

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

DEVELOPMENT OF THE NEW SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION MEASURING
SYSTEM WITH DIFFERENTIAL PRESSURE TRANSMITTER IN RIVERS AND
RESERVOIRS

角 哲也¹・森田佐一郎²・越智隆志³・小宮秀昭³

Tetsuya SUMI and Saichiro MORITA, Takashi OCHI, Hideaki KOMIYA

¹正会員 工博 京都大学助教授 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)

³ (株)SMD 技術研究所技術顧問

It is important to know quantity of wash load for the integrated sediment management from upstream through downstream river basins. Generally, both continuous turbidity measuring and bottle sampling are used for suspended-sediment concentration measurement in rivers or reservoirs.

Here, we have developed a new suspended sediment concentration measuring system with differential pressure transmitter (hereafter, we call SMDP). The SMDP has advantages in long-term and high turbidity measurement because differential pressure transmitter is measuring density of water directly. A floating type and a water circulating type are available, and both of them have shown good performances through field experiments at the Miwa dam, the Tenryu river and the Kurobe river.

Key Words : suspended-sediment concentration, SS, differential pressure transmitter, SMDP,
Miwa dam, Kurobe river

1. はじめに

流砂系の総合的な土砂管理を実現するためには、主として洪水時に生産されて流下する土砂の動態を、河川の上下流域においてこれまで以上に正確に把握することが必要である。流砂系内に貯水ダムがあれば、この経年堆砂量により流域内から生産される土砂量の概略を推定することが可能であるが、一般にウォッシュロードと呼ばれる微細土砂はその大部分がダム地点を通過してしまうために、その全容を知ることは容易ではない。

これを把握する方法としては、濁度計による連続観測と採水分析を併用するのが一般的である。しかしながら、濁度計は光学的手法であることから長期安定性に課題があり、一方、採水分析は、手間がかかる上に、小流域では短時間で到達する洪水ピークを逃さずに採水を行うことが難しいのが現状である。

光学的手法による濁度測定は、近年の技術改良により長期安定性は向上しているものの、年間の土砂流入量の大半を占める大洪水時や、近年注目されるダム排砂時などに発生する極めて高濃度の浮遊砂濃度を測定することには限界がある。

本研究は、このような問題の解決を目的として、従来の光学的手法によらず、差圧センサーによって流体中の密度を直接測定することにより浮遊砂濃度を計測する手法を開発することを目的としている。この手法は、連続測定が可能のことと、差圧測定であるが故に高濃度の方がより測定が容易となることを特徴としている。

計測システムは、差圧センサーを本体とし、架台・電源部・データ収録部、また、必要に応じて通信部から構成される。この計測システムの基本性能を把握するために、試作機による室内実験および実際のダム貯水池を対象としたフィールド試験を行ってきた¹⁾。

次に、実際の河川やダム貯水池における計測条件を考慮すれば、洪水時における砂礫や流木などの流下による損傷を受けずに、いかに浮遊土砂を含む水を効率的・安定的に計測システムに導くかが課題となる。その対策として、ダム貯水池内を対象とする水中設置式と、一般河川を対象とする水循環式の2方式を考案し、それぞれ天竜川美和ダムおよび黒部川における実地試験を行っている。そこで、本報ではこれらの試験結果について報告する。

2. 計測手法

2. 1 測定対象

本研究で対象とするのは、粒径 0.1~0.2mm以下のウォッシュロードであり、河川水中はもとより、ダム貯水池内でもある程度の時間滞留して容易には沈降しない性質を有している。以下、浮遊砂とはこのウォッシュロードを意味するものとし、浮遊砂濃度は、通常、浮遊物質濃度 (SS:単位 mg/l) と表記されているので、以下、SSで統一する。

SS の測定には、高濃度では 100,000mg/l 以上、低濃度では 100mg/l 以下の計測レベルが要求されている。すなわち山地河川の大出水時やダム排砂時に発生する SS の最大値が数 1,000~100,000mg/l 以上^{3), 5)}といわれる一方、水力発電所の取水口や沈砂池で要求される検出 SS 濃度は 50mg/l 以下と低濃度であり、このような幅広い濃度レンジに適用可能な測定法の開発を行う必要がある。

2. 2 測定原理

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。液体の濃度測定手法には種々のものがある²⁾が、ここでは図 1 に示すように流体中に間隔 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 : 高圧側、 P_L : 低圧側) を検出して密度測定を行う。

いま、平均密度を ρ 、重力加速度を g 、高圧側、低圧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

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

であり、これより圧力差 ΔP は

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

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 ΔP を求めることにより、平均密度 ρ 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

伝送信号

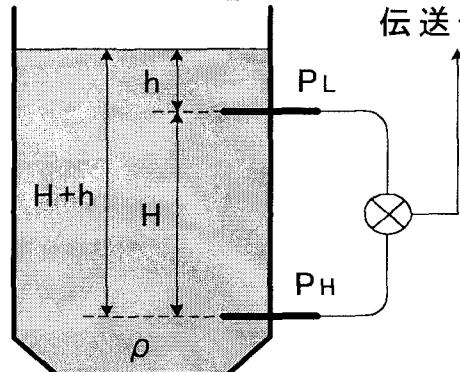


図-1 測定原理

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には、 V_H, V_L を同時に計測するか、装置の設計上、 $V_H = V_L$ となるように工夫するかのいずれかを選択する必要があるが、後者の方が現実的である。

次ぎに、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 $\rho_0(\text{g/cm}^3)$ 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、

$$\Delta P_{II} - \Delta P_I = ((\rho_0 + 0.01) - \rho_0)gH \quad (4)$$

となり、仮に H を 1,000mm とすれば約 10mmH₂O の微圧力の変化を検出することが必要となる。

このような微差圧を高精度で検出するために、本システムではシリコン振動式のセンサーを用いた差圧センサーを用いている。図 2 に示すのがシリコン振動式センサーであり、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ある。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。

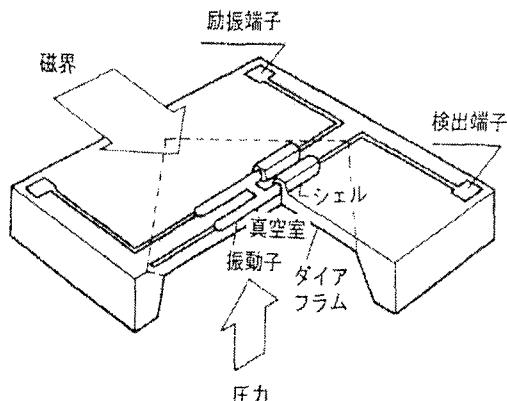


図-2 差圧センサー

2. 3 計測システム

図 3 に計測システムの模式図を示す。装置中心の円形のものが差圧センサー本体であり、 $H=1,000\text{mm}$ の間隔で上下に設置された 2 つの圧力検出口は細管で接続されている。当初の試作機においては、これら 2 つの圧力検出口には金属製のダイアフラムをつけた受圧部を設置し、差圧センサーまでの間の細管にはシリコンオイルを封じ込めていた。これは、高濃度を対象とする場合に土砂が細管内に進入することを防止するためであったが、1) 計測対象の水温が変化した場合に、封じ込めたシリコンオイルとの温度差が生じて不必要な差圧が発生してしまうこと、2) 細管内部への土砂の流入は現実にはほとんど考えられないこと、から、その後はダイアフラムを設置せずに、細管のみで中には水をそのまま注入する構造に改良した。

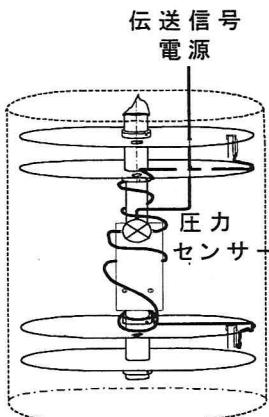


図-3 計測システム模式図

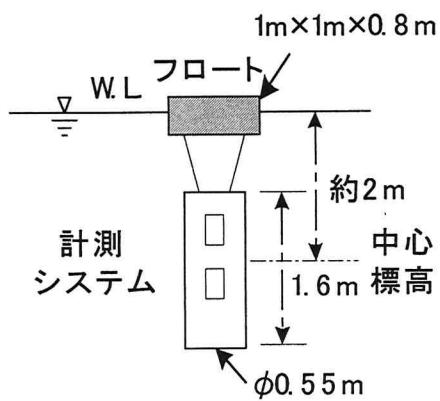


図-4 水中設置式模式図

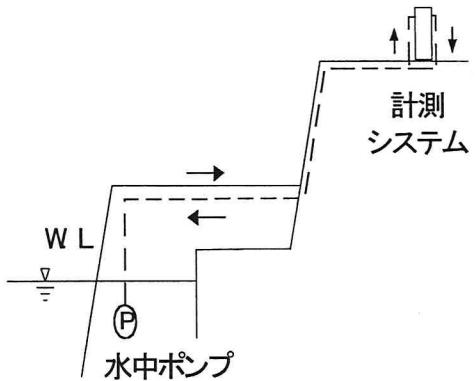


図-6 水循環式模式図

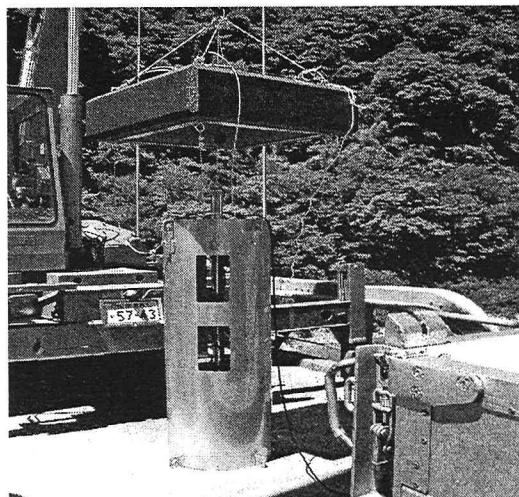


図-5 水中設置式システム全景

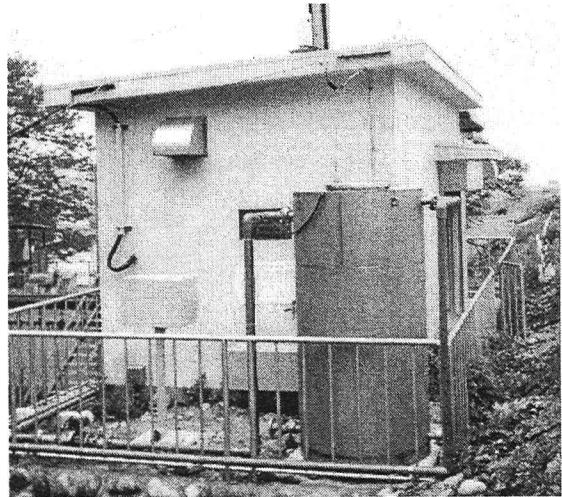


図-7 水循環式システム全景

次に、計測システムに測定対象となる微細土砂を含む水をいかに導くかが重要である。最も単純なのは、計測システムごと測定対象となる水中に入れてしまうことであり、これを以下、水中設置式と呼ぶ。

この方式は、図4に示すように上部に設置したフロートに計測システム全体を吊り下げる構造であり、構造および維持管理が簡単であることが長所である。一方、短所としては、計測中は計測システム本体が常時水中に入っている必要があるため、少なくとも常時2.5~3.0m程度以上の水深が確保される必要があることや、本体が流水中にさらされることから、高圧側、低圧側検出口付近の流速に偏りが生じた場合に誤差を生む可能性があること、また、砂礫や流木の衝突による損傷の危険性があることがあげられる。ただし、これらはシステム全体を円筒形のシェルで包み込むことで解決することができた¹⁾。

この水中設置式は、ダム貯水池のように一定以上の水深が常時確保されている場合に最適であり、次項で述べる天竜川美和ダム貯水池におけるフィールド試験もこの方式で行っている。図5は、計測システムの全景を示し、上部がフロート、また、下部に吊り下げられたものが外殻となるシェル構造のシリンダーを示し、内部に計測システム本体が格納されている。

一方、一般河川のように、洪水時から通常時まで大きく水深が変化する場合には、水中設置式の採用は困難となる。そこで、図6に示すように、計測システム本体を陸上に設置し、河川内に設置した水中ポンプから水を導水する方式を新たに開発した。導水された水は、計測システム本体を入れた円筒形（水中設置式のシリンダーよりも一回り大きい）の水槽に入り、オーバーフローにより排水管に導かれて再び河川に戻される循環構造となっており、以下、水循環式と呼ぶ。

本形式の長所としては、計測システム本体が水中にないことから、水中設置式に比べて洪水時の安全性が高く、また、採水のために最低限の水深が確保される場所であれば、どこでも設置可能なことがあげられる。一方、連続計測を行うためにはポンプの常時運転と水量管理が必要であり、また、水槽内に導水された土砂の一部が帰還せずに水槽内に沈降堆積する可能性があり、その処理が必要となることが課題として考えられた。これらは、水量計測用の電磁流量計を導水管の途中に配置することと、水槽底部に排砂用のバルブを設置して定期的に堆積土砂を排出することによりそれぞれ解決した。

この水循環式は、黒部川愛本地点においてフィールド試験を行っており、図7に計測システムの全景を示す。

3. 水中設置式によるフィールド試験 (美和ダム)

3. 1 試験概要

水中設置式による計測システムを用いて、洪水時にダムや河川に流入する浮遊砂濃度を実際に測定することを計画した。調査対象としたのは、天竜川上流の国土交通省中部地方整備局の美和ダム貯水池である。同ダムは、経年堆砂の進行を抜本的に改善するために、排砂バイパストンネルの建設が再開発事業として進められており、特に、洪水時に貯水池に流入する土砂に占める浮遊砂の割合が大きいことで知られている。

計測システムの設置地点は、装置本体を水没させるのに十分な水深を常時確保可能であることと、フロートを係留する施設があることを条件に、図8に示す貯水池中流部の神田橋付近を選定した。この地点は、図に示すように貯水池内の堆砂肩より上流であり、洪水時に水深5~6m程度が確保される場所である。

計測装置には、橋上から電源、信号線をキャプタイヤケーブルにより引き込んでおり、陸上には24V電源、記録計を設置してデータを収集している。先述の図5は測定装置を組上げてダム湖面に下すところを示している。

3. 2 計測結果

本システムの計測は、平成12年8月から開始しており、東海豪雨と同じ9月12日に最大流入量 $150\text{m}^3/\text{s}$ の出水が発生し、計測地点で最高 $1,000\text{mg/l}$ 程度のSS濃度を捉えることができた¹⁾。なお、この計測においては、洪水流入とともにSS濃度が上昇したことが確認されたが、出水前後のSS濃度が不安定に変動しており、計測安定性を向上させるために、計測システムの改良を行うことが必要と判断された。

この変動の原因としては、先述のように、この時点では、土砂の影響を考慮して差圧センサーに圧力を伝える受圧面にダイアフラムを用い、細管にシリコンオイルを内封していたことが挙げられる。そこで、受圧面にダイアフラムを用いない構造に変更し、水温変化による影響を生じないように改良した。

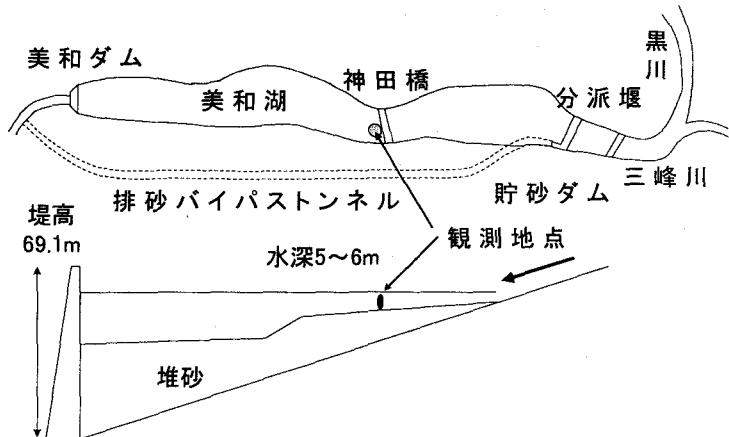


図-8 水中設置式(美和ダム) フィールド試験地

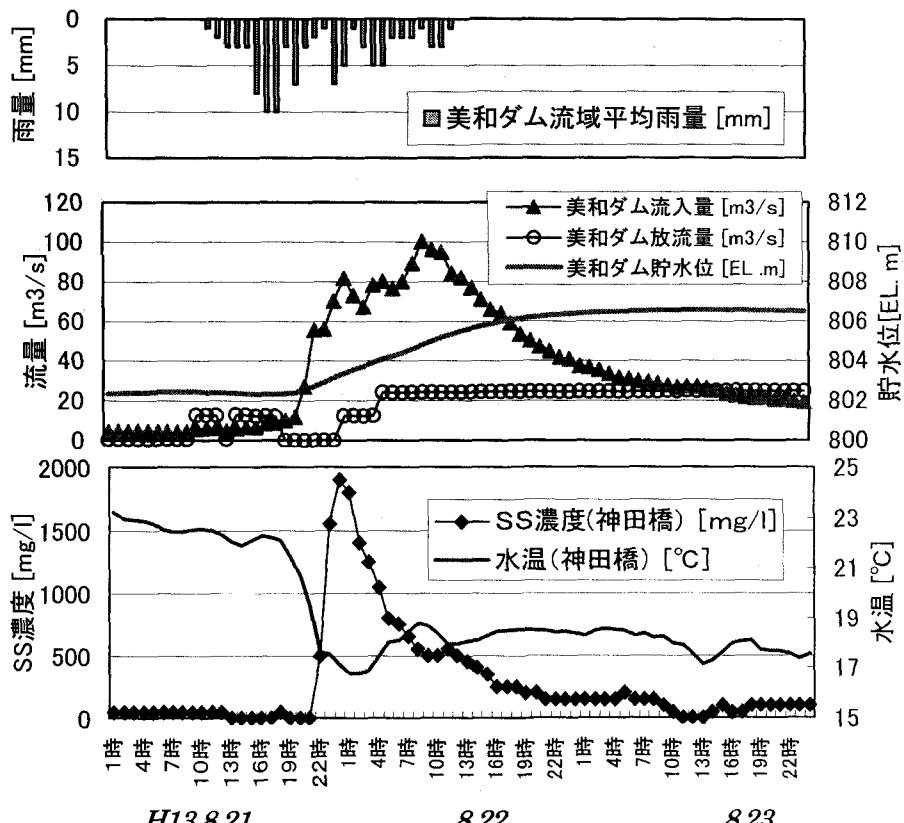


図-9 水中設置式フィールド試験結果(美和ダム; H13台風11号)

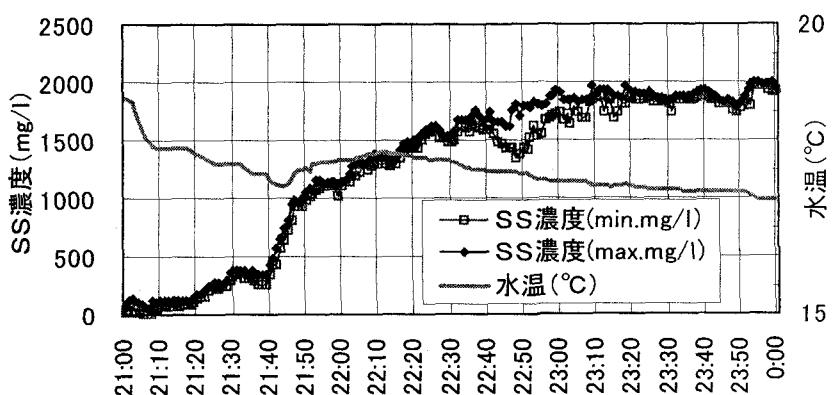


図-10 水中設置式(美和ダム H13台風11号) 洪水時1分データ

その後、非洪水期には目立った出水はなく、SS濃度の上昇も見られなかったが、平成13年8月21～22日の台風11号に伴う出水が発生し、図9に示すデータを取得することができた。計測は1秒間隔で行っており、60個平均で1分データを算出し、さらにその60個平均で1時間データにしたもの図9ではプロットしている。

この出水は最大流入量100m³/sであり、図に示すように出水前に50mg/l程度であったSS濃度が21日21時からの3時間で1,900mg/lまで急激に上昇し、ほぼ24時間で出水前に近い値まで低下した様子が捉えられている。また、SS濃度ピーク時にはこれまでの知見⁴⁾と同様に流入水温も21°Cから17°Cまで低下した。なお、平成12年の時のように出水前後のSS濃度計測値の不安定性は見られず、今回の計測システムの改良が極めて効果的であったことが確認された。

次に、図9における洪水立ち上がりの部分における1分間ごとの1秒データの最大値と最小値をプロットしたものを図10に示す。これによれば、21:40～21:50の10分間にSS濃度が急激に上昇したことが確認され、この間に貯水池上流から流入した高濃度の水塊が計測地点を極めて短時間に通過したことが明らかとなった。従来、このような短時間におけるSS濃度の経時変化を安定的に捉えることは困難であったが、本計測システムによる重要な効果の一つとして特筆される。

また、その後の9月10～11日の台風15号においても、図11に示すようにSS濃度が計測された。今回の洪水は最大流入量が300m³/sを超える規模であり、SS濃度も最高3,700mg/lに達した。また、これを1分データで示したもののが図12であり、これによれば、図11に示す1時間平均の最高3,700mg/l(12時)を大きく上回る4,600mg/l程度の高濃度が瞬間的には発生していたことがわかる。

また、図10と同様に1分間ごとの1秒データの最大値と最小値を図12に示しているが、SS濃度ピークの12時前後から遅れた18～19時頃にこれらの変動が大きくなっている。この理由としては、まず、流入量の増加および洪水吐きゲートからの放流の開始による影響が考えられるが、上流から流入する流れとダム堤体から折り返して来た流れが貯水池内の中流部(神田橋付近)において衝突して大きな乱れが生じ、上下センサー間で流速差が生じた可能性も考えられ、貯水池内の流動形態に関する今後の検討が必要である。

以上により、水中設置式によるSS濃度計測手法は、洪水時に貯水池に流入する高濃度の流水のモニタリング

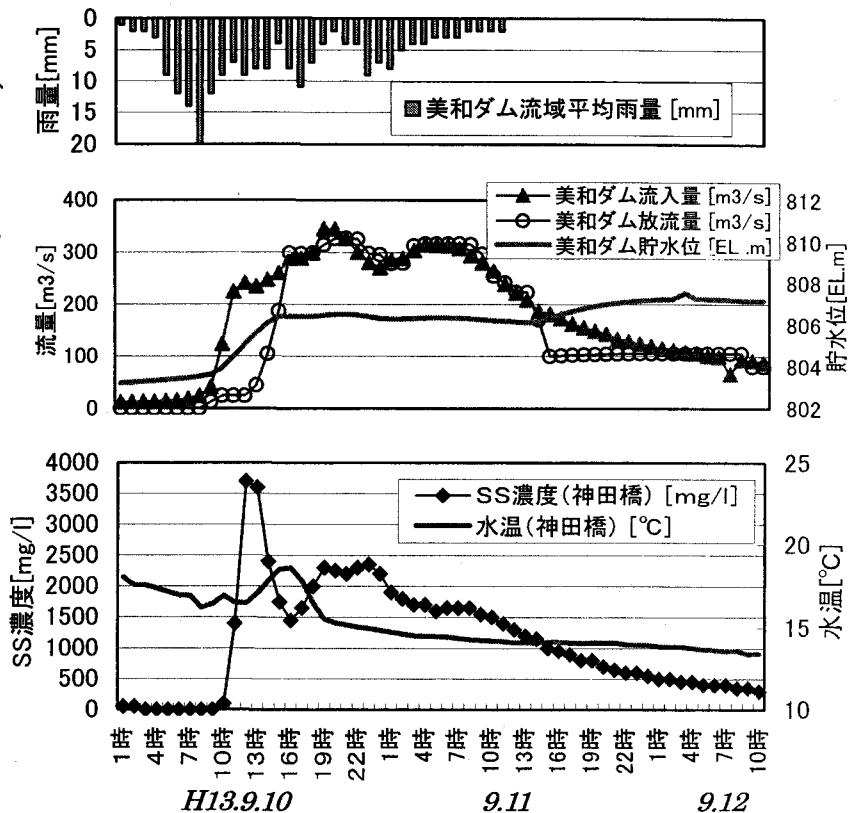


図-11 水中設置式フィールド試験結果(美和ダム; H13 台風15号)

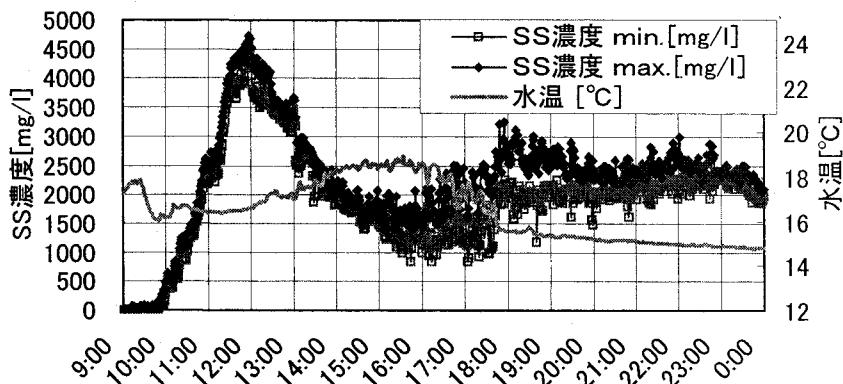


図-12 水中設置式(美和ダム H13 台風15号)洪水時1分データ

に効率的に利用できることが明らかとなった。

4. 水循環式によるフィールド試験(黒部川)

4. 1 試験概要

水中設置式に加えて、水循環式による計測システムのフィールド試験を計画した。調査対象としたのは黒部川であり、そのねらいは、国土交通省宇奈月ダムと関西電力株式会社で実施される連携排砂時の下流河川におけるSS濃度測定を行うことである。ダム排砂時には、下流河川におけるSSやDOの濃度とその継続時間をモニタリングすることが河川環境に与える影響を評価する上

で重要であり、特に高濃度の SS 濃度を連続計測することが課題となっている^{5,6)}。

本形式は特に設置地点の制約はないが、河川から取水するための水中ポンプを設置可能な場所を選定する必要がある。今回の試験においては、愛本堰堤下流の流路工末端部において国土交通省黒部工事事務所が水質観測用の取水管を設置しており、これを活用して導水する構造とした。河川からの導水構造及び計測システムの概観は先述の図 6, 7 のとおりである。

4. 2 計測結果

本システムの計測は平成 13 年 6 月から開始しており、開始直後の 6 月 19~22 日に宇奈月ダム・出し平ダムの初めての連携排砂が実施され、図 13 に示すように SS 濃度で最高 900mg/l の高濁度の流水が計測地点を通過する状況を捉えることができた。図には、同時に計測された宇奈月ダム直下の濁度と愛本堰堤上流部における SS 濃度の変化を示しているが、SS、濁度の計測値は、いずれも宇奈月ダムのフリーフロー開始直後の 6 月 21 日午前 8 時に最大値を示しており、その波形はほぼ一致している。一方、SS 濃度の計測値については、本計測システムと愛本堰堤上流部では、ピーク時を含めて約 2 倍の乖離がある。この原因としては、水中ポンプの設置位置により SS 濃度の高い河川の主流が導水されなかったことや、微細土砂の粒度分布の影響などが考えられるが現段階では明確ではなく今後の課題である。また、黒部川においては、初めての連携排砂に引き続いて、7 月 1~2 日に連携通砂（排砂後の洪水により流入する土砂を堆積させることなくダムを通過させる操作）が行われ、この際にも最高 1200mg/l の SS 濃度を計測することができた。

今回のフィールド試験により、水循環式による SS 濃度計測手法が、河川を流下する高濃度の流水のモニタリングに有効に利用できることが明らかとなった。

5. おわりに

差圧センサーを用いて浮遊砂濃度を連続測定するシステムを開発し、測定環境に応じた水中設置式および水循環式についてフィールド試験を行い、その適用性について検証を行った。得られた結果は以下のとおりである。

(1) 天竜川美和ダムにおける水中設置式のフィールド試験により、洪水時に貯水池に流入する高濃度の流水の通過を捉えることができ、本システムが SS 濃度のモニタリングに有効に利用できることが明らかとなった。

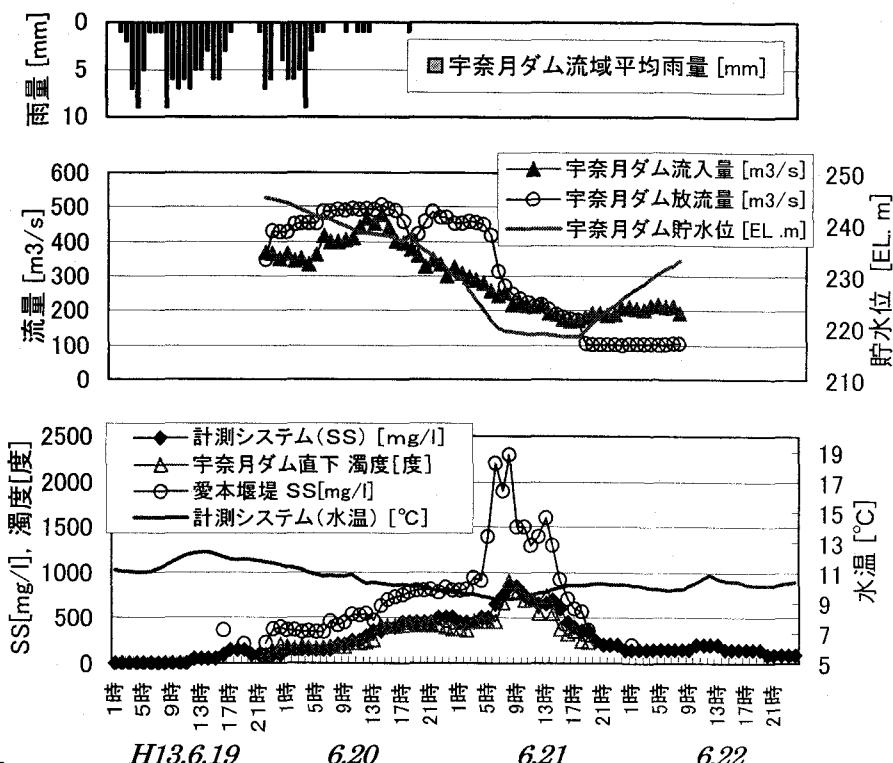


図 13 水循環式フィールド試験結果（黒部川）

(2) 黒部川のダム連携排砂における水循環式のフィールド試験により、排砂時に下流河川を流下した高濃度の流水の通過を捉えることができた。この水循環式では、常時水深を確保することができない任意の一般河川においても SS 濃度のモニタリングが可能であることが明らかとなった。

謝辞：本研究を進めるにあたり文部科学省科学研究費・基盤研究（一般 C）（代表：角哲也）の補助を受けた。また、国土交通省天竜川ダム統合管理事務所・三峰川総合開発工事事務所・黒部工事事務所には、フィールド試験の実施にあたり多大な協力を得た。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), 4-12, 2001
 - 2) Field techniques for suspended sediment measurement : Wren,D.G., Barkdoll,B.D., Kuhnle,R.A., and Derrow,R.W., ASCE HY 126 (2), 97-104, 2000
 - 3) 角 哲也・塙原千明：ダム流域におけるウォッシュロード量の評価、河川技術に関する論文集 5, 172-175, 1999
 - 4) 塙原千明・角 哲也・柏井条介：カーテンウォール付常用洪水吐きの土砂放流特性、土木技術資料, 40 (11), 56-61, 1999
 - 5) 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 127, 30-38, 1999
 - 6) 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・ワークショップ論文集, 117-126, 2000
- (2001. 10. 1受付)