

論文

RESCON モデルを用いたフラッシング排砂の 適用性検討について

角 哲也¹ 井口真生子²

Technical Feasibility Study of Sediment Flushing in Reservoirs Using the RESCON Model

Tetsuya SUMI Makiko IGUCHI

水資源開発や洪水調節を目的として建設されてきた貯水ダムの将来における最大の課題はダム堆砂による貯水容量の減少である。今後、ダム貯水池容量の持続的管理のための土砂管理計画が極めて重要となってくる。ここでは、土砂管理計画の決定補助ツールとして世界銀行が開発した RESCON モデルを紹介し、その中のフラッシング排砂の技術的評価手法が日本のダム貯水池にも適用可能か否かを検討した。さらに、日本のいくつかの貯水池に適用させた場合の結果をもとに、今後、この対策を広く適用していくための課題について考察した。

キーワード：貯水池土砂管理，フラッシング排砂，RESCON モデル

1. はじめに

水資源開発や洪水調節を目的として建設されてきた貯水ダムの将来における最大の課題はダム堆砂による貯水容量の減少である。全世界の貯水容量に対して毎年 0.5~1.0%の堆砂が進行しており、21 世紀半ばまでに総貯水容量の 30%以上が堆砂によって失われる可能性がある¹⁾と指摘されている¹⁾。

日本では、総貯水容量 100 万 m³ 以上の 877 箇所²⁾のダム、総貯水容量約 183 億 m³ に対する総堆砂量は約 13.5 億 m³ で、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%、また、平均年間容量損失は 0.24%程度である¹⁾。これらの値は世界平均よりも低いものの、主要な構造線地帯、とくに中部地方などは 0.42%と他に比べかなり高くなっている。したがって、このような地域においては、ダム貯水池容量の持続的管理のための土砂管理計画が極めて重要となってくる。

また、新規ダム建設が困難となる中、既存ダムを徹底的に有効活用するダムの再開発が今後進められると

考えられる。この再開発では、ダム群の貯水容量を効率的に再配分し治水・利水機能を向上させるとともに、土砂移動の連続性を同時に確保する恒久堆砂対策の導入が志向されるであろう。そこでは、ダムや周辺環境ごとの特性に応じた土砂管理計画の策定が求められる。

2003 年 3 月に開催された第 3 回世界水フォーラムにおける分科会「流域一貫の土砂管理(貯水池土砂管理に向けた挑戦)」¹⁾では、以下の勧告がなされた。

- ① すべての国レベルで、現状の貯水池堆砂状況の調査を行い、既存貯水池の将来にわたる信頼性(容量の持続的確保)に関する適切なアセスメント(評価)を行うこと。
- ② 持続性を確保するために、既存貯水池の管理および新規施設の計画において、ライフサイクルマネジメントと設計手法を導入すること。
- ③ 土壌浸食を防止し、土砂生産を減少させるための総合的な流域対策について、いっそうの研究を進め具体的に実施していくこと。

¹ 京都大学 大学院工学研究科 助教授

² (株)ハイドロソフト技術研究所 プロジェクトマネージャー

- ④ 貯水池土砂管理のための、安全かつ経済的な対策手法の開発を進めること。
- ⑤ 持続可能な貯水池土砂管理プロジェクトのアセスメントのための経済評価手法を確立し、導入を図ること。
- ⑥ 環境専門家とエンジニアは、貯水池土砂管理に伴う社会のおよび環境的課題の所在を明らかにし、既存の貯水池容量が未来の世代に財産として引き継がれるべく、これら課題に対する適切な緩和措置を共同作業により確立すること。
- ⑦ 先進国および発展途上国を問わず、すべての国において貯水池堆砂状況を整理した台帳を整備し、さらにこれに基づく実現可能な行動計画を策定するための国際協力を進めること。
- ⑧ 利害関係者間（市民を含む）における合意形成手法についていっそうの研究を進め具体的に実施していくこと。

この勧告の中で、②は従来の有限な設計寿命（計画堆砂容量）の考え方に対して持続可能なライフサイクル管理の考え方を提案するものである。分科会において世界銀行は、世界共通の課題としての貯水池堆砂問題を背景に、既存の水資源開発に関する融資案件の将来像を政策レベルで議論・検討することを促す RESCON (reservoir conservation) プロジェクト²⁾を進めていることを紹介した。ここで開発された RESCON モデルは、貯水池や地域の特性に適合した、経済的に有利で、自然・社会環境に悪影響の少ない土砂管理計画の決定を補助するツールである。比較的入手しやすい基本的データを用いて、土砂管理代替案の技術的評価、および経済評価を行うモデルとして有用なツールではあるが、まだ適用事例が少なく今後改善すべき課題も残されている。検討課題については、次節で RESCON モデルの概要に触れた後に論じるが、RESCON モデルを日本のダム土砂管理計画の事前検討に活用するためには、日本の貯水池や地域特性への適応性や生態系への配慮の追加など、さらに多くの課題があると考えている。

本研究では、まず、コストが低く恒久的な対策として海外で重要な位置を占めるフラッシング排砂に着目し、貯水池堆砂の排出可能性に特化して、その技術的

評価手法について検討した。さらに、このモデルを用いて日本のいくつかのダムに適用した場合の結果をもとに、今後この対策を広く適用していくための課題について考察する。

2. RESCON モデルとフラッシング排砂可能性判定手法

2.1 RESCON プロジェクト²⁾

世界銀行は貯水池の持続可能な管理を促進することを目的として、RESCON プロジェクトを1999年12月から約2年間実施した。このプロジェクトでは、①政策決定者に対して、持続可能で世代間の公平を達成できる貯水池管理政策を促進するための貯水池ライフサイクルの概念を提起し、②政策決定援助ツールとして RESCON モデルを開発した。

貯水池ライフサイクルとは、当初決定された設計寿命までしか考慮しないアプローチ（図-1左）とは異なり、貯水池使用の持続可能な循環型の管理法（図-1右）のことである。ライフサイクル管理アプローチでは、恒久的な利用を可能にする方法で運営・維持管理が行われる。もし、持続的な管理が不可能な場合は、プロジェクトを終了する際に施設閉鎖に伴って必要となる資金をいずれかの時点で積み立てる必要がある。これは、鉱山開発プロジェクトなどにおける一般的な考え方を例にとると、当初の目的を達成した鉱山を閉山するか否かの判断と同様である。

2.2 RESCON モデル

RESCON モデルでは、比較的用意しやすいデータを用いて、技術的に実行可能で、経済評価が高く、かつ、自然・社会環境に多大な影響を与えない土砂管理計画を選択する。RESCON モデルの構成を図-2に示

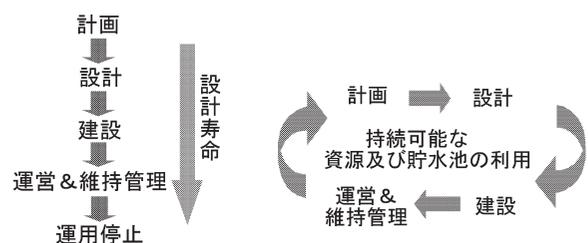


図-1 設計寿命アプローチ（左）とライフサイクル管理アプローチ（右）

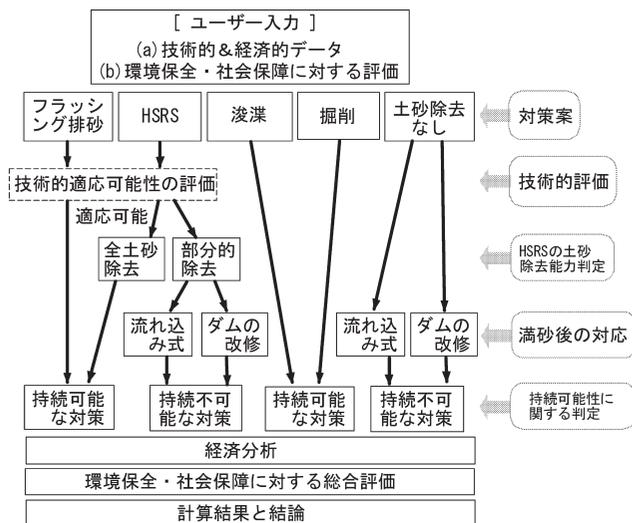


図-2 RESCON モデルの構成²⁾

す。RESCON モデルでは、① フラッシング排砂、② 水圧差による土砂吸引法 (HSRS; hydrosuction sediment removal system, 図-3)、③ 浚渫、④ 掘削、を貯水池土砂管理対策に挙げており、さらに、⑤ 土砂除去をしない、ことも選択肢に加えている。まず、地形特性、水文特性、堆積土砂の特性、堆砂除去に関するパラメーター、経済に関するパラメーター、設備投資に関するデータを入力する。また、環境保全・社会保障に対する評価では、自然環境保全のほか、文化遺産保全、上下流問題、少数民族保護などの各項目について4段階評価をつける。これらを用いて、フラッシング排砂、HSRS および掘削、浚渫について、持続可能な対策としての技術的導入可能性が判定される。持続可能な対策が選定できない場合、例えば発電ダムの場合は、ダムの満砂後に流れ込み式水力発電として利用する場合と、施設を閉鎖する場合とに分類し、各案について経済評価が行われる。次に、選択可能な土砂管理対策の技術的導入可能性の評価結果、経済分析が

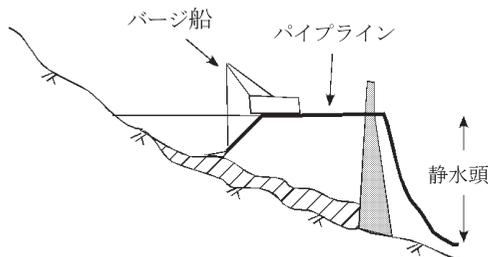


図-3 水圧差による土砂吸引法 (HSRS)

なされ、経済的に優位な対策が環境・社会面で問題がないかを別に評価したうえで最終結論が出力される。

2.3 RESCON モデルの今後の課題

RESCON プロジェクトの最終報告書²⁾では、次の課題を挙げている。① 多くの貯水池に適用し、エラーやモデルの限界を特定する。② 貯水池の洪水調整機能も考慮する。③ 密度流放流、スルーシング、排砂バイパスなど他の土砂対策も検討案に加える。④ 連続する貯水池への対応。⑤ 水文条件を識別できるような流入量の季節変動パターンのモデル化。⑥ 環境制限として下流に放流可能な土砂濃度設定。⑦ 各対策に対して環境負荷を軽減する経費を盛り込む。

これらの課題はすべて日本の貯水池への適応する場合において重要なことであるが、本研究では①に関連してフラッシング排砂の技術的評価に着目した。図-2に示す各種対策の中では、流水の掃流力を回復させて土砂排除を行うフラッシング排砂が経済性の観点からは有利となる。しかしながら、この種の対策が有効となるか否かはダム貯水池の地形、水文、土砂の性状などの要素に大きく左右され、これを適切に判定することがモデルの有効性の鍵となる。次に RESCON モデルにおけるフラッシング排砂の有効性判定手法を具体的に見てみる。

2.4 フラッシング排砂の技術的導入可能性の評価法

RESCON モデルでは、フラッシング排砂の技術的導入可能性の判定に Atkinson の提案する次に示す判定指標 SBR, LTCR³⁾ を用いている。

1) SBR (sediment balance ratio)

SBR は貯水池の土砂収支に関する判定指標で、1回のフラッシング排砂で除去可能な土砂量は、少なくとも次の排砂が実施されるまでの期間に堆積する土砂量以上でなければならない。SBR はこの条件 ($SBR \geq 1$) を満たすか否かを判定する指標であり、式 (1) に定義される。

$$SBR = \frac{1 \text{ 年当りフラッシング排砂量}}{\text{年堆砂土砂量}} = \left(\frac{Q_s T_f \cdot 86400}{N} \right) / M_{in} \cdot TE \quad (1)$$

ここに、 Q_s : フラッシング排砂量 (t/s), T_f : 排砂実施期間 (日), N : 排砂実施サイクル (年), M_{in} : 年流

入土砂量 (t/年), TE : 土砂捕捉率, である。 TE は Brune 曲線により, Q_s は清華大学式により求められる。 Q_s の詳細については, 次節で取り扱う。

2) $LTCR$ (long term capacity ratio)

$LTCR$ は確保される貯水池容量から見た排砂効果に関する指標で, フラッシング排砂により維持可能な貯水容量は初期総貯水容量に対して十分な割合 (約 50%以上) でなければならない。 $LTCR$ はこの条件 ($LTCR \geq 0.5$) を満たすか否か判定する指標であり, 式 (2) に定義される。

$$LTCR = \frac{\text{維持可能な貯水容量}}{\text{初期総貯水容量}} \quad (2)$$

$LTCR$ は図-4 に示されるように複雑な貯水池地形を単純にモデル化し, ダムサイト付近の代表断面にて評価する。図-4 のうち, 排砂しても堆積土砂が除去されずに取り残される断面積を A , 排砂によって土砂が除去される断面積を B とすると, $LTCR$ は式 (3) で表される。

$$LTCR = \frac{B}{A+B} \quad (3)$$

A を求めるには水みち幅 W_f およびその水みちの側岸勾配 SS_s が必要であるが, SS_s については Migniot 式

$$\tan(SS_s) = \frac{31.5}{5} \rho_d^{4.7} \quad (4)$$

を用いる。ここに, ρ_d は堆積土砂の乾燥密度である。なお, 本式は河口泥などの微細土砂の室内実験から得られたものであり, 堆砂の水みち側岸勾配に応用すると, 実際より急勾配に推定される傾向があるので注意を要する。水みち幅 W_f については, 次節で取り扱う。

3) SBR および $LTCR$ に必要なデータ

$SBR, LTCR$ の値を算出するのに最低限必要なデータは, ① 総貯水容量, ② 貯水池延長, ③ 常時満水位 (および洪水期制限水位), ④ ダムサイト付近の貯水池底面の幅, ⑤ ダムサイト付近の貯水池側面勾配, ⑥ 年流入土砂量, ⑦ 堆積土砂のタイプ, ⑧ ダム直上の元河床高, ⑨ 排砂時の水位 (排砂ゲート標高), ⑩ 排砂流量, ⑪ 排砂継続期間, ⑫ 排砂の実施サイクル, である。なお, 排砂が実施されていないダム貯水池では ⑨~⑫ を仮定する必要がある。これらはダム貯水池の運用, 流況, 排砂設備設置コストなどを考慮して決定しなければならないが, 本研究では次のルールに従って, これらの入力値を決定した。

[ルール 1] 排砂時の水位 (排砂ゲート標高)

ダム直上流の元河床高から制限水位までの高さを H としたとき, 日本の多目的ダムの常用洪水吐きゲートの平均設置高さは $(2/3)H$ となる。これら放流ゲートが排砂ゲートとして利用可能であるか否かの議論はここでは行わず, 排砂を効果的に行うための放流高さのみに着目する。これまでの知見により排砂ゲートの高さ (すなわち排砂時の下流端水位) が低いほど排砂の面では有利であることが明らかとなっているが, 一方で元河床高に近すぎると 1 回の出水で排砂ゲートが埋没する危険性がある。そこで, 検討の前提として, ここではすべてのダム共通に $(1/3)H$ の高さに排砂ゲートが設置されているものと仮定した (図-5)。

[ルール 2] 排砂流量

排砂に使用できる流量が大きいほど, フラッシング

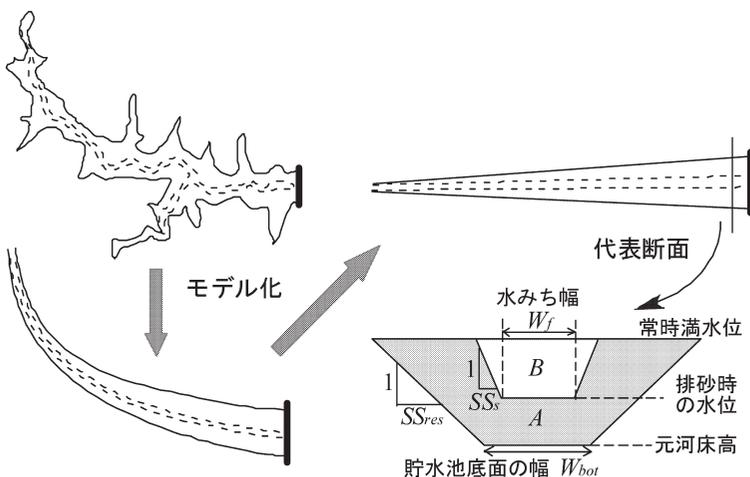


図-4 貯水池のモデル化および代表断面図³⁾

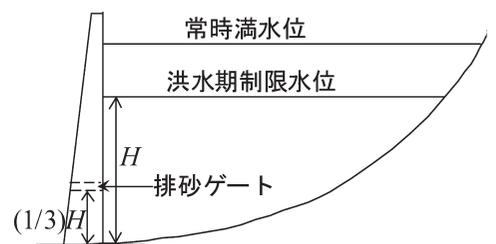


図-5 排砂ゲート位置

排砂が成功する可能性は高くなる。しかし、フラッシング排砂を自然洪水時にあわせて実行するには、ある程度、年間の生起確率を高いものにしなければならない。本研究では、日平均流量により作成した年間流況曲線における3/365日流量をフラッシング流量と仮定した。この流量は、各年の流況変化を考慮しても約80%の生起確率（5年間のうち4年間は年最大日平均流量が超過）となる。

[ルール3] 排砂継続期間

フラッシング排砂では、水位低下から自然流下に移行する初期の数時間で堆積土砂の大部分が排出されることが知られている。また、出し平ダム、宇奈月ダムの実績においても1日前後で排砂が行われている。そこで、ここではフラッシング排砂の継続時間を1日と仮定する。

[ルール4] 排砂の実施サイクル（年）

下流の河川環境の影響（排砂時のDO（dissolved oxygen）の低下、高濁水の継続）を軽減するためには、土砂を長期間堆積させずに、年に1回以上排砂を行って土砂を入れ替えることが望ましいと考えられる。そこで、ここではフラッシング排砂サイクルを1年と仮定する。

その他に、④および⑤は、貯水池内のいずれかの横断面を代表断面とみなす必要がある。図-4からもわかるように、排砂の観点からは、横断方向に広い断面ほど堆砂全体に対する水みち部分が相対的に小さくなる。したがって、代表断面を適切に選定することは、排砂の有効性判定に重要である。貯水池内の複数の横断面図が入手できたダムを対象に、貯水池断面の代表性に関する予備検討を行った結果、*LTCR* に与える影響は小さいことを確認したうえで、本研究ではダム軸断面を代表断面として④、⑤を決定した。もちろん、ダム軸とその他の断面が大きく異なる貯水池の場合には代表断面を別に定める必要があることはいうまでもない。

2.5 日本の河川特性から見た *SBR*、*LTCR* 算出法の課題

フラッシング排砂を行う場合、一次的判定として Atkinson の判定指標は非常に有効なものであるが、日本の貯水池の特性にも十分対応できるものか検討す

る必要がある。日本の貯水池の特性としては、堆積土砂の粒径が大きい、粒度分布の幅が大きい、一洪水当りの継続時間が短い、河道勾配が大きい、ことなどが考えられる。

そこで、*SBR* と *LTCR* を日本の貯水池に適用したところ、いくつかの検討すべき課題が明らかとなった。ここでは、そのうち次に示す3点について検討する。

イ) 排砂時に形成される水みち幅 W_f の推定式

ロ) フラッシング排砂量 Q_s の推定式

ハ) 制限水位方式ダムの *LTCR* の求め方

3. 問題提起と課題解決に向けた検討・考察

3.1 水みち幅の推定式について

1) RESCON の考え方と課題

フラッシング排砂で形成される水みち幅は *SBR*、*LTCR* の算出で用いられる重要な値である。RESCON モデルでは中国、アメリカ合衆国、インドの4カ所の貯水池での観測値（図-6）より導かれた経験式(5)により、水みち幅を決定している。

$$W_f = 12.8Q_f^{0.5} \quad (5)$$

なお、水みちの幅方向の発達貯水池の幅により制限を受けるときは、その貯水池の幅を水みち幅とする。

表-1に対象貯水池のフラッシング排砂に関する概要を記す。インドの Baira 貯水池を除けば、①大規模なダムである、②堆積土砂の粒径が非常に細かい、③河床勾配が非常に小さい、など日本の貯水池とは異なる特徴のダムであることがわかる。

式(5)は流水幅を求めるのに一般的に用いられているレジーム則 ($W_f = \alpha Q_f^{0.5}$) と同じく流量の平方根に比例する形式である。しかし、日本の一般河道の場合、その係数 α は約5~8程度といわれており、式(5)の12.8に比べて小さい。実際、出し平ダムの初回の排砂である1991年のフラッシング排砂での水みち幅は約60mであり、排砂流量87m³/sを用いると係数 $\alpha = 6.4$ となる。したがって、式(5)を出し平ダムにそのまま適用した場合、貯水池幅の制限がないと仮定すると、水みち幅は約2倍に過大評価されてしまうことになる。そこで、次に日本の貯水池の特性を考慮した水

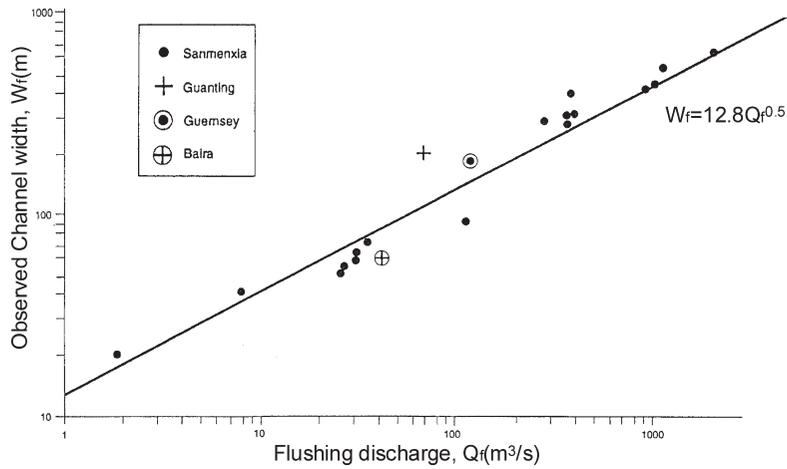


図-6 4ダムのフラッシング流量と水みち幅の関係³⁾

表-1 4ダムの水みち形成に関する緒元³⁾

ダム名	所在国	貯水容量 (百万 m ³)	堆砂の特性	平均的な排砂 継続時間	排砂流量 (m ³ /s)	河床勾配	観測数 (回)
Sanmenxia	中国	9640	黄土	4 カ月	1000~4000	1/3400	17
Guanting	中国	2270	黄土	5 日	80	1/860	1
Guernsey	アメリカ 合衆国	91	20% fine sand 60% silt 20% clay	5 日	125	1/1300	1
Baira	インド	9.3	情報なし	31 時間	44	1/120	1

みち幅の推定式について検討する。

2) 関連する既往の研究など

流水幅を求めるのに一般的に用いられている (5) 式以外の流水幅の計算式として、Altunin (1964) の式 (6)⁴⁾がある。式 (6) は流量のほか縦断勾配 S を変数に含む式である。

$$B = \frac{1.5Q^{0.5}}{S^{0.2}} \tag{6}$$

式 (6) は、水みち幅は縦断勾配の 0.2 乗に反比例しており、勾配が緩やかなほど流路は幅方向に、急なほど水深方向に発達すると捉えられる。いま、式 (6) に出し平ダムの縦断勾配 1/70 を代入すると、 $B = 3.4Q^{0.5}$ となる。一方、表-1 の 4 ダムの勾配より $\alpha = 1.5/S^{0.2}$ として計算したところ、 $\alpha = 7.7$ (Sanmenxia), 5.8 (Guanting), 6.3 (Guernsey), 3.9 (Baira) で、RESCON の示す $\alpha = 12.8$ よりも小さくなり、この式が広範囲で使用できるかは判断できない。

水みち幅の推定式として、日本の貯水池の特性を考

慮してどの式が適切であるかを判断するためには、例えば、出し平ダム下流の宇奈月ダムの排砂時に形成される水みち幅の検証など、さらに多くの実績値の蓄積が必須である。そこで今回は、流量のみから決定されるとする従来からの一般的なレジーム則を用い、係数は出し平ダムでの観測値をもとに $\alpha = 6$ を仮定した。

3.2 フラッシング排砂量の推定式

1) RESCON の考え方と課題

RESCON モデルではフラッシング排砂による排出土砂量の推定式として清華大学式³⁾を用いている。清華大学式は IRTCES* (1985) が中国の貯水池における実測値より求めた経験式として報告されているものであり、式 (7) に示される。

$$Q_s = \psi \frac{Q_f^{1.6} S^{1.2}}{W_f^{0.6}} \tag{7}$$

ここに、 Q_f : 排砂流量 (m³/s), S : 河床縦断勾配, W_f :

* International Research and Training Center on Erosion and Sedimentation

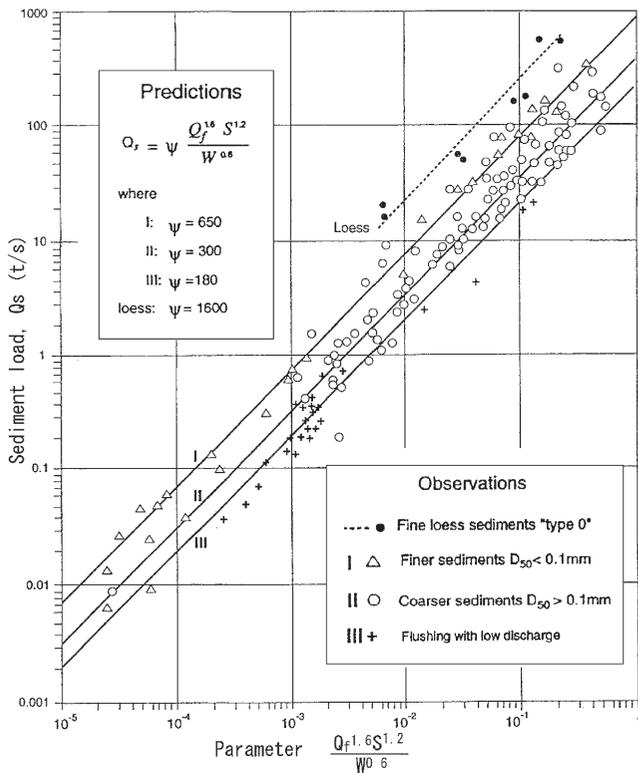


図-7 中国の貯水池排砂時の観測排出土砂量³⁾

水みち幅 (m), Ψ : 定数 (黄土のような土=1600, $D_{50} < 0.1 \text{ mm} = 650$, $D_{50} \geq 0.1 \text{ mm} = 300$, 排砂流量が小さく排砂が困難な場合=180) である。図-7 は中国の貯水池の実測値から求めた $(Q_f^{1.6} S^{1.2} / W^{0.6})$ と Q_s との関係に対数軸に粒径別にプロットしたものであり、この分布より Ψ を決定している。

ただし、Atkinson はレポートで「この式以外にフラッシング排砂量の推定式はないので、この式を用いる。しかし、中国の貯水池と状態が違うような貯水池においては、3 倍以上過剰に評価される恐れがある。」と述べて、河川・貯水池特性による相違を指摘するとともに、便宜的に清華大学式で算出された値の 3 分の 1 を採用している。フラッシング排砂量の推定式として、清華大学式を日本の貯水池に採用するには、Atkinson

表-2 清華大学式に使用した条件

	出し平ダム	ヴェルボアダム
縦断勾配 S	1/70	1/700
河床底幅 W_{bot} (m)	80	90
粒径に関するパラメーター Ψ	300/3 ($D_{50} > 0.2 \text{ mm}$)	650/3 ($D_{50} < 0.01 \text{ mm}$ で粘性土)

が行ったように「3 分の 1 の値を採用する」ことで十分であるかなど、まだ多くの課題が残されている。一方、この式を採用する場合の最大の利点は、① フラッシング流量、② 貯水池の縦断勾配、③ 貯水池内の堆積土砂の大まかな粒度特性、がわかれば、フラッシング排砂量を推定できることである。そこで、この利点を生かしつつ同式を日本の貯水池にも適用可能であるかを検討する。まず、実測値と清華大学式による計算値を比較し、次に、これらの結果を日本で一般的に用いられている流砂量式から算出した結果と比較する。

2) 実測値との比較

清華大学式を適用するには、少なくともフラッシング流量、貯水池の縦断勾配、貯水池内の堆積土砂の粒度特性と排砂流量のデータが必要である。そこで、複数のフラッシング排砂に関してデータの整備されている日本の出し平ダム (黒部川水系) とスイス連邦のヴェルボア (Verbois) ダム (ローヌ川水系) を対象として検討した。

出し平ダムは 1985 年に完成した堤高 76.7 m、総貯水池容量 900 万 m^3 の重力式コンクリートダムである。堆砂率が 30% を超えた 1991 年よりフラッシング排砂が試験的に行われ、1995 年より本格的にフラッシング排砂がほぼ毎年実施されている⁵⁾。

一方、ヴェルボアダムは 1943 年に完成した堤高 32 m、総貯水池容量 1500 万 m^3 の重力式コンクリートダムであり、土砂吐きを兼ねた底部放流管が 4 条 (14 m \times H 4.2 m) 設置されている。ダム完成当初よりほぼ 3 年に 1 回フラッシング排砂が実施されている⁵⁾。

出し平ダムとヴェルボアダムのフラッシング流量以外の条件を表-2 に示す。それぞれのフラッシングに対して、フラッシング流量、実測された排砂量、算出した排砂量、それらの比および Q_s を $(Q_f^{1.6} S^{1.2} / W^{0.6})$ で除して求めた Ψ を表-3 および表-4 に記す。図-8 は縦軸を Q_s 、横軸を $(Q_f^{1.6} S^{1.2} / W^{0.6})$ の対数軸とし、実測値をプロットしたものである。

表-3、表-4 より清華大学式により算出した排砂量 (Ψ は Atkinson に従って 1/3 と評価) は実測値と比較して、出し平ダムでは 6~140 倍、ヴェルボアダムでは 6~20 倍過大評価されていることがわかる。図-8 より実測値から得られた Ψ は 4 および 20 で、清華大

表-3 出し平ダムの単位時間当りの実績排砂量および推定排砂量⁵⁾

排砂実施年	堆砂率 (%)	排砂操作時間 (h)	排砂時平均流量 (Q_f) (m^3/s)	総土砂排出量 ($千 m^3$)	実績排砂量 (Q_s) (t/s)	推定排砂量 (t/s)	推定値実績値	推定 Ψ
1995	76	17	200	1720	33.7	211.7	6	16
1996	58	28	275	800	9.5	352.3	37	3
1997	44	48	220	460	3.2	246.5	77	1
1998	47	24	200	340	4.7	211.7	45	2
1999	52	24	140	700	9.7	119.6	12	8
2001	41	26	250	590	7.6	302.5	40	3
2002	42	12	170	80	2.2	163.2	73	1
2003	44	15	220	80	1.8	246.5	140	1

表-4 ヴェルボアダムの単位時間当りの実績排砂量および推定排砂量⁵⁾

排砂実施年	堆砂率 (%)	排砂操作時間 (h)	排砂時平均流量 (Q_f) (m^3/s)	総土砂排出量 ($千 m^3$)	実績排砂量 (Q_s) (t/s)	推定排砂量 (t/s)	推定値実績値	推定 Ψ
1945	7	29	530	812	9.3	128.2	14	16
1947	7	22	550	615	9.3	136.1	15	15
1949	8	20	500	590	9.8	116.8	12	18
1951	13	20	750	1052	17.5	223.5	13	17
1954	12	21	500	665	10.6	116.8	11	20
1956	13	20	450	798	13.3	98.7	7	29
1960	19	24	560	1186	16.5	140.0	9	25
1965	30	30	540	2140	23.8	132.1	6	39
1969	24	50	530	1435	9.6	128.2	13	16
1972	22	42	460	1399	11.1	102.2	9	24
1975	22	35	550	1798	17.1	136.1	8	27
1978	17	30	625	1022	11.4	166.9	15	15
1981	19	32	500	742	7.7	116.8	15	14
1984	24	42	560	879	7.0	140.0	20	11

学式の Ψ に比べて 1~2 桁小さい値である。清華大学式と比べて大きな相違が生じた原因として以下の 3 点が考えられる。

イ) 排砂可能な堆砂量に対してフラッシング水量 ($Q_f \times$ 継続時間) が多い

中国では、もともと河川水量が豊富ではなく、排砂土砂量に対し少ない水量で排砂が実施されており、単位水量当りの排出土砂量 (排砂効率) が高い場合が多い。一方、出し平ダム、ヴェルボアダムは排砂土砂量に対して、多くの水を使用できる条件下で実施されており、下流生態環境への配慮から、極端に高濃度の排出土砂とならないように水量を増やして実施されている。表-3、表-4 では、出し平ダムは 1995 年、ヴェルボアダムは 1965 年のフラッシング前の堆砂率が最も高

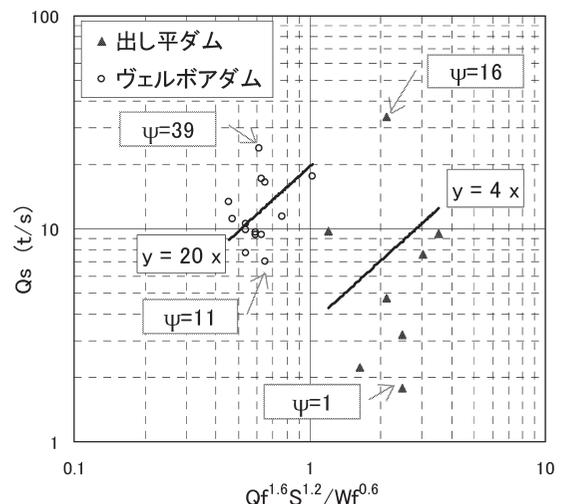


図-8 出し平ダム、ヴェルボアダムの Q_s と $(Q_f^{1.6} S^{1.2} / W_f^{0.6})$ との関係

く、その年の排砂効率は最も高くなっている。毎年排砂を行う出し平ダムの年間堆砂量の変動は、3年に1回のヴェルボアダムの3年累積堆砂量の変動に比べて大きいので、図-8においてばらつきが大きかったと考えられる。これらから、両ダムでは中国のダムに比べ、排砂効率の低い状態で運用されているといえる。

ロ) Q_s には排砂時の上流からの土砂流入量が含まれない

中国の貯水池では浮遊砂の割合が大きいため、排砂量は観測 SS 濃度から求めていると考えられる。一方、出し平ダムでは掃流砂が多く含まれるので、排砂前後の貯水池の地形測定より Q_s を推定しており、排砂時に上流から新規に流入してそのまま貯水池内を通過する土砂量は含まれていない。ヴェルボアダムの Q_s の測定手法は不明であるが、排砂にレマン湖の清水を多く使用しているため、排砂時の上流からの土砂流入は少ないと考えられる。仮に、排砂時の上流からの土砂流入量を大きく見積もったとしても Q_s の相違は最大2倍程度と考えられる。

ハ) 粒径が大きい堆積土砂に対する事例が少ない

係数 Ψ を決めるための実測値には、粒径の大きい土砂が堆積する貯水池のデータはほとんど含まれていないので、そのような貯水池についての精度は確かではないと考えられる。

3) 一般的な流砂量式との比較

次に、日本で一般的に適用される流砂量式を用いて

算出した結果と清華大学式とを比較した。ここでは、掃流砂量式は芦田・道上式⁶⁾を、浮遊砂量式には濃度分布に Lane-Kalinske 式⁶⁾、基準面濃度は芦田・道上式を用いた。勾配を 1/50, 1/100, 1/500, 流量を 100~800 m³/s として、4 粒径に対して計算した結果を図-9 に示す。粒径が 0.1 mm 以下の粘着性が卓越する土砂については、比較可能な粘性土の侵食量の評価式が提案されておらず、今後の課題とする。

掃流砂主体の $D_{50}=0.3$ mm, 0.5 mm の場合、流砂量と $(Q_f^{1.6}S^{1.2}/W_f^{0.6})$ は相関がよく、その比例係数は出し平ダムで最も排砂効率が高いときの $\Psi (=16)$ と近い値を示した。 $D_{50}=0.2$ mm は縦断勾配 1/500 のケースを除き、 $D_{50}=0.3$ mm, 0.5 mm の結果と近い値を示した。浮遊砂が主体の $D_{50}=0.1$ mm は、勾配ごとに異なった直線上に乗った。これは、清華大学式は勾配の 1.2 乗に比例するのに対し、今回用いた式は勾配の概ね 0.5 乗に比例するからである。図-9 に示すように $D_{50}=0.1$ mm では一致するとはいえないものの、 $\Psi = 300/3$ に比較的近い結果になったのに対し、 $D_{50}=0.2$ mm 以上では $\Psi = 300/3$ から大きく外れる結果となった。RESCON モデルでは、 $D_{50} > 0.1$ mm に対し一律に $\Psi = 300/3$ の値が用いられていたが、 $D_{50} > 0.2$ mm 以上では異なった係数が必要と思われる。これらの検討を踏まえ、本検討では D_{50} が 0.2 mm より小さな土砂の Ψ については RESCON モデルに従い、大きな粒径に対しては $\Psi = 15$ を使用することとした。

3.3 制限水位方式ダムの LTCR の考え方

日本の多目的ダムは制限水位方式のダムが多く含まれる。RESCON の貯水池のモデル化の考え方 (図-4) は、サーチャージ方式ダムで排砂を実行した場合の堆砂形状であり、流入土砂量の多い洪水期に水位を下げる制限水位方式の堆砂形状は図-10 に示されるように洪水期制限水位以上は堆砂が進みにくくなると考えられる。洪水期制限水位以上の土砂が堆積しない断面積を C とすると、制限水位方式ダムの LTCR の算出は式 (8) で表される。

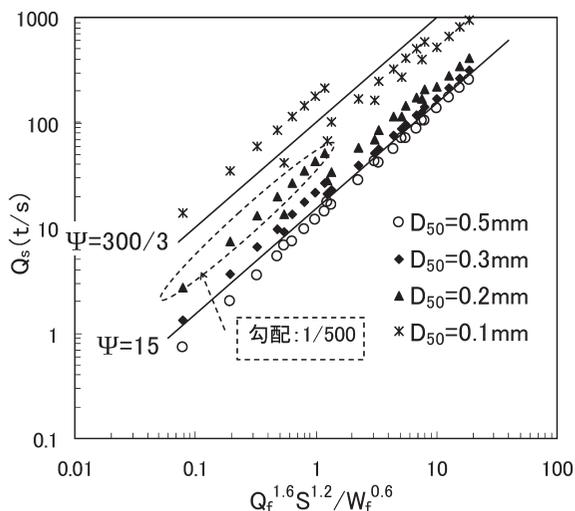


図-9 一般的な流砂量式から計算した Q_s と $(Q_f^{1.6}S^{1.2}/W_f^{0.6})$ との関係

$$LTCR = \frac{B+C}{A+B+C} \tag{8}$$

4. 日本の貯水池への適用と判定結果

4.1 対象ダムの選定と用いたデータ

3. 節で日本の貯水池に適用するために調整したモデルを用いて、日本の貯水池におけるフラッシング排砂の有効性について検討する。ここでは、角⁵⁾による既往の検討を参考に、検討対象モデルダムとして、CAP/MARを手がかりに日本の多目的ダムの中からバランスよく表-5に示すモデルダムを10ダム抽出した。ここで、CAPは総貯水池容量、MARは平均年間流入量、MASは平均年間土砂流入量である。さらに、CAP/MASは貯水池寿命の目安を表すもので、貯水池に流入する土砂量に関する指標である。また、CAP/MARは貯水池回転率の逆数で、貯水池の流況に関する指標でもある⁵⁾。今回対象としたのは、貯水容量(6.0~83.0 Mm³)、貯水池底幅(9.8~150.0 m)、河床勾配(1/590~1/34)、堆積土砂の粒径(中央粒径0.01 mm以下~2.0 mm以上)など、特徴が異なるダムである。

これら10ダムについてまとめた指標を図-11に示す。さらに、角⁵⁾によって導入された排砂可能条件式(9)を表す曲線を図-11に併示する。

$$\frac{CAP}{MAS} > \frac{CAP/MAR}{F_e(\beta - CAP/MAR)} \quad (9)$$

ただし、 F_e は排砂効率、 β は平均年間貯水池流入量に占める排砂使用水量の割合であり、文献に倣い $F_e =$

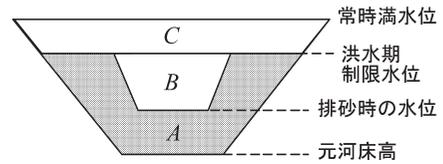


図-10 制限水位方式ダムのモデル断面図

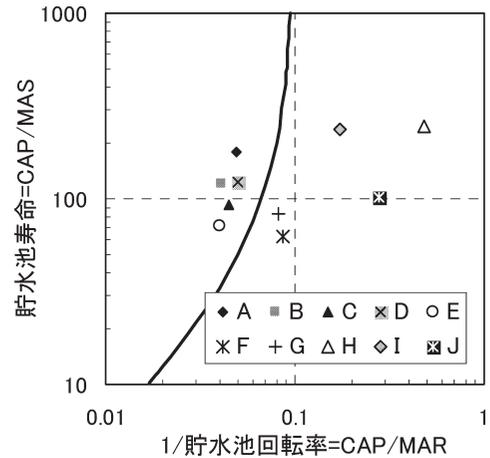


図-11 10ダムの貯水池回転率と貯水池寿命

0.02, $\beta = 0.1$ とした。この判定法では曲線より左側に位置するダムが排砂使用水量の観点から排砂可能となる。表-5の10ダムについて算出したSBRとLTCRの値と判定結果とを図-12、表-6に示す。グラフには判定基準である $SBR = 1$, $LTCR = 0.5$ を示す直線を併示している。これらの2直線の右上に位置するダムが排砂可能なダムである。

表-5 日本の10ダム(多目的ダム)の緒元

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
総貯水容量 (Mm ³)	54.3	47.1	43.0	6.0	12.7	7.4	34.3	83.0	26.9	58.0
貯水池延長 (m)	10,600	9,500	8,110	3,350	3,800	1,350	4,200	7,150	3,500	5,060
常時満水位 (洪水期制限水位) (m)	219.7	159.0	201.0	135.0	52.5	673.5	808.0	594.0	536.0	604.8
貯水池底面の代表幅 (m)	30.0	50.0	40.3	18.8	52.5	9.8	103.0	50.0	96.8	150.0
貯水池側面勾配の代表値	1.04	1.86	1.40	0.97	1.15	0.91	1.48	1.38	1.23	1.06
年間土砂流入量 (t)	321,252	410,016	478,908	54,468	118,908	119,832	600,000	355,040	124,200	732,413
堆積土砂のタイプ (中央粒径) (mm)	0.3	0.01	2.0以上	0.05	0.3	0.5	0.005	0.8	3	0.22
ダム直上流部分の河床高 (m)	154.0	135.0	137.0	114.0	20.8	614.0	757.2	506.0	460.0	534.6
排砂ゲートの標高 (m)	175.9	143.0	158.3	121.0	31.4	633.8	774.1	535.3	485.3	564.0
排砂流量 (m ³ /s)	462.0	162.3	201.8	18.3	99.1	20.7	92.9	55.8	53.1	63.4
CAP/MAS	179.8	121.7	91.98	123.3	71.75	62.8	83.67	247.73	235.8	101.9
CAP/MAR	0.049	0.041	0.045	0.05	0.04	0.086	0.082	0.48	0.173	0.279
排砂勾配	1/240	1/590	1/200	1/240	1/180	1/34	1/120	1/120	1/70	1/120
Ψ	15	650/3	15	650/3	15	15	650/3	15	15	15

CAP: 総貯水池容量, MAR: 平均年間流入量, MAS: 平均年間土砂流入量

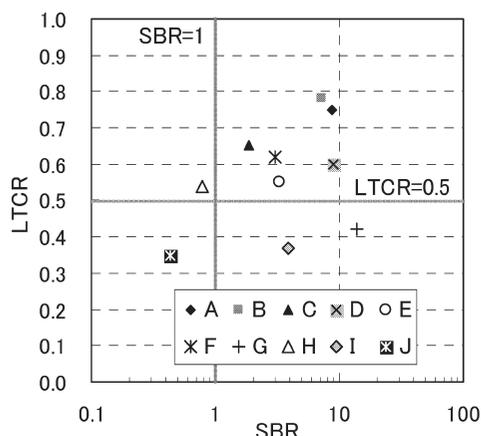


図-12 10ダムのSBRとLTCR

4.2 検討結果および考察

この結果から、10ダムのうち6ダムはフラッシング排砂が有効と判定された。LTCRが基準を満たさないダムG, I, Jは、流砂能力は十分であるが、排砂時に形成される水みち幅に対して貯水池幅が広いのでフラッシングによって十分な貯水容量を維持できないと考えられる。また、SBRが1以下のダムH, Jはダム規模に対してフラッシング流量が小さく、堆積土砂を十分に排砂できずフラッシングは効果的ではないと判定された。

ここで、このAtkinsonの指標による判定結果を角の排砂可能条件と比較してみる。図-11より角の判定手法ではダムF, G, H, I, Jが排砂不可能と判定されていることがわかる。両者の判定では、ダムFを除く9ダムが同じ判定結果となった。異なるアプローチにより導かれた2つの判定手法による結果が概略一致したことは興味深い。

この結果について、次のように解釈できる。LTCRは排砂ゲートの位置が決まっている場合は、貯水池幅に対する水みち幅に、言い換えれば、貯水池規模(CAP)に対するフラッシング排砂流量に左右される。

さらに、フラッシング流量は年間流入量(MAR)と関係があるので、LTCRはCAP/MARと関係があることがわかる。ダムG, I, Jはこのケースである。一方、SBRはフラッシング排砂流量に大きく依存するので、年間流入量(MAR)、さらにはCAP/MARと関連しているといえる。ダムHはこのケースである。これより、日本の貯水池は、比較的縦断勾配が大きく、幅が極端に広いものはないので、CAP/MARによってほぼフラッシング排砂の効果が決定される。ただし、ダムG, FのようなCAP/MARが0.1に近い場合は、貯水池地形によって微妙に判定が異なる。例えば、Atkinsonの指標でのみダムFが排砂導入可能と判定されたのは、ダムFはフラッシング流量が少ないが、勾配が急で、貯水池幅が狭い地形によるものである。

一方、CAP/MARが0.1より大きい場合に、角の判定手法では排砂不可と判定されるものの、Atkinsonの判定手法では排砂可能と判定される場合もでてくる。これは、Atkinsonの判定手法に角の判定手法にあるβ(排砂に使用可能な年間水量の上限)の概念がなく、フラッシング後の貯水位の回復が考慮されていないことによる。

4.3 感度分析

2.4.3項で仮定した入力値に関するルールがどれほど判定結果に影響を与えるかを感度分析を通して考察した。

1) 排砂ゲート高さ

ルール1では排砂ゲート高さを(1/3)Hとした(ただし、Hはダムの底高から制限水位までの高さである)。排砂ゲート高さは自然条件と異なり変更がしやすい要素である。SBRに影響を与える要因は、式(1)、(7)から排砂ゲート高さの変化による河床縦断勾配Sと水みち幅W_fの変化であり、排砂ゲート高さが低くなるほど河床縦断勾配は大きく、また、水みち幅は狭

表-6 10ダムのSBRとLTCRおよび判定結果

ダム	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
SBR	8.76	7.26	1.85	8.99	3.28	3.00	14.01	0.78	3.89	0.43
LTCR	0.75	0.78	0.65	0.60	0.55	0.62	0.42	0.54	0.37	0.35
判定	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×

SBR : sediment balance ratio, LTCR : long term capacity ratio

くなり、同じ排砂流量であっても流砂能力が大きくなる。ただし、式 (5) から求めた水みち幅が貯水池の幅に制約を受けないときは、水みち幅は排砂ゲート高さに関わらず一定で、河床縦断勾配のみに依存する。 $LTCR$ は排砂ゲート高さが下がるほど式 (3) の B の面積が大きくなり、 $LTCR=1$ に近づく。 $LTCR$ の増加率は式 (5) から求めた水みち幅が貯水池の幅に制約を受けるか否かで異なる。

貯水池の幅が十分に広いダム G と狭いダム A について、排砂ゲート高さを $0H$ から $(2/3)H$ まで変化させたときの SBR と $LTCR$ の変化と各ダムの横断面図と水みちとの関係を図-13 に示す。ダム G は、いずれの排砂ゲート高さでも水みちの発達に貯水池幅に制約されず、このような場合、 SBR および $LTCR$ はほぼ一定の割合で変化する。一方、水みちの発達が貯水池幅に制約を受けるダム A では、 SBR は河床縦断勾配と水みち幅の影響を受けるので、ダム G より大きく変化する。これに対して、図-13 の横断面図からも推測できるように $LTCR$ の変化は小さくなる。

排砂ゲートをダム底部に設けた場合 ($0H$) と $(2/3)H$ の高さに設けた場合の SBR と $LTCR$ を計算した結果を図-14 に示す。排砂ゲートを底部に設けた場合は、ダム J を除く 9 ダムで排砂可能と判定された。一方、排砂ゲート位置を $(2/3)H$ とした場合は、ダム A、B のみ排砂可能と判定された。ただし、Atkinson の判定指標は角の判定指標に含まれる β の概念がない

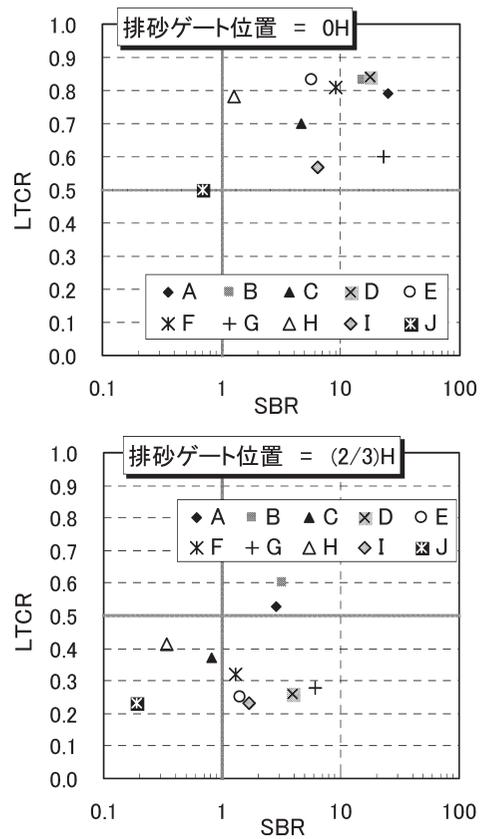


図-14 排砂ゲートを底部に設置した場合 (上) と $(2/3)H$ に設置した場合 (下) の SBR と $LTCR$

ので図-14 のような結果となったが、水位を最大限低下させフラッシング効率を上げたとしても、排砂後に水位を回復するだけの流入量がないダムでは、フラッシング排砂は導入できない。

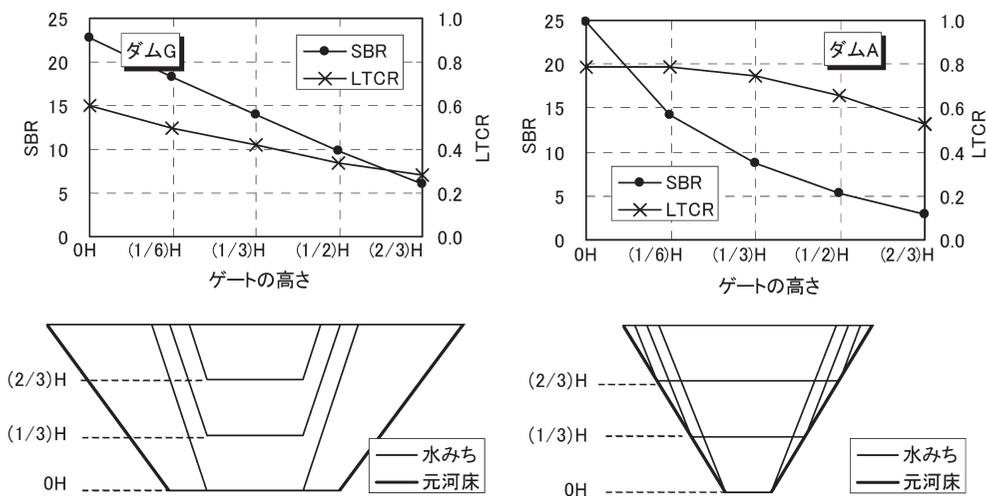


図-13 ダム G とダム A の排砂ゲート高さと SBR 、 $LTCR$ との関係 (上), および横断面図と水みちとの関係 (下)

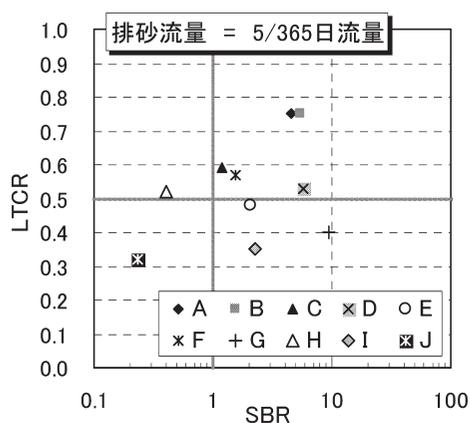


図-15 排砂流量が5/365日流量の場合のSBRとLTCR

2) フラッシング排砂流量

フラッシング排砂を行うのに、どれほどの流量が使用可能であるかは、ダムの目的や流入量変動特性などによって異なる。ルール2では3/365日流量に設定したが、少し危険側の5/365日流量に変更して判定を行った結果を図-15に示す。なお、5/365日の生起確率は約95%で、ほぼ毎年確保できる流量である。排砂流量を5/365日流量とした場合、10ダムとも流量が3/365日流量に比べ約2/3倍になった。SBRは式(1)、(7)より排砂流量の約1.6乗、LTCRは式(3)、(5)より排砂流量の約0.5乗に比例すると考えられる。したがって、SBRは $(2/3)^{1.6}$ ≈約1/2倍に、LTCRは $(2/3)^{0.5}$ ≈約5/6倍になった。これより、フラッシング排砂流量が変化すると、LTCRはほとんど変わらないが、SBRは大きく変化することがわかった。とくに、SBRが1に近いダムでは、フラッシング流量の設定が判定に影響を与えることになる。

3) ダムサイトを代表断面とすることの妥当性

対象10ダムのうちの3ダムについて、200mピッチの貯水池内横断面図を用いて、ダムサイトを代表断面とした場合とダムサイト付近で幅が最大となる断面を代表断面とした場合のSBRとLTCRとを比較した。その結果から、代表断面が変わったことではSBRは変化せず、LTCRもその差は0.02~0.05と両者に与える影響は小さいことを確認した。これより、貯水池の平面形状が極端に変化するような貯水池を除いては、便宜的にダムサイトを代表断面に選んでも差し支えないといえる。

4) 水みち幅の評価

水みち幅を推定するレジーム則の係数 α を大きくすると、水みち幅の発達が河床幅に制限されない限り、水みち幅 W_f が大きくなる。その結果、図-4から明らかなようにLTCRは増大し、式(7)より排砂流量が減少することによりSBRは小さくなる。

今回対象とした10ダムについて、 α を5~7の範囲で変化させSBRとLTCRを算出したところ、ダムによってSBRは約20%、またLTCRは約10%増減したが、ダムEを除き判定に影響を与えなかった。 α の設定については今後も継続して検討すべき課題であるが、 $\alpha=6$ と仮定することでも、一応の評価は可能であると考えられる。

5. おわりに

本研究では、土砂管理計画の比較検討ツールとして世界銀行が開発したRESCONモデルを紹介し、その中のフラッシング排砂導入可能性の判定指標であるSBRおよびLTCRの日本の貯水池への適用性について検討した。さらに、国内の実際のダムのデータを用いて考察を行った。得られた主要な結論は以下のとおりである。

- ① RESCONモデルにおいて用いられる水みち幅およびフラッシング排砂量の推定式は、規模が大きく勾配が非常に緩やかな中国における実測値などに基づいて係数が定められており、日本の貯水池にそのまま適用させることが困難であることが明らかとなった。そこで、国内のダムの排砂実績値や既往の研究をもとに新たに適用可能な係数を定めた。
- ② 国内の多目的ダム10ダムについて判定を行った結果、半数以上のダムでフラッシング排砂の導入可能性が高いことが確認され、また、有効でない貯水池についてはその原因を容易に把握することができた。また感度分析より、フラッシング排砂流量や貯水池代表断面の設定に比べて、排砂ゲート高さの設定が重要であり、今回、排砂が効果的でないと判定されたダムも、排砂ゲート高さを下げることで排砂が効果的になり得ること、既存の放流ゲートの高さでは排砂を行うには不十分である

ことがわかった。その場合には、既設ダムの堤体開削や地山へのトンネル構造での排砂ゲートの新設技術を開発していく必要がある。

今回の検討で使用した水みち幅およびフラッシング排砂量に関する実績値は限定的なものであり、今後、黒部川宇奈月ダムの排砂実績などを加えて推定式の精度向上を図る必要がある。一方、ダム条件を与えることにより、フラッシング排砂の導入可能性を判定することが可能であることが示されたが、今後、検討ダム数を増やし、黒部川の連携排砂に続くフラッシング排砂ダムの実現に向けて、ダム特性などとの関係についてさらに検討を進める必要がある。

また、今回は検討対象としなかったが、環境影響評価の導入は必須であり、例えば、環境制限として下流に放流可能な土砂濃度の上限を設定して、それを満たすための排砂条件を具体的に制約条件として組み込めば、環境に適合する形で排砂手法を選択することができるものと考えられる。また、排砂時の堆積土砂の侵食形態の予測も重要であり、側岸侵食に関する式(4)に代わる精度のよい概算式を検討する必要がある。現

在、出し平ダム、宇奈月ダムにおいて堆積土砂の侵食過程に関する調査を実施しており、今後報告していく予定である。

参考文献

- 1) 流域一貫の土砂管理 (貯水池土砂管理に向けた挑戦) セッション運営ワーキンググループ：第3回世界水フォーラム 流域一貫の土砂管理 (貯水池土砂管理に向けた挑戦) セッション報告書, pp. 103-118, 2003
- 2) The World Bank: Reservoir Conservation Volume I. The RESCON Approach, 2003
- 3) Atkinson, E.: The feasibility of flushing sediment from reservoir, HR Wallingford Report OD137, 1996
- 4) Morris, G. and Fan, J.: *Reservoir Sedimentation Handbook*, McGraw-Hill, 15.36, 1997
- 5) 角 哲也：ダム貯水池のフラッシング排砂における排砂効率, *ダム工学*, **10**, 211-221, 2000
- 6) 例えば, 土木学会：水理公式集, 平成11年度版, pp. 163-167, 2000

(2004年8月13日受理)

The reservoir storage loss caused by sedimentation is critical problem for those reservoirs which are expected to provide water resources and flood control. Hence, it is getting more important to promote sustainable sedimentation management in the near future. In this paper, RESCON model developed by the World Bank is introduced and the technical feasibility assessment of flushing used in the model is studied in order to apply it to reservoirs in Japan. After this assessment applying to several reservoirs in Japan, it is discussed that what is the points for successful flushing.

Key words: reservoir sedimentation management, sediment flushing, RESCON model