

# 洪水時におけるダム貯水池流入微細粒土砂の挙動把握と貯水池堆砂管理への応用

## STUDY ON BEHAVIORS OF FINE SEDIMENT IN A RESERVOIR AND ITS APPLICATION TO SEDIMENTATION MANAGEMENT

岡野眞久<sup>1</sup> ・ 梅田 信<sup>2</sup> ・ 田中則和<sup>3</sup> ・ 横森源治<sup>4</sup>  
Masahisa OKANO, Makoto UMEDA, Norikazu TANAKA and Genji YOKOMORI

<sup>1</sup>フェロー会員 (財)ダム水源地環境整備センター 技術顧問 (〒102-0032 千代田区麹町 2-14-2)

<sup>2</sup>正会員 博(工)(財)ダム水源地環境整備センター 研究第2部研究員 (〒102-0032 千代田区麹町 2-14-2)

<sup>3</sup>正会員 (財)ダム水源地環境整備センター 調査第2部主任研究員 (〒102-0032 千代田区麹町 2-14-2)

<sup>4</sup>正会員 国土交通省 三峰川総合開発工事事務所長 (〒396-0402 長野県長谷村大字溝口 1527)

Recently sediment bypass systems have been planned and constructed as effective countermeasures against sedimentation in several reservoirs. Nowadays how to control the behaviors of fine sediment has become important in order to make management of these systems or other similar systems more effective. In this study we conduct some practical consequences on basis of observations and analyses in Miwa Dam, where a redevelopment project is just being carried out. At first we confirmed typical density variation of fine suspended solids flowing into reservoirs during one flood period. We analyzed the behavior of fine suspended load in the reservoir using longitudinal-vertical 2-dimensinal simulation models. This showed relocating outlets of reservoir in the lower and proper level is effect to release high turbid water out of reservoir. We also observed movement of fine sediment mass on reservoir bed, caused by lowering reservoir water level. This can be applied to gather sediment in reservoirs. Consequently we indicate some practical and effective methods to prevent inflow of fine suspended load and reduce sedimentation in reservoirs.

**Key Words :** *sediment bypass system, reservoir sedimentation management, density variation of suspended solid in flood, behavior of suspended load and fine sediment in reservoir, practical sediment control methods*

### 1. 序論

#### (1) はじめに

近年、ダムの水位を下げずに行う堆砂対策として、流入土砂のうち粗粒砂礫は貯砂ダムで捕捉のうえ搬出し<sup>1)</sup>、微細粒土砂は貯水池を迂回させるバイパスシステムの有効性が期待されている。しかし、洪水を貯留・調節することを目的とするダムでは、貯留に際し少なからず微細粒土砂が貯水池に流入し堆積するため、流入土砂をいかに制御するかがこの方策の解決すべき課題となっている。

本論文は、この課題に関連して美和ダムで行われている微細粒土砂の挙動に関する現地調査及び数値解析等の結果並びにその制御方策等について論ずるものであり、この成果は他のダムの堆砂管理にも活用が期待される。

#### (2) 美和ダム貯水池堆砂実績と流域の土砂流出特性

美和ダムは天竜川水系三峰川(長野県上伊那郡長谷村地内)に1959年に竣工した、洪水調節、不特定(農地約2500haの用水補給)および発電(美和発電所で最大出力12200kw、春近発電所で最大出力23600kw)を目的とした国土交通省管理の多目的ダムである。その流域面積は

311.1km<sup>2</sup>、およびその総貯水容量は2995万m<sup>3</sup>である。ダム上流域は3000m級の山々が連なる南アルプスの西側斜面を含み、中央構造線や断層が南北を貫く。このため大規模な崩壊地も多く、流出土砂量は極めて多い。

美和ダムは竣工直後から洪水調節に大きな効果を発揮してきたが、同時に大量の流出土砂が貯水池内に堆積した。再開発事業に至るまでの美和ダムの堆砂実績とその特徴は宮本・尾中<sup>2)</sup>によれば次のようにまとめられる。

1988年時点の実測堆砂量は1410万m<sup>3</sup>である。1958年から1988年までの30年間の全堆砂量(1966年からは掘削除去量を加えたもの)は約1860万m<sup>3</sup>で、この間の比堆砂量は1990m<sup>3</sup>/年/km<sup>2</sup>に達する。このうち竣工後最大の洪水が生じた1982年は約430万m<sup>3</sup>を占める。堆砂には微細粒分が多く含まれており、粒径75μm以下のシルトおよび粘土が堆砂量の約75%を占めると推定されている。

#### (3) 再開発事業恒久堆砂対策計画と現下の課題

このような堆砂の進行に対し、治水安全度の向上と安定的な用水供給を維持する再開発事業が1989年から行われている。その主な内容は堆砂の掘削搬出による貯水容量の確保(2001年までに約125万m<sup>3</sup>搬出)と流入土砂を

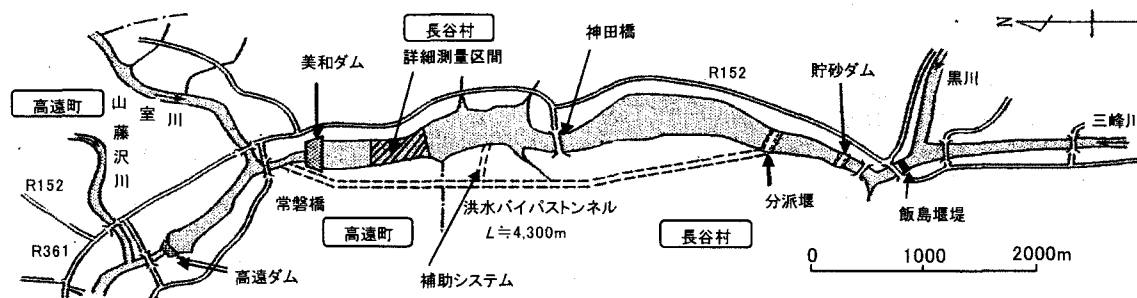


図-1 美和ダム貯水池平面図

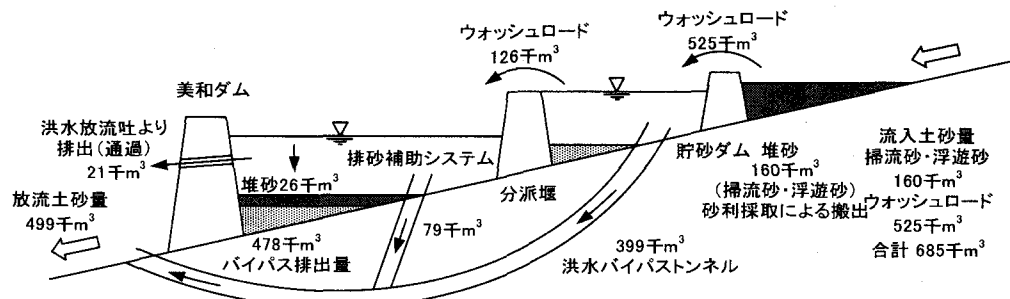


図-2 美和ダム再開発事業における年平均計画土砂収支

迂回させる洪水バイパスの整備である。この再開発事業の計画恒久堆砂対策施設を含む貯水池平面図を図-1に、また、年平均計画土砂収支を図-2に示す。これらの内、貯砂ダムは1993年に暫定完成し、洪水バイパスおよび分派堰は2001年に着工されている。この計画ではウォッシュロードを貯砂ダムや分派堰で捕捉できない0.1mmより細かい土砂とし、その土砂収支量は次の項目によっている。(1) 利水容量回復後バイパス放流する。(2) 流入量が100m³/s以上の時、ダムの洪水吐に優先して最大300m³/sの範囲でバイパスする。(3) 流入ウォッシュロードの一部は即時沈降し、残余は完全混合し放流量に応じて通過する。

排砂補助システムについて、宮本・尾中<sup>2)</sup>は「サイフォン等の自然営力(洪水等)を利用したシステム」とし、また、浦上・杉山<sup>3)</sup>は「排出先は洪水バイパストンネルとし、放流SS濃度の調節機能を持ち、湖内移動が可能な自走式とする。利水補給に支障をきたさない範囲で、洪水期間中に稼働させる。」としている。

筆者らはバイパスを前提に、より効率的な補助システムを具体化するため、計画土砂収支算出の項目の再検討

を含め、微細粒土砂の堆砂対策検討の方向を表-1にまとめた。貯水池への流入特性と流入後の挙動特性および堆積後の再移動特性を活用し、補助システムの負担を軽くし、持続可能な貯水池管理をめざすものである。

これらのうち、本研究では表-1の1～3の課題の解決を図るため、必要な観測をもとに、バイパスの運用、低位洪水吐による土砂の通過促進および通常の貯水位低下運用による堆砂の再移動と集積の可能性等の検討を進める。

## 2. 美和ダム貯水池への流入微細粒土砂の特性

### (1) 流入SS濃度等の観測とその流出特性

洪水時のダム流入部(飯島堰堤地点)におけるSS濃度の観測は、1988年以降、概ね50m³/s以上の洪水を対象として実施されている。表面採水で、GFP濾過法により分析された。その粒度分析は概ね正時での流量ピーク時に1検体採り、レーザー回折・散乱式により行われた。

この観測結果から一洪水中の流入SS濃度の時間変動特性が確認された。典型的な例を図-3に示す。流量・SS濃

表-1 土砂バイパスシステムにおける微細粒土砂の堆砂対策の課題

|   | 方 針                 | 具 体 策                                     | 明らかにすべき課題                                   |
|---|---------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 1 | 高SS濃度水はなるべく貯水池に入れない | ・洪水初期の高SS濃度水はなるべくバイパスし低SS濃度水を貯留する         | ・流量と流入SS濃度関係<br>・洪水発生間隔と流入SS濃度関係            |
| 2 | 流入したSSはなるべく通過させる    | ・低位洪水吐から高SS濃度水を放流<br>・洪水後期はバイパスせず貯水池を通し放流 | ・土粒子の沈降によるSS濃度分布の変化<br>・微細粒土砂の巻き上げや濁水密度流の挙動 |
| 3 | 機械力をなるべく使わず堆積土砂を集積  | ・通常的水位操作により堆積土砂を再移動させ集積エリアに集める            | ・水位低下に伴う流水による浸食と運搬                          |
| 4 | 洪水等自然営力を利用した排砂      | ・洪水時に濃度管理しつつ、水位差吸引方式により洪水バイパス等へ排砂(補助システム) | ・堆砂の性状とパイプ流送能力<br>・洪水時に稼働可能なシステム設計          |

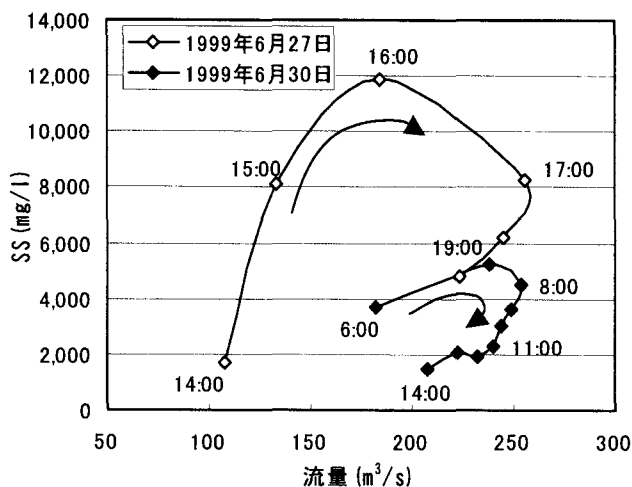


図-3 1999年6月洪水の流量とSS濃度の関係(飯島堰堤)

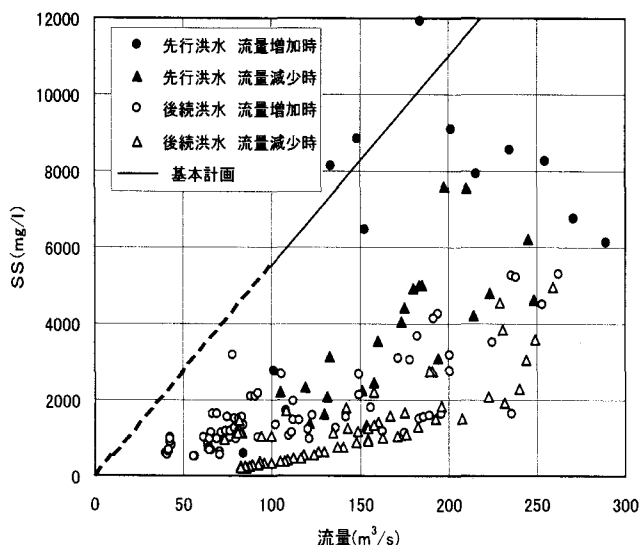


図-4 美和ダム流入地点(飯島堰堤)における流量-SS濃度関係

度関係はほとんどの洪水で、経時的に時計回りのループを描いた。また時間的に近接した洪水では、後続の洪水では相対的にSS濃度は低くなることが観測された。

### (2) 流入微細粒土砂の流出特性の利用

これまでの観測で得られた流量とSS濃度の関係を図-4に示す。ここではこれらの観測値を、85m³/s以上の流量が洪水発生前の半年以上生じていない先行洪水とそれ以外の後続洪水に分け、さらにそれぞれを流量増加時と減少時の合計4類型に分けた。こうして見ると高SS濃度の流入をもたらす洪水を区分できそうである。ループ特性については後述の3.(1)dでは図-5に示す関係を用いた。しかし3.(2)では基本計画策定に用いた一価関係式(図-4)を使った。計画や実管理にループ特性を適用するにはさらに観測を重ね、その特性を把握する必要がある。

このような流入特性を考えると Morris and Fan<sup>4)</sup>も指摘しているように流量増加時の高SS濃度水を、貯水池に貯水できる条件であっても極力バイパスし、減少時の低濃

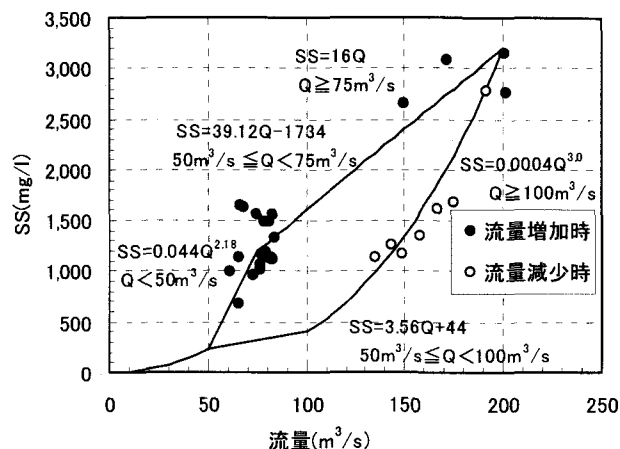


図-5 1997年洪水の流量とSS濃度の関係設定(飯島堰堤)

度水を貯留することにより微細粒土砂の堆積量を減少させることが期待できる。

## 3. 美和貯水池内微細粒土砂の流動堆積挙動解析

### (1) 数値解析手法

#### a) 解析モデル

バイパスされた洪水はそのままダム下流に流下するが、バイパスされずに貯水池に流入した高SS濃度水は、貯水池内の水深方向と流下方向に顕著な流動形態を示す。

本研究では(財)ダム水源地環境整備センターにおいて開発されてきた鉛直2次元(一方向多層流)水理・水質モデルに堆砂量等の算出ルーチンを加え、貯水池内流動堆積挙動数値解析モデルとした。本モデルは連続の式、運動量保存式、熱量保存式および濁質保存式からなる。

#### b) 計算条件

貯水池流下方向に100m、水深方向に厚さ1mに貯水池を分割し、各要素の奥行き幅は実測値を与えた。また、計算時間刻みはCFL条件から設定した。鉛直拡散係数は局所リチャードソン数の関数として与えられる。濁質の沈降速度は濁質粒子の粒径より、Stokesの式を用いて求めている。表-2にモデルの検証と解析に用いたその他の

表-2 その他の計算条件

|          | 検証計算                                          | バイパス後の解析                                                            |
|----------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 貯水池構造    | 実績 H-V<br>最大 5km×28m                          | 計画 H-V<br>最大 4.4km×28m                                              |
| 対象期間     | 1997.1.1~12.31                                | 1982.7.14~8.10                                                      |
| 初期水位     | 1月1日実績水位                                      | 洪水期制限水位                                                             |
| 初期水温     | 全層 3℃                                         | 7月14日実績                                                             |
| 初期SS     | 全層 5mg/l                                      | 7月14日実績                                                             |
| 流量Q-SS関係 | 図-5に示す式                                       | $Q \geq 100 \text{ m}^3/\text{s}$<br>$Q_w = 2.0 \times 10^{-5} Q^2$ |
| 粒度構成     | 6区分、代表粒径<br>1,5,10,15,25,50 μm<br>1989年測定値の平均 | 6区分、代表粒径<br>1,5,10,15,25,50 μm<br>1975~81年測定値                       |

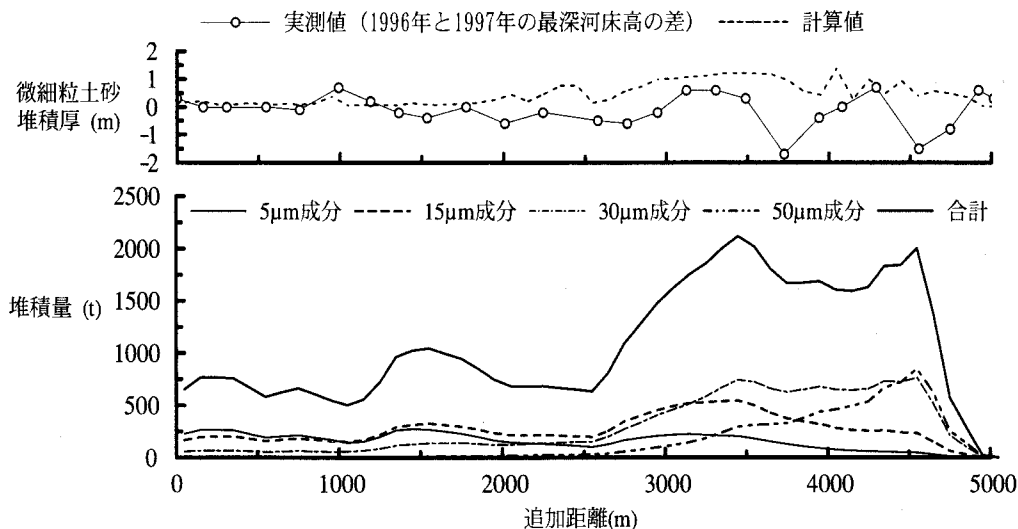


図-6 1982年8月洪水バイパス後の貯水池内SS濃度分布

条件を示した。

### c) 数値解析モデルの検証とモデルの特徴

検証は洪水後の貯水池内SS濃度が観測できた1997年を対象とした。通年計算の結果、貯水池内水温およびSS濃度分布並びに放流SS濃度に関しては、比較的良好に実測値を再現した。ここでは図-6に微細粒土砂堆積量の計算結果について実測値と比較して示す。概ね実績の堆砂形状を再現している。なお、微細粒土砂の堆積厚さは空隙率0.7、土粒子密度 $2650\text{kg/m}^3$ で整理した。

本貯水池内での微細粒土砂の粒径別堆積量分布については既に解析事例<sup>5)</sup>があるが、本モデルによる解析はより実用的な手法である。また、同様なモデルによる数値解析が土砂の捕捉という観点から行われている<sup>6), 7)</sup>。本モデルは濁水の長期化現象をも連続的に同一モデルで表現できる。流入した微細粒土砂の貯水池内SS濃度分布および放流SS濃度の変化さらには堆積量分布といった一連の現象の解析手法として有効な対策検討のため活用されよう。

### (2) 貯水池内流動・堆積分布の解析と考察

美和ダムにおける実績最大洪水は、1982年8月に生じた洪水で、最大時間流量(正時)は $1210\text{m}^3/\text{s}$ であった。これは美和ダムの現在の計画高水流量規模にあたる。この洪水に対し再開発計画では最大 $300\text{m}^3/\text{s}$ がバイパスされ最大 $910\text{m}^3/\text{s}$ が貯水池に流入することになる。この洪水を対象に現在の洪水吐(敷高EL. 799m)からの放流と低位洪水吐(敷高EL. 790m)からの放流の2つの場合に対し、それぞれ貯水容量確保のための掘削ケース1(EL. 800m, 主として上流側部分のみ掘削)と掘削ケース2(EL. 792m, 中流部分も含む掘削)の、合計4ケースを解析した。

低位洪水吐で掘削ケース1の場合における貯水池内SS濃度分布の例を図-7に示した。このケースから洪水流入後、間もなく混合状態になるが、その後、時間の経過とともにSS濃度差が水深方向に生じてくることが見られる。

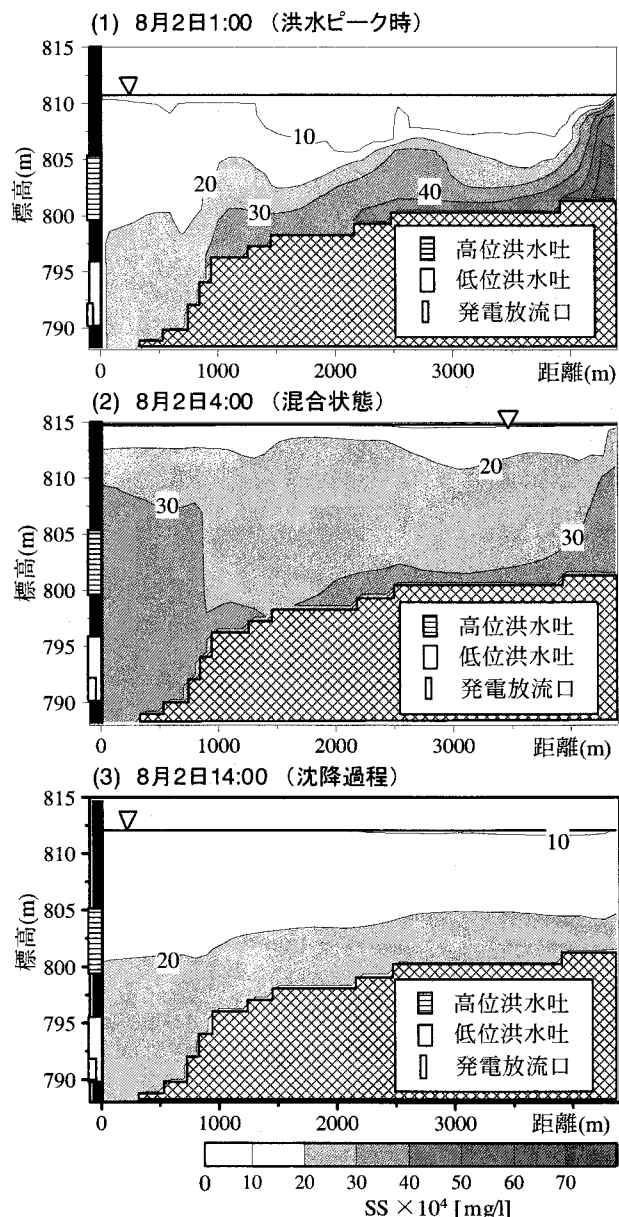


図-7 1982年8月洪水バイパス後の貯水池内分布

表-3 1982 年 8 月洪水バイパス運用後の洪水吐標高と貯水池掘削標高による土砂通過効果

| 洪水吐数高             | 洪水流入総量         | 5330 万 m <sup>3</sup> |                       |
|-------------------|----------------|-----------------------|-----------------------|
|                   | 貯水池採掘標高        | EL.800m               | EL.792m               |
| (現状)<br>EL. 799m  | 貯水容量           | 2340 万 m <sup>3</sup> | 2850 万 m <sup>3</sup> |
|                   | 貯水池内下流側部分の堆砂割合 | 34.8%                 | 35.1%                 |
| (低標高)<br>EL. 790m | 捕捉率            | 49.5%                 | 51.5%                 |
|                   | 貯水池内下流側部分の堆砂割合 | 32.9%                 | 33.8%                 |

この水深方向の濃度差を活用し、洪水時に SS を効率的に排出するのがねらいである。

解析結果から洪水吐標高と貯水池掘削標高による容量・形状のちがいがもたらす土砂通過促進効果を表-3 にまとめた。この表では貯水池全体の捕捉率と貯水池内下流側部分（ダムから 1.7km 地点まで）の堆砂量割合を比較して示している。

今城・角<sup>⑨</sup>は美和ダムにおける 2001 年 9 月洪水（最大流入量 300m<sup>3</sup>/s）を対象に解析し、放流管標高も捕捉率に大きく影響すると報告している。しかし、本計算では表-3 のようにその土砂排出効果はそれほど大きくない。この原因は解析対象洪水では流入から極めて短時間で混合状態になること、洪水期制限水位に戻ったところでゲート放流からバイパス放流に変えていることなどが考えられる。表-3 の結果は、1982 年 8 月洪水時の微細粒土砂全流入量（堆積量換算）約 130 万 m<sup>3</sup> に対し、洪水吐を低標高に代えることで貯水池内下流側部分の堆砂量を 8～10%，約 2 万数千 m<sup>3</sup> を減少できることを示している。貯水池全体の計画堆砂量 260 万 m<sup>3</sup> から見てこの減少量の評価は分かれようが、将来にわたり排除が困難な貯水池内下流側部分堆砂量を減少させる意義は小さくないと考えられる。洪水放流能力増強策などと併せ、低位洪水吐の導入は今後、積極的に検討されるべき課題であろう。

4. 美和ダム貯水池に堆積した微細粒土砂の貯水位低下に伴う再移動の観測とその応用

(1) 堆積微細粒土砂の貯水位低下に伴う再移動の観測

図-8 に示す 2002 年 10 月から 11 月にかけての貯水位低下に伴う堆積土砂の再移動観測が同年 9 月中旬と 11 月中旬に、図-1 に示すダムより 0.5km から 1.2km 付近の区間で行われた。観測方法は GPS と音響測深器により水平方向約 10m の間隔で湖底形状を測量するというものである。9 月の測量結果、11 月測量の結果およびそれらの差から浸食部分と堆積部分を算定した結果を図-9 の A), B), C) に示した。これらの図から蛇行する流路に沿う浸食の進行、標高 795m 以下の一部にデルタ状地形の形成および標高

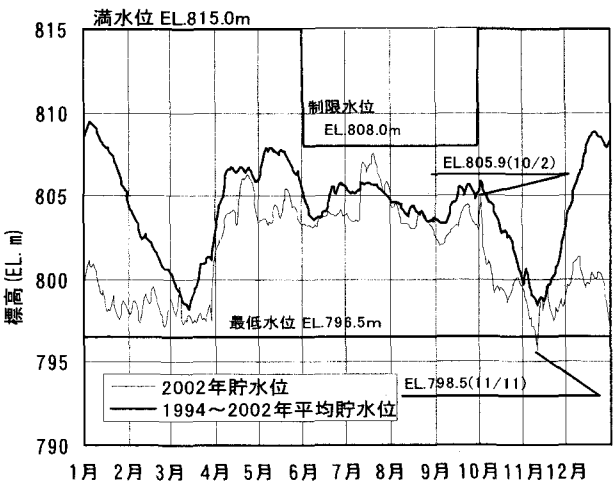


図-8 美和ダム年間貯水池運用実績

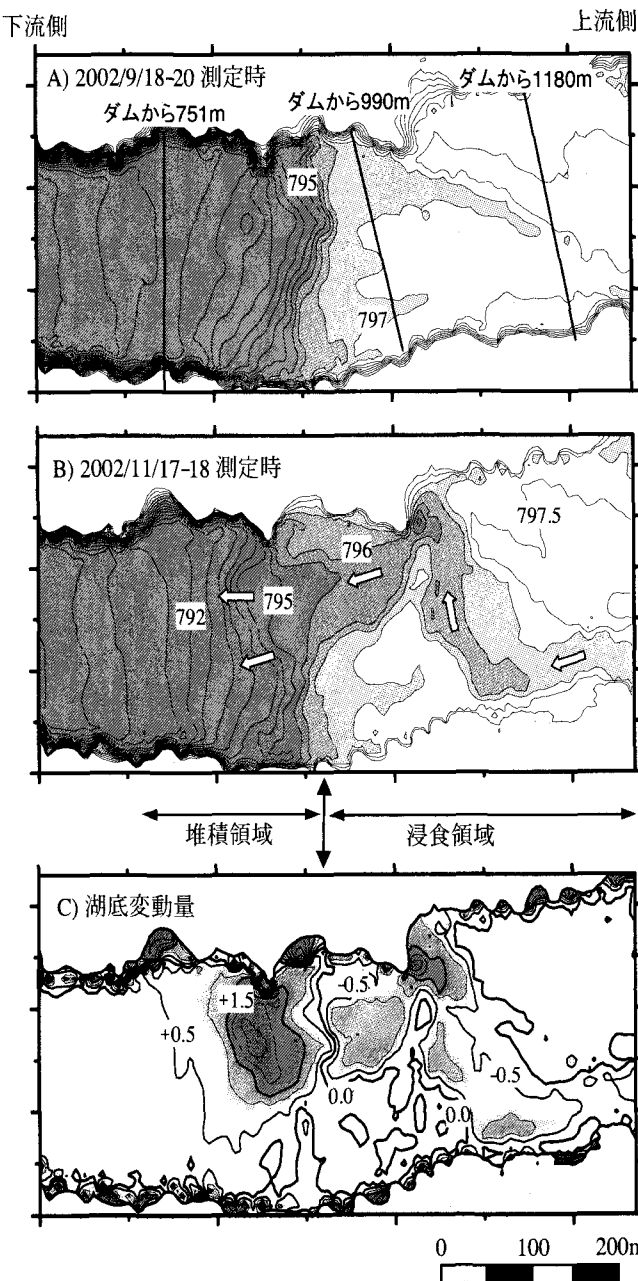


図-9 貯水位低下に伴う再移動の観測結果

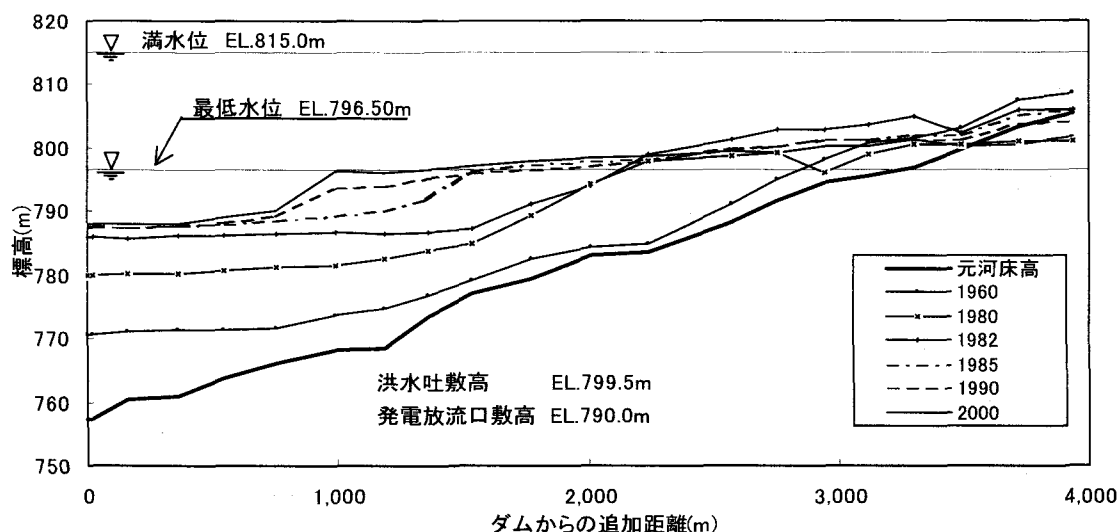


図-10 美和ダム最深河床高縦断面図

793m 以深での等高線がほぼ平行となる堆積状況が見られる。この水位低下により約 4.5 万  $\text{m}^3$  が再移動していることがわかった。なおこの付近の上流側の最深河床勾配は概ね 1/500、水位の低下速度は平均 0.2m/日程度であった。また、再移動土砂の粒径は  $75\mu\text{m}$  以下が多くを占めているものと想像される。

## (2) 貯水池内に堆積した微細粒土砂の集積の可能性

美和ダムにおける年間貯水池運用実績を図-8 に示す。これによれば年により差はあるものの、平均的には春先と秋と 2 回、水位を低下させる期間がある。

図-10 は近年の美和ダム最深河床高縦断面図を示す。美和ダムでは 1983 年の洪水の後には  $400\text{m}^3/\text{s}$  を超える洪水は生じていない。図-10 は 1985 年以降の底部堆積層の標高はあまり高くないのに対し、この間、デルタ肩は着実に延びていることを示している。このことと水位低下による再移動の観測結果から貯水池内上流側部分に堆積した微細粒土砂が通常の水位操作により再移動している可能性を窺うことができる。堆砂の再移動は土砂の粒径、圧密の状態、水位変動の履歴等で状況は異なると考えられる。しかし、通常の水位操作により再移動しているとすれば、例えばデルタ肩までの適切な集積エリアに、排砂補助システムが担う排砂量の一部を再移動により集積できる可能性は高いと言ってよい。そして、これにより機械力による集積を一部不要とすることができる。しかし、その集積量を定量的に設定するには、さらに観測を拡充し再移動の実態を把握していく必要がある。

## 5. 結論と今後の課題

ここでの検討と今後の課題を次のようにまとめた。

1) 洪水とともにダム貯水池に流入する微細粒土砂の濃度は洪水の規模、洪水の生起間隔の履歴等により大きく変化する。適切にバイパスを運用することにより、微細粒土砂の流入量さらには堆積量を減ずることが期待できる。

2) ダムからの放流機能の向上策などと併せ、低位洪水吐を導入すれば、貯水池に流入する微細粒土砂をより効率よく高濃度濁水流として通過させる手段となり得る。

3) 貯水池内上流部に堆積した微細粒土砂は毎年行われる貯水位低下操作により、相当量を貯水池内集積エリアに再移動させることが期待できる。

これらの成果は堆砂が進行しつつある他のダム貯水池の堆砂管理にも応用できる。ダムの新設の場合でも洪水吐の標高をなるべく低くすることを検討することが望ましい。具体的な計画、施設設計に必要な微細粒土砂の挙動把握についてはさらに現地観測を進める必要がある。

これらの堆砂管理による河川環境の改善および影響についても当然、並行して調査確認していく必要がある。

## 参考文献

- 1) 岡野真久、仁木兼二、松井初男、藤井隆弘：貯水池堆砂をダム下流河川に還元する排砂方式の導入、第 6 回水資源に関するシンポジウム論文集、pp201-206、2002。
- 2) 宮本高行、尾中宗久：美和ダム再開発事業の概要、ダム技術、No. 108、pp. 35-43、1995。
- 3) 浦上将人、杉山 勉：美和ダム再開発事業の概要と土砂排除技術開発の現状、ダム技術、No. 166、pp. 75-87、2000。
- 4) Morris, G. L. and Fan, J. : Reservoir Sedimentation Handbook, McGraw-Hill, p. 7-8 1997。
- 5) 道上正規、藤田正治、三木敦史：ウォッシュロードによる貯水池堆砂の 1 次元および 2 次元数値計算法、鳥取大学工学部研究報告第 23 巻、pp. 109-120、1992。
- 6) 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、第 57 回土木学会年次学術講演会講演集、II-141、2002. 9。
- 7) 桜井寿之、柏井条介、大黒真希：日本の多目的ダムにおける微細粒子土砂の捕捉と堆積、大ダム、No. 181、pp. 30-40、2002-10。

(2003. 4. 11 受付)