周囲流体の連行が抑制される。このことから、高 F_{d0} 数領域では反転流量が増大し、これが直接的に連行領域を脅かすことによって η が減少するものと思われる。一方、曲線 Q_{RS} は潜り跳水を表す。この場合、下流域に生じた反転流量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次第に充満してゆくことになる。ちなみに、曲線 Q_{RJ} は全域で連行を生ずる噴流のモデルを表わしている。

(3) 連行量解析 ; 図-6に示したモデルに基づき、 $[\eta + \alpha]$ ($\alpha = q_r / q_o$: q_r は跳水始端部での反転流量)と跳水の前後で放流淡水が失うエネルギー $\Delta E / E_o$ の間に簡単な線形関係を仮定する。すなわち、

$$[\eta + \alpha] = f_{unc.}(\Delta E / E_o) = a(\Delta E / E_o) + b \doteq (\Delta E / E_o) + c$$

ここに、 $\Delta E / E_o = \{(F_{d0}^2 + 2)\xi^2 - 2\xi^3 - F_{d0}^2\} / (F_{d0}^2 + 2)\xi^2$, $\xi = \frac{1}{2}\{-1 + \sqrt{1 + 8F_{d0}^2}\}$ である。

上式に実験によって得られた η, α, F_{d0} を代入して算出した結果を図-5に破線で示す。図中旗印のあるシンボルは算定に用いた現点である。反転流量を考慮することにより高 F_{d0} 数域での η の遁減が説明できるものと考えられる。以上のモデルは甚だ未完成なものである。しかし、運動量保存的な考え方で行き詰まっていた内部跳水の解析において、反転流の存在と逸散エネルギーの評価を勘案することにより、その形態と混合機構のモデル化が可能となることを示している。

<参考文献> 1) Stefan, H. and Hayakawa, N. (1972), Water Resour. Res., vol. 8, pp. 531-545.

2) 中村 充, 乃万俊文, 龍富士夫 (1978), 土木学会第25回海講演文集, pp. 456-459.

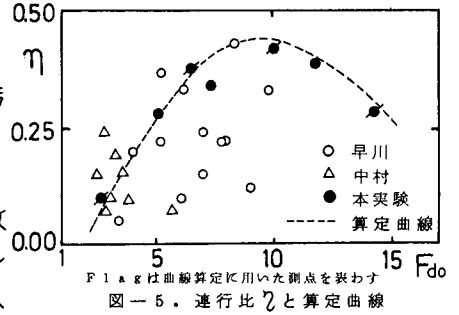


Fig. 5. 連行比 η と算定曲線

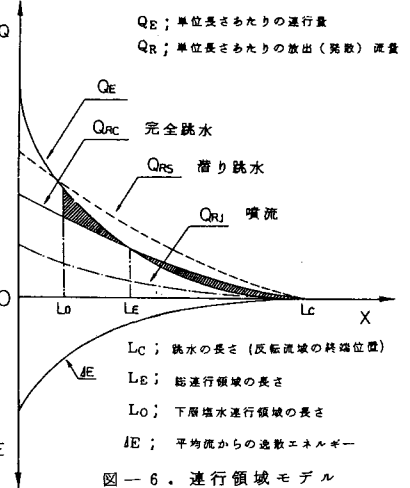


図-6. 連行領域モデル