

土砂管理で「千年ダム」の実現を

角 哲 也

(京都大学工学研究科)

◇ はじめに

流砂系の総合土砂管理の必要性が認識されて久しい。土砂移動の連続性の確保である。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。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「世代間の衡平(こうへい)」の考え方にとって極めて重要なポイントである。最近のダム建設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いないことがあげられる。21世紀型のダム事業およびダム管理のあり方を提示する時期に来ているのではないだろうか。

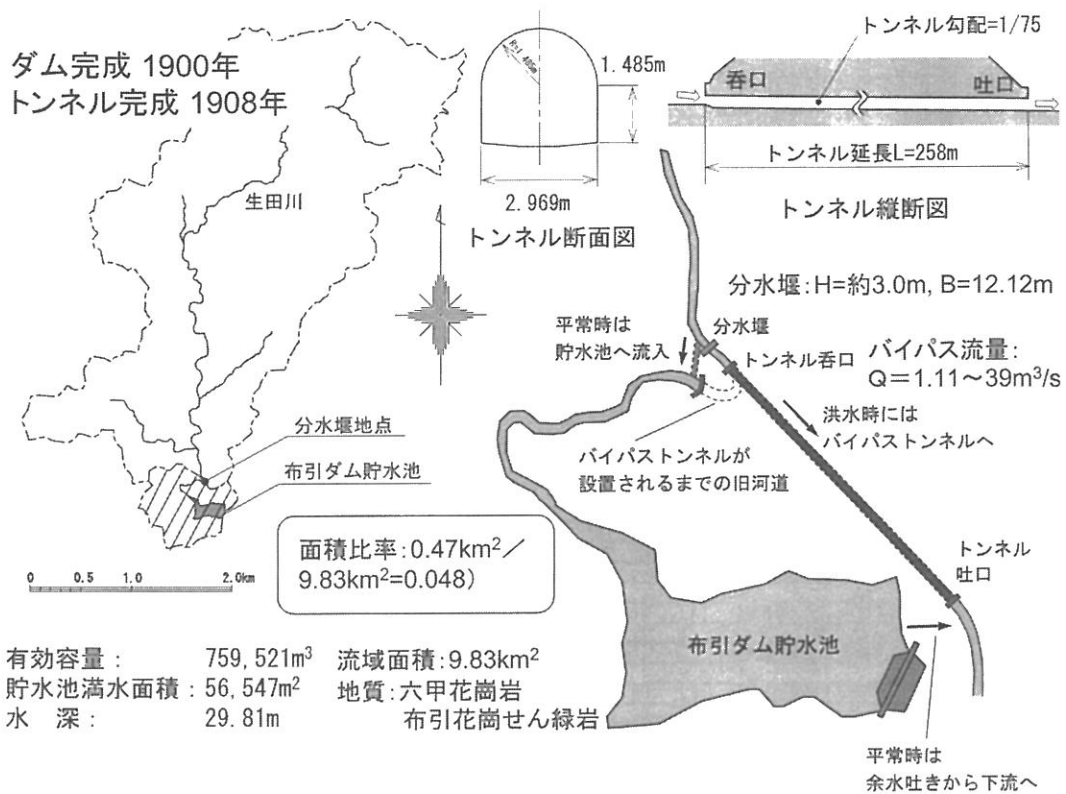
理念は先行するが、一方で具体論はなかなか進んでいないのが現状である。本論では、貯水池土砂管理の現状、およびこれを推進するための方策について考えてみたい。

貯水池土砂管理の必要性

ここでは、三つの具体的事例を考える。

まず、神戸市水道局の布引五本松ダムである。布引ダムは、日本最古の重力式ダムとして有名であり、また、最近まで耐震補強と貯水池内の堆砂除去が行われていた。しかし、このダムに排砂バイパストンネル(図1)が設置されていたことはあまり知られていない。ダムは一九〇〇年に完成したが、完成八年後の一九〇八年に早くもバイパストンネルが造られ、その後、堆砂対策としてのバイパス機能が長年にわたって有効に活用されてきた。バイパストンネルは、流入量約 $1\text{ m}^3/\text{s}$ 以上の洪水時に六甲山系から流入する土砂を直接ダム下流に迂回させる。これにより、当初のままでは約二五年で貯水池が土砂で埋まっていたところを、容量的には千年以上の長寿命に機能向上させたものと推定される。これほど古いバイパストンネル事例は世界的にも類を見ず、日本の貯水池土砂管理技術の草分けとして高く評価される。

2番目は、天竜川佐久間ダムのダム再編事業である。佐久間ダムは、現在までの実績年平均堆砂量から推定される貯水池満砂までの貯水池寿命(CAP/MAS(後述))は約一二〇年(無対策の場合)である。また、本川に建設された最大のダムであり、天竜川上



図一 布引ダムの排砂パイパストンネル

流ダム群の総堆砂量約二億 m^3 の約二分の一が堆積する天竜川流砂系の基幹ダムであり、侵食海岸の保全等、流域一貫とした土砂移動の連続性の確保が急務となっている。事実、遠州灘沿いでは海岸侵食により海岸沿いの道路が影響を受けたり、過去に埋め立てられた家庭ゴミが流出したりするなどの具体的影響が出ている。このように、貯水池の持続性の確保および流砂系総合土砂管理の両面から貯水池土砂管理の必要性が極めて高い。このような高いニーズを背景に、ダム再編事業では、佐久間ダムに治水機能を新たに確保し、恒久的な堆砂対策を実施することが決定された。現在、具体的な排出対象となる土砂の量と質に関する計画論、排出方法に関する技術論および環境影響評価などに関する実施計画調査が進められており、今後の展開に期待したい。

3番目は、日本で初めての本格的なダム撤去が検討されている熊本県荒瀬ダムである。このダムは紆余曲折を経てダム撤去の方向でその具体論の検討が進められているが、撤去に伴う最大の課題は貯水池内堆砂の downstream への流出である。この場合、粗粒土砂は downstream 河道の河床上昇と治水安全度の低下、細粒土砂は濁水発生などの水質問題に繋がる。ダム撤去事例は米国で数多いと言われるが、一部を除いてほとんどが小堰堤である。大規模施設の場合の最大の課題は、同様に堆砂流出の予測と制御であり、これは見方を変えれば撤去工事期間をかけた「緩やかなダム排砂」であると認識する必要がある。黒部川連携排砂（後述）のように、一般的な排砂が、排砂の時期や流量、ゲート開度などを選択できるのに対して、ダム撤去は一旦工事を開始してしまえば洪水の発生は自然流況に任せるしかない点で、環境に対する影響の大小には確率的な側面がある。なお、荒瀬ダムの場合には、堤高が低いために幸い細粒土砂（シルト）の比率が小さく、現在、これらシルト分は事前に除去される予定である。そのため、撤去に伴う水質問題は最小限に留められる可能性がある。

あるが、一般のダムではこの細粒土砂の処理が大きな課題となるものと推測される。しかしながら、いずれにしてもダム撤去というのは最終手段であり、大きなコストを伴うものと考えられる。従って、貴重な社会の財産であるダムを適切に管理して長期に渡り効用を発揮させるのが基本であることは言うまでもない。

貯水池土砂管理推進のための取り組みの現状

現在、貯水池土砂管理を推進させるためのさまざまな働きかけが行われているが、全国レベルでの活動として、「ダム土砂管理推進検討会（座長・道上正規 前鳥取大学学長、事務局・（財）ダム水源地環境整備センター）」があげられる。ここでは、3つのWG（WG1…堆砂推計精度の検討、WG2…排砂設備の計画・設計手法に関する検討、WG3…排砂に伴う下流河川環境に関する検討）のもとに検討作業を進めている。例えば、WG1に関しては、「全国の土砂生産量強度マップの作成」などの具体的なアウトプットも得られつつある。WG2では、各種の堆砂対策に関する技術課題を、また、WG3では堆砂対策実施時の環境影響の事前予測と影響低減方策についてそれぞれ検討している。特に、WG3では最近全国的な広がりを見せている「河川土砂還元」（後述）に関する環境モニタリングに関して検討を進めている。

一方、個別の水系やダムに関する取り組みとしては、前述の天竜川水系以外に、相模川水系での取り組みが特筆される。ここでは、相模ダムの堆砂問題と茅ヶ崎海岸の海岸侵食を背景に、河道域における流砂および洪水攪乱の減少による河川環境劣化も複合的に捉えて、土砂生産域、ダム域、河道域、河口・海岸域における対応策を、当面と将来の対策に分けて整理している。

淀川水系では、流域委員会において既設・新設ダムにおける土砂移動の連続性を確保することの必要性が議論されたのに応える形で、

水系内のダム（既設・新設）全てを対象に、現状のデータで議論可能な範囲で水系一貫した検討を行っている。具体的な検討項目は、①既存の貯水池堆砂および流砂観測資料（堆砂の量と質、堆砂形状、河川・ダムにおける浮遊砂観測データなど）の整理、②下流河川の土砂に関する課題整理（治水・利水・環境面）、③1次元河床変動計算による貯水池内および下流河川の再現シミュレーション、④ダム有無および土砂管理シナリオに基づく対策効果シミュレーション、⑤水系内のダム（既設・新設）を対象とした土砂管理優先度評価の試算（後述）、⑥実現可能な堆砂対策メニューのレビュー、⑦土砂管理の基本情報としての今後の流砂観測計画の検討、などであり、水系の貯水池土砂管理推進の第一歩となることが期待される。

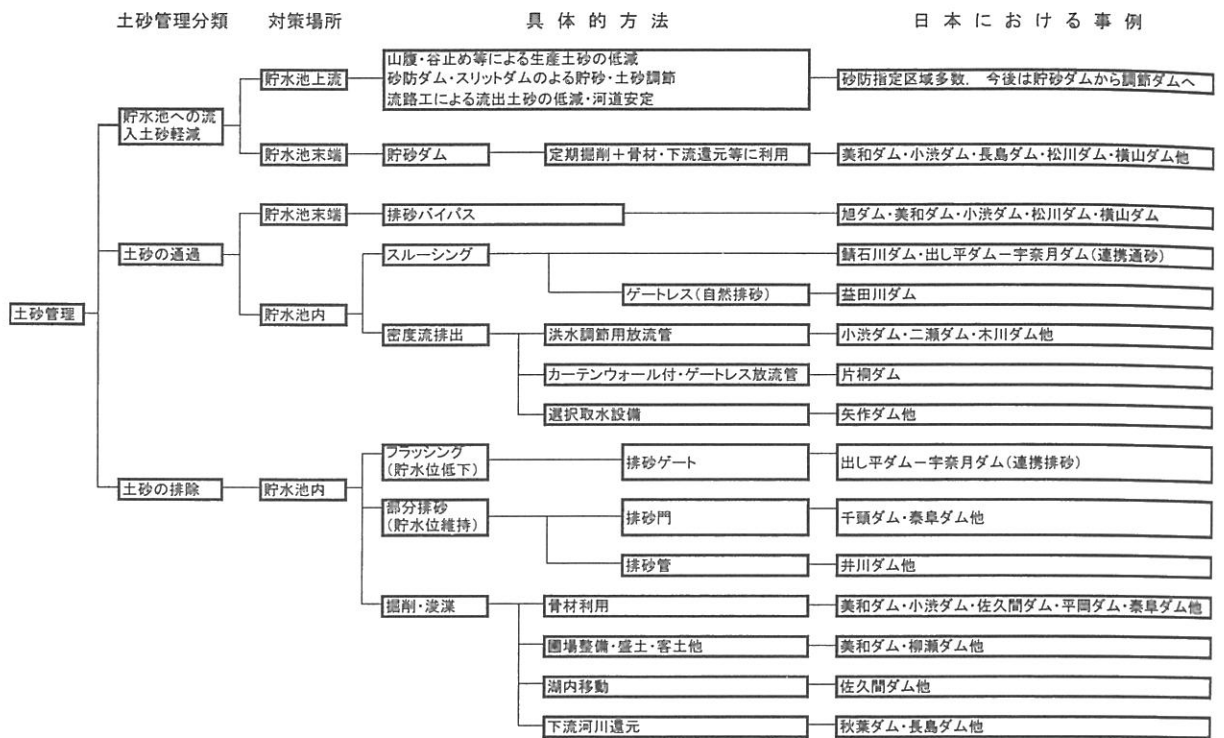
また、土砂管理の推進は河川における利害関係者の理解と協力が必須である。天竜川では、河川管理者、関係行政機関、ダム設置者、河川利用者（漁業組合と砂利採取組合）および学識経験者からなる土砂供給試験検討協議会が設置されており、今後のダム再編事業実施の地元調整の受け皿となることが期待される。

土砂管理メニューの現状

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（図1）。

① ダム貯水池への流入土砂軽減対策

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・流下させる土砂の河川還元実験が行われている。長島ダム、三春ダム、秋葉ダム、二瀬ダム、



図一2 貯水池土砂管理方策の分類

下久保ダム、浦山ダム、蓮ダム、布目ダム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、真名川ダムのように弾力的管理によるフラッシング放流と組み合わせることで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。

② ダム貯水池に流入する土砂を通過させる対策

ダム貯水池に流入する土砂を通過させ、堆積量を軽減させる対策としては、先述の布引ダムのような排砂バイパスと、土砂を含む高濃度の流水の特性を利用した貯水池からの密度流排出などがある。

排砂バイパスの代表事例は、新宮川旭ダムと天竜川美和ダムである。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(トンネル長さ二、三五〇m、最大通水量一四〇 m^3/s)を設置し、一九九八年四月より運用を行っており、年平均一六回の操作で年総流入量の約四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流の迂回のみならず、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(トンネル長さ四、三〇〇m、最大通水量三〇〇 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、二〇〇五年六月より試験運用が開始された。これら排砂バイパス技術は、トンネル建設に伴う費用が発生するものの、貯水池の水位低下が不要で、かつ、洪水時の貯水池流入水の直接放流であることから、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した技術と考えられる。

一方、密度流排出の事例としては、天竜川水系片桐ダムがある。片桐ダムでは、穴あきオリフェイス前面にカーテンウォールを設置し

て、洪水時に貯水池底部に流入する比較的土砂濃度の高い流水を放流する方法を採っており、洪水時に浮遊砂を積極的に排出することが期待されている。一方、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、天竜川小洪ダムでは、二〇〇四年一〇月の台風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(三〇mm以下→八〇mm)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たものと推定された。

また、究極の土砂通過方策として、最近事例の増加している「治水専用ダム」の考え方がある。いわゆる洪水吐きを土砂吐きと兼用させて、洪水貯留後の減水期に排砂も行つて堆砂を最小限に抑える構造のダムである。さらにこれを一歩進めたのが「治水利水分離ダム」構想で、本川には土砂の連続性を維持する治水専用ダムを整備し、支川に常時貯留型のダム(必要に応じて本川から利水導水を行う)を整備して、これらダム群で治水・利水機能を満足させる方法である。今後、流域の特性を考慮してダム再開発やダム再編が検討されるとすれば、このような治水と利水の組み替えもメニューの一つと考えられ、土砂管理の容易なダム構成に再編することも十分検討に値するものと考えられる。

③ ダム貯水池に堆積した土砂を排除する対策

ダム貯水池に堆積した土砂の排除策としては、機械力等により土砂を採取する方法と、排砂門・排砂路等で流水の掃流力により土砂を排出するフラッシング排砂がある。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(後述)。また、近年、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))が各種開発されている。これには、固定式と移動式があり、固定式の場合には貯水池内の土砂をシステム近傍まで湖内移動させる手段の確立、移動式の場合には年間目標排出土砂量に対応する操作時間と安全な作業環境の確保が課題である。

黒部川連携排砂の現状

黒部川の「ダム排砂」に対する社会の注目度は高いが、正確な情報が伝わっていない。出し平ダムでは、大粒径の土砂を対象とした排砂設備(排砂ゲートH5m×B5m)を2条設置し、水位低下による掃流力の回復を利用して貯水池に溜まった土砂を排出する。一九九一年に初めて排砂を行い、二〇〇五年六月までに計一三回の排砂が行われ、合計で六〇〇万³m以上の堆積土砂を流下させた(図13)。実に総貯水容量の三分の二以上に匹敵する量である。さらに二〇〇一年に、出し平ダム下流に宇奈月ダムが完成したこと、上下流ダムの連携排砂が開始された。下流の宇奈月ダムも排砂ゲート(左岸側に2門)を有し、二〇〇一年以来二〇〇五年七月までに、上流の出し平ダムと連携して計五回の排砂と四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、六月から八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

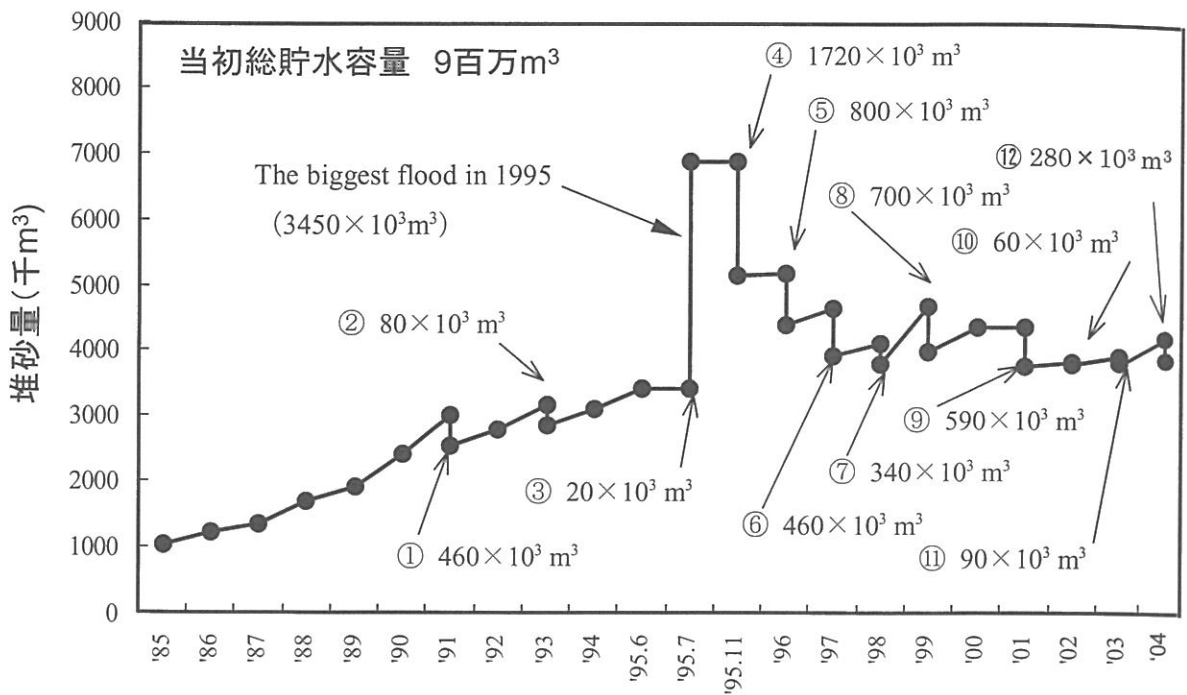


図-3 出し平ダムの排砂実績

が長くなら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。

これに対して、雑誌「選択」の6月号に「土砂に埋まるダム」と題して、黒部川連携排砂の現状について、「ヘドロ混じりの濁流は相変わらず流れている。」と記述されている。この表現は適切ではなく、現状のルールに従えば、河川・海域ともに致命的な影響（例えば、DOが大幅に低下）は生じないことが、一九九五年の出し平ダム単独の緊急排砂以降、実証されてきており、これは二〇〇一年以降の連携排砂でも活かされている。つまり、土砂は流れるが、新鮮な土砂のみであって、ヘドロ化した腐敗土砂ではないのが現状である。これにより、SSの上昇は生じるものの、基本的に新鮮な土砂が流下する自然洪水と基本的に変わず、DOの低下、硫化水素・悪臭の発生や、水生生物への著しい影響などの初回の排砂時のみに見られた特徴的な現象および具体的被害は生じていない。なお、この事実は、排砂評価委員会でも確認・評価されている。

貯水池土砂管理の推進方策

今後、貯水池土砂管理を推進するための鍵は、①貯水池土砂管理方策の適切な選択手法、②土砂管理を導入すべきダムの優先度評価手法、③現状で不足する効率的で環境適合型の土砂管理技術、の開発である。

① 貯水池土砂管理方策の適切な選択

図-4に日本における貯水池土砂管理事例を、水および土砂の回転率のパラメータ(CAP/MAR)（いわゆる貯水池回転率の逆数）＝総貯水容量／年間総流入量、CAP/MAS（貯水池寿命）＝総貯水容量／年間総流入土砂量で整理したものを示す。これを見

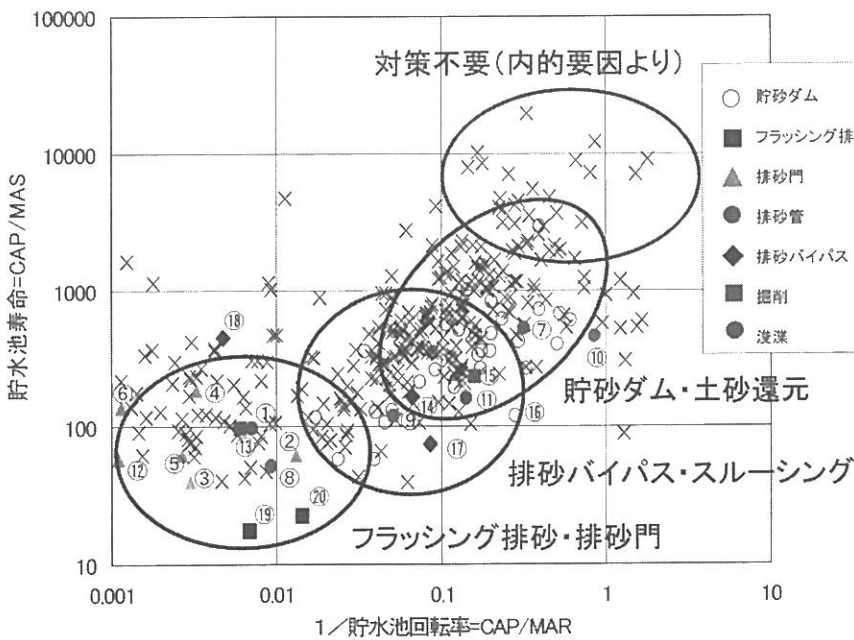
ると、概ね、CAP/MARの増加（回転率の減少）に伴って、フラッシング排砂・排砂門・排砂バイパス、貯砂ダム・掘削・浚渫の順に対策が変化していることがわかる。これは、選択可能な土砂管理対策が主に土砂輸送に使用可能な水量に大きく依存しているためである。なお、ここには土砂の質（粒径など）に関する要素や、土砂排出に対する河川環境条件などは考慮されていない。今後は、このような堆砂対策を選択する手法の確立が求められる。

② 土砂管理を導入すべきダムの優先度評価

次に、水系内に複数のダムが存在する場合には、現状では予算が限られることから一斉に土砂管理を導入することは現実的には難しい。そこで、何らかの指標により優先度評価を行うことが必要であろう。そこで、土砂管理の優先度評価を行う指標として次の3点を提案したい。1点目はダムの持続性に関する内的要因であり、指標が二つある。一つは計画堆砂速度に対する実績堆砂速度の超過程度（堆砂速度倍率）、もう一つは先述の貯水池寿命（CAP/MAS）である。わかりやすく言えば、自分自身がどれだけ困っているかである。2点目は、土砂の連続性確保に関する外的要因で、ダムごとの土砂の連続性分断に対する影響度合いと、下流域における実際の環境劣化などの影響の顕在化程度である。これは、下流の問題である。3点目は、ダムごとの土砂管理導入時の技術的容易性の観点である。この3つのポイントを組み合わせると優先順位を付けることができるかと考えている。

淀川水系のダム群を対象として、このような優先度評価を試行した結果、既設ダムについて、先行して土砂管理方策の検討を具体化すべきダムと現状で選択可能な対策手法の組み合わせが明確になった。新規ダムについても、ダム建設時に適切な土砂管理の目標を定めて、できる限り建設時点で土砂管理を考慮した施設配置を計画しておく必要があることが確認された。

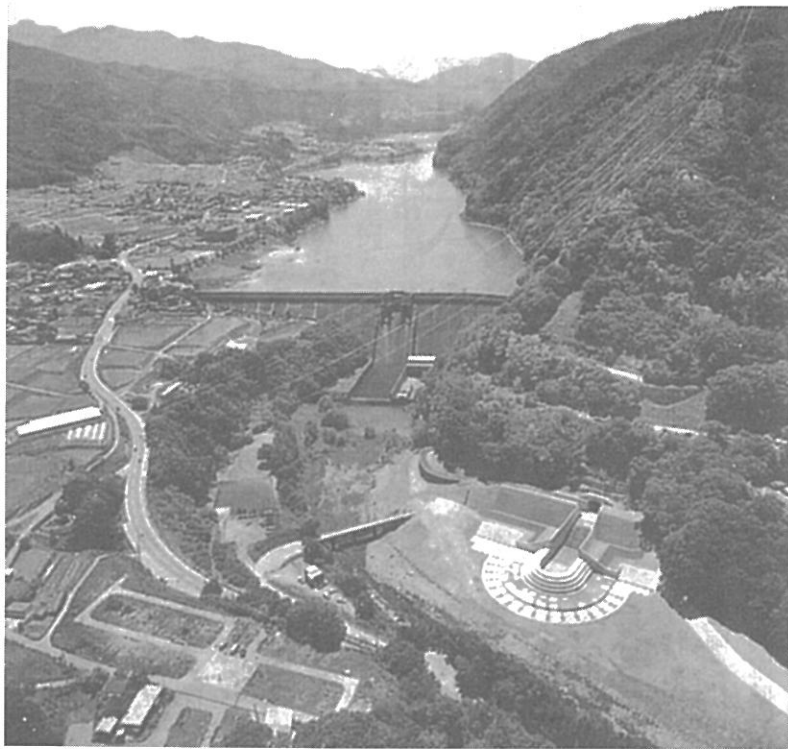
CAP: 総貯水容量, MAR: 年間総流入量, MAS: 年間総流入土砂量



1	大井	D, SP
2	千歳	SG
3	泰阜	SG, D, PF
4	笠置	SG, PF
5	大関	SG, PF
6	常盤	SG
7	三浦	SP
8	守田	D, PF
9	佐久間	D
10	八久和	E, D
11	井川	SP, E, D, PF
12	山口	SG, PF
13	秋葉	E, D, PF
14	美和	B, E, D, CD
15	牧尾	E, D, CD
16	小笠	E, CD
17	松川	B, E, CD
18	旭	B
19	出し平	F
20	宇奈月	F

CD	: 貯砂ダム
F	: フラッシング排砂
PF	: 洗水吐きフラッシング
SG	: 排砂門
SP	: 排砂管
B	: 排砂バイパス
E	: 陸上掘削
D	: 浚渫

図一四 貯水池土砂管理方策の選択



排砂バイパストンネルを備えた天竜川水系美和ダム
(右下がトンネル吐口と減勢工)

③ 効率的で環境適合型の土砂管理技術の開発

最後に必要なのは、さまざまなダムの条件に適用可能な堆砂対策メニューを幅広く開発することである。その観点で今後期待される技術開発は、土砂を「取る」、「運ぶ」、「流す」技術の3つであろう。先述の貯水池土砂管理推進検討会のWG2およびWG3に相当するテーマである。

「取る」技術としては、先述の水位差吸引土砂排出システム（HRSRS）に大いに期待したい。現状の課題は、このような新技術を実機レベルの技術に育成し、積極的に採用する仕組みの整備ではな

いかと考えられる。

「運ぶ」技術としては、河川の流水を使うのが最も自然であるが、通常のトラック輸送以外に、ベルトコンベア輸送、カプセル輸送、スラリ輸送なども条件が合えば適用可能である。また、水位差吸引土砂排出システムによって取り込まれた土砂を、特殊エジクターなどを利用してさらに長距離区間管路輸送させることも今後の検討に値する。

「流す」技術としては、粗粒土砂による下流河道への局所的な堆積問題と細粒土砂による高濃度濁水の発生などの水質問題の両者に關係し、これらが土砂管理の障害にならないように、安全に土砂を流す技術の開発が必要である。具体的な方法としては、細粒分を多く含む土砂の固化や脱水処理などにより濁水発生レベルを低下させたり、高濃度濁水を希釈したりする技術が考えられるが、新しい発想での技術開発を期待したい。

◇ おわりに

最後に、貯水池土砂管理の技術は日本にとどまらず世界的にも注目され求められていることを強調したい。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立しておくことの意義は大きい。

また、土砂管理の明確な目標を作ること重要である。その一つの考え方として、土砂管理を導入して「千年ダム」を実現させることを提案したい。先述の貯水池寿命で評価すれば、日本の多目的ダムは、一〇〇〇年以上が三四%、五〇〇〜一〇〇〇年が二五%、一〇〇〜五〇〇年が三四%、一〇〇年以下が七%となり、平均は四〇〇〜五〇〇年程度となる。ダムごとに、千年の持続性確保を如何に我々が持ち得る技術で実現させるかという目標を立てると、具体的なダムごとの必要な対策メニューが明確になってくるものと考えられる。

