

ダムの堆砂と排砂

Sediment Deposition and Removal at Dam Reservoirs

柏井 条介
Josuke Kashiwai

貯水池の堆砂は古くて新しい課題である。最近、総合土砂管理の位置付けの中で議論されることも多くなっているが、総合土砂管理の話題については、本講習会でも別途取り上げられている。ここでは、主として従来型の貯水池問題の視点で、実務の立場から技術的事項を整理してみたい。

1. 堆砂の予測

1. 1 計画堆砂量と実績

周知のように、現在のダム貯水池計画は、堆砂することを前提に策定されている。一般には 100 年間に溜まるであろう土砂に見合う堆砂容量が予め設定されており、堆砂量の推定が計画上の技術的課題となる。

堆砂量は、貯水池容量計画の構成要素の一つであり、過小な予測は貯水容量の減少を、過大な予測は過大なダム建設をもたらすが、堆砂量の予測精度については、これまでそれ程厳密に議論されてきたわけではない。これは、貯水池計画における堆砂は、100 年というような比較的長いライフサイクルが考えられていること、計画を超えたからといってカストロフ的な変化をもたらすものではないことなどにその理由を求めることができる。また、堆砂量の精度のよい推定が難しいという事情もあるように思われる。

図-1 は、完成後それぞれ 10、20、30 年目のダムにおける計画堆容量に対する実績堆砂量の割合を示したものである。用いたデータは、昭和 52 年から平成 8 年までの建設省（当時）の堆砂量報告資料（総貯水容量 100 万 m^3 以上のダムが対象）であり、この間にそれぞれの経過年数を迎えたダムの集計値である。100 年堆砂が計画されているものとするとして、それぞれ平均的に 10、20、30% 程度の堆砂進行が予想される。

図に示されるように、堆砂率はかなりバラツキをもっているが、何れの経過年数においても計画相当の % を超える割合は 50% を超えている。また、この傾向は、経過年数が大きいくほど顕著である。堆砂率が、対応する経過年数を超える割合が大きい原因として、100 年より短い期間の計画堆砂率を採用しているダムがあること、ダム完成直後の堆砂量が工事の影響等により大きく出る傾向があること等が考えられる。経過年数が大きいくほど傾向が顕著な原因は

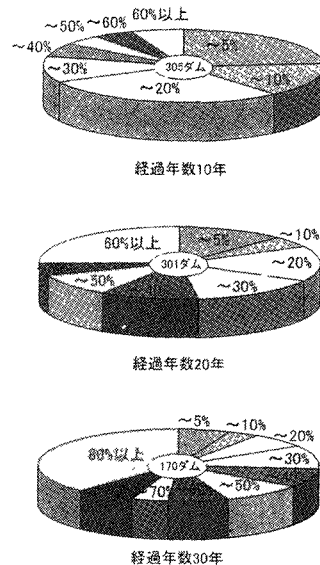


図-1 実績堆砂が計画堆砂量に占める割合とダム完成後の経過年数の関係

明確でないが、経過年数が大きいことは完成年が古

いことを意味しており、計画の堆砂年数の小さいダムが多いこと、工事の影響が大きかったこと、堆砂実績資料の蓄積により推定精度が向上してきたことなどが考えられる。因みに、平成元年から8年までのデータで同様の整理を行なうと、多少の精度の改善がみられている。何れの経過年数でも、堆砂率は計画相当%の（3～4分の1）～（3～4倍）内に大半のダムがあるということができよう。つまり、オーダーは変わらないことである。

上記の堆砂率は計画堆砂量に対するものである。貯水池計画への影響は、計画堆砂量を超える堆砂において生じる。図-2は、平成8年の建設省資料により、計画堆砂量が総貯水容量に占める割合を示したものである。計画堆砂量が総貯水容量に占める割合は20%以下のものが7割近くを占め、半数弱が10%以下である。ただし、5%以下のものもあれば、40%以上のものも有りバラツキは大きい。今、仮に計画堆砂量の3倍の堆砂が生じたとして、その総貯水容量に対する割合が5%であれば、有効貯水容量の10%程度が堆砂により失われるに過ぎない。一方、40%であれば、ダムは完全に埋没する。求められる予測精度がダムにより大きく異なることが分かる。

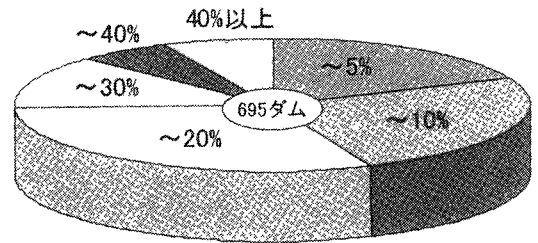


図-2 計画堆砂容量の総貯水容量に占める割合

貯水容量に対し計画堆砂量が大きいと予測されるダムでは、堆砂量推定精度の向上を図る必要がある。これについては、後に議論するが、期待される推定精度には限界があろう。一方、ライフサイクルが100年あるということは、実態をモニタリングしながら何らかの措置を講じるための時間が確保されていることを意味している。推定精度の向上とともに、モニタリングと必要に応じての対策が重要と考えられ、実際、わが国の100万 m^3/s 以上の貯水容量を持つダムでは、毎年の堆砂測量が実施され、堆砂進行に応じた対策が検討されてきている。

モニタリングと対策が重要であることは、堆砂容量の占める割合が大きいダムに限らない。2000年版のダム年鑑によれば、高さ15m以上の完成ダム数は、昭和20年に1,198であったものが平成11年には2,678を数えている。大規模ダムの建設はこの時期に集中し、この期間内に95%の貯水容量が建設されている。こうした大規模ダムの中には経過年数が40～50年に達するものがでてきており、モニタリングとともにダムに応じた対策が益々重要になろう。

以下では、新設ダムを念頭に述べる。後に示すように、新設ダムの堆砂予測は、基本的には近傍類似ダムの実績から実施すべきと考えられ、既設ダムでは近傍類似ダムの代わりにより確度の高い、同一ダムの過去のデータを中心に分析することとなる。

1. 2 堆砂の影響と予測内容

1. 1では、実績堆砂量を貯水池計画との関係で概観した。ここでは、計画論とは別に、堆砂の影響について整理し、堆砂予測との関係を考えてみる。堆砂の影響は、貯水池計画と直接に関係する①貯水容量の減少、治水安全度の低下や排水不良の原因となる②上流の河床上昇、橋梁や護岸等の浮き上がりや取水不良、地下水位低下の原因となる③下流の河床低下が従来から認識されてきており、このうち、①及び②が堆砂予測問題の対象として主として扱われてきた。

貯水容量の減少は、洪水調節や用水補給を目的とするダムでは、直接的な影響となる。このうち、洪水調節容量の空間は、洪水時の一時期に上昇するのみで、常時は空虚の状態にある。従って、一時的に容量内に

堆砂が生じたとしても、水位低下とともに土砂は下流に引き込まれる。常時貯留されている用水補給のための容量空間と比較し、堆砂の影響を受けにくい空間ということができよう。同じ理由で、洪水調節容量を持つダムでは、上流の河床上昇の問題が生じにくい。背砂の影響区間が洪水調節容量空間を含むからである。なお、土砂の流入は、主として出水時に生じ、特に洪水調節計画対象洪水のような大出水時には大きな土砂流入が生じることが想定される。この場合、比較的大きな粒径の土砂は洪水調節期間中に容量内に堆積することになる。

用水補給容量は、堆砂による容量減少の影響を受けやすい空間である。先に述べた堆砂推定誤差の影響は、用水補給容量において最も直接的に影響を受けることになる。先の検討も、総貯水容量に対する計画堆砂量の割合とともに、用水補給容量に対する割合として検討する必要がある。

発電ダムでは、容量とともに落差を得ることがダムの目的であるから、堆砂による容量減少の影響は洪水調節や用水補給と比較すると相対的に小さい。千田¹⁾は、幾つかの堆砂ダムを対象にした試算を行っており、著しい堆砂が生じた場合には、流れ込み式発電の発電状況に近づくものの、通常の堆砂では、ピーク発電は減少しても発電量はほとんど変化しなかったとしている。千田は、発電量に影響する堆砂の影響として、容量の減少の他、取水口の埋没や水圧鉄管への土砂の混入による取水停止を挙げているが、同様の影響は取水施設を必要とする他の目的のダムでも当然生じるものであろう。なお、洪水調節をも目的に含むダムに比べ、発電ダムや用水補給ダムで貯水位が高位に維持されるダムでは、上流の河床上昇が生じやすい。

以上のように、堆砂の影響は、貯水目的によりその特性が異なるものであるが、堆積土砂の目的別容量空間への堆砂量、上流の河床上昇、或いは取水施設への影響を知るためには、計画堆砂量といった堆砂量のみでの設定では不十分であり、貯水池内での堆積形状を知る必要がある。そのためには、流入土砂の粒度分布を設定する必要がある。

一方、実際には堆砂形状として水平堆砂が採用される例が多い。これは、こうした粒度も含めた検討が多大な労力と時間を有すること、先にも述べたように、堆砂に対するライフサイクルが長く、モニタリングを行ないつつの対応が可能なこと、底部に取水ゲートを持つことにより貯水容量空間を割り振った運用が可能なことなどに理由を求めることができよう。しかしながら、近年では堆砂実績のかなりの蓄積も得られてきている。計画と運用の整合性を図り、より合理的な貯水池活用への道を検討する必要がある。表－１は、先の平成８年建設省堆砂報告より作成されたもので³⁾、実績堆砂の有効容

表－１ 堆砂の有効容量内・外分布状況

地 方	平成８年現在堆砂量（×10 ³ m ³ ）			有効容量内／ 全堆砂量	対象ダム数
	有効容量内	有効容量外	合計		
北海道	26,000	53,081	79,281	0.33	77
東 北	23,035	50,036	73,701	0.32	80
関 東	43,765	38,431	82,196	0.53	52
北 陸	52,302	140,210	192,512	0.27	101
中 部	128,683	240,727	369,410	0.35	66
近 畿	30,111	47,907	78,018	0.39	66
中 国	13,945	14,099	28,044	0.50	83
四 国	42,852	40,541	83,393	0.51	52
九 州	41,251	71,624	112,875	0.37	109
沖 縄	469	784	1,253	0.37	9
全 国	402,613	697,440	1,100,053	0.37	695

量内及び死水容量内への分布状況を示している。堆砂の約４割が有効容量内に堆積していることが分かる。因みに、平成９年改訂新版の河川砂防技術基準(案)では、設計編の参考として、「ダムの構造計算に用いる堆砂位は、想定される１００年間の堆砂量が水平に堆砂するとした標高とするものとする。」と記述されている。これは、構造計算で安全側をとるとの記述であり、貯水池の計画論に関するものではない。

以上、堆砂予測の視点から堆砂の影響を見てきた。ここで、下流河道への影響など他の堆砂の影響につい

でも簡単に見ておく。

上記述べた貯水容量の減少や上流河床の上昇は、負の影響が殆どと言って差し支えないであろう。一方、下流河道への影響は、多少複雑である。ダムは巨大な砂防ダムといことができ、河床の安定に寄与していることも考えられる。適正な供給土砂量及び質を求め、之に見合う土砂を供給することが昨今話題の総合土砂管理における巨大土砂制御施設ダムでの中心課題といつてよいであろう。この場合にも量のみでなく、粒度分布を含む質の議論を避けて通ることはできない。総合土砂管理を述べるのが本稿の目的ではないのでここでは省略するが、下流への土砂供給方法そのものは、従来から貯水池の堆砂対策として検討されてきた技術の中に位置付けられるものであり、後にとりまとめる。

総合土砂管理の関係で言えば、上記の従来型の問題認識に加え、河床上昇や低下による④生物環境の変化が堆砂の影響として加えられる。貯水池上流域では、河床の上昇による既往植物群落等の埋没や河床形態変化、河床材料の細粒化による産卵床の消滅などが、下流域では河床低下に伴う河床形態の変化、河床構成材料の粗粒化²⁾による影響などが課題となっている。これらの検討においても量と質の両者を知る必要があることはいうまでもない。

1. 3 堆砂量の推定

1. 3. 1 経験式

河川砂防技術基準(案)の計画編・調査編は昭和 33 年に制定されている。そこでは、「多目的ダムの堆砂容量は、概ね 100 年間にたまる推定堆砂量をとるものとする」とされ、その解説において「貯水池の推定堆砂量については、現在の所定説がなく、計画に当たってはできるだけ既設のダムにおける堆砂量からその推定を行うほかはないが、上流の砂防計画、流域の広狭、地質、植栽等も考慮の上決定する必要がある。」と記載され、参考として、既往堆砂実績を貯水量と集水面積をパラメータに整理した鶴見⁴⁾による式、地形・地質をパラメータに整理した田中⁵⁾による式が紹介されている。爾来、1960 年代を中心に多くの堆砂量式が提案されてきた。例えば、吉良⁶⁾は、貯水容量と流域面積の比である承水係数及び起伏量を、難波・川口⁷⁾は起伏量、年降水量、森林面積率を、石外⁸⁾は起伏量、大雨時降水量をパラメータにした式をそれぞれ提案している。また、江崎⁹⁾は、洪水量、河床勾配、流域内の崩壊地面積をパラメータにするとともに、貯水池での土砂捕捉率を導入した式を提案している。これらは、堆砂量に関係するであろうパラメータを選出し、これと実績値との相関関係を調査したものであり、鶴見の式を除く各式の導出では、流域面積の大きい最上流端ダムで、貯水容量も比較的大きいダムが選出されている。最近では、宮崎・大西¹⁰⁾が電力ダムの堆砂データをもとに、堆砂の経年変化をパターン分けし、夫々のパターンに応じた堆砂量と関連パラメータとの解析を実施しているが、影響因子の取り扱い、これまでの手法と基本的には変わるところはなく、多変量解析が用いられている。

これら各式で用いられているパラメータからも推察されるように、堆砂に係わる因子は非常に多い。単純な式で全国の貯水池の堆砂量を精度よく推定することはかなり難しい問題というべきであろう。竹林ら¹¹⁾は、近年の建設省堆砂報告資料から、上流に高さ 15m 以上のダムのない全国 177 ダムを抽出し、鶴見、田中、吉良、難波・川口、石外らの式の推定値との比較を行っているが、何れの式も殆ど相関が得られず、また、各式の推定値間の相関も殆どなかったことを報告している。竹林らは、江崎による式の検証は実施していないが、41 ダムの堆砂実績による検証^{12a)}では、数倍程度の誤差が生じており、式を導出した以外のデータでの適合性はかなり悪くなるようである。この他、芦田・奥村¹³⁾は年平均流出土砂量が流域面積の -0.7 乗に比例するものとして、水系の流出土砂量による分類分けを行っているが、近年の建設省の堆砂報告データにて同様の整理を行った結果、芦田らの実施した 1970 までのデータと比較してバラツキが大きく、必ずしも芦田らの分類分けに従わなかったこと、同じ水系内でも年平均流出土砂量がかなり異なることが報告されている³⁾。

こうした経験式が一番大きな問題は、式の適用範囲が明確でないことにある。式の適用範囲を明示するためには、式導出で用いた流域及び貯水池の特性を明示する必要があるが、現象の複雑さ故、規定するためのパラメータ特定が困難な現状にある。こうした状況のもと、近年ではこれら経験式による推定値は参考値として取り扱われる場合が多い。実際の計画値は大規模貯水池の経験年数の蓄積により、多くの堆砂データが得られるようになっており、近傍における類似ダムの実績を用いる例が多くみられている。以下に近傍類似ダムの堆砂実績を用いる手法について考察する。

なお、近年では堆砂現象を土砂生産～流送～堆積の流砂の移動現象と捉え、それぞれを系統的にモデル化する試みがなされるようになってきている¹⁴⁾。計算機の機能向上により、こうしたモデルの作成・計算も容易になりつつあるものと思うが、現地データの収集を始め、投入される労力に見合う予測精度が得られるかは不明な点も多い様に思われる。寧ろ流域全体を扱う総合土砂管理の観点から必要なアプローチにも思われ、今後の展開に期待したい。

1. 3. 2 近傍類似ダムからの推定

1) 留意点

平成9年改訂新版の河川砂防技術基準(案)の解説では、「貯水池の堆砂量は、貯水池計画にあたり、基本的にはできるだけ類似地域における既設のダムの堆砂量から推定することが望ましく、上流の砂防計画、流域の広狭、地質、林相などを考慮し堆砂計算結果等も参照し、総合的に決定する必要がある。」とされているが、具体的に類似の内容や、貯水池の広狭、地質、林相などをどのように評価すればよいかについての記載はない。個々の事例ごとの検討に任されているといつてよい。

一般には、近傍ダムで標高、地質、林相、崩壊地等の状況が同様の貯水池堆砂実績があれば、そのダムの比堆砂量をそのまま用いているのが現状である。また、必ずしも各種パラメータの状況が同様でない場合には、近傍の複数ダムの堆砂実績との大小関係をパラメータの状況から定性的に判断し、平均値や安全を見てより大きいであろうダムの堆砂実績をとるといった方法がとられる。このようにすれば、推定誤差が近傍ダムの堆砂実績範囲、或いはその延長上のある範囲に納められるであろうという判断であり、賢明な手法といえよう。一方、こうした判断が妥当性を持つためには、パラメータにある程度類似した傾向をもつダムの堆砂量実績が、ある程度の数近傍に必要である。このようなダムが常にある保証はない。

近傍に類似ダムがない場合には、抽出するエリアをより広く取り、その中で堆砂量に関連するであろうパラメータと堆砂量の状況を判断していかざるを得ない。ここで、注意しておかなければならないのは近傍類似ダムの意味である。近傍類似

ダムはただ近くにあればいいというものではなく、堆砂関連パラメータの幾つかは同じものとして考えることができるという意味をもつものと解釈すべきである。例えば気象や地質・地形状況などが同じであれば、これらは固定したものと考え、崩壊地面積といった、堆砂に対する傾向が明確に規定できるものを比較すればよいという意味である。従って、近くにあって異なるパラメータの数が多いダム群の場合やある種の地質のよ

表－2 評価に用いられる比堆砂量を表すパラメータ例

流入土砂量に関するもの	土砂の捕捉に関するもの
地質区分	貯水池水量（年平均貯水池水量、洪水期平均貯水池水量）
集水面積	流入量（年間流入量、出水時流入量）
傾斜（起伏量、平均傾斜）	
林相	（上流河床材料）
高度	
崩壊地（面積・傾斜）	
開発状況（開発内容、面積）	
水文量（年降水量、年最大雨量、土砂流入開始雨量以上雨量、面積当たり貯水池流入量）	

うに堆砂への影響方向が必ずしも明確でないパラメータが異なる場合には、定性的判断が容易でなくなってくる。対象エリアを広げるというのは、こうした異なるパラメータ、或いは傾向が不明なパラメータの数が増え、定性的判断が徐々に困難になっていくことを意味している。エリアをどんどん大きくすると、最終的には全国ベースで経験式を作成するという従来の研究と同様の不確実性を持つことになる。近年では、堆砂量データもかなり蓄積されてきている。全国的範囲に至る前に、より精度のよい判断を実施していく必要があろう。ここに担当技術者の能力が問われているといつてよい。

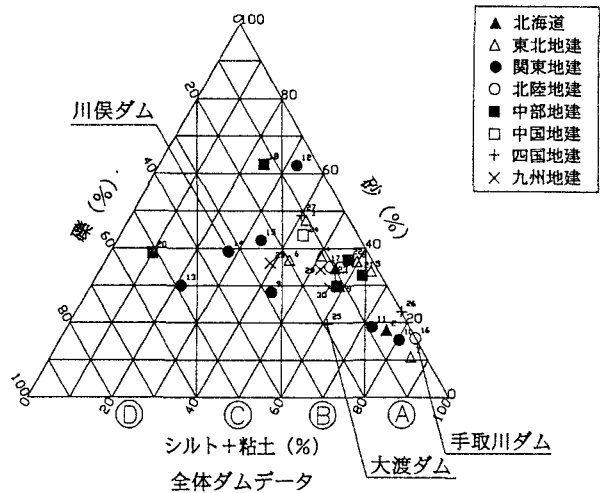
参考までに、よく用いられている比堆砂量に関連するパラメータを表－2に示す。本節で紹介した幾つかの提案式は、上流端ダムで貯水容量が比較的大きなもののデータを用いており、パラメータとして貯水量を導入していない。これは、集水域から流入する土砂量がほぼ貯水池で捕捉されているであろうことを前提に考えていること、つまり意識として流入土砂量を議論していることを表しているといつていいであろう。表の左側のパラメータである。一方、流入水量に対し、貯水量が小さい場合には、堆積することなく流下する微細粒子成分（顕著な場合には比較的大きな粒子成分）が無視できなくなってくる。鶴見や吉良の式で導入されている貯水容量のパラメータはこうした捕捉率に関するパラメータということができ、江崎は直接的に捕捉率をパラメータとして導入している。近傍類似ダムの実績が不足する場合に、砂防ダム等非常に貯水量の小さい構造物の実績値を参考にする例がみられるが、捕捉率の評価ができない場合には安易に用いるべきではない。このことについて次節にて検討する。

2) 微細粒子成分の流入と捕捉

貯水池の堆砂があるレベル以上に進行すると、堆砂量に応じて貯水池内を通過して下流に流下する土砂量が大きくなる。このとき、同時に流下する粒径も大きくなっていく。堆砂が満砂に近づくとき粒径の比較的大きな掃流成分の土砂も流下するようになり、多くの土砂が下流に流出する。捕捉される土砂量より排出される土砂量が多いような状況の貯水池は、堆砂実績から堆砂量を推定するダムとしては不適當である。つまり、計測可能な堆砂土砂量に対し、計測困難な通過土砂量が多いほど、流入土砂量の推定精度は悪くなる。

そこで、ここでは、貯水池流入とともに急激に沈降するような土砂の排出の生じていない場合を対象に考える。この場合、貯水池に堆積することなく流下する成分の主たるものはウォッシュロードであるなる微細粒子と考えてよいであろう。

まず、こうした微細粒子が堆砂量に占める割合について把握しておく。表－1に示したのは、その一つの指標である。今、水平堆砂が計画されているとすると、有効容量の内に溜まっている土砂は主として計画堆砂位が原河道と交わる位置より上流に堆積している土砂、例えばデルタを形成するような比較的大きな土砂により構成されているであろう。逆に有効容量外の土砂はこれより粒径の小さい、沈降が遅い土砂と考えることができる。こうした視点で表－1を見直すと、平均的には、堆砂の約6割が比較的小さい粒径の土砂で構成されていると考えることができよう。鈴木¹⁵⁾は、中部地方の貯水池ボーリング資料から、粒径1.0mm以下の細粒土砂の占める割合は、満砂しているダムを除き、60～80%であることを報告している。図－3は、建設省管理の30ダムについて実施され



図－3 貯水池内堆積土砂の粒径区分割合

たボーリング調査等の調査結果¹⁶⁾より求められた堆砂の粒径区分割合を示したものである。調査対象ダム平均では、粘土(0.005mm以下):20.2%、シルト(0.005~0.074mm):33.6%、砂(0.074~2.0mm):34.6%、礫(2.0~20mm):11.6%であり、シルト以下の細粒成分が約50%を占めている。これら平均的な結果は、互いに附合するものとなっている。ただし、図-3からも分かるように、個別ダム毎にみると、粒径区分割合も比較的バラツキが大きい。因みに、庄川を対象とした芦田・奥村¹³⁾の研究では、浮遊成分の境界となる粒径として0.1~0.2mmが考えられるとしており、これより小さい粒径がデルタ下流に堆積していることを報告している。また、角・塚原¹⁷⁾は、現地観測データより、ダム流域の出水時ウォッシュロード濃度は、下流域と比較してかなり大きくなることを示している。何れにしても、浮遊成分が堆砂の半分以上を占めるものとする、その捕捉率の議論は堆砂量を予測する上で無視できない因子であることが推察される。

ダムの捕捉率を表す図表として貯水池回転率をパラメータとした Brune^{12b)}の図表が知られている。これは、貯水池回転率として平均年総流入量/総貯水容量を用いたもので、米国の貯水池の実測値から上・下限及び平均の3曲線を提示している。前述の江崎⁹⁾は、平岡ダム貯水池の通過土砂量が佐久間ダムで全て捕捉されているとの仮定の下、両ダムの堆砂実績から平岡ダムでの捕捉率を求め、わが国のデータが Brune の図表の上限値に近いとしているが、わが国の代表値とするには、いかにも事例が不足しているというべきであろう。

図-4は、微細粒子の捕捉率と回転率の関係を示したものである¹⁶⁾。図は、建設省のいくつかの管理ダムを対象に行われた出水時の流入・放流水のSS調査結果を用いて作成されており、回転率として、濁水が流入する1出水当たりの総流入量と貯水量の比が用いられている。図中には、回転率の大きいデータが得られている大渡ダムのデータをもとに実施された、櫻井・柏井¹⁸⁾の鉛直2次元モ

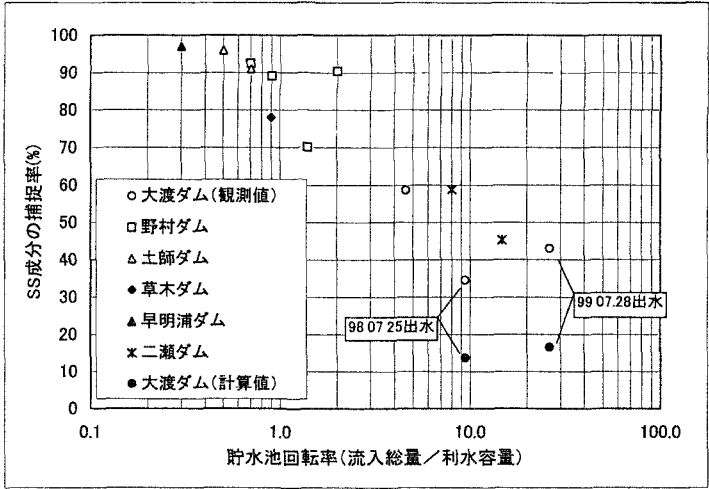


図-4 出水当たりの貯水池回転率とSS成分捕捉率の関係

デルによる数値シミュレーション結果を併せて示している。シミュレーション結果では、観測された放流水のSSは表層取水が行われている発電取水口のものを表していると推察されており、低位に設けられている放流管からの濁水放流を考慮すると、捕捉率は更に小さくなるものとしている。櫻井らは、実測データの検証を踏まえ、洪水波形・規模や取水位置を変えた検討を実施しており、微細粒子の捕捉率は回転率のみでなく、洪水波形や取水位置の影響を受けることを示している。また、当然のことながら流入土砂の粒度分布の影響を受ける。従って、同じダムの観測値でも洪水毎の捕捉率は回転率に対しある程度バラツキを持つことが予想されるが、100年という長期の土砂量を予測するのであれば、多少データはバラツキとしても平均的な値を用いて差し支えないものと思われる。そうした視点で図-4の結果をみると、データが少ないもののダムが異なるにもかかわらず比較的まとまりのある関係が得られているようである。今後更にデータの蓄積を計っていく必要があるが、出水時回転率が0.5程度以下では殆どの土砂が捕捉されること、回転率のべき乗に反比例して捕捉率が低下していくことが分かる。

図-4 を用いて、近傍類似ダムの堆砂実績から当該ダムの捕捉率を求める方法として、例えば次の方法が考えられる。

SS 成分、つまりウォッシュロード成分の流砂量 Q_s は、水量を Q とすると、 $Q_s = \alpha Q^\beta$ により通常表されている。ここに、 α, β は定数であり、 β として 2 の値がよく用いられている。この関係が成立するものとし、土砂（濁水）流入が発生する水量以上の出水 i における捕捉率を κ_i とすると、出水中に捕捉される土砂量 Q_{sdi} は、 $Q_{sdi} = \kappa_i \int_i Q_s dt = \kappa_i \alpha \int_i Q^\beta dt$ として計算される。したがって期間内の出水回数を n とすると、この間の全流入土砂に対する捕捉率 κ は

$$\kappa = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{sdi}}{\sum_{i=1}^n \int_i Q_s dt} = \frac{\sum_{i=1}^n (\kappa_i \int_i Q^\beta dt)}{\sum_{i=1}^n \int_i Q^\beta dt}$$

として求められ、近傍類似ダム及び当該ダム地点々々での出水量データを用いて、両ダムの捕捉率の違いを知ることができる。ここで、求められる捕捉率はウォッシュロード成分であるので、近傍類似ダムの堆砂量をウォッシュロード成分とこれより大きな粒子成分に分けておかなければならない。これは、堆砂のボーリング調査や堆砂形状の分析から行うことができる。すなわち、前述の芦田・奥村¹³⁾の提示している 0.1～0.2mm 以下の粒径割合、或いは貯水位付近に形成されるデルタ下流側の堆砂量割合などにより設定すればよいであろう。

3) 堆砂量の年変動

竹林・廣瀬・尾作¹¹⁾は、堆砂期間の比較的長い（12～35 年）のいくつかの貯水池の堆砂実績を用い、年堆砂量変動の確率処理を検討している。その結果、年堆砂量の確率分布は、概ね正規対数分布或いはグンベル分布に従うこと、年平均堆砂量から求められる 100 年間堆砂量に対し確率分布から求められるそれは全般に大き目の値を与え、特に年堆砂量の変動の大きいダムではその差が顕著になることを報告している。正規対数分布による年間堆砂量の確率表示は、須賀ら¹⁹⁾によっても提案されており、図-5 にその例を示す。図には、年堆砂量の変動も併せて示しているが、年堆砂量は比較的大きな変動を持つものであり、その影響を無視できないことが確認される。その影響は、100 年間堆砂といった総量的な検討においては勿論であるが、特に、貯砂ダムにより土砂捕捉しこれを毎年掘削するといった堆砂対策検討において大きく、平均量のみによる検討では不十分な計画となるので注意が必要である。

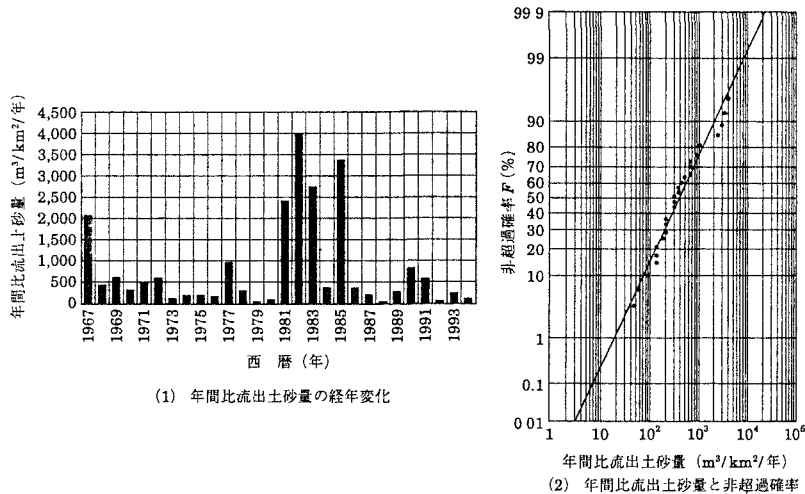


図-5 川俣ダム比流出土砂量の経年変化と確率評価

1. 4 堆砂形状の推定

貯水池に流入した土砂は、分級されて貯水池内の各所に沈降、堆積する。分級作用により形成される堆砂形状の典型的な構成要素として、貯水面付近から上流に延びる堆砂面を形成する頂部堆積層、頂部堆積層下流側に形成される比較的急勾配の前部堆積層、前部下流側で河床とほぼ平行に堆積する底部堆積層、ほぼ水平に堆積する密度流堆積層の4層がよく知られており¹³⁾、上流から下流に向かうに従って粒径が小さくなる。頂部堆積層及び前部堆積層はデルタとよばれる段丘状の形状を示し、主として掃流砂及び粒径の大きな浮遊砂からなる。また、底部堆積層、密度流堆積層は比較的粒径の小さい浮遊砂及びウォッシュロードにより構成される。

上記は典型的なスケッチであり、例えば粒度分布が連続的で、掃流・浮遊砂の混在が顕著になってくると、前部堆積層の勾配が緩くなり、底部堆積層との区別が不明瞭になってくる²⁰⁾。また、堆積土砂は、貯水位の水位が低下すると、再移動し、再度沈降・堆積するので、実際の堆砂形状は複雑な様相を示すことになる。

こうした分級や水位変化の影響を受ける堆砂形状は、貯水池運用下の河床変動計算によりある程度の信頼性をもって計算することが可能である。ここで、計算での流入土砂条件等は、対象期間内の堆砂量が、前節で述べた堆砂量に合うよう粒径分布を含め設定する必要がある。

計算における貯水池内の浮遊成分は、厳密には、密度分布をもつ貯水池内での複雑な流動現象を考慮しなければならない。この現象の再現には、濁水問題で利用されている鉛直一次元或いは2次元モデル等を用いることができる。ただし、100年といった長期間の計算をするにはかなりの計算時間を必要とする。浮遊成分については、ダムを通過する成分も考えられ、設定された堆砂量に見合う条件設定のためには、繰り返し計算が必要となる。これは多大な労力といえよう。このため、貯水池内の密度分布の影響を無視したより簡便な方法の検討がなされており参考にする事ができる^{21), 22)}。貯水池規模にもよるが、大量の土砂流入があるような出水時には、貯水池内の躍層はかなりの程度破壊されていることが想定され、このような場合には、密度分布の影響を考慮する必要はないものと思われる。

計算に当たってのもう一つの課題は、常流、射流が混在した流れ場の扱いにある。一般に、ダムが建設される河道の河床勾配は大きい。また、貯水位低下による再移動を再現するためには、下流に急勾配面をもつデルタの侵食を計算できなければならない。そのためには常流、射流の混在した流れ場に対する計算が必要となり、水位低下によるフラッシング排砂のシミュレーション等を対象に実施されてきている^{23), 24)}。同様の流れを扱う砂防関係では、近年、MacCormack法による計算が推奨されているようである²⁵⁾。

数値計算によるシミュレーションは、長期間に亘る計算が必要な堆砂形状検討では、それなりの労力を要するものである。貯水池容量に対する堆砂容量の比率が大きい場合や、大規模な堆砂対策を検討するなどのケースでは必要になるものと思うが、計画堆砂量が10%~20%程度の、通常の貯水池の計画検討に対しては過大な労力に思える。このような貯水池では、例えばウォッシュロードに相当する小さい浮遊成分に対しては水平堆砂とし、計算の比較的容易で背砂の問題を生じる掃流成分（粒径の大きな浮遊成分も掃流成分として扱う）に対してのみ計算を行うといった方法で十分であろう。背砂の影響が小さい場合には、掃流成分について更に簡便に、デルタの頂点＝常時の水位、前部堆積層傾斜角＝安息角とし、デルタの堆積量が掃流成分堆砂量に等しくなるように頂部堆積層勾配を求めるといった方法も考えられる。また、常時の水位での水深及び容量により無次元化した貯水池水深～容量曲線及び貯水池運用が、堆砂量検討の対象とした近傍類似ダムと同様であれば、近傍類似ダムにおける無次元水深上の堆砂量構成比率を当該ダムに適用するといった方法も有力であり、推定される堆砂の影響の度合い、利用可能なデータの質を勘案して手法の選択を行う必要がある。

2. 堆砂の軽減策

2. 1 堆砂軽減策のメニュー

現在実施されている、或いは現実的なものとして考えられている堆砂軽減方策をまとめて図-6に示す。

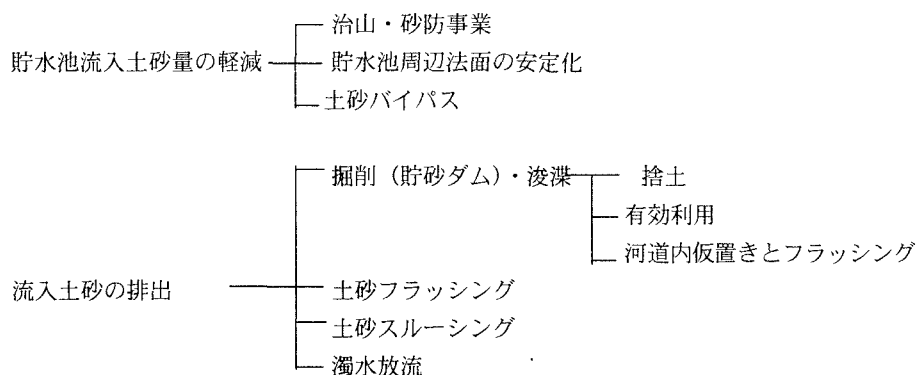


図-6 貯水池の土砂軽減方策

図-6のうち、貯水池における堆砂対策は土砂バイパスより下方のものであり、ここでは、これら方策を対象に論ずることとする。このうち、土砂バイパス、フラッシング、スルーシング及び濁水放流は、貯水池を通過する流水の力を用いるものである。また、掘削・浚渫は機械力によるものであるが、河道内に仮置きし、出水時にこれをフラッシュさせる場合には、河道を下る流水の力を併せて用いることになる。

2. 2 掘削・浚渫

堆積した土砂を排出する最も一般的な方法は掘削・浚渫である。堆砂量の絶対値が小さければ、堆砂の状況に合わせて除去すればよい。建設省の堆砂報告によれば、貯水容量100万 m^3 以上の約700ダムにおける、昭和61年～平成8年の10年間の年間平均堆砂量は約2,000万 m^3 であり³⁾、一ダム当たりの平均は約3万 m^3 である。貯水池計画、水位低下によるフラッシングが必要な宇奈月ダムでは、年間平均約140万 m^3 の、また、土砂バイパスによる恒久対策が計画されている美和ダムでは年間平均約70万 m^3 の流入土砂量が推定されており、これらの数字と比べれば平均値は桁違いに小さい数字である。掘削・浚渫による対応が可能なダムも少なくないであろう。平成9年度に建設省が実施したアンケート結果（回答590ダム）によれば、平成63年～平成9年までの10年間に、平均して年間390万 m^3 の、最大では500万 m^3 の土砂採取が行われている。

掘削・浚渫の問題点は、その搬出先である。先のアンケート結果では、採取土砂の約60%に当たる220万 m^3 がコンクリート骨材や盛土材として有効利用されている。ダム貯水池は一般に需要地から遠距離にあり、こうした有効利用では、コスト面で、また、道路整備が十分でない場合には環境面で不

利な条件下にある。近傍に需要が発生した場合に即座に対応するなど、常日頃からの臨機応変な対応が望まれる。図-7には、採取土砂の運搬距離を示す。距離が遠くなるに従って事例も少なくなっており、25kmを超える例はまれである。

掘削・浚渫土を有効利用する、或いは捨土する場合には、河道を通過するはずの土砂を河道外に搬出する

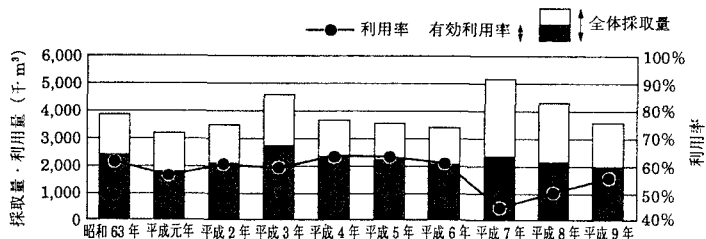
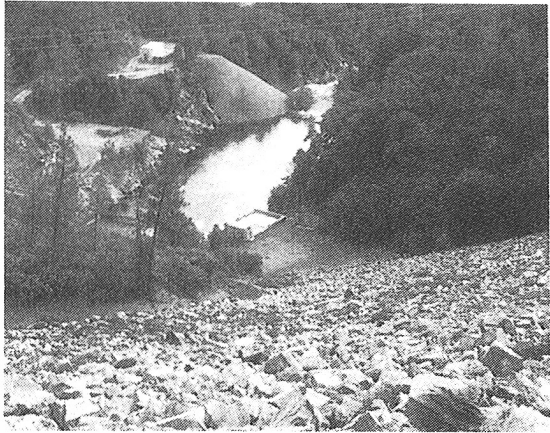


図-7 採取土砂の運搬距離

ことになる。総合土砂管理の観点からは、適当な粒径・土砂量を下流に供給するのが望ましい。このことを受け、近年、採取土砂を下流河道に仮置きし、これを出水時にフラッシュさせる試みが実施されるようになってきている。長安口ダムでは既に長年の実績を持っているし、秋葉ダム、長島ダム、三春ダムなど各地で試験的に行われている。将来性のある方法ということができ、今後、置土方法と出水時のフラッシング特性等が整理されていくことが望まれる。写真－１は、米国開拓局のダムでの置土状況であるが、ダム直下流斜面に上方から山積されている。これと比較し、わが国で実施されている置土は、かなり神経を使って置土場所、盛土形状を設定して



写真－１ ウィスキーータウンダム下流の置土状況

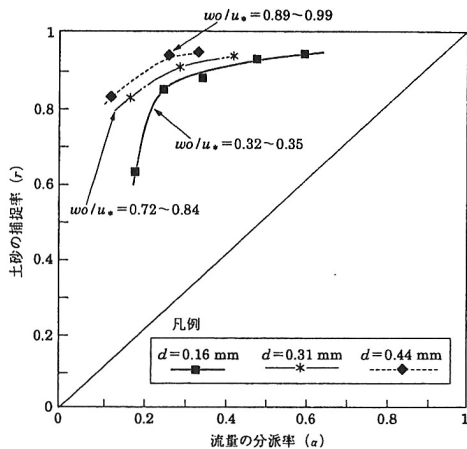
いる。また、置土も少量から始め、環境等のモニタリングを行いながら徐々に量を増やすといった慎重な対応を行っている。環境に配慮した妥当な方法と思うが、同時に、高コストなものになっているように思う。将来性のある方法であり、置土方法と出水時のフラッシング特性等を早急に整理していく必要がある。

有効利用や下流への置土に用いられるのは、比較的粒径の大きな土砂であり、堆砂でいえば、貯水池上流側に堆積する土砂である。こうした比較的大きな粒径の土砂の掘削を容易にするため貯水池末端付近に貯砂ダムが設けられる場合も多い。貯砂ダムは、規模を小さくすれば堆積土砂の粒径を比較的大きなものに限定することが可能であるが、逆に捕捉する量が小さくなる。また、規模を大きくすれば捕捉量は多くなるが同時に細粒成分も捕捉することになる。貯砂ダムの規模・配置の設定では、掘削土の処理方法を十分勘案しておかなければならない。貯砂ダムの、粒度特性も含めた貯砂機能については、不明な部分も多いが、数値シミュレーション等を用いてある程度の予測は可能である。

2. 3 土砂バイパス

土砂バイパスにてダム下流にバイパスされる土砂量は分水量の関数として与えられるが、その関係は粒径ごとに異なる。また、分流施設の形式・規模や運用方法の影響を受けるものである。従って、バイパス土砂量は、最終的には分水計画、施設計画を設定した上で算定されることとなり、バイパス計画検討では、何回かの試行計算が必要になる²⁶⁾。

粒径との関係で言えば、濃度分布が偏る粒径の大きなものほど、分流する流れの選択により、少ない水量の分流で多くの土砂を分流することができる²⁷⁾。図－８は、分流堰上流側に螺旋流を形成させ、河床付近の流れを主体に分流した場合の流量と土砂の分派特性について示したものである。図中、 w_0 ：粒子の沈降速度、 u_* ：上流河道での摩擦速度であり、粒径の大きい程、小さい分流量でより多くの土砂を捕捉できることが分かる。また、



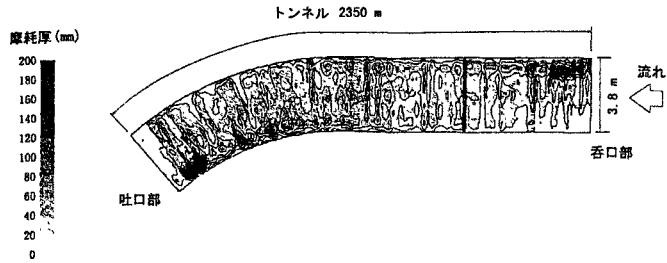
図－８ 分流堰前面に渦流を形成させた場合の土砂の捕捉率と流量の分派率の関係

粒径の大きな土砂であれば、分流堰上流の水位が流入水量に合わせて上昇・低下することを利用し、出水時に一旦上流に堆積させ、水量減衰時の水位低下時にフラッシュさせることも可能である。これに対し、水流と完全に混合しているウォッシュロードでは、水量と土砂量の分流比率がほぼ同程度となり、水量の分流計画により土砂分流量も概ね決まることになる。

バイパス施設の設計では、分流施設とともに、バイパス水路、減勢工の設計が課題となる。バイパス水路は、通常開水路トンネルとして設計されるが、トンネル内での土砂の堆積による水量や土砂の流下阻害を生じないように設計する必要がある。

一般に、同じ水路勾配での土砂輸送能力は、固定床におけるものが移動床におけるものよりかなり大きい²⁸⁾。それ故、一度堆積が始まると、堆積は急激に進行し、開水路流のトンネル内流況を保つことはできない²⁹⁾。こうした土砂の堆積は、定常的には、大きな粒径の土砂の高濃度分派や河道流砂量に比較して緩勾配な勾配設定により生じる可能性がある。また、先に述べた分流堰上流水位低下過程では、堰上流堆積土砂の侵食により、一時的に大きな土砂流入が生じるので注意が必要である。原田ら³⁰⁾は、分流堰水位低下時の土砂流入により生じたトンネル内堆積により、トンネル内に、負圧を伴う大きな圧力変動が生じることを報告している。なお、バイパス水路は、地形等との関係で湾曲部を持つことが考えられるが、湾曲部では、局所的な土砂の堆積を生じるので注意が必要である。射流水路に対する外崎・高須³¹⁾の実験によれば、流砂量の増加に連れて、湾曲部内側での堆積の開始、内側での堆砂厚の増大と湾曲外側への堆砂幅の拡大、外側への堆砂の到達と直線水路部への堆砂の拡大の過程を経るとされ、湾曲外壁に堆砂が到達する際の流砂量は、直線水路の場合の80%程度であったことを報告している。ただし、湾曲部曲率半径/水路幅＝5～15、湾曲部中心角度＝30～90度である。

粒径の大きな土砂を流下させる場合には、トンネルの土砂流下能力とともに、摩耗対策が問題となる。砂礫による摩耗・損傷量については、必ずしも十分な知見が得られている状況にはないが、砂礫のバイパスを実施している旭ダムバイパストンネルのコンクリート摩耗実績³²⁾によれば、平成10年4月から12月までの約8,300m³のバイパスにより、平均45mmの摩耗が生じ、石橋³³⁾による方法での年間摩耗量の設定値40mmと同程度の



図－9 旭ダムバイパストンネル摩耗状況

値であったとされている。一方、水平のインバーとであるにもかかわらず、局所的には200mmを超える深掘れが生じており、図－9に示すように、トンネル呑み口から直線区間では、呑み口部の影響で右岸側が、曲線始端以降では、曲がりの影響により左岸側（曲がりの内側）が顕著に摩耗している。こうした、摩耗／損傷については、今後、ライニング材料も含めて研究を進めていく必要がある。

摩耗対策は、バイパス水路のみではなく、分流施設、減勢工を含む施設全体としての問題でもある。トンネル部では、損傷による施設形状の変化はある程度許容されるが、分流堰の流量コントロール部では形状の維持そのものが必要である。このような場所では、損耗量の小さい鋼材を使うなど、施設の必要機能に留意した検討が要求される。

バイパス水路の摩耗を小さくするためには、水路の勾配を小さくするのが効果的である。一方、水路勾配を小さくとれば水路断面が大きくなり、土砂の輸送能力が減少する。水路延長が同じであれば、水路出口と下流河川標高に大きな落差を生じることになり、砂礫の激しい衝撃を受ける減勢工が必要となる。また、水路の下流端が山腹の高い位置になり、施工が不利になる等様々なデメリットが生じる。筆者は、水路出口標高はできる限り下流河床に近づけるのが得策であると考えているが、そのためにも水路の摩耗・損傷量とそ

の対策に関するより詳細な知見が求められている。

減勢工については、水理的には通常の水理施設と同様であるが、土砂による摩耗対策を十分に考えておかなければならない。また、地形にもよるが、バイパス水路は、通常河道側方から合流するので、減勢工が河道の流れに悪影響を与えないよう配置する必要がある。地形によっては、これはかなり難しい問題となり得るものであり、先に述べた水路勾配を大きくすることにより減勢工の負担をできるだけ小さく（下流条件が許せば、直接河道に放流）するのが得策である。なお、通常の規模の砂礫であれば、砂礫の存在が減勢工の流況に及ぼす影響は小さいと考えてよい。

2. 4 土砂フラッシング・スルーシング

治水専用ダムでゲートレスの常用放流設備敷高を原河床標高付近に設定した場合を考えると、貯水位及び流量変化は図-10に示すようになる。土砂の貯水池への流入は、主として出水時に生じ、流入した土砂は、粒径ごとに、洪水調節における一連の水位変化に応じた挙動を示す。即ち、沈降しにくい微細粒子は、流水と同様に一時的に貯留された後、貯水池が空虚になる過程で放流される。また、沈降しやすい大きな粒径の土砂は、貯水位上昇時には水面位置付近に堆積するが、水位の低下に伴い侵食されて下流に移動し、最終的にはダム下流へと放出される。中間的な粒径の土砂は、両者の間の挙動を示すこととなる。

微細粒子土砂の放出			
貯留>放出		放出>貯留	
大粒径土砂の放出			
放出	堆積	引き込み・堆積	放出

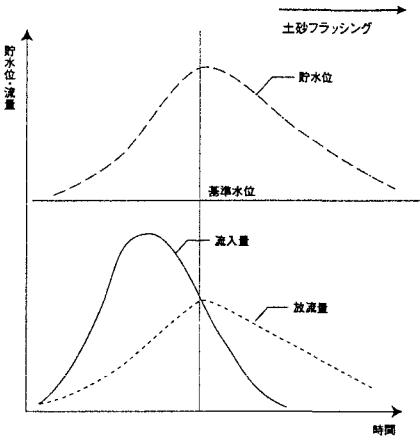


図-10 自然調節における貯水位・流量変化と土砂の挙動

土砂フラッシングは、貯水池の水位低下操作によって堆積土砂を下流に排出するものであり、そこで生じる現象は上述の水位降下時の現象と同じである。また、堆積することなく放出される微細土砂は、スルーシング操作により放流されたといつてよい（スルーシングの定義にはまだ確定したものはないが、ここでは、水位をある程度低下させ、流入土砂を堆積させることなく通過させる操作として定義しておく）。これら水位変化に伴う土砂の挙動は、堆砂形状の予測で述べた河床変動計算により計算することができ、繰り返されるフラッシング操作により、ダムから上流側に向かって、ある貯水空間が安定して維持される^{3,4)}。この安定して維持される空間を利用して貯水池の利用計画が策定される。ここで、洪水調節容量については、洪水中に大量の土砂が流入するので、フラッシング後に安定して得られる容量に、出水時に堆砂により失われる容量を差し引いておく必要がある。

治水専用ダムの常時の貯水池は空虚であり、一出水中に流入した土砂がその出水の中で排出される。即ち、自然現象に対する時間差が小さく土砂の放出が行われる。一方、多目的ダム等常時の水位が高い場合には、ゲート操作により実施される水位低下操作間の堆積土砂が排出されることになり、同じ流量・水位低下時間の排砂操作を行うものとする、水位低下操作の頻度が小さいほど一回あたりに排出される土砂量が大きくなる。このとき、小さい流量での排出を行うと、土砂排出量が小さくなり確保される貯水容量が小さくなることは勿論、非常に高濃度の土砂が排出されるなど下流河道環境に与える影響が大きい問題が生じる。

このことについて、多くの排砂経験を有するフランスの電力公社は、排砂操作に関し、①時期は洪水期とし、毎年の操作が可能なよう年1回発生するピーク流量程度を放流開始流量とする、②洪水流量を大きくしないよう、洪水ピークが過ぎてから行う、③所要の水位回復時間の短い貯水池で行う、④地域の水文及び環

境影響を考慮した時期を選定する（特に魚類の産卵シーズンは必ず避ける）、⑤清水を下流に放流し、下流河床に堆積した浮遊砂を洗い流すため、必要に応じフラッシュ放流を継続する等の原則を提示している³⁵⁾。わが国では、黒部川の出平ダムでの何回かのフラッシュ放流の経験を得て、同様の原則を持った排砂操作方法にたどり着いており、平成13年6月には、下流宇奈月ダムとの初めての連携排砂が実施されている。排砂経験を通じ、今後更に適切な運用ルールの確立が図られていくものと期待される。

ゲートレスの治水専用ダムでは常用洪水吐きを通して、また、多目的ダム等の常時の水位が高位にあるダムでは、ゲートを有する排砂設備を通じて土砂が排出される。これら施設は、堤体内に設けられており、堤体に影響を与えない、厳密な止水或いは流量制御を行わなければならない、という意味で土砂バイパス水路の場合より、更に厳密な土砂による摩耗・損傷対策を検討しなければならない。

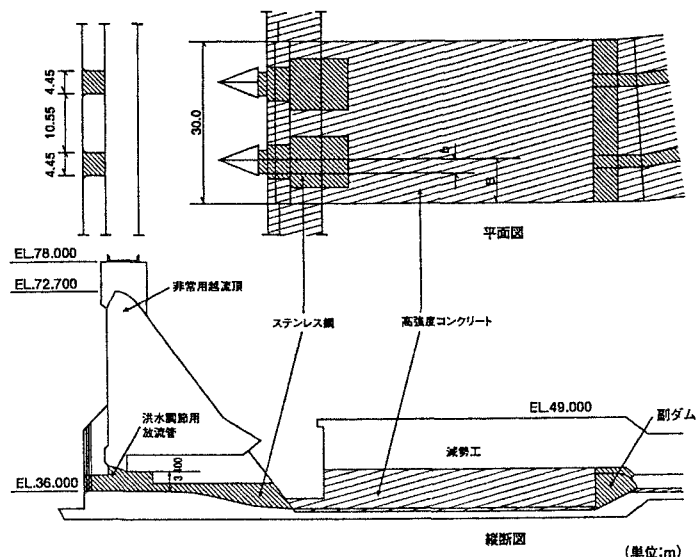


図-11 益田川ダムの放流設備

図-11には治水専用ダムである益田川ダムの放流設備計画を示したが、土砂を通過させる放流管の管路長を短くし、土砂による影響を小さくするとともに、堤体や流量制御に直接影響する部分及び、減勢工内の水深を確保するための副ダム上流面と上面については、形状変化が少なく耐摩耗・耐錆性のあるステンレス鋼によりライニングすることが計画されている。また、減勢工形状は、減勢工内に平面渦により生じる土砂の巻き込みが生ぜず、流入・堆積土砂がスムーズに下流にフラッシュされるよう配慮されている³⁶⁾。

施設の摩耗対策は、大量の土砂を排出する宇奈月ダムや出平ダムにおいて様々な検討が実施されており、各種ライニング材料の摩耗特性試験が実施されるとともに、ゲート形式やライニング方法に多くの新技術を導入している^{36)、37)、38)}。ここでは詳細は省略するが、今後の土砂流下施設の設計において参考になるものと思われる。

2. 5 濁水放流

貯水池内に堆積した土砂で最も扱いにくいのは、恐らく貯水池下流側に堆積した微細粒子成分ではないかと思われる。浚渫による除去は可能であるが、骨材や盛土としての利用は期待できない。下流への置土は濁水の原因となろう。また、土砂バイパスにより多くの土砂を迂回させることはできるが、先に述べたように粒径の大きな土砂と比べて捕捉率は低いので、貯水池に堆積する成分を完全に除去することはできない。水位低下によるフラッシングにより下流に排出することは可能であるが、土砂フラッシングは適用可能なダムが限られよう。

そこで、微細粒子を濁水として出水時に排出する方法が期待される。しかし、従来から議論されてきた濁水放流は、出水時の濁流を選択取水設備や低位の放流設備で積極的に排出しようというものであり（例えば図-12に示す片桐ダムでは、自然調節のための常用オリフィス上流にカーテンウォールを設置し、低位から

の濁水放流を行っている^{3 9)}、ある程度の排出効果は得られても、基本的には図－4に示される捕捉率を大幅に変えることはできないものと思われる。図－4の捕捉率には、低位放流管により多くの濁水が放流されている場合も含まれるからであり、最も影響するパラメータは回転率にあると考えられるからである。

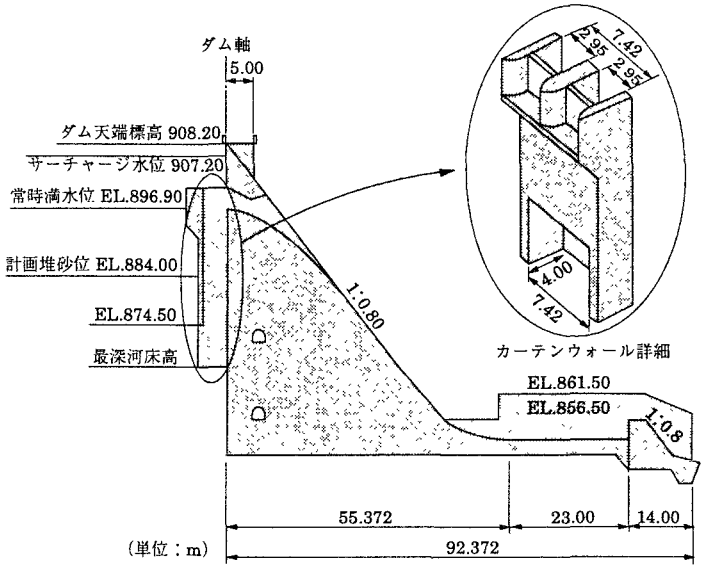
濁水放流については、余り積極的な議論はなされてこなかったのが実情であり、ここでは、これまでの記述と趣を変え、構想も含めて述べてみたい。なお、濁水放流に関連する現象は、濁水問題で扱われるものと基本的には同様であり、濁水流動シミュレーションによりシミュレートできる。

濁水放流をより効果あるものとするヒントは、図－4にあり、出水時の回転率を大きくすればよい。そのためには貯水位のある程度の低下を実施する必要がある。(結局、土砂スルーシングを行うことになる)。ある程度の規模の出水に対し、水位を低く維持できれば、小流量時に堆積した土砂を再浮上させ、堆砂レベルを常に一定に保つことも可能であろう。詳細は不明であるが、台湾におけるこうした運用の成功例も紹介されており、恒常的な貯水池利用に向けての有力な方法であると思われる^{4 0)}。

土砂スルーシングは、しかし、土砂フラッシング程ではないにしろかなりの水位低下を要求する。既設ダムであれば貯水池運用の変更が必要になろう。特に貯水池回転率が小さいダムでは、貯水容量の利用が大きく制限されることになる。

ここで、濁水問題を考えてみると、問題は、出水時の河川が濁った状態では濁度を軽減し、出水後の清澄な状態時まで濁水を放流しつづけることにある。つまり、全量の議論ではなく、時間的なズレが問題である。回転率が小さい場合にはこのことが特に顕著であり、出水始めの長い時間に亘り貯水池内の清澄な水を放流していることが考えられる。つまり、堆砂問題の側から言えば、濁水を出せる時期に出していないことになる。こうした貯水池では躍層も発達しているであろうから、カーテン等により洪水流を周辺水と混合することなく躍層下方に導流するとともに、低位の放流設備から放流を行い、実質的な回転率を躍層下方の容量に対するものとし、濁流の放流設備への到達を速くすることが考えられる。この場合、躍層上部の清澄水はそのまま保たれるから濁水長期化問題にも有効であろう。より積極的には、濁水が到達するまでの間、貯水池下流側の微細粒子を曝気等により攪拌、再浮上させ、出水と同時に低位放流設備から放流することも考えられる。こうすれば微細粒子成分の堆砂量を常にあるレベルで一定に維持することも可能と思うがどうか。

以上は、単なる構想である。貯水池下流側に堆積した微細粒子成分の排出は比較的難しい(勿論浚渫すればよい。より効率的な方法でという意味である)問題に思える。関係諸氏の技術開発に期待するところ大で



図－12 片桐ダムのカーテンウォール式常用洪水吐き

ある。

参考文献

- 1) 千田実：ダムの堆砂が発電に及ぼす影響について、電力土木、No.154、1978
- 2) 山本晃一：ダム下流の河床低下、土木技術資料、No.15、Vol. 6、1973
- 3) 上阪恒雄：貯水池の土砂管理、ダム技術、No.159、1999
- 4) 鶴見一之：貯水池堆砂量の一算定法、土木学会誌、39-3、1954
- 5) 田中治雄：わが国における貯水池の埋没に関する応用地学的研究、電力中央研究所報告・土木 57011、1957
- 6) 吉良八郎：貯水池の滞砂に関する水理学的研究、香川大学農学部紀要、1963
- 7) 灘波宣士、川口武雄：産地流域からの土砂の流出に及ぼす諸因子とくに森林の影響、林業試験所研究報告、1965
- 8) 石外宏：貯水池の堆砂に関する研究、電力中央研究所技術研究所報告、No.66010、1966
- 9) 江崎一博：貯水池の堆砂に関する研究、土木研究所報告、第 129 号、1966
- 10) 宮崎洋三、大西外明：貯水池の堆砂実績からみた流域の土砂流出についての研究、水文水資源学会誌、Vol.11、No.1、1998
- 11) 竹林征三、廣瀬昌由、尾作悦男：ダム貯水池堆砂量の推定方法についての試論－確率過程として堆砂現象をとらえる－、ダム工学、No. 8、1992
- 12) 建設省河川局監修：多目的ダムの建設、昭和 62 年版調査編、a)p.61、b)p.60
- 13) 芦田和男、奥田武信：ダム堆砂に関する研究、京都大学防災研究所年度報告、1974
- 14) 吉川太、副田悦生、笹川清志：堆砂診断技術に関する調査研究（ダム流入土砂量の予測）、関西電力(株)総研報告、1989
- 15) 鈴木徳行：ダム堆砂に関する排砂対策について、ダム技術、Vol.4-2、1986
- 16) 箱石憲昭：ダム貯水池の土砂管理に関する研究、土木技術資料、No.42、Vol.4、2000
- 17) 角哲也、塚原千明：ダム流域におけるウォッシュロード量の評価、河川技術に関する論文集、No. 5、1999
- 18) 櫻井寿之、柏井条介：貯水池における出水時の微細粒子の捕捉、ダム技術、No.161、2000
- 19) 須賀堯三、島貫徹、徳永敏朗：全国河川上流部の流出土砂量、土木技術資料、Vol.18、No.2、1976
- 20) 岡部健士：貯水池における堆砂過程とその予測に関する基礎的研究、京都大学学位論文、1982
- 21) 芦田和男、高橋保、道上正規：河川の土砂災害と対策、pp.182～190、森北出版、1983
- 22) 道上正規、藤田正治、三木淳史：ウォッシュロードによる貯水池堆砂の 1 次元及び 2 次元計算法、鳥取大学工学部研究報告第 3 巻、1992
- 23) 高須修二、太田達雄：貯水池の排砂に関する河床変動計算、土木技術資料、No.31、Vol 12、1989
- 24) T. Kokubo, M. Itakura, m. Harada: Prediction methods and actual results on flushing of accumulated deposits from Dashidaira reservoir, ICOLD, Q.74, R 47, 1997
- 25) (社) 砂防学会編：山地河川における河床変動の数値計算法、山海堂、2000
- 26) 柏井条介：貯水池土砂バイパスの計画検討、土木技術資料、No 43、Vol.3、2001
- 27) 柏井条介、本田敏也、菅原崇之：ダム貯水池の土砂バイパス施設分派特性、土木技術資料、No.37、Vol.12、1995
- 28) 柏井条介、外崎悟、川口和也：滑面固定床流れの抵抗と流砂量、土木技術資料、Vol 31、No.5、1989
- 29) 原田稔、森本浩、小久保鉄也：貯水池のバイパス排砂システムに関する実験的研究、ダム工学、No.24、1996
- 30) 原田稔、小久保鉄也、出野尚：貯水池のバイパス排砂システムにおけるトンネル内土砂水理特性、土木学会論文集、No.600/Ⅱ-44、1998
- 31) 外崎悟、高須修二：排砂水路曲線部における土砂輸送能力、第 44 回土木学会年技講演会講演集、1989

- 32) 片岡幸毅：旭ダムの排砂バイパスについて、貯水池土砂管理国際シンポジウムワークショップ論文集一、2000
- 33) 石橋毅：ダム排砂設備の流下砂礫による摩耗・損傷に関する水理学的研究、土木学会論文報告集、第 334 号、1983
- 34) 小林裕、柏井条介：ダム貯水池堆砂の排除に関する一考察、第 43 回土木学会年次講演会、1988
- 35) J-P. Bouchard: Sediment management in EDF reservoirs, 貯水池土砂管理国際シンポジウムワークショップ論文集一、2000
- 36) 柏井条介：洪水調節ダムのフラッシング操作と施設、貯水池土砂管理国際シンポジウムワークショップ論文集一、2000
- 37) 高須修二、豊田高司：排砂水路の摩耗対策、大ダム、No.138、1991
- 38) 寺田昌史：ダムの排砂設備の計画と設計について、大ダム、No.152、1995
- 39) 塚原千明、角哲也、宮井貴大、柏井条介：カーテンウォール付常用洪水吐きの土砂放流特性、土木技術資料、No.40、Vol.11、1998
- 40) 角哲也：台湾における貯水池土砂管理、ダム技術、No.159、1999