

一次元多層流モデルを用いた微細土砂の 貯水池内挙動解析

ANALYSIS OF FINE SEDIMENT BEHAVIOR IN A RESERVOIR BY USING A 2-DIMENSIONAL RESERVOIR HYDRODYNAMIC MODEL

梅田 信¹・岡野眞久²・東海林光³

Makoto UMEMA, Masahisa OKANO and Hikaru SHOJI

1 正会員 博(工) (財)ダム水源地環境整備センター 研究第二部
(〒102-0086 東京都千代田区麹町 2-14-2 麹町NKビル)

2 フェロー会員 (財)ダム水源地環境整備センター 理事

3 正会員 修(工) 株式会社 建設技術研究所 河川部 (〒103-0023 東京都中央区日本橋本町 4-9-11)

The behavior of fine suspended load in the reservoir was analyzed by using numerical simulation model. In this study, a vertical 2-dimensional reservoir hydraulic simulation model was employed that includes the effect of buoyancy caused by water temperature and suspended sediment. This is because density current in the reservoir caused by suspension of sediment typically shows a flow pattern in longitudinal and vertical directions. Validation of the model was tried from the view point of full year variation of sediment behavior and trap efficiency of fine sediment during each flood event. The effect of the redevelopment project being carried out was also estimated by using the model.

Key Words: dam reservoir, fine sediment, trap efficiency, numerical simulation

1. はじめに

ダム貯水池が建造されるような河川上流域において、洪水時に流送される土砂のかんりの部分は、河床材料よりはるかに細粒な土砂成分であり、ウォッシュロードに区分される。しかし大きな貯水池ができると、このような微細土砂も湖内に捕捉されるようになる。粒子自体は微細なものの総量としては大きいので、堆砂として有効貯水容量を減少させる要因となる¹⁾。また付着栄養塩も一緒に沈積するため、貯水池の水質環境にも影響を及ぼすと考えられる。

このため、洪水時における貯水池内の微細土砂挙動は、濁水の長期化も含めた水質及び堆砂の両観点から、以前より盛んに観測・検討が行われてきた²⁾³⁾。比較的最近では、坊野ら⁴⁾や梅田ら⁵⁾が、時空間的にも詳細な観測を行っている。

貯水池における洪水時の微細土砂の挙動は、密度流現象つまり貯水池内の水温構造と流入水の密度との相対関係に大きく左右される。したがって、貯水池内の土砂収支及び流動制御的な手法(例えば⁶⁾)による堆砂対策を検討するためには、密度流の効果を表現することのでき

る解析モデルを用いる必要があると考えられる。

角ら⁷⁾は、土木研究所で開発された鉛直二次元モデルを用いて、貯水池条件及び洪水流入要因と微細土砂の捕捉率の関係について検討している。しかし、彼らの用いたモデルの土砂挙動に対する検討の妥当性や検証については、十分に示されていない。上原ら⁸⁾は、ダム完成後数十年という長期間にわたる洪水時のシミュレーションを、やはり鉛直二次元モデルで行い、流入SS及び微細土砂の堆積過程の推定をしている。だが計算負荷を軽減させるために、洪水後すぐに濁質が沈殿すると仮定した処理を行っているなど、不合理な点が見られる。

本研究では、従来は水質(濁水及び富栄養化現象)解析に用いられていた一次元多層流モデル⁹⁾¹⁰⁾を微細土砂(主にウォッシュロード)の貯水池内動態解析に用い、堆砂に関する検討へと活用対象を広げようとする試みに関して報告するものである。そこで適用に際して、まず微細土砂の貯水池内における堆積過程に対するモデルの再現性に関して、検討および確認を行っている。また、土砂収支の再検討をし、恒久的な土砂対策を検討しつつある既設ダムにおいて、その対策の効果に関する予測検討を試算した。

2. モデルの構築

(1)モデルの概要

多くのダム貯水池の地形的な特徴として、横断方向のスケールが流下方向に比べ小さいということが挙げられる。そのため、貯水池内における流れ（多くの場合は密度流としての特性を有する）は、上下流方向及び鉛直方向の変化が大きいという特徴を持つ^{11), 12)}。したがって、貯水池を対象とした流動あるいは水質挙動の解析にシミュレーションモデルを用いる場合、鉛直二次元解析を実施するモデルを採用する例が多い（例えば^{13), 14)}）。

本研究で採用する解析モデルは、松尾・岩佐¹⁵⁾のモデルを基礎としたものである。これは静水圧近似を仮定した鉛直二次元解析を行う一次元多層流モデル¹⁶⁾である。基礎方程式を以下に示す。

$$\frac{D(Bu)}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial Bp}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x B \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z B \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (2)$$

$$\frac{\partial(Bu)}{\partial x} + \frac{\partial(Bw)}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{D(BT)}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x B \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z B \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{Bh}{\rho C_w} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(BC)}{\partial t} + u \frac{\partial(BC)}{\partial x} + (w - w_s) \frac{\partial(BC)}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x B \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z B \frac{\partial C}{\partial z} \right) + F_c \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 x = 流下方向座標、 z = 鉛直上向き座標、 u = x 方向の流速成分、 w = z 方向の流速成分、 p = 圧力、 ρ = 密度、 T = 水温、 C = 懸濁物質濃度、 B = 貯水池横断幅、 A_i = i 方向の実効動粘性係数、 D_i = i 方向の実効動拡散係数、 w_s = 懸濁物質の沈降速度、 h = 潜熱・顕熱及び長波・短波放射による熱フラックス¹⁷⁾、 C_w = 水の比熱である。

式(5)の最終項は、貯水池内斜面への懸濁物質の堆積フラックスを示すものであり、

$$F_c = w_s C \frac{\partial B}{\partial z} \quad (6)$$

により考慮している。本研究では、この堆積フラックスを各計算メッシュに対して出力し、後の微細土砂の貯水池内堆積量の解析や考察に用いるようにしている。

水の密度 ρ は水温と懸濁物質濃度の関数として与えている。また懸濁物質の沈降速度は、流入濁質の粒度分析結果から、ストークス則に基づいて与えることとしている。水平方向の実効動粘性係数（動粘性係数と渦動粘性係数の和）は、Richardson の 4/3 乗則から与えており、鉛直方向に関しては、松尾ら¹⁸⁾に倣い局所 Richardson 数 Ri の関数として

$$A_z = a \exp(-b Ri) + c \quad (7)$$

から求めている。ここに a 、 b 、 c は経験的に与える定数である。本研究では、次章で述べる検証計算の結果から、

$$a = 1.0 \times 10^{-4}, b = 0.5, c = 1.0 \times 10^{-5} \quad (8)$$

を設定した。

(2)土砂挙動解析の考え方

比較的規模の大きい貯水池における、堆砂に微細土砂（粘土、シルト）が占める割合は 50%以上もあるという報告がなされている¹⁹⁾。このような微細土砂は、洪水時に貯水池へ流入した際、貯水池内の密度構造に支配されながら浮遊・懸濁状態で輸送され、堆積・放流されると考えられる。したがって、このような微細土砂成分を含むウォッシュロードによる堆砂の予測や解析をするためには、密度流の効果という視点が必要だと考えられる。

そこで本研究では、従来貯水池内の水理・水質解析を行うために用いられたシミュレーションモデルを堆砂の解析に応用するものである。だが、本研究の段階では、河床変動の解析を厳密に行っているものではない。すなわち、流入した土砂が堆積することにより湖底が上昇するといったことや、いったん堆積した土砂が、洪水流入や貯水位低下などの水理条件により再移動し湖底形状が変化することなどが表現することができない。また、底泥の巻き上げに関するモデル化も組み込まれていない。従って、本モデルにより解析ができるのは、流入した微細土砂が一時的に湖底に堆積する量の分布を求めることである。そのため、本研究での解析対象として、洪水時の微細土砂の収支（捕捉率）解析と貯水池内での堆積量分布を調べる点に焦点を絞ることとなる。

堆積過程について、このような一時的な堆積という前提に対する妥当性は、議論を要するところであろう。しかしながら、貯水池の出水時における底泥の巻き上げ量に関しては、定量的な解析例は多くない。その中で、現地観測^{20), 21)}及び数値解析²²⁾による既往の検討には、流入総濁質量に比較して、巻き上げ量はかなり小さいという結果が得られている成果が見られる。貯水池ごとの流入・堆積土砂特性やそれぞれの洪水規模によっても、このような現象は変わってくる可能性があることは否定できない。例えば、文献^{21), 22)}における洪水規模 β （洪水時の総流入量と総貯水容量の比）は、それぞれ 0.3、0.1 程度と比較的小規模な洪水である。それに対して、底質の粒度組成は、どちらもシルト・粘土分が主体となっている。従って、次章で検討するダムにおける条件と流量規模の点で異なっている。しかし、これら既往の検討を参考に、本研究では土砂（底泥）の巻き上げ量は、流入量に比較して無視できる程度のものであると考えて、検討を進めることとする。

3. モデルの現地適用

(1)対象ダムの概要

前章で述べた解析モデルを天竜川水系三峰川の美和ダムに適用し、このダムにおける微細土砂の堆積特性について検討した。

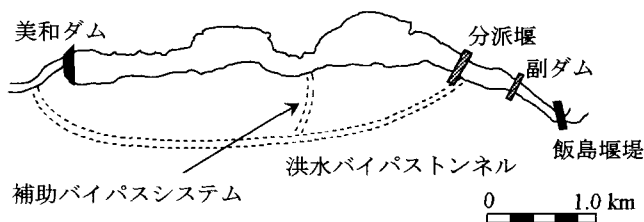


図-1 美和ダム貯水池平面図

美和ダムは、総貯水容量 $3.0 \times 10^7 \text{ m}^3$ 、堤高 69.1m の洪水調節、不特定及び発電を目的とする国土交通省管理の多目的ダムである。流域面積は 311.1 km^2 であるが、その内に 3,000m 級の山々が連なる南アルプス西側斜面を含み、中央構造線や断層が南北に走る。このため大規模な崩壊地も多く、流出土砂量が極めて多いのが流域の特徴である。

美和ダムは竣工直後から洪水調節に大いに寄与したが、上述のような流域特性のため、すでに大量の流出土砂が貯水池内に堆積している。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補給を維持するための再開発事業²³⁾が1989年から実施中である。主な事業内容は、堆砂の掘削搬出による貯水容量の確保と流入土砂を迂回させる洪水バイパスの整備である。事業に関連する施設のうち、貯砂ダムは1993年に暫定完成し、洪水バイパス及び分派堰は2001年に着工している。これらの施設を含む貯水池平面図を図-1に示す。

(2) 検討の方針

本論文では、前節で述べた事業における具体的計画において、洪水時の土砂解析・予測を行うモデルの構築を目標としている。しかし、管理ダムにおいて蓄積されているデータは、量的・質的に偏りがあったり不足したりしていることが多い。特に流入土砂については、洪水時のSSとして量的な把握はある程度されている場合であっても、組成（例えば粒度）まで測定されている事は、多くない。実務的には、データの蓄積を図ると同時に、事業の計画・解析検討を進める必要がある。そのような中、どのような方向性で予測解析を行っていかれるかと言う点に関して、本論文では検討している。

本モデルの適用性を確認するために、まず水質モデルとしての検証計算を実施した。検証対象期間は、近年で比較的大きな規模の出水が生じており、かつ出水中の貯水池流入SSの観測が実施されている1991年、1997年、1999年の3ヶ年を選定した。検証計算は、選んだ各年の通年で水温及びSSのシミュレーションを行った。その計算結果に対して、月1回の頻度で実施されている貯水池内の水質（水温・SS）鉛直分布と放流水質について、実測値と比較した。なお3ヶ年のうちで、特に出水後に湖内のSS分布が測定値として得られている1997年を中心に検証結果の検討をした。

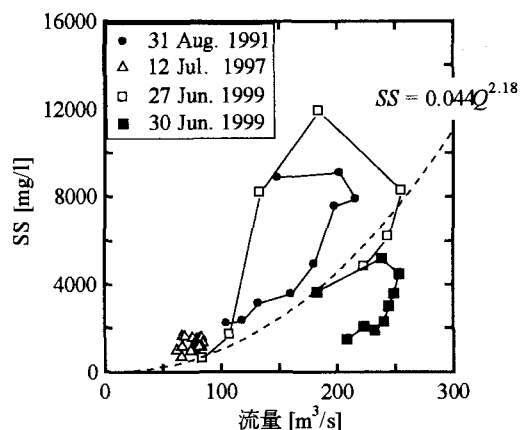


図-2 ダム流入量とSSの関係

表-1 検証計算で設定した流入濁質の粒度組成

粒径区分	代表粒径	存在比
~5 μm	4.0 μm	36.3%
5~10 μm	10 μm	16.4%
10~20 μm	15 μm	19.1%
20~40 μm	30 μm	18.5%
40~ μm	50 μm	9.7%

次に各検証年に対して、その年及び前年の堆砂測量結果の差を取り、年間の実績堆砂量分布を推定した。この結果と計算から求めた堆積量の分布を比較し考察した。

そして、最後に美和ダムの再開発事業において実施が検討されつつある貯水池掘削及び低部放流口設置の効果についての検討を行った。

(3) 水温・SSの検証計算

(a) 計算条件

洪水時におけるダム流入部（飯島堰堤地点）での流入SSの観測は、1988年以降概ね $50 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上の洪水を対象として実施されている。例として図-2に各検証年の最大の洪水における流量とSS濃度の関係を示す。流量とSS濃度の関係は経時的に右回りのループを描き、増水時の方が減水時よりもSS濃度が高くなるのがわかる。この現象はいずれの年の観測でも同様の傾向が見られる。このようなループ特性が貯水池内の土砂収支に大きく影響すると考えられる。そこで計算実施にあたり、観測が実施された洪水期間中には、観測値から求めたSS時系列を流入条件として与えることで、このような特性が考慮できるものとした。なお観測値がない期間については、図-2に点線で示した流量とSSの相関式

$$SS = 0.044Q^{2.18} \quad (9)$$

から流入SS濃度を与えた。

流入SSの粒度組成は、1989年の出水時に実測がなされている。このときの平均的な粒度分布から、表-1に示す粒径区分を設定した。これに対し、各粒径成分についての移流・拡散式（式(5)）により解析し、全成分の線形和を総SSとした。

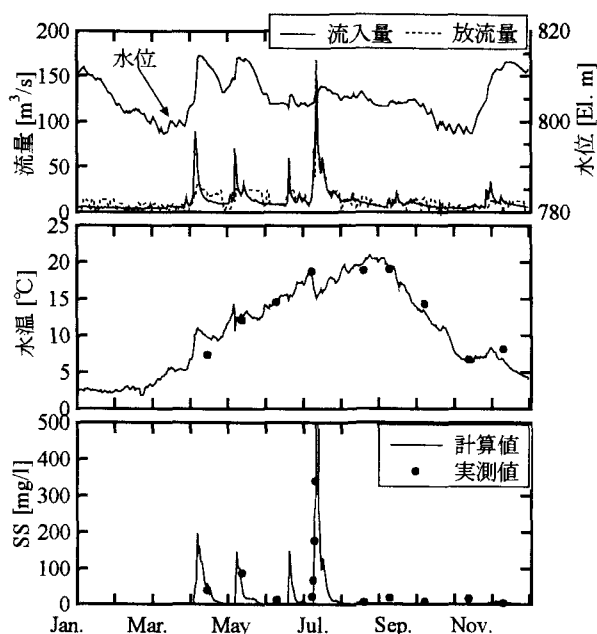


図3 放流水質の検証計算結果 (1997年)

貯水池の流入量・放流量は、ダム管理日報に基づいて与え、熱収支計算のための気象条件は、ダムから10～20km程度の距離に位置する近傍の気象庁観測所の実測値から推定した。

(b) 計算結果

検証計算を実施した3カ年のうち、出水後のSS分布が捉えられている1997年に対して、水温とSSに関して実測値と計算値の比較したものを図-3及び図-4に示す。図-3は、通年の放流水温・SSの計算値と実測値を時系列で比較したものである。実測頻度が低いため、細かな変動を追うことができないが、年間での変動は概ね再現できていると考えられる。

一方図-4には、ダムサイト付近における水温・SSの鉛直分布を示した。実測については、やはり時空間的に測定間隔が大きくまばらではあるため、細かな精度での検証は必ずしもできなかった。モデルパラメタのうち、特に粒度組成はSSの計算結果に大きく影響する。実際には、同一貯水池の流入とはいえ、洪水によりある程度の差が生じていると考えられる。本論文では、計算を実

施した3ヶ年で平均的に傾向を表現できた表-1の値を設定した。

(4) 土砂堆積の検証結果

微細土砂の堆積量の計算結果を実測値と比較して図-5に示す。この計算結果の堆積厚さは、SSの重量分布として得られた出力値に対し、空隙率0.7、土粒子密度 2650kg/m^3 として整理したものである。また実測値は、当該年及びその前年の堆砂測量結果（最深河床位置）の差を取ることで推定した。図-5によれば、堆砂形状の傾向は概ね再現しているように思われる。しかし、堆積厚の絶対値としては、全体的に実測値が計算値を下回っており、最大で1m以上の差が見られる。この理由として、次の2つの可能性が考えられる。

まず一つ目には、美和ダムでは図-3に示した水位の年間変動にも見られるように、毎年9月から11月頃にかけて水位を低下させている。この水位低下に伴い、特に貯水池の上流部で、堆積土砂が再移動して下流部へ運ばれている可能性がある。そのため実測の堆積分布は、洪水時の堆積量に、その後の再移動量が重ね合わせられたものではないかと考えられる。

二つ目の理由として、実績堆砂量には、主に貯水池の上流端付近で実施されている掘削による変化量を含んでいる事が挙げられる。しかし、掘削土砂の組成や詳細な掘削位置についてのデータが無いため不明である。また、掘削された土砂が、その年に堆積したものとは限らないということも想定される。

通常の管理ダムで入手可能な貯水池内の土砂堆積データとして、年一回の頻度で実施される堆砂測量のデータにより、モデルの検証を試みた。しかし、本研究の対象ダムでは、再移動量や掘削量と言った要素が含まれることから、洪水時の土砂挙動解析に重点を置いた本モデルの検証データとしては、十分では無いと言える。

(5) 微細土砂捕捉率に関する考察

対象とした美和ダムの測量データのみでは、土砂堆積に関する検証が必ずしも十分にできないことが分かった。そこで、微細土砂の捕捉率について、文献^{21), 24)}の実測値

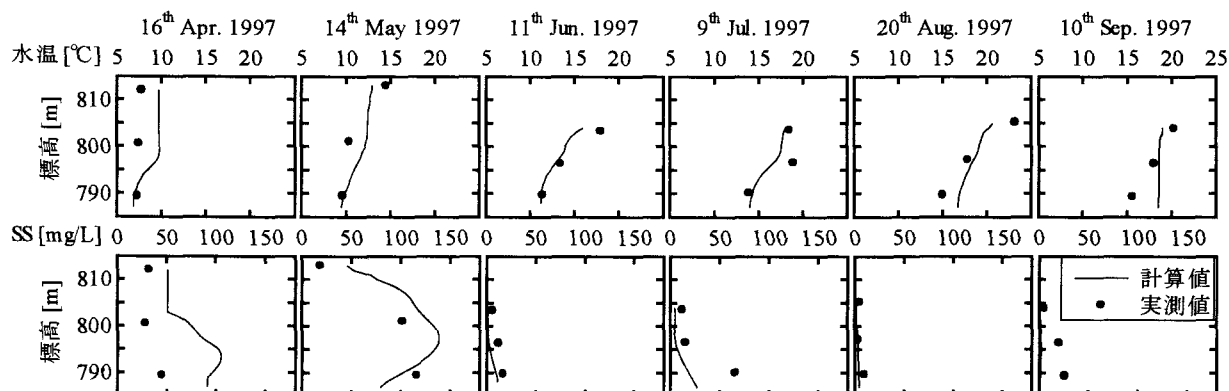


図4 貯水池内の水質（水温・SS）の検証計算結果 (1997年)

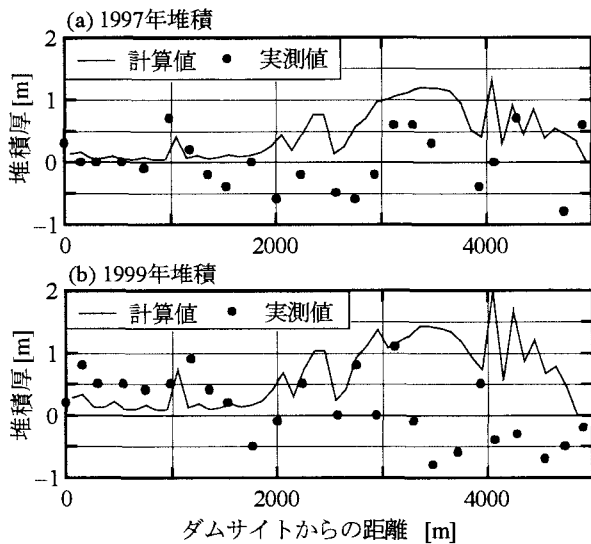


図-5 土砂堆積厚の検証計算結果（1997年・1999年）

と比較した。図-6は、検証計算を実施した3ヶ年から洪水を抽出し、洪水規模（出水時回転率）と微細土砂の捕捉率をプロットしたものである。文献値のプロットは、洪水規模が1前後と10前後に分布している。特徴として、洪水規模が概ね5以下まで直線的に右下がりになっているが、5以上となると急激に捕捉率が低下するという傾向を示している。本研究で得られた計算結果では、洪水規模が概ね文献値で空白となっている洪水規模の区間を埋めるような洪水となっている。そのような規模の洪水において、文献値での捕捉率のばらつき（20%程度広がり）の範囲で継続する右下がりの傾向が得られている。この結果から、概ね本研究で検討したモデルで出水時における微細土砂の堆積過程が表現されていると判断して差し支えないものと思われる。

(6)再開発事業後の洪水時土砂量の検討

前章の検討により、洪水時の土砂挙動の解析に対する有効性が概ね示されたと考えられる。そこで、つぎに美和ダムの再開発事業完成時における土砂収支及びその効果について検討した。解析の対象として想定する洪水は、美和ダム供用開始後において最大であった1982年8月洪水とした。この洪水における最大時間流量は $1210\text{m}^3/\text{s}$ であり、これは美和ダムの現在の計画高水流量規模に当たる。当該洪水における流量の時間波形を図-7に示す。ここで留意点として、“放流量”はダムのゲート放流のみではなく、図-1に示した洪水バイパスを通した放流（現計画値）も表示している事が挙げられる。

検討を実施する項目は、規模などの点で現在計画が検討中である洪水吐の標高及び貯水容量を確保するための貯水池底掘削量とした。洪水吐の敷高は、現在の洪水吐（標高799m）と密度流の効果により排砂効率向上が期待される低位洪水吐（標高790m）を設定した。貯水池底の掘削は、主として上流部を掘削することになる標高800m以浅の掘削ケースと中流部まで掘削することにな

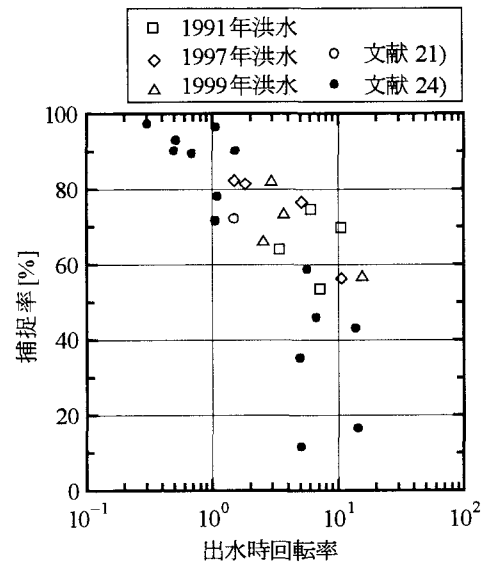


図-6 検証計算期間に生じた洪水における捕捉率

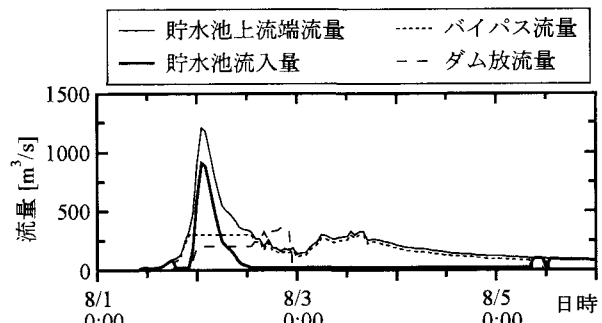


図-7 1982年洪水時の設定流量時系列

る標高792m以浅の掘削ケースの2通りとした。それぞれの組み合わせから、合計4ケースの解析を行った。

洪水吐標高と貯水池掘削標高による貯水池内堆積量・捕捉率について、解析結果を表-2にまとめた。今城・角²⁵⁾は、美和ダムにおける2001年9月洪水（最大流入量 $300\text{m}^3/\text{s}$ ）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-2のように、土砂排出効果はそれほど大きくない。この原因として、次の二つが考えられる。

まず、本論文の対象洪水は、規模が大きいために流入開始後さきわめて短時間で全層混合となった事が挙げられる。そのため、密度流としての濁水挙動を利用して排出効率を高めるという施設計画の意図が、十分に達せられていない。二点目として、現時点でのバイパスの運用計画が、洪水期制限水位に戻ったところでダム・ゲート放流からバイパス放流に変える運用となっている。そのため、洪水後半に貯水池内の回転率が落ち込んでいることなどが、原因として考えられる。

表-2の結果は、当該洪水における微細土砂の全流入量約130万 m^3 に対し、洪水吐を低標高に変えることで約2～4万 m^3 を減少できることを示している。計画堆砂量260万 m^3 から見て、この減少量の評価は分かれよう。しかし、上述のバイパス運用方針などと併せ、低位洪水吐

表-2 再開発後の条件における1982年8月洪水に対する
土砂通過効果の比較

掘削 標高	放流口 標高	貯水池内堆積量		捕捉率
El. m	El. m	10 ³ ton	10 ³ m ³	%
800	799	537.8	364.8	51.5
800	790	517.8	351.1	49.6
792	799	579.5	728.9	55.5
792	790	539.5	678.6	51.7

の導入は今後積極的に検討されるべき課題であろうと考えている。

4. おわりに

本研究では、ダム貯水池における微細土砂（主にウォッシュロード分）による堆砂量の検討方法に関する試みとして、密度流の効果を表現することができる鉛直二次元流動モデルを用いた解析を実施した。

本論文は、解析の対象として、美和ダム貯水池を選定し、モデルの検証及び現在行われつつある再開発事業の効果に関して予測計算を行った結果について報告したものである。モデルの検証においては、貯水池内の堆積量の分布などに関して十分な確認が出来なかったものの、洪水ごとの微細土砂の捕捉率については、概ね妥当な値が得られることが分かった。

本研究で用いたモデルは、元来水質解析のために開発されたものである。従って、河床変動の計算、すなわち土砂の堆積により湖底の形状が変化することや一旦堆積した土砂が洗掘されることなどが表現されていない。そのため現段階では、一洪水における貯水池内の土砂収支について検討することに特化せざるを得ないところがあると言える。より長期的な貯水池内の微細土砂挙動を解析するためには、上記のような課題点に関して改良を加えていく必要があると考えている。

謝辞：本研究の実施に当たり、国土交通省中部地方整備局三峰川総合開発工事事務所には、データの提供をはじめとして様々な点で便宜を図って頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Fan, J., and Morris, G. L.: Reservoir sedimentation. I: Delta and density current deposits, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.118, pp.354-369, 1992.
- 2) 足立昭平, 中村俊六: 横山ダム貯水池における洪水時の濁水調査, 水理講演会論文集, 第21巻, pp.15-20, 1977.
- 3) 村本嘉雄, 道上正秋, 藤田裕一郎: 貯水池における微細粒子の堆積と濁度に関する調査, 水理講演会論文集, 第21巻, pp.21-26, 1977.
- 4) 坊野聡子, 清水康行, 黒木幹男, 藤田睦博, 吉田義一: ダムを含む河川の流砂と河床変動に関する研究, 土木学会論文集, No.656/II-52, pp.61-72, 2000.
- 5) 梅田 信, 横山勝英, 石川忠晴, 銭 新, 高橋迪夫: セケ宿

- 貯水池における濁質の流入・流動・堆積過程に関する観測と数値シミュレーション, 土木学会論文集, No.656/II-52, pp.255-268, 2000.
- 6) Oehy, C., D. and Schleiss, A. J.: Numerical modeling of a turbidity current passing over an obstacle – practical application in the Lake Grimsel, Switzerland, *Proceedings of the 2001 International Symposium on Environmental Hydraulics*, 2001.
 - 7) 角 哲也, 高田康史, 岡野眞久: ダム貯水池における洪水時の微細土砂流動特性と捕捉率に関する考察, 河川技術論文集, 第9巻, pp.353-358, 2003.
 - 8) 上原英之, 梅田 信, 石川忠晴: 秋田県皆瀬貯水池における濁質堆積特性について, 土木学会第56回年次学術講演会, pp.202-203, 2001.
 - 9) 関根秀明, 吉田延雄, 梅田 信, 浅枝 隆: 曝気式循環施設の理論とその効果に関する考え方, ダム工学, Vol.13, pp.5-18, 2003.
 - 10) 堀田哲夫, 浅枝 隆, 富岡誠司, 陳 飛勇, 山下芳浩, 東海林光: 下層密度流によるダム貯水池の濁水長期化現象とその対策, 水文水資源学会誌, 第16巻, pp.236-245, 2003.
 - 11) Akiyama, J. and Stefan, H.: Turbidity current with erosion and deposition, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.111, pp.1473-1496, 1985.
 - 12) Parker, G., Garcia, M., Fukushima, Y. and Yu, W.: Experiments on turbidity currents over an erodible bed, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.25, pp.123-147, 1987.
 - 13) Chung, S. and Gu, R.: Two-dimensional simulations of contaminant current in stratified reservoir, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.124, pp.704-711, 1998.
 - 14) Farrell, G. J. and Stefan, H. G.: Mathematical modeling of plunging reservoir flows, *Journal of Hydraulic Research* Vol.26, pp.525-537, 1988.
 - 15) 松尾直規, 岩佐義郎: 合流部を有する貯水池での富栄養化シミュレーション, 水理講演会論文集, 第29巻, 359-364, 1985
 - 16) 岩佐義朗編著: 数値水理学, 丸善, 1995.
 - 17) Huber, W. C., Harleman, D. R. F. and Ryan, P. J.: Temperature prediction in stratified reservoirs, *Journal of the hydraulics division, ASCE*, Vol.98, pp.645-666, 1972.
 - 18) 松尾直規, 山田正人, 宗宮功: 貯水池上流端における流動特性と淡水赤潮現象との関係, 水工学論文集, 第40巻, pp.575-581, 1996.
 - 19) 櫻井寿之, 柏井条介, 大黒真希: 日本の多目的ダム貯水池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.
 - 20) 森田弘昭: 洪水時汚濁負荷の湖水質に及ぼす影響—湖内粒子態栄養塩の挙動について, 水質汚濁研究, Vol.12, pp.37-45, 1989.
 - 21) 梅田 信, 富岡誠司: ダム貯水池における洪水時微細土砂の流下過程について, 河川技術論文集, 第9巻, pp.359-364, 2003.
 - 22) 梅田 信: 貯水池に流入する洪水時濁水の三次元流動解析, 東京工業大学学位論文, 2001.
 - 23) 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.
 - 24) 柏井条介: ダム貯水池における細粒成分の捕捉率に関する一考察, ダム技術, No.181, pp.21-28, 2001.
 - 25) 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.

(2003.9.30 受付)