

# 表層流の流動特性と遮蔽幕による 希釈混合効果

## FLOW CHARACTERISTICS OF SURFACE CURRENTS AND MIXING BY CURTAINS

秋山 壽一郎<sup>1</sup>・アキレス クマール ジャ<sup>2</sup>・山崎 勉<sup>3</sup>・浦 勝<sup>4</sup>

Juichiro AKIYAMA, Akhilesh K. Jha, Tsutomu YAMASAKI and Masaru URA

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>学生員 学士(工) 九州工業大学大学院 工学研究科博士前期過程 (同上)

<sup>4</sup>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)

Such flow characteristics of the front of a surface current in both buoyancy-inertia and buoyancy-viscous region as intrusion length, propagation speed, flow thickness and densimetric Froude number are quantified experimentally. Subsequently the effects of a curtain placed in the steady surface currents on the mixing of the currents are investigated experimentally. It is found that some of the heavier ambient fluid is lifted up by the upwelling motion of the lighter surface layer fluid along the curtain, and consequently the dilution rate of surface layer increases with the ratio of the submerged depth of the curtain to the inflow depth.

**Key Words :** density current, surface current, reservoir, curtain, algal blooming

### 1. はじめに

家庭排水等を発生源とする広域的な水質汚濁の進行に伴い、河川水の水質は年々悪化する傾向にある。このため、ダム貯水池等の閉鎖性水域では富栄養化による植物プランクトンの異常増殖、すなわち淡水赤潮がよく見られるようになってきた。

ダム貯水池では、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、流入河川水は表層流、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。このため、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。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は表層流に乗り水域全体に拡がることもある<sup>1)</sup>。

表層流が関与した富栄養化現象に対する比較的安価な池内対策の一つとしてカーテン等の遮蔽幕を用いた富栄養化対策があり、いくつかのダム湖で試験的に実施されている<sup>2)</sup>。遮蔽幕は、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、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<sup>3-8)</sup>。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<sup>9-10)</sup>。しかし、表層流のフロント特性については十分な理解が得られているわけではない。すなわち、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では、そ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





図-2 表層流フロントの流動状況の一例(CASE I -3-3)

設けられた多数の小穴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、一定の表層流層厚が得られるよう塩水供給量を慎重に調節した。図-1中には現象に関する重要な諸量も示されている。

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-慣性力領域から浮力-粘性力領域への遷移領域が表れるように、表-1のように流入条件( $a$ ,  $q_0$ ,  $\varepsilon_0$ )を様々に変化した。その際、上下層が明確な界面を有する表層流が得られるように、予備実験結果に基づき、流入装置から流出した瞬間に生じる初期混合ができる限り小さくなるように流入条件を設定した。このような慎重な配慮は、表層流フロントの流動特性が慣性力、浮力および粘性力の微妙なバランスで容易に変化することを踏まえたものである。一方、CASE II ではCASE I の結果に基づき、表層流が実験水路の全長にわたって浮力-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、遮蔽幕の設置深さ $d/a$ を7通り( $d/a=2, 3, 4, 5, 6, 7$ および8)に変化させた。ただし、遮蔽幕としてはアクリル板を用いた。よって、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。実験条件を表-1にまとめて示す。

測定内容としては、CASE I では塩水表面を流動する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ー解析することにより、表層流フロント形状と先端移動速度 $U$ を算定した。また、所定の断面に導電率計を設置し、フロント密度をオイラー的に計測した。CASE II では遮蔽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( $X=X_d$ )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

表層流は、一般に水表面での放熱や風から受けるせん断応力などの水表面での外部要因の影響を受けやすく、その流動特性は容易に変化する。従って、実際問題ではこれらの影響を無視することはできないが、ここでは表層流の流動特性およびそこで

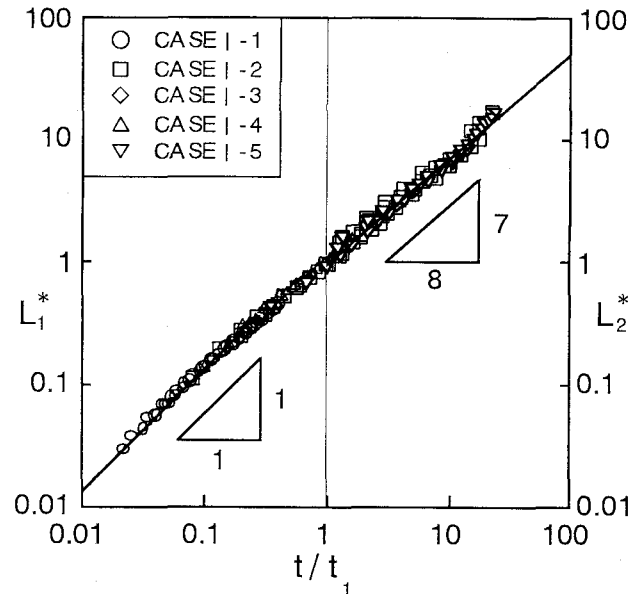


図-3 表層流のフロントの無次元侵入長

の遮蔽幕の設置効果に関する基本的な知見を得ることを目的としているので、この点は考慮されていない。以下ではまず表層流の流動特性の定量化を行い、次に遮蔽幕の設置による希釈混合効果について検討を加える。

#### (1) 表層流フロントの流動特性

図-2は、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周囲水表面に広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徐々に変化するが、概ね楔形であり、その後部ではほぼ一定の層厚となっていることがわかる。

表層流フロントの侵入長 $L$ は、上下層が明確な界面を有するときには、浮力-慣性力領域では式(1)で与えられる<sup>11)</sup>。しかし、定数値 $c_1$ についてはKao<sup>12)</sup>の結果などがあるが、正確にはよくわかっていない。一方、浮力-粘性力領域では水表面にせん断力が働く場合には $L/((\varepsilon_0 g q_0^3 / \nu)^{1/5} t_1^{4/5}) = 0.73 (t/t_1)^{4/5}$ となることがこれまでの研究で明らかにされている<sup>11)</sup>。しかし、せん断力が働かない場合には式(2)で与えられるが、この場合の定数値 $c_2$ については決定されていない。ここに、 $t_1$ =両領域の遷移時間( $= [q_0^4 / (\varepsilon_0 g)^2 \nu^3]^{1/3}$ )である。

$$\frac{L}{\left(\varepsilon_0 g q_0\right)^{1/3} t_1^{1.0}} = c_1 \left(\frac{t}{t_1}\right)^{1.0} \quad (1)$$

$$\frac{L}{\left(\varepsilon_0 g q_0^2 / \nu^{1/2}\right)^{1/4} t_1^{7/8}} = c_2 \left(\frac{t}{t_1}\right)^{7/8} \quad (2)$$

図-3は、各領域でのフロントの無次元侵入長 $L_1^*$ (= $L/(\varepsilon_0 g q_0)^{1/3} t_1$ )、 $L_2^*$ (= $L/(\varepsilon_0 g q_0^2 / \nu^{1/2})^{1/4} t_1^{7/8}$ )と無次元経過時間 $t/t_1$ との関係について調べたものである。ここで、無次元量に付した添字1と2はそれぞれ、浮力-慣性力領域( $t/t_1 < 1.0$ )と浮力-粘性力領域( $t/t_1 > 1.0$ )での無次元特性量であることを示している。これより、 $t/t_1 = 1.0$ 前後を境にして、無次元侵入長の $t/t_1$ に対する依存性が変化していること、浮力-慣性力領域では $t/t_1$ の1乗に、浮力-粘性力領域では $7/8$ 乗に比例しており、実験で上下層が明確な界面を有する表層流が得られていることが確認できる。同図に基づき定数値 $c_1$ と $c_2$ を推定すると、それぞれ $c_1 \approx 1.32$ および $c_2 \approx 0.94$ のようになる。

図-4は、各領域の無次元フロント層厚 $b_1^*$ (= $b/(q_0^2 / \varepsilon_0 g)^{1/3}$ )、 $b_2^*$ (= $b/((q_0^2 \nu^{1/2} / \varepsilon_0 g)^{1/4} t_1^{1/8})$ )と $t/t_1$ との関係について調べたものである。ここで、無次元量に付した添字1と2はそれぞれ、浮力-慣性力領域と浮力-粘性力領域での無次元特性量であることを示している。各領域の無次元フロント層厚は式(3)と式(4)で与えられる。図-2から明らかなように、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楔状の形状であり、そこでの層厚が最大になるような代表的な層厚は存在しない。このため、表層流のフロント層厚 $b$ の定義には任意性が残るが、ここでは、フロント後部ではほぼ一定の層厚となっていることに着目し、この一定層厚をもって層厚とした。フロント層厚については、かなりのデータのばらつきが認められるが、傾向的には上記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 $c_3 \approx 0.85$ および $c_4 \approx 0.92$ のようになる。

$$\frac{b}{\left(q_0^2 / \varepsilon_0 g\right)^{1/3}} = c_3 \quad (3)$$

$$\frac{b}{\left(q_0^2 \nu^{1/2} / \varepsilon_0 g\right)^{1/4} t_1^{1/8}} = c_4 \left(\frac{t}{t_1}\right)^{1/8} \quad (4)$$

図-5は、浮力-慣性力領域におけるフロントの内部Froude数 $F_i$ の頻度分布を示したものである。これより $F_i \approx 1.40$ が得られる。ここに、 $F_i$ は $U^{3/2}/(\varepsilon_0 g q_0)^{1/2}$

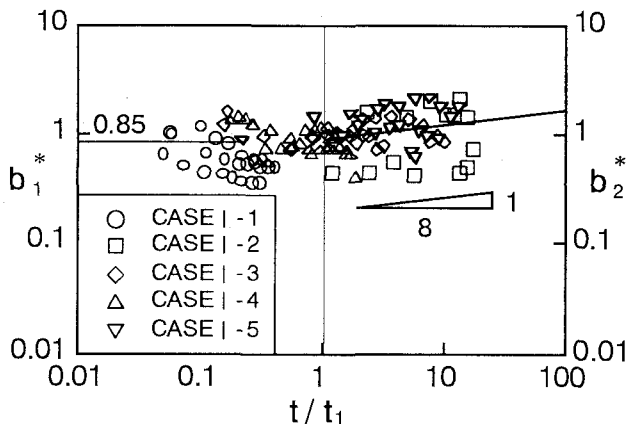


図-4 表層流の無次元フロント層厚

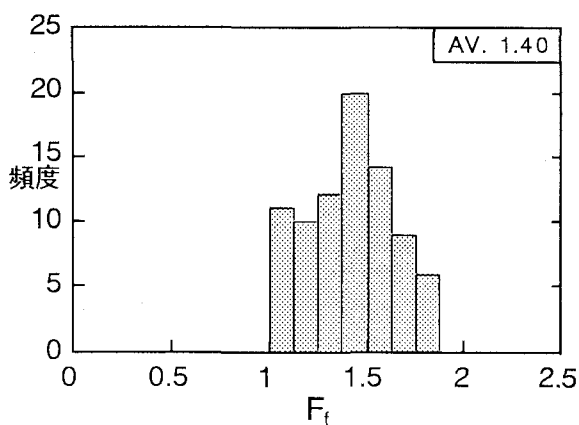


図-5 浮力-慣性力領域内部Froude数

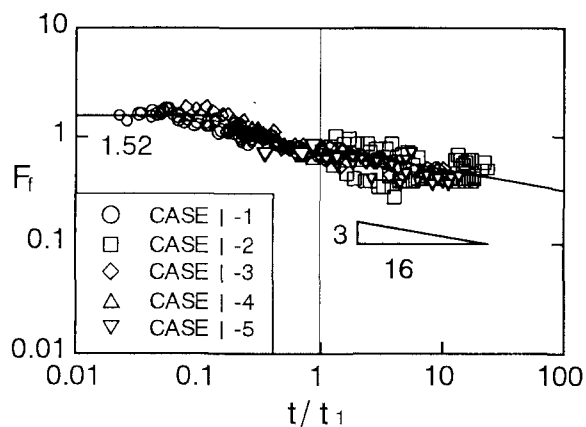


図-6 表層流フロントの内部Froude数

で定義される流入条件に基づく内部Froude数である。一方、図-3より得られる $U$ を用いると $F_i \approx 1.52$ となる。ここでは、図-5から得られる $F_i$ にかなりのばらつきがあることを踏まえ、 $F_i \approx 1.52$ を採用する。表層流と類似した密度流として重力密度流があるが、フロント部の特性量に基づく塩水重力密度流フロントの内部Froude数 $F(=U/(\varepsilon g b)^{1/2})$ に関して、Huppert & Simpson<sup>13)</sup>は $H/h \leq 0.075$ で $F=1.19$ 、 $b/h=0.075 \sim 1.0$ で $F=0.5(b/h)^{1/3}$ なる経験式を提案している。この経験式と

比較を行なうためには、Fがフロント部の局所的な特性量に基づく内部Froude数であるので、流入条件に基づく $F_f$ に書き換える必要がある。重力密度流の単位幅流量が $q=bU$ で表され、浮力フラックスの保存( $\epsilon g q = \epsilon_0 g q_0$ )が成立すると仮定すると、 $F=F_f$ が得られる。本研究での $b/h$ の範囲は約0.011~0.053であるので、Huppert & Simpson<sup>13)</sup>に従えば、 $F=1.19$ 程度であると考えられる。この値と本研究で得られた $F_f=1.52$ を比較すると、その相対誤差は22%程度となり、相当大きい。また、 $F_f$ の定義と式(1)より、 $F_f$ と $c_f$ との関係は $c_f=F_f^{2/3}$ のようになる。従って、 $F=1.19$ に対応する $c_f$ 値は $c_f=1.12$ となり、この値と本研究で得られた $c_f=1.32$ とを比較すると、その相対誤差は約15%程度となる。

以上より、Huppert & Simpson<sup>13)</sup>の塩水重力密度流の経験式は、浮力-慣性力領域の表層流には適用できないことがわかる。これは、表層流では上記の2つの仮定が成立しないためであると考えられる。

図-6は、 $F_f$ と $t/t_1$ との関係を示したものである。これより、 $F_f$ は上述したように流入条件とは無関係に、浮力-慣性力領域では約1.52となる。一方、浮力-粘性力領域では $F_f(=U^{3/2}/(\epsilon_0 g q_0)^{1/2})$ と表-2中の $U$ の関係式より、 $F_f \propto (t/t_1)^{-3/16}$ の関係となり、 $0.74(t/t_1)^{-3/16}$ のように表すことができると考えられる。また、両領域の遷移点前後ではその中間の値を取る。以上の結果をまとめると表-2のようになる。

表-2 表層流の関係

| 浮力-慣性力領域<br>$t < t_1$                                                                    | 浮力-粘性力領域(せん断力なし)<br>$t < t_1$                                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\frac{L}{(\epsilon_0 g q_0)^{1/3} t_1^{1.0}} = 1.32 \left( \frac{t}{t_1} \right)^{1.0}$ | $\frac{L}{\left( \frac{\epsilon_0 g q_0^2}{\nu^{1/2}} \right)^{1/4} t_1^{7/8}} = 0.94 \left( \frac{t}{t_1} \right)^{7/8}$   |
| $\frac{U}{(\epsilon_0 g q_0)^{1/3}} = 1.32$                                              | $\frac{U}{\left( \frac{\epsilon_0 g q_0^2}{\nu^{1/2}} \right)^{1/4} t_1^{-1/8}} = 0.82 \left( \frac{t}{t_1} \right)^{-1/8}$ |
| $\frac{b}{\left( \frac{q_0^2}{\epsilon_0 g} \right)^{1/3}} = 0.85$                       | $\frac{b}{\left( \frac{q_0^2 \nu^{1/2}}{\epsilon_0 g} \right)^{1/4} t_1^{1/8}} = 0.92 \left( \frac{t}{t_1} \right)^{1/8}$   |
| $F_f = 1.52$                                                                             | $F_f = 0.74 \left( \frac{t}{t_1} \right)^{-3/16}$                                                                           |

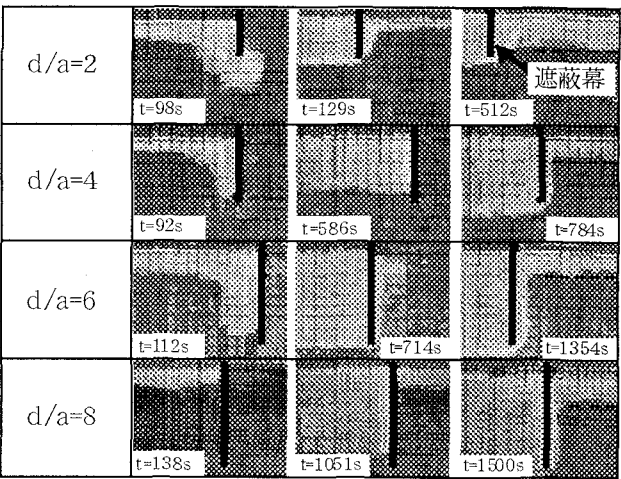


図-7 遮蔽幕まわりでの流動状況の一例

## (2) 遮蔽幕の設置効果

図-7は、遮蔽幕まわりの流動状況が、幕の無次元設置深さ $d/a$ によって変化する様子を示したものである。これより、遮蔽幕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わかった。

図-8は、幕の下流で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、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 $\epsilon_0$ で正規化されている。なお、 $b$ 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 $d/a$ が増加すると水表面に至るまで表層の希釈が促進されることがわかる。特に $d/a=6$ 以上では表層全体にわたってはほぼ一様な相対密度分布となっており、幕の設置による明確な希釈混合効果が認められる。

図-9は、幕の設置に伴う流入水の混合率 $\gamma$ と無次元設置深さ $d/a$ との関係について調べたものである。ここで、 $\gamma$ は幕の設置に伴う正味の混合率であり、

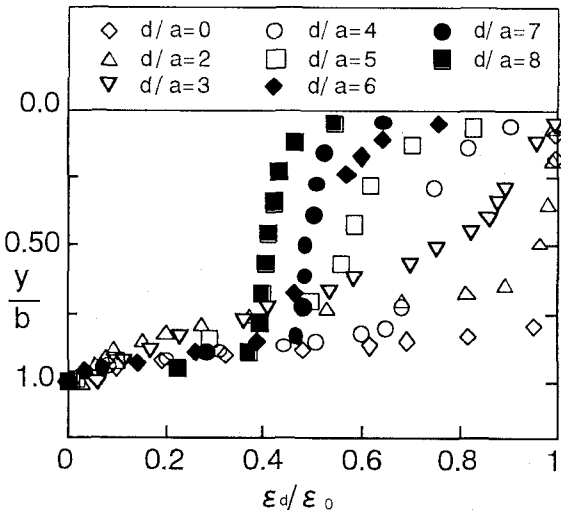


図-8 幕下流での定常表層流の相対密度分布

浮力フラックスの保存に基づき、 $\gamma = -1 + \epsilon_0/\epsilon_d^* - \gamma_0$ より算定した。ここに、添字\*は層平均量であることを示し、 $\gamma_0$ は幕が設置されていない状態で流入点から幕の設置位置までの総連行量であり、数回の測定の結果

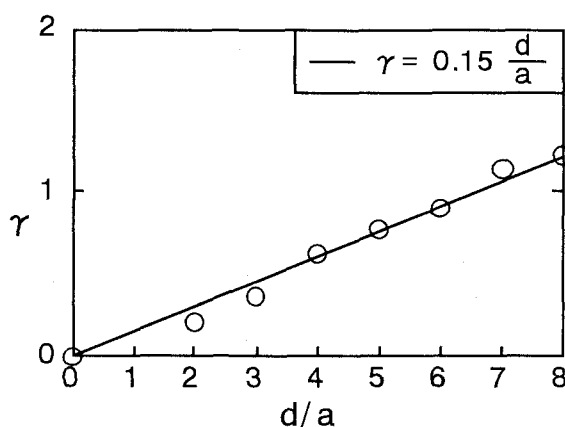


図-9 混合率 $\gamma$ と無次元設置深さ $d/a$ との関係

その値は約0.16であった。また、希釈混合した後に再び安定した表層流を形成するところでの内部Froude数 $F_d$ は0.50程度であった。ここで、 $\gamma_0$ がほぼ一定の値を取る理由は、 $\gamma_0$ は主に流入時の初期混合で規定されており、これが極力小さくなるように実験条件を設定しているためである。同図より、 $\gamma$ は $d/a$ の増加とともに線形的に大きくなり、式(5)のような関係が成立することがわかる。なお、 $d/a \approx 7$ で約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、遮蔽幕の設置によって密度差を半分減らせることがわかる。

$$\gamma = 0.15 \frac{d}{a} \quad (5)$$

以上より、幕の下流側では流入水の密度は減少するので、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。また、遮蔽幕の設置は、富栄養化対策のみならず、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。

#### 4. まとめ

本研究によって得られた結論は次のとおりである。

(1) 上下層が明確な界面を有する時の浮力-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遮蔽幕の希釈混合効果について検討を加え、以下のような知見を得た。

①表層流中に遮蔽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る。②幕の設置深さとともに、混合率が線形的に大きくなる。③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水深との関係で

希釈率が規定されるため、式(5)が一つの目安になる。

今後は、幕の形状の効果や流入条件の影響等について検討を重ねる予定である。

**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1350571)の援助を受けた。また、本研究を遂行するにあたり、本学大学院工学研究科博士前期課程2年岩橋高彰君(現(株)前田建設工業)および本学学部4年生片山哲幸君の協力を得た。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(代表者：浅枝 隆)，土木学会水理委員会，環境水理部会，pp.69-167, 2000.
- 2) 例えば，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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Rodi, W.: Turbulence models and their applications in hydraulics, *State of the Arts Paper*, IAHR, 1980.
- 7) Jirka, G.H. et al.: Buoyant surface jets, *J. of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 107, No. 11, pp. 1467-1488, 1981.
- 8) List, E. J.: Turbulent jets and plumes, *Ann. Rev. of Fluid Mechanics*, Vol. 14, pp. 189-212, 1982.
- 9) Hoult, D. P.: Oil spreading on the sea, *Ann. Rev. Fluid Mechanics*, Vol. 4, pp. 341-368, 1972.
- 10) 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.
- 11) Didden, N. & Maxworthy, T.: The viscous spreading of plane and axisymmetric gravity current, *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 121, pp. 27-42, 1981.
- 12) Kao, T. W. : Density currents and their applications, *J. of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 103, HY. 5, pp. 543-556, 1977.
- 13) Huppert, H. E. & Simpson, J. E.: The Slumping of gravity current, *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 99, pp. 785-799, 1980.

(2001. 10. 1受付)