

密度流排出を用いた黒部川連携排砂の 高度化に関する研究

STUDY ON IMPROVEMENT OF SEDIMENT FLUSHING OPERATION IN KUROBE RIVER BY USING DENSITY CURRENT VENTING

白音包力皋¹・角 哲也²
Baiyinbaoligao and Tetsuya SUMI

¹ 学生会員 工修 博士後期課程 京都大学大学院工学研究科 (〒606 - 8501 京都市左京区吉田本町)

² 正会員 博(工) 京都大学助教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒606 - 8501 京都市左京区吉田本町)

In the Kurobe River, coordinated sediment flushing and sluicing of Dashidaira and Unazuki dams have been executed since 2001. In order to minimize environmental impacts caused by intensive high sediment concentration discharge during sediment flushing, it is important to pass through fine sediments during each natural flood as much as possible.

This paper discusses effects of density current venting to discharge incoming fine sediment under various combinations of discharge facilities and reservoir water levels without fully drawdown. From the two dimensional reservoir model calculations, the lower reservoir water level and the combination of sediment flushing gate and the middle level outlet is recommended to sluice sediment without fully draw down.

Key Words : *sediment flushing, suspended-sediment concentration, Kurobe river, density current venting*

1. はじめに

黒部川の連携排砂は「流砂系における総合的な土砂管理」の先例と位置付けられているが、貯水池に堆積した土砂、または洪水とともに流入した土砂をできるだけ少ない水で流す排砂効率の課題と、排出した土砂による下流域の生態環境への影響をできるだけ軽減させる安全性の課題が大きなポイントになっている。

黒部川流域においては、先に完成した出し平ダムは1991年より単独での排砂を実施しており、また、宇奈月ダムの完成後の2001年から、両ダムで初めての連携排砂及び連携通砂がスタートしたが、現在はダム下流域において連携排砂・通砂による大きな環境影響は生じていない。その理由としては、洪水期に合わせたフラッシング排砂方法と、今の段階では出し平ダムから排出された土砂の大部分は宇奈月ダム貯水池内に捕捉され、宇奈月ダムから放流されるSSが大幅に減少していることなどが考えられる。一方、2005年までの連携排砂・通砂の実績を見ると、宇奈月ダムの放流SSのピーク値は2001年の2,500mg/lから2005年は65,000 mg/lまで上昇した。その原因として宇奈月ダム貯水池の堆砂による容量の減少や河床勾配が安定化(計画河床勾配)してきたことなどが考

えられる。

ここで、放流SSの環境に与える影響については、角^{1),2)}によりSSと継続時間の両者で評価することが重要であり、スイス・フランスなどの排砂管理に活用されていることが報告されている。また、木下ら³⁾はダム排砂時の魚類に与える影響は主として、微細粒径の部分であることを指摘している。一方、角ら⁴⁾は2005年6月の連携排砂・通砂時に採水による放流SS及びその粒度変化について検討している。

そこで、筆者らは微細粒土砂に着目した密度流排出と粗粒土砂に着目したフラッシング排砂方法を結合した新たな排砂方法を提案し、微細粒土砂と粗粒土砂を分割して排出することにより、排砂効率と放流安全性を同時に向上させることを目指して検討を進めている。その考え方としては、出し平ダムから排出された高濃度土砂の流れを、①連携排砂の場合、宇奈月ダムの排砂ゲートの操作により、先に密度流排出を行い、次にフラッシング排砂することにより、水位低下段階の清水放流することを密度流排出することに転換し、流入した大量の微細粒土砂を先に排出し、次のフラッシング排砂時のSS中の微細粒部分の割合を減少させることで安全性を図る；②連携通砂の場合、毎回宇奈月ダムは水位を低下させずに密度流排出を

行い、排砂効率と利水安全度の向上を図る。この論文では、その中の密度流排出について検討する。

2. 密度流排出計算

ダム貯水池に高濃度土砂が流入する場合、貯水池の土砂濃度や水温条件により、流入する主流が貯水池の水深に対して、表層、中層または低層へ流れ込む密度流現象が発生し、これを利用して流入する微細粒土砂をダムから排出する方法が密度流排出である。ここで、密度流排出の効率は貯水池の長さ、形状、河床勾配や放流設備の高さおよび流入流量と土砂濃度などによって決められると考えられる。

(1) 基礎式

本検討では(独)土木研究所で開発された貯水池鉛直二次元移流拡散モデルを用いている。本モデルの基礎式を以下に示す。

a)連続式:

$$\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial VB}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

b)水平方向の運動方程式:

$$\begin{aligned} \frac{\partial BU}{\partial x} + \frac{\partial BU^2}{\partial x} + \frac{\partial BUV}{\partial y} = \\ -\frac{B}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(BD_x \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(BD_y \frac{\partial U}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{wx}}{\rho_0} \end{aligned} \quad (2)$$

c)鉛直方向の運動方程式:

$$\frac{\partial P}{\partial y} = -\rho g \quad (3)$$

d)SS濃度の輸送方程式:

$$\frac{\partial BC_k}{\partial t} + \frac{\partial BUC_k}{\partial x} + \frac{\partial B(V+v_{ok})C_k}{\partial y} = \quad (4)$$

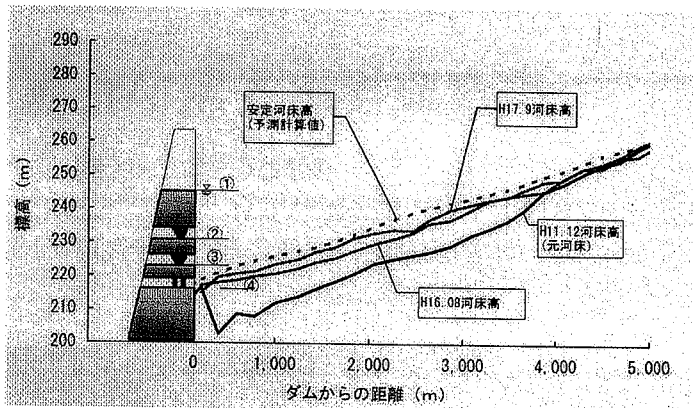
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(BD_x \frac{\partial C_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(BD_y \frac{\partial C_k}{\partial y} \right)$$

e)水温の輸送方程式:

$$\frac{\partial BT}{\partial t} + \frac{\partial BUT}{\partial x} + \frac{\partial BVT}{\partial y} = \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(BD_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(BD_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{BH}{\rho_0 C_w}$$

ここで、 x : 流下方向座標、 y : 鉛直上向き座標、 U : x 方向の流速成分、 V : y 方向の流速成分、 B : 貯水池横断幅、 D_x : x 方向の渦動粘性係



注: ①常時満水位 (245.00m)、②常用洪水吐数高 (231.00m)、③水位低下用放流設備数高 (224.00m)、④排砂路呑口数高 (215.00m)

図-1 宇奈月ダム縦断面図

数、 D_y : y 方向の渦動拡散係数、 P : 圧力、 ρ_0 : 基準密度、 ρ : 流水密度、 T : 水温、 C_k : SS の代表粒径 k の濃度、 v_{ok} : SS の代表粒径 k の沈降速度、 H : 発生熱量、 C_w : 水の比熱係数である。

渦動粘性係数 D_x と D_y の取り扱いについて、定数、摩擦速度による設定、Richardson 数を用いた設定や標準型 $k-\varepsilon$ モデルなどがあるが、ここでは定数として設定した。鉛直方向の圧力は静水圧分布と仮定した。

(2) 計算条件

a) 貯水池のモデル化

2005年9月に行われた宇奈月ダム貯水池の200m間隔の横断面測量データを用いて、水平長さ(50m)×鉛直高さ(1m)の格子を65×42(214.0m～250.0m標高)作成し、標高250.0m以下の貯水池をモデル化した(図-1に示す)。

b) 貯水位及び放流条件

出し平ダム排砂時の宇奈月ダムにおける密度流発生条件を245.0m(高水位)、240.0m(中水位)、235.0m(低水位)の三ケース及び常用洪水吐ゲート(231.0m)、水位低下用ゲート(224.0m)、排砂ゲート(215.0m)の各放流設備の組み合わせにより、表-1に示すケースについて計算を行った。

c) 初期水温と初期濁度分布

貯水池の初期水温と初期濁度分布を排砂前の2003年5月26日のダムサイトより上流2240m地点における調査結果を用いて入力する。ここでは、貯水池表層～底層について、水温を10～9℃、濁度を3～2mg/lに設定した。他の計算条件及びパラメータを表-2に示す。

表-1 計算ケース(放流条件)

CASE	ゲート操作方法
CASE-1	常用洪水吐ゲートのみ
CASE-2	水位低下用ゲートのみ
CASE-3	排砂ゲートのみ
CASE-4	常用洪水吐、水位低下用、排砂ゲート同時
CASE-5	常用洪水吐、水位低下用ゲート同時
CASE-6	水位低下ゲートと排砂ゲート同時
CASE-7	先に水位低下ゲート、流入 SS ピーク 2 時間後排砂ゲート開始

表-2 各パラメータ

重力加速度 (m/sec ²)	9.81E+00
Stefan Boltzman 定数 (cal/m ² /sec/K)	1.17E-03
X 方向動粘性係数 (m ² /s)	1.00E-05
Y 方向動粘性係数 (m ² /s)	1.00E-05
水面反射率 α ($0 \leq \alpha \leq 1$)	6.00E-02
水面吸収率 β ($0 \leq \beta \leq 1$)	5.00E-01
輻射熱減衰係数 η (1/m)	5.00E-01
水面セルを決めるための基準水深 (m)	5.00E-01
濁質基準密度 (g/m ³)	2.65E+06

d) 流入条件

流入流量, 流入水温, 土砂濃度及び気温は図-2 に示す 2003 年 6 月 27 日 19:00 から 2003 年 6 月 29 日 21:00 までの実測値を用いた. 流入 SS の粒度分布は, 連携排砂時に出し平ダム放流 SS がピーク濃度を示した 2003/6/28 22:00 時点の粒度分布を代表値として統一して用いた. ここで, 流入 SS は表-3 に示すように 5 段階の粒径で代表させている.

e) 計算時間

増水前の 8 時間を含む 2003 年 6 月 27 日 19:00 から出し平ダム排砂後の水位回復終了の 2003 年 6 月 29 日 21:00 までの 50 時間を検討した.

f) 粒子の沈降速度

表-3 から分かるように, 出し平ダムから排出される SS の粒径は粗粒部分の割合が多いため, 粒子の沈降速度 v_0 の計算は式 (6) に示す Rubey 式を用いた.

$$v_0 = \sqrt{sgd} \times \left(\sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{sgd^3}} - \sqrt{\frac{36v^2}{sgd^3}} \right) \quad (6)$$

ここで, $s = \frac{\sigma - \rho}{\rho}$, σ : 土粒子密度, d : 土粒子

径, g : 重力加速度である.

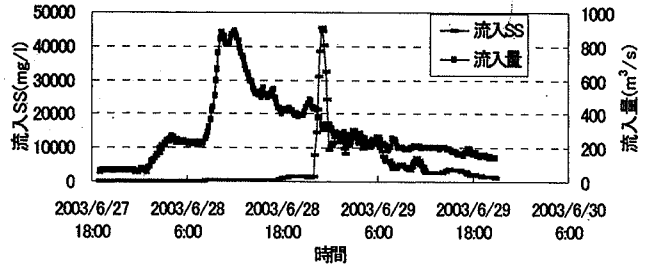


図-2 流入流量と流入 SS

表-3 代表粒径

粒径 (mm)	通過質量百分率 (%)	代表粒径 (mm)
0.0014	0.3	0.0021 (代表粒径 5)
0.0033	2.5	
0.0065	5.9	0.0092 (代表粒径 4)
0.013	13.1	
0.022	22.5	0.0311 (代表粒径 3)
0.044	38.8	
0.075	53.5	0.0892 (代表粒径 2)
0.106	64.6	
0.25	90.9	0.461 (代表粒径 1)
0.85	100	

なお, 代表粒径の計算方法は, 代表粒径 = $\sqrt{\text{粒径}1 \times \text{粒径}2}$

3. 計算結果及び考察

表-1 に示した検討ケースのうち, 貯水池内の密度流の発生状況について代表的なケースとして CASE-6 を抽出して説明する.

(1) 密度流発生状況

図-3~5 に貯水位 245.0m 時の流入 SS のピークの潜り込み, 進行及び排出後の結果を示す. これらの図から, 出し平ダムから排出された高濃度土砂流れにより, 宇奈月ダム貯水池内に底層密度流が発生し, 一部の土砂が沈降しながらダムサイトへ進行していることが分かる. また, 貯水位を 240.0m と 235.0m に低下させた場合の流入 SS のピーク流入 80 分後の結果を図-6, 7 に示す. 貯水位の低下につれて, ダムサイトまで到達する密度流の濁度が上昇していることが分かる.

以上の結果から, これらケースではいずれも底層密度流が発生していることが確認され, 貯水位の変化にかかわらず, 密度流はダムサイトから約 1,300m から 1,600m 付近の上流で発生していることが分かる. これは, 貯水池内に密度流が発生する条件として, 流入流量や土砂濃度のほか, 貯水池の境界条件 (平面形状, 河床勾配など) も大きく影響しているからと考えられる.

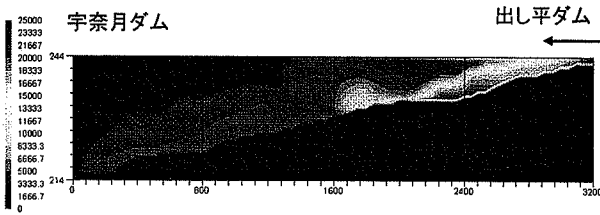


図-3 ピーク流入 50 分後(貯水位 245.0m, CASE-6)

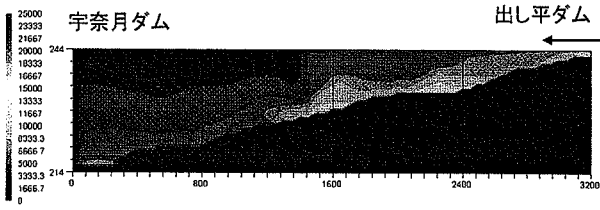


図-4 ピーク流入 80 分後(貯水位 245.0m, CASE-6)

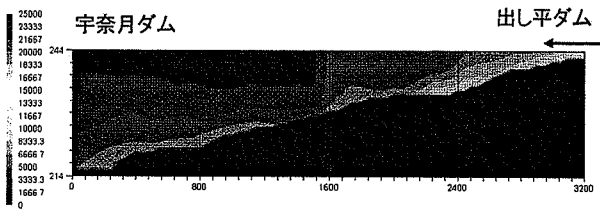


図-5 ピーク流入 120 分後(貯水位 245.0m, CASE-6)

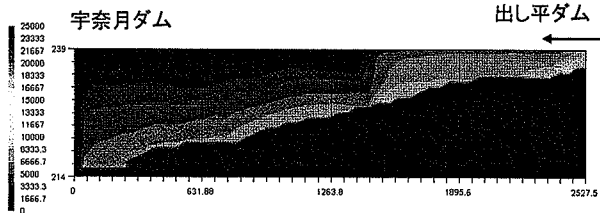


図-6 ピーク流入 80 分後(貯水位 240.0m, CASE-6)

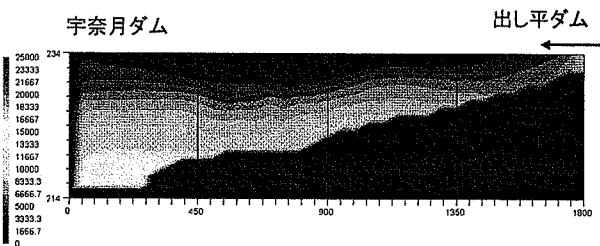


図-7 ピーク流入 80 分後(貯水位 235.0m, CASE-6)

(2) 密度流の流下速度

CASE-6 で貯水位を変化させた場合の SS ピーク流入 1 時間後のダムサイトから 1,450m 上流断面の流速と SS の鉛直分布を図-8~10 に示す。貯水池内に底層密度流が発生する場合、流れの主流が低層に位置し、表層に逆流が発生する。ここで、水位が高いほど、主流の最大流速と土砂濃度が小さくなり、逆流の流速が大きくなる傾向が見られるが、密度流の流下速度には大きな差は見られない。この時点の密度流の最大流下速度は貯水位 245.0m, 240.0m, 235.0m ではそれぞれ 0.38m/s, 0.41m/s, 0.42m/s であり、水深が深くなるほど鉛

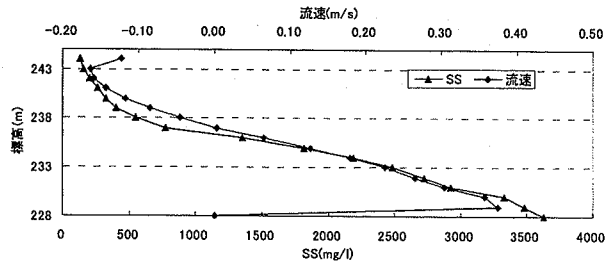


図-8 ピーク流入 1 時間後の流速と SS(貯水位 245.00m)

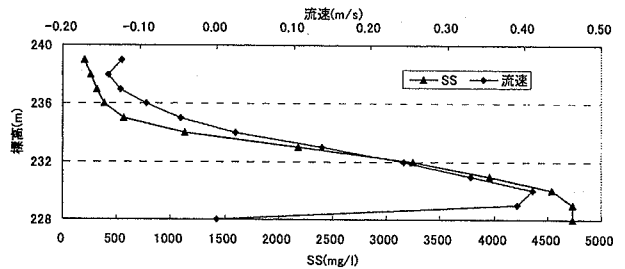


図-9 ピーク流入 1 時間後の流速と SS(貯水位 240.00m)

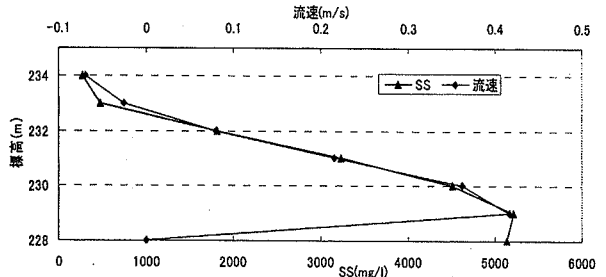


図-10 ピーク流入 1 時間後の流速と SS(貯水位 235.00m)

直拡散も大きくなり、密度流の厚さが大きくなるとともに最大流速が若干遅くなると考えられる。

韓其為⁸⁾は潜り込んだ後の密度流の流れを等流と近似し、また幅広長方形断面を仮定し式(7)に示す密度流の流下速度の推定式を提案している。

$$V = \sqrt[3]{\frac{8}{f} \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho} g \cdot \frac{Q}{B} \cdot S} \quad (7)$$

ここで、 V : 流下流速, f : 摩擦係数, $\Delta\rho$: 流入濁水と貯水池内水の密度差, Q : 流入流量, B : 流水幅, S : 河床勾配である。なお、一般に $f = 0.025$ である。

そこで、図-8~10 のデータを参考に、以下の数値を用いて宇奈月ダムにおける底層密度流の流下流速を推定すれば $V = 0.49\text{m/s}$ と得られた。これは図-8~10 の最大流速と概ね一致しており、式(7)を用いて密度流の流下流速を推定することが可能と考えられる。

($\Delta\rho/\rho = 2.5 \times 10^{-3}$ (T=10°C 一定, 密度流 5000mg/l, 貯水池内 1000mg/l と仮定), $Q = 300\text{m}^3/\text{s}$, $B = 200\text{m}$, $S = 0.01$)

表-4 放流 SS のピーク値(mg/l)

CASE	245.0m	240.0m	235.0m
CASE-1	3,551	-	-
CASE-2	4,228	5,542	9,342
CASE-3	4,545	5,913	10,599
CASE-4	4,315	-	-
CASE-5	3,876	-	-
CASE-6	4,555	5,907	10,164
CASE-7	4,717	6,107	10,384

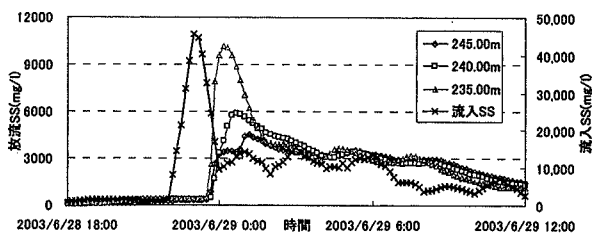


図-11 流入 SS と放流 SS の比較(CASE-6)

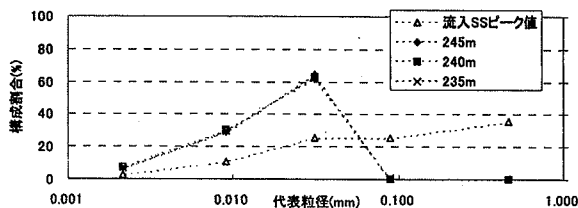


図-12 流入 SS / 放流 SS の粒径構成割合(CASE-6)

(3) 放流 SS について

検討した各ケースの放流 SS のピーク値を表-4 に示す。これによれば、貯水位が低いほど放流 SS のピーク値が高くなっている。これは貯水位が低くなると流入した土砂がダムサイトまで辿り着く距離が短くなり、進行中の沈降量や拡散量が小さくなるからと考えられる。放流 SS のピーク値は貯水位 245.0m では 4,000mg/l 程度であるのに対して、235.0m では 10,000mg/l 程度まで上昇している。一方、放流設備の組み合わせでは、排砂ゲートを含めて全体の放流標高を低くするほど、ダム前面の底層に到達する高濁度層を放流可能となるため放流 SS のピーク値も高くなっている。

なお、密度流の流下時間は密度流排出を計画する際に重要なパラメータであり、流入流量、放流流量、流入土砂濃度および貯水池水位などによって決められると考えられる。ここで、密度流の流下時間を図-11 に示す流入 SS のピーク値と放流 SS のピーク値の時間差から計算すると、貯水位 245.0m, 240.0m, 235.0m ではそれぞれ 2 時間 10 分, 1 時間 40 分, 1 時間 10 分となり、当然のことながら貯水位が低いほど早くダムまで到達していることがわかる。

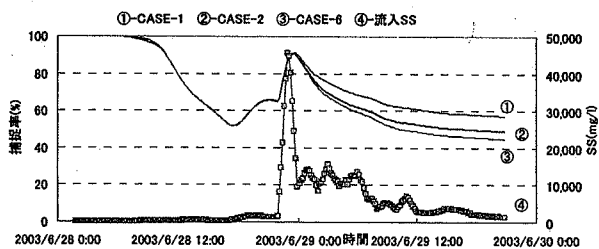


図-13 各 CASE の捕捉率の変化(貯水位 245.0m)

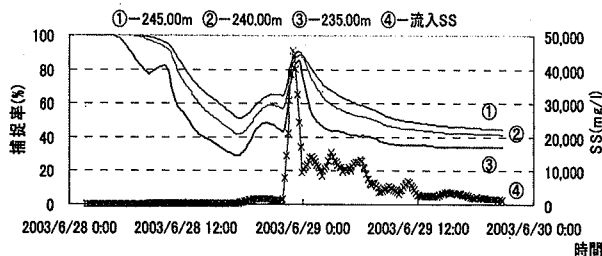


図-14 貯水位変化による捕捉率の変化(CASE-6)

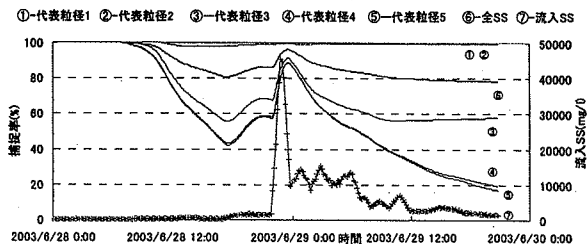


図-15 代表粒径と全土砂の捕捉率の変化 (貯水位 245.0m, CASE-6)

次に、図-12 に放流 SS における代表粒径の構成を示す。放流 SS の粒度分布は貯水位変化にかかわらずほぼ一致しており、代表粒径 4 と 5 の割合はほぼゼロとなる。一方、代表粒径 3 の割合は 60% まで上昇している。これは、密度流が流下する際に 90 μ m 以上の大きな粒径の土砂が沈降してしまいほとんどダムまで到達しないためである。

(4) SS の捕捉率

SS の捕捉率はその粒度分布と貯水位、放流設備の組み合わせなどによって決定される。貯水池の水位は密度流発生及びダムサイトまでの到達時間に影響し、最終的に土砂の沈降量と拡散量を決定する。従って、水位が高いほどダムサイトまで辿り着く土砂濃度が小さくなり、放流される SS も小さくなると考えられる。

貯水位 245.0m を例として、流入 SS に対する捕捉率の時間的変化を CASE-1, 2, 6 の放流条件ごとに逐次計算して示したものを図-13 に示す。この図から分かるように、常用洪水吐ゲートのみ放流する CASE-1 の捕捉率が一番高く、CASE-6 の捕捉率が一番低くなっている。これは、放流設備の標高の差やその操作方法による効果と考えら

れる。CASE-6 で貯水位を変化させた場合の SS の捕捉率の変化を図-14 に示す。水位が低いほど、捕捉率が小さいことが分かる。さらに、代表粒径ごとの捕捉率の変化を貯水位 245.0m の CASE-6 の結果を例として図-15 に示す。これより、代表粒径 1, 2 の捕捉率はほぼ 100% で、代表粒径 3 の捕捉率は約 58%, 代表粒径 4 と 5 の捕捉率は 19% と 17% になっており、粒径が大きいほど捕捉率が高くなっていることが分かる。

各水位、各ケースに対応する放流 SS の捕捉率を表-5 に示す。全 SS に関しては、貯水位 245.0m で 78~83%, 貯水位 240.0m で 77~79%, 貯水位 235.0m で 74~77% の範囲で変動し、貯水位および CASE ごとの差は必ずしも大きくはない。しかし、微細粒土砂（ここで、代表粒径 3 (=0.044mm) 以下) の捕捉率に着目すれば貯水位 245.0m で 45~57%, 240.0m では 41~46%, 235.0m では 34~41% のような大きな差が見られ、特に、貯水位が高い 245.0m の場合には 12% 程度の差が生じ、排砂ゲート操作による密度流排出の効果が著しいことが分かる。

4. 結論と今後の課題

本研究の結論を以下に示す。

(1) 出し平ダムから排出された高濃度濁水を宇奈月ダムから密度流状態で排出させる可能性があることが確認された。

(2) 密度流の流下流速から貯水池流下時間を概略で推定することが可能であり、密度流排出のタイミングを計画するのに利用可能と考えられる。

(3) 密度流排出では、貯水位が低いほど、また常用洪水吐ゲート、水位低下用ゲート、排砂ゲートの順に SS の捕捉率が低くなり、出来るだけ放流標高が低いゲートを用いることが効果的である。

(3) 流入 SS 全体の捕捉率は約 75% であるが、魚類生態等に影響が大きいと考えられる微細粒土砂（この計算では 44 μ m 以下）の捕捉率は 35% 以下となり、密度流排出の有効性が確認された。

今後の課題：

1) 連携排砂・通砂時に出し平ダムから排出された土砂は比較的粗粒部分が多いが、密度流排出によっても粒径 0.0892mm 以上の土砂の大部分は捕捉される。従って、これらの粒径に対しては、水位を完全に低下させるフラッシング排砂により排出するための検討を引き続き行う必要がある。

2) 今回の密度流排出計算は流入量 850m³/s の中規模出水を対象としたが、流入量 400m³/s 規模の小出水でも密度流が発生することが確認されて

表-5 全 SS 及び 44 μ m 以下土砂の捕捉率(%)

CASE	245.0m		240.0m		235.0m	
	0.044m m 以下	全 SS	0.044m m 以下	全 SS	0.044m m 以下	全 SS
CASE-1	57.02	83.29	-	-	-	-
CASE-2	48.74	80.06	46.06	79.05	40.85	76.99
CASE-3	45.05	78.57	41.74	77.35	34.0	74.27
CASE-4	45.35	78.70	-	-	-	-
CASE-5	51.88	81.29	-	-	-	-
CASE-6	44.59	78.40	41.39	77.22	33.91	74.24
CASE-7	44.64	78.46	41.45	77.26	34.18	74.40

いる。今後は、流入流量および流入土砂濃度を変化させた場合の密度流発生状況について整理検討する必要がある。

謝辞：本研究を進めるにあたり、国土交通省北陸地方整備局黒部河川事務所の多大な協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 角哲也：ダム貯水池土砂管理の将来，貯水池土砂管理国際シンポジウム論文集，pp117-126，2000。
- 2) 角哲也：ダム貯水池からの排砂と排砂時の放流水質管理，ダム技術，No. 127，pp.30-39，1997。
- 3) 木下篤彦，藤田正治，田川正明，水山高久，澤田豊明：排砂に伴う濁りが魚類に与える生理的影響とその評価法，砂防学会誌，Vol.58，No. 3，pp.34-43，2005。
- 4) 角哲也・白音包力舉・森田佐一郎：宇奈月ダムフラッシング排砂時の細粒土砂流下特性，水工学論文集，第 50 巻，pp.779-784，2006。
- 5) 高田康史：貯水池土砂管理手法とダム計画・管理への適用に関する研究，京都大学学位論文，2005。
- 6) 櫻井寿之・柏井条介：貯水池流動鉛直二次元モデルにおけるモデルレベルによる計算結果の比較，ダム工学，Vol.15，No.2，pp.106-119，2005。
- 7) 角哲也，高田康史，岡野眞久：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，河川技術論文集，第 9 巻，pp.353-358，2003。
- 8) 韓其為：水庫淤積，中国・科学出版社，2003。
- 9) 岡野眞久，梅田信，田中則和，横森源治：洪水時におけるダム貯水池流入微細粒土砂の挙動と貯水池堆砂管理への応用，河川技術論文集，第 9 巻，pp.73-78，2003。
- 10) 李国英ら：黄河首次調水調砂試験，中国・黄河水利出版社，2003 年。
- 11) 角哲也・白音包力舉・森田佐一郎：SMDP を用いたダム排砂時の SS 観測について，河川技術論文集 Vol.11，pp.315-320，2005。
- 12) 国土交通省 北陸地方整備局 黒部河川事務所ホームページ，<http://www.kurobe.go.jp>

(2006. 4. 6 受付)