

◆特集：砂防・河川・海岸における土砂管理の取り組み◆

## 堆砂対策によるダムからの土砂供給特性について

櫻井寿之\* 箱石憲昭\*\*

### 1. はじめに

将来に亘るダム機能の維持、ダム下流の土砂環境の改善および流域一貫した土砂管理の観点から、ダム貯水池内への流入土砂を下流河道に供給することが求められている。また最近では、ダムからの土砂供給による影響について、下流河道の河床を構成している材料（礫、砂、シルト・粘土）に着目して、供給される土砂の質（粒径や供給するタイミング）との関係を適切に評価する必要性が指摘されている。

しかしながら、土砂を経済的に供給するためには、貯水池の水位差や流水のエネルギーを利用することが不可欠であり、その場合、貯水池の機能を発揮するための貯水位運用や流入量の条件により、制御できる内容や範囲はある程度限定される。

そこで、本稿では、ダムからの土砂供給の下流河道への影響を検討する上での参考となる知見を提供するために、代表的な堆砂対策手法（土砂供給手法）である、土砂バイパス、土砂フラッシングおよび流水型治水専用ダムについて、粒径別の土砂供給の特性を考察した内容を報告する。

### 2. 土砂バイパスの土砂供給特性

土砂バイパスは、貯水池上流に分流施設を設置し、流量の多い出水時に、分流施設からダム下流までの水路（多くの場合トンネル水路）を通じて流水とともに土砂をバイパスする手法であり、基本的に流入土砂量に近似した土砂供給となる。

図-1は、出水中の分流堰の水位変化が比較的小さく、分流堰敷高とバイパス水路流入部の敷高の差が小さい場合を想定して示したものである。この場合、下流へ供給される土砂量は、概ね流入土砂量にバイパスされる流量比を掛けた量となる。

出水中の分流堰上流の水位変化が大きい場合には、水位上昇（流入水量増加）時の捕捉、低下（減少）時の排出現象が顕著になり、土砂供給特性が土砂フラッシングのそれに近づくようになる。また、バイパス水量と土砂量の関係は、分流施設敷高とバイパス水路流入部敷高の差等の施設形状の影響を受け<sup>1)</sup>、これら水位変化や施設形状の影響は、浮遊砂や掃流砂において顕著である。

### 3. 土砂フラッシング及び流水型治水専用ダムの土砂供給特性

洪水末期に貯水位を低下させる土砂フラッシングは、流入土砂量と比較して洪水末期に集中して土砂供給される特徴をもつ。大量の土砂供給は、フラッシング施設上流側の堆砂面上の勾配が大きいことにより生じ、土砂フラッシングで供給された土砂は、当該洪水の期間内ではダム直下流に堆積する傾向を示すことになる。また、近年計画されるようになってきている、河床付近に放流設備をもつ流水型の治水専用ダムでは、土砂供給のメカニズムはフラッシングと似ているが、洪水初期で貯水位上昇が小さい場合にも掃流力に応じた粒径の土砂供給が生じることになる。

このような、貯水池内の掃流力を高めて、貯水

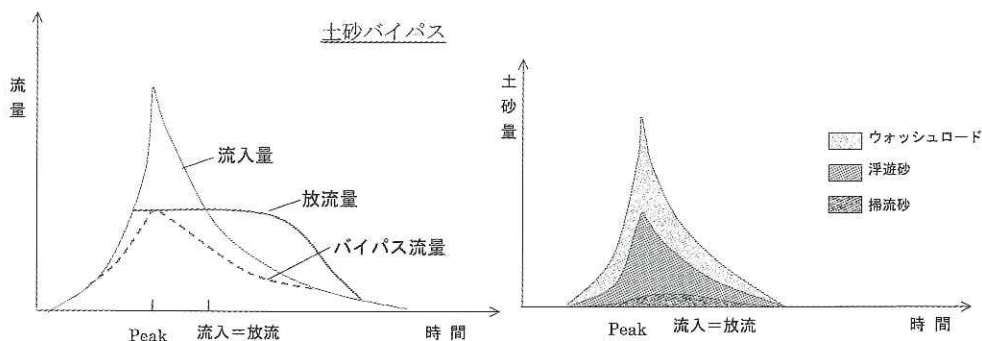


図-1 土砂バイパスの供給土砂特性

Characteristics of Sediment Supply from Dam Reservoir by Countermeasures for Sedimentation

池から直接土砂供給する型式の手法の特徴については、貯水池の運用や洪水波形によって大きく影響を受けると考えられ、これらの一般的な特性を議論するために、数値シミュレーションモデルを用いて検討を実施した。

3.1 計算条件の設定

検討に用いる数値シミュレーションモデルは、混合粒径1次元河床変動モデルである<sup>2)</sup>。実際の典型的な貯水池における土砂フラッシング操作の計算を行うために設定した条件について述べる。

貯水池形状については、図-2に示すような台形断面を想定し、国土交通省関連の既設ダムを参考に、河床勾配を1/100として図-2中の表に示すような形状を設定した。

流入量については、洪水期が比較的明確な関東地方の二瀬ダムの波形を用いることとした。10年間の実際の流入量波形について、回転率が2となるように引き伸ばして計算条件として用いた。

対象とする粒径については、粘土から砂礫までを再現することを考慮して、0.005mm～25.4mmまでの表-1に示す9個の代表粒径を設定した。

粒径別の流入土砂量については、次式で与えることとした。

$$Q_{sj} = \alpha_j Q^{\beta_j} (Q > Q_c) \quad (1)$$

ここで、 $Q_{sj}$  : 粒径  $j$  の流砂量 ( $m^3/s$ )、 $Q$  : 流量 ( $m^3/s$ )、 $\alpha_j, \beta_j$  : 定数、 $Q_c$  : 土砂流入限界流量 ( $m^3/s$ ) (これ以下の流量では土砂は流入しないものとする) を表す。

パラメータの設定においては、供給土砂特性の特徴を把握しやすくするために、生産土砂が大きい条件を想定し、日本の貯水池の比堆砂量の実績値を参考に  $800m^3 / (年 \cdot km^2)$  程度を目安として設定した。設定値を表-1に示す。

$\beta_j$  に関しては、細粒成分の値については既往のダムの検討結果を参考に決定し、粗粒成分については既往堆砂実績の粒度分布における混合粒径の流砂量式の傾向を参考に決定した。土砂流入限界流量については、 $Q_c = 5m^3/s$  として、これ以下の流量の場合は計算負荷軽減のため期間を短縮した。

ダムでは、自然調節方式による洪水調節が行われることを想定し、ゲートレスの洪水吐きが1条とダム地点の初期河床標高 (EL.100mとする) を敷き高とする排砂設備が1条設置されていることとする。なお、洪水吐き、排砂設備ともに、出口の大きさは高さ4m、幅4mの正方形とした。

フラッシング操作については、排砂基準流量  $Q_0$  と排砂終了流量  $Q_1$  を設定し、出水の低減期に放流量が  $Q_0$  を下回った場合に排砂設備からの放流

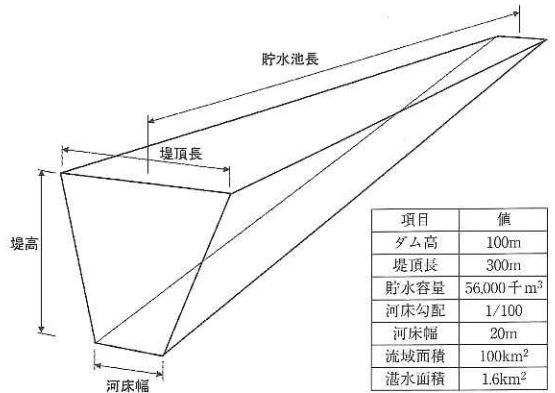


図-2 貯水池形状

表-1 粒径区分と流入土砂量パラメータ

分類	粒径No.	粒径区分(mm)	代表粒径(mm)	$\alpha_j (\times 10^{-7})$	$\beta_j$
礫	1	9.52～	25.4000	335.23	1.10
	2	2～9.52	4.3630	1,340.92	1.10
砂	3	0.84～2	1.2960	293.05	1.40
	4	0.25～0.84	0.4580	35.11	2.00
	5	0.075～0.25	0.1370	32.61	2.00
シルト	6	0.0339～0.075	0.0504	5.72	2.30
	7	0.0129～0.0339	0.0209	7.99	2.30
	8	0.005～0.0129	0.0080	16.83	2.30
粘土	9	～0.005	0.0050	145.29	2.30

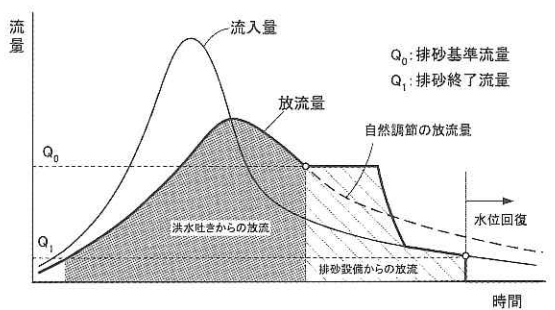


図-3 フラッシング排砂操作の概要

表-2 計算条件

項目	単位	値
計算時間刻み	sec	1～3
流下方向の空間刻み幅	m	100
流下方向の空間メッシュ数	個	111
横断面の鉛直方向分割厚さ	m	0.5
横断面の鉛直方向分割数	個	200
交換層厚	m	0.05
マニングの粗度係数	$m^{-1/3} \cdot sec$	0.03
水の動粘性係数	$m^2/s$	0.000001
水の密度	$kg/m^3$	1,000
土粒子密度	$kg/m^3$	2,650
空隙率(間隙率)	-	0.4

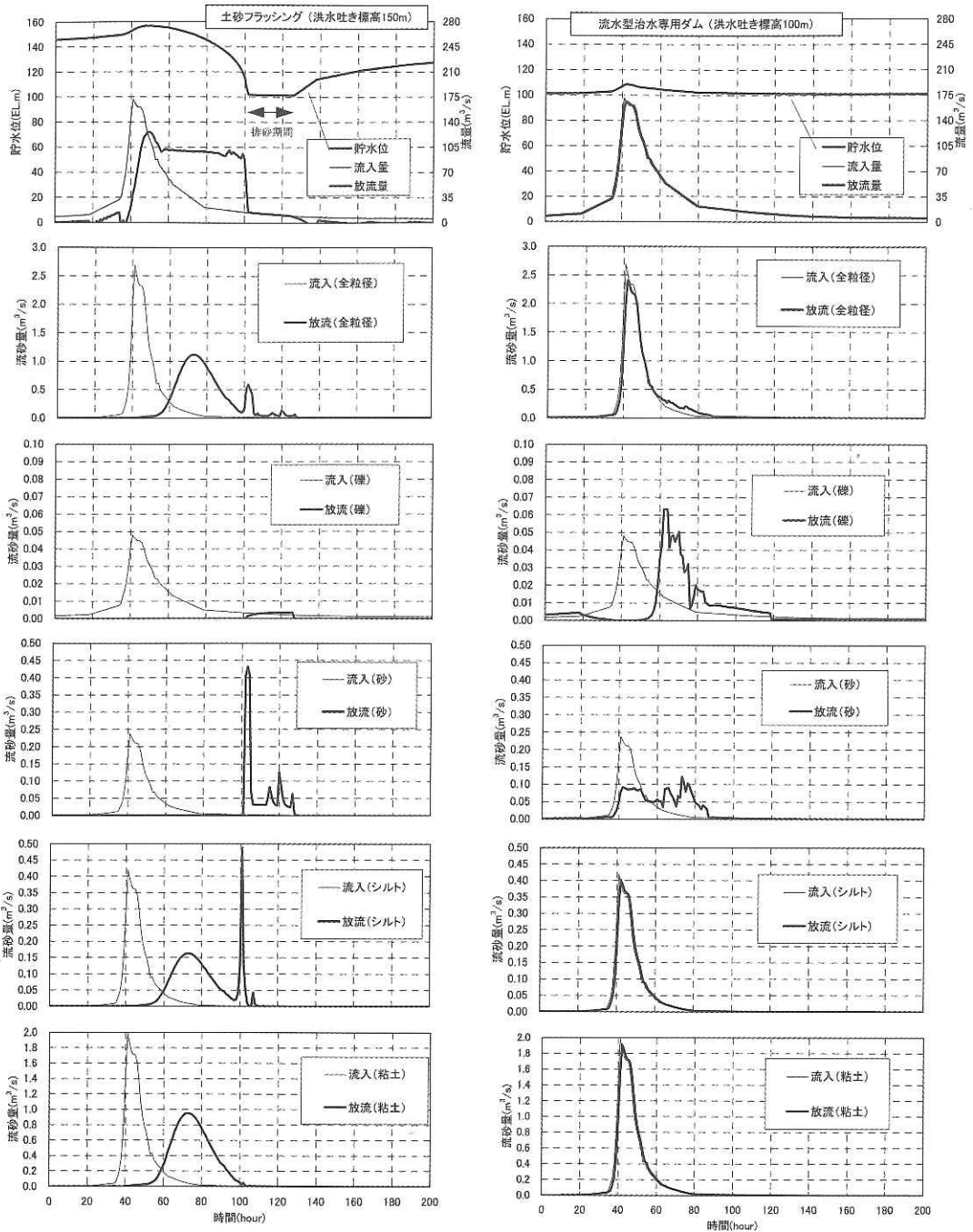


図-4 流砂量の計算結果

を開始し、流入量が $Q_1$ を下回った時点で終了するという操作ルールを設定した。なお、排砂設備からの放流量は放流能力が $Q_0$ を超える場合は $Q_0$ とし、超えない場合は放流能力の放流量とした(図-3参照)。排砂基準流量としては、年1、2回程度排砂が実施できる流量として、 $100\text{m}^3/\text{s}$ とし、排砂終了流量は、 $10\text{m}^3/\text{s}$ に設定した。

土砂フラッシングの検討を行う場合の洪水吐き標高はEL.150mとし、流水型治水専用ダムの検討を行う場合は河床と同じEL.100mとした。その他の計算条件を表-2に示す。

### 3.2 計算結果

下流への供給土砂特性について、ある一つの出水時の流砂量を図-4に示す。

放流土砂量の計算結果には、特に粗い粒径に振動がみられる。この原因は不定流計算の特性によるものと推察されるが、今後詳細に検討したい。

土砂フラッシングのケースでは、洪水調節を行っている洪水吐きからの放流量が排砂基準流量の100m<sup>3</sup>/sを下回った段階で、排砂設備による水位低下が始まり、出水のピークから60時間後に水位低下が完了して排砂が実施され、ピーク後約90時間後に流入量が排砂終了流量10m<sup>3</sup>/sを下回った時点で排砂設備からの放流が終了し、水位の回復が始まっている。

全粒径の流砂量をみると、放流土砂量の波形は流入土砂量の波形と比較して、ピークが30時間ほど遅れており、波形もなだらかになっている。また、水位低下が完了した時点で放流土砂量の一時的な増加が認められる。

粒径区分別にみると、礫では、排砂期間中以外には放流は生じず、排砂期間中も、流量が小さいため、流入土砂量の6.5%程度の土砂放流に留まっており、大部分は貯水池に捕捉されている。砂については、礫と同様に、排砂期間中のみ放流が生じているが、水位低下完了直後に流入土砂量のピークを超える大きな放流土砂量が生じており、流入土砂量の67.5%と比較的多くの量が放流されている。シルトについては、出水のピーク時にはほとんど土砂は放流されず、水位低下中に、なだらかなピークをもって放流されている。また、砂同様に水位低下完了直後に放流土砂量の大きなピークが生じており、洪水調節中に一旦貯水池内に沈降堆積した土砂が、水位低下後に再浮上しているものと考えられる。粘土については、水位低下完了直後に目立ったピークがみられない点を除いてシルトと同様な傾向である。

流水型治水専用ダムの場合、今回検討した出水では、若干の水位変動が生じているのみで放流量はほぼ流入量と等しい。全粒径の流砂量をみると、流入量のピーク時に若干放流土砂量が流入土砂量よりも小さく、洪水の末期に、放流土砂量の方が大きくなっているが、放流土砂量の変化は流入土砂量の変化に近い。

粒径区分別にみると、礫では、放流土砂量が流入土砂量と比べて大きく遅れた波形になっており、水位が若干でも高くなっている期間には下流へ放流されず、水位が下がってきた時点で、一気に流下している。砂では、ピーク時の放流土砂量は流入土砂量の半分程度であり、末期には流入土砂量を上回る放流土砂量が生じている。シルト、粘土については、流入土砂量に等しい放流土砂量となっており、ほぼ浮遊状態で貯水池内を通過しているものと考えられる。全ての粒径区分別で、流入土砂

とほぼ同じ量の土砂が放流されている。

土砂フラッシングの場合は、水位低下が必要となり、全粒径で放流土砂は流入土砂の波形から遅れて流出し、粗粒分は水位低下が完了するまで流出しない。シルト、砂の成分については、洪水調節中に貯水池内に沈降堆積した土砂量が、水位低下完了後に、侵食されて流出することにより、水位低下完了直後に大きな放流土砂量のピークを生じる。一方、流水型治水専用ダムでは、貯水位が低く、放流量の変化が流入量の変化と近い場合には、細粒分（シルト、粘土）の放流土砂量は流入土砂量に近い変化を示し、粗粒分（礫、砂）については、流入土砂量の波形から遅れて流出し、その遅れは粒径が大きいほど大きくなる。

#### 4. まとめ

代表的なダムからの土砂供給手法について、粒径別の土砂供給の特性を示した。土砂バイパスでは分流施設と分流量の条件によっては、流入土砂量と異なった土砂供給となる可能性がある。土砂フラッシングでは、土砂供給が流入土砂の波形から遅れることになり、粒径が大きいほど遅れと量の減少が大きい。また、流水型治水専用ダムでは、フラッシングよりは、そうした遅れは小さくなるが、大きな粒径の遅れは生じる。下流河道への影響を検討する場合に、このような土砂供給特性を考慮に入れる必要がある。

また、近年、従来の手法と比べて放流土砂の質と量を制御しやすい土砂吸引や下流への仮置き等の供給手法も開発・試験等がされつつあり、このような手法に関する研究の進展が望まれる。

#### 参考文献

- 1) 柏井条介、角 哲也、本田敏也：土砂バイパス施設分派部の水理的検討、大ダム、No.164, pp.25-33, 1998.7
- 2) 櫻井寿之、鎌田昌行、柏井条介、鈴木伴征：混合粒径河床変動モデルによる貯水池堆砂・排砂現象の再現、ダム工学、Vol.16, No.1, pp.30-40, 2006.3

櫻井寿之\*



独立行政法人土木研究所  
つくば中央研究所水工研  
究グループ河川・ダム水  
理チーム主任研究員  
Toshiyuki SAKURAI

箱石憲昭\*\*



独立行政法人土木研究所  
つくば中央研究所水工研  
究グループ河川・ダム水  
理チーム首席研究員  
Noriaki HAKOISHI