

漸拡水路における表層流の流動特性

九州工業大学工学部 学生員 ○賀籠六 淳一、正会員 秋山 壽一郎、浦 勝
九州工業大学大学院 学生員 山崎 勉、片山 哲幸

1. はじめに

貯水池上流端で発生する淡水赤潮に対する池内対策の一つとしてフェンス工（以下では、簡単のため幕と呼ぶ）がある。しかし、その設置深さや幕の設置する希釈混合効果について十分な知見が得られているわけではない。本研究は、ダム貯水池のように下流に向かって水路幅が漸拡するような水域での表層流のフロント特性についてに検討を加えたものである。

2. 実験

実験装置は、図-1 に示すように、水深 $h=50\text{cm}$ の塩水(密度 ρ_a)を満たしたアクリル製の水槽(長さ 5.0m、幅 0.2m、高さ 0.6m)中に水路幅 B_0 、水深 a の流入部と側壁の拡がり角度 $\alpha=1.24^\circ$ の漸拡水路を設置したものである。流入部内部の水位が水槽内に貯留された塩水の水位と一致した瞬間に流入部前面のゲートを引き上げ、ウラニンで着色した淡水(ρ_0)を一定流入流量 Q_0 で貯留水中に放出し表層流を発生させた。流入部の内部には、越流堰が設置されており、一定流量 Q_i でヘッドタンクから供給された淡水の一部は、一定流量 Q_e で越流堰の左側に流出し、流入流量 Q_0 を一定に保つようになっている。なお、流入流量は $Q_0=Q_i-Q_e$ より算定した。

表層流の浮力・慣性力領域、浮力・粘性力領域あるいは浮力・慣性力領域が現れるように、水路の幾何学的条件(a, B_0)と流入条件(Q_0, ϵ_0)を様々に変化させ実験を行った。ここに、 ϵ_0 は初期相対密度差($=(\rho_a-\rho_0)/\rho_a$)である。その際、流入水が水槽に流出した直後に生じる初期混合が極めて小さくなるように、流入点での内部Froude数($F_0=Q_0/B_0(\epsilon_0 g a^3)^{1/2}$)を $F_0=0.06\sim 0.89$ の範囲で変化させた。実験条件を表-1に示す。

測定内容としては、中心軸に沿ってスリット光を照射し、可視化した表層流フロントの様子をCCDカメラで撮影し、デジタルVTRに収録された画像をコンピュータ解析することにより、表層流のフロント形状とフロント侵入半径 R を求めた。

3. 漸拡水路における表層流フロントの流動特性

上下層が明確な界面を有し、水表面にせん断力が働かない場合の軸対称表層流の無次元フロント侵入半径 R^* は、浮力・慣性力領域では式(1)、浮力・粘性力領域では式(2)でそれぞれ与えられる。一方、浮力・慣性力領域と浮力・粘性力領域の無次元フロント層厚 b^* は、それぞれ式(3)と式(4)で与えられる²⁾。

$$R_1^* (=R/(\epsilon_0 g Q_0 t_1^3)^{1/4}) = c_1 (t/t_1)^{3/4} \quad (1) \quad ; \quad R_2^* (=R/[(\epsilon_0 g Q_0^2 / v^{1/2})^{1/6} t_1^{7/12}]) = c_2 (t/t_1)^{7/12} \quad (2)$$

$$b_1^* (=b/[(Q_0 / \epsilon_0 g)^{1/2} t_1^{-1/2}]) = c_3 (t/t_1)^{-1/2} \quad (3) \quad ; \quad b_2^* (=b/[(v^{1/2} Q_0 / \epsilon_0 g)^{1/3} t_1^{-1/6}]) = c_4 (t/t_1)^{-1/6} \quad (4)$$

$$F_f = c_5 \quad (5) \quad ; \quad F_f = c_6 (t/t_1)^{-1/3} \quad (6)$$

フロントの内部Froude数 $F_f (=U^{3/2} S^{1/2} / (\epsilon_0 g Q_0)^{1/2})$ は、式(1)と式(2)を微分して得られるフロント移動速度 U とフロント最先端の円弧長 $S = \alpha \pi R / 90$ を用いると、浮力・慣性力領域と浮力・粘性力領域でそれぞれ式(5)と式(6)のように得られる。ここに、 t_1 は両領域の遷移時間($= (Q_0 / \epsilon_0 g v)^{1/2}$)である。

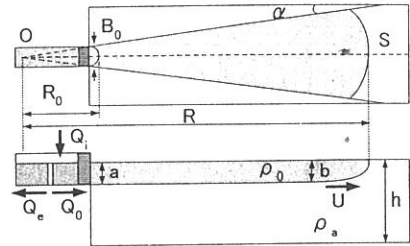


図-1 実験装置および流れの定義図

表-1 実験条件

	B_0 (cm)	ϵ_0	Q_0 (cm^3/s)
I-1-1	5	0.03	222
I-1-2	5	0.02	202
I-2-1	5	0.04	156
I-2-2	5	0.03	146
I-3-1	5	0.02	96.7
I-4-1	5	0.01	59.8
I-4-2	5	0.0025	30
I-5-1	5	0.02	29
I-6-1	5	0.01	10
I-6-2	5	0.01	9.9
I-7-1	2	0.05	124
I-7-2	0.7	0.05	45.5
I-7-3	0.7	0.1	68

これらの関係式は、フロントの局所的な特性量ではなく流入条件に基づいている点が利点であるが、各定数 c_{1-6} の値が全くわかっていないため、実際に適用することはできない。そこで以下ではこれらの定数値を明らかにする。ここで、 R_0^* は $R_0^*=R_0/(\epsilon_0 g Q_0 t_1^3)^{1/4}$ で定義される無次元流入半径である。

図-1の状況に対する上記の関係式の妥当性を調べるためには、フロントが仮想原点から流入点までの距離 R_0 を移動するのに要する経過時間 t_0 を知る必要がある。そこでまず、実験装置の範囲内で R_0^* を可能な限り小さく設定した疑似軸対称流である $R_0^* \leq 0.6$ のCASE I-7の結果に基づき、 c_1 を算定した。図-2は、この場合の R_1^* と t/t_1 との関係を示したものである。これより、 R_1^* は t/t_1 の $3/4$ 乗に比例しており、ほぼ軸対称流となっていることが確認できる。これより、 $c_1 \approx 3.70$ のように同定される。次に、この c_1 の値と式(1)より、 $R_1=R_0$ となる t_0 を求め、この t_0 を実験結果から得られた流入点からの経過時間に加えることで、仮想原点からの経過時間 t を求めた。このようにして得られた各領域における R^* と t/t_1 との関係を示したものが図-3である。これより、 $t/t_1=1.0$ 前後を境にして、 R^* の t/t_1 に対する依存性が変化しており、浮力・慣性力領域では t/t_1 の $3/4$ 乗に、浮力・粘性力領域では $7/12$ 乗に比例していることから、図-1の状況でも、上記のような補正をすることで、軸対称表層流の関係式が適用できることがわかる。同図に基づき c_2 を推定すると、 $c_2 \approx 3.70$ が得られる。なお、既往の研究¹⁾によれば、漸拡水路での密度流は、 $\alpha \leq 7^\circ$ であれば中心軸に沿って軸対称であり、壁面での剥離が発生しないことがわかっている。従って、上記の関係式と係数は、この範囲の漸拡水路で適用できると考えられる。

図-4は、各領域における b^* と t/t_1 との関係について調べたものである。表層流フロントの形状は、流入直後はカルマンヘッド的な形状を呈するものの、その後は楔状に変化する。このため、浮力・慣性力領域では画像よりある程度代表的な層厚を判別することができるが、浮力・粘性力領域では楔状に変化するため、代表的な層厚は存在しない。そこで、ここでは $0.95R$ の位置での層厚をもって b と定義した。このように定義の困難さもあって、 b^* については、データのばらつきが認められるが、ほぼ各領域で式(3)と式(4)の関係に従っていることがわかる。同図に基づき定数値 c_3 と c_4 を推定すると、それぞれ $c_3 \approx 2.1$ および $c_4 \approx 2.5$ ようになる。図-5は、各領域における F_f と t/t_1 との関係を示したものであり、各領域でほぼ式(5)と式(6)の関係に従っていることがわかる。同図に基づき定数値 c_5 と c_6 を推定すると、それぞれ $c_5 \approx 1.9$ および $c_6 \approx 1.5$ ようになる。ここで、 c_5 と c_6 にはそれぞれ $c_5 = (\alpha\pi/90)^{1/2} (3/4)^{3/2} c_1^2$ と $c_6 = (\alpha\pi/90)^{1/2} (7/12)^{3/2} c_2^2$ なる関係があり、これらの式に基づくと、 $c_5 \approx 1.8$ および $c_6 \approx 1.2$ となり、上記の図-5から得られる係数値とおおよそ一致する。

4. まとめ

本研究より上下層が明確な界面を有する時の漸拡水路における浮力・慣性力領域および水表面にせん断力が働かない場合の浮力・粘性力領域における表層流フロントの流動特性が明らかとなった。

参考文献: 1) 秋山壽一郎: 流入型密度流の水理特性とその予測, 土木学会水理委員会環境水理部会, pp.69-167, 2000., 2) Didden, N. and Maxworthy, T.: The viscous spreading of plane and axisymmetric gravity current, *J. of Fluid Mechanics*, Vol.121, pp.27-42, 1981.

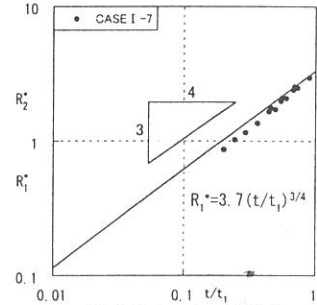


図-2 $R_0^* < 0.6$ の場合の R_1^* と t/t_1 との関係

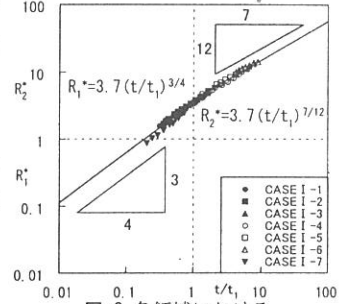


図-3 各領域における R^* と t/t_1 との関係

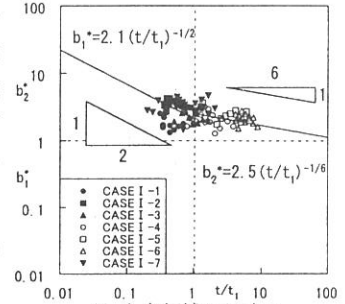


図-4 各領域における b^* と t/t_1 との関係

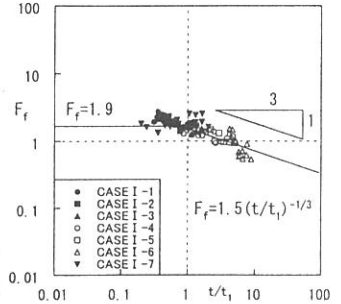


図-5 各領域における F_f と t/t_1 との関係