

ダム前面に設置したウォール による流入濁水の排除効果

DOWNSTREAM CONTROL OF PLUNGE DENSE INFLOWS IN A RESERVOIR BY A WALL

秋山 壽一郎¹・重枝 未玲²・安藤 祐馬³・小野 修平³

Juichiro AKIYAMA, Mirei SHIGE-EDA, Yuma ANDO and Shuhei ONO

¹フェロー会員 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(工学) 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 (同上)

³学生会員 九州工業大学大学院 工学研究科博士前期課程 (同上)

Downstream control of plunging dense inflows into a well-mixed reservoir by a wall placed near a dam, as a countermeasure for fresh red tide bloom as well as sedimentation due to turbidity currents, is investigated experimentally. It is found that the inflows are displaced out of the reservoir and the position of plunging point is maintained in stable condition by placing the wall, and hence reservoir water is rendered fresh. It is also found that when the bottom end of the wall is placed at or slightly beneath the upper interface of the dense bottom currents observed under the condition of no wall, the inflows are effectively displaced out of the reservoir.

Key Words: *reservoir, plunge flow, water quality, turbidity, sedimentation, wall*

1. はじめに

出水時に河川からダム貯水池に流入した濁水は、その負の浮力のために池水に潜り込み、潜入密度流を形成する。潜入現象は、赤潮物質の集積機構、富栄養化、濁水の長期化等のダム水質問題のみならず、ウォッシュロードの堆砂によるダム機能の低下と深く関わっている¹⁾。

池水に潜入した濁水は、成層型貯水池では中層密度流として躍層に沿って貫入し、濁水長期化現象をもたらす。混合型貯水池では底面に沿って下層流として流下し、ダム付近にウォッシュロードが堆砂する。また、濁質に吸着した栄養塩が蓄積され、底質が長期にわたって貧酸素状態に置かれるとヘドロ化し、排砂時に下流域や沿岸域の水質の悪化をもたらす場合がある。

ダム貯水池の流動現象や水質は流入・流出水の影響を強く受ける。このため、出水時に流入する濁質や栄養塩を池内に滞留させることなく、濁質の捕捉率を下げ、適切な方法により速やかに池外に放流することが、池水の水質とダム機能の保全を図る上での基本となる。

貯水池の水質保全(池内)対策としては、(1)曝気により循環流を発生させる「循環流制御設備」、(2)カーテンやパイプライン等の選択流入施設により、河川からの流入水を所定の水深位置に潜り込ませる「選択流入設備」、(3)ダム堤体に設けられたゲート付き放流管により出水時

に中・底層から放流する「選択放流設備」がある²⁾。これらは、池内の流動制御により水質保全を図る方法であり、まとめて「流動制御法」と呼ばれる。

一方、濁質を池外に排除する方法としては、浚渫、洪水余水吐きや選択放流設備近くに流入水を導き放流する副ダムとオリフィスあるいはバイパストンネル、貯水池水位を強制的に低下させることで掃流力を上げ、ダム近傍の堆砂を除去するフラッシング排砂、などがある。

「流動制御法」のひとつである「選択放流」は、ダム堆砂の原因となる高濃度のウォッシュロードを池外に放流することになるので、水質保全対策としてだけではなく、ダム機能保全対策としても有効である。しかしながら、わが国の全てのダムに「選択放流設備」が設けられているわけではなく、流域面積が比較的小さな重力式ダムの多くにはクレストゲートを持たない常用洪水吐きが設置されている。このようなダムでは、自然越流による表層放流を行うので、出水時に池内に流入してくる濁質や栄養塩の排除が難しく、土砂の捕捉率も大きくなるという問題がある。このため、このようなダムでは洪水吐き前面にウォールを設置し、下層流として池内を流下してきた高濃度な濁水を貯水池底部からウォールで導き、洪水吐きから放流する方法が取られることがある³⁾。また、より積極的なダム機能保全対策として、ダム堤体の上流側に垂直なバップルウォールを設け、ダム貯水位とバップルウォールの内側の水位差を利用した上昇流によ

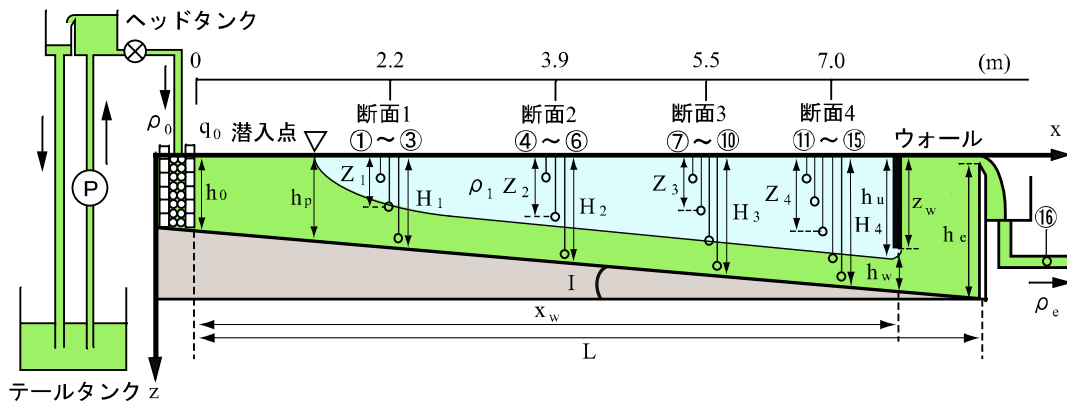


図-1 実験装置と計測断面

り堆砂を除去する方式も提案されている⁴⁾。しかしながら、ウォールの設置が池水の全体的な流動現象にどのような影響を及ぼし、またどのようにウォールを設置すれば、流入濁水を効果的に排除することができるのか、等々について必ずしも十分な知見が得られているわけではない。

本研究は、以上のような背景を踏まえ、流入濁水の排除と池内の清水保全の立場から、選択放流設備を持たないダムの洪水吐き上流側にウォールを設置した場合の設置効果について室内実験に基づき、検討を加えたものである。

2. 実験

実験装置は、淡水を満たした全面ガラス製の水槽(長さ10m、深さ1.2m、幅0.6m)中に貯水池を模したアクリル製の水路(長さ7.6m、深さ0.4m、幅0.1m)を設置したものである。水路勾配 I は潜入密度流とその下流の下層密度流の挙動を規定するので、内部限界勾配 I_c がどのような値を取るのかについて明確にしておく必要がある。ちなみに、Lee & Yu⁵⁾は $I=1/50$ では緩勾配、福岡ら⁶⁾は $1/10$ では急勾配、 $1/60$ では緩勾配としており、実験室スケールでは概ね $I_c=1/60 \sim 1/50$ の範囲にあると考えられる。著者ら⁷⁾は水路勾配 $I=1/150 \sim 1/30$ の範囲における下層密度流の実験結果に基づき $I_c=1/50$ とした。本研究では、著者らの基準に基づき、 $I=1/60$ の緩勾配に設定した。

水槽中に水深 $h=17.2\text{cm}$ まで淡水(密度 ρ_l)を貯留した後に、流入部からウランで着色した塩水(密度 ρ_0 、単位幅流量 q_0)を流入させ、自然な潜り込み状態での潜入密度流を発生させた。貯水池からの排水は流入分だけ、下流端の越流堰(高さ $h_e=16.7\text{cm}$)から自然越流するようになっている。

実験は、越流堰から自然越流させた場合(CASE A)と越流堰の上流側にウォールを設置し越流堰から自然越流させた場合(CASE B)を実施した。また、各CASEについて流入内部Froude数 $F_0=(q_0/\varepsilon_0 g h_0^3)^{1/2}$ を3通りに変化した。なお、全てのCASEにおいて、流入水深 $h_0=5.0\text{cm}$ 、

表-1 実験条件

CASE	q_0 (cm ² /s)	F ₀	h _c (cm)	(L-x _w)/h _c	h _u (cm)	z _w /h _u
A-1	6.5	0.70	3.95	-	12.0	-
A-2	8.0	0.86	4.54	-	11.6	-
A-3	10.0	1.08	5.26	-	11.4	-
B-1-1	6.5	0.70	3.95	1	-	0.87
B-1-2					-	1.00
B-1-3					-	1.13
B-2-1	8.0	0.86	4.54		-	0.87
B-2-2					-	1.00
B-2-3					-	1.13
B-3-1	10.0	1.08	5.26		-	0.87
B-3-2					-	1.00
B-3-3					-	1.13

表-2 重要なパラメータ

g	:重力加速度
h_u	:CASE A におけるウォール設置位置での上層水深
$H_{1\sim4}$	:断面1～4での全水深
x_w	:ウォールの設置位置
L	:流入点から越流堰までの距離
z_w	:ウォールの設置水深
$Z_{1\sim4}$	:断面1～4での導電率計プローブの設置水深
ε_0	:流入水の相対密度差($=(\rho_0-\rho_l)/\rho_l$)

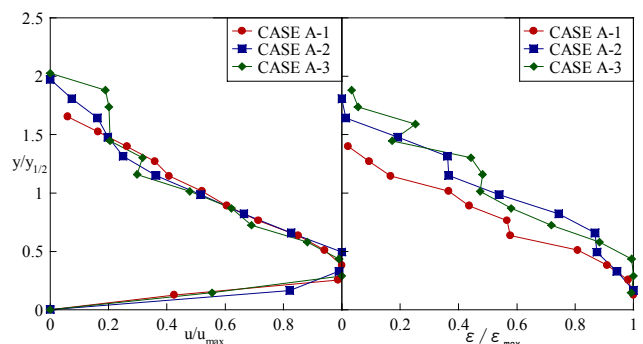


図-2 流速(左)と相対密度差(右)の鉛直分布 (CASE A)

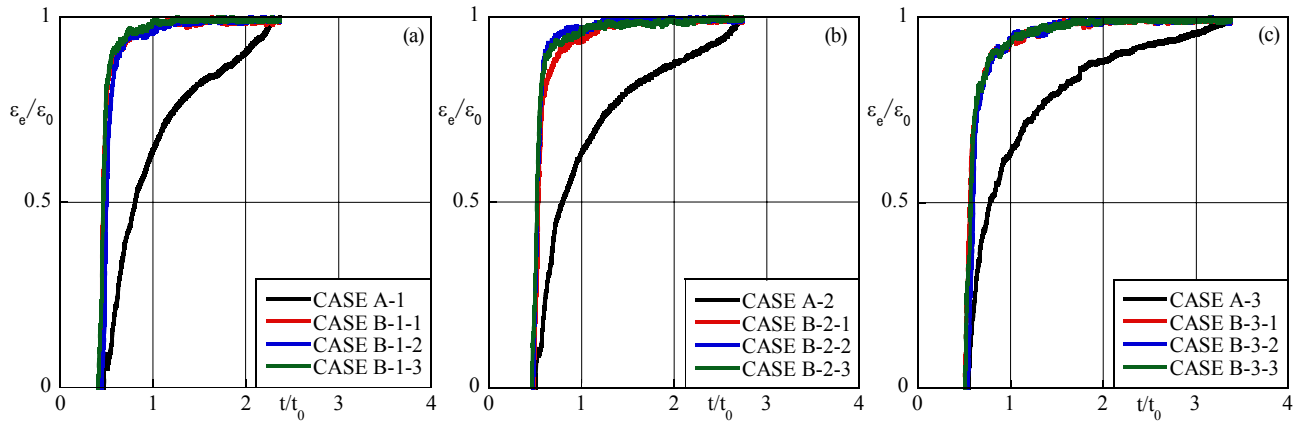


図-3 越流水の相対密度差の時系列 ((a) $F_0=0.70$, (b) $F_0=0.86$, (c) $F_0=1.08$)

流入相対密度差 $\varepsilon_0=0.0007$ の一定値とした。

ウォールの設置位置は、越流堰の設置位置での水深と同じ距離だけ上流側に離れた位置とした。また、ウォールの設置深さは、CASE A における自然な潜り込み状態での目視界面(以下、目視界面を「界面」という)を基準とし、ウォール下端が界面上方($z_w/h_u=0.87$)、界面(1.00)あるいは界面下方(1.13)となるように設定した。実験装置の概要ならびに導電率計の設置断面と設置状況を図-1に示し、表-1と表-2にそれぞれ実験条件と重要なパラメータを示す。

測定および解析方法については、各CASE について、(1)ウォール設置位置における流動層厚を目視により決定した後、流入開始から貯水池全体が流入水と入れ替わるまでの流動状況をビデオカメラで撮影し、その映像をパソコンに取り込み画像解析することで、全体的な流況などを把握した。(2)水路縦断方向の断面1～断面4(図-1)において、水深方向の3～5点に導電率計を設置し、各測点での相対密度差 ε の経時変化を求めた。また、越流水の相対密度差 ε_e も同様に求めた。(3)流入水の先端が越流堰に到達したときのウォール設置位置での流速と密度の鉛直分布をそれぞれサーマル式微流速計と導電率計で測定した。さらに、(4)CASE A では、設定した水路勾配の妥当性、つまり流れの状態が常流になっているかどうかを確認する目的で、下層流が越流堰天端に達した時刻での流速と密度の鉛直分布を計測した。

3. 実験結果と考察

図-2は、CASE A において流入密度流の先端が越流堰天端に到達した時刻での、ウォール設置位置における流速と相対密度差の鉛直分布を示したものである。いずれの分布もそれぞれの最大値と流速の最大値を取る距離の半値半幅で無次元化されている。なお、画像解析の結果から、流入密度流の先端が越流堰天端に到達するまでの無次元到達時間は、CASE A-1, CASE A-2 およびCASE A-3 でそれぞれ $t/t_0=0.43$, 0.49 および 0.54 であった。ここに、 t_d (=貯水池の全容量/流入流量)は総入れ替え時間ある

いは I/t_0 は回転率である。両分布に基づき、モーメント法により層平均物理量(h_w , U_w , ε_w)を求め、これらを用いてウォール設置位置での内部Froude数 F_w を算定したところ、CASE A-1, CASE A-2 およびCASE A-3 でそれぞれ、 $F_w=0.98$, 0.88 および 0.85 であった。著者らにより⁷⁾、 $I=1/60$ では流動層の内部Froude数は0.90程度の値を取ることがわかっており、 $I=1/60$ が緩勾配であることが確認できる。

図-3は、各 F_0 における越流水の相対密度差 ε_e ($=(\rho_e-\rho_l)/\rho_l$)と ε_0 との比の時系列を示したものである。これより次のことがわかる。(1)CASE A では、CASE B に比して流入水と池水が希釈混合された状態で排水されている。(2)CASE B では、CASE A に比して1.2～1.8倍程早く流入水が排水されている。(3)ウォールの設置深さが排水された相対密度差に及ぼす影響は僅かである。

図-4は、CASE A において、図-3で示した流入開始から $\varepsilon_e=\varepsilon_0$ となる時刻 t/t_0 までの無次元潜入水深 h_p/h_c とウォール設置地点での無次元水深 h_w/h_c の時系列を併せて示したものである。なお、 h_w/h_c の始点が流入水が越流堰天端に到達した時刻に対応している。ここで、 h_c は流入条件に基づく内部限界水深($= (q_0^2/\varepsilon_0 g)^{1/3}$)である。これより次のことがわかる。

CASE A では、 h_p/h_c は流入開始から急増した後微増あるいはほぼ一定となり、再度急増している。このような挙動を取る理由は次のように考えられる。(1) h_p/h_c が流入開始後に急増から微増へ変化する時刻は、流動層が越流堰天端に到達した時刻とほぼ一致している。 h_p/h_c の流入開始後の急増は、流入水が先端部を有する非定常状態の重力密度流として流下しているためである。(2)著者ら⁷⁾が明らかにしたように、潜入点が平衡状態に達するまでは、流入条件と水路勾配の影響を受け、平衡状態に近づくに従ってそれらの影響が弱くなり、 $F_p \approx 0.5$ に漸近していく。このような理由で、 h_p/h_c は急増後、微増あるいはほぼ一定となっている。また、この時間帯では h_w/h_c が急増しているが、その影響はまだ潜入点まで及んでいない。(3)図中に示した縦の実線は、貯水池下流端で上昇した流動層厚が上流側へ伝播し、潜入点に到達した時刻を示している。これは、画像解析から得られたことであ

る。これから明らかなように、潜入点が再度急増する時刻は、貯水池下流端で上昇した流動層厚が潜入点に到達する時刻とほぼ一致している。このことから、緩勾配水路での潜入密度流であるので、越流堰近傍での流動層厚の上昇の影響を受け、その影響が潜入点に到達した時点で、平衡状態に近づきつつある潜入点の状態が変わり、また清水の一部は越流堰から排水され続けるので、一気に潜入点が下流側へ移動すると考えられる。

一方、CASE B では、(1) h_p/h_c は流入開始後の急増後はほぼ一定値を取っており、一定値に遷移する時刻は、CASE A と同様に、流入水が越流堰に到達した時刻とほぼ一致している。(2)CASE A と比較すると、潜入点の下流への移動距離が小さくなっている。これは、先述したように、CASE A では表層から放流されているために、潜入点が下流側に引っ張られていたものが、ウォールの設置によって抑制されるためである。(3)急増後の潜入点の位置は安定している。(4)ウォールの設置位置別に見ると、若干ではあるが、界面上方、界面、界面下方の順で流入開始後の潜入点の下流への移動が小さくなっている。(5) F_0 別に見ると、 h_p/h_c には顕著な傾向的な違いは認められない。 h_w/h_c には t/t_0 が増加するにつれて、緩やかに増加する傾向が認められ、CASE A のように急速ではないが、排水できなかった流入水の一部が徐々にウォール付近に残留していることがわかる。

図-5は、CASE A とCASE B の潜入点の内部Froude数 F_p の時系列を示したものである。図中には著者らが得た $I=1/60$ での平衡状態での F_p 値($=0.52$)⁷⁾も併せてプロットしている。なお、 F_p と h_p/h_c との間には、 $h_p/h_c = F_p^{-2.3}$ なる関係がある。これより次のことがわかる。(1)CASE A の F_p 値は時間の経過とともに、絶えず変化しており、またその値も平衡状態のものとは全く異なっている。(2)CASE B では、急減した後の F_p は平衡状態ではないのでその値は若干異なっているが、平衡状態の値に漸近している。また、ウォールを界面位置とした場合が最も平衡状態での F_p 値⁷⁾に近いこともわかる。

図-3～図-5から、ウォールを設置することで、次のような機能と効用が期待できると考えられる。(1)流入水は速やかに池外へ排除される。(2)表層放流で生じる池水の流動による潜入点の下流側への移動を抑制する。(3)貯水池下流端での層厚の上昇とその上流側への伝播が抑制され、潜入点の下流への移動が抑制され安定化する。また、ウォール下端を界面位置とした場合に最も効果が得られる。(4)これらのことから、池水の清域が保全される。

図-6は、断面4での相対密度差の時系列の一例を示したものである。 F_0 によって顕著な傾向的な違いは認められなかったので、ここでは $F_0=0.86$ の結果を示している。なお、各プローブの設置深さは断面4における水深 $H_4(=16.67\text{cm})$ で無次元化されている。これより次のことがわかる。(1)CASE A では、下層流の先端が越流堰に到達直後、短時間で流入水が水表面まで広がる。

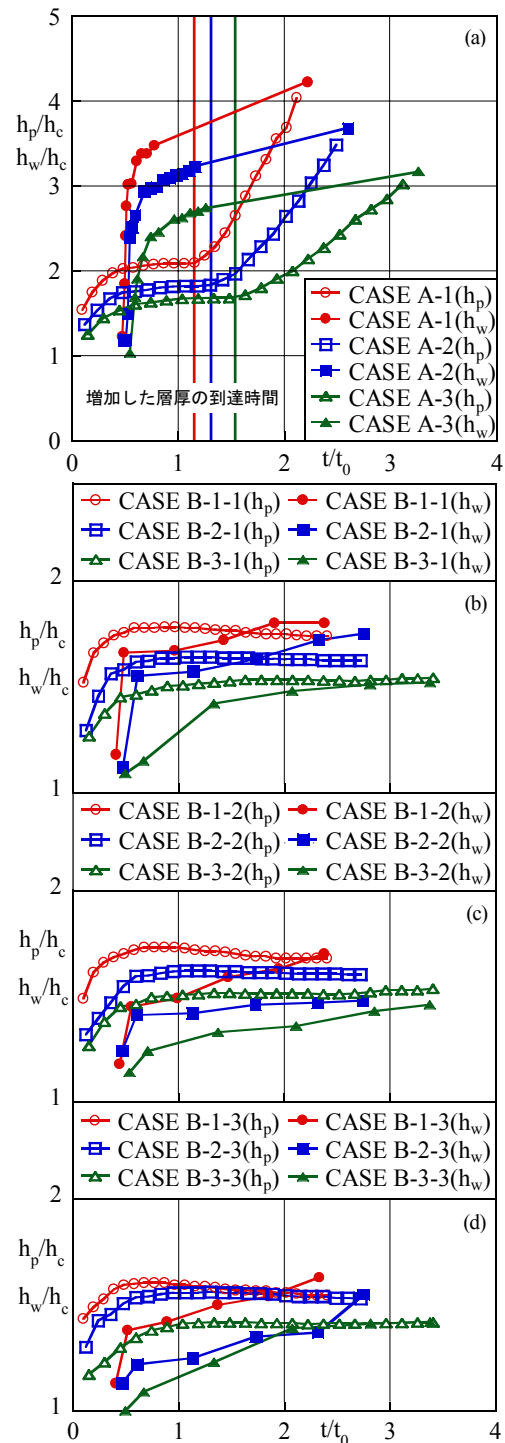


図-4 h_p/h_c と h_w/h_c の時系列 ((a)CASE A, (b)CASE B(界面上方), (c)CASE B(界面), (d)CASE B(界面下方))

(2)CASE B では、ウォール下端を界面上方に設定した場合は流入水の拡散が大きい。界面あるいはその下方とした場合は、流入水の拡散が緩やかである。

図-7は、流況がほぼ定常状態となった時間帯での、ウォール直上流点でのCASE B の相対密度差の鉛直分布を示したものである。 F_0 別にウォールをそれぞれ界面上方、界面および界面下方としたときの分布形として示している。なお、いずれの分布もそれぞれの最大値と流速の最大値を取る距離の半値半幅で無次元化されている。これより、いずれの F_0 についても、ウォール下端を界面

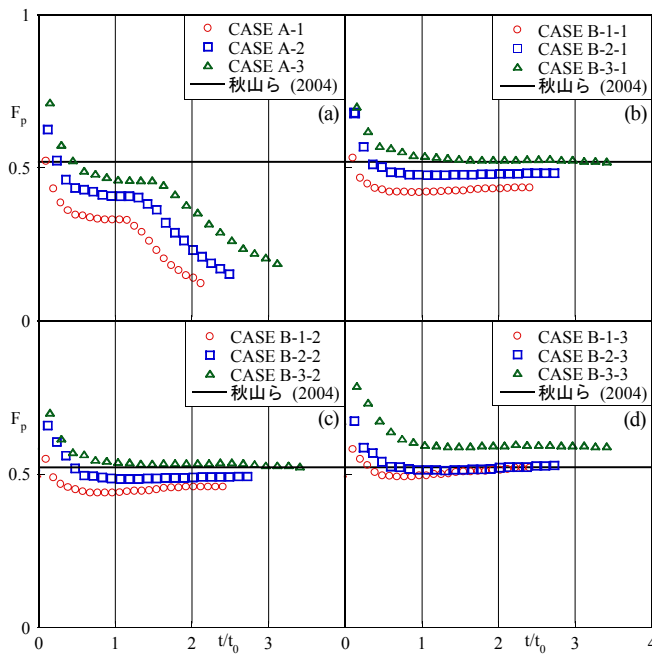


図-5 F_p の時系列 ((a)CASE A, (b)CASE B(界面上方), (c)CASE B(界面), (d)CASE B(界面下方))

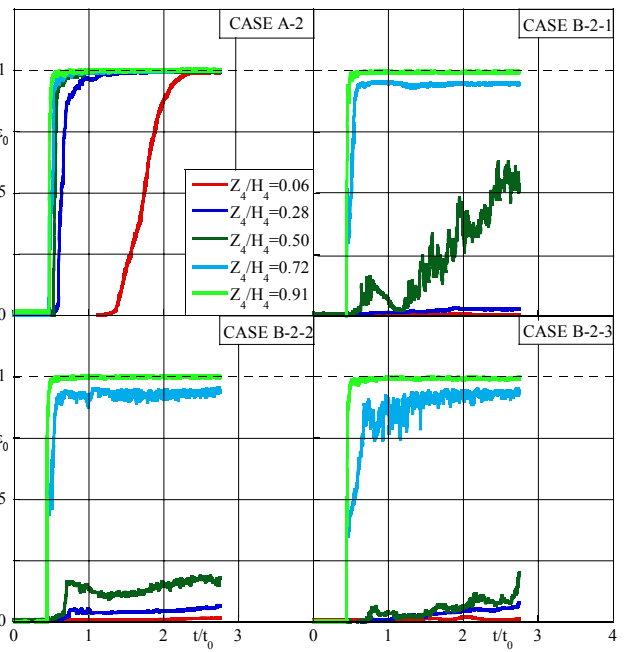


図-6 断面4での相対密度差の時系列 ($F_0=0.86$)

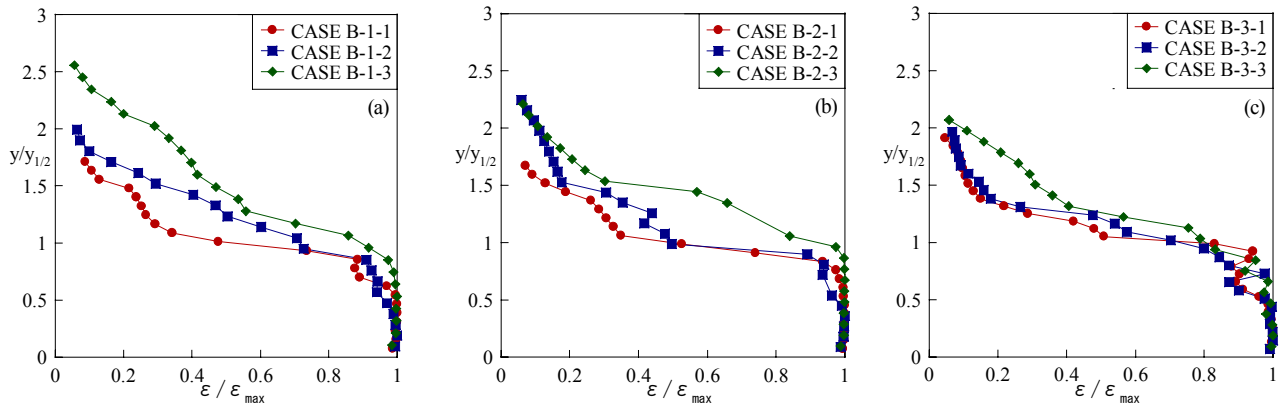


図-7 ウォール直上流点でのCASE B の相対密度差の鉛直分布 ((a) $F_0=0.70$, (b) $F_0=0.86$, (c) $F_0=1.08$)

下方とした場合では、流動層の上端部がウォールによって遮られるために流動層の拡散が若干大きいことがわかる。

図-8は $F_0=0.86$ の場合について、CASE A とCASE B の一例としてウォール下端を界面位置に設定した場合の $t/t_0=0.49, 0.75, 1.00$ および 1.75 での相対密度差の空間分布とその時刻の画像を併せて示したものである。なお、相対密度差の空間分布図は、断面1～断面4(図-6)で得られた相対密度差の時系列を変換したものである。図-4で示したように、 $t/t_0=0.49$ はCASE A で流入水が越流堰に到達した時刻、 0.75 と 1.00 は越流堰近傍の層厚が上昇し、その上昇が潜入点に到達するまでの時刻、 1.75 は層厚の上昇が潜入点に到達した後の時刻を示している。

これより次のようなことが見て取れる。(1)CASE A では流入水の排水が困難だけでなく、池水も同時に排水されるので、流入水が下流側から徐々に池内全体に拡散していくとともに、潜入点が下流側に移動し、清水域が急速に消失していく。(2)CASE B では流入水が速やかに池外へ排除され、また流入水が越流堰に到達した後は

潜入点はいへん安定している。このため、清水域が保全されている。

紙面の都合で図は省略するが、 $F_0=0.70$ ではCASE A とCASE B のいずれについてもさほど図-8($F_0=0.86$)の状況と変わらないが、 $F_0=1.08$ では流入流量の増加に伴い、CASE A では清水域の消失の度合いがより強くなる。CASE B では $F_0=0.86$ の場合と大きく変わらないが、僅かではあるが、希釈された流入水がウォール前面に溜まってくる。そのため、長時間時間が経過すると、CASE A のような状況に至ると推察される。

また、図-6～図-8から、流入水を速やかに池外へ排除するためには、ウォール下端を界面位置とした場合が最も効果的であり、次いで界面下方、界面上方の順であると考えられる。一方では、流入開始後の潜入点の下流への移動距離は界面上方、界面、界面下方の順で小さくなるので、池水の清水域を保全するためには、流入水の排除効果と潜入点下流側への移動による清水域の減少効果の両者を勘案して、ウォールの設置水深を設定する必要があると考えられる。

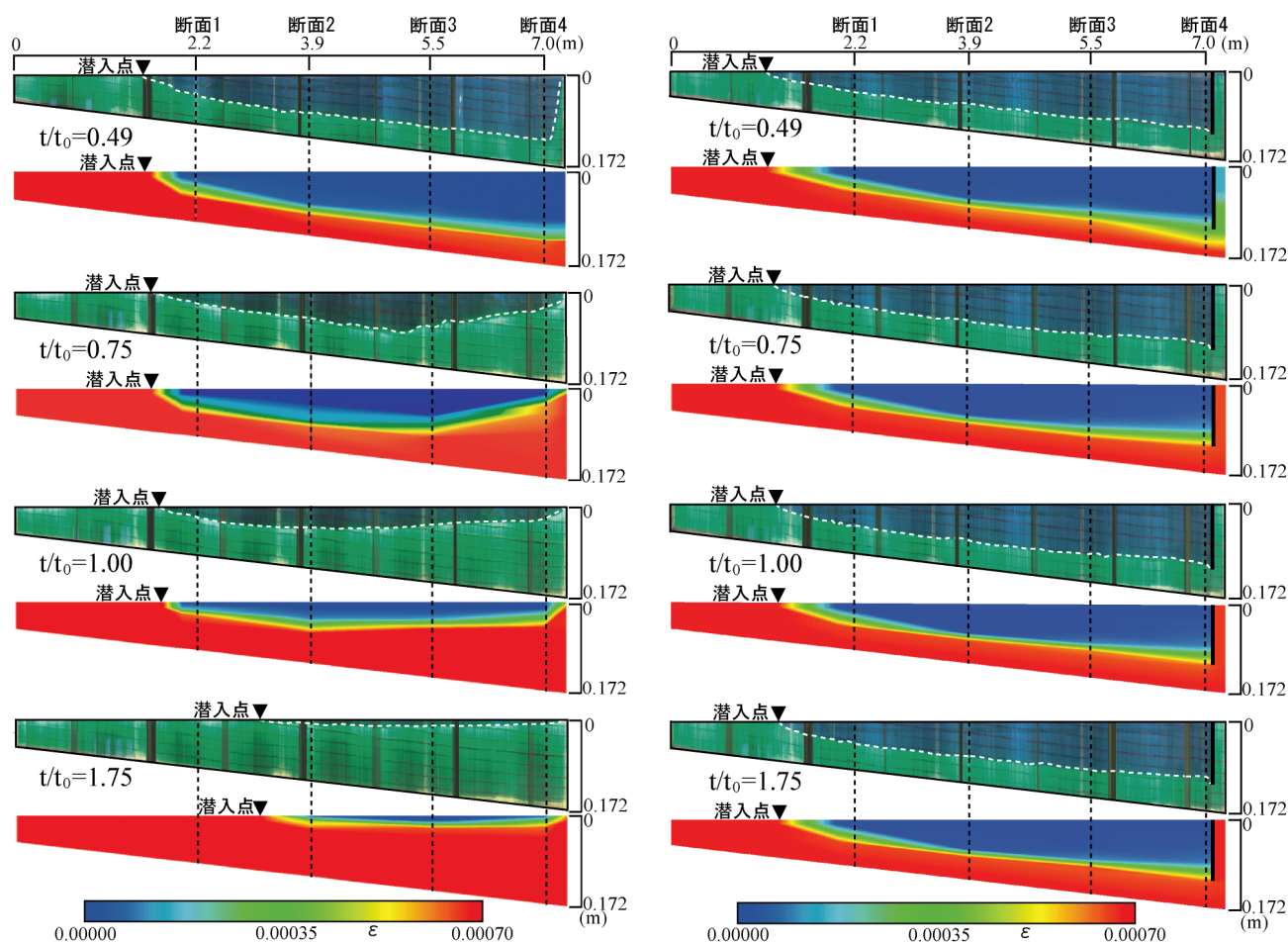


図-8 CASE A とCASE B の相対密度差の空間分布図 ((左)CASE A-2, (右)CASE B-2-2)

4. 結論

本研究により、以下のような結論が得られた。洪水吐きの前面にウォールを設置することで、流入水を速やかに池外へ排除できる。このため、ダム下流端での下層流の層厚の増加も抑制され、潜入点も安定化される。その結果、池水の清水域が保全される。言い換えれば、ウォールを設置することで、流入水と池水が混合して表層越流していた状態から、ダム底部に設けられた放流施設から流入水(池水の連行や界面混合のため一部希釈混合している)を安定的に排水しているような効果が期待できる。ウォールの設置水深としては、流入水の排除効果と潜入点下流側への移動による清水域の減少効果の両者を勘案して、ウォールの設置水深を設定する必要がある。実現象での水位や流入流量の変動を勘案すれば、ウォール下端を界面位置程度に設定しておけばよいと思われる。

今後は、著者らが開発中の貯水池流動モデル(SMM-BIF-CG model)⁸⁾による数値シミュレーションを試みる予定である。

謝辞：本研究を実施するにあたり、本学学部4年佐藤亜彦君の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

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) 荒井 治，高須 修二：ダム湖の水質対策の動向，ダム工学，Vol.7，No.2，pp.90-97，1997.
- 3) 塚原 千明，角 哲也，宮井 貴大，柏井 条介：カーテンウォール付常用洪水吐きの土砂放流特性，土木技術資料 40-11，pp.56-61，1998.
- 4) 日本国土開発(株)：ダム堆砂除去(河川還元)システム，ダム技術提案，<http://www.nilim.go.jp/lab/fdg/k-gijyututeian.htm>.
- 5) Lee, H.Y & Yu, W.S.: Experimental study of reservoir turbidity current, *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.123, No.6, pp.520-528, 1997.
- 6) 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.
- 7) 秋山 壽一郎，片山 哲幸，西 恭太，土居 正明：混合型・成層型貯水地での潜入密度流の水利特性について，水工学論文集，第48巻，pp.1375-1380，2004.
- 8) 重枝未玲，秋山壽一郎：一般座標コロケート格子を用いた鉛直2次元モデルによる潜入密度流の数値解析，水工学論文集，第49巻，pp.1159-1164，2005.

(2006. 9. 30受付)