

SMDP を用いたダム排砂時の SS 観測について

MONITORING OF SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION WITH SMDP DURING RESERVOIR SEDIMENT FLUSHING

角 哲也¹・白音包力皋¹・森田 佐一郎²
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)

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

Generally, monitoring of sediment transport in rivers and reservoirs is carried out by suspended sediment concentration measurement, and bed load is estimated indirectly by calculation of sediment budget in rivers and reservoirs obtained by field surveys.

In the Kurobe River, coordinated sediment flushing and sediment sluicing of Dashidaira and Unazuki dams have been performed in July 2004. This paper discusses the way of monitoring of suspended sediment concentrations in the downstream river during these operations. Results of hourly bottle samplings and continuous SMDP measurements (Suspended Sediment Concentration Measuring System with Differential Pressure Transmitter) are compared, and characteristics of SS peaks in the downstream river are discussed.

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。

浮遊土砂濃度の計測手法としては、濁度計による連続観測や採水分析などの手法があるが、いずれにも安定性や手間がかかるなどの課題がある。このような背景で、著者らは2000年から、SMDP (Suspended Sediment Concentration Measuring System with Differential Pressure Transmitter) の研究開発を行い、黒部川出し平ダムと宇奈月ダムの連携排砂時のダム下流の浮遊土砂濃度の計測、天竜川美和ダム土砂バイパストンネル開発に関する土砂動態モニタリング、小渋ダム貯水池内の土砂動態のモニタリングなどを実施している。

ここでは、2004年度の黒部川出し平ダムと宇奈月ダムの連携排砂・通砂時のダム下流の浮遊土砂濃度の計測結果について、SMDPと伝統的な採水手法の計測結果について比較検討を行い、SMDPを用いたダム排砂時のSS濃度モニタリングの現状について報告する。

2. 計測方法

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(詳しい原理については、参考文献1、2を参照)である。

ここで、実際の計測条件により、計測システム本体を水中(河川内あるいは貯水池内)に直接置くか置かないかによって、水循環型と水中型の二種類に分かれる。水循環型SMDPは、流量及び水位変動が大きい自然河川の流れに適しており、ポンプで河川水を取り込んで配管を通して堤防上などに設置した水槽(内部に差圧センサーを設置)まで導水し、水槽内部の水が時間経過とともに順次入れ替わることで浮遊砂濃度を計測する。

一方、水中型SMDPは、一定以上の水深が常時に確保される貯水池などのような場所に適しており、差圧センサーを浮遊土砂濃度が変化する流体中に直接投入して計測するものである。この形式では、水深鉛直方向の高さを移動させることにより、異なる水深の浮遊砂濃度を計測することも可能であり、天竜川小渋ダム貯水池内においてこのような計測を実施している。

3. 計測場所

(1) 出し平ダム及び宇奈月ダムの連携排砂

黒部川においては、利水や治水の目的で中流域に黒部ダム、下流域に出し平と宇奈月ダムなどが建設されている。黒部川は日本有数の土砂量が多い河川であり、下流域の出し平ダムと宇奈月ダムでは、河川の流砂の連続性を維持し、貯水池の持続性を確保するために、毎年6月から8月にかけて1回から2回の頻度で、連携排砂・通砂を行っている。なお、連携排砂・通砂時においては、下流域への影響の把握やその効果を評価するために、ダム貯水池、河川及び海域において、浮遊土砂濃度、水質、底質、水生生物調査などが排砂実施前、実施中、実施後に行われている。

2004年度の連携排砂・通砂は、7月13日に新潟県に豪雨、洪水被害をもたらした梅雨前線が南下し、黒部川流域で7月15日から大雨になり、7月16日21時時点で出し平ダムの流入量が連携排砂基準流量(250m³/s)を上回ったことにより開始された。今回の連携排砂では、2003年6月の連携

排砂以降に出し平ダムに堆積した33万m³が排砂対象となった。なお、宇奈月ダムも出し平ダムに合わせて排砂を行っているが、現在のところは安定堆砂勾配に向けて粗粒土砂を堆積させており、微細土砂のみが通過する状態である。

今回の排砂では、貯水位低下後の自然流下(排砂)中にさらに大きな洪水が発生したため(7月18日未明)、排砂を途中で中断し、出し平ダムと宇奈月ダムは洪水処理や洪水調節へ移行した。両ダムの貯水位は洪水貯留により一時的に上昇したが、その後、両ダムは再び貯水位を低下し、今度は新規に流入した土砂を速やかに排出させるための自然流下(通砂)を行った。図1にこれら経過を示すが、このように排砂・洪水調節・通砂が連続的に実施されたことが今回の大きな特徴である。ちなみに、この7月18日の半日後に同じ梅雨前線が南下し福井豪雨をもたらした。このとき、黒部川上流域では一部で時間雨量100mmにも達する降雨を記録したにもかかわらず黒部川ではほとんど被害も発生せず、上流ダム群による洪水調節効果を端的に示す結果となった。

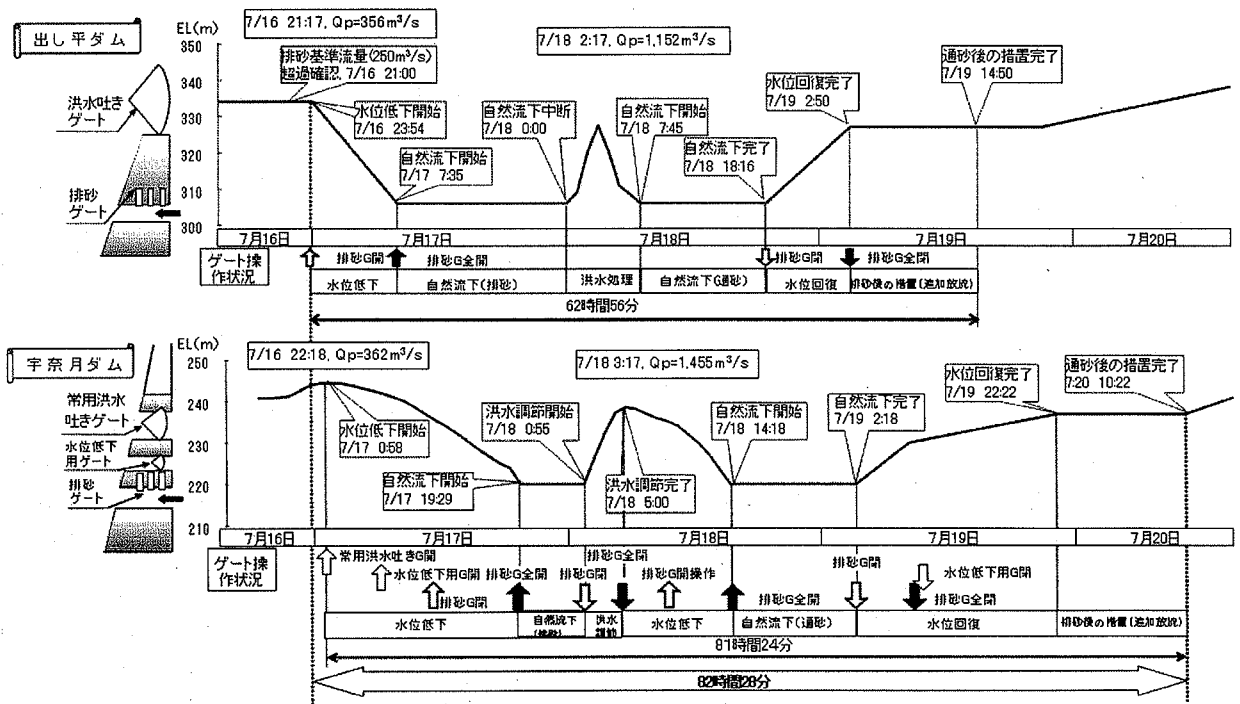


図1 2004年度黒部川出し平ダムと宇奈月ダムの連携排砂・通砂経過

(2) 計測場所

連携排砂時においては、毎正時の採水法とSMDPを用いた連続計測方法により浮遊土砂濃度の計測が同時に行われた。計測場所を図2に示す。採水法の採水場所は出し平ダム直下(約400m下流、右岸側)、宇奈月ダム直下(約400m下流、

左岸側)、愛本橋(宇奈月ダム下流愛本堰堤上流、右岸側)、下黒部橋(宇奈月ダム下流約20km、右岸側)であり、SMDPは宇奈月ダム直下(約600m下流、右岸側、水循環型SMDP、図2の(a))、愛本橋(宇奈月ダム下流約1.2km、愛本堰堤上流、左岸側、水中型SMDP、図2の(b))、下黒部

橋（宇奈月ダム下流約 20km、左岸側、水循環型 SMDP、図 2 の(c)と(d) 地点である。ここで愛本橋において水中型が設置できたのは、当該地点が取水堰堤上流部の河岸沿いであり、淵状に水深が確保されている場所であったことによる。

採水法は表面採水であり、SMDP はそれぞれ河床から宇奈月ダム直下で 180cm（河床からのポンプの高さ）、愛本橋で 150cm（河床からの SMDP 本体中心高さ）、下黒部橋で 20cm（河床からのポンプの高さ）の高さで計測している。

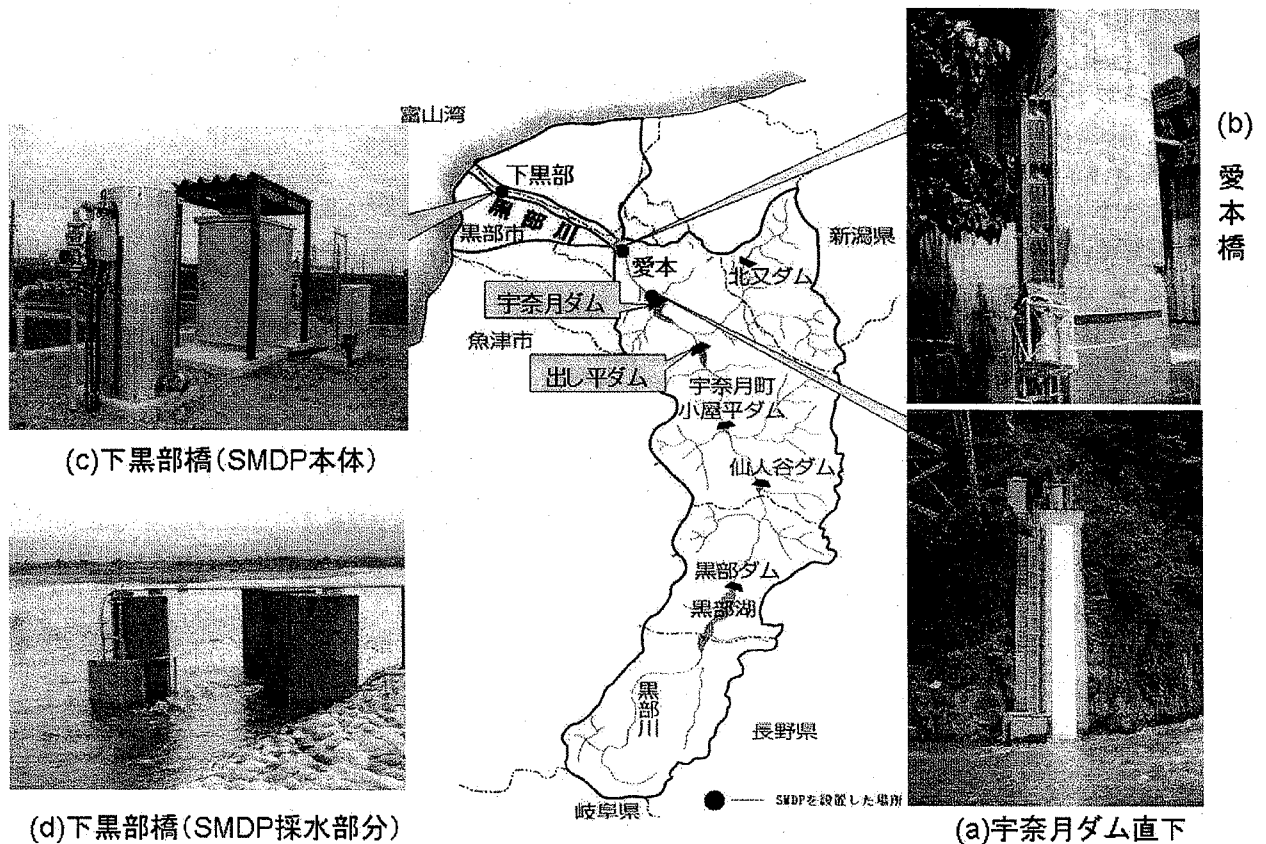


図 2 黒部川流域と SMDP を設置した場所

4. 計測結果

(1) 宇奈月ダム直下

図 3 に宇奈月ダム直下の左岸側の採水法と右岸側の SMDP の 7 月 16 日 23 時から 7 月 19 日 12 時までのそれぞれの地点の浮遊土砂濃度の計測結果を示す。この図から分かるように、7 月 17 日 8 時から SMDP と採水法の計測結果に変動が現れ、7 月 17 日 20:20 時点で 4,440mg/l の初めてのピーク値を示している。これらは、出し平ダムと宇奈月ダム排砂ゲートの開操作及び、宇奈月ダムの 7 月 17 日 19:29 からの自然流下開始を反映していると考えられる。7 月 17 日 21 時から 7 月 18 日 8 時まで大出水による急激な濃度上昇が生じたため、ポンプから SMDP への給水が停止し残念ながら欠測となった。7 月 18 日 8:20 から、ポンプを再起動させると、7 月 18 日 9:50 時点で 7,270 mg/l のピーク値を示し、宇奈月ダムの洪水調節後の排砂ゲートの再開放操作後の SS の変動を記録した。

さらに、7 月 18 日 14:40 時点で 15,910 mg/l に達し、通砂による自然流下開始後の SS 最大値となった。この時の採水結果は 17,000mg/l (15 時) であり、SMDP とほぼ同等である。なお、7 月 18 日 14:40 から、排砂に伴って流出した流木により SMDP の配管の一部が破損したため、その後は欠測となっている。図 4 に採水法と SMDP の計測結果の相関を示すが、全体的に、採水法と SMDP の計測結果の相関が高いことが分かる。

(2) 愛本橋

図 5 に愛本橋の水中型 SMDP による SS 計測結果を示す。愛本橋における SS 値は 7 月 17 日 21:10 時点で 8,360 mg/l、7 月 18 日 1:50 時点で 10,480mg/l、4:40 時点で 9,430mg/l、10:30 時点で 9,760 mg/l、15:40 時点で 29,465 mg/l の五つのピーク値を示しており、それぞれ宇奈月ダムの排砂ゲート開操作（水位低下）や自然流下（排砂）、支川と本川の洪水、洪水後の排砂ゲート開操

作（水位低下）及び洪水後の自然流下（通砂）操作などに対応していると考えられる。水中型では欠測もなく連続的にデータが記録され、採水法と SMDP の計測結果による各ピーク値の時間はほぼ一致している。

一方、図 6 に採水法と SMDP の計測結果の相関を示す。両者の結果には良好な相関が得られているが、両者の値は全体的に採水法の値が SMDP より大きい値を示している。この理由としては、両者の計測地点の相違のほか、水中型における流速による動圧の影響が考えられる。

(3) 下黒部橋

図 7 に下黒部橋における採水法（左・右岸側）と左岸側の SMDP の SS 計測結果を示す。SS 値は 7 月 17 日 11:00 から著しい変動が現れ、7 月 17 日 23:10 時点で 2,940 mg/l、7 月 18 日 7:40 時点で 5,450 mg/l、12:20 時点で 4,350 mg/l、18:40 時点で 9,630 mg/l の四つのピーク値を示しており、それぞれ宇奈月ダム排砂ゲート操作（水位低下）や自然流下（排砂）、洪水、洪水後の排砂ゲート操作（水位低下）及び洪水後の自然流下（通砂）などの操作に対応している。その中で、7 月 18 日 4:40 から 7:00 までの間は、急激な濃度上昇が生じたためにポンプから SMDP への給水が停止し欠測となった。

図 8 に採水法（左・右岸側）と SMDP の計測結果の相関を示す。採水法（左・右岸側）の計測結果は SMDP よりやや大きな値を示しており、他地点に比べてその差は大きくなっている。ここで、

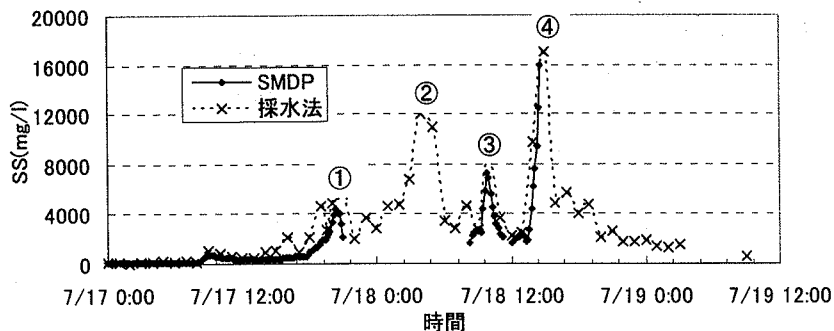


図 3 宇奈月ダム直下の SS の計測結果

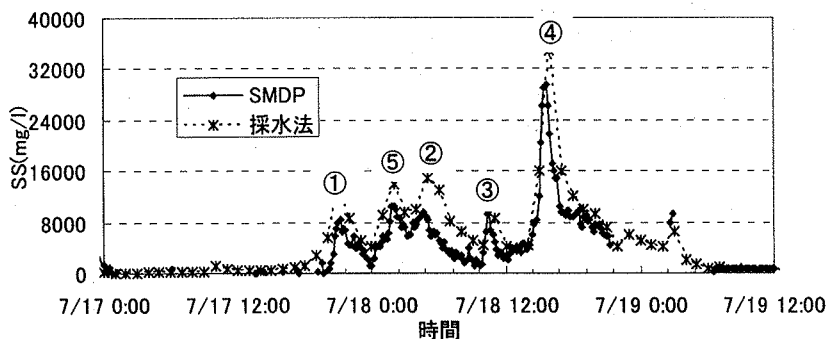


図 5 愛本橋の SS の計測結果

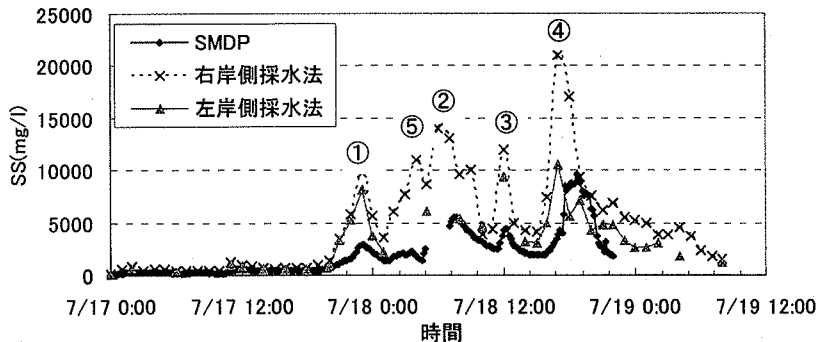


図 7 下黒部橋の SS の計測結果

左・右岸における採水による SS 値同士を比較すると、全般に右岸側が高くなっており、これは、下黒部橋のところで黒部川が二つの流路に分かれて、主流が右岸側となっていたためと推定される。

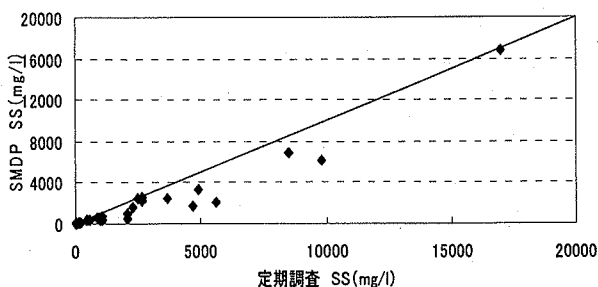


図 4 採水法と SMDP の計測結果の相関（宇奈月ダム直下）

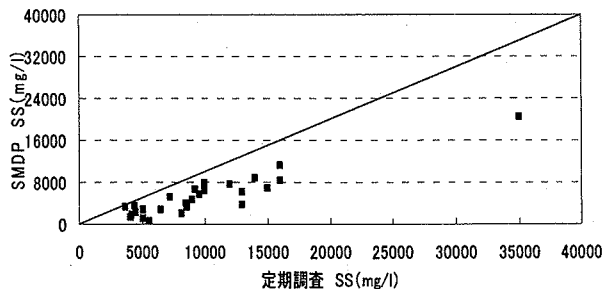


図 6 採水法と SMDP の計測結果の相関（愛本橋）

そこで、SMDP が設置されている左岸側の採水値と SMDP を比較すれば、両者の差は小さく良好な相関が得られている。

5. 考察

SMDP を用いて、黒部川における連携排砂・通砂の各操作時における下流河川の SS の変化過程を自動で連続的に計測することができた。これにより、水循環型および水中型を適切に組み合わせれば、最大数万 mg/l に達する排砂時の高濃度の SS モニタリングを効率的に実施できるものと考えられる。

(1) SS 濃度のピーク値の特性

宇奈月ダム直下、愛本橋と下黒部橋の三つの計測結果を比較すると宇奈月ダム直下では四つのピーク値 (図 3 の採水法の計測結果により、①~④)、愛本橋及び下黒部橋では五つのピーク値 (図 5, 7 の採水法の計測結果により、①~⑤) が計測されている。ピーク⑤が増えた理由としては、宇奈月ダム下流から愛本橋までの間に支川合流があり、愛本橋 7 月 18 日 2:00 時点のピーク (8,640mg/l) はその影響と考えられる。

各地点のイベントごとのピーク値を各地点の最大値であるピーク④の値との比率で表したものを表 1 に示す。これによれば、SS ピークの比率の変化傾向は宇奈月ダム直下と下黒部橋ではよく一致しているが、その間の愛本橋では 7 月 17 日 21:10 時点を除くと約半分の比率とな

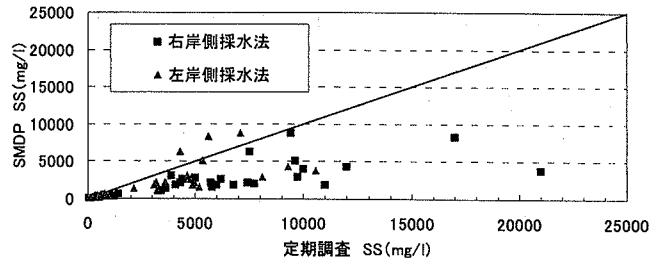


図 8 採水法と SMDP の計測結果の相関 (下黒部橋)

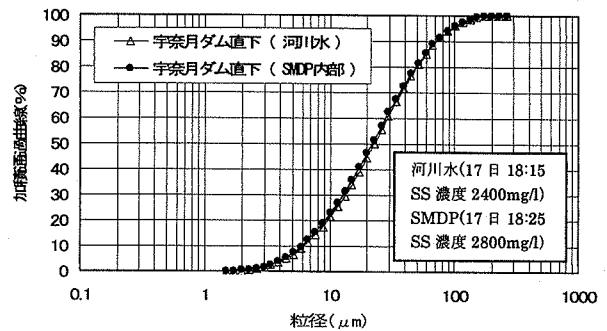


図 9 採水場所ごとの粒度分析結果 (宇奈月ダム直下)

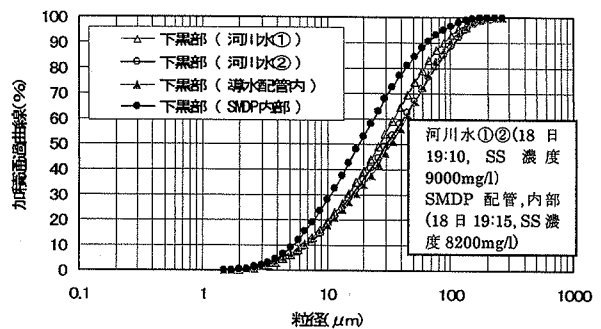


図 10 採水場所ごとの粒度分析結果 (下黒部橋)

表 1 各計測地点のピーク値の比較

No.	日付	宇奈月ダム直下			愛本橋			下黒部橋		
		時間	SS(mg/l)	比率	時間	SS(mg/l)	比率	時間	SS(mg/l)	比率
①	7月17日	20:20	4,440	0.28	21:10	8,360	0.28	23:10	2,943	0.31
⑤	7月18日	—	—	—	1:50	10,480	0.36	—	—	—
②		—	—	—	4:40	9,430	0.32	7:40	5,450	0.57
③		9:50	7,270	0.46	10:30	9,760	0.33	12:20	4,350	0.45
④		14:40	15,910	1.00	15:40	29,465	1.00	18:40	9,629	1.00

っている。この理由としては、水循環型の場合には配管及び水槽内の濁水が 20 分程度入れ替わりを繰り返しながら計測するために、その間の河川内の SS 変動が平均化されるのに対して、水中型ではほぼ瞬間値として時間遅れなく計測しているために、通砂時のピーク値 (④) がより大きく評価されたことが一因と考えられる。

次に、各地点のピーク発生時刻を比較すると、

ピーク①、②、④において、愛本橋および下黒部橋は、それぞれ宇奈月ダム直下から 1 時間および 2~3 時間遅れであり、排砂・通砂時の SS 波形の流下に要する時間に対応していると考えられる。

(2) 地点ごとの粒度分布特性

宇奈月ダム直下および下黒部橋において、河水、SMDP への配管内、SMDP 本体 (水槽)

内で採水したサンプルをレーザー回折式粒度分析装置 (HORIBA, LA-300) で粒度分析した結果を図9および10に示す。

まず、宇奈月ダム直下 (17日18:15) および下黒部橋 (18日19:10) の河川水同士を比較すれば、それぞれの採水時刻が異なるが、いずれも1~200 μm の範囲に分布している。さらに詳細に見ると、下黒部橋の方が d_{50} で10 μm 程度粗くなっている。この採水時刻の18日19時頃は、SS濃度のピーク④の直後であり、宇奈月ダム貯水池内の堆積形状が今回の洪水で大きく変化し、宇奈月ダムが細粒土砂をより通過させやすい状態に移行し、これが下黒部橋まで到達したことが原因と考えられる。

次に、河川水とSMDP内の粒度特性を比較する。宇奈月ダム直下地点では、SMDP本体 (水槽) 内の粒度分布は河川水とほとんど一致しており、問題なく導水・密度測定が行われている。一方、下黒部橋においては、河川水、SMDPへの配管内に比べてSMDP本体 (水槽) 内の粒度分布がやや小さくなっており、数十 μm 以上の粒径の細粒土砂が減少している。図8に示したように、下黒部橋においては採水法とSMDPの計測結果の差がやや大きくなっており、上記の細粒土砂の一部減少が影響している可能性がある。この理由としては、水中ポンプからSMDP本体 (水槽) までの導水経路が考えられ、ほとんど鉛直管のみで構成される宇奈月ダム直下 (配管全長20m) に比べて、下黒部橋では河道内から堤防上のSMDP本体までの水平管部分が長い (配管全長60m) ことが、途中でのSS成分の沈降をもたらした可能性がある。現在、導水管内の流速を0.5m/s以上確保するように調整しているが、今後の改良すべき課題と考えられる。

6. おわりに

本論文では、黒部川連続排砂・通砂時の下流河川のSS変化をSMDPを用いて計測し、採水分析との比較を行った。以下に主要な結論を示す。

- (1) 水中型と水循環型SMDPともに、ダム排砂時の最大約30,000mg/lに達するSSの急激な変化を自動で連続的に計測可能であることが確認された。
- (2) 排砂・通砂期間中に発生したSSピークは、宇奈月ダムにおける自然流下 (排砂)、洪水処理、洪水後の水位低下、洪水後の自然流下 (通砂) 及び下流支川からの洪水流入などの各インパクトに対応し、下流3地点のSMDPの計測結果の相互比較により、流下による遅れ時間やピーク値の大きさなどの特性を把握することができた。

(3) 水中型は河川の流速による動圧の影響が課題であるが、数千mg/l以上の高濃度領域では時間遅れも無く良好に計測可能であること、逆に水循環型では、高濃度となった場合に水中ポンプからの採水系統の安定的な稼働が課題であることが明らかとなった。

今後の課題を以下に示す。

- (1) 各地点の採水法とSMDPの計測結果から両者には良好な相関が確認された一方、SMDPは全体的に採水法より小さい値を示している。これは採水場所の相違による影響のほか、水循環型SMDPの場合、高濃度土砂がSMDPの採水ラインなどに沈降して、SMDPの計測結果がある程度小さくなる可能性がある。また、水中型SMDPは、採水ラインとポンプなどが不要であるため経済的であるが、流速の影響を受ける可能性があり、これをできるだけ小さくする工夫が必要である。
- (2) 排砂や洪水時の高濃度土砂による水循環型SMDPの欠測を防止するために、SS計測値によってポンプ自身の能力を自動でコントロールして採水ラインの閉塞を防止したり、複数設置しているポンプの交互運転間隔を短くしたりして、欠測時間を極力無くすなどの対策を行う必要がある。
- (3) ここで計測した結果は全て河川の流れの一点だけの値で、その断面全体のSSを代表しているとは言えない。従って、SSを計測し評価する際には、SMDP、採水法ともに、他の実測データや資料なども参考に行う必要がある。

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) 進藤裕之：黒部川におけるダム排砂，第3回世界水フォーラム，流域一貫の土砂管理セッション報告書，(財)ダム水資源地環境整備センター，pp. 153-163，2003.
- 4) 角 哲也：日本における貯水池土砂管理，第3回世界水フォーラム，流域一貫の土砂管理セッション報告書，(財)ダム水資源地環境整備センター，pp. 103-118，2003.

(2005. 4. 7 受付)