

漸拡水路における表層流の流動特性と フェンス工の設置効果

SURFACE CURRENTS IN A DIVERGING CHANNEL AND ITS CONTROL BY
CURTAINS FOR COUNTERING FRESH WATER RED-TIDE BLOOMS

秋山壽一郎¹・片山 哲幸²・山崎 勉²・浦 勝³

Juichiro AKIYAMA, Tetuyuki KATAYAMA, Tutomu YAMASAKI 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)

Some of such missing information on the front of surface currents spreading in a diverging channel as intrusion length, flow thickness and densimetric Froude number in both buoyancy-inertia and buoyancy-viscous region have been quantified experimentally.

The effects of a curtain, placed in the steady surface currents in a diverging channel, on the mixing of lighter inflow water with heavier ambient water are investigated experimentally. It is found that some of heavier ambient water is lifted up by the upwelling motion of the lighter surface layer fluid along the curtain, and consequently the dilution rate of surface layer will increase with the ratio of the submerged depth of the curtain to the inflow depth.

Key Words: surface current, reservoir, diverging channel curtain, algal blooming

1. はじめに

ダム貯水池の水循環や水質は流入河川水の性質に大きく左右される。これは、そこでの成層の状態や流入河川水との密度差の程度によって、流入水が表層流、下層流あるいは中層流などの流入型密度流として池内を流動するためである。場所にもよるが、早春から6月初旬にかけては流入水の水温が貯水池水温より高くなることがあり、この時期に貯水池上流端で発生した淡水赤潮が表層流に乗り水域全体に拡がることもある¹⁾。

富栄養化現象に対する池内対策として流動制御があるが、その中でも汚濁拡散防止幕を水面から垂らしたフェンス工は比較的安価であり、その効果に関する検討が試験的に実施されている^{2,3)}。フェンス工(以下では、簡単のため幕と呼ぶ)は、貯水池を横断するように設置することで、植物プランクトンの水域への拡散を防止するとともに、その異常増殖の主要な要因である栄養塩類の制御と光合成反応に必要な光や水温などの環境条件の人為的な操作を図ろうとするものであるが、表層流の流動特性が十分に解明されていないこともあって、その設置を行う際の設置深さや幕が設置された場合の表層流の希釈

混合効果などについて十分な知見が得られているわけではない。

密度噴流のように流出時に浮力に比して慣性力が比較的強い表層流については、発電所からの温排水や河口部での河川流出などを対象として、これまで膨大な量の研究がなされている⁴⁻⁹⁾。また、浮力に比して慣性力が弱い場合の表層流としては流出油の拡がりの問題があり、これについても表面張力の効果も含めて活発な研究がなされている^{10,11)}。

貯水池等への河川水の流入によって発生する表層流のように、表面張力が問題とならない表層流のフロント特性は、慣性力、浮力および粘性力の3者の大小関係で決定され、浮力と慣性力がバランスする浮力-慣性力領域がまず表れ、次いで浮力と粘性力がバランスする浮力-粘性力領域となり、浮力-慣性力領域から浮力-粘性力領域に遷移する遷移領域では3力がバランスすることが、これまでの研究で明らかにされているが^{10,12)}、定量的な関係が示されていないので、著者ら¹³⁾は上下層が明確な界面を有する場合の浮力-慣性力領域と浮力-粘性力領域における1次元表層流のフロント特性を定量的に明らかにした。

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2次元表層流のフロント特性および表層流中に幕を設置した場合の希釈混合効果について実験的に検討を加えたものである。なお、研究の結果より、幕の設置は火力発電所からの温排水の希釈にも有効に作用すると考えられる。

2. 実験

実験装置は、図-1に示すように、水深 $h=50\text{cm}$ での塩水(密度 ρ_a)を満たした全面アクリル製の水槽(長さ 5.0m 、幅 0.2m 、高さ 0.6m)中に水路幅 B_0 、水深 a の流入部とその下流側に片側の側壁の拡がり角度 α が一定(1.24°)の漸拡水路を設置したものであり、水槽下流端には貯留水深を一定に保つ目的で、越流堰が設けられている。流入部前面には開放ゲートが設置されており、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開放ゲートを引き上げ、ウランで着色した淡水(ρ_0)を一定流入流量 Q_0 で貯留塩水中に放出し表層流を発生させた。流入部の内部には、流入水深と同じ高さ a で越流堰が設置されており、一定流量 Q_1 でヘッドタンクから流入部に供給された淡水の一部は、一定流量 Q_2 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。これは、流入に際して余剰あるいは不足のflow forceが働かないようにするための工夫であり、 $Q_0=Q_1-Q_2$ より流入流量を算定している。ただし、より正確に Q_0 を算定するために、各流入条件について予備実験を行い、堰からの越流水深がほぼ0となるような Q_1 を決定した後に、本実験を実施した。このような慎重な配慮は、表層流フロントの流動特性が流入条件によって容易に変化することを踏まえたものである。図-1中には対象とする現象に関連する重要な諸量も示されている。

実験内容としては、幕が設置されていない状況での表層流フロントの流動特性に関するCASE Iと定常表層流中における幕の設置効果に関するCASE IIの2通りを実施した。CASE IIでは表層流中に連行される周囲水を補償する目的で、通水と同時に水槽下部側面に設けられた多数の小孔を通じて若干の塩水供給を行なった。この際、時間の経過にかかわらず、表層流層厚が一定となるように塩水供給量を慎重に調節した。

実験条件としては、CASE Iでは表層流の浮力-慣性力領域、浮力-粘性力領域あるいは浮力-慣性力領域が表れるように、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、上下層が明確な界面を有する表層流を実現するために、流入水が流入部から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条件を設定する必要がある。予備実験結果によれば、この条件は流入点での内部Froude数 $F_0=(Q_0/B_0)(\epsilon_0 g a^3)^{1/2} < 1.0$ を満たす場合であった。ただし、 F_0 が小さい方が界面が安定することはあらためて言うまでもないが、過剰に小さくすると流入直後の浮き上がりが顕著とな

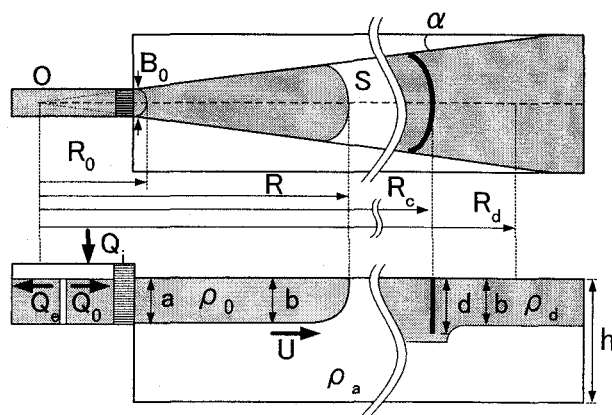


図-1 実験装置および流れの定義図

表-1 実験条件

CASE I	h (cm)	α ($^{\circ}$)	a (cm)	B ₀ (cm)	ϵ_0	Q ₀ (cm ³ /s)
I -1-1	50	1.24	5	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

CASE II	h (cm)	a (cm)	B ₀ (cm)	ϵ_0	Q ₀ (cm ³ /s)	h _c (cm)	R _c (cm)	d (cm)
II -1-1	50	5	5	0.0045	100	4.5	225	0
II -1-2								15
II -1-3								25
II -2-1							265	0
II -2-2								15
II -2-3								25

るので、ここでは $F_0=0.06\sim 0.89$ の範囲で変化させた。

一方、CASE IIではCASE Iの結果に基づき、全領域にわたって浮力-慣性力領域が表れるように流入条件を設定し、この流入条件を一定に保った状態で、幕の設置深さ d/h_c を3.3と5.5に変化させた。ここに、 h_c は内部限界水深($=((Q_0/B_0)^2/\epsilon_0 g)^{1/3}$)である。また、幕の設置位置を $R_c/B_0=45$ と53に変化させた。ただし、幕としてはアクリル板を用いた。このため、ここでは流体力等によるその変形については考慮されていない。実験条件をまとめて表-1に示す。

測定内容としては、CASE Iでは各流入条件について水路の中心軸に関する流れの対称性を確認した後に、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

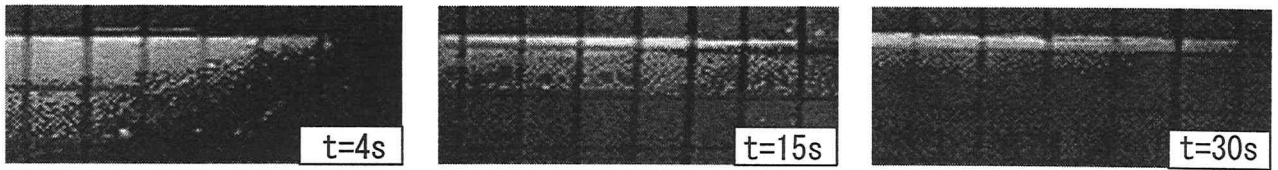


図-2 漸拡水路における表層流フロントの流動状況

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。その際、同一条件下で複数回計測を行い、測定結果の再現性を確認した。一方、CASE IIでは幕下端から流出した流入水が下層水と希釈混合した後、再び安定した定常表層流を形成した地点での鉛直塩分濃度分布を導電率計(KENEK、MK-206)で測定した。その際、同一条件下で複数回計測を行い、測定結果の再現性を確認した。

3. 実験結果

以下では、まず漸拡水路における表層流の流動特性の定量化を行い、次に幕の設置による希釈混合効果について検討を加える。

(1) 漸拡水路における表層流フロントの流動特性

図-2は、漸拡水路における表層流フロントの流動状況の一例を示したものである。流入時には若干の混合が認められるが、時間の経過とともに明瞭な界面を有しながら表層流が周囲水表面に拡がって行く様子がわかる。また、フロントの形状は時間の経過とともに、流入直後のカルマンヘッド的な形状から楔状に徐々に変化することが確認できる。

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¹²⁾。

$$R_1^* = \frac{R}{(\varepsilon_0 g Q_0 t_1^3)^{1/4}} = c_1 (t/t_1)^{3/4} \quad (1)$$

$$R_2^* = \frac{R}{(\varepsilon_0 g Q_0^2 / \nu^{1/2})^{1/6} t_1^{7/12}} = c_2 (t/t_1)^{7/12} \quad (2)$$

$$b_1^* = \frac{b}{(Q_0 / \varepsilon_0 g)^{1/2} t_1^{-1/2}} = c_3 (t/t_1)^{-1/2} \quad (3)$$

$$b_2^* = \frac{b}{(\nu^{1/2} Q_0 / \varepsilon_0 g)^{1/3} t_1^{-1/6}} = c_4 (t/t_1)^{-1/6} \quad (4)$$

さらに、最も重要な流動特性量であるフロントの内部Froude数 $F_f (= U^{3/2} S^{1/2} / (\varepsilon_0 g Q_0)^{1/2})$ 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 =両領域の遷移時間 $(= (Q_0 / \varepsilon_0 g \nu)^{1/2})$ である。

$$F_f = c_5 \quad (5)$$

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

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を用いた表示となっている点が特徴であり利点であるが、各定数 $c_{1 \sim 6}$ の具体的な値が全くわかっていないために、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。

図-3と図-4は、それぞれ浮力-慣性力領域と浮力-粘性力領域における流入点から測ったフロント侵入半径 $(R^* - R_0^*)$ とそこからの無次元経過時間 $(t - t_0)/t_1$ との関係を示したものである。ここで、 R_0 は仮想原点0から流入点までの距離であり、ここでは R_0 を流入半径と呼ぶ。 R_0^* は $R_0^* = R_0 / (\varepsilon_0 g Q_0 t_1^3)^{1/4}$ で定義される無次元流入半径である。これより、浮力-慣性力領域では、経過時間が大きくなるにつれて式(1)の関係に漸近する傾向が認められるが、全体的にはこの関係に従っていないことがわかる。また、 R_0^* が大きい方が式(1)からのずれが大きいことも確認できる。一方、浮力-慣性力領域においては式(1)の関係に従わないデータも、浮力-粘性力領域においては経過時間が大きくなると、式(2)の関係によく従うことがわかる。このような傾向は、ここで取扱っている表層流が厳密には軸対称流ではなく、図-1に示す状況であることに起因していると考えられる。

図-1に示すような状況に対する上記の軸対称表層流の関係式の妥当性を調べるためには、少なくとも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-5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、全域で軸対称流となっていることが確認でき、 $c_1 \approx 3.70$ のように同定される。

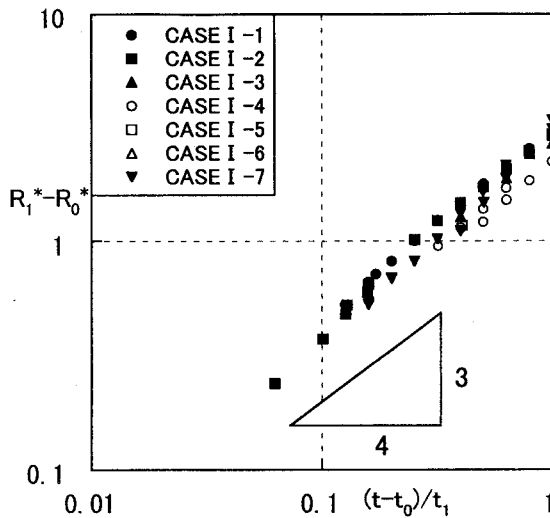


図-3 浮力-慣性力領域における $R_1^*-R_0^*$ と $(t-t_0)/t_1$ との関係

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-6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に示す状況であっても、上記のような考慮をすることで、上下層が明確な界面を有する場合の軸対称表層流の関係式がほぼ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、 $c_2=3.70$ 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、壁面での剥離も発生しないことがわかっている。従って、上記の関係式は、この範囲の漸拡水路であれば上記の補正を施すことで適用可能であると考えられる。ところで、図-3に示したように、 R_0^* が十分小さければ軸対称流れとなる。これは、 R_0^* の定義から、 R_0 が大きくても Q_0 が十分に大きければ、軸対称流れとなることを示している。つまり、 R_0^* が大きくても、無次元流入流量 $Q_0^* (=Q_0/[R_0^{8/5}(\epsilon_0 g \nu^3)^{1/5}])$ が十分に大きければ、軸対称流れとなる。この傾向は図-3より確認できる。しかし、 $Q_0^*=1/R_0^{8/5}$ のような関係があるので、軸対称流れとなるためには、 Q_0^* よりも R_0^* の影響の方がより強い。

以下の b^* と F_r についても t_0 に関する補正を R^* と同様に行った。図-7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。図-2から明らかのように、表層流フロントの形状は、底面に沿って流動する重力密度流とは異なり、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-粘性力領域では完全な楔状に変化するため、代表的なフロント層厚は存在しない。そこで、ここ

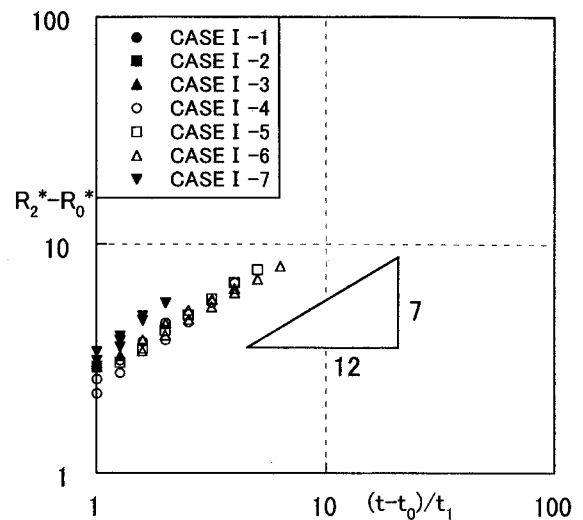


図-4 浮力-粘性力領域における $R_1^*-R_0^*$ と $(t-t_0)/t_1$ との関係

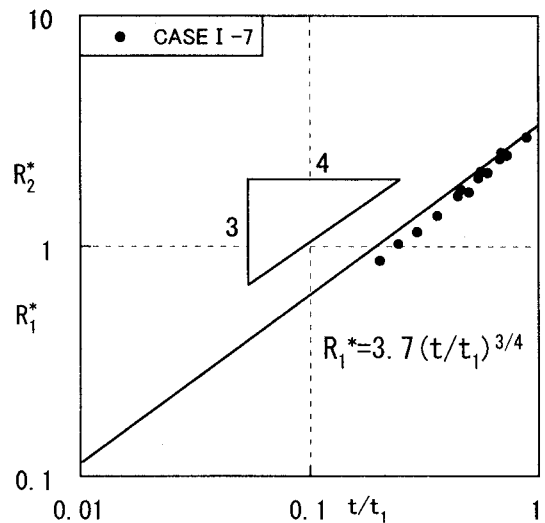


図-5 $R_0^* < 0.6$ の場合の R_1^* と t/t_1 との関係

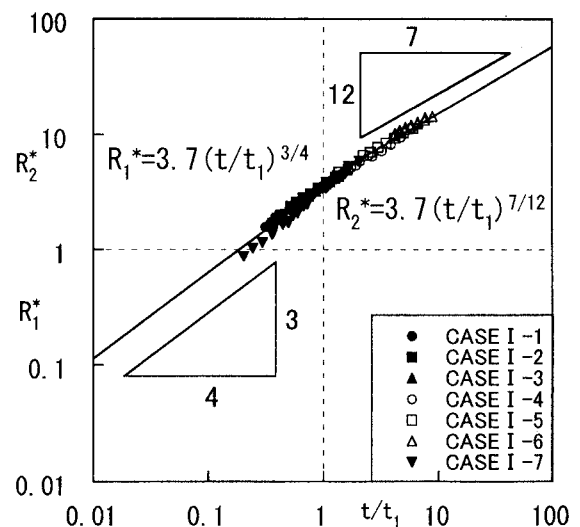


図-6 各領域における R^* と t/t_1 との関係

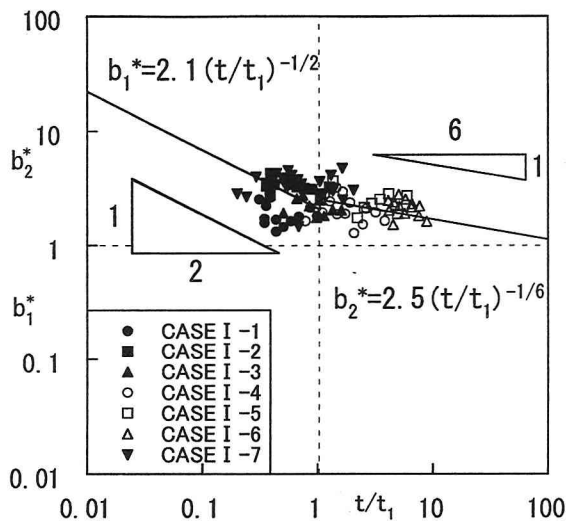


図-7 各領域における b^* と t/t_1 との関係

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 $c_3 \div 2.1$ および $c_4 \div 2.5$ のようになる。

図-8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、各領域では式(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 $c_5 \div 1.9$ および $c_6 \div 1.5$ のようになる。以上の結果をまとめると表-2のようになる。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 $c_6 = (\alpha\pi/90)^{1/2} (7/12)^{3/2} c_2^2$ なる関係がある。これらの式に基づくと、 $c_5 = 1.8$ および $c_6 = 1.2$ となり、上記の図-8から得られる係数値とおおよそ一致する。

(2) 漸拡水路におけるフェンス工の設置効果

図-9は、フェンス工まわりの流動状況が、幕の無次元設置深さ d/h_c によって変化する様子を示したものである。これより、フェンス工の設置によって幕の上流側に貯留された表層水が幕下端から流出することで希釈され、表層流の層厚が増加することがわかる。目視観測によると、幕の下端より流出した表層流体が幕の背面に沿って浮力効果により上昇する際に発生する渦によって、周囲流体が取込まれリフトアップすることで表層流の希釈が生じることが認められた。

図-10と図-11は、幕の下流の再度安定した表層流が形成される地点での相対密度分布を示したものである。なお、 y は水表面から測った距離であり、図中の分布は再度安定した表層流の層厚 b と初期相対密度差 ε_0 で正規化されている。また、 b の定義はそこでの相対密度差が0となる水深としている。同図より、無次元設置深さ d/h_c が増加すると表層の希釈が促進されることがわかる。ここで、 ε_d は幕下流での相対密度差 $(=\rho_a - \rho_d)/\rho_a$ である。

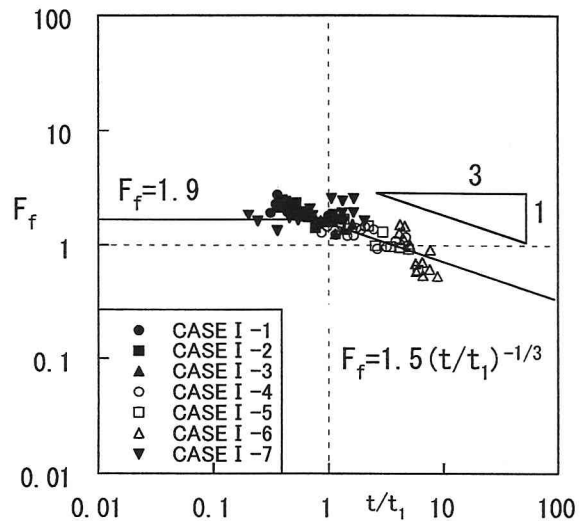


図-8 各領域における F_f と t/t_1 との関係

表-2 漸拡水路における表層流の流動特性

	浮力-慣性力領域 $t < t_1$	浮力-粘性力領域 $t > t_1$
R^*	$c_1 \div 3.7$	$c_2 \div 3.7$
b^*	$c_3 \div 2.1$	$c_4 \div 2.5$
F_f	$c_5 \div 1.9$	$c_6 \div 1.5$

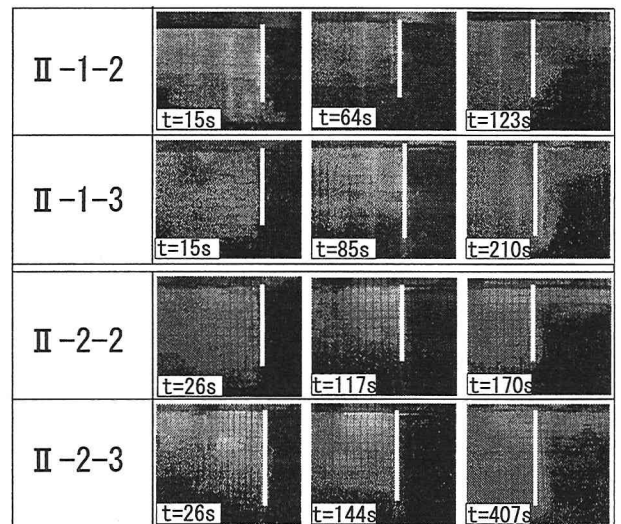


図-9 フェンス工まわりでの流動状況の一例

図-12は、幕の設置に伴う流入水の混合率 $\gamma (=Q_m/Q_0)$ と無次元設置深さ d/h_c との関係について調べたものである。ここで、 Q_m は幕の設置に伴う総連行量、 γ は幕の設置に伴う正味の混合率であり、浮力フラックスの保存に基づき、 $\gamma = -1 + \varepsilon_0/\varepsilon_d^* - \gamma_0$ より算定した。ここに、添字*は層平均量であることを示し、 γ_0 は幕が設置されていない状態での流入点から測定位置までの総連行率であり、その値は約0.43であった。同図より、 γ 値に設置位置による若干の違い

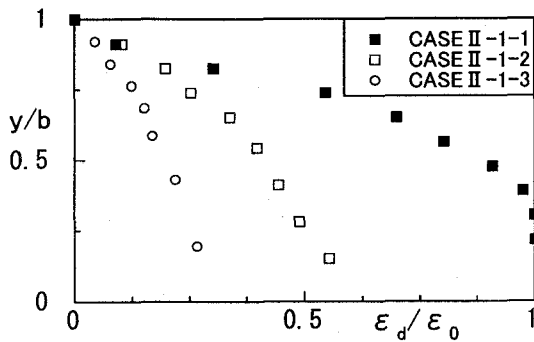


図-10 CASE II-1 における幕下流での
定常表層流の相対密度分布

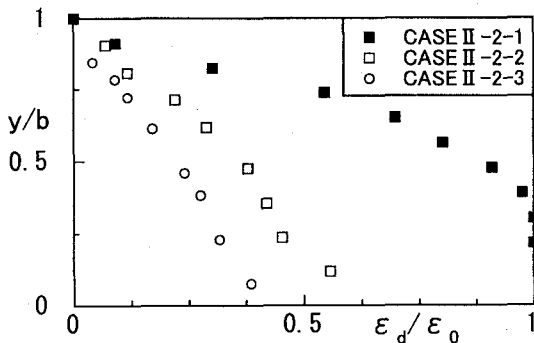


図-11 CASE II-2 における幕下流での
定常表層流の相対密度分布

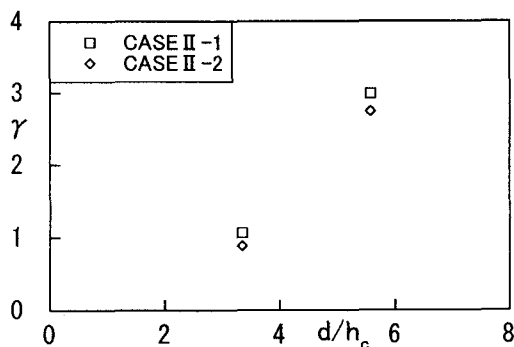


図-12 混合率 γ と無次元設置深さ d/h_c との関係

が認められるが、これは界面を通じての混合の違いであると考えられる。 γ は d/h_c の増加とともに急激に大きくなり、 $d/h_c \approx 3$ で100%の希釈混合効果が期待できることから、この程度の設置深さにすれば、フェンス工の設置によって密度差を半分に減少させることがわかる。

以上より、幕の下流側では流入水の密度が減少するため、表層流を中層流へ転化できる可能性があり、栄養塩類の流入と光合成反応に必要な光や水温などの環境条件の制御や操作が可能であると考えられる。

4. まとめ

本研究によって次のような結論が得られた。

(1) 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

ロントの流動特性を明らかにした。

(2) 定常表層流中に設置された幕による希釈混合効果について検討を加えた結果、①表層流中に幕を設置することで、下層の重い流体との希釈混合効果が期待でき、 $d/h_c \approx 3$ で100%の希釈混合効果が期待できること、②跳層が存在しない混合型貯水池では設置深さの基準が全くないが、そのような場合は流入条件との関係で希釈率が規定されるため、図-12が一つの目安になること、などの知見が得られた。

参考文献

- 1) 秋山壽一郎：流入型密度流の水理特性とその予測、湖沼・貯水池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) 吉村 佐、田島良一、斉藤暁樹、井芹 寧：寺内ダム貯水池における水質管理の調査報告、ダム技術，No.114, pp.35-46, 1996.
- 3) Priyantha, D.G.N. et al.: Modelling the effects of curtains on water quality of eutrophic reservoir, *Annual J. of Hydraulic Engineering*, Vol.40, pp.7-12, 1996.
- 4) 椿東一郎、小松利光：2次元表面密度噴流における流れの特性と連行現象、土木学会論文集，第273号，pp.69-81, 1978.
- 5) 中辻啓二、許 再寧、室田 明：河川ブルームの拡がり特性とその物理機構，土木学会論文集，No.434/II-16, pp.29-36, 1991.
- 6) 和田 明、片野尚明：3次元数値モデルによる排水ブルームの挙動解析，電力中央研究所報3708031, 1983.
- 7) Rodi, W.: Turbulence models and their applications in hydraulics, *State of the Arts Paper*, IAHR, 1980.
- 8) Jirka, G.H. et al.: Buoyant surface jets, *J. of Hydraulics Division*, ASCE, Vol.107, No.11, pp.1467-1488, 1981.
- 9) List, E.J.: Turbulent jets and plumes, *Ann. Rev. of Fluid Mechanics*, Vol.14, pp.189-212, 1982.
- 10) Hoult, D.P.: Oil spreading on the sea, *Ann. Rev. of Fluid Mechanics*, Vol.4, pp.341-368, 1972.
- 11) 羽田野袈裟義、天野卓三、松本治彦、埜口英昭、平野宗夫：水表面の油層の1次元的な拡がりについて、土木学会論文集，No.593/II-43, pp.117-124, 1998.
- 12) Didden, N. and Maxworthy, T.: The viscous spreading of plane and axisymmetric gravity current, *J. of Fluid Mechanics*, Vol.121, pp.27-42, 1981.
- 13) 秋山壽一郎、アキレスクマール ジャ、山崎 勉、浦勝：表層流の流動特性と遮蔽幕による希釈混合効果、水工学論文集，第46巻，pp.1025-1030, 2001.
- 14) Kao, T.W.: Density currents and their applications, *J. of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol.103, HY.5, pp.543-556, 1977.
- 15) Huppert, H.E. & Simpson, J.E.: The slumping of gravity current, *J. of Fluid Mechanics*, Vol.99, pp.785-799, 1980.

(2002. 9. 30受付)