

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

BEHAVIOR OF FINE SEDIMENT IN A RESERVOIR CARRIED BY A FLOOD

梅田 信¹・富岡誠司²
Makoto UMEDA and Seiji TOMIOKA

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正会員 (財)ダム水源地環境整備センター 研究第二部

Extensive field measurements were carried out in a dam reservoir during a flood for the purpose of pursuing the behavior of fine sediment in a reservoir. Inflow and outflow sediment concentrations were measured every 2 hour during the flood. After the storm had passed, vertical profiles of water temperature and turbidity were measured every day for 10 days.

The trap efficiency of fine sediment in the reservoir was analyzed using the data above. The trap efficiency for the whole sediment was 72%, which was plotted on the lower boundary of Brune's curve. Trap efficiencies of grain size components were also estimated. Grain components below $3\mu\text{m}$ had the same efficiency of about 30%, while all the sediments larger than $100\mu\text{m}$ were trapped in the reservoir.

Key Words: dam reservoir, fine sediment, resuspension, trap efficiency, field measurement

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かなりの部分は、河床材料よりはるかに細粒な濁質であり、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、微細な濁質も湖内に捕捉されるようになり、その量の大きさのために、有効貯水容量に影響を及ぼす。また、付着栄養塩も堆積するため、貯水池の長期的な水質環境に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濁水・微細土砂挙動は、特に濁水の長期化という水質現象の観点から、以前より盛んに観測が行われてきた^{1),2),3)}。また比較的最近では、坊野ら⁴⁾や梅田ら⁵⁾が、時空間的に詳細な観測を行っている。このような研究の多くにおいて、貯水池における微細土砂の挙動は、堆砂および水質という貯水池内の問題として捉えられる事が多かった。

しかし近年では、ダム下流の生態系への影響や流域土砂管理といった水系一貫の環境面からの関心が多く寄せられている。坊野ら⁴⁾は、ダム湖を含んだ河川を対象として、ウォッシュロードも合わせた土砂成分に対し、河床変動の検討をしている。河田ら⁶⁾は、天竜川水系を対

象として、海岸土砂収支に対するダムの影響を検討している。

これらの研究成果から言えるのは、ダムを含む河川での土砂収支を考える上で、単なる総量のみの議論では、不十分であるということである。特にウォッシュロードのような微細な成分の挙動を検討する場合、粒度という質的な収支の観点が重要であると考えられる。しかし、貯水池における微細土砂の挙動に関して、粒径成分に分けて解析した例は、数値シミュレーションによるもの⁷⁾が見られる程度であり、現地観測データから定量的に解析した例はほとんど無い。

本研究では、東北地方のXダム貯水池を対象に、洪水時における微細粒土砂の挙動について、時空間的に詳細な観測を行った。その結果を基に、貯水池による微細粒土砂の流下過程について考察した。特に、粒度別に貯水池内の微細土砂収支についてとりまとめた。

2. 現地観測方法

(1) 観測対象ダムの概要

現地観測を行ったXダムは、東北地方に位置する、流域面積が 172km^2 、総貯水容量は $3.1 \times 10^7\text{m}^3$ の中規模な貯水池である。貯水池の平面図を図-1に示す。この貯水池

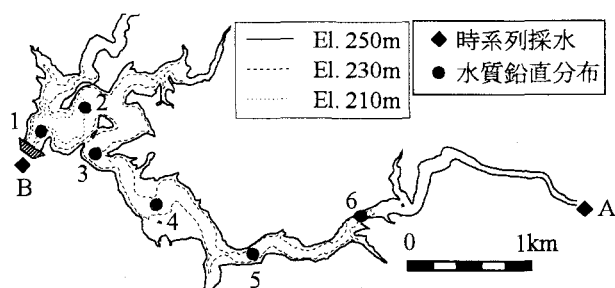


図-1 Xダム貯水池平面図と観測地点

の流域における土地利用は、森林が87%とほとんどを占めている。また流出土砂量の指標と考えられる裸地・崩壊地の面積率は、約3%となっている。この貯水池は、竣工から現在約40年が経過しているが、1997年6月に実施された堆砂測定の結果では、堆砂容量に対する堆砂率が45%となっている。したがって、堆砂の進行が計画をやや上回っており、本貯水池において、土砂量のモニタリングは重要な課題だと考えられる。

(2) 観測の概要

現地観測は、2001年8月22日に台風通過の際に発生した洪水時に行った。観測項目は、貯水池上流端及びダム放流地点における流入水と放流水の採水・分析及び貯水池内の多地点における水質の鉛直分布計測である。

流入及び放流水の観測は、洪水発生直前である8月22日13時から流量の低減した8月24日11時まで2時間間隔で採水を行った。また、その後は1日～数日間隔の計測とし、洪水後2週間の9月7日まで継続した。流入水の採水地点は、常時満水位における背水区間の直上流である地点Aで行った。放流水の採水は、地点Bにおいて、洪水吐き及び発電放流の両者について行った。測定・分析項目は、水温・濁度・SSの3項目を採水した全サンプルに対して行った。また流入水に対しては、粒度分析を、流量の増減に合わせて採取した4サンプルについて実施した。分析は、レーザー回折・散乱式（Honeywell 製 MICROTRAC HRA 9320-X100）により行った。

貯水池内の水質分布計測は、洪水発生当日である8月22日から31日までの10日間に渡り、1日1回の頻度で行った。またその後は、週1～2回程度の頻度とした。観測地点は、図-1に示した6地点である。多項目水質計（アレック電子(株)製ATU70-D）を用いて、水深方向0.5m間隔で水温と濁度の測定を行った。また、濁度とSSの関係のチェックなどのために、地点1における4水深（水深0.5m、湖底上0.5m、半水深、最高濁度層）において採水し、濁度・SS及び粒度組成（最高濁度層のみ）の分析も行っている。

これらの洪水時観測とは別に、2000年12月に底質採取調査も実施している。地点1、5においてコアサンプラー（(株)離合社製）を用いて、表層から20cm程度の厚さを採取した。採取後、5cm厚ずつに切り分け、レーザー回

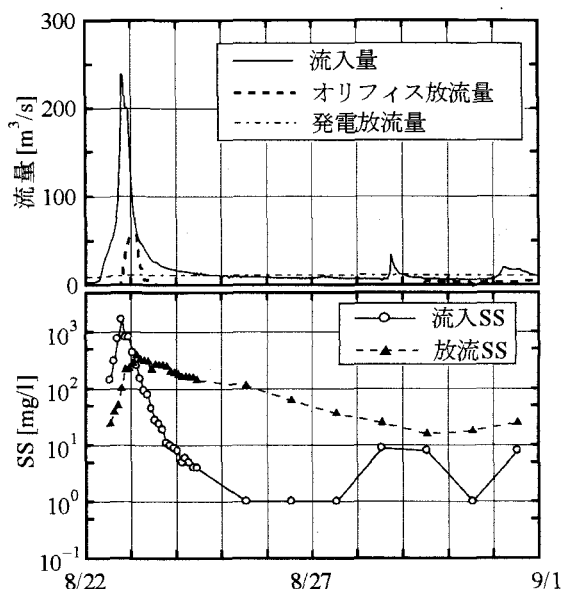


図-2 洪水時流入・放流時系列の観測結果

折・散乱式粒度分析装置（島津製作所製SALD-3000）により粒度分析を行った。

3. 観測結果

(1) 流入・放流時系列

図-2に流入及び放流水の観測結果を示す。上から流入量・放流量、流入SS・放流SSの時系列を示している。調査対象とした洪水の降雨は、8月22日0時頃より降り始め、17時に時間最大雨量 18 mm/hr（ダム流域平均）となった。また同日22時までの総降雨量は132mmであった。

洪水前の貯水位は約EL.227mであり、洪水期間を含めて制限水位EL.237.5mには達していない。発電放流は表層放流（水面下2.5m）であり、洪水はオリフィスゲート（EL.230.0m）より放流されている。洪水時の総流入量と総貯水容量の比として定義される洪水規模 β^0 は、0.34であった。この値からすると小規模洪水と言えるが、貯水容量として、洪水前の貯水量を考える出水時回転率 η^0 を見ると1.5である。

流入河川のSSは、流入が洪水ピーク時に1600mg/Lを超えているが、洪水終盤（8月23日15時）には、25mg/L以下（環境基準AA類型）まで低下する。放流水は、最高で400mg/L近い値となっているが、流入と比較すると、約4分の1まで希釈されていることになる。しかし、次節のデータに見られるように、貯水池内において濁水が滞留することにより低減が遅く、洪水5日後の8月28日になって25mg/L以下となる。

(2) 貯水池内水質分布

貯水池内の水温・濁度の鉛直分布の観測結果を図-3に示す。右から順に上流側の観測地点の結果となっており、これを観測日ごとに、縦の並びで示した。ここでは、時

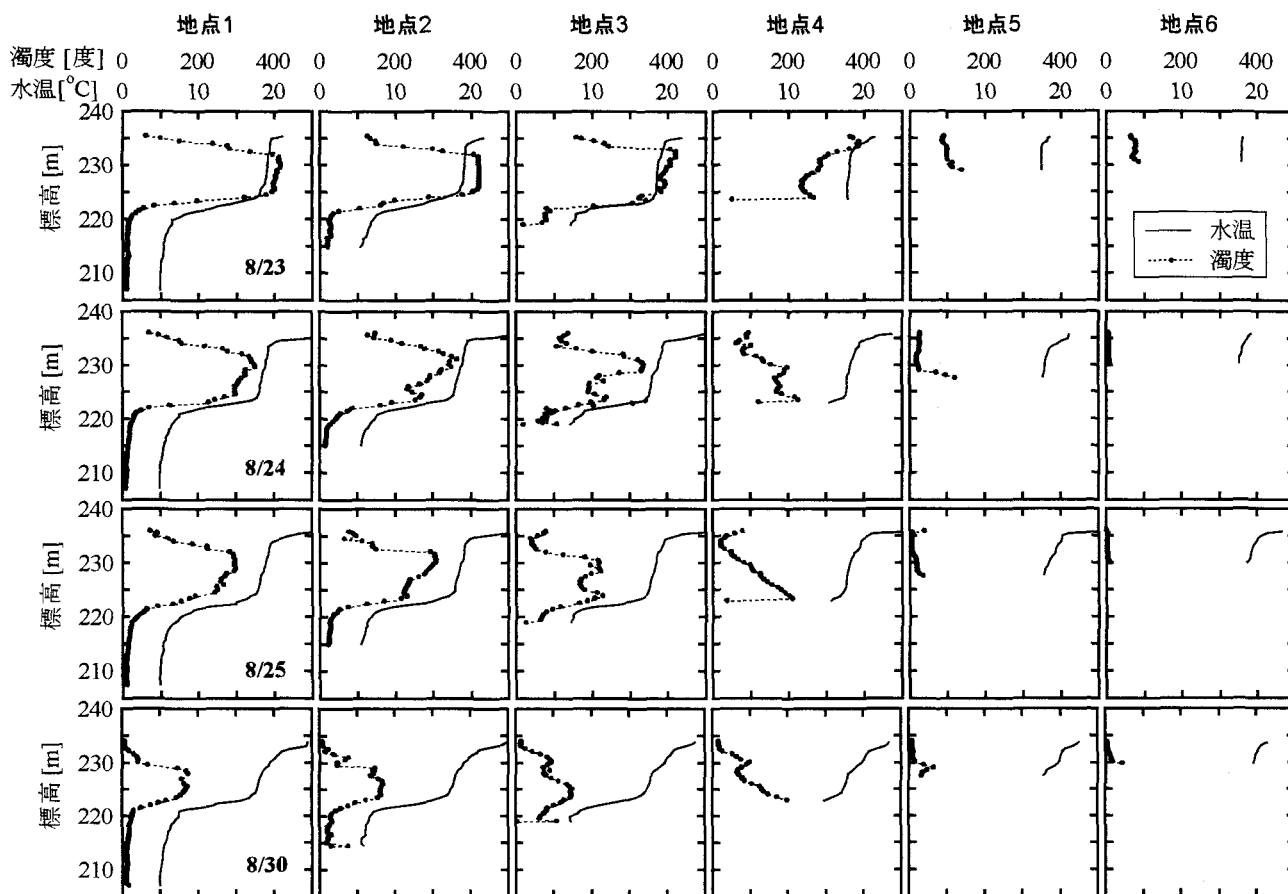


図-3 貯水池内における水温・濁度の鉛直分布の観測結果

間的な変化が比較的大きい洪水後の3日間（8月23～25日）と洪水から1週間後の8月30日を示した。また図-4には、貯水池下流端の地点1における濁度の鉛直分布を時間的な変化として示している。

Xダム湖内では、洪水前にEL.224m付近に水温躍層が形成されていたことを確認している。洪水によって若干躍層位置が下がるものの、強固に維持されていた。

図-4の濁度の鉛直分布を見ると、水温躍層の上層に高濁度層が形成されていることが分かる。洪水後には、時間の経過とともに、徐々に濁度が低くなっている。しかし、洪水から2週間が経過した9月7日においても、水温躍層上部に100度近い濁度が残っている。

図-3より、水温の鉛直分布は、流下方向に概ね一様であると言える。それに対して、濁度の鉛直分布には、以下のような特徴がある。貯水池中流部に当たる地点4では、洪水後に底層ほど濁度が高い分布を示している。この地点では、水温躍層と湖底がちょうど交わっていることが、水温のデータから分かる。また中流域であることから、上流から流れ込む清水と下流部に滞留している濁水とが、ぶつかり合うように均衡している状態だと思われる。それに対して、下流側の地点1～3においては、躍層上部への濁水貫入が、概ね一様な類似した分布を示している。また上流側の地点5と6においては、比較的速やかに清水化している。このように濁度の分布は、湖底地

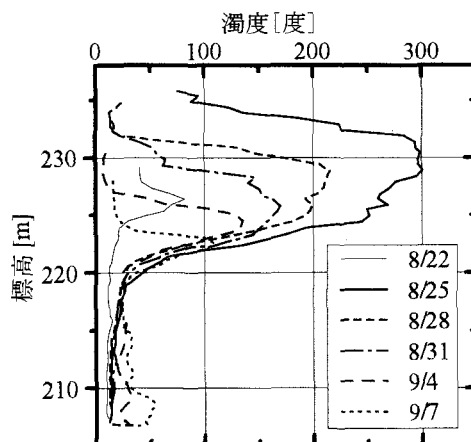


図-4 地点1における濁度鉛直分布の時間変化

形の影響や流入・放流水などの影響により、ある程度の空間分布が生じていることが分かる。

(3) 粒度組成

流入地点（地点A）における濁質の粒度組成を図-5に示す。分析は、流量のピークを挟んで6時間間隔で行った。洪水後半である流量低減時には、細粒分の割合が多くなっていることが分かる。また図-6は、貯水池内における最高濁度層で採水した試料の粒度組成である。洪水当日である8月22日の採水時には、すでに流量の立ち上りが生じていた。その流入SS分が採水されたため、堆積

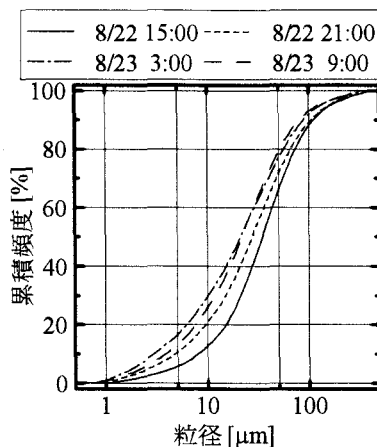


図-5 洪水時の地点Aにおける濁質の粒度組成

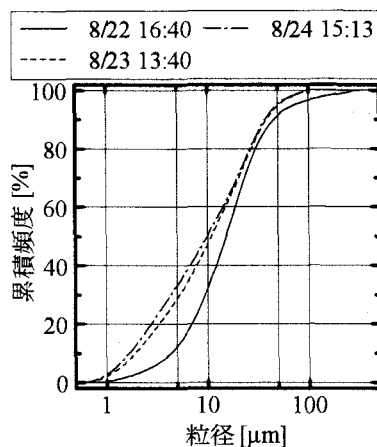


図-6 貯水池内浮遊濁質の粒度組成

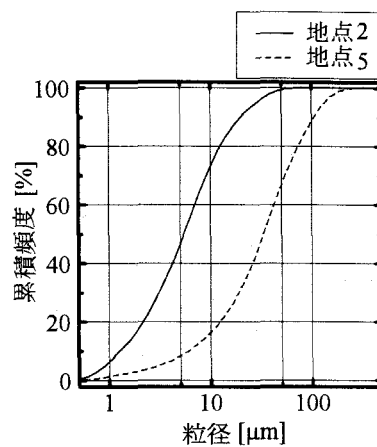


図-7 貯水池内底質（表層）の粒度組成

途中の粒径成分も含んでいた可能性がある。それに対して、洪水後には、50%粒径がおよそ $10\mu\text{m}$ となっている。流入水の50%粒径が $20\sim 30\mu\text{m}$ であったのに比べて、かなり細粒化している。このことから、比較的粗粒な成分（数十 μm 以上）は、流入後一日以内に速やかに堆積していると考えられる。そのため浮遊濁質は、非常に細かい粒子が多くなっていることが分かる。

図-7に、貯水池内底質の粒度分析結果を示す。これは、表層から5cmまでの堆積物について、粒度分析を実施した結果である。これによると、貯水池の中～下流部でかなり粒度が変化しており、中央粒径で下流（地点2）が $6\mu\text{m}$ 、中流（地点5）が $35\mu\text{m}$ となっている。このように、堆砂の面からも、この貯水池では微細土砂の挙動を把握することが重要であることが分かる。

4. 濁質負荷量収支

(1) 濁度とSSの換算

前章で示した観測結果を用いて、洪水時における貯水池内での濁質収支について解析を行った。その際、濁質量の収支として考えるためには、貯水池内で計測された濁度をSS値に換算する必要がある。そこで、濁度とSSの相関関係式によりSSの鉛直分布を推定することとした。濁度とSSの相関式はSt.1における4水深の濁度とSSの測定値から作成した。その結果、図-8に示すように

$$C_{SS} = 0.64D_h - 0.86 \quad (1)$$

の関係が得られた。ここに D_h ：採水分析濁度[度]、 C_{SS} ：採水分析SS[mg/L]である。また定数項(0.86)は、SSが0であっても、コロイド成分などにより生じている濁りに対応する値を示していると考えられる。

水質計による現地測定濁度と採水分析による濁度の相関についても、別途求めているので、水質計により現地計測した濁度からSSへの換算を行うことができる。なお、図-3に示した濁度は、採水分析による濁度値に換算済みの値である。

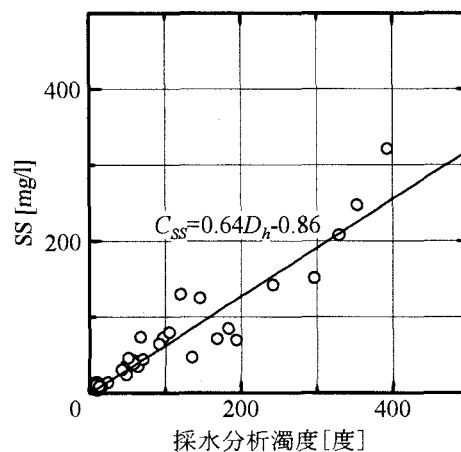


図-8 貯水池内の採水分析による濁度とSSの相関

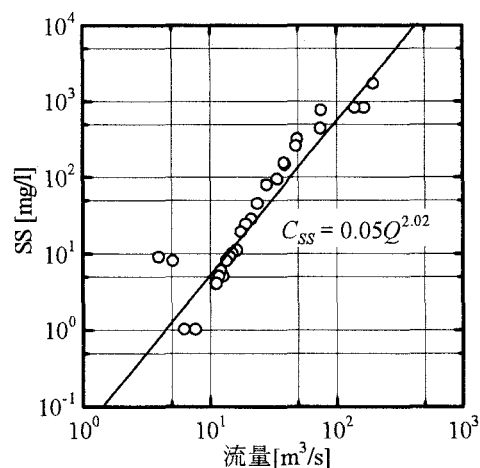


図-9 洪水時の地点Aにおける流量とSSの相関

(2) SS総量の収支計算

貯水池の流入及び放流のSSフラックスは、つぎのように推定した。まず流入SSは、洪水時における2時間間隔の採水データと貯水池流入量を乗じることで求めた。また、2時間間隔での採水が終了した後については、流量と負荷量の関係式を採水分析によるデータから作成し、各時刻の流量からフラックスを推定した。地点Aにおける流量とSSの関係をプロットすると図-9のようになる。流量とSSの関係式は、最小二乗法により

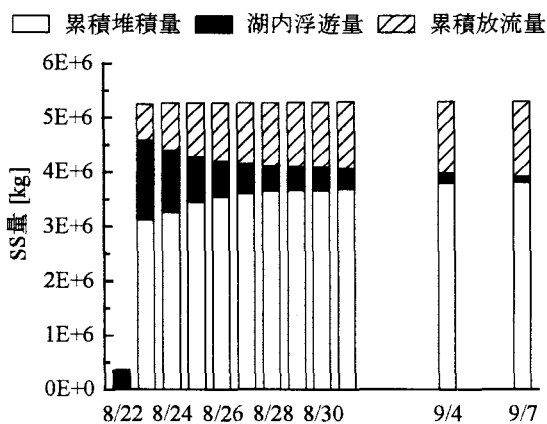


図-10 貯水池内における微細土砂収支の時間変化

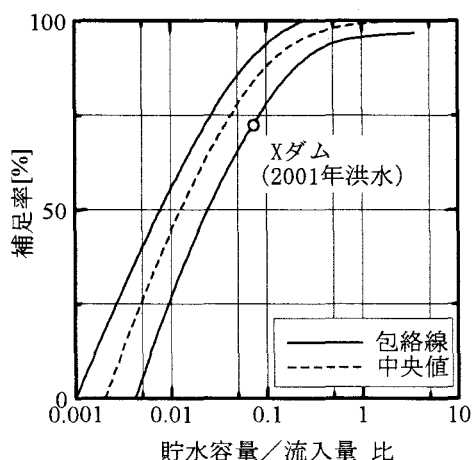


図-11 Bruneの捕捉率曲線とXダムにおける観測結果

$$C_{ss} = 0.05Q^{2.02} \quad (2)$$

が得られ、上記のSSフラックスの推定には、この式を用いた。

放流SSフラックスについては、実測SS値を時間的に線形内挿し、各時刻のSSを算出した。これは、流入SSのように流量と濃度の相関が無いためである。これにダム放流量を乗じてSSフラックスとしている。

貯水池内の浮遊SS総量は、貯水池内の濁度測定結果および別途詳細に計測した湖底形状のデータから算出した。濁度の測定値は、式(1)の関係によりSSに換算して用いた。貯水池内の空間分布を考慮するために、流下方向に200m、鉛直方向に1mのメッシュを設定した。これに各メッシュに対応する地点の貯水池横断幅を掛け合わせることで各メッシュの体積が算出できる。各メッシュに対応するSSは、図-1に示した測点における計測値を、貯水池縦断方向に対して線形に空間内挿をして設定した。これらから各測定日の貯水池内浮遊SS量を求めた。

堆積量についてみると、洪水後2週間（9月7日）まで流入SSの約72%が堆積しているが、60%は洪水翌日（8月23日）までに堆積していることが分かる。また、放流SSについてみると、洪水後2週間まで流入SSの約26%が放流されている。そのうちの12%は洪水翌日に放流されている。

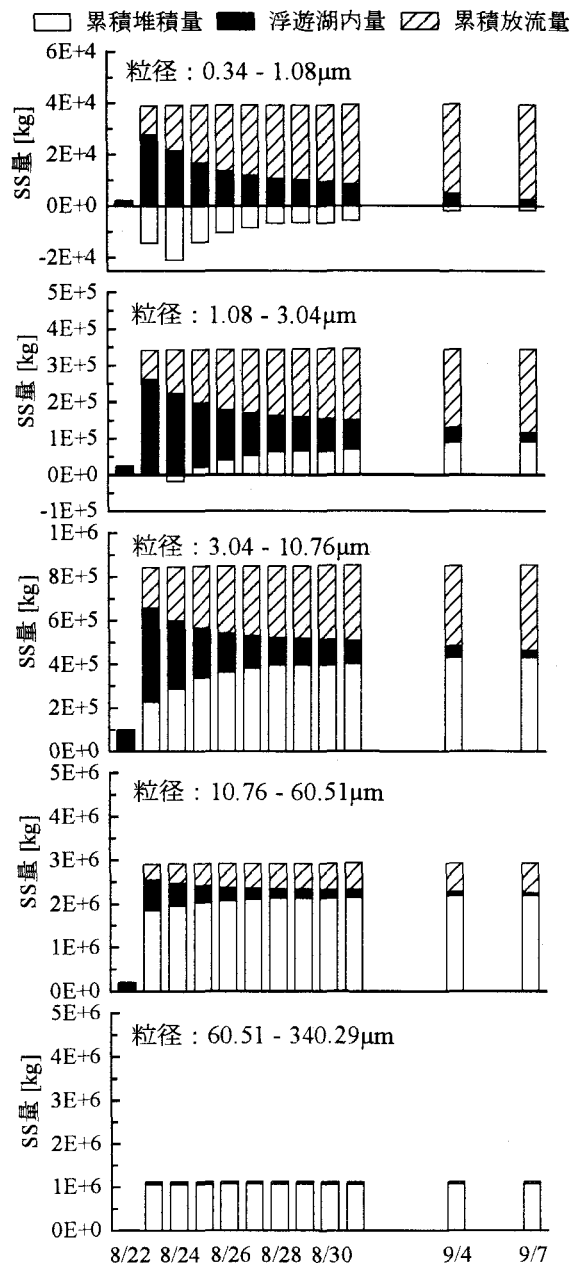


図-12 粒度別の貯水池内における微細土砂収支

図-11は、Bruneの補足率曲線⁹⁾である。包絡線は、上端が粗粒土砂流入、下端が細粒土砂流入の条件に対応するものである。ここに本洪水により得られた値（9月7日時点の72%）を○印でプロットしたところ、包絡線のほぼ下端にプロットされた。ここに、Xダムにおける貯水容量および流入量は、それぞれ総貯水容量（ $3.1 \times 10^7 \text{ m}^3$ ）及び1989年から1999年の10年間の平均年間流入量（ $3.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ ）としている。

図-11の補足率として、本来は長期間の値をプロットすべきところを、Xダムにおける一洪水での堆積量と流入量の比とした。また洪水2週間後における浮遊量を無視していることから、必ずしも厳密な比較とは言えない点がある。しかしながら、本貯水池における微細土砂の堆積量を推定するための大まかな目安として、図-11を用いることができると考えられる。

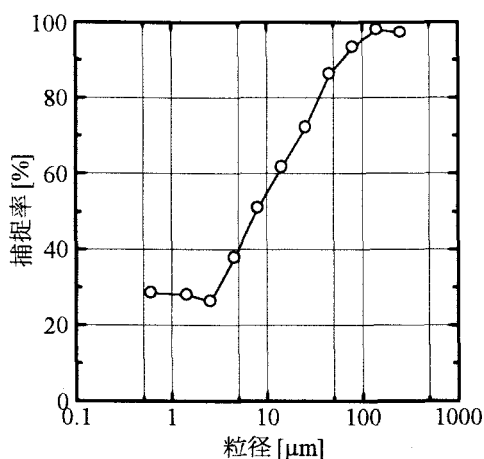


図-13 粒度別の洪水時微細土砂捕捉率

(3) 粒度別のSS収支計算

つぎに、粒度成分別に収支を検討する。流入SSの粒度分布は、地点A（図-5）の結果を用いた。ダム湖内および放流SSの粒度分布は、地点1の最高濁度層の結果（図-6）を用いた。また粒度分布の時間変化は、各粒径成分について、洪水中に測定を行った3回ないし4回の観測値を時間的に線形補間して設定した。

図-12は、粒度を5成分に分けて、時間的な収支変化を求めた結果である。粒径の細かい成分では、堆積量が負値となっているが、これは流入・放流量と湖内浮遊量の収支を取った結果、湖内での巻き上げが生じていることに対応する。この結果より、粒径がおよそ3μmよりも細かい成分について、巻き上げによる湖水の再懸濁が生じていることが分かる。また60μm以上の成分は、ほとんどが洪水発生の日までに堆積していることが分かる。

図-13は、11成分の粒度組成に区分して、各粒度の9月7日の時点における捕捉率を求め、プロットしたものである。その際、巻き上げにより再懸濁が生じた成分に対して、その影響を除くため、

$$E = 1 - \frac{S_{out}}{S_m - V_s} \frac{S_m}{S_m + V_e} \quad (3)$$

により捕捉率 E を求めた。ここに、 S_m ：流入SS総量、 S_{out} ：放流SS総量、 V_s ：9月7日時点の浮遊量、 V_e ：推定された最大巻き上げ量である。

図-13より、粒径が100μm以上の成分は、ほぼ全量が貯水池内に捕捉されたことが分かる。それ以下の粒径になると、対数粒径に対してほぼ直線的に捕捉率が減少している。しかし、3μm程度以下になるとほぼ一定値の30%弱ほどに落ち着くことが分かる。

櫻井ら⁷⁾は、大渡ダムにおける数値シミュレーションにより、粒度別の捕捉率について検討している。彼らの検討では、出水時回転率を1.8としているため、本研究の洪水規模と概ね等しいと考えられる。そのため、微細な成分の捕捉率が約30%で一定となる傾向は類似している。しかし、捕捉率が上昇し始める粒径が、櫻井らは30μm以上であるのに対し、本研究では4μm前後以上と

なっている。すなわち本研究の結果では、比較的細粒な成分であっても、捕捉率が高いことになる。

5. おわりに

本研究では、東北地方にある一貯水池を対象として、洪水時における詳細な濁水観測を実施した。その結果、貯水池における微細土砂の挙動をかなり詳細に捉えることに成功した。

これらの観測結果から、当該洪水時における微細土砂の捕捉率に関して検討した。微細土砂全体の捕捉率は72%程度となり、これはBruneの捕捉率曲線から想定される範囲内の値となった。さらに、粒度別の捕捉率を算出したところ、約3μm以下では30%弱の一定値となるのに対し、約100μmまでは対数粒径にほぼ直線的に捕捉率が上昇することが分かった。また100μm以上の成分はほぼ100%が貯水池内に捕捉されている。

本貯水池は、濁水（長期化）現象を含めた微細土砂の放流制御について検討していく必要があると考えられている。その際に、特に洪水後の選択取水などを用いた放流方式の検討において、本論文で示した詳細な現地観測データは、有用なものだと考えられる。

謝辞： 現地観測結果のデータ整理・解析にあたって、（株）日水コンの池上 迅 氏にご助力頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 村本嘉雄, 道上正規, 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.
- 3) 中村 昭, 今村瑞穂, 横道雅己：多目的ダム貯水池における濁水長期化調査, 水理講演会論文集, 第24巻, pp.259-264, 1980.
- 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：セッ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) 河田恵昭, 井上雅夫, 植本 実, 丸谷 正, 石川真紀子：海浜過程に及ぼすダム堆砂の影響—天竜川水系を対象として—, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.606-610, 1997.
- 7) 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.
- 8) 安芸周一, 白砂孝夫：貯水池の流動形態と水質, 水理講演会論文集, 第18巻, pp.187-192, 1974.
- 9) Brune, G. M.: Trap efficiency of reservoir, *Trans. AGU*, Vol. 34, 1953.

(2003. 4. 11受付)