

発電用大規模貯水池（佐久間貯水池）に おける堆砂に関する考察

STUDIES ON SEDIMENTATION IN A LARGE-SCALE RESERVOIR FOR POWER GENERATION

新庄高久¹・藤田裕一郎²
Takahisa Shinjo, Yuichiro Fujita

¹正会員 電源開発株式会社水力流通事業部土木グループ 課長（〒104-8165 東京都中央区銀座5-16-1）

²正会員 工博 岐阜大学流域圏科学研究センター教授（〒501-1193 岐阜市柳戸1番1）

The initial total storage capacity of 327 Mm³ of Sakuma dam reservoir in 1957 has been reduced to 213 Mm³ in 2002 due to sedimentation of 114 Mm³. In order to reduce flood damage in the upstream area caused by the sedimentation, attempts to lower the riverbed is being continued by dredging and flushing with river water. However, riverbed has not been lowered sufficiently, hence more efficient measures are required. So, accumulated reservoir data of flow discharge, cross sectional surveying and grain size distribution were examined to clarify actual state of the sedimentation. Results of the examination show that sediment concentration is decreasing clearly implying that a flood cannot convey the same amount of sediment as it could before. Another results of sediment movement were compared with those evaluated from 1-D analyses of non-uniform flows, indicating the efficiency of the sediment flushing. Accumulation curves of volumetric changes of cross sections were obtained for individual grain sizes, which can express sediment movement in the reservoir properly.

Key Words : Sedimentation, Sediment concentration, accumulation curves of sediment volume

1. はじめに

天竜川は、その源を諏訪湖とし、中央及び南アルプスに挟まれた伊那谷を南下し奥三河、北遠の山岳地帯から遠州平野を経て太平洋に注ぐ、延長 213 km、流域面積 5,090 km² の水量豊富な大河川である。天竜川流域には、古生層から沖積層までの地層及び火成岩、堆積岩、変成岩が見られるが、中央構造線周辺の脆弱な地質であり、急峻な地形と相まって、天竜川では豪雨・出水のたびに侵食され流出し運搬される土砂が極めて多く、「暴れ天竜」として知られている。

図-1¹⁾に示すように、天竜川流域には、本流に上流から中部電力(株)の泰阜ダム、平岡ダム、電源開発(株)の佐久間ダム、秋葉ダム、船明ダムが、支流に国土交通省所管の美和ダム、小渋ダム等の10ダムが設置されている。このうち、泰阜ダム、平岡ダムの全堆砂率（総堆砂量／総貯水容量）は、2002年度時点で 80.1 % と 84.9 %²⁾ であり、この20年間その値に僅かな変化しかないことから³⁾、天竜川本流を流下してきた土砂は、そのほとんどが佐久間貯水池に流入していると判断される。

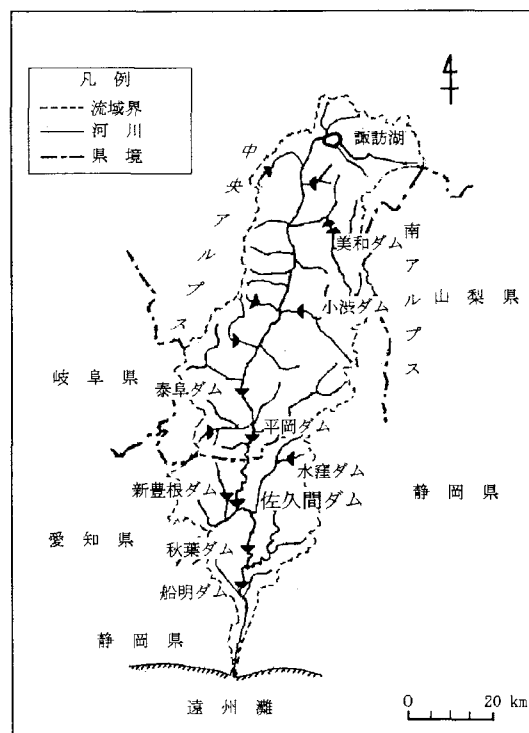


図-1 天竜川流域とダムの位置（名称は主要なもの）

1956年に竣工した佐久間ダムは、伊那谷から続く峡谷部の末端近くに当たる河口から約 70 km の天竜川中流部に位置する、堤長 293.5 m、堤高 155.5 m、堤体積 112 万 m^3 のコンクリート重力式ダムである。流域面積約 4,000 km^2 の佐久間ダム地点における平均年間総流入水量は約 $5 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{年}$ と豊富であり、その貯水は佐久間発電所(最大出力 35 万 kW)において発電に使用され、一般水力としては日本最大の電力量(約 15 億 $\text{kWh}/\text{年}$)を生み出している。貯水の一部は農工業用水・上水道(豊川用水)にも直接利用される一方、佐久間発電所での発電使用後の水は下流の5発電所(佐久間第2、秋葉第1・第2・第3、船明、合計最大出力 191.1万 kW)で再使用されるとともに、農工業用水、上水道用水を含む河川正常流量の源となっている。しかしながら、上述の流域条件から土砂流入も大量であるため、2002年時点での総堆砂量は、総貯水容量 $327 \times 10^6 \text{ m}^3$ の約 35 % に相当する $114 \times 10^6 \text{ m}^3$ に達しており、日本最大となっている。

本文では、初めに、この佐久間貯水池の堆砂とその対策の概況を説明し、ついで、これまで系統的な検討の加えられることが少なかった既存資料を今後の堆砂対策に活用するために、その第一歩として行った、土砂流入特性の検討結果と流砂促進(流水掃砂)の効果も含んだ貯水池内における土砂挙動把握の試みについて報告する。

なお、佐久間貯水池からの流出濁質量を概算したところ、平均 10 万 m^3 強と全土砂流入量の1割以下であったので、以下の検討では無視している。しかし、今後この点については捕捉率の経年変化も含め詳細に検討したい。

2. 佐久間貯水池における堆砂の実状

(1) 堆砂量の経年変化

図-2 は、佐久間貯水池の堆砂状況を流入土砂量、累計総堆砂量及び有効貯水容量の経年変化として示したものである。この図によれば、ダム完成後の10年間前後は $420 \text{ 万m}^3/\text{年}$ 程度の大量の土砂流入が継続していたが、その後は1970、83年のような大規模出水のあった年には $500 \text{ 万m}^3/\text{年}$ を超える土砂が流入しているものの、流入土砂量は減少傾向にあり、至近10年間の平均は約 $120 \text{ 万m}^3/\text{年}$ となっている。

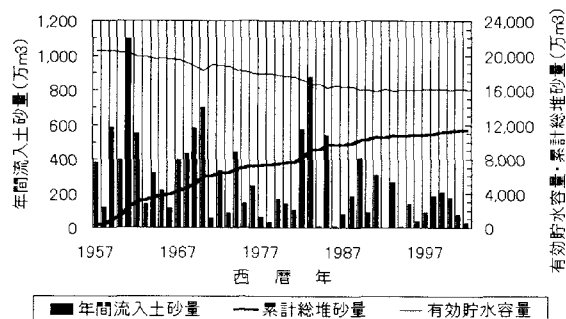


図-2 流入土砂量、堆砂量、有効貯水容量の経年変化

(2) 堆砂形状の経年変化

図-3 は、佐久間貯水池の河床縦断の変化を示したもので、元河床は最深河床高、それ以外は元の河谷上に水平堆砂したとして求めた平均河床高である。貯水池の常時満水位は EL.260m (ダム水位では 40m)、低水位は EL.220 m (同 0 m)、利用水深は 40 m となっている。

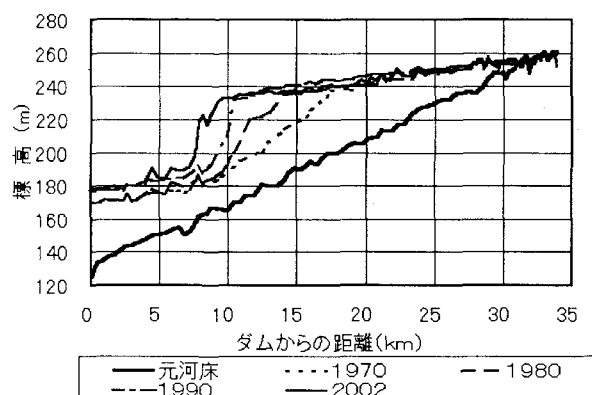


図-3 佐久間貯水池内堆砂形状の経年変化

図-3 によれば、貯水池の上流から徐々に堆砂が進行しており、1970年頃にはダムから約 18 km 地点(以下距離はダムから距離を表す)の EL.236 m 付近にデルタ肩が形成されている。71、72年の冬期渇水期に、新豊根揚水発電所放水口工事に伴って、佐久間貯水池水位が EL.220 m 以下に低下させられたことにより、堆積土砂が掃砂されて80年頃には EL.230 m 付近だけでなく、約 12 km 地点の EL.220 m 付近にもデルタ肩が形成されている。72年の新豊根揚水発電所の運転開始以降、佐久間貯水池はほぼ常に EL.230 m より高い水位で運用されていることから、90年の形状のようにデルタ肩の高さは EL.230 m 付近に固定され、デルタ肩よりも上流側で堆砂が進行して堆砂勾配が緩やかになっているが、近年は図-3 にも見られるように約 30 km 付近から上流は河床がほとんど変化していない。さらに、91年以降は、後述の堆砂対策の1つとして、冬期渇水期の1ヶ月余り貯水位を EL.232.5 m を目途に低下させて維持するという操作をしているため、デルタ肩は EL.232.5 m 付近を維持しながら前進し、2002年には約 10 km 付近に達している。

(3) 堆砂の処理対策¹⁾

佐久間ダムでは、大量の堆砂によって、上流区間でも河床上昇が著しいため、「上流域における洪水時の冠水回避」を目的として以下の対策を実施している。

a) 流砂促進 [流水による貯水池内での土砂移動(流水掃砂)]

前述のように、渇水期の2月中旬から3月下旬の35日間、佐久間貯水池水位を低下させることによって、貯水池内中・上流部を自然河道状態とし、この間の流水を利

用して堆砂を貯水池下流部の有効容量以下に移動させるものであり、測量成果によれば年間約 100～200 万 m^3 の土砂が移動しているとみられる。

b) 湖内移送 [浚渫船による貯水池内での土砂移動]

貯水池中流部の堆砂を浚渫船のサンドポンプで船倉に吸い上げ、貯水池下流部の有効容量以下に搬送、捨土しているもので、年間約 40 万 m^3 を目標に実施している。

c) 湖外搬出 [浚渫土砂の貯水池外への搬出]

コンクリート・アスファルト骨材、ゴルフ場用砂等として砂利業者が浚渫採取しているものであり、年間約 40 万 m^3 を目標に実施されている。

しかしながら、これらの堆砂対策のうち、湖内移送並びに湖外搬出は、浚渫船の喫水による制限を受けるため、実施範囲が貯水池中流部に限られ、一方、流砂促進は渇水期の実施のため、期間中に発生する出水の規模が大きくなり、上流域の大粒径の土砂は移動し難い状況にあって、図-3 のように、上流区間の堆砂排除・河床低下はなかなか進まない状況にある。

3. 佐久間貯水池への土砂の流入特性

図-2 によれば、年間流入土砂量の多かった1961, 70, 83年の翌年あるいは翌々年の流入土砂量は極端に少なくなっている。これには測量誤差の影響も考えられるが、上流河道の堆積土砂が大規模な出水で過剰洗掘を受け一気に貯水池まで流送されたため、その翌年あるいは翌々年には河道を通過する土砂量が少なくなり、結果的に貯水池への流入量が少なくなったことも推察される。そこで、年間総流入水量と流入土砂量の経年変化を示すと図-4 のようである。

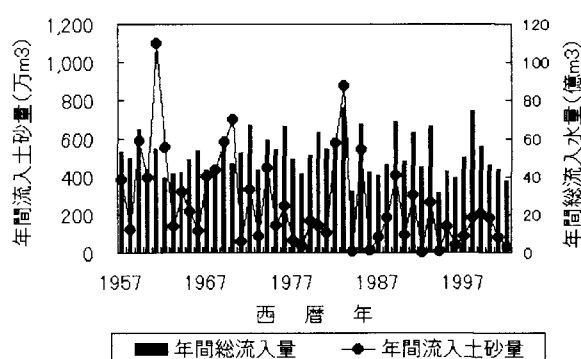


図-4 年間総流入水量と流入土砂量

年間総流入水量は、佐久間発電所が運転を開始した1957年以降、 $(3.0\text{強} \sim 8.0\text{弱}) \times 10^9 \text{ m}^3/\text{年}$ の範囲で推移している。一方、流入土砂量が $5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ 以上と多かった年は1961, 70, 83年と3回あるが、それぞれの年間総流入水量は 約5.5, 約4.7, 約 $7.6 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{年}$ であって、既往最大の年間総流入水量であった83年を除い

て、61年と70年は平均的な値にすぎない。逆に、 $7.5 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{年}$ と既往2番目の値を記録した98年の流入土砂量は $2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ と多くない結果となっている。

このように、年間総流入水量が多いからといって、必ずしも流入土砂量が多いということではない。そこで、図-5 のように、年間堆砂量を年間総流入水量で除して年平均流入土砂濃度を算出し経年変化を示した。それによれば、流入土砂量が多かった61, 70, 83年では平均土砂濃度がその前後の年より高くなってはいるものの、全体的に流入土砂濃度の低下傾向が顕著である。したがって、佐久間貯水池への流入土砂量は、今後土砂流入を著しく増加させるような事象が生じない限り、現状維持あるいは漸減すると推測される。

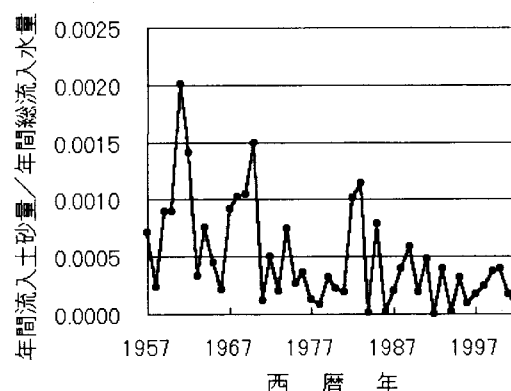


図-5 流入土砂濃度の経年変化

また、図-4, 5 から判るように、年流入土砂量や年平均土砂濃度と年間総流入水量との間には高い相関を期待できないため、年最大日流入水量、年最大流入水量、一定値以上の日平均流入水量の年間総和値等について相関解析を行った。その結果では、図-6 に示すように、年最大日流入水量と年流入土砂量との相関関係が最も明確であったが、回帰直線から上方に3倍近く、下方に1/3以下離れる年もあって、流入土砂量の支配流量については今後より詳細な検討が必要である。

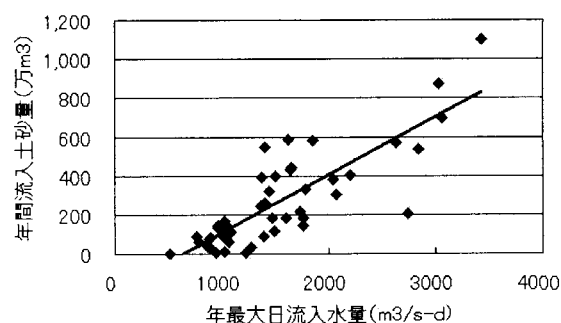


図-6 流入土砂量と年最大日流入水量の関係

4. 佐久間貯水池内部における土砂の移動状況

(1) 堆積土砂の粒度分布

佐久間貯水池では堆砂対策を実施しても前述のように上流部の河床低下が進まない状況にある。この点に関して、堆積土砂の砂粒度分布や横断面の変化量の検討から土砂の移動状況の把握を試みた。

堆積土砂の粒度分布は1979, 80, 81, 83, 88, 92, 95, 97, 98, 99年に調査されている。しかしながら、95年以前の調査は、堆積土砂が骨材や陶土に有効利用できるかを把握するために実施されたものが主で、表層の土砂が採取されているが、採取位置の詳細の不明確なものが含まれている。一方、97, 98, 99年の調査は、貯水池内の堆砂性状の把握を目的とし、地点によっては深さ20 m までボーリングを行って試料を採取し、ふるい分析と沈降分析によって粒度分布を測定している。

初めに、土砂移動に関わっている深さを河床断面測量成果から推定した。97年と98年とについて同一断面内の横断形状を比較し、堆積厚さあるいは洗掘深さを求めた結果、デルタ肩の前進箇所では10 m 以上もの堆積があり、流砂促進によって約8 m もの洗掘を受けた断面のあることも判った。しかしながら、ほとんどの断面における変化は5 m 以下の範囲に納まっていたので、土砂移動に関わる範囲は、概ね表面から5 m 程度に限られていると判断し、表面から5 m 程度までのデータを平均化して土砂移動に関わる粒度分布を得た。同一断面で複数点採取されている場合にはそれらも平均している。

図-7 には81, 83年の、図-8 には97, 98, 99年の粒度分布を、ともに代表的な地点について示している。両図とも、上流に向かうにつれて、全体的に粒度分布が粗くなっており、貯水池による分級作用が生じていることが示されているが、図-7 によれば、当時のデルタ肩より下流に当たる10 km 地点までの範囲の土砂は、約95 % 以上がシルトとなっている。

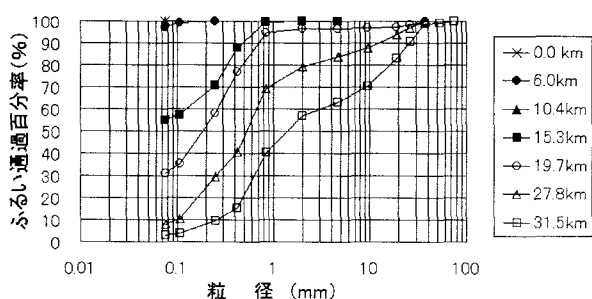


図-7 佐久間貯水池内堆砂の粒度分布(1981, 83年)

一方、図-8 では、10 km 地点までの範囲が調査されていないためその範囲の状況は比較できないが、28 km 地点付近よりも上流では、図-7 よりも礫分の占める割

合が増え粗粒化している。これは、91年から実施している流砂促進によって上流区間から細粒分が移送されたことを示しているものと推察される。

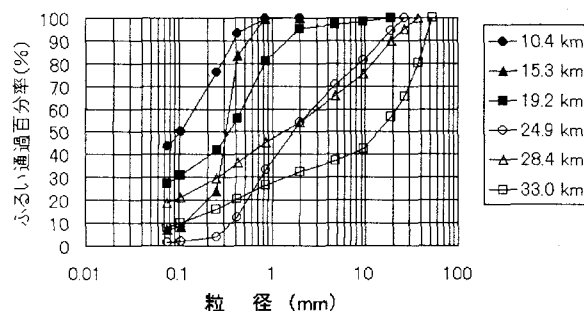


図-8 佐久間貯水池内堆砂の粒度分布(1997, 98, 99年)

(2) 堆砂粒度分布と移動限界粒径の関係

流砂促進時における貯水池内の土砂移動の概況を把握するために、期間中の平均的な水位と流量である、貯水位 EL. 233 m と流入流量 150 m³/s とを与え、1981年と97年の河道形状について1次元不等流計算を行って掃流力を算出した。その値から移動限界粒径を逆算し、両年について、図-7 および図-8 に示されている表面から5 m 程度までのデータを平均化して得られた粒度分布より、読みとり可能なものについて10 % 粒径、30 % 粒径、中央粒径、70 % 粒径、90 % 粒径および95 % 粒径を読みとり、それらの縦断変化と比較すれば図-9 と図-10 のようである。

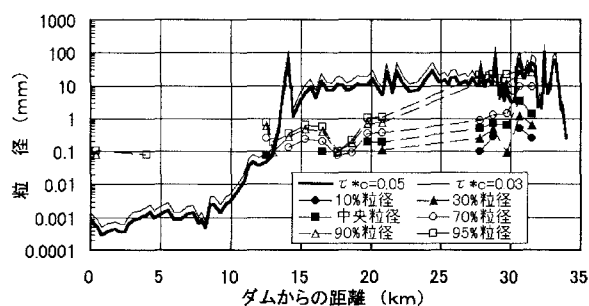


図-9 堆砂粒度分布と移動限界粒径の縦断比較(1981, 83年)

流砂促進開始前の図-9 では、21 km から27 km までの区間のデータがないが、30 km よりも上流の区間では70 % 粒径まで土砂は掃流可能な状態となっていて流砂促進により中流から上流の区間で土砂が十分に掃砂されうる状態であったことが推定される。

一方、図-10 によれば、90 % 粒径以下の土砂が掃流可能な区間は25 km 地点までと狭められており、それより上流の区間でも70 % 粒径前後の土砂は掃流できないようである。このように、流砂促進開始当初に比べ、

25 km よりも上流区間では粗粒化によってその効果は落ちてきているが、それよりも下流の区間では十分に効果が期待できるとの結果となっている。

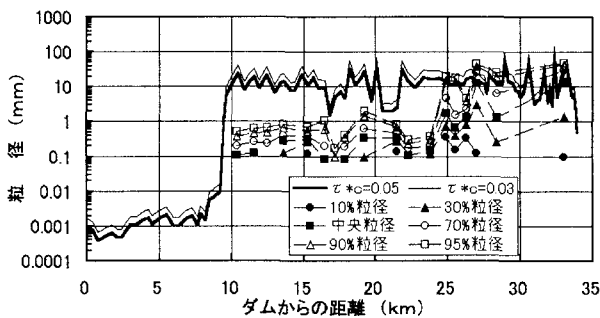


図-10 堆砂粒度分布と移動限界粒径の縦断比較(1997, 98, 99年)

したがって、貯水池の中流区間において掃流力は十分あるにもかかわらず、ここ数年、河床低下が進んでいない理由には、それを上回るかそれに匹敵するような量の土砂流入があるためにそのような状況が発生していることや、あるいは、算定された掃流力が河床波の発生等によって全て有効に土砂の輸送に使われず、実際に土砂輸送量が減少していることなどが推測される。これらの点については、粒径別流砂量式によって全流送量を綿密に算定することが不可欠であるが、本文ではそこまで立ち入ることができなかったため今後の課題としたい。

また、後者の理由に関しては、フルード数や粒径からはlower regimeの河床波が発生している可能性は高いが、佐久間貯水池の場合、径深・平均粒径比が 10^4 オーダーに達する断面も少なくなく、水理公式集⁴⁾に例示されているような既往の河床波データの範囲を越えているために、即断はできず、できるだけ速やかに河床形態の形成の実態を観測・把握した上で評価したいと考えている。

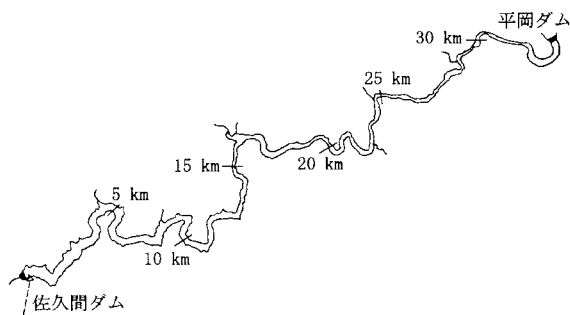


図-11 佐久間貯水池平面図

なお、図-9、図-10 を比較すると、10 km から 15 km にかけての区間において粗粒化が顕著であり、逆に、17~18 km 区間ではその前後よりも細粒分が多くなっている。後者の区間は、図-11 のように川幅のやや狭い直線区間から川幅の広い蛇行部の入口に向かう区間に相当し、流速の低下で細粒分が堆積したものと推測され、移

動限界粒径の変化とも対応している。なお、図-10 では、22 km 地点付近で、その前後の区間に比べて細粒分が多くなっている。この付近は、川幅のやや狭い直線区間が川幅の変化しないまま蛇行区間に接続する区間に相当しており、流れの堰上げ効果によって細粒化が生じた可能性があって、この傾向が至近年のデータでのみ確認されたことは、例えば、流砂促進によって、流れがダムの堰上げ効果の著しい湛水区間の流れではなく、河道形状の影響が大きく働く流れになったことの結果であるとも考えられる。なお、81, 83年の調査と97, 98, 99年の調査では、同一の断面で実施している例が5例しかなく、また、同一断面でも同一地点で実施しているかどうかの判別がつかないことや、同一断面では河道彎曲部の内側・外側無関係に平均しているため、既存データから粗粒化の程度や場所的变化を明らかにすることは難しい。

以上の点については、今後、通常の貯水池運用時における洪水流や流砂促進時の流れの状況を明らかにして、詳細な検討を加えていきたい。

(3) 粒径別累加堆砂量の検討

前節の堆積土砂の粒度分布と断面変化量から、粒径別に貯水池内における土砂の移動状況を評価した。

a) 粒径別断面堆砂量の算出

佐久間貯水池では、毎年、出水期終了後に堆砂測量を行い、貯水池横断形状や堆砂量を経済産業省及び国土交通省に報告している。これらの断面測量を用いて断面毎に粒径別の堆砂量を算出することとした。なお、佐久間貯水池では前述のとおり湖内移送及び湖外搬出という堆砂処理を行っているため、測量成果に対して湖外搬出と湖内移送の量を補正して、堆砂処理のない状態に戻す必要がある。そこで、工事資料から湖内移送量及び湖外搬出量並びにそれらの浚渫・捨土位置のデータを抽出して、断面毎に補正した堆砂量を算出した。ただし、81年から82年にかけての期間は、地元砂利業者による湖外搬出が実施されているものの、浚渫位置を特定する工事資料がなかったためその影響を補正することはできなかった。解析に使用した堆砂の粒度分布は前項と同じである。

b) 粒径別累加堆砂量の検討

81年から82年にかけての断面変化量に各粒径階の土砂が占める割合を掛けて算定した各断面における粒径毎の堆砂量を、縦断方向に累加して求めた粒径別の縦断方向累加堆砂量を図-12 に、同じく97年から98年にかけてのものを図-13 に示す。

佐久間ダムのような大規模ダムでは、ごく微細な土砂を除いてダム地点を通過する土砂はほぼ皆無と見なせるので、これらの図の曲線は当該期間にそれぞれの断面を通過した粒径別の土砂量を表している。微細土砂の場合でも、ダム地点で濁度が測定されていればそこでの通過量が推定できるので、その量だけ対応する曲線を上方に平行移動させれば、各断面におけるその通過量を示して

いることになる。

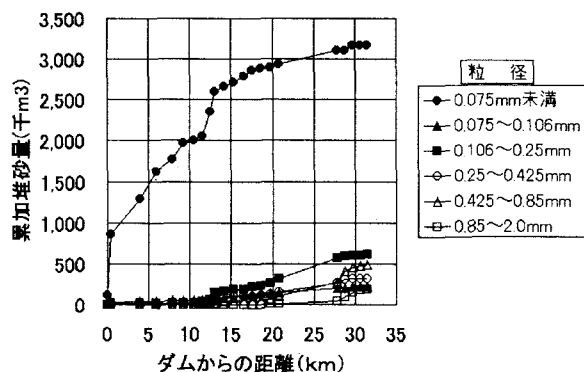


図-12 粒径別縦断方向累加堆砂量(1981年から82年)

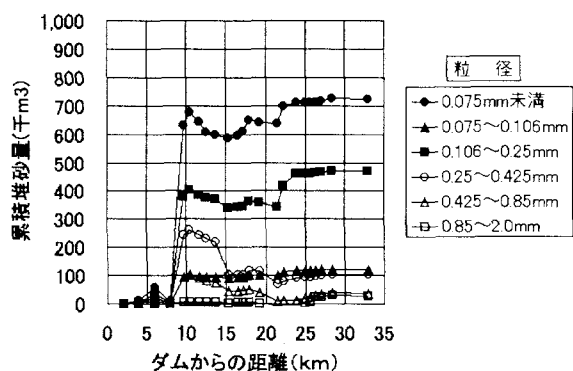


図-13 粒径別縦断方向累加堆砂量(1997年から98年)

図-12 によれば、累加堆砂量はいずれの粒度でも右上がりの曲線となっており、81年時点では、貯水池内に流入した土砂は流下方向に順次堆積していった状況が示されている。とくに、粒径 0.075 mm 未満の土砂の流入量が非常に多く、貯水池のほとんど全ての区間で堆積しているが、13 km 地点付近までが著しい。一方、図-13 によれば、上下に変動している曲線もかなりあって、堆積及び洗掘の区間が交互に発生していることを表している。

例えば、0.85 mm 以下の粒径についてみると、10 km 地点付近では累加量は急激に増加していて堆積が進行したことを示しており、粒径の細かい土砂でその傾向が著しい。それより上流の 20 km 付近にかけては逆に減少していて洗掘されたことが判り、その上流では、堆積に対応した短い区間を経た後、貯水池内の上流部では各粒径とも累加量には変化がほとんどない。したがって、97年には、貯水池に流入する土砂は、25 km 地点より上流の河床には堆積せず、そのまま下流に流下していたことが判る。しかし、その通過量は、81年時点に比べると大きく低下していることは明らかである。また、10 km 付近の堆砂量が増加しているのは、粒径の細かい土砂が主であり、流砂促進によって粒径の小さい土砂が掃砂された結果である。さらに、22 km 地点付近で堆積が進んでいるのは、図-10 にも見られた掃流力が低下する区間

と一致している。このように、粒径別累加堆砂量の縦断図は、貯水内の堆砂動態を示すのに有効な方法である。

なお、図-12 と図-13 とで、曲線の変化が大きく異なっているのは、81年から82年には大規模な出水があったのに対して、98年から99年には大出水はなかったが流砂促進のための運用を行ったなど、流入量に大きな違いのあったことを反映しているものと考えられる。

5. 結論

佐久間貯水池における堆砂について、既往の調査結果に基づいて、その動態について検討を加えた。その結果、以下の諸点を明らかにすることができた。

- ・佐久間貯水池における年平均流入土砂濃度は低減する傾向にある。
- ・佐久間貯水池の年間流入土砂量は年最大日流入水量と高い相関がある。
- ・1981年前後と97年前後とにおける堆砂粒度分布の比較によれば、上流部における粗粒化が著しく、上流部での流砂促進効果はやや低下している。
- ・81年と97年における粒径別縦断方向累加堆砂量の比較では、流入土砂の堆積状況や貯水池内の堆積、洗掘状況が明らかに異なっていて、流砂促進の効果は明白である。

今後、ダム水位、流入水量等のデータを用いて水平2次元の流れ解析を行い、今回明らかにした佐久間貯水池の堆砂動態の背後にある土砂の移動機構を明らかにして、より有効な堆砂対策の立案・実施に役立てていきたいと考えている。

謝辞：本報告をまとめるにあたり、電源開発株式会社中部支店及び佐久間電力所の各位には資料の提供や整理にご尽力頂いた。また、岐阜大学大学院学生大橋慶介君、鷹野敏弥君、と同工学部学生小山達郎君にはデータ整理に協力頂いた。ここに記して厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 菊池浩一郎, 村永峰男, 板橋勝国: 佐久間ダムの堆砂状況と対策, 電力土木, No. 291, pp. 41-45, 2000.
- 2) 原子力安全・保安院電力安全課: 平成14年度発電用貯水池・調整池堆砂状況, 電力土木, No. 307, pp. 150-159, 2003.
- 3) 資源エネルギー庁公益事業部発電課: 昭和57年度発電用貯水池・調整池堆砂状況, 電力土木, No. 186, pp. 109-115, 1983.
- 4) 土木学会水理委員会: 昭和60年度版水理公式集, pp. 252, 1985

(2003. 9. 30受付)