

# 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

CONTINUOUS MEASUREMENT OF HIGH SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION  
DURING KUROBE RIVER SEDIMENT FLUSHING WITH SUBMERGIBLE TYPE SMDP

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

Tetsuya SUMI, Saichiro MORITA and Hideaki KOMIYA

<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)

<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)

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 from 2003 to 2009. These data have been obtained by submergible type of Suspended Sediment Concentration Measuring System with Differential Pressure Transmitter (hereinafter we call 'submergible type SMDP') which is designed to be placed underwater. Measured data have good correlation with manual sampling and show high concentration peaks up to 50,000mg/l which were not obtained by scattered hourly sampling data.

**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・通砂時には、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<sup>1-5)</sup>。

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。本研究では、黒部川宇奈月ダム下流の愛本地点 (図-1) に水中型 SMDP(submergible type SMDP)を設置して得られた 2003-2009 年のダム連携排砂・通砂時のモニタリングデータを用いてその計測特性を分析するとともに、今後の黒部川連携排砂・通砂時の浮遊土砂濃度のモニタリングに向けた課題について考察する。

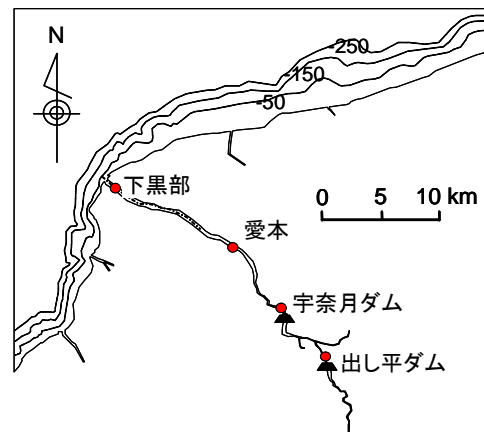


図-1 研究サイト (黒部川愛本地点)

## 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の浮遊砂濃度を連続計測するシステムである。

測定原理を以下に示す。流水中に浮遊砂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  $V_H$ 、 $V_L$  とすれば、

Bernoulli の定理より

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

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 濃度を知る事ができる。

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。本研究で用いる水中型 SMDP はこの点がポイントとなる。

次に、実際に求める圧力差を考えてみる。いま  $SS=0 \text{ mg/l}$  の水の密度を  $\rho_0 \text{ (kg/m}^3\text{)}$  とすれば、 $SS=0 \text{ mg/l}$  (I) から  $SS=10,000 \text{ mg/l}$  (II) に変化した場合の圧力差の変化量は(3)式より、

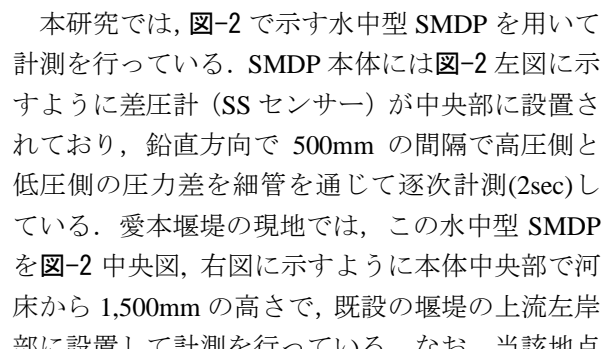
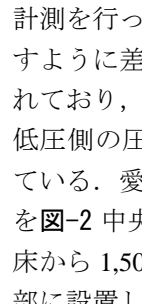
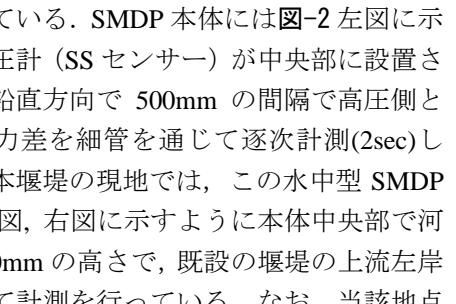
$$\Delta P_I - \Delta P_{II} = ((\rho_0 + 10) - \rho_0)gH \quad (4)$$

となり、 $H=1,000 \text{ mm}$  とすれば約  $10 \text{ mmH}_2\text{O}$  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。これは、シリコン半導体プロセス技術を応用してシリコンの単結晶ダイアフラムに2つの振動子を形成し、ダイアフラム上の真空室に設置したもので、ダイアフラムの上下面に圧力差が生じることによりシリコンダイアフラムが弾性変形して振動子に歪が発生し、共振周波数が変化する。この周波数変化を計測することにより圧力差を検出することができる。

### (2) 水中型 SMDP

SMDP には差圧センサーを含む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種類があり、計測環境に応じて使い分けことが求められる。筆者らは、これまで黒部川（宇奈月ダム、出し平ダム）や天竜川（美和ダム、小渋ダム）などにおいて現地計測実験を実施して計測システムの安定性や計測精度の検証を行ってきた。

その結果によれば、水循環型は配管や水循環用ポンプが必要であり施設が大掛かりとなること、ダム排砂時のように高濃度になると配管を安定して水を循環させることが困難となることなどが明らかとなった。一方、水中型は計測対象とする水中に差圧センサーを直接入れるため、配管や水循環用ポンプが不要で、これらに対する維持管理も必要ない。課題は、水中に本体を入れるために装置のコンパクト化を進めるとともに、流速が大きい場合に流れの乱れが差圧センサーに圧力変動として作用して誤差が大きくなる可能性があることなどである。

本研究では、で示す水中型 SMDP を用いて計測を行っている。SMDP 本体には左図に示すように差圧計 (SS センサー) が中央部に設置されており、鉛直方向で  $500\text{mm}$  の間隔で高压側と低压側の圧力差を細管を通じて逐次計測(2sec)している。愛本堰堤の現地では、この水中型 SMDP を中央図、右図に示すように本体中央部で河床から  $1,500\text{mm}$  の高さで、既設の堰堤の上流左岸部に設置して計測を行っている。なお、当該地点は主流が左岸に寄っており、土砂濃度に関して概ね代表性は確保されているものと推定される。

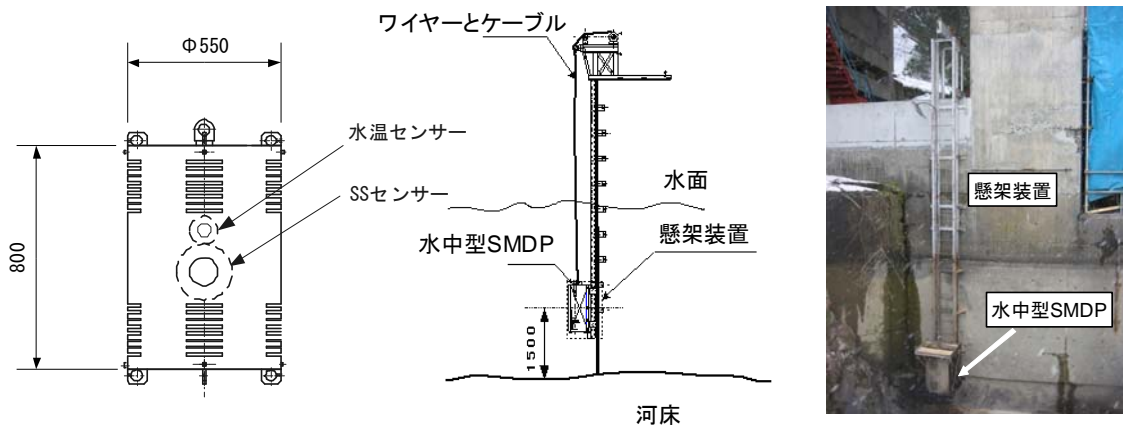


図-2 水中型 SMDP と愛本堰堤への設置状況

(左：SMDP 本体，中央：懸架装置と設置状況，右：設置状況 (愛本堰堤のゲート開放による排水時))

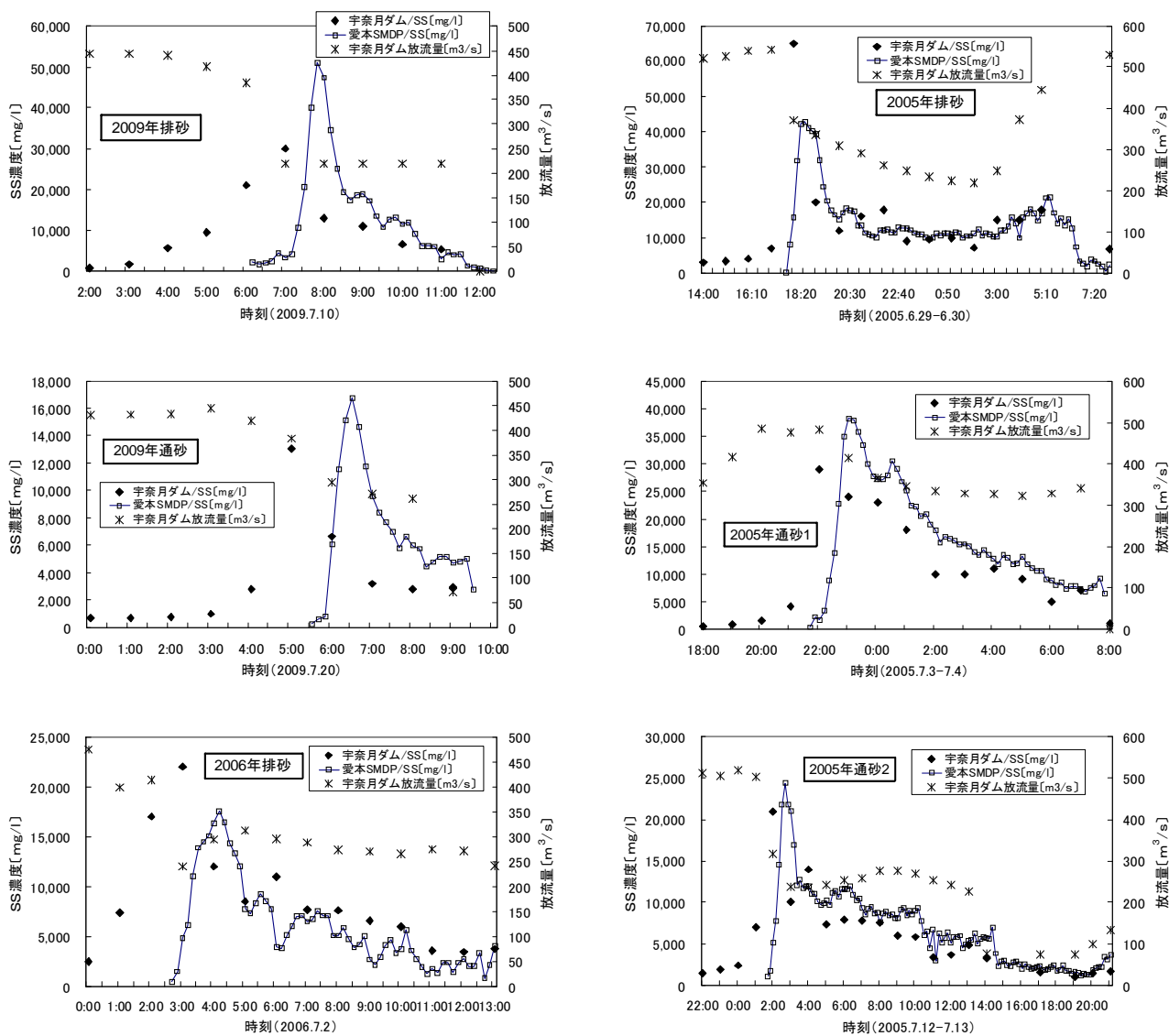


図-3 黒部川連携排砂・通砂時の水中型 SMDP による浮遊砂濃度連続計測結果

### 3. 計測結果

2003-2009 年度の連携排砂・通砂は、概ね各年の梅雨期（6 月後半から 7 月中旬）に実施されてきており、機器の調整中のために欠測となった 2008 年以外は水中型 SMDP を用いて愛本地点の高濃度の浮遊砂濃度を連続計測することができた。

図-3 に計測データのうちの代表例を示す。なお、図には宇奈月ダム直下で計測された 1 時間間隔の採水データから求められた SS 濃度(mg/l)および宇奈月ダム放流量を比較のために示している。

これまでの研究により、宇奈月ダムからの高濃度の浮遊砂濃度のピークは水位低下の完了直前に生起することが明らかとなっている。このタイミングは、図-3 の各年の連携排砂・通砂時の宇奈月ダムの放流量が減少するタイミング（すなわち、水位低下による上乘せ放流量が無くなって、ダムが流入量＝放流量に至った段階）にほぼ一致しており、宇奈月ダム直下の SS 濃度も同様である。

また、各年の 1 回目の土砂排出である排砂操作に比べて、2 回目以降の通砂操作においては SS 濃度のピーク値はそれぞれ低下しており、2009 年（排砂、通砂）および 2005 年（排砂、通砂 1・2）のデータでこれを確認することができる。その理由は、排砂時には前年秋～春にかけての中小洪水で流入・堆積した土砂が一度に排出されるのに対して、通砂時にはその後の新規の流入分のみが排出されるため、排砂によってダム湖内の土砂の交換が進んでいることを端的に示している。

なお、宇奈月ダム直下の SS 濃度に比べて、水中型 SMDP のデータは一定時間の遅れが常に生じている。これは、水中型 SMDP を設置した愛本地点は図-1 に示すように宇奈月ダムから約 7km 下流に位置し、その分濃度変化が遅れて到達しているものと考えられる。

そこで、図-3 に示した各年の連携排砂・通砂時の両者のデータについて、10 分ごとに時間遅れを考慮して計測データの相関分析を行った。結果を図-4 に示す。これによれば、排砂・通砂イベントごとに若干の差異はあるものの、概ね 80 分の遅れ時間を見込むことが妥当であると判断される。

そこで、80 分の遅れ時間を標準として、これを用いて 2009 年の連携排砂・通砂の水中型 SMDP 計測データをシフトさせて宇奈月ダム直下の SS 濃度計測データと比較したものを図-5 に示す。これにより、水中型 SMDP の計測値は宇奈月ダム直下のデータとほぼ一致し、特に、ピーク後の SS 濃度低下を良好に捉えていることがわかる。

水中型 SMDP では 2s ごとの計測データを 10

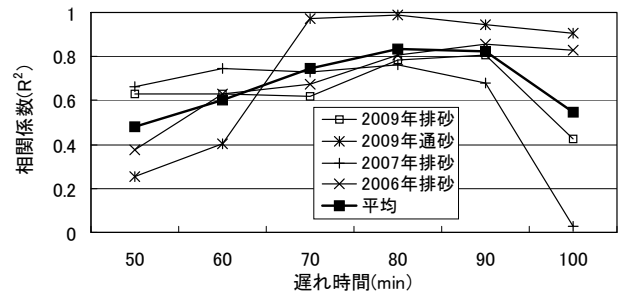


図-4 宇奈月ダム直下と愛本地点の遅れ時間と相関係数

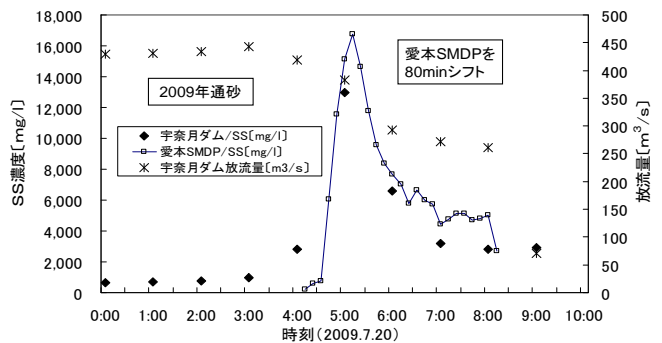
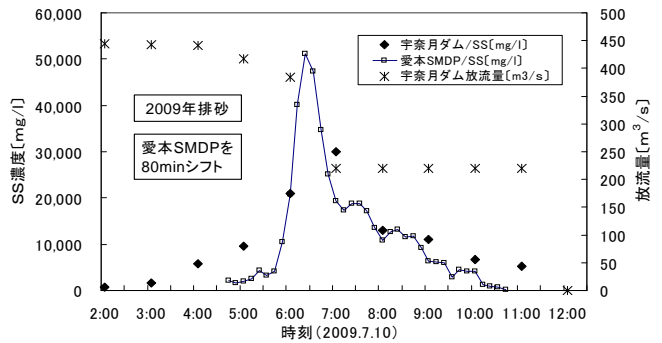


図-5 連携排砂・通砂時（2009 年）の水中型 SMDP（80min シフト）と宇奈月ダムの SS 濃度の比較

分間平均で記録しているのに対して、宇奈月ダム直下での SS 濃度は 1 時間ごとの採水（1 サンプル）で行っており、貯水位低下に伴う急激な濃度変化に追従できていない可能性がある。

特に、2009 年の排砂時においては、水中型 SMDP では最高 50,000mg/l 相当の濃度が計測されているのに対して、採水データでは 30,000mg/l に留まっており、実際には、7/10 の 6:30 頃に濃度のピークを迎えていた可能性が高い。

これまで、黒部川の連携排砂・通砂では 1 時間間隔の採水データを基本として種々の評価が行われている。採水は人力作業であり、排砂は夜間を含めて 24 時間対応であることから、実質的にこれ以上の頻度で行うことは非常に困難である。これに対して、水中型 SMDP を用いることにより連続データを取得し、このような急激な濃度変化をより確実に捉えることが可能と考えられる。

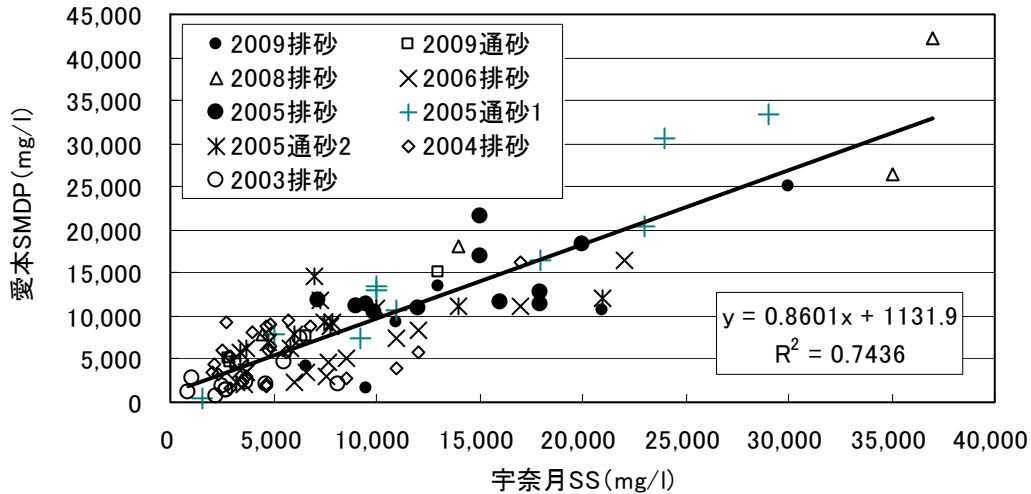


図-6 連携排砂・通砂時（2003-2009年）の水中型 SMDP（80min シフト）と宇奈月ダム SS 濃度の比較

#### 4. 考察

##### (1) 水中型 SMDP の計測精度

これまでの検討結果をもとに、水中型 SMDP のデータを 80 分シフトさせて各年のデータを宇奈月ダム直下の採水データと比較したものを図-6 に示す。ここで、水中型 SMDP は連続データであり、宇奈月ダム直下の採水時刻に対応するもののみを抽出している。

これより、年によって多少のばらつきはあるものの、愛本に設置した水中型 SMDP が宇奈月ダムから流下した高濃度の浮遊土砂濃度を良好に捉えていることが確認される。

##### (2) 宇奈月ダムからの浮遊土砂排出量の推定

水中型 SMDP は連続データであることから、これを用いて排砂効果のより詳細な検討を行うことができる。そこで、図-5 に示した 2009 年の連携排砂・通砂時の水中型 SMDP による宇奈月ダム地点の SS 濃度の推定値と宇奈月ダム放流量を用いて、単位時間あたりの SS 流下量 (kg/s) および SS 流下総量(t)を推定した。

図-7 に推定結果を示す。これによれば、ピーク時刻付近で、排砂時は通砂時の約 3 倍の単位時間あたりの SS 流下量、また、全体で約 2 倍の SS 流下総量であったと推定される。なお、通砂時には、自然流下が開始された後も宇奈月ダムへ上流河川から流入する流量が大きく（約 300m³/s）、また、新規にダムに流入する土砂量が大きく、その結果、ピーク後も 2～3 時間にわたって浮遊土砂の流出が続いていたことがうかがえる。

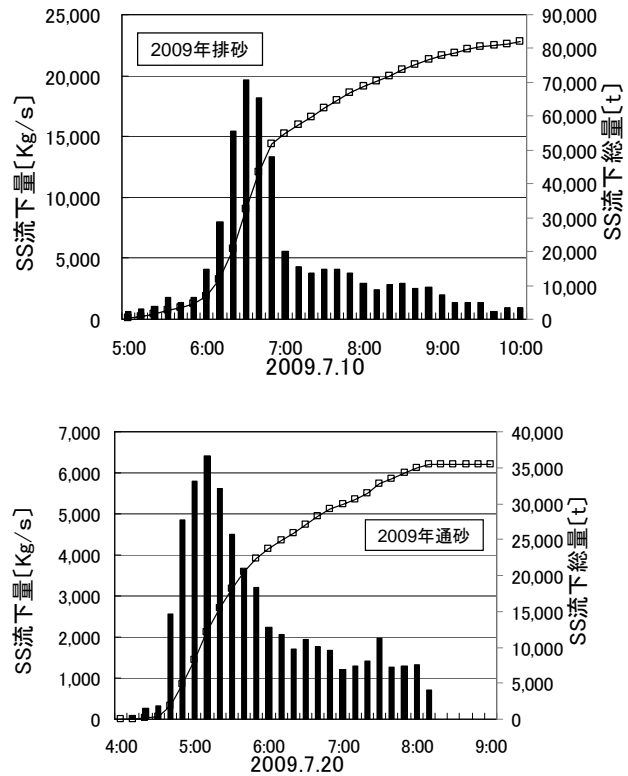


図-7 連携排砂・通砂時（2009年）の浮遊土砂排出量の推定

##### (3) 水中型 SMDP による観測の得失

ここでは、これまでに得られた計測実績をもとに、水中型 SMDP の得失と今後の課題について整理する。

###### a) システム構築

水中型 SMDP は、水循環型 SMDP に比べて採水設備が不要でシステム構築が容易である。また、採水設備（ポンプ、ポンプ制御盤、配管・バルブ等）の初期投資や保守費用も不要である。

## b) 設置環境

河川，ダム等の環境に直接センサー部を設置するので流速の影響を考慮する必要がある．流速 1 m/s 程度であれば測定スパンは広い（概ね 100～150,000mg/l）が，流速がこれを超える場合は 1,000mg/l 程度以上の高濃度計測が推奨される．

センサーを水中に入れるので，ある程度の水深が常時必要（最低 1.5m 程度）である．ただし水中から一時的にセンサーが出て再度水没すれば測定は継続可能である．また本体を固定するための懸架装置が設置可能な河岸構造物が必要である．

## c) メンテナンス

センサーが砂泥に埋まらない限り長期間メンテナンスフリーである（水循環型 SMDP では採水設備のメンテナンスが出水後必要）．

## d) センサーの体格

水中型 SMDP はセンサー単体で高さ 0.8m×外形 0.55m，重量 50kg 程度であるが，水循環型 SMDP はセンサーと水槽が一体になるために高さ 2m×外形 0.8m，重量が 200kg と大型となる．

## e) リアルタイム測定

水中型 SMDP は河川，ダム湖など測定流体に直接浸漬するために測定値は常にリアルタイムで得られる．これに対して水循環型 SMDP は，ポンプ配管を経由して測定流体を水槽内にためて測定するために，水の交換に要する遅れ時間が生じる．

## f) 今後の課題

水中型 SMDP の課題は以下のとおりである．

- ・小型軽量化：水中型 SMDP は水循環型 SMDP に比べて小型化し，システムも単純化したのが，設置・メンテナンスを容易にするためのさらなる小型軽量化が必要である．
- ・流れの整流化：河川の流れの激しいところでも流れの影響を受けずに低濃度領域も計れるように水中型 SMDP 周りに流れを整流する機構を開発することが必要である．

## 5. 結論

本研究の結論を以下に示す．

- 1) 2003-2009 年度の連携排砂・通砂を対象に，黒部川愛本堰堤に設置した水中型 SMDP を用いて，最大 50,000mg/l の浮遊土砂濃度の流下を安定して連続計測することができた．

- 2) 流下時間を考慮した上で，水中型 SMDP と宇奈月ダム地点における採水法による SS 濃度を比較した結果，良好な相関関係が得られるとともに，1 時間間隔の採水法では得られない高濃度ピークの発生を把握することができた．

- 3) 宇奈月ダム放流量と浮遊土砂濃度の連続観測により，排砂・通砂時の土砂排出量の時系列データがより詳細に把握することができた．

- 4) 水中型 SMDP は，水循環型 SMDP に比べて採水設備が不要で，コンパクトかつメンテナンスフリーのシステムであり利点が多い．一方，設置環境として，最低 1.5m 程度の水深と懸架装置が取り付けられる河岸構築物が必要であり，また，低濃度計測では圧力センサーに働く流れの乱れの影響が相対的に大きくなって誤差要因となるため流れの整流機構の開発が必要である．

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．

## 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，Vol.46，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) 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．
- 5) 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．
- 6) 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>

(2009. 9. 30 受付)