

貯水池土砂管理の現状と将来

角 哲 也*

概要 ダムはインフラ資産の中でも最も長期供用が期待される施設の一つである。今後、新規のダム建設を従前のように行うことが困難になるとすれば、中長期の課題である貯水池の堆砂問題について、ダムの持続的管理および流砂系の総合土砂管理の観点から積極的に取り組んでいく必要がある。本稿では、貯水池土砂管理の現状および今後の展開について概観し、これを推進して目指すべき21世紀型のダム管理のあり方について考えてみたい。

キーワード：ダム堆砂，貯水池土砂管理，流砂系総合土砂管理，アセットマネジメント

1. はじめに

1998年7月に河川審議会総合土砂管理小委員会から「流砂系の総合的な土砂管理に向けて」の報告が出されてから10年が経過した。「流砂系」とは、図-1に示すように土砂生産源を含む「河川域」と沿岸漂砂の流れが支配する「漂砂系」、さらにこれらを繋ぐ「河口」を包括した土砂の流れに着目したシステムの総称であり、土砂に関して生じている歪(例えばダム堆砂や海岸侵食など)を関係者が連携を取りつつ総合的に解決していこうとする取り組みであった。

日本のマクロな土砂収支では、年間約2億 m^3 の土砂生産のうち、約1/4(約4,500万 m^3)がダム貯水池に堆積しているとされる。日本の約34,000kmの海岸線の約60%が侵食海岸であり、それらの約40%が河川からを含む土砂供給量の減少が原因とされる。1950-60年代には、河床からの砂利採取が急増し海岸侵食に大きく影響したが、現在は規制されている。流砂系の土砂管理のキーワードは「土砂移動の連続性の確保」であり、その中でもダムの堆砂対策の推進は大きな鍵を握っている。

ダムはインフラ資産の中でも最も長期供用が期待される



角 哲也

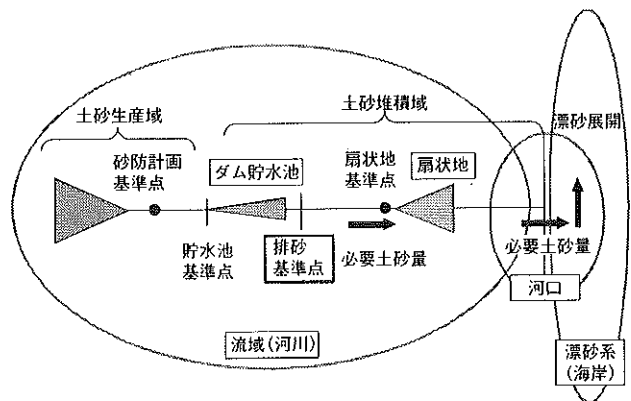


図-1 流砂系土砂管理のイメージ

施設の一つである。今後、新規のダム建設を従前のように行うことが困難になるとすれば、中長期の課題である貯水池の堆砂問題について、ダムの持続的管理および流砂系の総合土砂管理の観点から積極的に取り組んでいく必要がある。本稿では、貯水池土砂管理の現状および今後の展開について概観し、これを推進して目指すべき21世紀型のダム管理のあり方について考えてみたい。

2. 貯水池堆砂の現状

日本の河川では、掃流砂・浮遊砂・ウォッシュロードの形態により土砂が輸送されており、河川を流下するこれらの土砂がダム貯水池に流入すると、図-2に示すように貯水池の持つ堆積特性に応じて粒径ごとに分級された堆砂デルタが形成される¹⁾。

貯水池内の堆砂領域は、①頂部堆積層、②前部堆積層および③底部堆積層に大別され、デルタを構成する①および②には河床を転動してきた掃流砂および浮遊砂のうち粒径

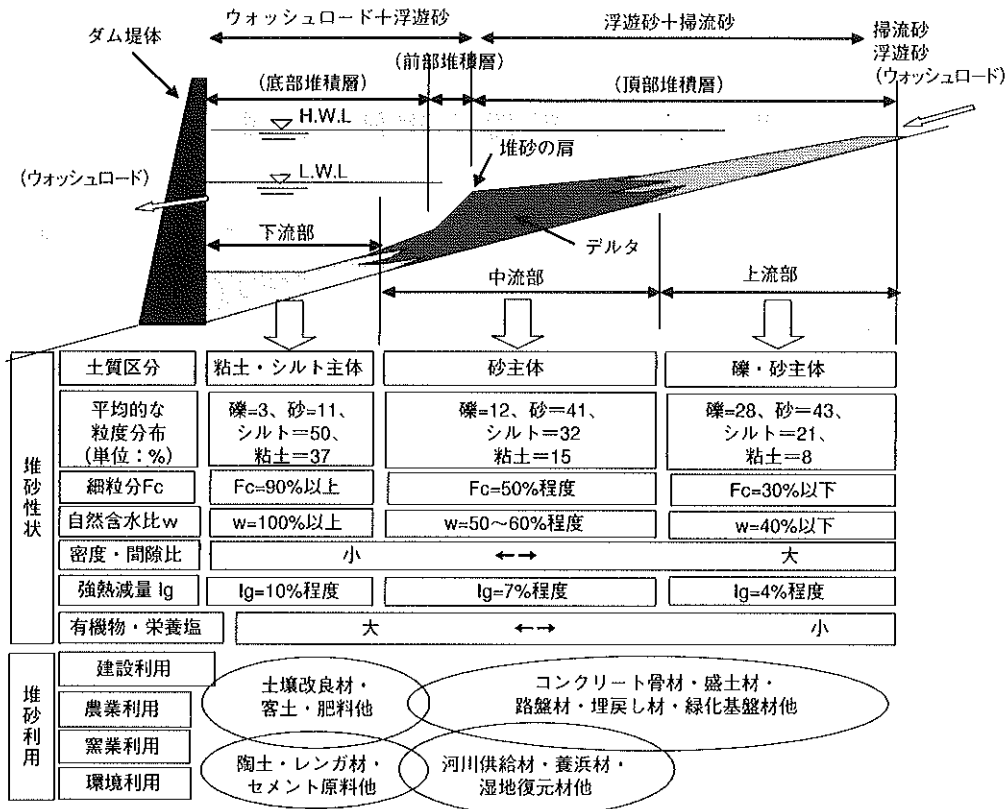


図-2 貯水池堆砂の性状と有効利用方策¹⁾

の比較的粗い部分(0.1~0.2mm以上)が堆積している。このうち②はデルタの肩を通過した掃流砂がその直下に堆積し、それに浮遊砂による影響が加わって形成される比較的勾配の急な部分である。

デルタは一般に時間経過とともに前進すると同時に、その上流端は上流へ遡上していく。ダム直上流に水平に堆積した③の堆積物はほとんど粒径が0.1mm以下のウォッシュロードであり、主に濁水の密度流に起因するものである。なお、ウォッシュロードの一部は、放流設備を通じて水流とともに下流へ流出し、この境界粒径はダム貯水池規模や貯水池回転率などで異なるが、概ね0.01mm程度である。

ダム貯水池の堆砂問題は、ダム貯水池における発電等取水口の土砂埋没問題、貯水池上流河道の背砂による洪水氾濫の危険性の増大、利水・治水容量の減少、下流河川への土砂流出の減少と河道部の砂利採取が複合的に影響する河床低下や海岸侵食などがある。

日本では、堤高15m以上のダムがこれまでに約2,700箇所建設されている。国土交通省では、1977年以来、貯水容量100万 m^3 以上の貯水池に対して堆砂状況などを継続的に調査しており、現在の1ダム当たりの総貯水容量に占める堆砂量の平均割合(全堆砂率)は約7.4%となっている。これをダム完成後の年数で割ると年平均0.24%程度の速度(単純に求めれば貯水池が満杯になるまで約400年)で貯水

池容量が失われている計算となる。

3. 貯水池土砂管理はどこまでできたか

日本における貯水池土砂管理は、大別すると、1) 貯水池への流入土砂の軽減対策、2) 貯水池へ流入する土砂そのものを通過させる対策、3) 貯水池に堆積した土砂を排除する対策に分けられる。このうち、現在日本で進められている主な堆砂対策は、伝統的な貯水池内の掘削・浚渫に加えて、フラッシング排砂、排砂バイパスおよび河川土砂還元の3つである。さらに、これに加えて、微細土砂の貯水池からの放流を促進する密度流排出や粗粒土砂も含めて土砂の通過がし易いようにダムの放流設備の改造や貯水池運用を変更させる通砂運用(スルーシング)も検討・実施されてきている。ここでは、これらの現状について概観する。

(1) フラッシング排砂

日本におけるフラッシング排砂の代表事例は、黒部川水系出し平ダム・宇奈月ダムの連携排砂である。出し平ダム(関西電力(株))では、大粒径の土砂を対象とした排砂設備(排砂ゲートH5m×5m)を2条有し、1991年以来2008年7月までに計16回の排砂が行われ、合計で700万 m^3 近くの堆積土砂を流下させた。実に総貯水容量の2/3以上に匹敵する量である。さらに2001年に、出し平ダム下流に宇奈月

ダムが完成したことから、上下流ダムの連携排砂が開始された。下流の宇奈月ダム(国土交通省)も排砂ゲート(左岸側に2門)を有し、2001年以来2008年7月までに、上流の出し平ダムと連携して計8回の排砂と7回の通砂が実施されている。各年の最初の洪水時に実施する排砂に対して、排砂後のさらに大きな洪水時に新たな流入土砂を排砂同様の操作により下流に通過させるものが通砂である。

黒部川では、関係者間の合意形成を目的として、環境・生物・漁業などの専門家からなる第三者委員会「黒部川ダム排砂評価委員会」および関係行政機関で構成する「黒部川土砂管理協議会」が組織され、『排砂は、できるだけ貯水池に土砂を貯め込まずに一定の河床形状を維持するため、6月から8月までの間に発生する洪水時に実施する』ことを原則に排砂操作が進められている。その結果、当初のような排砂に伴う水質悪化などの現象も見られず、貯水池容量の維持に大きく貢献している。この、自然洪水に合わせて、間隔が長くないように一定頻度で排砂を実施するルールは、フラッシング排砂に関して長年の実績を有するスイスやフランスにおける知見にも合致しており、今後の貯水池土砂管理の推進に大いに参考となる。

このように実施されてきたフラッシング排砂による効果を総合土砂管理の観点から今後どのように評価していくかが次なる課題である。これまでの黒部川ダム排砂評価委員会における評価の視点は、排砂による環境へのマイナス面の影響の有無をチェックすることであったが、今後はダム堆砂量の軽減や下流への土砂供給による環境への正の影響を評価することが求められる。

ここでは排砂による土砂収支を概観する。継続的な排砂により、出し平ダムは現在総貯水容量の45%程度の堆砂量ではほぼ平衡状態に達している。一方、宇奈月ダムでは、出し平ダムからの排砂および残流支川の黒雑川からの流入土砂のうち、粗粒土砂を中心に堆砂が進行する一方で、細粒土砂を中心にダムを通過している状況である。黒部川では、貯水池の堆砂・排砂を考慮した1次元河床変動モデルを構築しており、これに排砂中のSS観測値や貯水池堆砂量変化などの実測データを加味して補正を行った2006年7月の粒径別土砂収支を図-3に示す。これによれば、出し平ダムは、新規流入量約42万 m^3 を加えた約91万 m^3 の土砂を排砂し、宇奈月ダムは支川黒雑川からの約47万 m^3 を加えた約138万 m^3 の流入土砂に対して、粒径2mm以下の細粒土砂を中心に約73%の101万 m^3 の土砂を通過させている。粒径2mm以上の粗粒土砂の通過量は約2万 m^3 であり、現在は90%以上が宇奈月ダムに捕捉されている。

宇奈月ダムから下流の河道においては、宇奈月ダムから

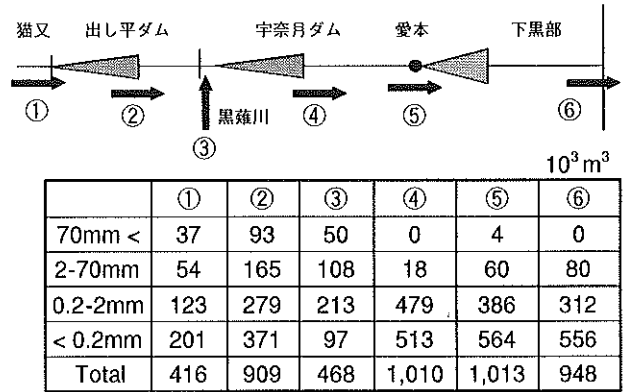


図-3 黒部川連携排砂における土砂収支(2006年7月)

の排砂量とほぼ同様な通過土砂量があるものと推定される。このうち、0.2mm以下のウォッシュロード成分はそのまま河口から海域に流出するのに対して、0.2-2mmの土砂の一部が河床にトラップされる一方、河床材料である2mm以上の土砂が下流に掃流されているものと考えられる。今後は、宇奈月ダムからの粗粒分の流出が増加し、さらに下流へ供給されるようになるものと考えられる。

(2) 排砂バイパス

排砂バイパスの代表事例は、新宮川旭ダム(関西電力株)と天竜川美和ダム(国土交通省)である。旭ダムでは、濁水長期化問題、堆砂問題に対して、排砂バイパス設備(トンネル長さ2,350m, 最大通水量140 m^3/s)が設置された。1998年4月より運用を行っており、年平均16回の操作で年総流入量の約4割がバイパス放流されている。対象とする土砂は、掃流砂、浮遊砂であり、バイパス水路運用以来、ダム貯水池の濁水や堆砂問題が軽減されている。なお、このバイパス水路は洪水時の迂回のみならず、平常時には清水バイパス(貯水池内が濁水化した場合に上流から流入する清水をダム下流に直接放流)としても活用され効果をあげている。

一方、美和ダムのバイパス設備(トンネル長さ4,300m, 最大通水量300 m^3/s)は主にウォッシュロードの排出を目的とし、貯砂ダムと共同して土砂管理を実現するものである。2005年6月より試験運用が開始され、これまでに3回の洪水時のバイパス運用が行われている。バイパス運用時には、貯水池内の各点でSS濃度に関する詳細なモニタリングが実施され、これら3回の洪水時にダムに流入した粒径0.1mm以下のウォッシュロード約70万 m^3 の約45%がバイパス放流されたと推定されている。

これら排砂バイパス技術は、トンネル建設に伴う初期費用が発生するものの、貯水池の水位低下が不要であり、かつ洪水時の貯水池流入水の直接放流であることから、下流

河川環境問題に対する懸念はほとんど生じないなど、日本の河川状況に適合した技術と考えられる。現在、建設や計画が進められているその他の排砂バイパスの事例は多く、天竜川の小渋ダム(国土交通省)・松川ダム(長野県)・佐久間ダム(天竜川ダム再編事業(国土交通省・電源開発(株)))や矢作川矢作ダム(国土交通省)などがあげられる。

(2) 河川土砂還元

ダム貯水池への流入土砂の軽減対策の中では、貯水池末端部で粗粒土砂を中心に捕捉する貯砂ダムの設置が一般的に行われている。近年、いくつかのダムでは、貯砂ダムで捕捉した土砂を、ダム下流へ運搬・仮置きし、洪水時等に自然流出・流下させる土砂の下流還元実験が行われている³⁾。長島ダム、三春ダム、二瀬ダム、蓮ダム(以上、国土交通省)、下久保ダム、浦山ダム、布目ダム(以上、治水資源機構)、秋葉ダム(電源開発(株))などが代表的事例であり、堆積土砂の環境利用として意義が高く、その持続可能性を追求する必要がある。また、真名川ダム(国土交通省)のように弾力的管理によるフラッシュ放流と組み合わせて土砂還元を実施している例もあり、洪水攪乱と土砂供給による複合的な河川環境改善効果が期待される⁴⁾。

この土砂還元は、米国カリフォルニア州のダムでも、キングサーモン(Chinook Salmon)の産卵床を確保するための砂利供給事業として実施されている⁵⁾。その最大のものはサクラメント川上流のケズウィックダム(シャスタダムの下流)において行われており、土砂還元費用として1979年から2000年までに約22百万US\$が費やされた。同様な土砂の補給はライン川でも古くから行われており、バージ船を使って年間平均17万トンの砂利が下流河川の河床低下対策として投入されている。

(4) 密度流排出

洪水時に貯水池底部に流入する土砂濃度の高い流水をダムの中・低標高部から放流して土砂の堆積を抑制する密度流排出は、中国黄河の三门峡ダムや小浪底ダムが代表例である。日本では適用事例が少ないが、高圧放流管を有するゲートダムでは、洪水時の貯水池内の流動を詳細に検討し、効果的にゲート操作を行うことにより、現状よりも細粒土砂の排出を促すことが可能になるものと考えられる。事実、天竜川小渋ダムでは、2004年10月の台風23号洪水の後期放流時に、高圧放流管からの放流SS濃度が急上昇するとともに、流水中の土砂粒径が大きくなる(30 μ m以下 \rightarrow 80 μ m)現象が確認され、密度流が貯水池内を流下してダムに到達し、その一部が排出されたと推定される。

(5) 通砂運用(スルーシング)

フラッシング排砂は一度堆積した土砂を洪水時の一時的な貯水位低下により貯水池内の土砂を本格的に排出するものである。これに対して、電力ダムにおいては、発電取水口への土砂流入を防止するために、洪水時にある程度の貯水位低下を行って土砂吐きゲートから部分的に土砂を排出する操作が行われている。これをさらに拡張して、洪水時や洪水期の貯水池運用を制限することにより、貯水池に流入する土砂の通過促進を行う操作が一部のダムで実施あるいは検討が進められている。

鯖石川ダム(新潟県)や二風谷ダム(北海道開発局)は融雪期に大幅に貯水位を低下させて土砂を通過させる操作を行っている。また、九州電力(株)の宮崎県耳川水系ダム群では、洪水吐きゲートの改造と主に台風時の貯水位低下操作により土砂通過の促進を図る計画が進められている。天竜川ダム再編事業では、排砂バイパスが計画されている佐久間ダム下流の秋葉ダムにおいて、洪水時の貯水位低下を行って上流からの排出土砂を堆積させることなく通過させる操作が検討されている。

台湾の一部のダムでは、土砂流入の多い洪水期の数ヶ月間貯水位を低下させる操作が導入されている⁶⁾。また、最近事例の増加している洪水調節専用(流水型)ダムでは、常時は貯留せずに洪水時のみに貯留して速やかに排水することで、洪水時に流入した土砂の自然排出(通砂)が可能であり、堆砂量の最小化と流砂の連続性確保が満足される。

4. 貯水池土砂管理の今後の展開

ここでは、貯水池土砂管理を進める際に今後重要となる視点を以下に考えてみたい。

(1) 流砂系総合土砂管理を進める視点

流砂系総合土砂管理を進めるためには、a) 場の連続性、b) 時間の連続性、c) 土砂の量と質、およびd) 水管理/土砂管理の連携が重要である。

土砂生産および輸送は降雨などに伴う確率的なイベント性を有しており、年平均量と大きなイベント時における生産・移動量の双方を考慮する必要がある。また、土砂管理で対象とする量(土砂量)と質(粒径など)の目標設定が重要である。例えば、河川還元を行う際には、どの程度の量をダム下流に移動させればいいのか、また、ダム湖の中のもののような粒径が下流から求められているのか、に関する綿密な計画と実施、さらには実施結果のモニタリングが必要である。

さらに、土砂管理を考える際には、土砂が流砂系を適切

に輸送されるための水量管理が重要である。いくら土砂を供給しても水量がなければそこに貯まるだけであり、一般に、ダム運用管理により下流河川の流況は変化しており、その分の土砂輸送能力(掃流力)の変化を考慮しておく必要がある。先述の米国カリフォルニア州やライン川の土砂供給の事例でも、従前の河川との掃流力の違いを考慮に入れて土砂還元すべきことが指摘されている。

(2) 貯水池土砂管理手法の組み合わせの視点

貯水池土砂管理においては、ダムに流入する自然河川が運んできた土砂粒径をできる限り変化させることなく下流に通過させる対策が望ましい。しかしながら、土砂管理対策によっては、適用可能な土砂粒径には差異が生じ、適切な組み合わせを検討する必要がある。一般に、フラッシング排砂はそれだけでほとんどの粒径を排出可能である。排砂バイパスも同様に汎用性が高いが、トンネル規模には限界があり、大洪水時にはトンネルへ分派されない土砂(主に細粒土砂)が貯水池に流入するため、例えば、密度流排出と組み合わせるなどの検討が必要である。また、美和ダムで行われているように、粗粒土砂は上流の貯砂ダムで捕捉してトンネル内に入れない場合も考えられるが、このような場合には、捕捉された土砂の下流還元との組み合わせが必要となる。

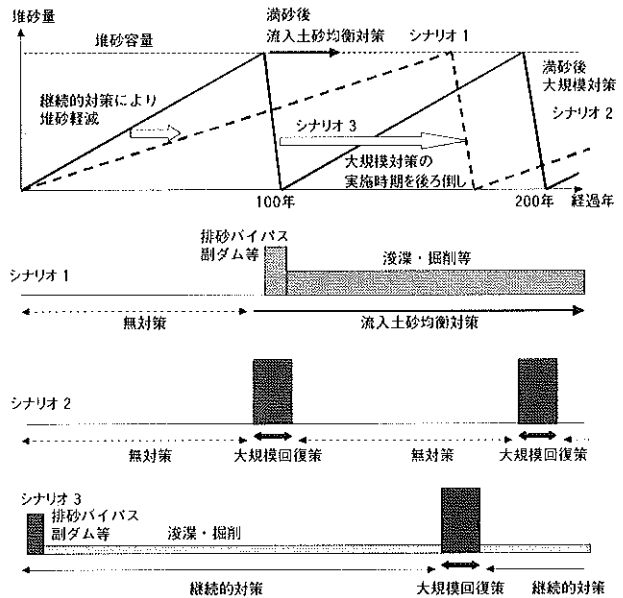
(3) ダムのアセットマネジメントの視点^{7), 8)}

ダムを構成する施設ごとの更新期間とマネジメントの重点を整理したものを表一に示す。ダムをインフラ資産と捉えれば、耐用年数の比較的短い機械、電気設備等の維持管理費の合理化とともに、中長期の課題である貯水池の堆砂問題などについても今のうちから本格的に取り組んで、長期効用を発揮させるための戦略(=ダムのアセットマネジメント)が重要となる。

なお、アセットマネジメント適用にあたり、貯水池容量や堆砂は資産管理上どのような扱いであるのが課題である。一般にダム本体は、構築物である固定資産として耐用年数を基に減価償却され、残存価値が把握されている。しかし、貯水池容量は固定資産ではないため、堆砂に伴う損失は財務会計上で把握できない。堆砂対策として浚渫・掘削等を実施しないかぎり費用としては意識されない。すなわち、減価償却会計原則に基づいて、ダム施設のアセットマネジメントを実施することには限界があり、工学的観点から望ましい堆砂計画を策定するとともに、計画の達成状況を繰延維持補修会計原則に基づいて把握するような管理会計を策定することが必要となる。

表一 更新期間による施設の区分とマネジメントの重点

更新期間	施設等	マネジメントの重点	備考
短期 数年～数十年	機械設備 電気設備 建築物	点検、整備、補修、 更新のトータル費用 の低減	サービス水準向上 技術革新対応
長期 数十年～ 数百年	貯水池 (堆砂)	長寿命化 ライフサイクルコスト の低減	適切な対策をすれば 更新時期は延びる
超長期 (不明)	ダム堤体	点検 維持管理費用の低減 リスクアセスメント	適切な管理をすれば更新が 超長期不要となり更新費用 の現在価値が評価できない
偶発的	貯水池法面 地すべり 地震対応等	点検 緊急時対応	一定レベルまでは 建設時に対応



図一 堆砂対策のシナリオと費用のイメージ

次に、アセットマネジメントに基づく堆砂対策シナリオを考えてみる。100年を超える超長期に渡りダムを機能させることを前提とすれば、無対策でサービス水準に支障が生じるようになってから流入土砂均衡対策を実施する(シナリオ1)、無対策でサービス水準に支障が生じるようになってから大規模回復策(掘削)により当初計画の100年堆砂容量を確保する(シナリオ2)、当初から土砂堆積抑制策を行うことにより、大規模回復策の回数を減らす(シナリオ3)が考えられる。

これらをもとに、現実のダムを対象としたライフサイクル費用評価を行うと、土砂流入量が少ないダムや河川の水量が多く土砂流入排出均衡対策が容易なダムではシナリオ1が、土砂処分場の確保や運搬が容易なダムではシナリオ2が有力となる。一方、ダムの設置により掃流力が低下することとあわせ、ダム周辺地域も市街化し、土砂処分や運搬が困難な地域のダムでは、堆砂抑制策により大規模回復対策を出来るだけ後ろ倒しして、その回数を減らすシナリ

オ3が有用と考えられる。

(4) 土砂資源の有効活用の視点

従来、堆砂対策としては骨材資源としての有効利用が行われてきた。しかしながら、法的規制、輸送コストおよび骨材資源としての量と質の安定性の問題などにより必ずしも資源として有効に活用されていない。数は少ないものの、ダム管理者と民間の砂利組合の連携例も報告されており、今後は、ダム管理者と利用者がリスクを分担する形でリサイクルを促進することも重要である⁹⁾。特に河川砂利・海砂に加えて輸入砂の規制が強化されてきており、国内資源であるダム堆砂の資源価値を見直す必要がある。

なお、リサイクルにあたっては、コンクリート骨材のみならず、舗装材料としての利用に関心が寄せられており、道路事業との連携が重要である。一方で、砂利資源を全てリサイクルして利用してしまうのも問題であり、流砂系を維持するために必要な流砂量と土砂資源としてのリサイクル量のベストミックスが重要である。

また、貯水池内に堆積した細粒土砂に含まれるフルボ酸鉄と海の生態(昆布の生産)に着目した研究も進められており、新たな有効活用方策として注目される。

(5) 技術開発と国際貢献の視点

貯水池土砂管理の技術は世界的にも注目され求められている。地震と大規模台風の度重なる襲来による大量の土砂生産が発生している台湾や火山噴火が続くインドネシアなど、ダムの堆砂対策が国家的な課題となっている国は多い。日本のダム技術の将来性という意味で、ここで日本が売れる技術を確認しておくことの意義は大きい。

フラッシング排砂は世界的に見ても事例は多いが、環境との両立の観点から黒部川で得た経験は貴重である。また、排砂バイパスの技術は日本が最先端であり、台湾などではその導入に関心が高い。また、機械力を用いずに水位差を利用して土砂を排出する水位差吸引土砂排出システム(HSRS (Hydro-suction Sediment Removal System))の導入が天竜川ダム再編事業などで検討されているが、この技術を確認することは、堆砂対策を抱える国内外の多くのダムにとって朗報となるものと期待される。

5. おわりに

ダムは貴重な社会の財産であり、使い捨てにせず適切

な貯水池土砂管理により持続可能な利用を目指す必要がある。最近のダムに対する批判の論拠の一つに、堆砂問題に対する明確な解決策を提示できてきないことがあげられる。ダムの堆砂対策を後回しにしないことは、後世に堆砂対策という負担を回さない「世代間の^{つうへい}衡平」の考え方にとって極めて重要なポイントである。

総合土砂管理の観点では、欧州委員会も域内の国際河川を対象に、河川の連続性の観点から流砂の量と質の保全を水管理指令(Water Framework Directive (WFD) (2000/60/EC))の中で政策課題として打ち出している¹⁰⁾。日本の河川審議会総合土砂管理小委員会の方が先行していたわけであり、その実現においても世界をリードすべく関係各機関の積極的な取り組みを期待したい。

参 考 文 献

- 1) 大矢通弘;角 哲也;嘉門雅史. ダム堆砂の性状把握とその利用法, ダム工学, vol.12, no.3, 2002, p.174-187.
- 2) 角 哲也. 「世代間衡平」のためのダム貯水池土砂管理のすすめ. ダム技術. 229, 2005, p.3-12.
- 3) 末次忠司;瀬戸楠美;箱石憲昭;櫻井寿之. 物理的な挙動に着目した土砂還元手法のあり方. 水利科学. no.302, 2008.
- 4) 坂本博文;中村甚一;角 哲也;浅見和弘. 真名川ダム弾力的管理試験における「フラッシュ放流」の計画と効果の評価について. 河川技術論文集. vol.12, 2006, p.271-276.
- 5) Kondolf, G. Mathias: Hungry Water: Effects of Dams and Gravel Mining on River Channels, Environmental Management. vol.21, no.4, 1997, p.533-551.
- 6) 角 哲也. 台湾における貯水池土砂管理. ダム技術. no.159, 1999, p.41-52.
- 7) 角 哲也. 堆砂対策に着目したダムのアセットマネジメント. 河川. no.745, 2008, p.30-34.
- 8) 小林潔司. 河川・ダム施設のアセットマネジメントー今後の展望ー. 河川. no.745, 2008, p.40-43.
- 9) 大矢通弘;角 哲也;嘉門雅史. ダム堆砂リサイクルのコスト分析とPFIによる事業化検討. ダム工学. vol.13, no.2, 2003, p.90-106.
- 10) http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/index_en.html