

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

CONTROL OF PLUNGE FLOWS IN A RESERVOIR BY CURTAINS FOR COUNTERING FRESHWATER RED-TIDE BLOOMS

秋山 寿一郎¹・アキレス クマール ジャ²・山下 直樹³・浦 勝⁴
Juichiro AKIYAMA, Akhilesh K. Jha, Naoki YAMASHITA 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正会員 博士(工) 九州工業大学助手 工学部建設社会工学科 (同上)

³学生員 学士(工) 九州工業大学大学院 工学研究科博士前期課程 (同上)

⁴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 at the plunge point is approximately 0.57 and the rate of initial mixing depends on the magnitude of inflow densimetric Froude number. When a curtain, submerged to the depth of the ambient fluid without the curtain, is placed downstream of the plunge point, the depth of inflowing fluid behind the curtain increases compared to the depth without curtain and the depth exceeds even the plunge depth. 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

淡水赤潮は、河川水が流入する貯水池上流端に見られることが多い。プランクトンのこのような集積因子としては、河川からの栄養塩の供給に加え、プランクトン自身の浮上作用や走光性等の生物学的な因子が影響し、力学的な因子として風の作用等の気象条件や池水の流れの状態等が深く関係する¹⁾。特に、池水の水温に較べて低温の河川水が流入する時期では、流入水が池水を連行しながら潜り込む潜入密度流が発生する。このため、貯水池上流端へ向かう補償流が生じ、これがプランクトンの集積因子として大きな働きをする。

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。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、遮蔽幕(カーテン)の設置等があるが、遮蔽幕は他の対策と比して安価

なことが利点であり、遮蔽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、貯水池の成層状態によっては、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、高橋ら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、潜入密度流の水理特性そのものが未だ十分に解明されていないこともあり¹⁾、潜入密度流と遮蔽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態である。

本研究は、このような背景を踏まえ、混合型貯水池における潜入密度流現象と遮蔽幕の設置状態との関係について基礎的な知見を得ることを目的として実施したものである。

2. 実験

実験装置は、前面アクリル製の水槽(長さ 9.0m、幅

0.6m)中に水路(水平区間長 1.15m、傾斜区間長 7.5m)を設置したものであり、表-1 の実験条件に示すように、水平区間の水深 h_0 と傾斜区間の勾配 I はそれぞれ 5.0cm と 1/30 の一定値に保たれている。

実験内容としては、潜入密度流そのものの水理特性の把握を目的とした、幕が設置されていない状況での CASE A、および遮蔽幕の設置効果の検討を目的とした幕が設置された状況での CASE B の2通りについて実施した。遮蔽幕としてはアクリル板を用いた。従って、ここでは流体力等による幕の変形については考慮されていない。表-1 中の CASE A-1 は、潜入水深と界面形状、CASE A-2 は初期混合率の算定を目的としたものである。なお、CASE B-1 は遮蔽幕を潜入点の上流側に、CASE B-2 は下流側に設置した場合である。また、 h_0 =流入水深、 q_0 =単位幅流入流量、 ε_0 =相対密度差($=(\rho_0-\rho_a)/\rho_a$)、 F_0 =流入内部Froude 数($= (q_0^2/\varepsilon_0gh_0^3)^{1/2}$)、 x_f/h_p =潜入点から測った無次元設置距離および b/h_1 =無次元設置深さである。ここに、 b =幕の設置深さ、 h_1 =幕が設置された位置での上層水深、 h_p =潜入水深および ρ_0 と ρ_a はそれぞれ流入水と池水の密度である。潜入密度流の流れの定義図と遮蔽幕の設置に伴う重要な諸量をあわせて図-1 に示す。

実験内容としては、レーザースリット光で可視化した潜入点近傍の流況をデジタルVTRに収録し、その画像をコンピューター解析することで安定状態の潜入水深 h_p および界面形状を求めた。単位幅当たりの総連行量 q_e は、サーマル式微流速計(KENEK、VS-101)と導電率計(KENEK、MK-206)を用い、CASE Aでは潜入点から $30h_p$ の地点での下層密度流の流速と塩分濃度分布を計測し、それぞれの分布を積分することで求めた。なお、この測定点の位置は、CASE A-1で界面形状から潜入密度流区間を推定した結果に基づいている。一方、CASE Bでは遮蔽幕近傍の流況を撮影するとともに、導電率計を用いて幕が設置されていない状態での潜入点から $30h_p$ 下流の断面での下層密度流の塩分濃度分布を求め、そこでの補償流の大きさ q_{ef} の算定を行った。

3. 実験結果

(1) 潜入密度流の特性(CASE A)について

遮蔽幕の設置に当たっては、遮蔽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。潜入密度流の特性量として重要なものは、潜入水深 h_p 、初期混合率 γ 、潜入区間長、界面形状などであるが、その中で最も重要なものは、潜入水深 h_p と初期混合率 γ である。ここで言う初期混合とは、潜入密度流が潜入点から下層密度流となるまでの区間、つまり潜入密度流領域での周囲水の潜入密度流への単位幅当たりの総連行量 q_e であり、等幅矩形断面水路では h_p と γ はそれぞれ式(1)と(2)の

表-1 実験条件

CASE A		I	h_0 (cm)	ε_0	q_0 (cm^2/s)	F_0
A-1	A-1-1-1	1/30	5.0	0.0007	10	1.08
	A-1-1-2				15	1.62
	A-1-1-3				20	2.16
	A-1-2-1			0.00175	15	1.02
	A-1-2-2				20	1.37
	A-1-2-3				25	1.71
	A-1-3-1			0.0035	25	1.21
	A-1-3-2				30	1.45
	A-1-3-3				35	1.69
A-2	A-2-1			0.0007	10	1.08
	A-2-2				12.5	1.35
	A-2-3				15	1.62

CASE B	x_f/h_p	I	ε_0	q_0 (cm^2/s)	F_0	b/h_1
B-1-1-1	2 and 5	1/30	0.0007	10	1.08	0.3
B-1-1-2						0.6
B-1-1-3						0.9
B-1-1-4						1.0
B-1-2-1				12.5	1.35	0.3
B-1-2-2						0.6
B-1-2-3						0.9
B-1-2-4						1.0
B-1-3-1	2 and 5	1/30	0.0007	15	1.62	0.3
B-1-3-2						0.6
B-1-3-3						0.9
B-1-3-4						1.0
B-2-1-1				10	1.08	0.3
B-2-1-2						0.6
B-2-1-3						0.9
B-2-1-4						1.0
B-2-2-1	2 and 5	1/30	0.0007	12.5	1.35	0.3
B-2-2-2						0.6
B-2-2-3						0.9
B-2-2-4						1.0
B-2-3-1				15	1.62	0.3
B-2-3-2						0.6
B-2-3-3						0.9
B-2-3-4						1.0

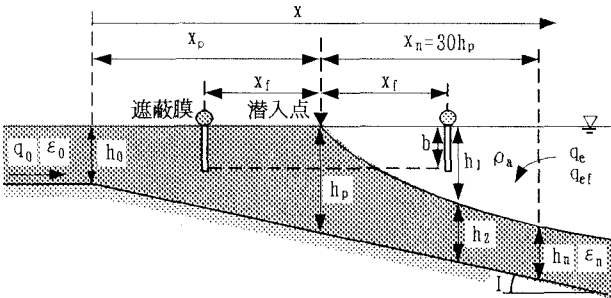


図-1 流れの定義図と重要な諸量

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

ように定義される。ここに、 F_p =潜入点での内部 Froude 数($= (q_0^2/\varepsilon_0 g h_p^3)^{1/2}$)、 h_c =内部限界水深($= (q_0^2/\varepsilon_0 g)^{1/3}$)および g =重力加速度である。式(1)から明らかなように、 h_p を求めることは F_p を定めることと同じである。

潜入密度流についてはこれまで多くの研究が重ねられている⁸⁻²⁰⁾。等幅矩形断面水路を対象とした室内実験で得られたこれまでの知見を総括すると、 F_p は約 0.25~1.0、 γ は 0~約 2.0 の範囲の値を取り、いずれもかなり散らばることがわかっている¹⁾。このように、 F_p と γ に限っても明確な見解が得られているわけではない。しかし、 F_p 値については、水路床勾配 I が極めて大きい ($I>1/10$) 場合には $F_p<0.5$ の値を取るが、そのような非現実的な状態を除けば、多くのデータは $F_p=0.5\sim0.75$ の範囲に収まり、平均的には $F_p=0.56$ 程度の値を取ると考えられる¹⁾。一方、 γ については研究例も少なく、流入条件や水路床勾配との関係についてはよくわかっていない。

現地観測では貯水池形状や底面の状態あるいは気象条件などの様々な条件が影響することに加え、精度の良い測定そのものが困難であるので、 F_p 値に散らばりが生じるのは当然であるが、上記のように室内実験で得られた結果がばらつく理由としては、①例えば、有田・塚原²⁰⁾が報告しているように、水路床勾配と内部 Froude 数の影響が考えられること、②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 & Shah⁹⁾、岸・板倉¹²⁾)あるいは本研究のように流入水路が水平に設置されている場合(例えば、福岡ら¹⁴⁾、Farrell & Stefan¹⁹⁾、有田・塚原²⁰⁾)があり、この影響が考えられること、③例えば、Lee & Yu⁸⁾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、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、④初期混合の影響が明確になっていないこと、などが考えられる。

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。これより、本研究で得られた F_p の値は 0.5~0.7 の範囲の値を取り、その平均値($F_p=0.57$)は上述した既往の結果と一致する。ただし、周知のように開水路漸変流では水路の粗度で限界勾配が決まるが、下層密度流の限界勾配は連行係数、流速と密度分布形状および水路の粗度で決定されるので、内部的な限界勾配を一義的に決定することはできない。例えば、Lee & Yu⁸⁾は $I=1/50$ で内部的な緩勾配、福岡ら¹⁴⁾は $1/10$ で急勾配、 $1/60$ で緩勾配としている。従って、内部的に急勾配か緩勾配かを特定するためには、下層密度流の内部 Froude 数 F_p を知る以外に方法はない。つま

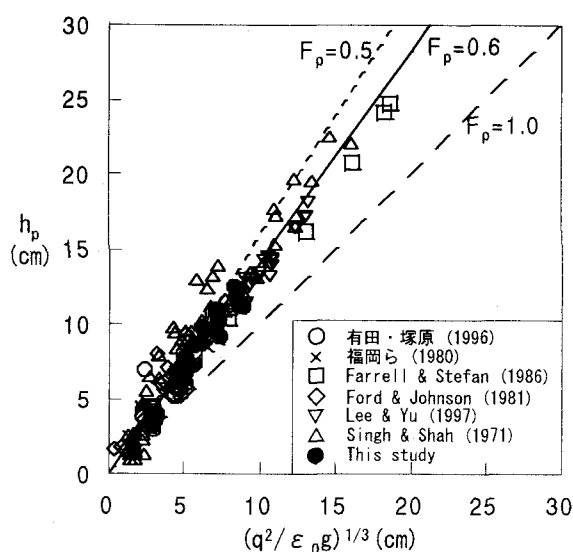


図-2 潜入水深と内部限界水深との関係

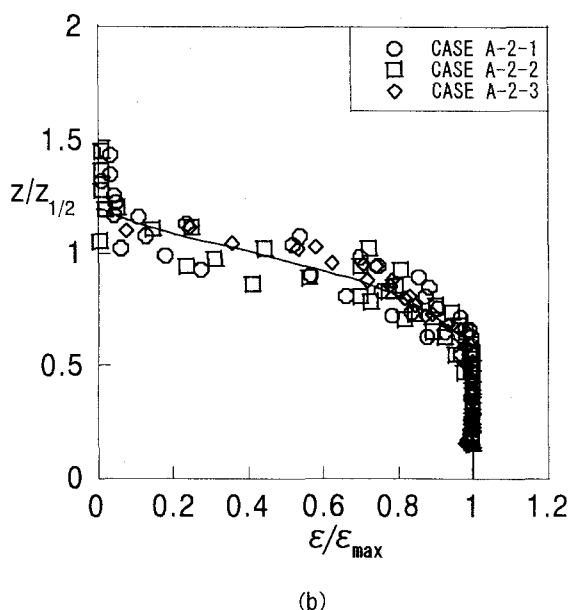
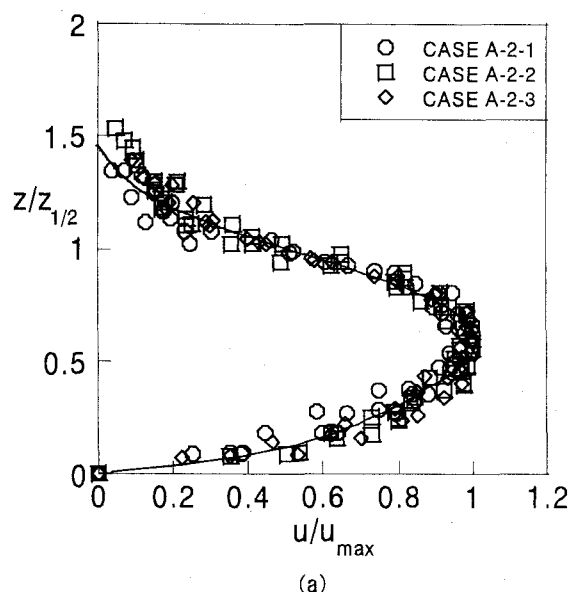


図-3 流速分布(a)および密度分布(b)

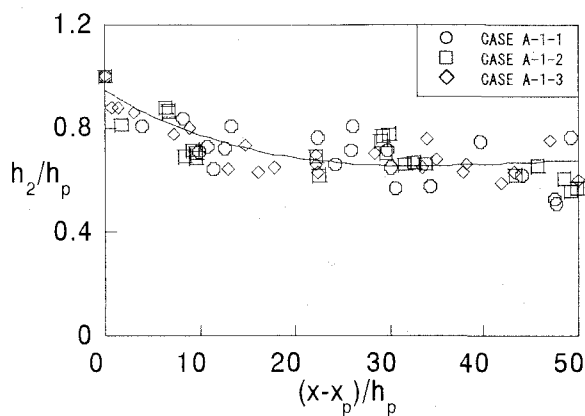


図-4 潜密度流区間での界面形状

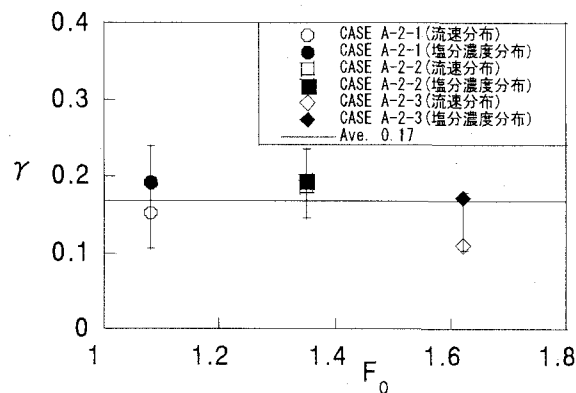


図-5 初期混合率 γ と流入内部Froude数 F_0 との関係

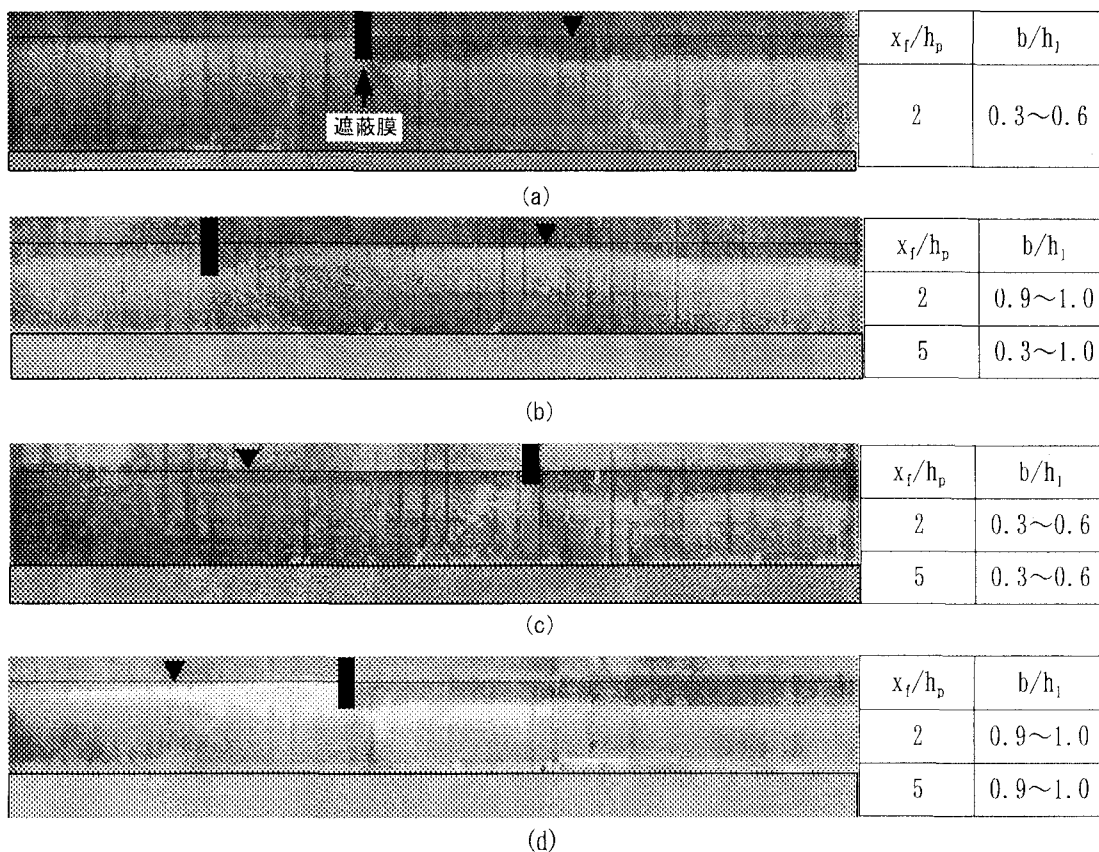


図-6 遮蔽幕の設置深さ b/h_1 と流況

(a:上流側(CASE B-1)、b:上流側(CASE B-1)、c:下流側(CASE B-2)、d:下流側(CASE B-2))

り、流れの状態が内部的な射流であれば急勾配、常流であれば緩勾配と判断されるわけである。

図-3 は、潜密度流下流端、つまり下層密度流の上流端付近で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いる。同図より、若干のばらつきは認められるものの、いずれの分布形状も相似形であることがわかる。これらの分布形状に基づき、モーメント法²¹⁾を用い、層厚平均流速 U と層厚平均相対密度差および層厚を求め、

これらに基づき F_0 を算定した結果、 $F_0 \approx 1.23$ であることがわかった。これより、本研究の結果は内部的な急勾配におけるものであると判断される。

図-4 は、CASE A の結果に基づき、遮蔽幕が設置されていない潜密度流の無次元界面形状を示したものである。これから、福岡ら¹⁰⁾などの報告にもあるように、水路勾配が同じであれば、流入条件とは無関係に無次元下層水深 h_2/h_p は $(x-x_p)/h_p$ の関数として表示できることが確認できる。

図-5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 と流入内部Froude数 F_0 との関係について調べたものである。図中の矢印はエラーバーである。データのばらつきは認められるが、いずれの測定から得られた結果からも γ は F_0 に依存しないことがわかる。これより、 $I=1/30$ の急勾配水路では式(3)の関係が成立するようである。なお、 $I=1/50$ でのLee&Yu⁹⁾の結果は $\gamma \approx 0.17$ となっており、本研究で得られた γ 値の平均値と同程度となっている。

$$\gamma \approx 0.17 \tag{3}$$

(2) 遮蔽幕の設置効果 (CASE B) について

図-6 は、時間が十分に経過した安定した状態での b/h_1 に対する流況の違いを示したものである。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。これより、CASE B-1 では $x_f/h_p=2$ の場合は $b/h_1=0.3$ と 0.6 のときに幕の設置点から潜入するようになるが(図-6a)、水深がより大きい水域に潜入させることができるわけではなく、幕の設置効果は認められない。一方、 $x_f/h_p=2$ におけるそれら以外の b/h_1 と $x_f/h_p=5$ 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(図-6b)、潜入点の上流側に遮蔽幕を設置した場合は、その設置効果が全く認められないことが明らかとなった。

ところが、CASE B-2 ではそ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、無次元設置深さが小さい場合($b/h_1=0.3$)は幕の設置効果が認められず、この場合も幕がない状態での潜入点近傍で潜入するが(図-6c)、大きい場合($b/h_1=0.9$ および 1.0)は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可能となる(図-6d)。その中間の $b/h_1=0.6$ では流入内部Froude数 F_0 に対する依存性が認められ、 F_0 が大きい場合は設置深さが大きい場合と同様な効果がある。なお、このような傾向は $x_f/h_p=2$ と 5 のいずれにおいても同様であった。

以上より、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 F_0 の値とは無関係に幕の設置効果が認められ、水深がより大きい水域に潜入させることが明らかとなった。なお、遮蔽幕が設置されていない状態での潜入点のおおよその位置は、式(1)と $F_p \approx 0.57$ より推定可能である。また、図-3 から明らかに、その時の上層水深も2層流モデルで予測可能である¹⁰⁾。従って、所定の位置における効果的な幕の設置深さ b の推定は可能である。

図-7 は、潜入水深比 $(b+h_2)/h_p$ と設置位置 $(x_p+x_f)/h_p$ との関係について調べたものである。ここに、 $b+h_2$ は F_0 の大きさとは無関係に幕の設置効果が認められたときの潜入水深である。この潜入水深比は、ほぼ潜入点の位置と水路床勾配 I および幕の設置位置 x_f/h_p によって決ま

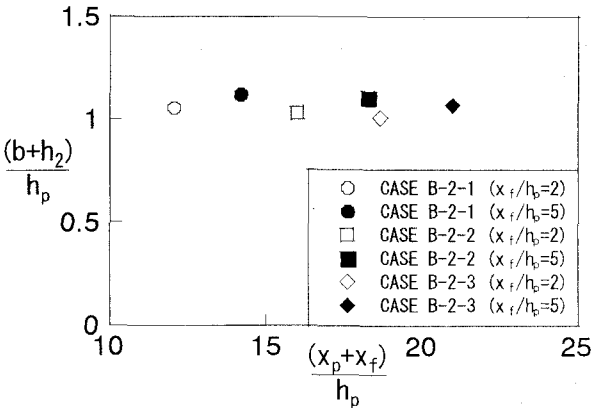


図-7 潜入水深比 $(b+h_2)/h_p$ と幕の設置位置 $(x_p+x_f)/h_p$ との関係

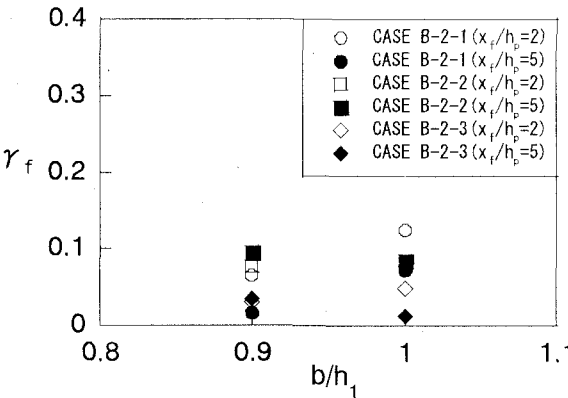


図-8 補償流の大きさ γ_f と遮蔽幕の設置深さ b/h_1 との関係

表-2 幕を設置したときの混合率 γ_f

CASE	F_0	$x_f/h_p=2$	$x_f/h_p=5$
		γ_f	
B-2-1	1.08	0.095	0.044
B-2-2	1.35	0.078	0.090
B-2-3	1.62	0.038	0.023

るものである。図-6d のように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では、幕が設置されていないときの潜入水深より常に大きく、 $x_f/h_p=5$ の方がより大きくなる。これは、 x_f/h_p をさらに大きく取ること、潜入水深比を大きくできることを示唆している。また、 F_0 が小さい方が幕なしの潜入水深より大きくなることもわかる。

図-8 は、潜入点の下流側に遮蔽幕を設置した場合で設置効果が F_0 とは無関係に常に認められた状況、つまりCASE B-2 で $b/h_1 \geq 0.9$ のときの上層の混合率 $\gamma_f (=q_{ef}/q_0)$ と b/h_1 との関係について調べたものである。これより、全体的に b/h_1 が 1.0 の方が γ_f が若干大きい値を取ること、 $x_f/h_p=5$ の方がやや小さい値を取っていること、などがわかる。 γ_f の値をまとめて示したものが表-2 であ

る。この結果と図-5 の γ の値とを比較すると、同一の F_0 に対して γ_f の方が小さくなっていることから、潜入時の補償流も幕を設置したときの方が小さくなることがわかる。

以上より、遮蔽幕を潜入点下流側に設置し、その設置深さを上層水深程度とした場合に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とともに、より深い水域に流入水を潜入させることができることが明らかとなった。

4. まとめ

本研究より、 $I=1/30$ 程度の急勾配矩形断面水路での潜入密度流およびそこでの遮蔽幕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、平均的には 0.56 程度の値を取る。また、初期混合率 γ は約 0.17 の一定値を取る。

(2) 遮蔽幕を潜入点下流側に設置するとともに、遮蔽幕の設置深さを上層水深と同程度にした場合に、潜入密度流による赤潮物質の集積域への集中を低減させるとともに、下層密度流による流入物質の輸送促進を図ることができる。

今後、より幅広い流入条件下における緩勾配での潜入密度流とそこでの幕の設置効果について検討を重ねる必要がある。

謝辞：本研究の一部は、文部省科学研究費(基盤研究C(2)、課題番号13650571)の援助を受けた。また、本研究を遂行するにあたり、本学学部4年生の佐藤伸広君(現大分県)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(代表者：浅枝 隆)、pp. 69-167、土木学会水理委員会、環境水理部会、2000。
- 2) 高橋徹馬・奥村勉・増田稔・柴田治信：石手川ダム湖における赤潮抑制対策について、ダム技術、No. 80、pp. 34-44、1993
- 3) 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。
- 4) 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。
- 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・鈴木宏幸・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) 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.
 - 9) Singh, B. & Shah, C.R. : Plunging phenomena of density currents in reservoirs, *LaHouille Blanche*, Vol.26, No.1, pp.59-64, 1971.
 - 10) 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.
 - 11) Hebbert, B. & Imberger, J. & Loh, I. & Patterson, J. : Collie river underflow into the Wellington reservoir, *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.105, HY.5, pp.533-545, 1979.
 - 12) 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。
 - 13) Ford, D.E. & Johnson, M.C. & Monismith, S.G. : Density inflows to Degray lake, Arkansas, *Proc. of Second Int'l Symposium on Stratified Flows*, Trondheim, Norway, pp.977-987, 1980.
 - 14) 福岡捷二・福嶋祐介・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。
 - 15) 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。
 - 16) 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.
 - 17) Akiyama, J., & Stefan, H.G. : Plunging flow into a reservoir: theory, *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.110, HY.4, pp.484-498, 1984.
 - 18) 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.
 - 19) Farrell, G.J. & Stefan, H.G. : Mathematical modeling of plunging reservoir flows, *J. of Hydraulic Research*, Vol.26, No.5, pp.525-537, 1988.
 - 20) 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。
 - 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) Ellison, T.H. & Turner, J.S. : Turbulent entrainment in stratified flows, *J. of Fluid Mechanics*, Vol.6, pp.423-448, 1959.

(2001. 10. 1 受付)