

潜入密度流の流動特性とフェンス工 による流動制御

PLUNGE FLOWS IN A RESERVOIR AND ITS CONTROL
BY CURTAINS FOR COUNTERING FRESH WATER RED-TIDE

秋山壽一郎¹・西 恭太²・浦 勝³

Juichiro AKIYAMA, Kyouta NISHI and Masaru URA

¹正会員 Ph.D 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550北九州市戸畑区仙水町1-1)

²学生員 九州工業大学大学院 工学研究科博士前期課程 (同上)

³正会員 工博 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (同上)

The hydrodynamics of plunge flows and their control by curtains, as a countermeasure for freshwater red-tide blooms formed at the head of a well-mixed reservoir, are investigated experimentally. It is found that the densimetric Froude number F_p at the plunge point depends on the magnitude of inflow densimetric Froude number F_0 and channel bed slope I when F_0 is small. When F_0 is large, F_p on steep slopes becomes independent of F_0 and takes a constant value. The rate of initial mixing γ is found to be a linear function of I . Suitable location and submerged depth of a curtain, to increase the depth of inflowing fluid behind the curtain and to reduce the amount of initial mixing compared to the depth and initial mixing without curtain, are identified for both steep and mild slope. The inflow densimetric Froude number does not seem to affect this phenomenon.

Key Words : density current, plunge flow, reservoir, algal blooming, curtain

1. はじめに

ダム貯水池のような比較的小規模な閉鎖性水域では、そこでの水質は流入および流出水の影響を強く受ける¹⁾。従って、補償流による赤潮物質の集積域への集中を阻止するとともに、下層あるいは中層密度流による下流への輸送を促進し、放流等により池内のプランクトン総量を減らすことが、貯水池上流端で発生する淡水赤潮を抑制するための池内対策の基本となる。具体的な池内対策としては、選択流入施設、副ダム処理、フェンス工等があるが、フェンス工(以下では幕と略称する)は他の対策と比して安価であり、幕の設置により赤潮物質の水域への拡散を防止できるばかりでなく、設置方法次第ではその集積にとって重要な働きをする補償流の抑制効果が期待できる。さらには、下層あるいは中層密度流による深層や躍層への流入水の輸送促進を図ることも可能であると考えられる。

淡水赤潮と潜入密度流との関係について調べた研究としては、例えば、久保ら²⁾、畑³⁾、中本⁴⁾、山田ら⁵⁾、松尾ら⁶⁾、天野ら⁷⁾、などによる現地観測や多層モデルに基

づく数値解析など枚挙にいとまがないが、潜入密度流の水利特性そのものが未だ十分に解明されていないこともあって¹⁾、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。

本研究は、このような背景を踏まえ、水路床勾配が1/30の場合に関する前報⁸⁾をさらに発展させ、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の解明とそこでの幕の設置効果について検討を加えたものである。

2. 実験

実験は、幕が設置されていない状況での潜入密度流の水利特性の把握を目的としたCASE A、幕の設置効果の検討を目的としたCASE Bを実施した。幕としてはアクリル板を用いた。このため、流体力等による幕の変形等については考慮されていない。

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、CASE Aでは傾斜部の水路床勾配 I を1/30、1/60、1/80および1/150に変化させるとともに、流入条件を変化させ実験を行った。実験条件を表-1に示す。一方、CASE Bでは I を1/30、1/60および1/80に変化させるとともに、各 I について流入内部Froude数 $F_0=(q_0^2/\varepsilon_0 g h_0^3)^{1/2}$ を3とおりに変化させ、各 F_0 について潜入点から上流側あるいは下流側に向かって測った幕の無次元設置距離 x_f/h_p を2、5および8に変化させた。また、各 x_f/h_p について、幕の無次元設置深さ b/h_1 を0.3、0.6および1.0に変化させた。CASE Bの実験条件の詳細は紙面の都合で省略する。ここに、 b =幕の設置深さ、 h_1 =幕が設置された位置での幕がない状況での上層水深、 h_p =潜入水深、 q_0 =単位幅流入流量、 $\varepsilon_0=(\rho_0-\rho_a)/\rho_a$ 、 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、CASE Aではスリット光で可視化した潜入点近傍の流況を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。一方、CASE Bでは収録された幕周辺の流動状況を解析することで、そこでの流況把握を行った。また、幕から $30h_p$ 下流の断面での下層密度流の塩分濃度分布を導電率計を用いて計測し、CASE Aと同様な方法で幕が設置された状態での混合率 γ_f を算定した。なお、潜入点の位置は条件によっては時間の経過とともにかなり移動するが、後述するように、このことが潜入点での内部Froude数が散らばる要因の一つとなる。このため、本研究では潜入点近傍の流況を約1時間モニターし、安定状態に達したことを確認した後に、全ての測定を手早く実施した。

表-1 実験条件

CASE	I	h_0 (cm)	ε_0	h_p (cm)	q_0 (cm ² /s)	F_0	F_p
A-1-1-1	1/30	5.0	0.0007	7.4	10	1.08	0.62
A-1-1-2				8.6	12.5	1.35	0.62
A-1-1-3				9.8	15	1.62	0.60
A-1-2-1			0.0012	8.0	15	1.24	0.61
A-1-2-2				9.0	17.5	1.44	0.60
A-1-2-3				9.9	20	1.65	0.59
A-1-3-1			0.00175	7.1	15	1.02	0.61
A-1-3-2				7.85	17.5	1.20	0.60
A-1-3-3				8.6	20	1.37	0.62
A-2-1-1	1/60	5.0	0.0007	8.0	6.5	0.70	0.35
A-2-1-2				9.0	8.0	0.86	0.38
A-2-1-3				9.9	10	1.08	0.39
A-3-1-1	1/80	5.0	0.0007	6.1	4.5	0.49	0.36
A-3-1-2				6.5	5.5	0.59	0.40
A-3-1-3				7.6	7.0	0.76	0.39
A-3-2-1			0.0012	6.3	7.0	0.58	0.42
A-3-2-2				6.5	8.5	0.70	0.47
A-3-2-3				7.5	10	0.82	0.45
A-3-3-1			0.00175	6.5	10	0.68	0.45
A-3-3-2				6.8	11.5	0.79	0.48
A-3-3-3				7.6	13	0.89	0.47
A-4-1-1	1/150	5.0	0.0007	5.2	0.75	0.08	0.07
A-4-1-2				5.3	1.0	0.11	0.10

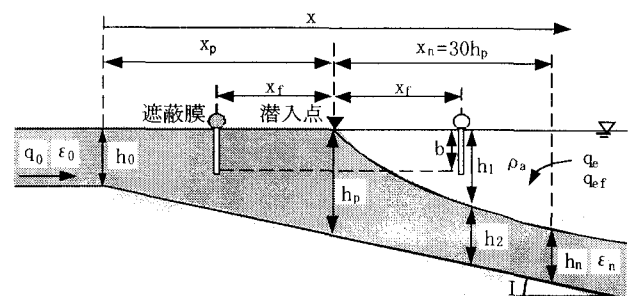


図-1 流れの定義図と重要な諸量

3. 実験結果

(1) 潜入密度流の流動特性 (CASE A)

幕の設置に当たっては、幕がない状態での潜入密度流の特性を十分に把握しておく必要がある。潜入密度流の流動特性量としては、潜入水深 h_p 、初期混合、潜入区間長、界面形状などがあるが、その中でも潜入水深と初期混合が特に重要である。初期混合については、2層流モデルに基づき、連行係数を用いて算定する方法^{例えは9)}、潜入密度流領域(潜入点から下層密度流となるまでの区間)での周囲水の単位幅当たりの総連行量 q_e として捉え、初期混合率 γ で評価する方法がある。後者は、実用上の観点から便利であるため、これまで多くの研究^{例えは10), 12), 14), 18), 19), 20)}で、この γ が用いられている。本研究で

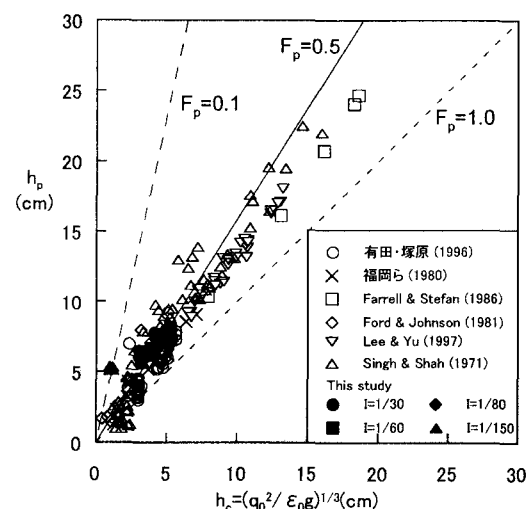


図-2 潜入水深と内部限界水深の関係

もこの定義に基づき議論を進める。

等幅矩形断面水路では h_p と 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($= (q_0^2 / \varepsilon_0 g h_p^3)^{1/2}$)および h_c =内部限界水深($= (q_0^2 / \varepsilon_0 g)^{1/3}$)である。

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

h_p についてはこれまで多くの研究が重ねられている。⁸ ~²³、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の範囲の値を取る。 I との関係でみると、 $I \geq 1/10$ の極めて大きい勾配を除外すると、 $F_p=0.5 \sim 0.75$ の範囲に収まる。平均的には $F_p \approx 0.56$ 程度の値を取るようである¹⁾。この平均値は、Savage & Brimberg²¹⁾や福岡⁹⁾らによって理論的に得られた $F_p=0.50$ に近い。有田・塚原²²⁾も $I=1/50$ 程度では $F_p \approx 0.50$ で近似できると指摘している。しかし実際は、福岡⁹⁾の実験結果は $I=1/60$ で $F_p=0.38 \sim 0.65$ 、有田・塚原²²⁾では $I=1/50$ で $F_p=0.405 \sim 0.784$ の値を取っている。Lee & Yu¹⁰⁾は、 $I=1/50$ で $F_p=0.60 \sim 1.0$ なる結果を得ており、潜入初期には $F_p \approx 1.0$ となるが、潜入点の位置が時間の経過とともに変化し、安定した状態では $F_p \approx 0.6$ を取ると報告している。このように、 $F_p \approx 0.50$ となる根拠は必ずしも明確ではない。

F_p 値がばらつく要因としては、①有田・塚原²²⁾が指摘しているように、 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、②Lee & Yu¹⁰⁾が報告しているように、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、③流入水路が貯水池の水路床勾配の延長として用いられている場合(例えば、Singh & Shah¹¹⁾、岸・板倉¹⁴⁾、Lee & Yu¹⁰⁾)あるいは流入水路が水平に設置されている場合(例えば、福岡⁹⁾、Farrell & Stefan²⁰⁾、有田・塚原²²⁾、秋山⁸⁾)があること、④急勾配水路では初期混合の影響があること、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、 $\gamma=0 \sim 2.0$ 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。以上のように、 F_p と γ について明確な見解が得られているわけではない。

図-2は、本研究で得られた h_p と h_c の関係についてプロットしたものである。図中にはこれまでの実験研究で得られた結果も同時に示してある。本研究で得られた F_p も0.09~0.70の範囲の値を取っており、やはり大きく散らばっている。

潜入密度流の特性は、上記の①の指摘のように、 I に

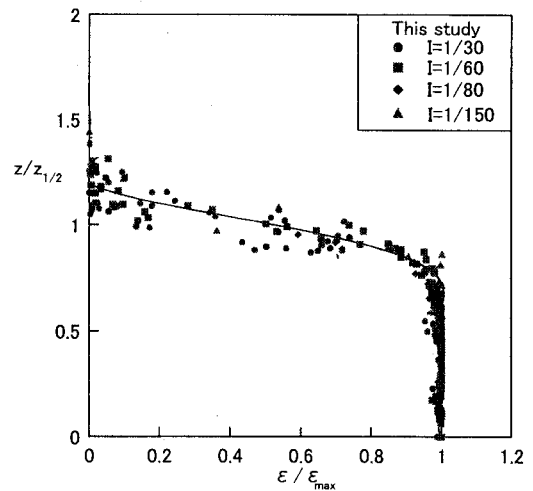
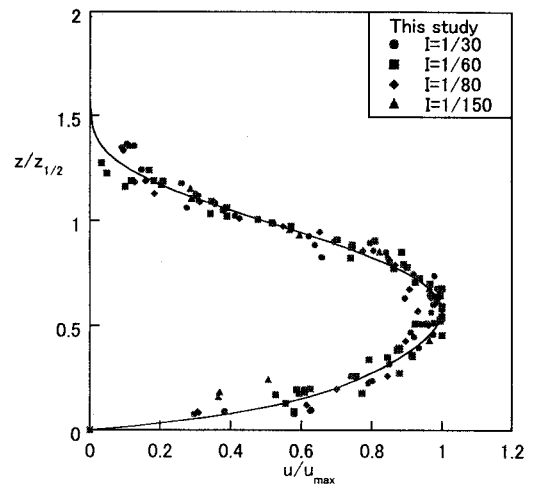


図-3 流速分布と密度分布の一例

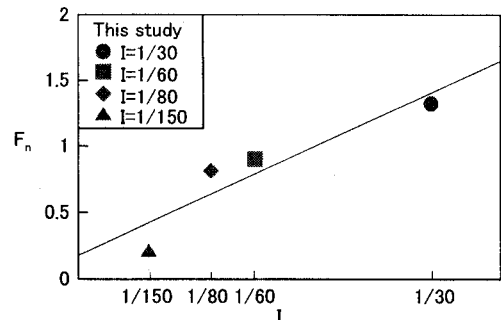


図-4 F_p と I との関係

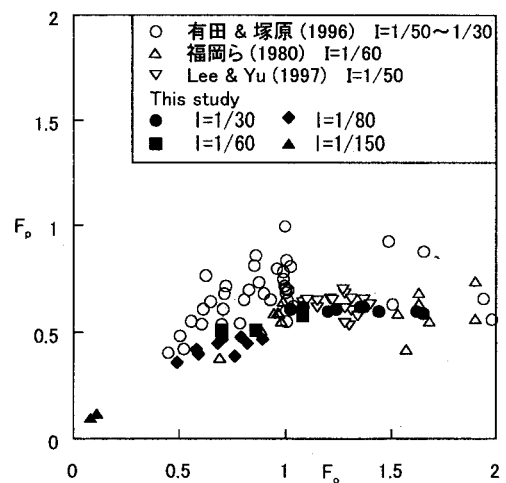


図-5 F_p と F_0 との関係

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。ちなみにLee & Yu¹⁰⁾は $I=1/50$ は緩勾配、福岡ら⁹⁾は $1/10$ は急勾配、 $1/60$ は緩勾配としており、 I_c は $1/50 \sim 1/60$ 程度であると推測されるが、確定的ではない。図-3は、下層密度流の流速分布と密度分布を示したものである。いずれも最大値と最大値を取る距離の半値半幅で無次元化されており、分布形状がほぼ相似形であることがわかる。図中の実線で示した回帰曲線に基づき、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 $F_n=(q_n^2/\varepsilon \rho g h_n^3)^{1/2}$ 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。

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

$$S_1 = \int_0^\infty 2by dy; \quad S_2 = \int_0^\infty bdy/Bh \quad (4)$$

図-4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。図中の実線は F_n と I との関係を示す。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 $F_p \approx 0.56$ は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 値であり、緩勾配での F_p の値については有益な情報がほとんど得られていないことを意味している。なお、 S_1 と S_2 はそれぞれ $0.5 \sim 1.4$ と $0.5 \sim 1.2$ であった。

図-5は、各 I ごとに F_p と F_0 との関係を示したものである。図中には $I \leq 1/30$ の既往のデータも同時にプロットされている。これから、同一水路勾配であっても $F_0 \leq 1.0$ 以下では F_0 が減少するにつれて F_p は若干減少する傾向が認められ、 $F_0 > 1.0$ では有田・塚原²²⁾が指摘しているように、 I に傾向的に依存しているようにも見える。

有田²³⁾は、flow forceとbuoyancy fluxの保存より得られる長さスケール $L(=h_0 F_0^{4/3}(1+0.5 F_0^{-2}))$ を用いて、 $1/50 \leq S \leq 1/10$ の範囲では流入点から潜入点までの距離 x_p が F_0 と I などで表せることを示している。しかし、一般に急勾配水路で F_p が I で変化すると考えにくく、ある限定された条件下で水路の幾何学的形状(h_0 , I)が F_p に影響を及ぼしていると考えの方が妥当である。例えば、 F_0 と F_p の定義から明らかなように、潜入するためには必ず $h_p/h_0 \geq 1.0$ であるので、 $F_p \leq F_0$ となり、 F_0 が小さければ F_p は限りなく0に近い値を取り得る。また、同一水路形状であれば、 F_0 が大きいつきには F_p は h_0 の影響を受けないが、 F_0 が小さいときにはこの影響を受けると考えられるからである。

以上のような考えに基づき、 F_p と h_p/h_0 との関係について調べたものが図-6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 値が大きくばらついていることから、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

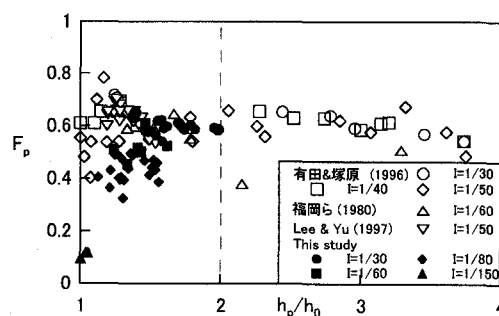


図-6 F_p と h_p/h_0 との関係

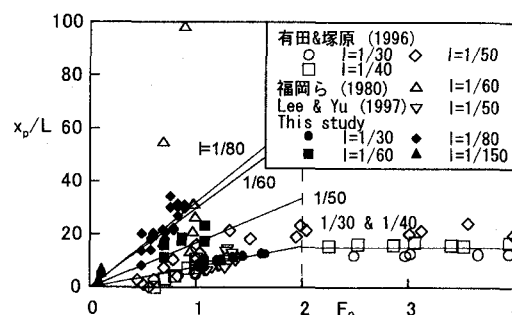


図-7 x_p/L と F_0 との関係

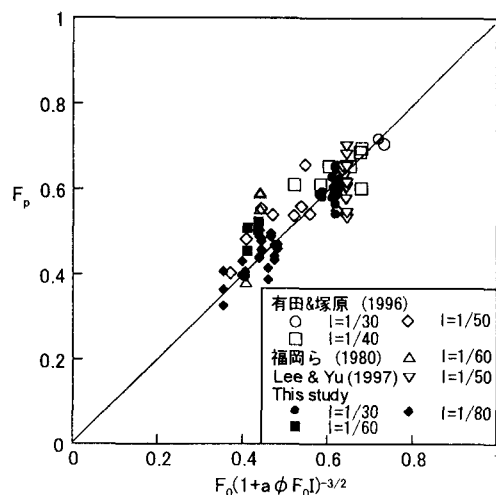


図-8 式(7)の検討

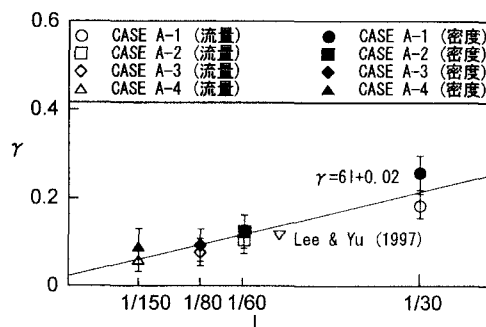


図-9 γ と I との関係

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(5)の関係があるので、図-6でみた h_p/h_0 は x_p と I で規定されている。

$$h_p/h_0 = 1 + x_p I/h_0 \quad (5)$$

そこで、有田²³⁾と同様に、 x_p/L と F_0 との関係を調べたものが図-7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、 $I < I_c$ での $F_0 \geq 1.5$ 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、それ以下では $I \geq I_c$ 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。ただし、福岡ら⁹⁾のデータで $F_0 < 1.0$ のものはこの傾向から外れている。この理由は不明である。

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(6)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-7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-8は式(5)と式(6)より得られる式(7)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。

$$x_p/L = a F_0 \quad (6); \quad F_p/F_0 = (1 + a \phi F_0 I)^{-3/2} \quad (7)$$

図-9は、流速と塩分濃度分布の両測定結果から得られた q_e に基づき算定された γ と水路床勾配 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、いずれの測定結果からも γ が I に依存していることが見て取れる。これより、少なくとも $I=1/150 \sim 1/30$ の範囲では、 $\gamma \approx 6I+0.02$ なる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 & Yu¹⁰⁾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。

(2) フェンス工の設置効果(CASE B)

以下では $I=1/80 \sim 1/30$ の各水路勾配について幕の設置効果に検討を加える。評価の基準は、幕の設置により、より深い水域に流入水を潜入させることができるかということ、および潜入密度流による赤潮物質の集積域への集中を弱めることができるかということである。集積域への集中の強さは流入水が潜り込む際の補償流と関係しているので、幕がない場合の初期混合率 γ とある場合の初期混合率 γ_f との比でこれを評価することとする。以下の図-10に示す流況図は全て通水から十分に時間が経過した安定した状態での結果である。なお、図中の▼印は幕が設置されていない状況での潜入点の位置を示している。

・ $I=1/30$ の急勾配水路：幕を上流側に設置した場合では、 $x_f/h_p=2$ の場合は $b/h_l=0.3$ と 0.6 のときに幕の設置点から潜入するようになるが、水深がより大きい水域に潜入さ

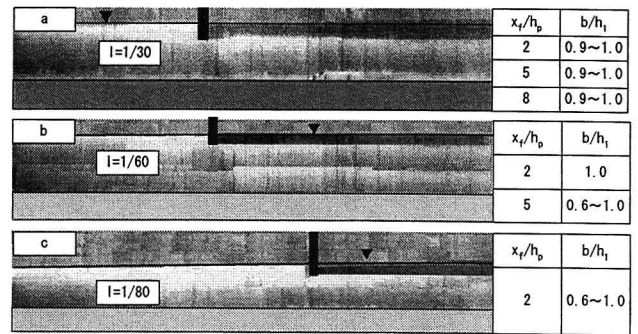


図-10 CASE Bの流況図

せることはできなかった。 $x_f/h_p=2$ で $b/h_l=1.0$ の場合と $x_f/h_p=5$ と 8 のいずれの場合も最終的には幕がない状況での潜入点近傍で潜入するようになり、幕の設置効果は認められなかった。このように、潜入点の上流側に幕を設置した場合は、その設置効果が全く認められなかった。一方、幕を下流側に設置した場合は、幕の設置深さによって異なった流況を呈することが認められた。すなわち、 $b/h_l=0.3$ では幕の設置効果が認められず、最終的には幕がない状態での潜入点近傍で潜入したが、 $b/h_l=1.0$ では全ての x_f/h_p で幕がない状態よりも水深がより大きい水域に潜入させることができた。その中間の深さである $b/h_l=0.6$ では F_0 に対する依存性が認められ、 F_0 が大きな場合は設置深さが大きいときと同様な結果となった。

以上より、 $I=1/30$ の急勾配水路では、幕を潜入点の下流側に設置し、設置深さを上層水深程度としたときに幕の設置効果が認められ、この設置条件では γ よりも γ_f の方が50%程度小さく、潜入時の補償流も小さくなることがわかった(図-10a)。

・ $I=1/60$ の限界勾配に近い緩勾配水路：幕を上流側に設置した場合は、幕の設置位置と幕の設置深さによって異なった流況を呈することが認められた。 $x_f/h_p=2$ の場合は $b/h_l=1.0$ 、 $x_f/h_p=5$ の場合には $b/h_l=0.6$ および 1.0 のときに、幕がない状態よりも水深がより大きい水域に潜入させることができた。 $x_f/h_p=8$ の場合は最終的に幕がない状況での潜入点近傍で潜入するようになり、設置効果は認められなかった。一方、幕を下流側に設置した場合は、 x_f/h_p と b/h_l のいずれとも無関係に、最終的に幕がない状態での潜入点近傍で潜入するようになり、設置効果が全く認められなかった。

以上より、 $I=1/60$ の限界勾配に近い緩勾配水路では、幕を上流側に設置し、 $x_f/h_p=2 \sim 5$ で設置深さを上層水深程度としたとき、 $x_f/h_p=5$ で $b/h_l=0.6 \sim 1.0$ としたときに幕の設置効果が認められた。初期混合率も勘案すると、 $x_f/h_p=2 \sim 5$ で設置深さを上層水深程度としたときに設置効果があることがわかった(図-10b)。

・ $I=1/80$ の緩勾配水路：幕を上流側に設置した場合は、幕の設置位置 x_f/h_p によって異なった流況を呈することが認められた。 $x_f/h_p=2$ の場合は $b/h_l=0.3 \sim 1.0$ のいずれのときも、幕がない状態よりも水深がより大きい水域に潜入させることができた。 $x_f/h_p=5$ と 8 のときには最終的に

幕がない状況での潜入点近傍で潜入するようになった。一方、幕を下流側に設置した場合では、 x_f/h_p と b/h_1 のいずれとも無関係に、最終的に幕がない状態での潜入点近傍で潜入するようになり、設置効果が全く認められなかった。

以上より、 $I=1/80$ の緩勾配水路では b/h_1 の大きさにかかわらず、幕を潜入点近傍の上流側に設置したときに、幕の設置効果が認められたが(図-10c)、幕がない状態での γ と比較すると γ_f は同程度かやや大きな値となった。

4. まとめ

本研究より、等幅矩形断面水路での潜入密度流およびそこでのフェンス工の設置効果について以下のような結論が得られた。

(1) 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(7)で表せることなどの知見が得られた。ただし、 h_p/h_0 が大きいところでの緩勾配水路の F_p のデータが存在しないので、この場合の F_p 値については不明である。これについては今後の課題としたい。また、初期混合率 γ は水路床勾配 I に依存し、 $\gamma = 6I + 0.02$ なる関係が成立する。

(2) $I=1/80 \sim 1/30$ の各水路勾配について幕の設置効果の検討を加え、各勾配での有効な幕の設置条件を明らかにした。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、本学学部4年生の土居正明君および音なぎ哲也君の協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 秋山壽一郎：流入型密度流の水利特性とその予測，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) 久保直也ら：風屋貯水池における淡水赤潮現象と貯水池環境，大ダム，No.126, pp.18-25, 1988.
- 3) 畑 幸彦：永瀬ダム湖（高知県）の淡水赤潮，水質汚濁研究，Vol.14, No.5, pp.25-29, 1991.
- 4) 中本信忠：神流湖の淡水赤潮，水質汚濁研究，Vol.14, No.5, pp.13-17, 1991.
- 5) 山田正人，宗宮功，小野芳朗，小林尚礼：ダム貯水池におけるPeridinium淡水赤潮の集積機構の評価，水環境学会誌，第18巻，第10号，pp.775-783, 1995.
- 6) 松尾直規，山田正人，宗宮功：貯水地上流端における流動特性と淡水赤潮現象との関係，水工学論文集，第40巻，

- pp.575-581, 1996.
- 7) 天野邦彦，田中康泰，鈴木宏明，安田佳哉：貯水池末端における持続的な淡水赤潮に関する研究，水工学論文集，第44巻，pp.1083-1088, 2000.
- 8) 秋山壽一郎，アキレス クマール ジャ，山下直樹，浦勝：ダム貯水池上流端での富栄養化対策を目的とした遮蔽幕による潜入密度流の制御，水工学論文集，第46巻，pp.1013-1018, 2002.
- 9) 福岡捷二，福岡祐介，中村健一：2次元貯水池潜入密度流の潜り込み水深と界面形状，土木学会論文報告集，第302号，pp.55-65, 1980.
- 10) 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.
- 11) Singh, B. & Shah, C.R.: Plunging phenomena of density currents in reservoirs, *La Houille Blanche*, Vol.26, No.1, pp.59-64, 1971.
- 12) Elder, R.A. & Wunderlich, W.O.: Inflow density currents in TVD reservoirs, *Int'l Symp. Stratified Flows*, IAHR/ASCE, Novosibirsk, USSR, pp.221-236, 1972.
- 13) Hebbert, B. et al.: Collie river underflow into the Wellington reservoir, *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.105, HY.5, pp.533-545, 1979.
- 14) 岸 力，板倉忠興：第16回自然災害シンポジウム講演論文集，pp.235-238, 1979.
- 15) Ford, D.F. et al.: Density inflows to Degray lake, Arkansas, *Proc. of Second Int'l Symposium on Stratified Flows*, Trondheim, Norway, pp.977-987, 1980.
- 16) 菅 和利，玉井信行：貯水池潜入部の潜り点及び初期混合に関する研究，第25回水理講演会論文集，pp.631-636, 1981.
- 17) Hauenstein, W. & Dracos, T.H.: Investigation of plunging density currents generated by inflows in lakes, *J. of Hydraulic Research*, Vol.22, No.3, pp.157-179, 1984.
- 18) Akiyama, J. & Stefan, H.G.: Plunging flow into a reservoir: theory, *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.110, HY.4, pp.484-498, 1984.
- 19) Akiyama, J. & Stefan, H.G.: Onset of underflow in slightly diverging channels, *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.113, No.7, pp.825-844, 1987.
- 20) Farrell, G.J. & Stefan, H.G.: Mathematical modeling of plunging reservoir flows, *J. of Hydraulic Research*, Vol.26, No.5, pp.525-537, 1988.
- 21) Savage, S.B. & Brimberg, J.: Analysis of plunging phenomena in water reservoirs, *J. of Hydraulic Research*, Vol.13, No.2, pp.187-204, 1975.
- 22) 有田正光，塚原千明：貯水池密度流の潜り点の水利条件に関する実験的研究，ながれ，第15巻，pp.409-416, 1996.
- 23) 有田正光：貯水池密度流の潜り点の水利条件に関する解析的研究，水工学論文集，第40巻，pp.567-574, 1996.

(2002. 9. 30受付)