

◆特集：「ストック・メンテナンスの世紀」への対応◆

堆砂対策によるダム貯水池の持続的利用

柏井条介*

1. はじめに

適切な管理が行われれば、近代工法により建設されたダム堤体は半永久的に利用可能な構造物である。しかし、ダム堤体により形成される貯水池の寿命は、堤体のように半永久的という訳にはいかない。

貯水池の機能は、主に二つの側面から寿命を論じることができる。一つは、貯水池建設の背景となる社会・経済的なものであり、社会・経済の変化に応じて貯水池の必要性も変化する。

近年、ダムの嵩上げや放流設備等の改造事例が増加してきているのは、こうした貯水池の必要性の変化に対応するものと考えられる¹⁾。逆に貯水池の使命が終わったものとして、ダム撤去の議論もなされるようになってきているが、現況ではその例は限られている。

貯水池の寿命に関する他の側面は堆砂である。近年のわが国の貯水池計画では、100年間に堆積する土砂量を貯水容量に予め見込むものとされている。計画期間の100年は他の構造物と比較してかなり長いものであるが、完成後の経過年数の長いダムでは、計画堆砂量を超えるダムもみられている。こうしたダムは今後徐々に増加するものと予想され、単純に必要性の有無のみ評価するものとするれば、ダム貯水池の社会・経済的な寿命は堆砂容量から定まる寿命より長いと問題はないとされる。したがって、堆砂対策技術の確立の有無が、将来のダム利用の効率性を左右するものと思われる。

堆砂対策については、堆砂の進行の速いダム等では既に実施されてきているところであるが、これら対策検討は個々の貯水池を対象とするものであり体系化には至っていないのが現状である。また、治水、河川利用と環境保全の調和を目指す総

合土砂管理²⁾との関係が明確でない等、必ずしも検討が十分でない部分も存在する。

本稿では、やがて多くのダムが堆砂問題に直面するとの認識の下、堆砂対策技術の現状を整理しつつ将来の方向性を考察する。ただし、ここで扱う堆砂対策技術は貯水池周辺での技術に限定し、治山等による流域の生産・流入土砂量軽減策は含まないものとする。治山等の対策は根源的であるが、ダムの堆砂対策として評価するためには、効果を定量化し、堆砂対策としての効率性を明確にしていく必要がある。また、本稿では既設ダムを対象に考えている。

2. 堆砂の現状

以下の考察に入る前に、堆砂の現況について概観し問題の緊急性について確認しておく。

図-1は、完成後の経過年数と年平均の堆砂容量の損失率（堆砂で失われる堆砂容量の割合（%））の関係を、ダム数のカバー率をパラメータに示したものである。用いたデータは、100万m³/s以上の総貯水容量をもつ786ダムの堆砂実績データである。データは、1996年現在のものであり、対象ダムは当時のわが国のダム数の約30%、全貯水容量の約80%を占めている。

図より、完成後の年数が多いほど（完成年が古いほど）年平均堆砂容量の損失率が大きい傾向が

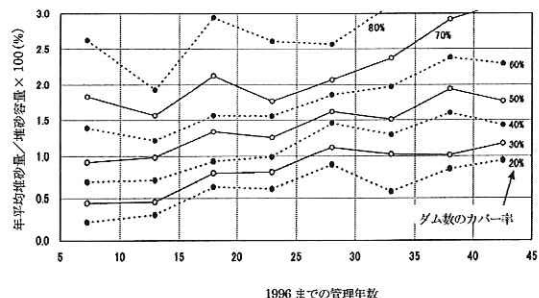


図-1 堆砂容量の年平均損失率

Sustainable Use of Dam Reservoirs by Sedimentation Countermeasures

あり、完成後40年のダムでは、約半数のダムが2%（堆砂容量の寿命50年）以上の損失率となっている。このことは、40年以上経過したダムの半数近くが既に堆砂容量を失っている、或いは失いつつあることを示しており、今後、計画堆砂容量を超えるダムが増加するであろうことが確認される。

なお、完成後の年数が比較的少ないダムでは、ダム数のカバー率約50%において年平均損失率1%となっており、100年間の堆砂容量設定に関する計画方針の徹底化、堆砂量推定精度の向上が確認される。ただし、ダムごとのばらつきは依然として大きく、推定精度の向上は、古くて新しい問題として残されている。

図-2は、総貯水容量に対する堆砂容量の割合を示したものである。値はややばらつくが、平均的には16%程度である。このことは、仮に堆砂容量が失われても多くの貯水容量が残されることを示しており、わが国の堆砂問題の深刻さを緩和している。なお、確認はしていないが、値のばらつきは流入土砂量の影響による部分が大きく、流入土砂量が多いダムほど堆砂容量の占める割合が大きくなるものと考えている。

上記のように、堆砂問題は平均的にはそれほど深刻ではなく、直ちに貯水池機能に大きな障害が生じる状況にはないといえる。緊急を要するダムは限られており、これらダムには逐次対策が講じられつつある。

堆砂対策を必要とするダムが継続的に順次出現してくるといのが今後の展開になるものと思われる、その際、流入土砂量が多いダムのみでなく、比較的小さい流入土砂量のダムも対象に入るようになることが推察される。

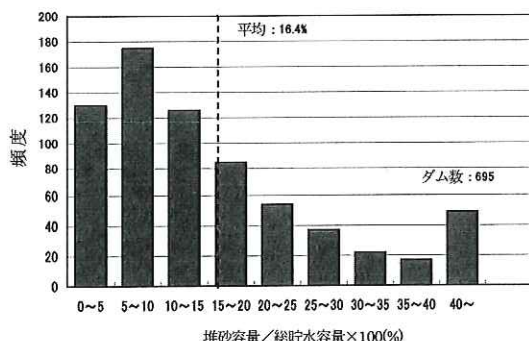


図-2 堆砂容量の総貯水容量に占める割合

3. 土砂採取と有効利用の現状

貯水池の持続的利用を果たすためには、流入土砂量に相当する土砂量を貯水池外に移動させる必要がある。

1997年に実施したアンケート結果では、全国で毎年400万 m^3 程度の土砂の採取が確認されている。アンケート回答ダム数は580であり、図-1で用いた786ダムの同時期の総堆砂量が年間約2000万 m^3 程度であることから、20%程度以上の土砂が毎年採取されている勘定になる³⁾。

同アンケートでは、土砂採取量の約60%がコンクリート骨材や盛土材料として有効利用されていることが示されているが、同時に有効利用に限界があることも示唆されている。すなわち、貯水池が山間部にあり、需要地までの距離が一般に大きいこと、堆砂には有効利用できない微細粒子成分や木片等が混入しやすく、これらの分別・廃棄が必要になることなどである。

ここで、国土交通省ダムの貯水池のボーリング結果によれば、堆砂の54%がシルト以下の成分であり、そのうち20%は粘土成分である（堆砂体積比⁴⁾）。従って、仮に有効利用を推進したとしても、従来型のコンクリート骨材等の利用では堆砂の半分は利用できないことになる。シルトや粘土を利用する方法が開発される必要があるが、土壤材料や陶土への利用など、利用方法は限定され、かつ需要量が余り見込めないのが現状である⁵⁾。

堆砂の採取は貯水池末端に設けた貯砂ダムにより土砂を捕捉して実施される場合が多い。陸上掘削を可能とするとともに掘削位置を固定することが貯砂ダムの設置目的であり、基本的には砂以上の粒子が対象に考えられている。貯水池の深い位置に堆積するシルト、粘土は浚渫除去作業が必要であり、採取作業そのもののコスト低減も課題といえよう。

4. 河道への土砂供給

4.1 土砂供給の位置付け

有効利用できない採取土砂は捨土する必要がある。捨土のためには用地確保が必要になるが、対象土砂量が大きくなると、用地確保が困難になる。

近年、採取した堆砂をダム下流に仮置きし、洪水時に掃流させる試みがなされるようになってい

るが、これは、堆砂対策の観点からは捨土先を河道に求めたものと位置付けることができる。一方、土砂管理の観点からは下流域への土砂供給と位置付けることができる。

下流域への土砂供給は、総合土砂管理を実施する上で必要な措置の一つに位置付けられているが、適切な供給を行うためには、下流域の土砂環境の現況、及び供給に伴い生じる変化を把握・評価する必要がある。貯水池堆砂の影響は、河床低下や低下に伴う粗粒化などの負の影響がクローズアップされる場合が多いが、例えば土砂流量の大きい流域では、同様の現象を河床上昇抑制、細粒化抑制などの正の影響として評価できる場合も考えられる。ダム完成後の経過年数の長いダムでは、ダムの存在を前提に下流域の土砂環境が形成されるようになっているので、現況を多面的に評価し、土砂供給の位置付けを明確にする必要がある。

土砂供給の影響を調査・分析・評価するための手法については、十分には確立されていない状況にあるが、堆砂による下流河川への影響と合わせて精力的に研究が進められている。今後、事例の蓄積により、逐次整備されていくものと思われる。

供給土砂量設定における技術的課題は多いが、筆者は、今後の堆砂対策の検討では、下流河道が必要としている土砂量（或いは、下流河道への影響のない土砂量）を下流に供給することを優先すべきではないかと考えている。この場合、設定される土砂供給量は流入土砂量と異なることが予想される。ダム建設前の土砂環境が良好でなかった場合が考えられるのはもちろん、貯水池の存在により下流河川の流況が変化する、具体的には平滑化されるためである⁶⁾。流況変化について実施した国土交通省ダムの放流実績の分析によれば、1年間の日平均流量を大きい順に並べた場合の30番目（30/365）の流量程度以上ではダム放流量が流入量より小さくなるダムが多く、60番目の流量程度以下では放流量が大きくなるダムが多くなることが示されている。また、1番目となる年最大日平均流量は、全てのダムで放流量が流入量より小さい。

適切な土砂供給を目標にするものとして、設定される土砂量が流入土砂量より小さい場合には、差分の土砂は河道に還元することができない。洪水が平滑化されることから、多くのダムでこうし

た状況となることが予想され、先に示した土砂採取や有効利用に関する一層の技術開発が望まれる。

4.2 土砂供給するための堆砂対策技術

4.2.1 技術の現状と課題

ここでは、今後の展開が期待される河道に土砂供給する方法について、現況をまとめるとともに今後の技術開発の方向性について考察する。

貯水池への流入土砂を下流に供給する主な方法として、現在のところ、貯水位を一時的に低下させ、貯水池内の掃流力を回復させて土砂を排出する土砂フラッシングやスルーシング、貯水池上流での分流により洪水時流入土砂を直接下流にバイパスする土砂バイパス及び先に述べた掘削土の下流への仮置きがあり、実施されている。これら手法については、文献3)をはじめ既に多くの公表論文等があるのでここでは詳細には立ち入らないが、各手法の特徴、適用性を簡単に整理すると次のようになる。

土砂フラッシングやスルーシング、土砂バイパスは、河川を流下する流水の土砂輸送力を用いる方法であり、輸送エネルギー源の観点からは優れた方法といえることができる。ただし、これら方法では、対象土砂量が小さくなると貯水位低下操作による貯水効率の低減や必要施設の費用の負担が相対的に大きくなり、例えばダムの嵩上げや掘削・浚渫に対し、単位土砂量当りの費用が大きくなる問題を有している。そのため、適用できるダムがかなり限定される。経済性等の比較検討を行う必要があるが、筆者は、こうした方法は宇奈月ダム（土砂フラッシング）や美和ダム（土砂バイパス）の事例にみられるように数十万 m^3 /年以上といった大きい対象土砂量の場合に優位な方法ではないかと考えている。

採取土を河道内に仮置きし、出水時に掃流させる方法は、貯水池操作に影響なく実施することができる。その意味で、多くの貯水池で適用可能なより一般的な方法であるが、仮置き場所の制約から土砂量が制限されること、また、ダム直下流に適当な仮置き場所がない場合には運搬費用が大きくなる問題がある。また、仮置きは濁水等の問題を生じないよう、常時は冠水しない州等に実施する必要がある、出水時の掃流力を十分に生かせないという問題もある。

以上のように、現在実施されている河道に土砂

供給する堆砂対策技術はそれぞれ適用性に課題を有している。これら方法は、技術的に十分に確立されたものではなく、今後更なる技術の改良、合理化が望まれるが、同時に新たな手法の開発も望まれている。

こうした状況の中、最近では管路上流に設けた設備により土砂を吸引し、管路を通じて下流に移動させる方法が検討されるようになってきている^{7)~9)}。これら方法は実績もなく、その適用性は未知数であるが、筆者は次の理由でこうした方法の発展に期待しており、一部技術については、土木研究所として共同研究による検討を実施している。

- 1) 貯水池運用の変更を必要としない。
- 2) 放流量に対する供給土砂量の制御精度の向上が期待できる。
- 3) 施設規模を小さくでき経済性の向上が期待できる。

以下では、これを洪水時排砂（理由は次節に示す）と称し、次節に方法のイメージと必要な技術開発について述べる。本手法による対象土砂量は、今のところ、土砂フラッシングや土砂バイパスの対象土砂量以下を考慮しており、十万 m^3 /年程度以下を想定している。

4.2.2 洪水時排砂技術のイメージと必要な技術開発

本方法はダム貯水池上下流の水位差を用いて土砂を吸引、排出するものであり、イメージ図を図-3に示す。本方法における操作は次の事項を基本として考えている。

- 1) 下流への土砂供給は洪水時に実施する。
- 2) 貯水池から下流への土砂移動は、ダムの余水放流量の一部又は全部を用いて実施する。

上記方法を基本とする理由は、下流河道環境への影響軽減及び利用可能な水の存在にある。具体的には次の通りである。

1) 下流河道環境への影響軽減

仮置土の場合と同様であるが、常時において下流河道の流水中に土砂供給を行うことは、供給に伴う濁水の影響が顕著になる。また、河道内の土砂輸送力が小さく、供給位置付近に局部的に大きく堆積してしまうなど、河床環境を大きく変えてしまうことが懸念される。従って、常時の流水中への土砂供給は、不可能とはいわないまでも非常に困難である。一方、微細粒子を含む河道内での土砂移動は、大半が出水中に生じる。従って、もともと土砂移動の激しい出水時に土砂供給を行うことにより、河道への環境的な負荷を軽減することができる。

2) 利用可能な水の存在

出水時には、比較的大きな無効放流量が期待され、土砂輸送媒体として利用できる流水が豊富である。

上記操作の基本に従うものとして、土砂供給を実施するために必要な技術を列記すると次の通りである。

- 1) 土砂の吸引・輸送に関する技術
- 2) 広いエリアの土砂を吸引するための技術
 - 2)-1 吸引口に土砂を移動させる技術
 - 2)-2 吸引口を移動させる技術
 - 2)-3 2)-1、2)を組み合わせた技術

1) は、具体的には図-3に示す管路（図ではダム堤体を通過させるものとしているが、地山内を通過させ、トンネルを利用して下流に導水することなども想定される）の吸引口から土砂を吸引するとともに輸送し、下流河道に放流する技術を示している。この場合、管路入口部形状が通常の放流管と同様のもので、かつ入口位置が固定される場合には、吸引による土砂の移動エリアは極めて限られることになる。そこで、より広い（ここでは平面的な広がりを考えている）範囲の土砂を排出するために2)の技術を併用する必要が生じる。

2)-1の技術は、施設の運用方法により次の技術に分類することができる（図-4参照）。

- ① 出水時に移動させる技術
- ② 常時に移動させる技術
- ③ ①と②を組み合わせた技術

①は、出水時の管路の吸引に合わせて広い領域の土砂を移動させ、そのまま吸引する技術を意味する。また、②は常時に土砂を吸引口に移動させ、

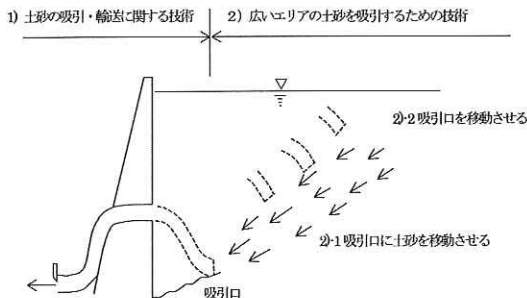


図-3 洪水時排砂のイメージ

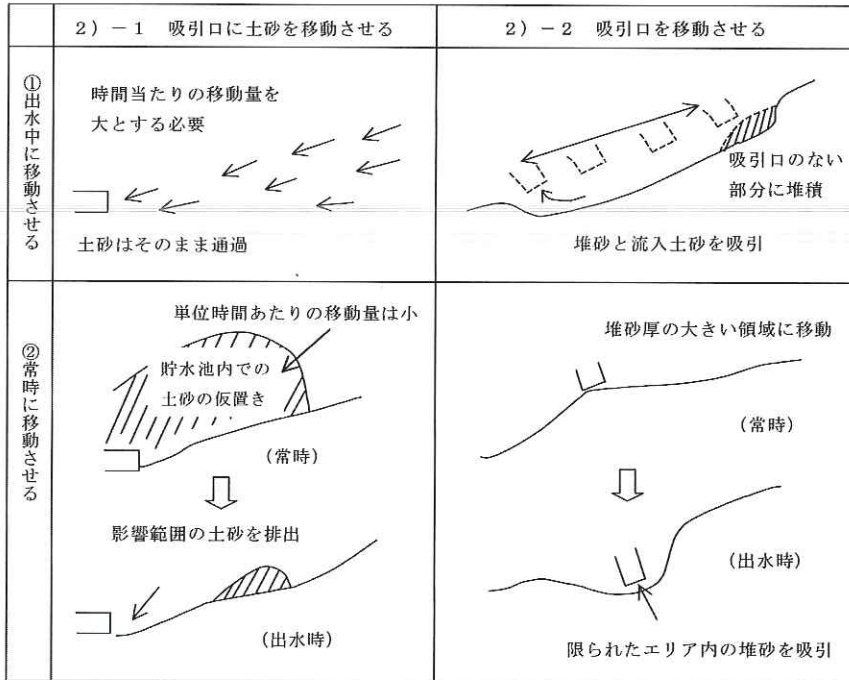


図-4 洪水時排砂方法の分類

出水時の放流に合わせて吸引する技術で、下流河道への仮置き場所を移動距離の短い貯水池内に求めたものともいうことができる。吸引口の平面位置が固定されていることから水中安息角の範囲の土砂しか排出できないことになるが、堆砂位と吸引口標高差を大きくすることで数万 m^3 程度の排出は可能である。③は①と②を組み合わせたもので、常時にある領域に土砂を移動させ、出水時の放流に合わせてある領域内の土砂を吸引する技術である。

2) - 2の技術も同様の分類が可能である。具体的内容は次のようになる。

すなわち、①は出水中に対象エリア全体に亘り吸引口を移動させる技術、②は常時に吸引口を移動させ、出水時にはその位置において吸引する技術、③は常時に吸引口を移動させるとともに、出水中にもある領域内を移動させる技術が対応する。

以上の技術は、それぞれ特有の課題を有するものであるが、共通する課題として、

- 1) 出水時の短時間に比較的大量の土砂を下流に供給しなければならない。

という土砂供給効率の課題がある。また、

- 2) 吸引口の埋没を防止しなければならない。

という課題がある。吸引口の埋没は運用休止時期に生じるものと考えることができ、出水や貯水位低下により土砂が移動する場合、常時の人為的な土砂移動による場合の両者がある。これらの他、常時の土砂移動については、貯水池内での濁水対策が付随して生じる問題となる。

土木研究所では、以上の技術のうち実現性が低いと思われる2) - 1を除く方法を念頭に、主として吸引口の検討を実施している。

なお、2) - 2の吸引口を移動させる方法については、広い領域での移動は施設の負担が大きく、土砂の移動を組み合わせるのが合理的と考えられる。従って、本方法の経済性を向上させるためには、並行して経済的な湖内輸送方法の開発検討を実施する必要がある。

5. 河床変動計算による堆砂対策検討

貯水池計画検討では、堆砂容量は堆砂面を水平として設定されるのが一般的である。すなわち、堆砂問題は主として量の問題として検討されてきており、堆砂形状の推定に必要な流入土砂の粒度組成や貯水池内での分級現象に対する検討は、余りなされてこなかった経緯がある。これは、対象

となる粒度の範囲が広く、粒度組成の推定及び粒子の貯水池内での挙動の再現が困難であったことに主たる原因があったものと考えられる。これらは技術的な課題といえる。

ここで、管理ダムでは堆砂実績があるのでボーリング調査による堆砂の粒度組成の把握が可能である。堆砂測量は毎年実施されているので、大きな貯水位変化がなく、水位変化による堆砂の移動が顕著でなければ、年ごとの流入土砂の粒度組成を求めることもできる。また、近年の計算機の能力向上により広い粒度分布をもつ土砂の貯水池内挙動の計算も可能になってきている。

堆砂計算は、河床変動計算の範疇に入るものであるが、特に浮遊土砂の挙動については河床での浮遊量と沈降量が等しくない非平衡状態の再現が必要になる。また、微細粒子を含む洪水流の挙動に水温（密度）成層の影響が無視できない場合には濁水問題の検討で用いられている鉛直2次元等の計算と併用する必要も生じるが、こうした数値計算を用いることにより、土砂フラッシングなどによる粒径別排出土砂量を検証することが可能である。また、貯水池内の粒径別堆砂量の分布を推定することにより、例えば4.2.2に示した方法における、湖内輸送すべき場所と対象粒径の関係を求めるなど、対策検討の条件設定にも用いることができる。

上記の考えのもと、土木研究所では現在、既設ダムを想定した堆砂調査方法の確立、数値計算モデルの開発及びこれらを通じた堆砂対策検討手順の確立を目的に研究を進めており、今後その成果を公表していきたいと考えている¹⁰⁾。現在開発しているモデルは、1次元不定流のモデルであり、MacCormac法及び有限体積法の両者について概ね実用化できている⁶⁾。

従来の堆砂計画では、数値計算をツールとして活用することが少なかったように思うが、今後は積極的に活用していくことが期待される。特に既設ダムの堆砂対策検討では、堆砂実績という検証データがあり、モデルの信頼性を確保できるので、精度のよい将来予測が可能なものと思われる。

6. おわりに

堆砂対策手法については既に幾つかの方法が実施されているが、その適用条件は明確でなく、

個々のダムごとに試行錯誤的に検討されているのが現状である。本稿ではこうした技術の現状を大まかに概観し、今後の技術開発の方向についてとりまとめてみた。記述内容には私見も多く含まれており、読者諸氏のご意見を戴ければ幸いである。

ダム建設の歴史は旧いが大規模ダムの歴史はそれほど長くはない。これは世界に共通した状況であり、多くの貯水容量は50年程度以下の歴史しかもっていない¹¹⁾。堆砂問題は、今後世界的な問題としてクローズアップされる可能性があり、わが国の技術が貢献できることを期待したい。

参考文献

- 1) 坂本忠彦：ダム再開発についての現状の課題と今後の展望、第8回ダム工学会講習会概要集、2003
- 2) 例えば岡本 敦：河川審議会「総合土砂管理小委員会」報告について、砂防と治水、第123号、1998
- 3) 上阪恒雄：貯水池の土砂管理、ダム技術、No.159, pp.4-23, 1999
- 4) 櫻井寿之、柏井条介、大黒真希：ダム貯水池の堆砂形態、土木技術資料45-3, pp.56-61, 2003
- 5) 日本大ダム会議技術委員会排砂対策分科会：ダム排砂対策の現状と課題、大ダム、No.176, 2001
- 6) 柏井条介：貯水池機能の保全設備－堆砂対策－、ダム技術、No.215, pp.12-24, 2004
- 7) 橋本徹：ダムや堰などの貯水池に堆積した土砂を排出するHydro技術、大ダム、No.183, pp.85-88, 2003
- 8) 横森源治、福本晃久、土屋良明、渋谷?州：美和ダム貯水池内堆積土の効率的な排出工法の開発、ダム技術、No.205, pp.47-63, 2003
- 9) 岡野真久、俣野文孝、岡本恒治、片山祐之：マルチホールサンクション排砂管の水理特性に関する実験的研究、水工学論文集、第48巻, pp.1393-1398, 2004
- 10) 鈴木伴征、柏井条介、鯖石川ダム堆砂実績を用いた粒径別流入土砂量の推定、ダム工学（投稿中）
- 11) Morris, G.L: Reservoir sediment management- worldwide status and prospects, Proceedings of session on challenges for the reservoir, The 3rd world water forum, pp.97-108, 2003

柏井条介*



独立行政法人土木研究所水工研究グループダム水理チーム 上席研究員
Josuke KASHIWA