

宇奈月ダムフラッシング排砂時の細粒土砂流下特性

CHARACTERISTICS OF FINE SEDIMENT DISCHARGE DURING SEDIMENT FLUSHING OF UNAZUKI DAM

角 哲也¹・白音包力皋²・森田 佐一郎³

Tetsuya SUMI, Baiyinbaoligao and Saichiro MORITA

¹ 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)

² 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)

³ 正会員 工修 (株)SMD 技術研究所代表取締役 (〒164 0012 東京都中野区本町3丁目33-11)

In the Kurobe River, coordinated sediment flushing and sediment sluicing of Dashidaira and Unazuki dams have been executed since 2001. From the view point of the comprehensive sediment management in the sediment routing system, monitoring of quantity and quality of sediment transport during these events in rivers and reservoirs is very important.

This paper shows the results of field data obtained during sediment flushing and sluicing operation of Unazuki dam in June-July, 2005. Suspended sediment concentration measured by the manual sampling and SMDP (Suspended Sediment Concentration Measuring System with Differential Pressure Transmitter), turbidity measured by a high range turbidimeter and grain size distribution are discussed. Clearly, based on the progress of sedimentation of Unazuki reservoir, sediment discharge characteristics of Unazuki dam have been changed year by year.

Key Words : reservoir sediment flushing, suspended-sediment concentration, SMDP, Kurobe river

1. はじめに

近年, 黒部川をはじめ, 天竜川などのダム連携排砂やダム再開発によって「流砂系における総合的な土砂管理」が実施されようとしているが, その結果を評価する際には土砂動態のモニタリングが極めて重要である。

浮遊土砂の計測手法としては, 従来, 人力採水を行った上で濁度や SS を計測する方法および濁度計による連続観測が用いられてきた。ここで対象とする黒部川連携排砂時には, 数万 mg/l もの高濃度となり, 通常の濁度計では計測レンジを超えてしまうことからこれまでは採水法が唯一のモニタリング手法とされてきた。一方で, 著者らが開発してきた SMDP (Suspended Sediment Concentration Measuring System with Differential Pressure Transmitter) が高濃度領域での計測実績をあげており, また, 高濃度領域まで測定可能な濁度計も近年開発されてきている^{1), 2), 3)}。

そこで本研究では, 現状で使用可能なこれらモニタリング手法を用いて 2005 年黒部川連携排砂時の浮遊土砂の流下特性を把握した。採水試料については粒径解析も行い, 1 週間に渡る洪水 - 排砂 - 通砂のイベントごとに宇奈月ダムから排出された浮遊土砂の動態を明らかにするとともに, 濁

度と SS の乖離について, 粒度分布特性の観点から考察した。

2. 計測方法

宇奈月ダムのフラッシング排砂時のダムから排出される浮遊土砂を対象に, 表-1 に示すモニタリングを実施した。なお, 山彦橋は宇奈月ダム下流約 600m 地点に位置する。

ここで, 山彦橋上流の採水は黒部河川事務所により実施されているもので, SS・濁度データが公表されている⁴⁾。次に, SMDP は高精度の差圧センサーによって流体の密度を直接測定することにより, 洪水時の河川や貯水池における高濃度の浮遊砂濃度を連続で自動的に計測するシステムであり, 計測システム本体を水中に直接設置した水中型とポンプで河川水を取り込んで配管を通して

表-1 計測方法

計測項目	計測場所	計測方法	計測 間隔
SS	山彦橋上流	採水	1hr
	山彦橋	水循環型 SMDP	2sec
	愛本堰堤	水中型 SMDP	2sec
濁度	山彦橋上流	採水	1hr
	山彦橋	COMPACT-HTW	10min
粒度分布	山彦橋	採水	不定期

水槽（内部に差圧センサーを設置）まで導水する水循環型の2種類を用いた。濁度は、特に高濃度計測用に開発されたアレック電子社製COMPACT-HTW（最大測定 70,000mg/l）を用い

た。また、各イベント中の高濃度発生時に山彦橋より独自に採水（合計約 80 サンプル）を行い、レーザー回折式粒度分析器（HORIBA - LA300）を用いて粒度分析を行った。

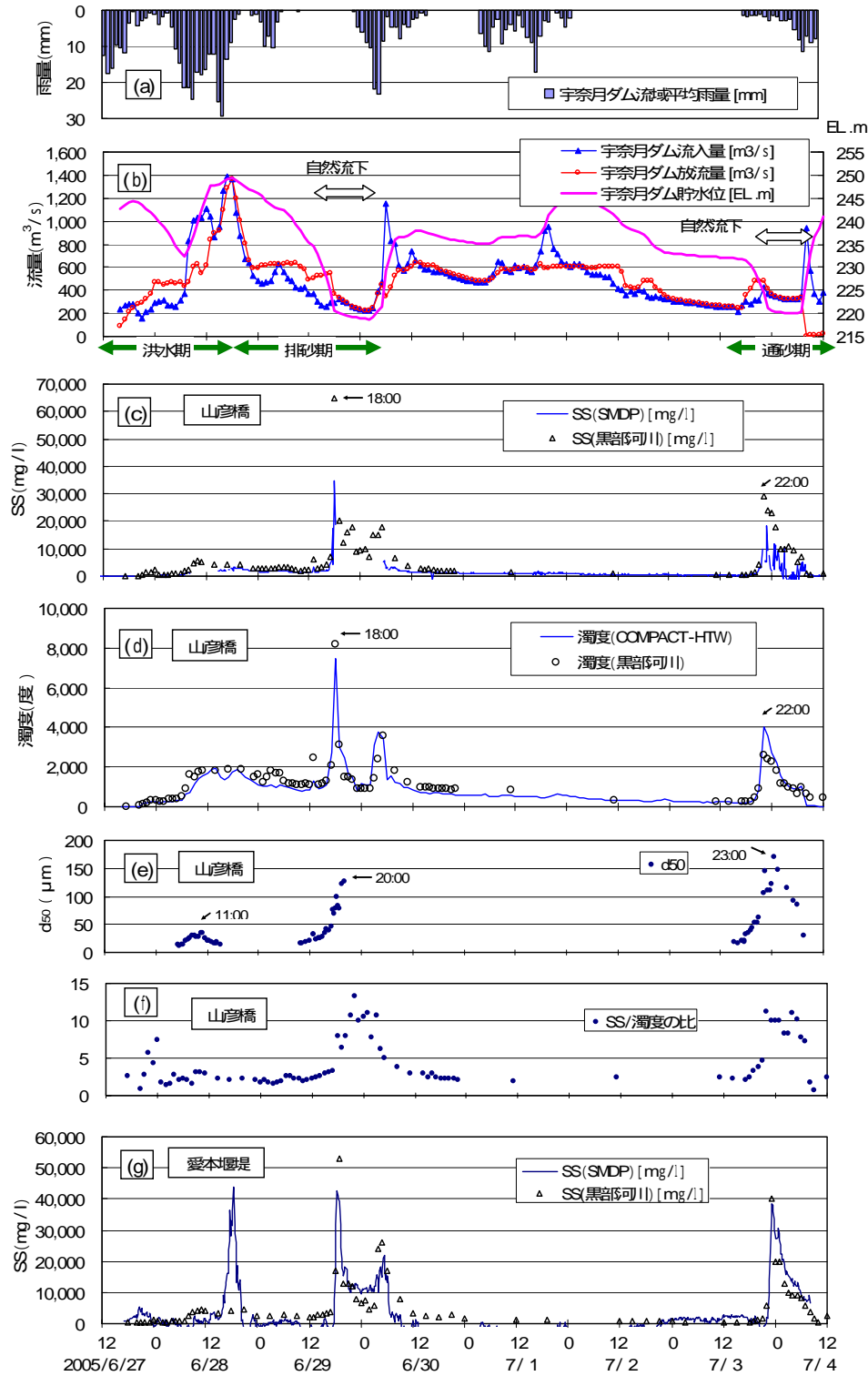


図-1 2005年度宇奈月ダムの排砂・通砂経過および細粒土砂流出に関する計測結果

- (a)流域平均降雨量, (b)流入量・放流量・貯水位変化, (c)SS変化(山彦橋), (d)濁度変化(山彦橋), (e)SS中のd₅₀の変化(山彦橋), (f)SSと濁度の比(山彦橋), (g)SS変化(愛本堰堤)

表-2 2005年黒部川連携排砂および連携通砂の経過

項目	ダム操作	出し平ダム			宇奈月ダム		
		開始時刻	終了時刻	経過時間	開始時刻	終了時刻	経過時間
連携排砂	水位低下	6/27 20:45	6/28 7:47	9時間 15分	6/27 19:28	6/28 7:32	12時間 4分
	洪水処理又は調節	6/28 7:47	6/28 20:40	25時 45分	6/28 7:32	6/28 22:06	14時 34分
	水位低下再開	6/28 20:40	6/29 7:45	11時 5分	6/28 22:48	6/29 17:32	19時 26分
	自然流下	6/29 7:45	6/29 19:45	12時間	6/29 17:32	6/30 5:26	11時 14分
	水位回復	6/29 19:45	6/30 2:55	7時間 10分			
	洪水処理又は調節	6/30 2:55	6/30 23:00	20時間 5分	6/30 5:26	6/30 13:06	8時間 20分
連携通砂	水位低下				6/30 13:06	6/30 23:00	9時間 54分
	一時中断	6/30 23:00	7/3 17:00	66時間	6/30 23:00	7/3 17:00	66時間
	水位低下再開	7/3 17:00	7/3 21:30	4時間 30分	7/3 17:00	7/3 22:42	5時間 42分
	自然流下	7/3 21:30	7/4 8:50	11時 20分	7/3 22:42	7/4 7:13	8時間 31分
	水位回復	7/4 8:50	7/4 12:10	3時間 20分	7/4 7:13	7/4 15:23	8時間 10分
	通砂後の措置	7/4 12:10	7/5 0:10	12時間	7/4 15:23	7/5 3:23	12時間分

3. 計測結果

(1) 2005年黒部川連携排砂の概要

2005年度の連携排砂・通砂は、6月27日から7月5日にかけて実施された。既往の実績との違いは、北陸地方を往復移動した梅雨前線の影響により連携排砂・通砂の水位低下段階でそれぞれ大きな洪水が発生し、出し平ダム・宇奈月ダムは洪水処理や洪水調節に移行したため、一連の操作が長期間に及んだことである。特に通砂においては、計画上は洪水発生後速やかに実施すべきところが、洪水流入継続のため体制を一時中断し、3日後に再開する異例の操作となった。

これら一連のダム操作経過を表-2に、また、対応する水文データ（宇奈月ダム流域平均降雨量，宇奈月ダム貯水位・流入量・放流量）を図-1(a)，(b)に示す。これらより、今回の一連の期間をダム操作と関連付けて、「洪水期」(6/27 19:28～6/28 22:06)，「排砂期」(6/28 22:48～6/30 5:26)，「通砂期」(7/3 17:00～7/4 15:23)と定義する。

(2) 各期別の宇奈月ダムからの細粒土砂流出特性

a) 洪水期

宇奈月ダムは6/27 19:28から連携排砂の水位低下を開始したが、その後の降雨によりピーク流入量 1,487m³/sの洪水が発生したため水位低下を中断し洪水調節へ移行した。

図-1(c)，(d)にダム下流の山彦橋におけるSSおよび濁度の変化を示すが、洪水調節中はクレスト越流部および常用洪水吐き・水位低下用放流設備からの放流であり、濁度 2,000度，SS5,000mg/l程度の流出であった。この時のSSの粒度分布変化を図-1(e)，図-2に示す。ダムを通過するSSのメジアン径(d₅₀)は洪水流量の増加とともに上昇し、6/28 11:00で最大値約35μmに達した。

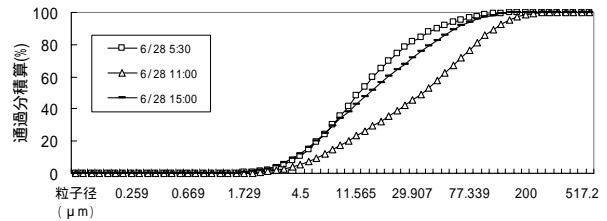


図-2 洪水期(6/28)のSS粒度分布の変化

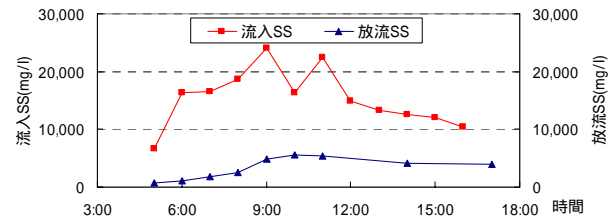


図-3 洪水期(6/28)の流入SSと放流SSの変化

これは、この時点で常用洪水吐きから最大約620m³/sの放流が行われており、貯水池内を沈降せずにダムまで到達した細粒土砂が、ダムの中位標高から放流されたものと推定される。その後は、放流量の上昇にもかかわらずSS粒径が、細くなっており、これは常用洪水吐きからクレスト越流部に放流標高が移行した結果である。

図-3に、出し平ダムから宇奈月ダムサイトまでの流下遅れを1時間としたときの宇奈月ダム流入SS(出し平ダム放流SSと黒雑支川流入SSより推定)と放流SSを示す。これらの時間変化はほぼ一致しており、貯水池上流からの流入SSの一部が洪水吐きから放流されているものと考えられる。一方で、SSピークは約1/5に低下しており、粒径35μm以上の粗粒土砂を中心に貯水池内で捕捉されているものと推定される。

b) 排砂期

洪水ピーク後の6/28 22:48に排砂に向けて水位低下が再開された。同様に図-1(c)，(d)にダム下流の山彦橋におけるSSおよび濁度の変化を示す。

排砂期では、貯水池の水位低下につれて、貯水池上流は次第に自然河道状態に移行し、流れの掃流力の上昇が堆積土砂の巻上げを増加させるため、上流からの流入土砂とともにダムまで高濃度の土砂が輸送される。さらに、クレスト越流部 常用洪水吐き 水位低下用放流設備、そして最終的に排砂設備と放流標高が低くなるに伴って土砂濃度は急上昇し、水位低下完了直前の 6/29 18:00 に濁度 8,200 度、SS65,000mg/l の最高値を記録した。

この時の SS の粒度分布変化を図-1(e)および図-4 に示すが、土砂濃度と同様に放流 SS のメジアン径は貯水位および放流標高の低下とともに上昇した。観測された放流 SS の最大メジアン径 127 μm は、放流 SS 最大発生時刻 2 時間後の 20:00 に記録されており、これは自然流下開始後に排砂設備まで粗粒土砂が到達するまでの遅れ時間に対応しているものと考えられる。

図-5 に、洪水期同様に推定した宇奈月ダム流入 SS と放流 SS を示す。水位低下中に上流の出し平ダムから排出された土砂が流入し、これらはほとんどが沈降または希釈され放流 SS にほとんど変化を生じない。その後、宇奈月ダムの自然流下開始により放流 SS が逆転して貯水池からの土砂排出に転じていることが SS 変化からも確認される。

c) 通砂期

排砂による自然流下完了直前の 6/30 5:26 に再び洪水流入が発生し、平成 16 年同様に排砂に引き続き通砂が実施されることとなった。しかしながら、今年はその後の降雨継続により通砂に向けた水位低下が開始できない状態が継続し、最終的に 3 日後の 7/3 17:00 から水位低下が開始された。通砂時においても、排砂時同様に水位低下完了直前の 7/3 22:00 に濁度 2,600 度、SS29,000mg/l の最高値を記録した。

図-1(e)および図-6 に SS の粒度分布変化を示す。連携排砂時と同じように貯水位低下につれて放流 SS のメジアン径も上昇し、最大メジアン径は排砂時よりも大きい 164 μm に達した。また、推定された宇奈月ダム流入 SS と放流 SS を図-7 に示す。出し平ダムは先に自然流下に入り、SS ピーク値は 90,000mg/l となり、これが約 1 時間後に宇奈月ダムを通過し、ダム下流で 29,000mg/l が観測された。SS に関しては排砂時と逆の結果となったが、その理由として、出し平ダムからの流入 SS の多くが粗粒分のために、宇奈月ダム貯水池内でその多くが捕捉されたことが考えられる。

(3) 水循環型 SMDP および水中型 SMDP の計測結果
図-1(c)に今回の排砂時の SMDP の計測値を示す。

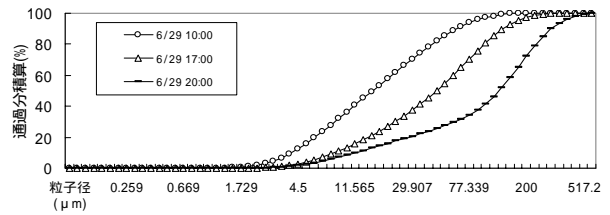


図-4 排砂期(6/29)の粒度分布の変化

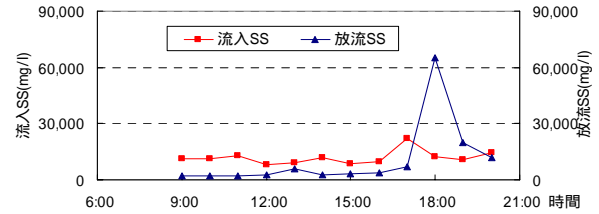


図-5 排砂期(6/29)のダム貯水池の流入 SS と放流 SS

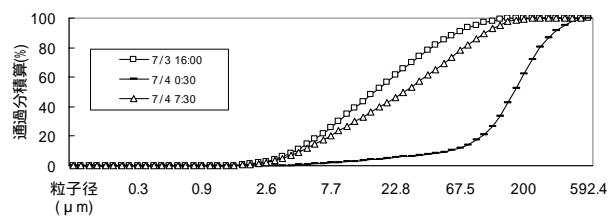


図-6 通砂期(7/3-4)の粒度分布の変化

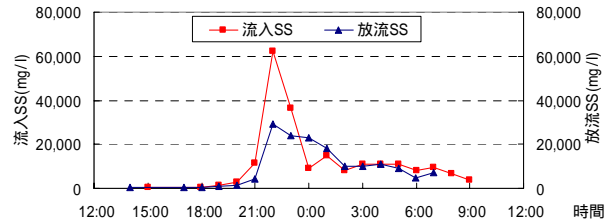


図-7 通砂期(7/3-4)のダム貯水池の流入 SS と放流 SS

水循環型は高濃度による配管の詰まりにより途中で欠測となった時間があるが SS 30,000mg/l 以上の高濃度の観測ができた。一方、図-1 (g)に示す愛本堰堤の水中型では、採水 SS の時間変動とほぼ一致する極めて良好なデータが得られ、SS 連続観測の有効な手法であることが改めて確認された。

4. 考察

(1) 粒径別の土砂収支

a) 洪水期

図-8 に粒度分析から得られた洪水期の放流 SS の粒径別の割合、また、この割合を計測された SS に掛けて得られた粒径別の SS の変化を図-9 に示す。この期間は全体的に、5 ~ 75 μm の粒径の割合が全体の 70 ~ 80% を占めている。また、先述のように常用洪水吐きからの放流時には、20 ~ 75 μm 、75 ~ 250 μm が中心であり、クレスト越流部に移行すると 5 ~ 20 μm が増加しており、放流 SS ピーク時には 250 μm 以上の粒径が 14% に達した。

b) 排砂期

図-10 および図-11 より, 全体的に見ると, 水位低下につれて, 20 μm 以下の細粒部分の割合が減少し, 75 μm 以上の粗い粒径の割合が上昇している. 特に, 自然流下中は 75~250 μm が約 50%, 250 μm 以上が約 17%まで上昇した.

c) 通砂期

図-12 および図-13 より, 排砂期同様に, 水位低下につれて 20 μm 以下の細粒部分の割合が減少し, 75 μm 以上の粗い粒径の割合が上昇している. 特に, 自然流下中は 75~250 μm が約 60%, 250 μm 以上が約 19%まで上昇した.

表-2 は, 以上の SS の粒径別割合をもとに, 各期別の粒径別浮遊土砂量の割合を求めたものである. 洪水期では 5 μm ~75 μm の割合が一番多く全体の 76%を占め, 排砂期と通砂期では 20 μm ~250 μm 粒径の割合がそれぞれ全体の 69%と 78%を占めている. また, 洪水期から通砂期までの全体を見ると, 排出土砂の粒径は次第に粗くなり, 特に, 250 μm 以上の粒径は洪水期のわずか 0.03%から通砂期の 10.13%まで上昇し, 排砂・通砂により大量の粗粒土砂が下流へ供給されていることを示している.

(2) ダム排砂時の濁度と SS の相関

一般に, 河川における SS と濁度の間には一定の相関式が成立するとの報告があるが, この前提は濁水中に含まれる細粒土砂の粒径, 形状, 色調などが概ね不変な場合であり, 異なる河川の場合や同一河川でも季節変化などにより含まれる細粒土砂の成分が異なる場合には相関が満足されないものと考えられる. 特に, ダム排砂のように SS 中に粗粒土砂が含まれて大きく変化する場合には課題が大きい. そこで, これまで整理してきた宇奈月ダム排砂時の SS, 濁度および粒度分布のデータを用いて相関分析を行う.

ここで対象とするのは, 図 1(c), (d) に示した山彦橋における採水データから得られた SS と濁度および図 1(e)の粒度分布である. まず, 各測定時刻の SS と濁度の比を求めたものを図 1(f)に示している. これによれば, SS/濁度が 2 から 14 程度まで大きく変化しており, この傾向は図 1(e)のメジアン径の変化と極めてよく一致していることがわかる. そこで, 次にこれらの SS と濁度の値を各期別にプロットしたものが図-14 である. これによれば, 図 1(f)からも推測されるように洪水期は相関が高く SS/濁度の比が小さく, 排砂期, 通砂期の順で比が大きくなっている. これらの線

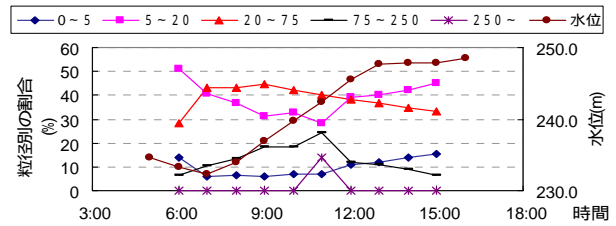


図-8 洪水期(6/28)の SS の粒径別の割合

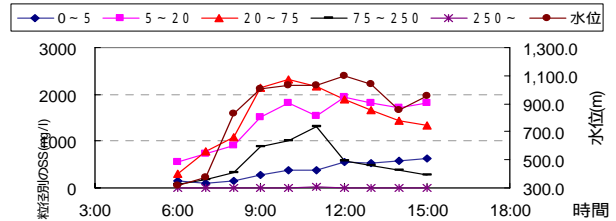


図-9 洪水期(6/28)の粒径別の SS

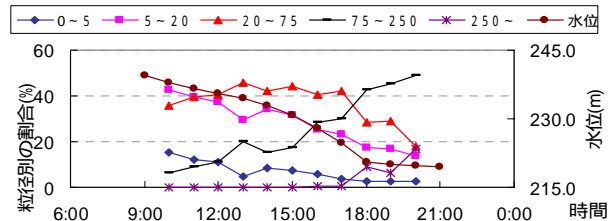


図-10 排砂期(6/29)の SS の粒径別の割合

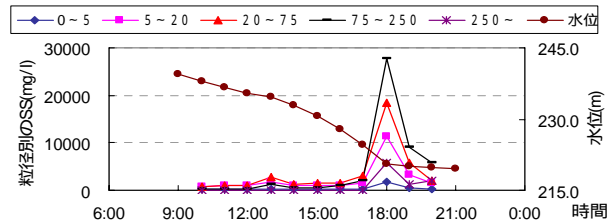


図-11 排砂期(6/29)の粒径別の SS

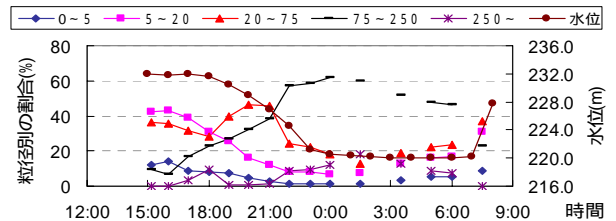


図-12 通砂期(7/3-4)の SS の粒径別の割合

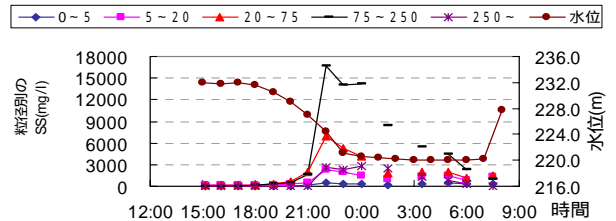


図-13 通砂期(7/3-4)の粒径別の SS

表-2 各期間の粒径別浮遊土砂量の割合

粒径 (μm)	0~5	5~20	20~75	75~250	250~
洪水期(%)	10.36	37.77	38.42	13.42	0.03
排砂期(%)	3.80	20.65	31.89	37.11	6.55
通砂期(%)	2.28	9.72	22.55	55.32	10.13

形回帰式は図中に示す。図-15は、SSの粒径を5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 75, 106, 150, 212, 300, 425, 600 μm の17階級に分けて、各粒径までのSS累計値と濁度の線形近似相関係数を求めたものである。これより、いずれも粒径の増大に従って濁度との相関が高くなるが、洪水期と排砂期では45 μm までの場合（洪水期：0.768；排砂期：0.893）、通砂期では150 μm までの場合（0.959）にそれぞれ相関係数が最大となり、これ以上の粗粒土砂を含めると相関係数が低下する。これは、光学式濁度計はカオリンなどの基準粘土により校正されており、細粒土砂濃度に対して相関が得られやすいが、粗粒土砂の割合が増加するにつれて乖離が生じてくるものと考えられる。

これを具体的に示したものが図-16であり、各粒径階までのSSの累計値と濁度の比率を示している。この図から分かるように、50 μm まではSSと濁度の比率は期別にかかわらずほぼ一致しており、20 μm 程度まででSS/濁度 1、50 μm 程度まででSS/濁度 2である。さらにこれ以上の粒径を含むと、各期別でSS/濁度の比率が異なり相関が得られなくなる。従って、ダム排砂のような50 μm を超える粗粒土砂を含むSSモニタリングにおいては、細粒土砂の含有量に反応する濁度計測とともに、SSの直接測定が必須であると考えられる。

5. 結論

本研究の結論を以下に示す。

- 1) ダムからの放流SSと粒度分布は、湛水状態の洪水期と排砂・通砂期では大きく変化し、洪水期は流量が大きく、放流標高が低いほど、また、排砂・通砂期では貯水位が低いほどSSが上昇し粒径が大きくなる。
- 2) 排砂・通砂期の放流SSピークは自然流下開始直前に発生し、粒径ピークは粗粒分の貯水池内の流下時間の関係でこれより数時間遅れる。
- 3) 粒径別の土砂収支では、洪水期は75 μm 以下が80%以上を占めるのに対して、排砂・通砂期は75 μm 以下が45, 65%と次第に増大し、宇奈月ダムから排出される粒径は粗くなっている。
- 4) ダム排砂時の放流SSと濁度の関係では、50 μm まではSSと濁度の比率は期別にかかわらずほぼ一致し良好な相関が得られるが、含まれ

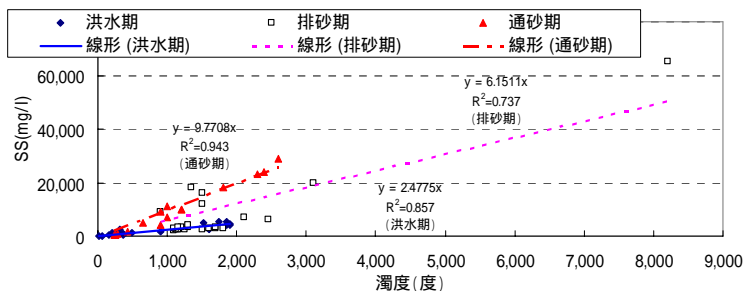


図-14 洪水期、排砂期と通砂期のSSと濁度の比較

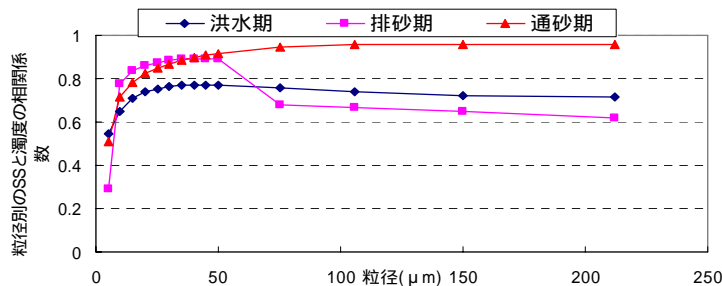


図-15 各粒径階までのSSと濁度の相関

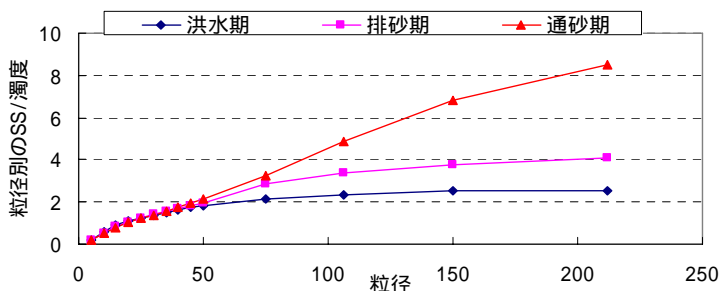


図-16 各粒径階までのSSと濁度の比率

るSS粒径階の増大により比率が2倍程度まで増加する。さらに50 μm を超える粗粒土砂を含む場合にはSSの直接測定が必須と考えられる。

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には、SMDPの設置および採水資料データの提供など多大な協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 角 哲也・森田佐一郎・越智隆志・小宮秀昭：差圧測定による浮遊砂濃度計測システムの開発，ダム工学，11(3)，pp. 4-12，2001。
- 2) 角 哲也・森田佐一郎・越智隆志・小宮秀昭：差圧センサーを用いた河川・ダム貯水池における新しい浮遊砂濃度計測手法の開発，水工学論文集，第46巻，pp. 779-784，2002。
- 3) 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.10，pp. 315-320，2005。
- 4) 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>

(2005.9.30 受付)