

# 水中型 SMDP による黒部川ダム連携排砂時の 高濃度 SS 計測と制御

角 哲也<sup>1</sup>・森田佐一郎<sup>2</sup>・小宮秀昭<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 正会員 博(工) 京都大学教授 防災研究所水資源環境研究センター (〒611 - 0011 宇治市五ヶ庄)  
E-mail: sumi.tetsuya.2s@kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup> 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)

<sup>3</sup> (株)SMD 技術研究所 (〒164 - 0012 東京都中野区本町 3 丁目 33-11)  
E-mail: saichirou\_morita@nifty.com

黒部川において、2001 年より出し平ダムと宇奈月ダムの連携排砂および通砂が実施されている。流砂系の総合土砂管理の観点からは、排砂時の貯水池内および下流河道の土砂の量と質のモニタリングは極めて重要となる。特に、SS 濃度は下流河川の魚類に対する影響などを評価する上でも重要な指標であり、実時間で計測し可能な限りダム操作に反映させることが重要である。本論文では、2015 年および 2016 年の排砂時の高濃度 SS の連続観測結果を紹介する。これらのデータは、高精度の差圧センサーを用いた水中型 SMDP (以下、水中型 SMDP) を用いて計測されたものである。計測データは、直接採水によるデータと良好に一致し、水位低下に伴って高濃度が発生する自然流下直前のゲート操作を実時間で管理するために有効に活用された。

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

## 1. はじめに

黒部川や天竜川などにおいて流砂系の総合土砂管理が本格化している。土砂管理のためには、河川中の掃流砂、浮遊砂およびウォッシュロード量の測定が必要であり、従来ウォッシュロード量の計測手段として濁度計測や人力採水による SS 濃度計測がおこなわれてきた<sup>1), 2)</sup>。しかしながら、採水による SS 濃度測定は連続測定ではなく結果が出るまでに時間と費用がかかるなど問題が多かった。

近年、Felix らは、水力発電所の水車の摩耗損傷を抑えるための取水濃度管理のために、振動チューブを用いた高濃度 SS の計測手法を開発している<sup>3)</sup>。一方、筆者らは、河川水の SS 濃度の変化は河川水の密度の変化と考え、連続して自動で SS 濃度を圧力変化としてとらえる機器 SMDP (Suspended Sediment Concentration Measuring System with Differential Pressure Transmitter) を開発し、これを黒部川下流域<sup>4-9)</sup> や天竜川流域の美和ダムなどに設置して実績を上げてきた。SMDP には、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 種類がある。

2015 年には、黒部川の宇奈月ダムにおいてダム下流に水中型 SMDP を設置 (図 1) して連携排砂の際の高濃度

SS をリアルタイムで測定することに成功した。2016 年は SMDP で測定した SS 濃度値をダムの排砂ゲート操作に使う試みがなされた。宇奈月ダムの連携排砂では SS 濃度を抑えながらできるだけ効率よく多くの浮遊砂の排出を行うことが求められる。このために SS 濃度のリアルタイム計測とそれに対応したゲート操作によるダム下流の SS 濃度の制御が重要になる。

本論文では、SMDP による計測の概要と、これを活用したダムからの排砂濃度の制御の試みについて報告を行い、今後の活用の可能性と課題を考察する。

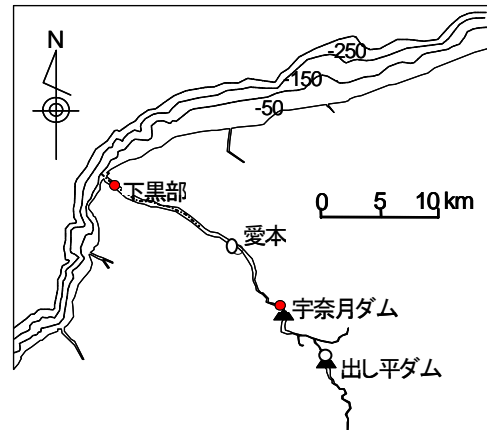


図-1 黒部川下流の SMDP による測定地点

## 2. 計測方法

### (1) SMDP の測定原理

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SSを連続計測するシステムである。

測定原理を以下に示す。流水中にSSが含まれる水と含まれない水では密度が異なる。そこで、流体中に鉛直間隔 $H$ を一定に保った2つの固定基準点を設け、これらの圧力( $P_H$ : 高压側,  $P_L$ : 低压側)を検出して密度測定を行う。

いま、平均密度を $\rho$ 、重力加速度を $g$ 、高压側、低压側検出口付近の流速をそれぞれ $V_H$ 、 $V_L$ とする。

ここで、Bernoulliの定理が成立すると仮定すれば、

$$\frac{P_H}{\rho g} + \frac{V_H^2}{2g} = \frac{P_L}{\rho g} + H + \frac{V_L^2}{2g} \quad (1)$$

であり、これより圧力差 $\Delta P$ は

$$\Delta P = P_H - P_L = \rho g H + \frac{\rho(V_L^2 - V_H^2)}{2} \quad (2)$$

となる。

いま  $V_H = V_L$  とすれば、

$$\Delta P = P_H - P_L = \rho g H \quad (3)$$

となり、 $g$ 、 $H$ が既知であることより、圧力差 $\Delta P$ を求めることにより、平均密度 $\rho$ およびSS濃度(SSC)を知ることができる。

しかし、一般には $V_H \neq V_L$ であり、 $\Delta P = \rho g H$ と断定すると、 $\rho(V_L^2 - V_H^2)/2$ が誤差項となる。そこで、精度を上げるためには、装置の設計上、 $V_H = V_L$ となるように工夫する必要がある。

次に、実際に求める圧力差を考えてみる。いま  $SSC=0$   $mg/l$ の水の密度を $\rho_0$  ( $kg/m^3$ )とすれば、 $SSC=0$   $mg/l$

(I) から  $SSC=10,000$   $mg/l$  (II) に変化した場合の圧力差の変化量は(3)式より、

$$\Delta P_I - \Delta P_{II} = ((\rho_0 + 10) - \rho_0) g H \quad (4)$$

となり、 $H=1,000$   $mm$  とすれば約  $10$   $mmH_2O$  の微圧力の変化を検出することが必要となる。これを高精度で検出するために、SMDPではシリコン振動式のセンサーを用いた高精度、高安定の差圧センサーを用いている。具体

的な配置構成は参考文献4), 5)を参照されたい。

### (2) 宇奈月ダム下流設置の水中型 SMDP

宇奈月ダム下流に設置した水中型 SMDP の外観を図2左に示す。直径  $500$   $mm$ 、高さ  $700$   $mm$  の円筒形の外筒の中に差圧計 (SS センサー) が中央部に設置されており、鉛直方向で  $500$   $mm$  の間隔で高压側と低压側の圧力差を封入液の入った細管で差圧計に伝える。設置場所は宇奈月ダム堤体から約  $500$   $m$  下流の黒部川と弥太蔵川合流部の直前の右岸側にコンクリートの突堤を設けて、放流水中の流木や砂礫の直撃を避けるために突堤の下流側面に懸架装置で SMDP 内蔵の収納籠を取り付けた (図2右)。

SMDP 本体中央部は、河床から  $1,500$   $mm$  の高さになるように設置した (図2中央)。SMDP の測定スパンは  $100,000$   $mg/l$  であり、例えば河川水の濃度が  $0$   $mg/l$  から  $100,000$   $mg/l$  に変化すると高压側圧力口と低压側圧力口の鉛直方向間隔  $H=500$   $mm$  から約  $50$   $mmH_2O$  の微小圧力変化が発生する。この圧力変化を  $4-20$   $mA$  DC 信号に変換して記録計に伝送する。記録計では  $20$  秒間隔でデータを保存する。またダムの管理所にテレメータで  $4-20$   $mA$  DC 信号を送り管理所の監視画面に  $10$  分間隔で測定値を表示する。

## 3. SS 濃度計測と制御結果

### (1) 連携排砂の経過<sup>10)</sup>

宇奈月ダムと出し平ダムの連携排砂は平成28年6月25日から27日にかけて行われた。宇奈月ダムではピーク流入量が6月25日5時30分に  $335.8$   $m^3/s$  となり6時40分からダムの水位低下を開始した。この時のダム水位は標高  $244.6$   $m$  である。さらに約8時間後の14時32分に排砂ゲートを開く操作を行った。この時ダム水位  $234.6$   $m$  である。その後、約6時間かけてダムの水位を標高  $220.4$   $m$  まで ( $14.2$   $m$ ) 低下させ、25日20時45分に自然流下を開始した。(図3に水文データを示す。)

自然流下開始の前後 (25日20時45分前後) では流入水が川のような流れでダムの底を流れ、この時に、湖底にたまった堆砂が流水で浸食される。

その結果、放流水中のSS濃度が最も高くなるため、この時期のSS濃度測定が環境影響の観点では重要になる。従来は宇奈月ダム下流の観測点で人力による濁度測定と採水によるSS濃度測定を1時間間隔で行い、サンプル採水によるSS濃度測定結果は採水後数日かけて分析結果を出していた。このために間接的に濁度を監視していたが、SS濃度測定をダム操作に直接使うことはできなかったが、今回SMDPを使いリアルタイムのSS濃度値を使ってダムのゲート操作を行った。

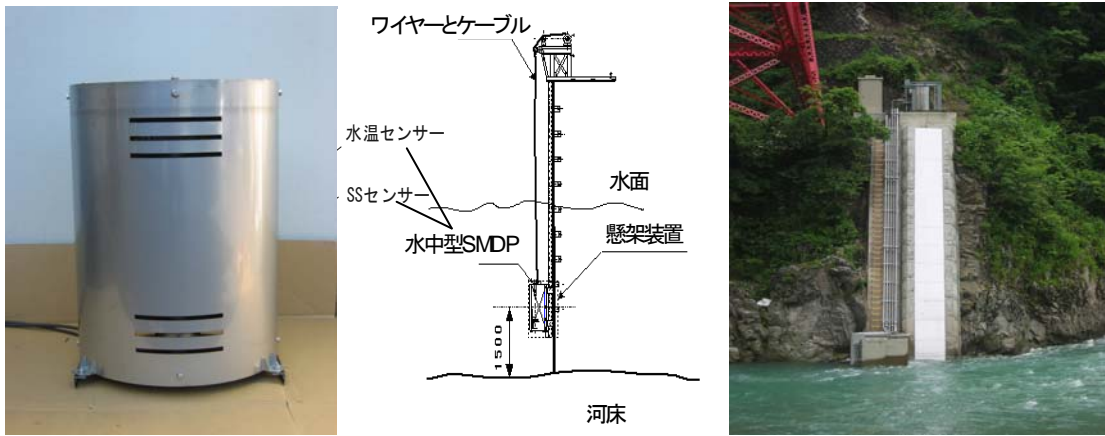


図-2 水中型SMDPと宇奈月ダム下流の設置状況

(左：SMDP 本体，中央：懸架装置と設置状況 右：設置場所 (宇奈月ダム堰堤より約500m 下流)

## (2) ゲート操作の手法

今回行ったダムゲートの操作手法は単にゲート開度を大きくして放流するのではなく、図4に示すようにダム下流のSS濃度に上限値の閾値を設け、SS濃度が徐々に上昇し上限値(30,000mg/l)に近くなるとゲートを閉めて、自然流下時の水流を緩めて(放流量を減らして)、河床の堆砂の浸食を抑制することで水中のSS濃度を低下させた。その結果、ダム下流のSS濃度は上昇が緩くなり、しばらくすると下降に転じる。SS濃度が減少して下限目標値(20,000mg/l)に近くなると再びゲートを開く方向に操作して(放流量を増やして)水流を強め、河床の堆砂がより削れるようにし、この結果、水中のSS濃度が上昇してくる。今回は、この操作を数回行い、目標値の中に収めながら水位を低下させて自然流下完了に移行させた。

2016年の連携排砂のダム下流SS濃度とダムの水位を時間経過で示したのが図5である。横軸が時刻で縦軸が宇奈月ダム下流のSS濃度とダムの貯水位である。今回の方法でゲート操作をしたことでSS濃度が約10,000mg/lから30,000mg/lの間で振れていることわかる。その結果SS濃度が一気に上昇することなく自然流下に移行することができた。なお、採水データとの比較を示すが、多少のずれはあるものの概ね傾向を捉えている。

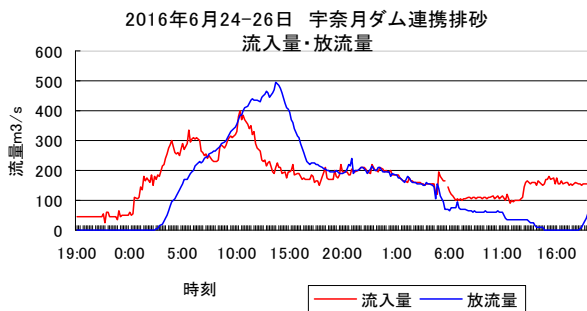


図-3 宇奈月ダム2016年連携排砂水文データ

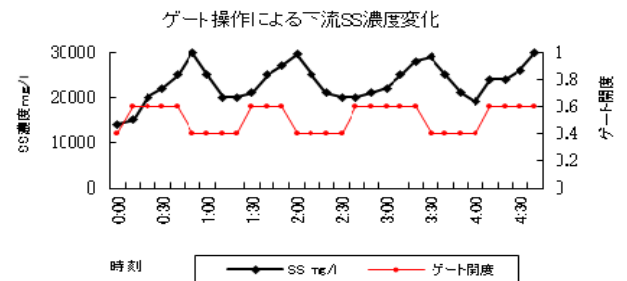


図-4 ゲート操作とSS濃度変化の例

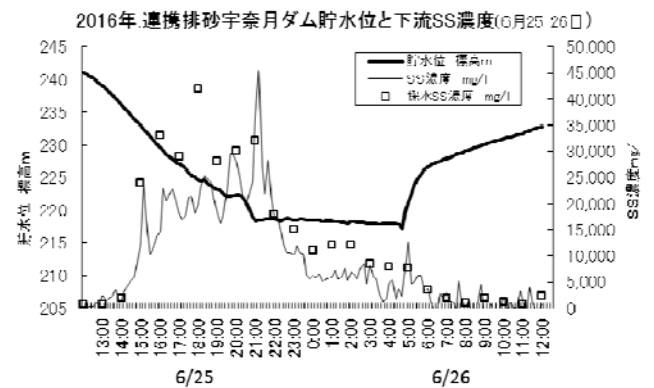


図-5 2016年連携排砂水位とSS濃度

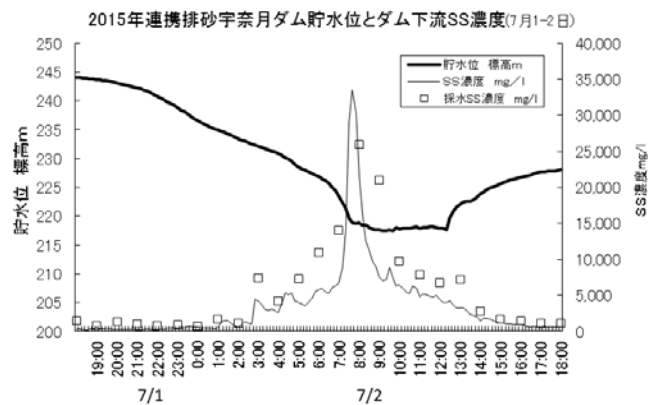


図-6 2015年連携排砂水位とSS濃度

一方、2015年の連携排砂時にはまだSS濃度測定値を監視してゲート操作を行うことはなく、排砂ゲートを開いてダム水位を下げて行き自然流下完了まで移行させた。図6に2015年の連携排砂時のダム下流のSS濃度とダム水位の変化の経過を示す。2015年と2016年の連携排砂の比較を行うと、2015年の排砂ではピークのSS濃度は直前の濃度から6倍くらいの濃度にまで急激に変化している。同様に採水データとの比較を示すが、2015年のデータも良好に傾向を捉えている。

2015年と2016年の連携排砂時のSS濃度をそれぞれのピーク値のタイミングで合わせて描くと図7のようになる。2016年の排砂では宇奈月ダム下流のSS濃度を見ながらゲート制御を行った結果、直前の濃度に比べてピークのSS濃度の上昇を約1.5倍に抑えることができたことと推定される。これにより、ダムのゲート操作でダム下流のSS濃度を制御する方法が有効であることがわかる。2016年の上流の出し平ダムの目標排砂量は29万m<sup>3</sup>と2015年の16万m<sup>3</sup>よりも大幅に上回っており、宇奈月ダムに堆積していた土砂量も同様に2016年の方が多かったとすれば、仮に2015年のような方法で水位低下していたとするとSS濃度は今回の数倍になっていたと思われる。

### (3) SSの排出量

SSの排出量の面からこの操作を検討する。宇奈月ダムに流入する浮遊砂量はその年の自然条件により変化する。流入した浮遊砂はできるだけダムにためずに流出させたい。流入した浮遊砂を排出する機会的主なものには連携排砂であるので、流入する浮遊砂量が多い年の場合連携排砂等で流出する浮遊砂量も多くなる。また当然SS濃度をコントロールしながら流出させて下流域への影響を少なくすることが求められる。

いま、ダムの放流浮遊砂量(kg/s) = SS濃度(g/l) × 放流量(m<sup>3</sup>/s) で求まるとする。

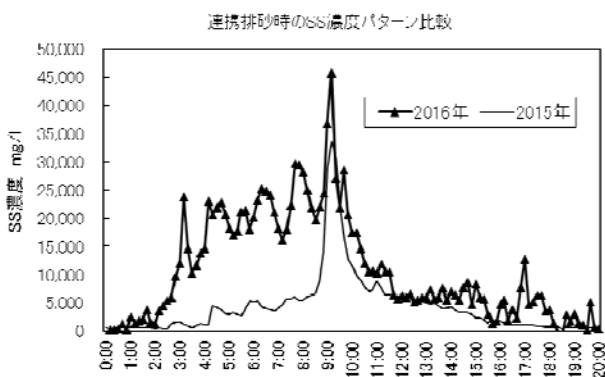


図-7 連携排砂時SS濃度波形比較

いま、SS濃度10g/lの水を毎秒100m<sup>3</sup>1時間継続して放流するとSS量は1000kg/s×3600s=3600tとなる。2016年の連携排砂時のSS量を求めたのが図8である。放流SS量が一時期に集中することなく平均化している。一方、2015年の連携排砂のSS量は図9のようになりSS濃度ピーク時刻にSS量がピークになる。2015年と2016年ではSS濃度のピーク値が異なるがSS濃度を監視しながらゲート操作を行った2016年のほうが、ピーク濃度を大きく上昇させずに、多くのSSを排出できたことが図8、図9の比較からわかる。

### (4) 下黒部橋のSS濃度とダム下流SS濃度比較

海にそそぐ直前の黒部川のSS濃度観測点が下黒部橋左岸の水質観測所にある。この地点は川の水深が浅いことから河川水を採水ポンプでくみ上げてSMDP水槽にためて水槽内に入れたSMDPセンサーでSS濃度を測定する水循環式SMDPが設置してある。図10が下黒部橋左岸の水循環式SMDPと観測局舎である。

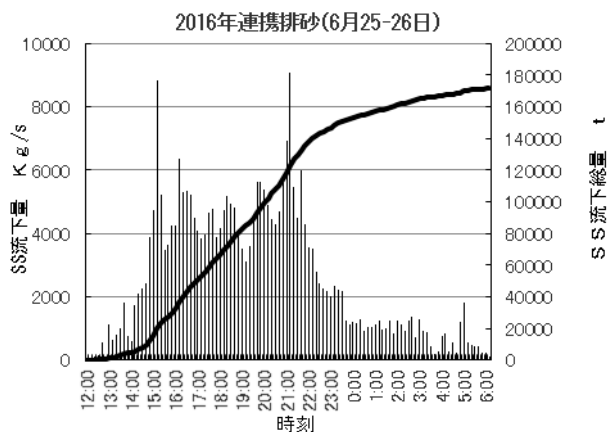


図-8 連携排砂時(2016年)のSS排出量の推定

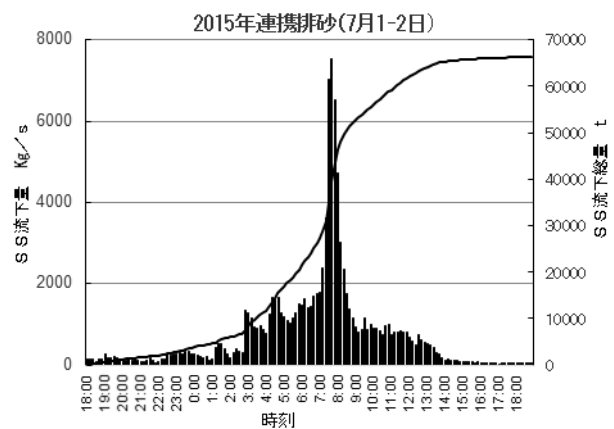


図-9 連携排砂時(2015年)のSS排出量の推定



図-10 下黒部橋設置水循環式SMDP と局舎

水循環式SMDPの特徴は水深の浅い所で水中形SMDPの設置が難しい所であり、またSS濃度が10,000mg/l前後の中濃度SS水の測定に適している。下黒部橋の水循環式SMDPのスパンは20,000mg/lとして下黒部橋でのSS濃度測定に対応している。宇奈月ダムから流出した浮遊砂はダム下流から下黒部橋の間(約20km)の河床に一部堆積しながら海にそそいでいるものと考えられる。両方の地点の濃度を比較したのが図11(2016年連携排砂)および図12(2015年連携排砂)である。

宇奈月ダムと下黒部橋のピークSS濃度を比較する。濃度の比を $\alpha$ とすると、2016年の連携排砂時は $\alpha=0.23$ であった。同様に2015年の連携排砂時の比は $\alpha=0.15$ である。ダムから出た浮遊砂は黒部川下流で沈降してSS濃度を減らしながら海岸にたどり着く。宇奈月ダム下流のSS濃度ピーク値が高いと下黒部橋のSS濃度ピーク値も高くなる。いずれにしても、下黒部橋のSS濃度ピーク値は宇奈月ダム下流の2割前後に低減している。宇奈月ダム下流と下黒部橋のSS濃度の差に相当する浮遊砂はダム下流から下黒部橋間の河床に堆積していると考えられ、排砂後の処置(清水によるフラッシュ放流)やその後の自然出水等を通じて徐々に下流に流下しているものと考えられる。

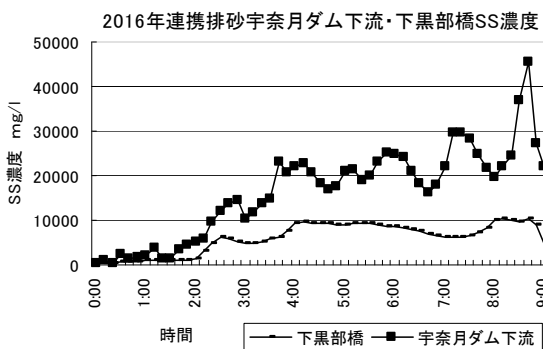


図-11 宇奈月ダム下流と下黒部橋のSS濃度(2016年)

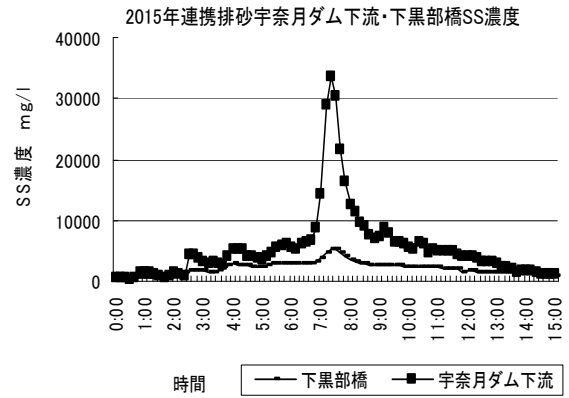


図-12 宇奈月ダム下流と下黒部橋のSS濃度(2015年)

今後、宇奈月ダム下流と下黒部橋における排砂時のSS濃度の関連がより明確になると、宇奈月ダム下流のSS濃度から下黒部橋のSS濃度の推測ができるようになるものと考えられる。今後はデータを積み重ねて、このような河道におけるSSの変化を解明していきたい。

#### 4. 今後の課題

- 宇奈月ダムの堆砂状況は毎年変化しており、自然流下前後の流れで浸食される砂礫の量、質は年ごとに異なっており、今後もゲート操作とダム下流SS濃度の変化傾向についてデータを積み重ね制御の向上を図る必要がある。
- 連携排砂の自然流下直前に行うゲート操作ではダム下流のSS濃度を監視してゲート開閉の度合いを調整する。現在はSS濃度の表示間隔を10分間隔にしているが、この間隔を短くして(例えば2分程度)ゲート操作の遅れを減らすことが必要である。
- 自然流下直前のゲート操作を自動化することで操作員の負担を減らすことができる。即ちダム下流のSS濃度測定値、SS濃度の上下限目標値からゲートをPID制御等の制御を行う。  
PID制御: ゲート開度(入力値)の制御を下流のSS濃度(出力値)と目標のSS濃度(目標値)の偏差、偏差の積分、偏差の微分の3要素を組み合わせるフィードバック制御方式
- 下黒部橋のSS濃度は海にそそぐ河川水のSS濃度として重要であるが、宇奈月ダム下流のSS濃度がどのくらい減衰するかはその年によって変動し、この変動要因の把握が重要である。

## 5. 結論

- a) 宇奈月ダム下流の水中形 SMDP により 2016 年の連携排砂時の高濃度 SS (ピーク値 45,000mg/l) を測定した。
- b) SMDP の測定値を監視しながら排砂ゲートの開度調整操作を行った結果、宇奈月ダム下流の SS 濃度を目標値に収めて放流することができた。さらに自然流下時のピークも小さくできた。
- c) ゲート操作で SS 濃度を制御することなく放流した場合に比べて、濃度上昇を抑えながら多くの SS を放流できるものと考えられる。今回行った自然流下前のゲート操作方法はダム下流の SS 濃度制御に有効である。
- d) 将来、排砂時の自然流下前後のゲート操作を自動化することで操作員の負担を減らし効果的に浮遊砂を排出できる。
- e) 宇奈月ダム下流の SS 濃度と下黒部橋の SS 濃度のピーク値を比較すると 2015 年、2016 年の連携排砂時の下黒部橋の SS 濃度は宇奈月ダム下流の 2 割前後に低減しており、河道内の低減や、その後の放流時の流出メカニズムの解明が重要である。

謝辞：本研究にあたり、国土交通省北陸地方整備局黒部河川事務所には SMDP の設置とその運用データ及びダム水文データ等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) Wren, D.G, Barkdoll, B.D., Kuhnle, R.A. and Derrow, R.W., Field techniques for suspended-sediment measurement, ASCE HY 126(2),

2000, pp.97-104.

- 2) C. Peteil, F. Fruchart et. Al., Sustainable management of sediment fluxes in reservoir by environmental friendly flushing: The case study of the Genissiat Dam on the upper Rhone River (France), *Advances in River Sediment Research – Fukuoka et al. (eds)*, © 2013 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-00062-9, pp.1147-1156.
- 3) D. Felix, I. Albayrak and R.M. Boes, Combining in-situ laser diffraction (LISST) and vibrating tube densimetry to measure low and high suspended sediment concentrations, *River Sedimentation, Wieprecht et al. (Eds)*, © 2017 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02945-3, pp.1264-1271.
- 4) 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.
- 5) 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*, Vol.46, pp.779-784, 2002.
- 6) 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.
- 7) 角 哲也・白音包力舉：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*, Vol.50, pp.913-918, 2006.
- 8) Sumi, T., Baiyinbaoligao and Morita, S. : Characteristics of Fine Sediment Discharge during Sediment Flushing of Unazuki dam, *JSCE, Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering*, Vol.25, No.1, pp. 99-106, 2007.
- 9) 角 哲也・森田佐一郎、小宮秀昭：水中型 SMDP を用いた黒部川ダム排砂時の高浮遊砂濃度連続計測, *水工学論文集*, Vol.54, pp.1111-1116, 2010.
- 10) 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>

(2016.9.30 受付)

## MEASUREMENT AND CONTROL OF HIGH SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION DURING KUROBE RIVER SEDIMENT FLUSHING WITH SUBMERSIBLE TYPE SMDP

Tetsuya SUMI, Saichiro MORITA and Hideaki KOMIYA

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 continuous measurement of high suspended sediment concentration during sediment flushing and sluicing operation of Unazuki dam in 2015 and 2016. These data have been obtained by submersible type of Suspended Sediment Concentration Measuring System with Differential Pressure Transmitter (hereinafter we call 'submersible type SMDP') which is designed to be placed underwater. Measured data have good correlation with manual sampling and effectively utilized to control gate operation by real-time basis during the most critical timing producing extreme high concentration just before free flow starts for sediment flushing.