

流水中の微細土砂濃度計測に関する研究

課題番号 12650512

平成 12 年度～平成 14 年度科学研究費補助金
(基盤研究 (C) (2)) 研究成果報告書

平成 15 年 5 月

研究代表者 角 哲也

(京都大学大学院工学研究科 助教授)

流水中の微細土砂濃度計測に関する研究

課題番号 12650512

平成 12 年度～平成 14 年度科学研究費補助金
(基盤研究 (C) (2)) 研究成果報告書

平成 15 年 5 月

研究代表者 角 哲也

(京都大学大学院工学研究科 助教授)

目次

1	本研究の目的	1
2	研究組織	2
3	研究経費	2
4	研究発表	2
5	研究成果の概要	3
1)	試験状況写真	9
2)	フィールド試験データ	15
6	研究成果収録	25
6.1	学会誌等に発表されたもの	25
1)	差圧測定による浮遊砂濃度計測システムの開発	27
2)	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	35
3)	三峰川流域における土砂の生産と流出に関する観測	41
4)	Development of the suspended-sediment concentration measuring system with differential pressure transmitter in rivers and reservoirs	47
6.2	口頭発表されたもの	57
1)	差圧測定による浮遊砂濃度計測に関する研究	57
2)	ダム貯水池における微細土砂の流動とその制御方策に関する基礎的研究	59
3)	ダム貯水池における微細土砂の流動とその制御方策に関する基礎的研究	61
4)	流砂系における貯水池土砂管理の課題	63
7	参考資料	77
1)	日本における貯水池土砂管理への取り組み	79
	角 哲也: 第3回世界水フォーラム, 流域一貫の土砂管理 (貯水池土砂管理に向けた挑戦) 分科会論文集, 滋賀, 2003	
2)	浮遊砂濃度測定装置(SMDP) General Specifications	93
	(株)SMD 技術研究所	

1 本研究の目的

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、高精度の差圧伝送器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実施したものである。この計測法は、近年急激に発展した高精度の差圧伝送器を用いており、連続測定が可能なことと、計測対象の流体の密度が大きくなる、すなわち高濃度となるほど、計測断面間隔を小さくできることから、光学式とは逆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。

初めに、この差圧伝送器を用いた高濃度の浮遊土砂濃度（SS）の直接測定法（Suspended Sediment Concentration Measuring System with Differential Pressure Transmitter（以降 SMDP と呼ぶ））を確立するために、計測システムの試作機を製作した。計測システムは、差圧伝送器を本体とし、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た。

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た。

さらに、本システムの特徴である高濃度の浮遊砂濃度の計測として、美和ダムの堆積土砂を用いた実地試験（美和ダム堆砂排除補助システム実証試験フィールドを利用）を行った。

本報告書は、これら一連の研究成果についてとりまとめたものである。

2 研究組織

研究代表者 角 哲也

京都大学・工学研究科・助教授

3 研究経費

平成 12 年度	2,100 千円
平成 13 年度	1,000 千円
平成 14 年度	1,000 千円
計	4,100 千円

4 研究発表

4.1 学会誌等に発表されたもの

- 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, Vol.11, No3, pp.211-218, 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) 中川 一, 角 哲也, 三好岩生, 高濱淳一郎, 里深好文, 横森源治: 三峰川流域における土砂の生産と流出に関する観測, 河川技術論文集, 第8巻, pp. 91-96, 2002
- 4) T. Sumi, S. Morita, T. Ochi and H. Komiya: Development of the suspended-sediment concentration measuring system with differential pressure transmitter in rivers and reservoirs, Hydraulic Measurement and Experimental Methods Conference, EWRI-ASCE and IAHR, Estes Park, Colorado, July 29-31 2002

4.2 口頭発表されたもの

- 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に関する研究, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集, II-097, 2001
- 2) 今城 貴弘・角 哲也: ダム貯水池における微細土砂の流動とその制御方策に関する基礎的研究, 平成 14 年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, II-38, 2002
- 3) 今城 貴弘・角 哲也: ダム貯水池における微細土砂の流動とその制御方策に関する基礎的研究, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, II-141, 2002
- 4) 角 哲也: 流砂系における貯水池土砂管理の課題, 第 8 回ダム工学会講習会講演集, ダム工学会, 2003

5 研究成果の概要

本研究で対象とするのは水中の浮遊土砂濃度(SS)の直接測定であり、流体密度を高精度の差圧伝送器を用いて自動計測するものである。この計測法は、近年急激に発展した高精度の差圧伝送器を用いていることに特徴があり、計測断面間隔および差圧伝送器の測定レンジを変化させることにより任意の浮遊土砂濃度(SS)レベル(例えば 10~2000, 30~50,000mg/l など)を設定することができる。また、計測対象の流体の密度が大きくなる、すなわち高濃度となるほど、計測断面間隔を小さくできることから、光学式とは逆に低濃度よりもむしろ高濃度に適した計測法と考えられる。

この差圧伝送器を用いた高濃度の浮遊土砂濃度(SS)の直接測定法(Suspended Sediment Concentration Measuring System with Differential Pressure Transmitter (以降 SMDP と呼ぶ))を確立するために、計測システムの試作機を製作し、ダム貯水池および一般河川においてフィールド実験を実施した。また、計測システムの仕様として、ダム貯水池のような水深が十分得られる場所に対する水中設置式 SMDP と一般河川のように水深が大きく変化する場所に対する水循環式 SMDP を開発した。

測定原理は、一定間隔Hで設定された2つの圧力検出口間における水の密度変化を高精度の圧力差検出器により計測することにより SS 測定を行うものであり、連続測定が可能で、差圧計測による流体密度の直接測定により、高濃度計測可能であることを特徴としている。

①室内試験(平成 12 年度)

まず始めに、室内試験による計測性能評価を行った。カオリン粘土を用いて人工的に作成した基準SS濃度に対する差圧計出力の計測を行い線形関係が確認された。

②美和ダム貯水池における水中設置式 SMDP フィールド試験(平成 12~14 年度)

次に、実際の貯水池(天竜川水系美和ダム)を対象に連続観測によるフィールド試験を実施し、現地における実際の流れ・濁質分・温度の変化などに対する計測安定性を調査した。ここで採用したのは、差圧計による計測システム本体を直接計測流体中に設置する水中設置式 SMDP であり、貯水池のような常時十分な水深が得られる場所において有効な方法である。

平成 13 年 8 月及び 9 月及び平成 14 年 7 月及び 10 月に発生した台風に伴う洪水流入時には、美和ダム貯水池内の観測地点において、SS 濃度の変化を捉えることができた。特に、平成 13 年 9 月の台風 15 号による洪水時には、SMDP による計測値が極めて短時間に大きく上昇し、貯水池上流から流入した最高 4,000mg/l の高濃度の流水の通過を本システムにより捉えることができた。また、他の洪水時の計測結果も良好であり、フィールド試験により本計測法が有効であることが確認された。

なお、平成 14 年度は、水温および SS 濃度に加えて電磁流量系を応用した微流速計を SMDP 下部に設置し、洪水流入時の流速変化を同時計測した。貯水池内の流速は洪水流入と同時に上昇し、ピーク流量付近では貯水池下流方向の最高 10cm/s の流速が記録された。

③黒部川における水循環式 SMDP フィールド試験(平成 13～14 年度)

水中設置式 SMDP に対して、一般河川などのような水深確保が困難な場所における測定方法として、計測システムを流水中から離れて設置し、ポンプで測定水を循環させて計測する水循環式 SMDP 型のフィールド試験を黒部川において実施した。

黒部川においては出し平ダム・宇奈月ダムの連携排砂が実施されており、平成 13 年 6 月及び 7 月及び平成 14 年 7 月の排砂時に、下流愛本地点の河川から取水した循環水を対象に SS 濃度の連続観測を行い、他の方法による観測結果との関係についても検討を行った。

平成 13 年 6 月の第 1 回目の連携排砂中には、最高 1,000mg/l の SS 濃度が SMDP により計測され、排砂進行に伴う SS 濃度の時間変化については採水分析結果などと良好に一致した。一方、SMDP 計測値と他の方法による観測結果の絶対値には差が生じた。これは、黒部川では、水循環システムを構成する水中ポンプに既設のものを使用したことから循環水量に制約があり、河川中の SS 濃度と最終的に計測された SMDP 水槽内の SS 濃度に相違があったことが想定される。いずれにしても、この循環システムの改良により、一般河川の SS 濃度の自動観測手法として十分効果を発揮できる可能性があることが確認された。

④高濃度計測に対するフィールド試験(平成 13～14 年度)

SMDP は差圧計測であることから、高濃度計測が可能なことを特徴としている。しかしながら、これを室内試験で検証することは、試験サンプルの作成および一定濃度の維持の困難さが伴う。そこで、②でフィールド試験を行った美和ダムの貯水池内堆積土砂を対象に、高濃度の測定環境を準備し、高濃度の SS 濃度に対する SMDP の計測特性の把握を行った。

具体的には、美和ダムの堆積土砂の排除を目的として開発中の「堆砂排除補助システム(プラグ流の原理を用い土砂の吸引・輸送):国土交通省三峰川総合開発工事事務所・信州大学・吉川建設㈱の共同開発」の試験フィールドを用いて、水槽内に貯められた高濃度濁水の SS 濃度を水中設置式 SMDP を用いて連続計測した。

計測された SS 濃度は数万～最高 30 万 mg/l までの範囲であり、同時に採水されたサンプルの SS 分析結果とも良好に一致し、高濃度測定にも十分有効であることが確認された。

⑤貯水池鉛直 2 次元数値解析モデルによる水中 SMDP 測定データの検証(平成 13 年度)

美和ダム貯水池の鉛直 2 次元モデルを作成し、平成 13 年 8 月及び 9 月の台風洪水時の貯水池内 SS 濃度および水温変化を再現し、SMDP 計測値との比較検証を行った。なお、流入条件のうち、流入流量はダム管理所の観測データを、また SS 濃度は美和ダム貯水池上流端で洪水時に採水されたデータから作成した流量～SS 濃度の関係式より与えている。計算された SS 濃度・水温はその時間変化・計測値ともに SMDP の計測値と良好に一致した。

以上のとおり、室内実験、フィールド試験を通じて、SMDP の開発およびその実用化に向けた実証データの取得を行うことができた。今後は、洪水時のフィールド試験を継続し検証データの蓄積をはかるとともに、特に水循環式 SMDP に関する研究を進める必要がある。

本研究では、SMDP の開発・製作、室内実験およびフィールド試験に際して㈱SMD 技術研究所の多大な協力を得た。また、フィールド試験では、国土交通省中部地方整備局三峰川総合開発工事事務所および天竜川ダム統合管理事務所、ならびに、国土交通省北陸地方整備局黒部河川事務所の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

流水中の微細土砂濃度計測 に関する研究

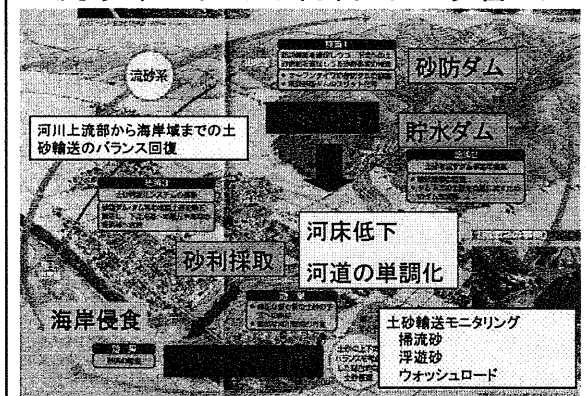
研究の目的

- ・ 長期安定性の高い浮遊砂濃度(SS)の連続計測手法の開発

<研究の背景>

- 流砂系における総合的土砂管理の推進
土砂管理基準点の設定
あらゆる粒径の土砂の365日の定量的モニタリング
- ダム排砂・排砂バイパスの実用化
排砂時に発生する高濃度SSのリアルタイム計測
排砂量・バイパス土砂量の定量的把握

流砂系における総合的土砂管理

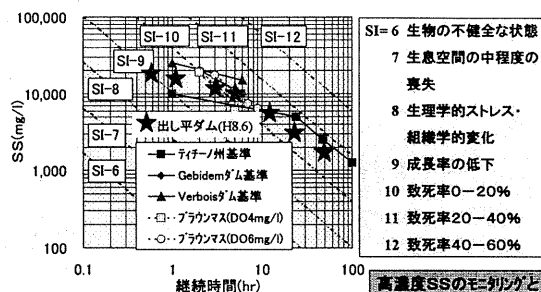


黒部川(宇奈月ダム・出し平ダム) におけるダム排砂



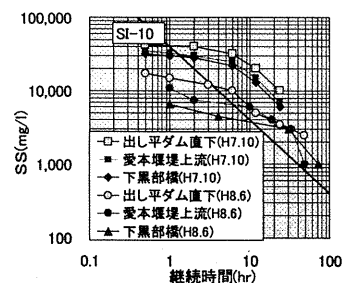
排砂管理基準値とストレスインデックス(SI)

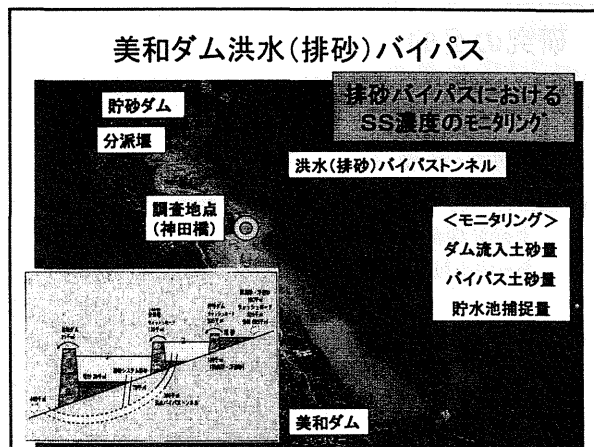
$$SI = \log_e (SS濃度(mg/l) \times 継続時間(hr)) \quad (Newcombe, 1991)$$



排砂管理基準値とストレスインデックス(SI)

$$SI = \log_e (SS濃度(mg/l) \times 継続時間(hr)) \quad (Newcombe, 1991)$$



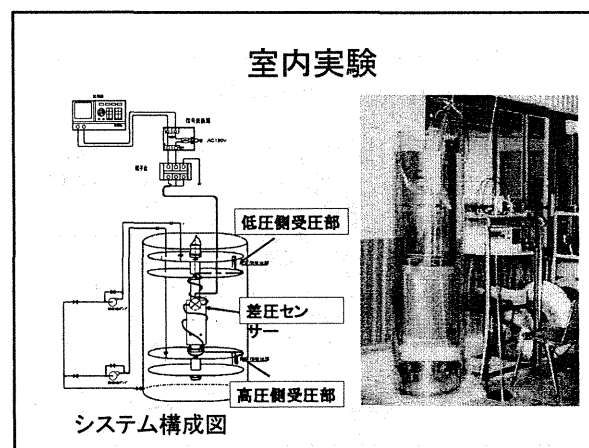
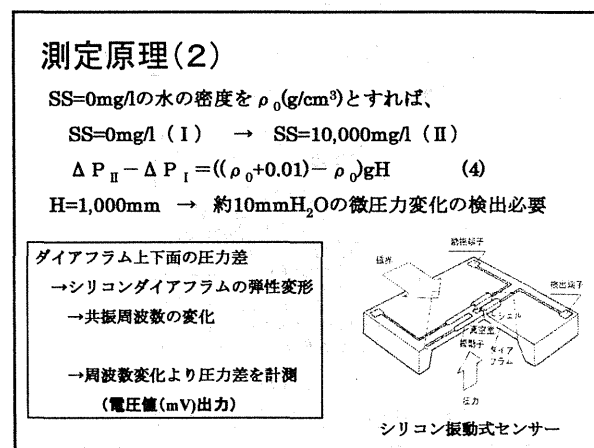
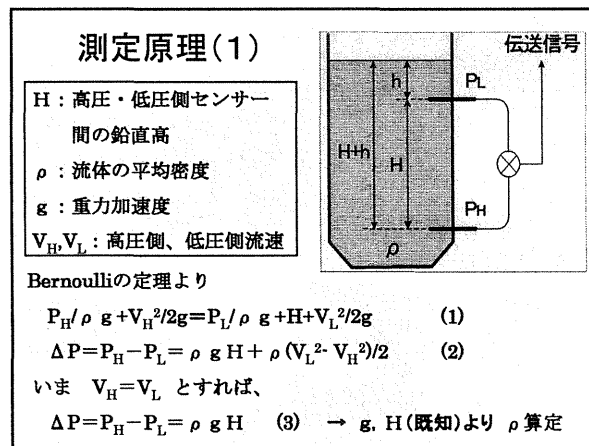
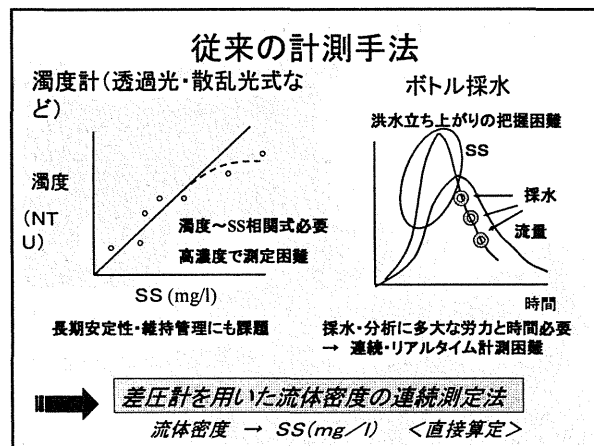


研究の目的

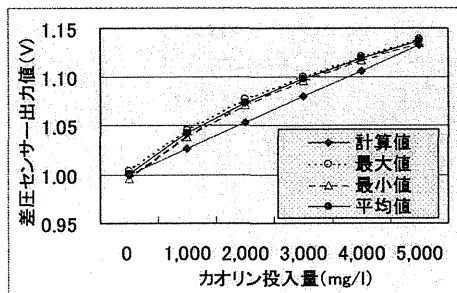
- ・ 浮遊砂濃度のリアルタイム、連続、高濃度計測可能なシステムの開発

Suspended Sediment Concentration
Measuring System with Differential
Pressure Transmitter

➡ S M D P

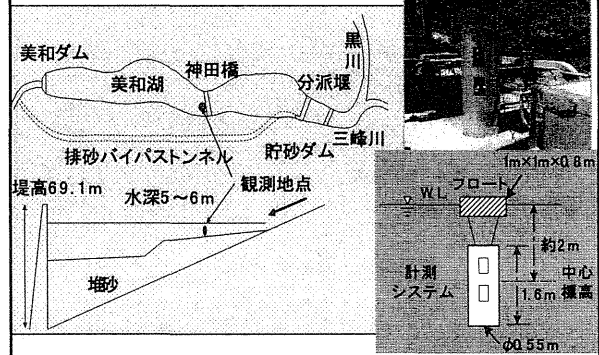


カオリン投入に対する計測結果

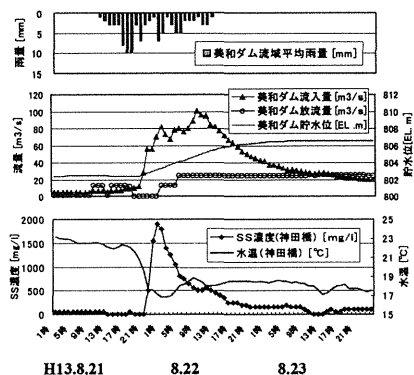


カオリン濃度と差圧センサー出力の直線性を確認

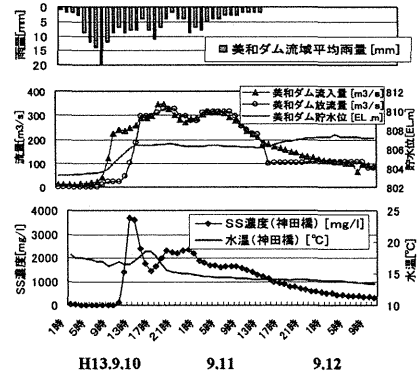
フィールド試験 (水中設置式)



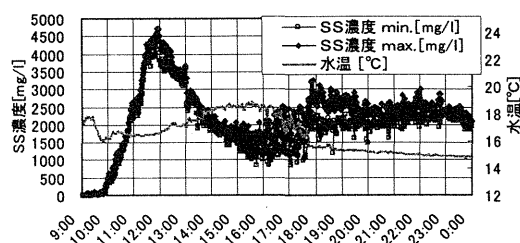
フィールド試験結果(H13年台風11号)



フィールド試験結果(H13年台風15号)

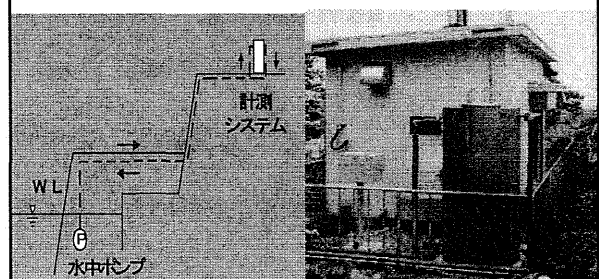


浮遊砂濃度計測結果(1分データ)

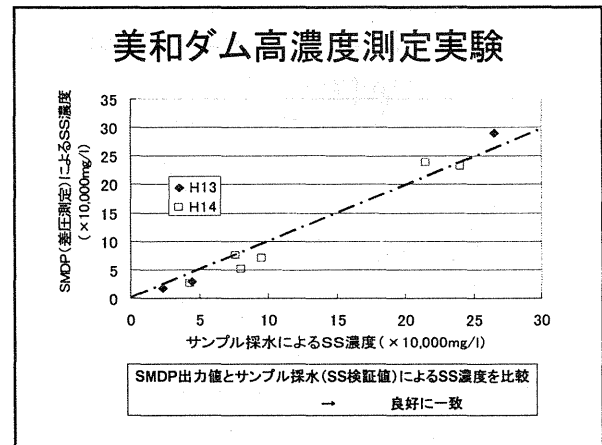
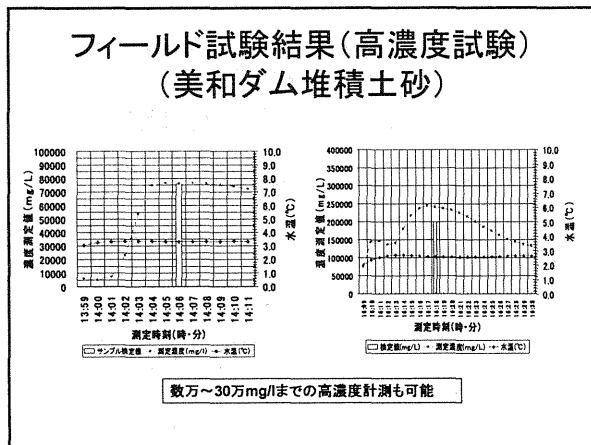
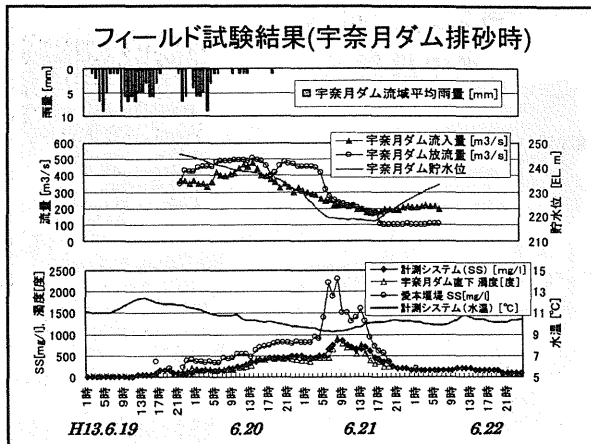


連続計測により1分データ(平均値, 変動を含む)まで分析可能
(最高4,800mg/lを記録)

フィールド試験(水循環式)



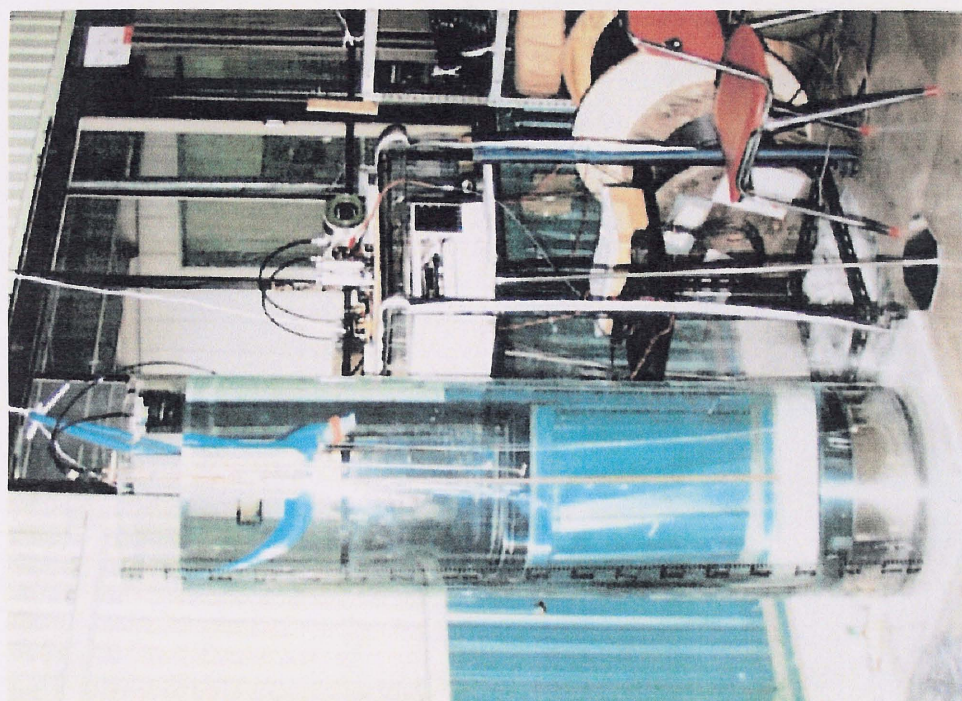
黒部川愛本堰堤下流



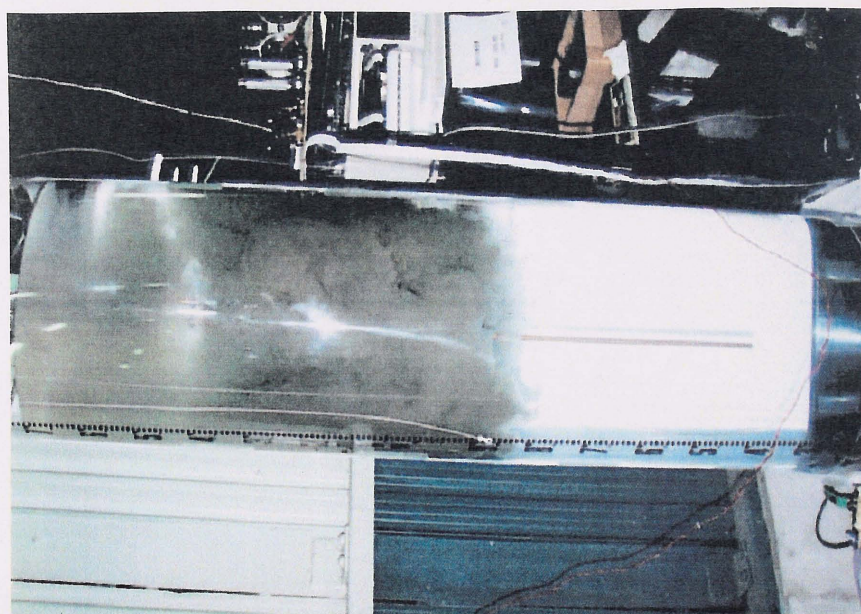
- まとめ
- 差圧計測による浮遊砂濃度(SS)連続計測手法(SMDP)を開発
 - 室内実験により直線性を確認(H12)
 - フィールド試験によりSS濃度計測が可能であることを確認(H13-14)
 - 水中設置式SMDP(天竜川美和ダム)
 - 最大約4,000mg/lの高SS濃度の濁水通過を観測
 - 水循環式SMDP(黒部川)
 - ダム排砂時の高SS濃度のモニタリングに有効
 - 水循環(採水)方法の改良が必要
 - 高濃度計測(数万～30万mg/l)も可能であることを確認(H13-14)

研究成果の概要 (試験状況写真)

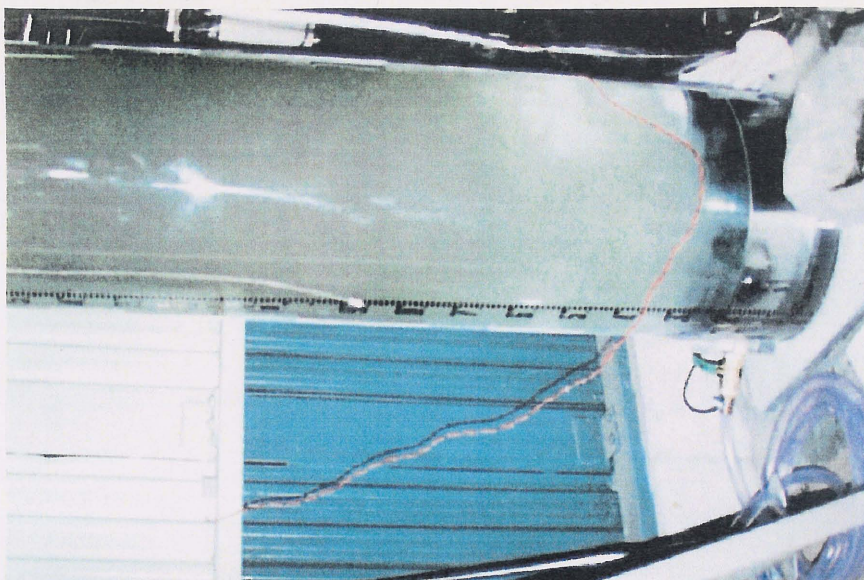
- ① 室内試験
- ② 美和ダム貯水池における水中設置式 SMDP フィールド試験
- ③ 黒部川における水循環式 SMDP フィールド試験
- ④ 高濃度計測に対するフィールド試験



室内実験装置概観



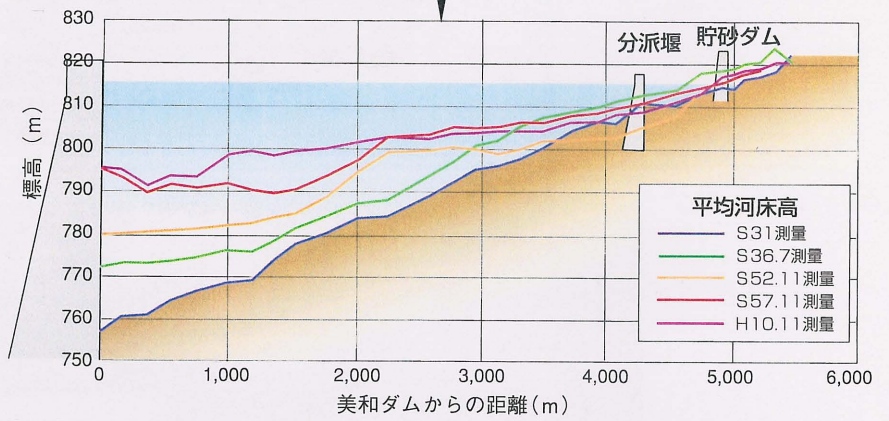
カオリン投入 20s 後



カオリン投入 60s 後

〔位置図〕

美和ダム貯水池平面図



データ記録部

美和ダム貯水池における水中設置式 SMDP フィールド試験

黒部川における水循環式 SMDP フィールド試験

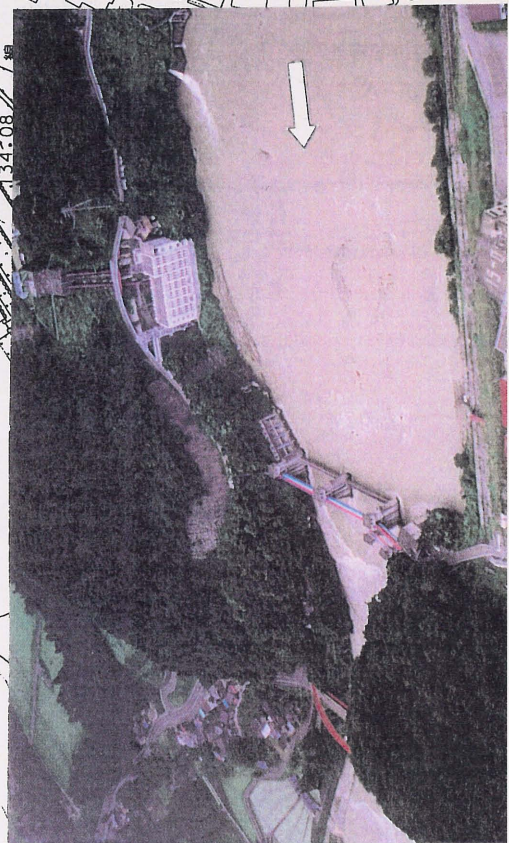
黒部川

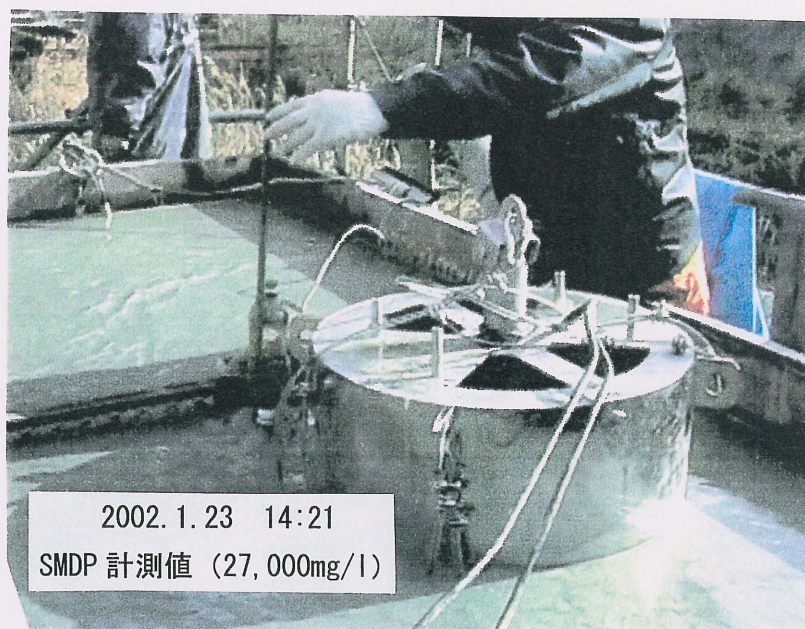
黒部ダム

SMDP 設置場所

水中ポンプ設置場所

2001 4 11 3:10:42 PM





2002. 1. 23 14:21
SMDP 計測値 (27,000mg/l)



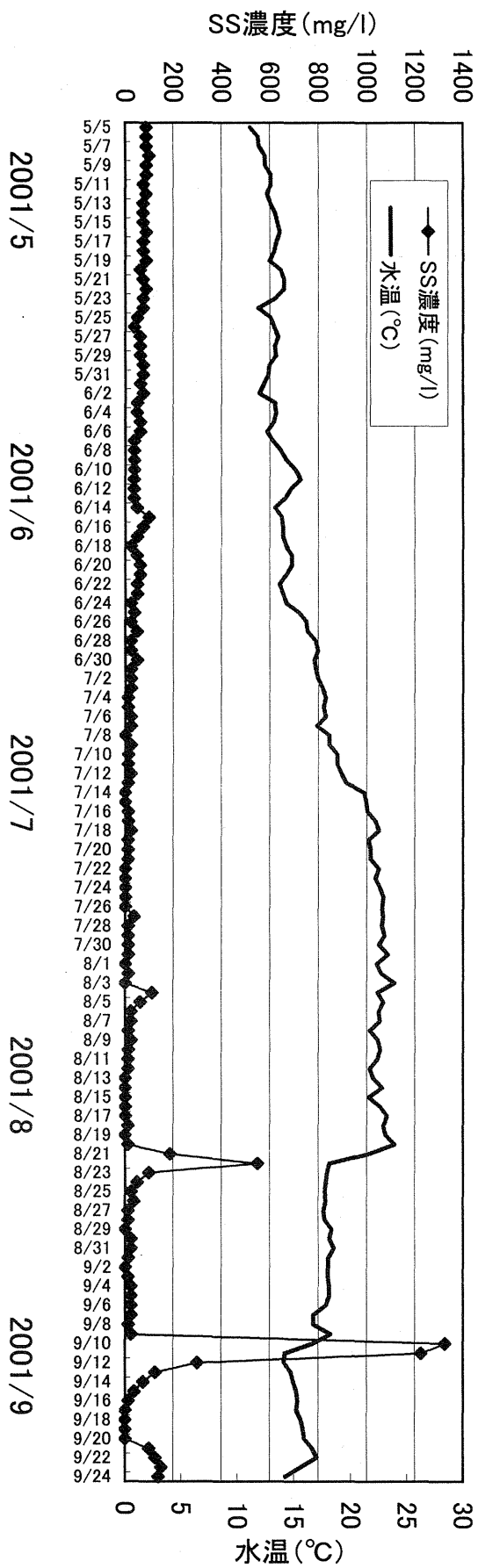
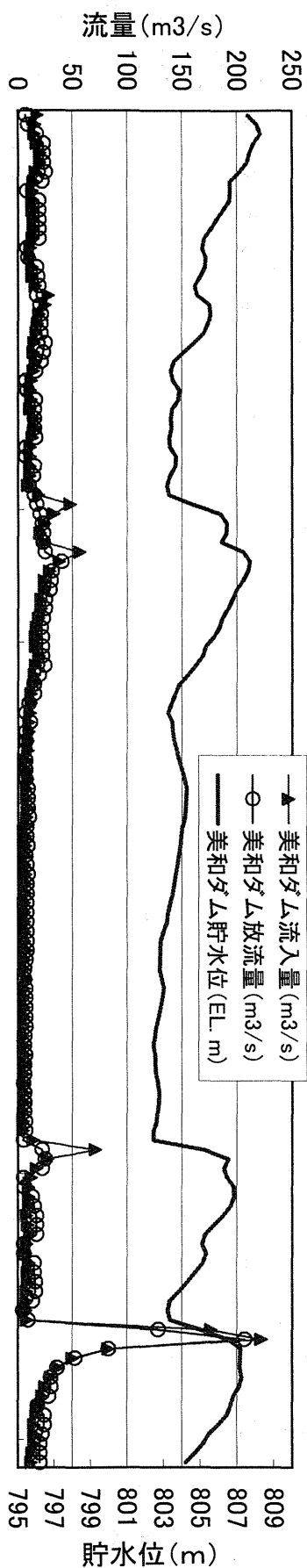
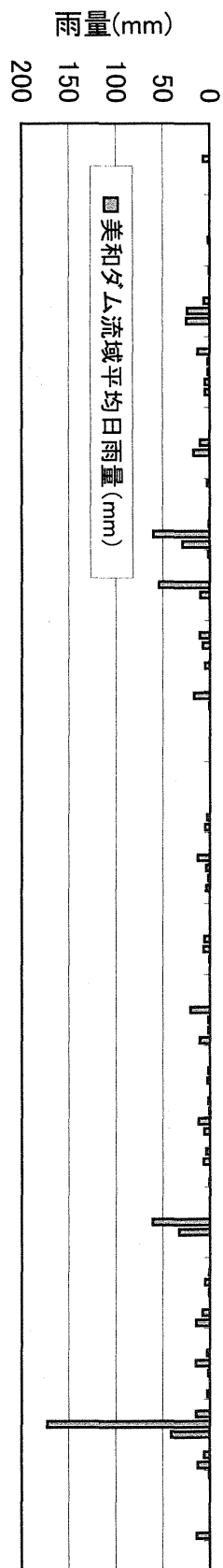
2002. 1. 29 16:19
SMDP 計測値 (240,000mg/l)

高濃度計測に対するフィールド試験

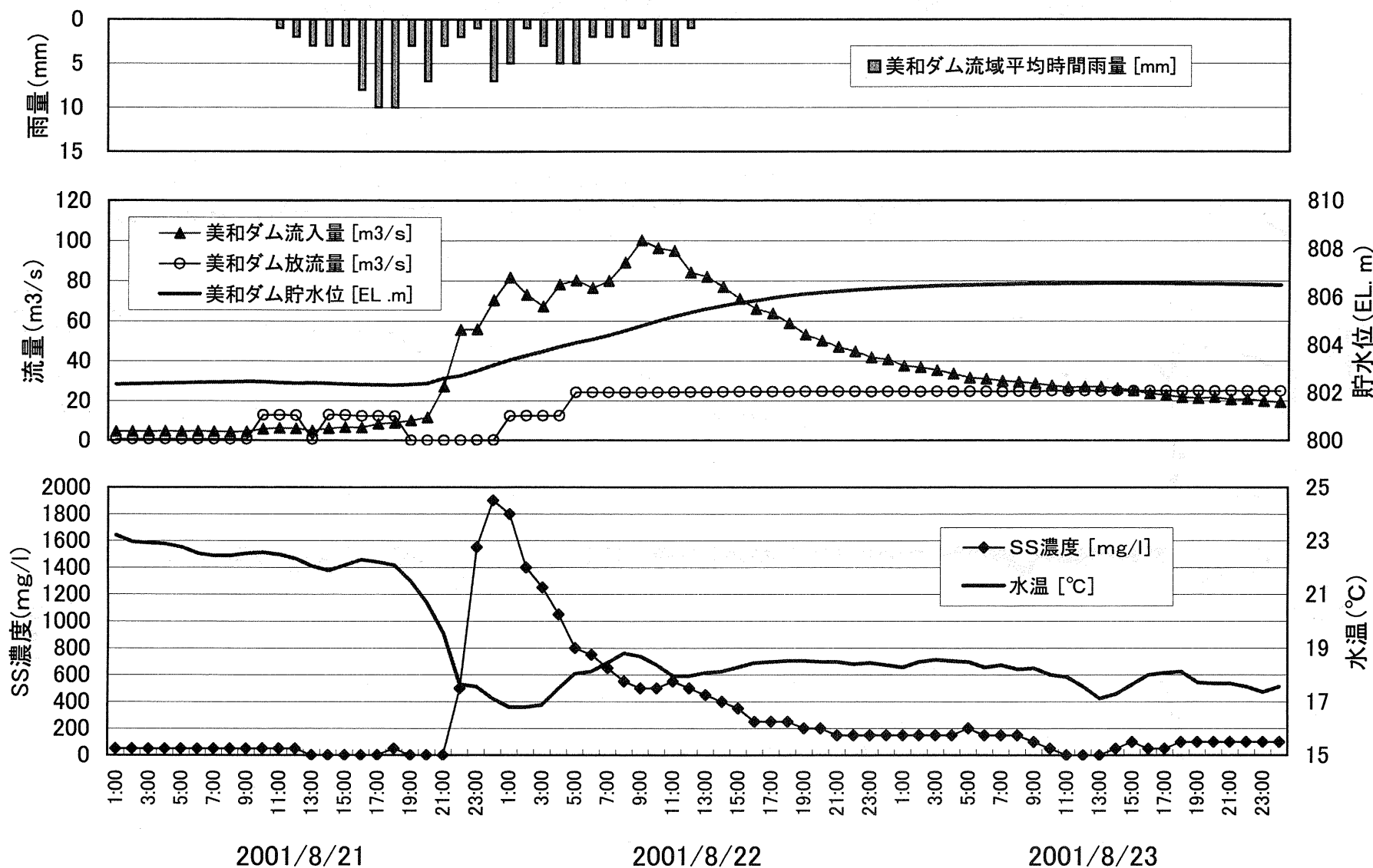
研究成果の概要

(フィールド試験データ)

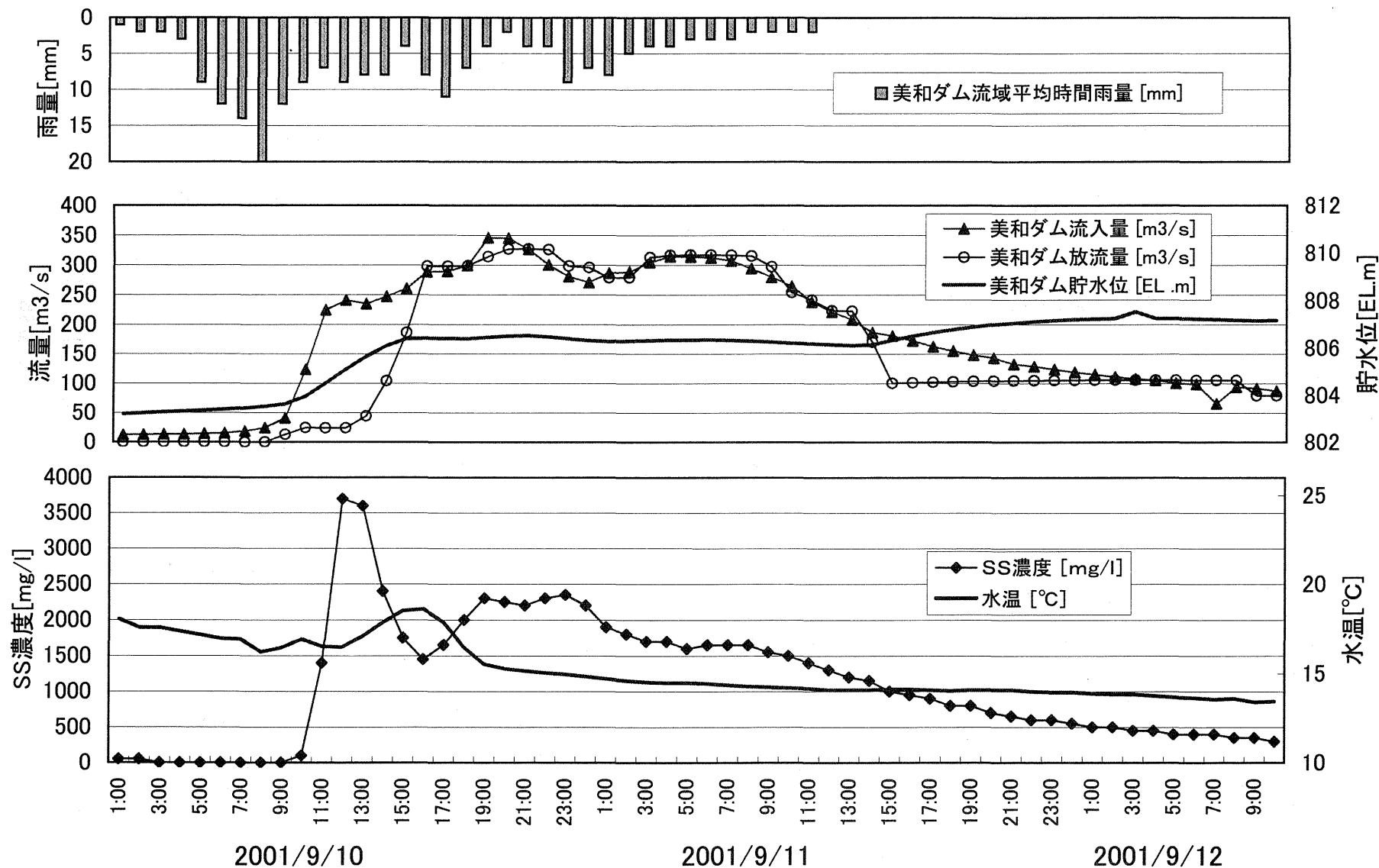
- ① 美和ダム貯水池における水中設置式 SMDP フィールド試験
 - 1) 平成 13 年 5 月～9 月
 - 2) 平成 13 年 8 月 21～23 日(台風 11 号)
 - 3) 平成 13 年 9 月 10～12 日(台風 15 号)
 - 4) 平成 14 年 10 月 1～3 日(台風 21 号)
- ② 黒部川における水循環式 SMDP フィールド試験
 - 1) 平成 13 年 6 月 19～22 日 連携排砂
- ③ 高濃度計測に対するフィールド試験



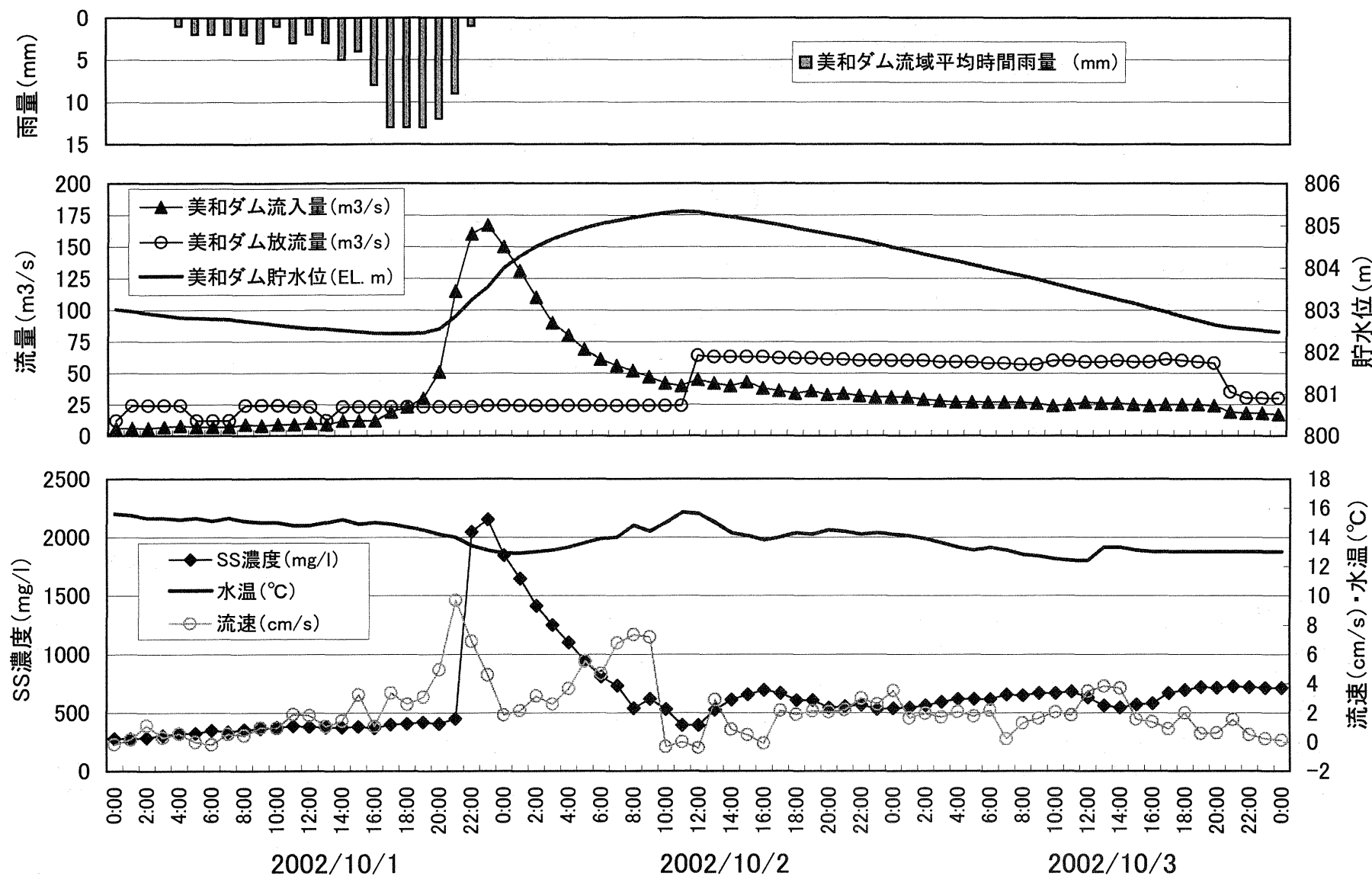
美和ダム貯水池における水中設置式SMDPフーランド試験(平成13年5月~9月)



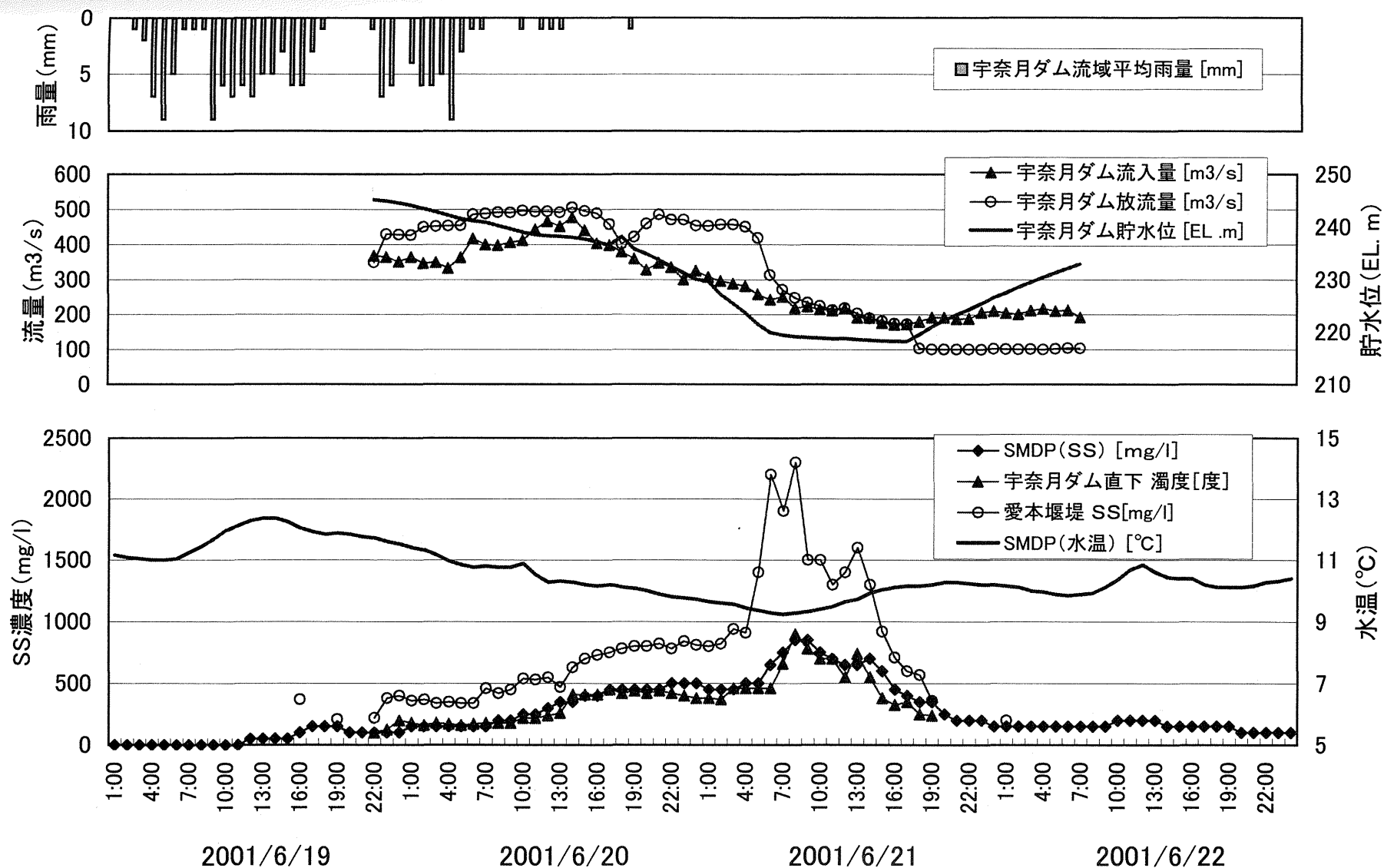
美和ダム貯水池における水中設置式SMDPフィールド試験
平成13年8月21日～23日(台風11号)



美和ダム貯水池における水中設置式SMDPフィールド試験
平成13年9月10日～12日(台風15号)



美和ダム貯水池における水中設置式SMDPフィールド試験
平成14年10月1日～3日(台風21号)



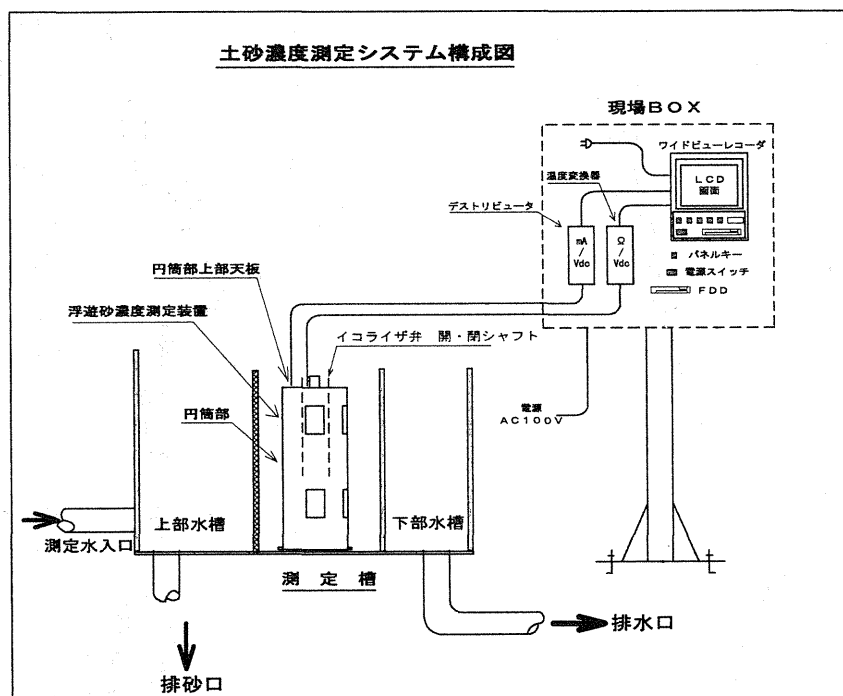
黒部川における水循環式SMDPフィールド試験
平成13年6月19日～21日(連携排砂)

③高濃度計測に対するフィールド試験

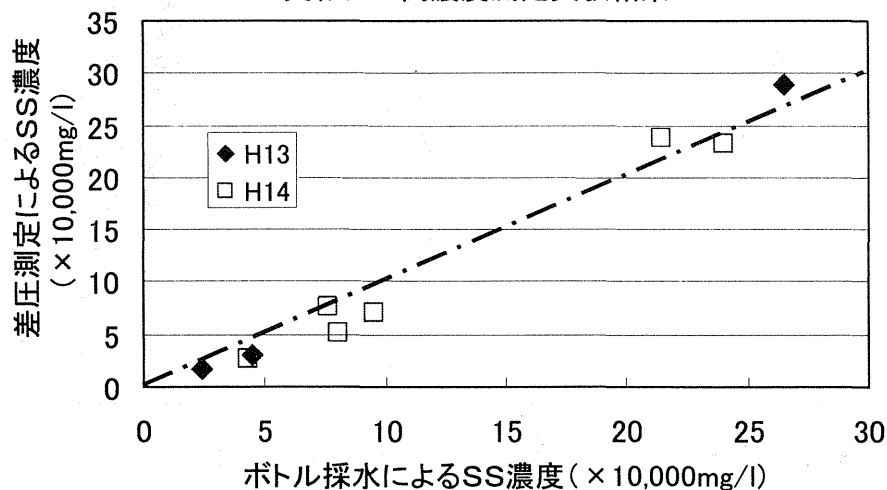
「美和ダム堆砂排除補助システム(試験装置)」より、高濃度の濁水が測定槽の上部水槽の下部入口に送られる。SMDP は網目状のフィルター板を通して流れ込む中間槽に設置し、さらに中間槽から下部水槽へは常に越流状態を保つ。

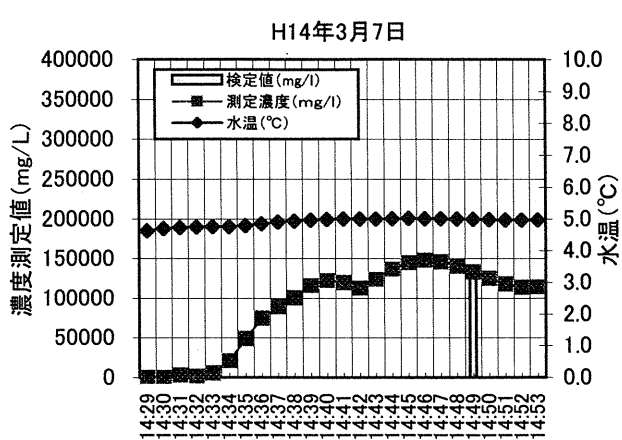
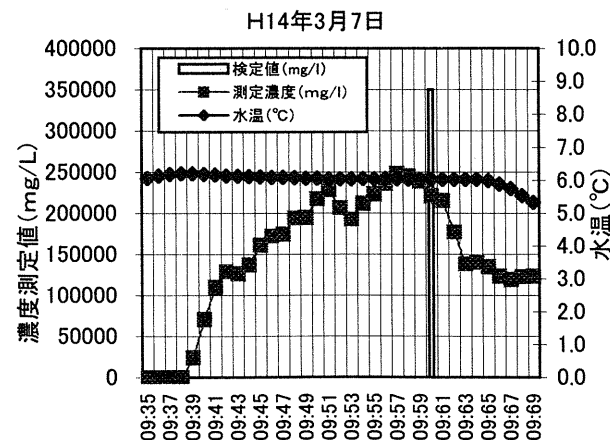
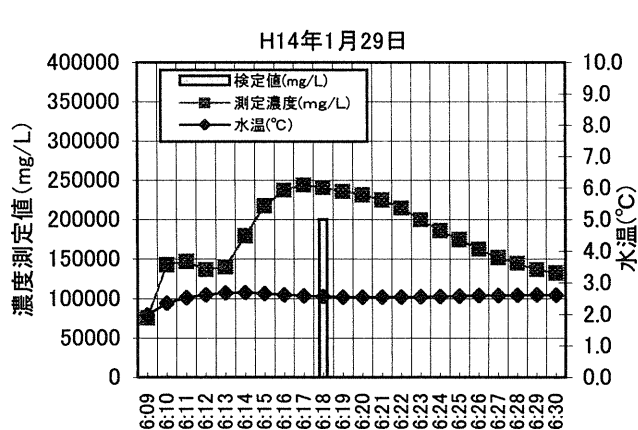
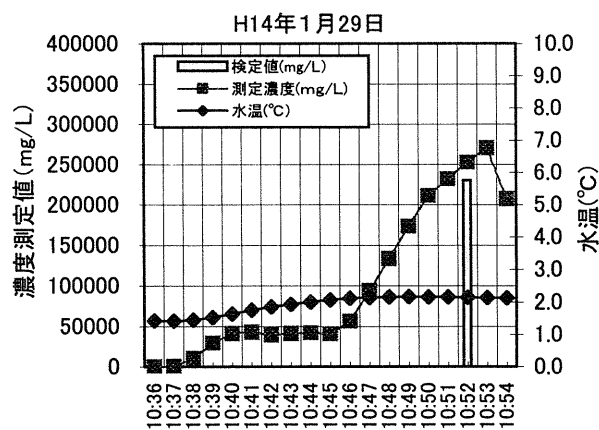
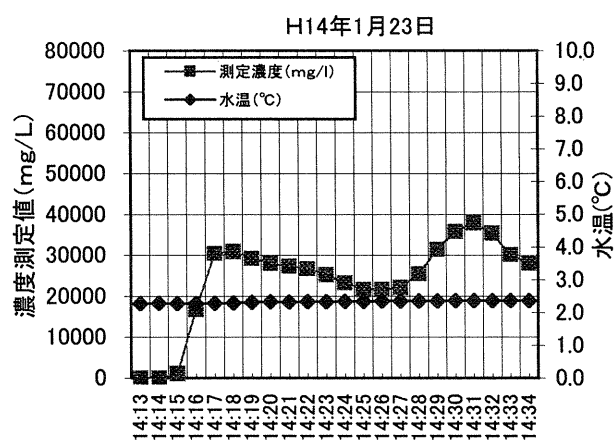
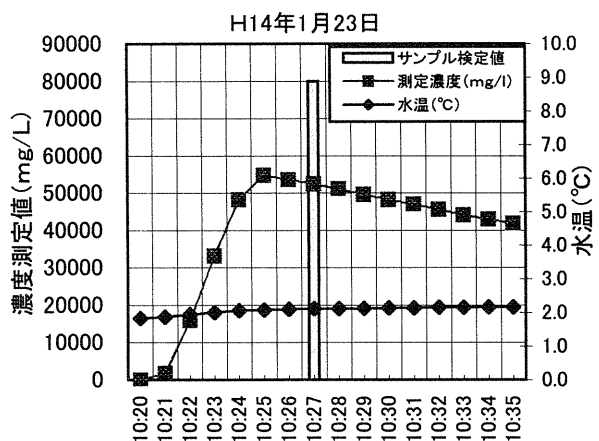
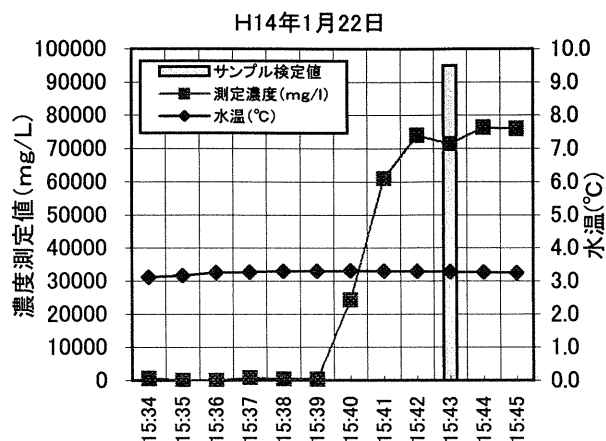
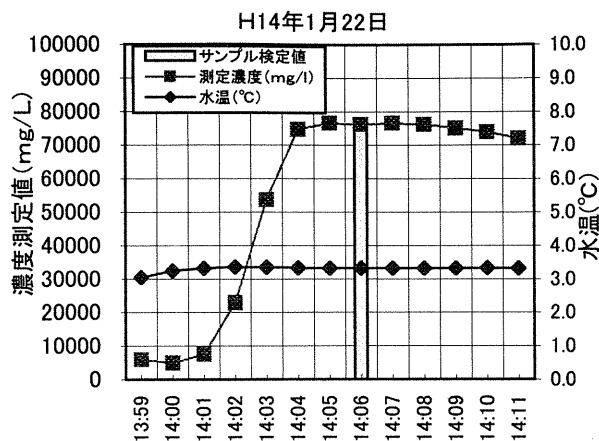
SMDP による SS 濃度測定は、「補助システム」の起動とともに開始し、SMDP 出力がほぼ一定となった時に中間槽内から検定用のサンプル採水を SMDP の中間高さに合わせて行う。

計測された SS 濃度は数万～最高 30 万 mg/l までの範囲であり、同時に採水されたサンプルの SS 分析結果(検定値)とも良好に一致し、SMDP が高濃度測定にも十分有効であることが確認された。



美和ダム高濃度測定実験結果





高濃度フィールド試験結果(美和ダム堆積土砂)