

ダム貯水池における洪水時の 微細土砂流動特性と捕捉率に関する考察

STUDY ON TURBIDITY CURRENT CHARACTERISTICS DURING FLOODS AND TRAP EFFICIENCY OF FINE SEDIMENTS IN RESERVOIRS

角 哲也¹・高田 康史²・岡野 眞久³

Tetsuya SUMI and Yasufumi TAKATA and Masahisa OKANO

1. 正会員 工博 京都大学助教授 大学院工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)
2. 正会員 工修 京都大学大学院工学研究科博士後期課程 (〒540-0008 大阪市中央区大手前)
(株)建設技術研究所大阪支社水工部)
3. 正会員 工修 (財)ダム水源環境整備センター (〒102-0083 東京都千代田区麹町)

Reservoir sedimentation causes various problems, such as storage capacity losses and the risk of blocking intake structures. It will be necessary to manage those sediments properly in order to obtain sustainable long-term use of existing reservoirs. During floods, sediment concentrations of entering flows are often very high and suspended load can be carried in the form of turbidity currents. Thus, it is important to study those characteristics and proper management methods that will be able to pass entering sediments through reservoirs as much as possible.

In this paper, we study those turbidity currents during floods using a 2-dimensional numerical simulation model and the trap efficiency of fine sediments in reservoirs. The results suggest that the trap efficiency of fine sediments depend on the turnover rate, bed slope, sediment concentration, grain size, and elevation of bottom outlets. Those results are very helpful to understand the behavior of turbidity current in stratified reservoirs and its management from the viewpoint of mitigation measures for reservoir sedimentation.

Key Words : *suspended load, reservoir sedimentation, turbidity current, trap efficiency, stratified reservoirs, Koshiu dam*

1. はじめに

近年「流砂系」のキーワードの下、流域一貫した総合的な土砂管理の必要性が高まってきている。ダム貯水池における様々な堆砂問題が報告される中、総合的な土砂管理の観点より貯水池内における土砂捕捉の動態を把握することは極めて重要であると考えられる。

ここで、貯水池内に堆積する細粒土砂は、砂・礫等に比べてリサイクル資源としての利用が困難であり、また、貯水池内の濁水長期化現象の主因となるなど貯水池土砂管理上の障害となる一方、下流域に対する栄養塩や有機物等の供給源としてその意義が再認識されてきている。従って、その流動特性や制御方法を考察することは、総合土砂管理の観点のみならず、環境保護の観点からも要求されている重要な事項である。

従来の研究では、実際のダム貯水池に対する濁水シミュレーション結果等より、濁水の流動形態および捕捉率に大きな影響を与えるパラメータとして、洪水規模(回転率)や放流管設置標高等が報告されている。しかしながら、それら以外の濁水の流動条件(例えば、河床

勾配、SSの粒径、放流形式、水温条件など)が流動形態あるいは捕捉率に与える定量的な影響の大きさは十分に把握されていない状況にある。

そこで本研究では、濁水流動シミュレーションを実施することにより、貯水池や洪水の各条件と細粒土砂の流動特性、および濁水制御の上で重要なパラメータとなる捕捉率との関係の考察を行った。

今回使用したプログラムは、土木研究所にて開発された流れ方向と水深方向の流れの変化を対象とする鉛直二次元シミュレーションプログラムである¹⁾。

(1) まず、モデル貯水池により、貯水池形状、洪水回転率、流入SS濃度、SS平均粒径、粒度分布範囲、放流管標高、放流量、流入水温、水温分布等が貯水池内の流動形態と捕捉率に与える影響を検討した。

(2) 次に、ケーススタディーとして、実際のダム(天竜川水系小渋ダム)を対象に濁水シミュレーションを実施した。この際にも、洪水回転率、流入SS濃度、放流管標高、放流量等の条件を変化させ、貯水池内の流動形態を分類するとともに捕捉率への影響の大きさを検討した。

2. モデル貯水池の検討条件

今回の検討では、以下のとおり濁水流動に関する9つパラメータについて検討を行った。なお、検討パラメータは各3ケース変化させてその影響の大きさを検討するものとする。

(1) モデル貯水池形状 (河床勾配)

貯水池容量は15,000千 m^3 一定とし、河床勾配に関して下記の3ケースを考える。

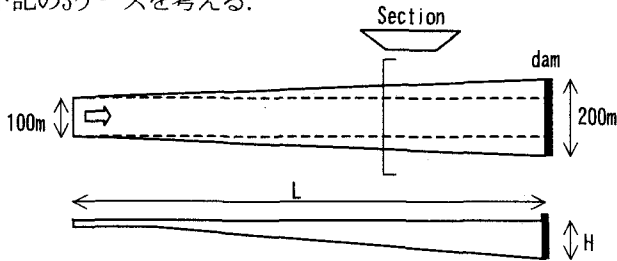


表-1 貯水池形状設定ケース ($V=15,000$ 千 m^3)

河床勾配 H/L	0.005 (1/200)	0.010 (1/100)	0.015 (1/67)
堤体側水深 H	33.54m	47.43m	58.10m
貯水池長さL	6,708m	4,743m	3,873m

(2) 洪水規模 (回転率)

検討に用いる流入ハイドロは、山間部での洪水調査に基づいてHager²⁾が提案した下式の流入ハイドロモデルを使用した。洪水規模としては回転率に関して下記の3ケースを考える。

$$Q(t) = Q_p \left[\frac{t}{t_p} \exp\left(1 - \frac{t}{t_p}\right) \right]^m \quad (1)$$

ここに、 Q_p : ピーク流入量、 t_p : ピーク流入量の発生時刻、 m : 定数 (ここでは $t_p=7$ (hr)、 $m=3$ とした)

表-2 洪水規模設定ケース

回転率 β	0.5	1.0	2.0
総流入量 (m^3)	7,500,000	15,000,000	30,000,000
ピーク流量 (m^3/s)	200	400	800

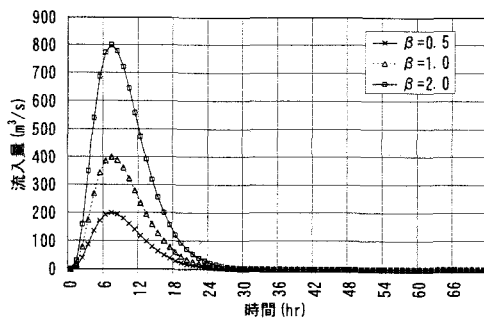


図-1 流入ハイドロモデル

(3) 流入SS濃度

流入SS特性は下式により与える。

$$C = \alpha Q^n \quad (2)$$

$$Q_s = \alpha Q^{n+1} \quad (3)$$

ここに、 C : SS濃度 (g/m^3)、 Q_s : SS輸送量 (g/s)、

Q : 流入量 (m^3/s)、 α, n : 定数

ここでは、上式中の $n=1$ とし、著者ら³⁾の検討を参考に、下表のとおりSSピーク濃度を設定した。

表-3 流入SS濃度設定ケース α

回転率 β	0.5	1.0	2.0	
Q_{peak}	200	400	800	
SSピーク濃度 (g/m^3)	$\alpha=5$	1,000	2,000	4,000
	$\alpha=20$	4,000	8,000	16,000
	$\alpha=40$	8,000	16,000	32,000

また、SS濃度のピーク発生時刻は、一般に流入量ピークよりも若干早いことが知られており、これを下式のとおり仮定し、流量と同様にHager²⁾が提案した流入ハイドロモデルよりSS濃度の時間変化を算出した。

$$\frac{t_{sp}}{t_p} = 0.85 \quad (4)$$

ここに、 t_{sp} : 濁度のピーク発生時刻

(4) SSの中央粒径

本解析では5つのSS粒径に対してシミュレーションを実施する。ここでは、取り扱いの容易さを考慮し、対象SSの粒径の大きさを表すパラメータとして、5つのSS粒径の中央値 (5種類の値の中央値) を考える。

なお、柏井⁴⁾によると、全国の実績ダムに流入するSS成分の観測値の平均値は、以下のとおりであり、ダムサイトにおけるSS成分の粒径としては、概ね3~40 μm を設定すれば適当であることがわかる。

表-4 ダムサイトにおけるSS成分の平均粒径 (柏井)

	範囲
d16	3~6 μm
d50	10~20 μm
d84	20~40 μm

以上より、SS粒径の中央値として20 μm を中心に下表のとおり3ケース設定する。

表-5 SS中央粒径設定ケース

SS成分の中央値 (μm)	15	20	30

(5) 粒度分布の範囲

本検討ではある全体のSS濃度に対し、それらを5等分してそれぞれの粒径のSS濃度とした。ここで、SS成分の分布範囲を、その広がりに応じて下表のとおり設定する。また、柏井の調査結果も併せて図示する。

表-6 SS粒径分布ケース設定 (対象粒径の間隔Δd)

分布①: 均一粒径	分布②: 狭い分布	分布③: 広い分布
Δd=0.00 μm	Δd=3.75 μm	Δd=7.50 μm

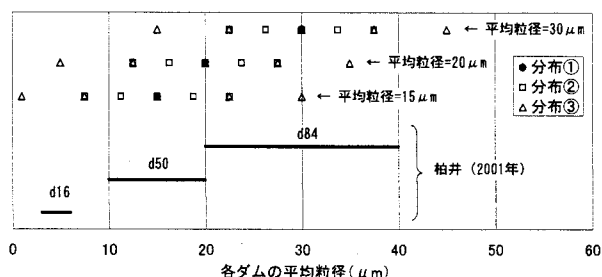


図-2 SS粒径分布ケース

(6) 放流管設置標高

放流管の設置標高は、ダム地点の河床高から放流管敷高までの高さdを水深Hで無次元化した量d/Hをパラメータとする。

表-7 放流管設置標高ケース設定

放流管設置標高d/H	0.1	0.5	0.9
------------	-----	-----	-----

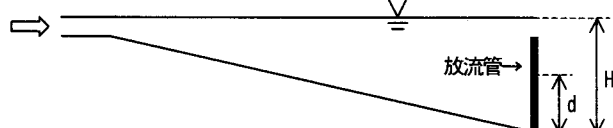


図-3 放流管設置標高模式図

(7) 放流形式 (洪水流量カット率)

放流は一定量カットルールで行うものとし、ピーク流入量 Q_{ip} とその時の調節量 Q_c との比 (カット率) $r=Q_c/Q_{ip}$ をパラメータとする。

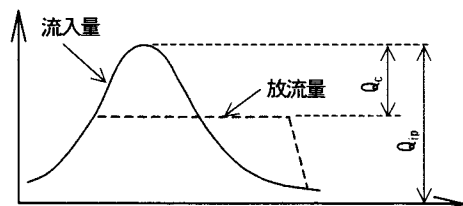


図-4 カット率模式図

表-8 放流量設定ケース

$r=Q_c/Q_{ip}$	1/2	2/3	3/4
----------------	-----	-----	-----

(8) 流入水温

流入水温 T_i は、貯水池内の初期平均水温 T_m (17.5℃) との比 T_i/T_m をパラメータとし、以下のとおり設定する。(流入水温と貯水池内の平均水温との相対的な温度差が密度流を支配すると考えられるため)

表-9 流入水温設定ケース

T_i/T_m	0.8 (14.0℃)	1.0 (17.5℃)	1.2 (21.0℃)
-----------	----------------	----------------	----------------

(9) 貯水池内初期水温分布形

貯水池内の初期水温分布は、平均水温17.5℃とし、成層状態に関して下記のとおり3ケース設定する。

表-10 貯水池内初期水温分布形

等変化率型	表層を25℃、底面を10℃とし、その間の水温は等変化率とするケース
混合型	貯水池全体が水温17.5℃で均一なケース
躍層型	表層を25℃、底面を10℃とするが、水深の中央付近で躍層を形成しているケース

3. 流動形態および捕捉率に関する考察

(1) 捕捉率に関する各パラメータの影響の大きさ

a) 各パラメータ単独の影響の大きさ

ここでは、各パラメータの検討ケース中央に位置する条件を組み合わせたものを基本ケースとし、基本ケースから各パラメータを変化させることにより、各パラメータ単独の影響の大きさを検討した。解析結果を表-11に示す。

b) 各パラメータの相互作用

各パラメータは上記の単独としての影響だけでなく、互いに相互作用を有しているものと考えられる。ここでは、検討パラメータの内、相互作用が大きいと予想される、①河床勾配～放流管設置標高、②水温分布形～洪水規模～流入水温～放流管設置標高のパラメータに着目し、検討を行った。それぞれのパラメータが捕捉率に与える影響を図-5～8に示す (但し検討パラメータ以外は基本ケースとする)。

①: それほど顕著な傾向ではないものの、河床勾配が急になるほど、放流管を低位置に設置することの効果が大きくなる。

②: 回転率が1.0以上となると、貯水池内の水温成層が破壊されやすくなることから、濁水の流動形態は初期水温分布形にほとんど支配されなくなることがわかる。逆に回転率が0.5程度の洪水の際には、 $d/H=0.5$ のケースで、混合型に比べ、躍層型の捕捉率が比較的低くなる。これは中層密度流が発生し、その標高に放流管を設けていることにより、SSが効率的に排出できるためである。

c) 重回帰分析

ここでは、各パラメータが捕捉率に与える影響の大きさを定量的に把握すべく、今回実施した全ての解析結果 (81ケース) を対象に、捕捉率を目的変数、各パラメータを説明変数とし、重回帰分析を行った。なお、水温分布は何らか数量化する必要があるため、水温勾配の大きさを数量的に表現することとし、混合型=1、等変化率型

=2, 躍層型=3として分析を行った. 分析結果を表-12に示す. これらによると, 捕捉率に与える影響が比較的大きなパラメータとして, 河床勾配, 洪水規模, SS粒径,

SS濃度, 放流管設置標高などが挙げられることがわかる.

表-11 各パラメータ単独の影響の大きさ

	① 貯水池形状 河床勾配I	② 洪水規模 回転率β	③ 流入SS濃度 α	④ SS中央粒径 D(μm)	⑤ 粒度の 分布 dD(μm)	⑥ 放流管 設置標高 d/H	⑦ 放流量 カット率Γ	⑧ 流入水温 Ti/Tm	⑨ 貯水池初期 水温分布	捕捉率
基本 ケース	0.010	1.0	20	20	3.75	0.5	0.3333	1.0	混合型	0.650
①	0.005	1.0	20	20	3.75	0.5	0.3333	1.0	混合型	0.750
	0.015	1.0	20	20	3.75	0.5	0.3333	1.0	混合型	0.555
②	0.010	0.5	20	20	3.75	0.5	0.3333	1.0	混合型	0.828
	0.010	2.0	20	20	3.75	0.5	0.3333	1.0	混合型	0.445
③	0.010	1.0	5	20	3.75	0.5	0.3333	1.0	混合型	0.703
	0.010	1.0	40	20	3.75	0.5	0.3333	1.0	混合型	0.610
④	0.010	1.0	20	15	3.75	0.5	0.3333	1.0	混合型	0.554
	0.010	1.0	20	30	3.75	0.5	0.3333	1.0	混合型	0.819
⑤	0.010	1.0	20	20	0.00	0.5	0.3333	1.0	混合型	0.650
	0.010	1.0	20	20	7.50	0.5	0.3333	1.0	混合型	0.653
⑥	0.010	1.0	20	20	3.75	0.1	0.3333	1.0	混合型	0.537
	0.010	1.0	20	20	3.75	0.9	0.3333	1.0	混合型	0.862
⑦	0.010	1.0	20	20	3.75	0.5	0.9000	1.0	混合型	0.605
	0.010	1.0	20	20	3.75	0.5	0.7500	1.0	混合型	0.683
⑧	0.010	1.0	20	20	3.75	0.5	0.3333	0.8	混合型	0.625
	0.010	1.0	20	20	3.75	0.5	0.3333	1.2	混合型	0.693
⑨	0.010	1.0	20	20	3.75	0.5	0.3333	1.0	等変化率型	0.635
	0.010	1.0	20	20	3.75	0.5	0.3333	1.0	躍層型	0.635

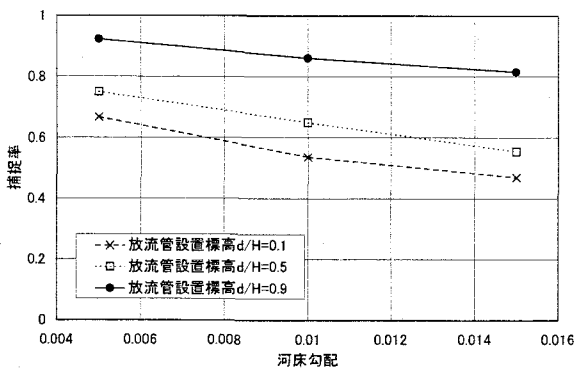


図-5 河床勾配の影響

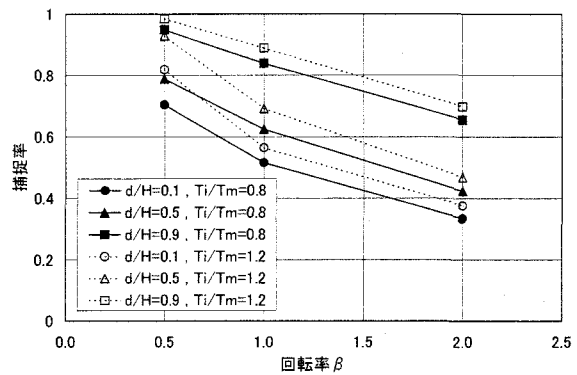


図-6 混合型水温分布の場合

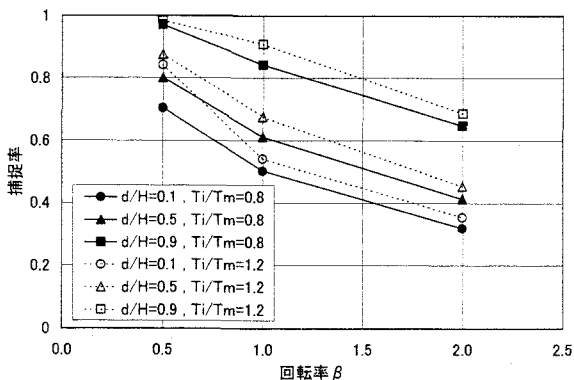


図-7 等変化率型水温分布

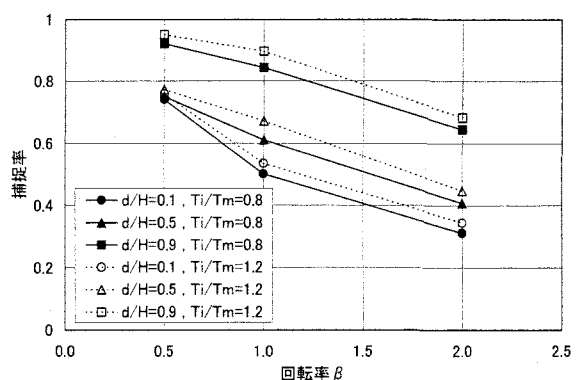


図-8 躍層型水温分布の場合

表-12 重回帰分析の結果

	切片	① 貯水池形状 河床勾配	② 洪水規模 回転率 β	③ 流入SS濃度 α	④ SS中央粒径 $D(\mu\text{m})$	⑤ 粒度の 分布 $dD(\mu\text{m})$	⑥ 放流管 設置標高 d/H	⑦ 放流量 カット率 r	⑧ 流入水温 T_i/T_m	⑨ 水温分布
係数	0.5832	-16.6667	-0.2320	-0.0030	0.0152	0.0004	0.3653	-0.1225	0.1332	-0.0034
標準誤差	0.1280	4.1326	0.0102	0.0020	0.0045	0.0095	0.0187	0.1149	0.0338	0.0069
今回設定したパラメータ範囲で捕捉率に及ぼす影響幅	-	0.167	0.348	0.104	0.229	0.003	0.292	0.031	0.053	0.007

※1 標本数=81

※2 重相関係数=0.965

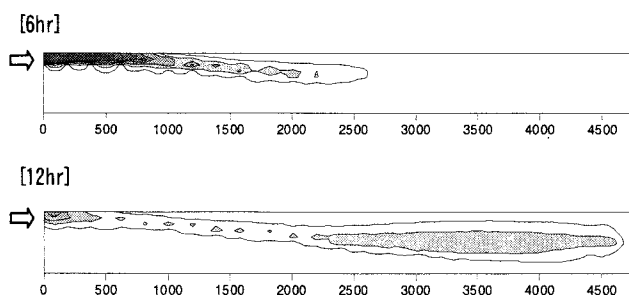


図-9 SS濃度の分布 中層密度流の様子
($\beta=0.5$, $d/H=0.5$, $T_i/T_m=1.2$, 躍層型)

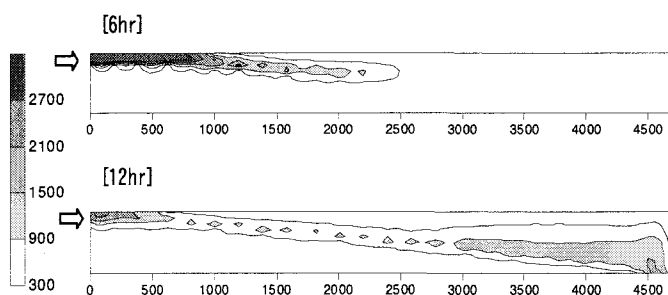


図-10 SS濃度の分布 下層密度流の様子
($\beta=0.5$, $d/H=0.1$, $T_i/T_m=0.8$, 混合型)

4. 小洪ダムにおけるケーススタディー

小洪ダムの貯水池形状を下図に示す。当貯水池についても、前節のモデル貯水池と同様に鉛直二次元のモデル化を行った。

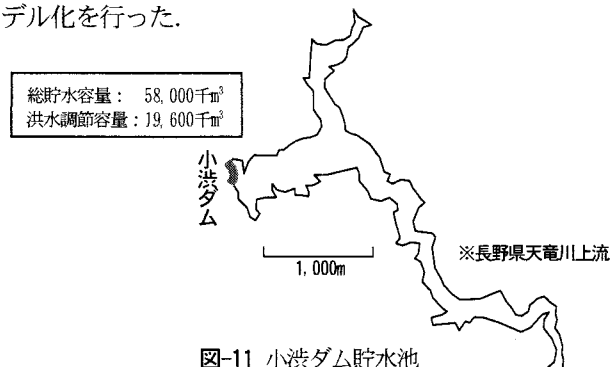


図-11 小洪ダム貯水池

(1) 検討条件

流入量およびSS濃度の時間データは前節の手法と同様にHager²⁾が提案した流入ハイドロモデルにより与えることとし、本検討での小洪ダムの放流形式は実際のダム運用と同様に一定率一定量放流方式とする。また、貯水池内の水温分布は発電取水口（水深のほぼ中央に位置）からの取水により躍層が形成されている状態を仮定した。小洪ダムのケーススタディにおいて、検討するパラメータは次表のとおりである。また、対象としたSS成分は3.7, 7.9, 14.6, 26.8, 59.4 μm 、また貯水池の河床勾配は約0.013である。

表-13 各パラメータ検討ケース

洪水規模	【7ケース】
回転率 β	0.31, 0.38, 0.51, 0.64, 0.77, 0.89, 1.02
SS濃度定数 α	【3ケース】 10, 20, 30
流入水温(°C)	【3ケース】 17, 18, 19
放流量カット率 $r=Q_c/Q_{ip}$	【3ケース】 1/2, 2/3 (実際), 3/4 (一定率一定量放流)
放流管設置標高 d/H	【2ケース】 0.537 (現ダム堤体形状), 0.3

(2) 捕捉率および土砂流動に関する考察

a) SS濃度, 洪水規模, 流入水温

図-12に捕捉率と洪水規模の関係を示す。また、中層密度流の有無を表-14に示す。これらによると、全体的に洪水規模が大きくなれば捕捉率が下がるが、回転率が小さく($\beta < 0.5$)、中層密度流が生じる場合のみ、 β にかかわらず捕捉率がほぼ一定となることがわかる。また、今回設定した流入水温条件($T=17, 18, 19^\circ\text{C}$)と微細土砂濃度条件($\alpha=10, 20, 30$)では、濃度条件の方が密度流に与える影響が大きい。さらに解析結果より、中層密度流は貯水池内の流下速度が遅く、下層密度流は流下速度が比較的大きいことが分かった。下層密度流は10時間程度でダムに到達する。これは前節の図-9, 10でも確認できる。

b) 放流管設置標高

小洪ダムの実際の放流管設置標高は $d/H=0.537$ であるが、放流管の設置標高を変化させた場合の捕捉率に対する影響を検討した。図-13にコンジット標高による捕捉率の変化を示す。これらによると、一般に放流管設置標高が低い方が捕捉率も低い。ただし、洪水規模の小さい中層密度流が発生するような条件では、その密度流の流下標高に放流管がある場合の方が捕捉率は低くなることもある（前節と同様の傾向）。

c) 放流方式（カット率）

一般に放流初期段階では貯水池内のSS濃度の低い水をコンジットより放流することになる。これに対して

密度流の堤体到達後の放流時間を長くすれば、より多くの微細土砂の放流を期待できる。そこで、カット率を変化させて放流時間を変化させた場合の捕捉率に対する影響を検討した。図-14にカット率と捕捉率の関係を示す。これによると、洪水規模が小さく中層密度流となる場合にはカット率が大きい方が捕捉率を小さくすることができるが、全体としては大きな変化は見られなかった。これは、カット率を上げることにより放流時間は長くなるが、放流量そのものが小さくなることにより、その分だけ密度流がダム堤体に到達するまでの流下時間が長くなり、放流時間を長く確保する効果が小さくなってしまいうためと考えられる。

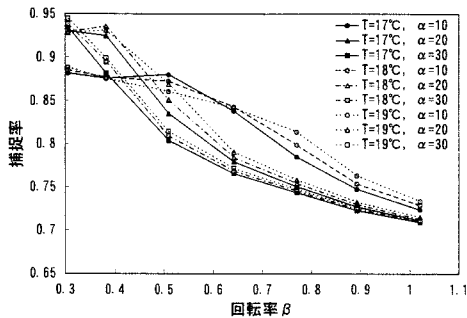


図-12 捕捉率と洪水規模の関係

表-14 中層密度流の有無

α	水温T=17°C			水温T=18°C			水温T=19°C		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30
β=0.31	○	○	×	○	○	×	○	○	×
β=0.38	○	×	×	○	×	×	○	△	×
β=0.51	×	×	×	×	×	×	△	×	×
β=0.64	×	×	×	×	×	×	×	×	×
β=0.77	×	×	×	×	×	×	×	×	×
β=0.89	×	×	×	×	×	×	×	×	×
β=1.02	×	×	×	×	×	×	×	×	×

○：中層密度流，△：中間，×：下層密度流

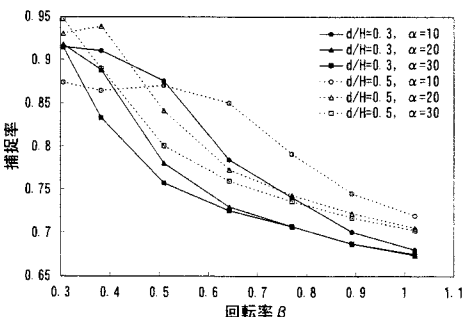


図-13 コンジット標高による捕捉率の変化

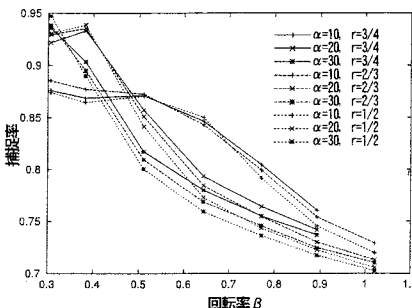


図-14 カット率と捕捉率の関係

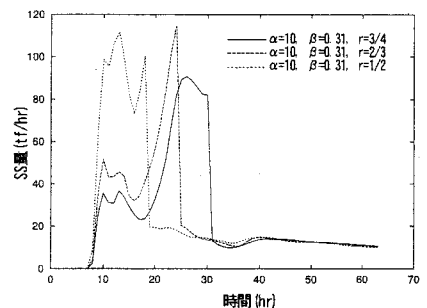


図-15 放流SS量の時間変化

5. まとめ

今回、鉛直二次元の濁水流動シミュレーションを実施することによって、種々のパラメータが捕捉率や濁水流動に与える影響について概ね定量的に把握できた。また、特に、捕捉率に大きな影響を与えるパラメータとして従来の研究で報告されていた洪水規模や放流管設置標高に加え、SSの粒径、河床勾配、SS濃度の影響も比較的大きいこと、さらには水温分布と洪水規模、放流管設置標高の相互作用により、捕捉率や濁水の流動形態が支配されることが明らかになった。

しかしながら、今回考察を行った対象はあくまで定数等を仮定した濁水シミュレーション結果に過ぎず、今後、実際の貯水池において出水中のSS濃度を計測し、その流動形態を検証する必要がある。現在、小洪ダム貯水池では貯水池流入点・貯水池内・ダム直下流における洪水時の流入水温・SS濃度を自動計測できるシステムが設置されており、今回使用した濁水シミュレーション結果の精度検証を行うとともに

に、捕捉率を下げるためのゲート放流方法の検討などを進める必要がある。

参考文献

- 建設省 土木研究所ダム部水資源開発研究室：貯水池の冷濁水ならびに富栄養化現象の数値解析モデル（その2）、土木研究所資料第2443号，1987
- Hager, W. H. : A simplified rainfall-runoff model, J. Hydro., Amsterdam, 74, pp.151-170; 80, pp.395-398, 1985.
- 角 哲也・塚原千明：ダム流域におけるウォッシュロード量の評価，河川技術に関する論文集，第5巻，pp.221-226, 1999.
- 柏井条介：ダム貯水池における細粒土砂成分の捕捉率に関する一考察，ダム技術，No181, pp.21-28, 2001.
- 今城貴弘・角 哲也：ダム貯水池における微細土砂の流動とその制御方策に関する基礎的研究，第57回土木学会年次学術講演会，II-141, 2002.
- 斉藤慶：ダム貯水池における洪水時の微細土砂流動特性と捕捉率変化に関する研究，京都大学卒業論文，2003.

(2003. 4. 11受付)