

潜入密度流の流動特性について

九州工業大学工学部 学生員 ○土居 正明、音なぎ 哲也、正会員 秋山 壽一郎、浦 勝
九州工業大学大学院 学生員 西 恭太

1. はじめに

貯水池上流端で発生する淡水赤潮の池内対策としてフェンス工(以下では幕と略称する)がある。しかし、潜入密度流と幕の設置効果との関係についてはよくわかっていないのが実状である¹⁾。本研究は、緩勾配を含むより広範囲な水路床勾配での潜入密度流現象について検討を加えたものである。

2. 実験

実験装置は、前面アクリル製の水槽(長さ 9.0m、深さ 1.2m、幅 0.6m)中に長さ 1.15m の水平部と下端部が段落ちになった傾斜部よりなる幅 0.1m の水路を設置したものである。水路水平部の水深 h_0 を 0.05m の一定に保ち、傾斜部の水路床勾配 I を 1/150~1/30 で変化させるとともに、流入内部 Froude 数 $F_0(=(q_0^2/\epsilon_0 g h_0^3)^{1/2})$ を変化させ実験を行った。ここに、 h_p =潜入水深、 q_0 =単位幅流入流量、 $\epsilon_0=(\rho_0-\rho_a)/\rho_a$ 、 g =重力加速度、 ρ_0 と ρ_a はそれぞれ流入水と周囲水の密度である。潜入密度流の流れの定義図と幕の設置に伴う重要な諸量を併せて図-1 に示す。

実験・解析方法としては、スリット光で可視化した潜入点近傍の流れを CCD カメラで撮影した画像をコンピューター解析することで、潜入水深 h_p および界面形状を求めた。また、潜入点から測って $30h_p$ の下流での下層密度流の流速と塩分濃度分布をそれぞれサーマル式微流速計と導電率計を用いて計測した。それぞれの分布を積分することで得られた流量と層平均浮力より、初期混合率 γ を算定した。

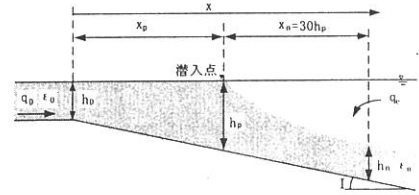


図-1 流れの定義図と重要な諸量

3. 潜入密度流の流動特性

等幅矩形断面水路では潜入水深 h_p と初期混合率 γ はそれぞれ式(1)と式(2)のように定義される。ここに、 F_p =潜入点での内部 Froude 数($=q_0^2/\epsilon_0 g h_p^3$)^{1/2} および h_c =内部限界水深($=q_0^2/\epsilon_0 g$)^{1/3} である。等幅矩形断面水路を対象とした室内実験で得られたデータ中で水路床勾配 I との関係がわかっているデータに基づき、これまでの知見を総括すると、 F_p については $I=1/60\sim 1/3$ の範囲で約 0.25~1.0 の範囲の値を取り、平均的には $F_p \approx 0.56$ 程度となる。 F_p 値がばらつく要因としては、 I と F_0 により、流動形態が変化するため、この影響を受けること、潜入点の位置が安定するまでに時間を要するため、実験で必ずしも安定した潜入水深が得られているとは限らないこと、などが考えられる。一方、 γ については流速あるいは密度分布形等の正確な計測が必要なこともあって、研究例は僅かであるが、これまでの知見を総括すると、 $\gamma=0\sim$ 約 2.0 の範囲の値を取るようである¹⁾。しかし、水路床勾配との関係については全くわかっていない。

潜入密度流の特性は、水路床勾配 I に依存する可能性があるため、下層密度流の限界勾配 I_c がどのような値を取るのかを明確にしておく必要がある。まず、下層密度流の流速分布と密度分布に基づき、式(3)に定義するモーメント法で層平均流速 U と層平均浮力 B および層厚 h を求め、下層密度流の Froude 数 $F_n(=(q_n^2/\epsilon_n g h_n^3)^{1/2})$ を算定した。ここに添字 n は下層密度流の特性量であることを示す。

$$h_p / h_c = F_p^{-2/3} \quad (1) \quad ; \quad \gamma = q_c / q_0 \quad (2)$$

$$Uh = \int_0^\infty u dy \quad ; \quad UBh = \int_0^\infty u b dy \quad ; \quad U^2 h = \int_0^\infty u^2 dy \quad (3)$$

図-2 は、このようにして得られた F_n と I との関係について調べたものである。これより、限界勾配は

$I_c \approx 1/50$ であると判断される。これは、上述した $F_p \approx 0.56$ が限界勾配に極めて近い緩勾配を含む急勾配での平均的な F_p 値であることを意味している。

F_p と h_p/h_0 との関係について調べたものが図-3 である。これより、 $h_p/h_0 \approx 2.0$ 以上では I_c と同じかそれ以下の F_p 値はほぼ一定値を取り、それ以下では F_p 値が大きくなるから、少なくとも急勾配水路では $h_p/h_0 \geq 2.0$ 以上では $F_p \approx 0.60$ となること、急勾配水路でも流入点に近い点で潜入する場合や緩勾配水路で h_p/h_0 が小さい場合には F_p 値が変化することがわかる。

水路の幾何学的形状より式(4)の関係があるので、図-3 でみた h_p/h_0 は x_p と I で規定されている。そこで、 x_p/L と F_0 との関係を調べたものが図-4 である。ここに、 L は flow force と buoyancy flux の保存より得られる長さスケール $L=(h_0 F_0^{4/3}(1+0.5 F_0^{-2}))$ である。これより、今回得られた $I=1/30$ のデータも含めて、 $I \geq I_c$ で $F_0 \geq 2.0$ で x_p/L はほぼ一定値を取るが、それ以下では x_p/L はほぼ線形的に増加することがわかる。また、 $I < I_c$ の $F_0 \geq 1.5$ のデータが得られていないので、 x_p/L がどのような値を取るのかは不明であるが、これ以下では $I \geq I_c$ の場合と同様に各 I についてほぼ線形的に増加することがわかる。以上より、急勾配水路では $F_p \approx 0.60$ なる一定値を取ると考えられるが、 $F_0 \leq 2.0$ では式(5)のような関係が予想される。ここに、 a は I の大きさによって決定される定数であり、 $I > I_c$ では $a \approx 5.0$ の一定値を取り、 $I < I_c$ では I によって変化し、図-4 に基づけば、 $I=1/50$ で $a \approx 15$ 、 $1/60$ で $a \approx 29$ 、 $1/80$ で $a \approx 32$ のようになる。図-5 は式(4)と式(5)より得られる式(6)の妥当性を検証した図であり、ややばらつきは認められるものの、傾きが 1.0 の実線に従っておりこの関係が成立していることが確認できる。ここに、 $\phi = F_0^{4/3}(1+0.5 F_0^{-2})$ である。

$$h_p/h_0 = 1 + x_p I / h_0 \quad (4); \quad x_p/L = a F_0 \quad (5); \quad F_p/F_0 = (1 + a \phi F_0 I)^{-3/2} \quad (6)$$

図-6 は、潜入密度流下流での流速と塩分濃度分布の両測定結果に基づき算定された γ と I との関係について調べたものである。データのばらつきは認められるが、 $I=1/150 \sim 1/30$ の範囲では、式(7)の関係が成立するようである。なお、図中の矢印はエラーバーである。また、 $I=1/50$ での Lee & Yu²⁾の結果は $\gamma \approx 0.17$ となっており、本研究で得られた γ 値とほぼ一致している。

$$\gamma \approx 6I + 0.02 \quad (7)$$

4. まとめ

本研究より、等幅矩形断面水路での潜入密度流について、潜入点での内部 Froude 数 F_p は、急勾配水路で h_p/h_0 あるいは $F_0 \geq 2.0$ 以上であれば、 $F_p \approx 0.60$ となること、 h_p/h_0 あるいは $F_0 < 2.0$ では急勾配水路であっても流入点に近い点で潜入する場合や緩勾配水路では F_p 値が変化し、そこでの F_p は式(6)で表せること、初期混合率 γ は水路床勾配 I に依存し、式(7)の関係が成立することなどの知見が得られた。

参考文献： 1) 秋山壽一郎：流入型密度流の水力特性とその予測，湖沼，貯水地の管理に向けた富栄養化現象に関する学術研究のとりまとめ，土木学会水理委員会，環境水理部会，pp.69-167, 2000. 2) Lee, H.Y & Yu, W.S.: Experimental study on reservoir turbidity current, *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol.123, No.6, pp.520-528, 1997.

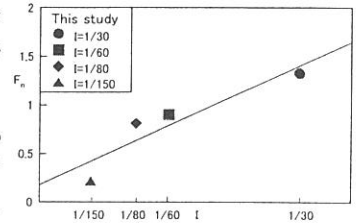


図-2 F_p と I との関係

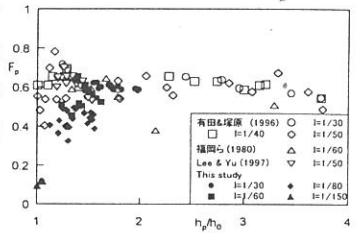


図-3 F_p と h_p/h_0 との関係

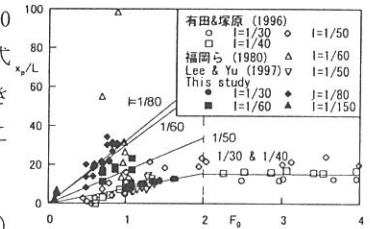


図-4 x_p/L と F_0 との関係

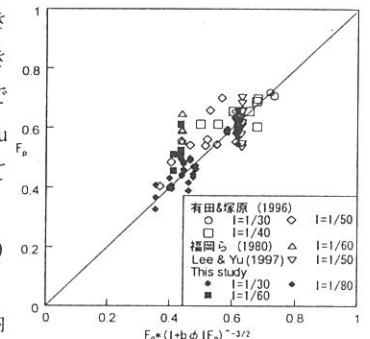


図-5 式(6)の検討

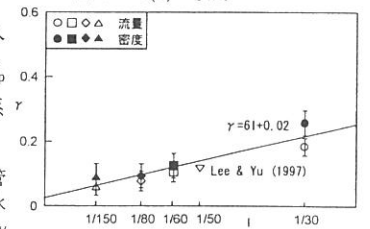


図-6 γ と I との関係