

# 管理ダムにおける堆砂実績と計画堆砂量 に関する一考察

## CONSIDERATION TO SEDIMENT MANAGEMENT OF EXISTING DAM

澤田 尚<sup>1</sup>・吉永 寿幸<sup>2</sup>・能塚 孝<sup>3</sup>

Hisashi SAWADA, Hisayuki YOSHINAGA and Takashi NOTSUKA

<sup>1</sup>西日本技術開発(株)河川部 (〒810-0041 福岡市中央区渡辺通 1-1-1)

E-mail:h-sawada@wjec.co.jp

<sup>2</sup>西日本技術開発(株)河川部 (〒810-0041 福岡市中央区渡辺通 1-1-1)

E-mail:h-yoshinaga@wjec.co.jp

<sup>3</sup>西日本技術開発(株)河川部 (〒810-0041 福岡市中央区渡辺通 1-1-1)

*Key Words: sediment, sediment management, existing dam, dead storage, active storage capacity*

### 1. はじめに

川は、水を流すだけでなく、土砂も押し流している。普段の澄んだ流れでは流れる土砂の量も極微々たるものであるが、洪水時には濁流となり、さらに、河床のレキも動かされる。ダムで川を堰き止めるとこれらの土砂のほとんどは、貯水池内に貯まることとなる。

ダムの設計計画では、通常、貯水池内に流入する100年間程度の土砂量を予測し堆砂容量(無効容量)として確保している<sup>1)</sup>。堆砂は、貯水池の上流端付近からはじまり、堤体に向かって進行するのが一般的である。

我が国は、近年急速な高齢化が進行しており、社会資本への投資余力が減少してきていること、近年の自然環境保全に対する社会的要望の高まりなどから、貴重な社会資本ストックである既設ダムを将来の治水利水需要に対応することまで考慮するなど効率的に利用することが求められている。

一方、既存管理ダムの報告によると、想定した堆積土砂量よりも多くの土砂が流入し、将来、ダムの利水・治水容量を減少させ、ダム機能の低下が懸念されている。逆に、流入土砂量を低減することが可能となれば、既存の堆砂容量で設計計画年以上の既存の社会資本ストックの有効利用となる。

このような背景から、近年、管理ダムにおける土砂管理は非常に重要視される内容となっているものの、実際

のダムにおける堆砂は、その地域における地質特性や気象条件に影響され、堆砂の進行や流入土砂量の実績などを整理・評価した研究が少ないのも実情である。

本研究では、流域地質が堆積岩地域の既存の管理ダム(竣工後30年)において、入手した堆砂の進行、堆砂実績をもとに、計画比堆砂量を検証し、堆砂容量の確認・評価を行った。

### 2. 実績堆砂形状の整理

#### (1) 典型的な堆砂形状

典型的な堆砂の縦断形状は、図-1に示されるとおり、上流から①頂部堆積層、②前部堆積層、③底部堆積層、④密度流堆積層の4部の堆積層により形成され、我が国各地の貯水池における堆砂形状は、I~IV型の基本形に分類される<sup>2)</sup>。

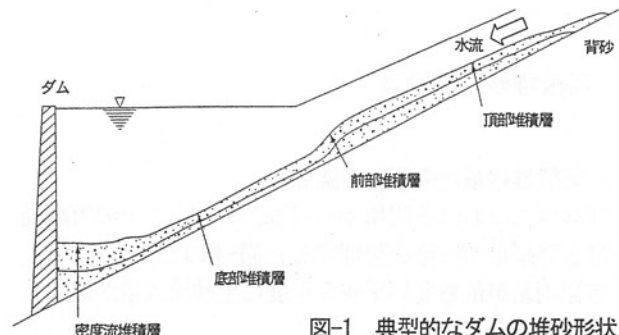


図-1 典型的なダムの堆砂形状

それぞれの特徴を以下に列挙する(図-2 参照)。

- ① I型: 掃流砂, 浮遊砂とも相当量流入する場合で, 図-1 に示した典型的な堆砂形状における各構成部が比較的明瞭にみられる。デルタの肩は, 常時満水位の位置付近に形成される。
- ② II型: 流入土砂のほとんどが微細な浮遊砂の場合に形成されるもので, 直上流に大規模な貯水池がある場合, あるいは, 貯水池上流に緩勾配区間があり掃流砂の流入が少ないような場合に多い。
- ③ III型: 浮遊砂の供給源が少ない流域で, かつ, 堆砂の比較的初期の段階において現れる形状である。
- ④ IV型: 規模の小さい貯水池でダム付近まで著しく土砂が堆積している場合に見られる形状である。

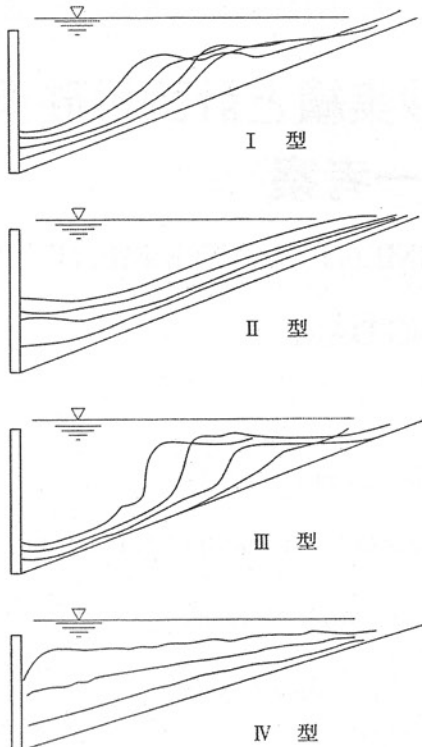


図-2 堆砂形状の基本分類

## (2) 管理ダムの堆砂形状

ダム運用開始後, 30年間に測量した管理ダムの堆砂の縦断形状の推移を図-3に示す。図内には, ダム建設前の元河床と代表年として昭和56, 59, 平成2, 8, 15年の計5年分を記載した。

当ダムの堆砂形状は, 典型的な堆砂形状における各構成部が比較的明瞭にみられ, デルタの肩が常時満水位の位置付近に形成されている。よって, 前項(1)に示した堆砂形状の基本分類は, I型に分類される。なお, 当ダムの流入土砂は, 現地調査結果および流域地質などから60%程度以上が砂・礫と推測される。

一方, デルタの肩より上流側の堆砂は, 河床勾配の1/2程度で, 経年に伴いダム堤体に近づいていることが確認できる。

## 3. 実績堆砂量の整理

### (1) 実績堆砂量と降雨量の関係

管理ダムにおける昭和49~平成15年度までの実績堆砂量と降雨量の推移を整理すると図-4のとおりとなる。年総雨量が最も多い平成5年度に土砂流入量が最大と

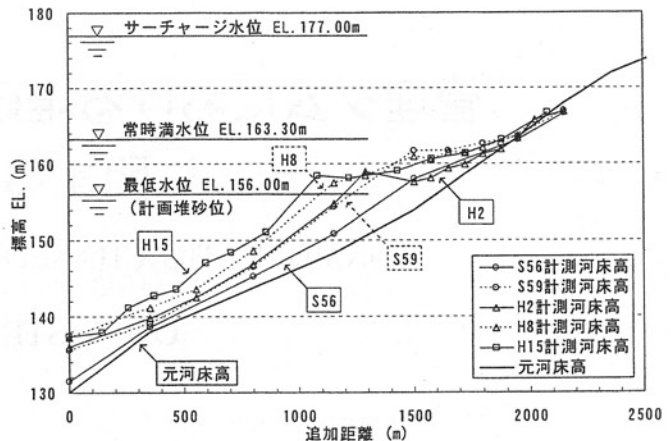


図-3 管理ダムにおける元河床と貯水池内の堆砂縦断形状の推移

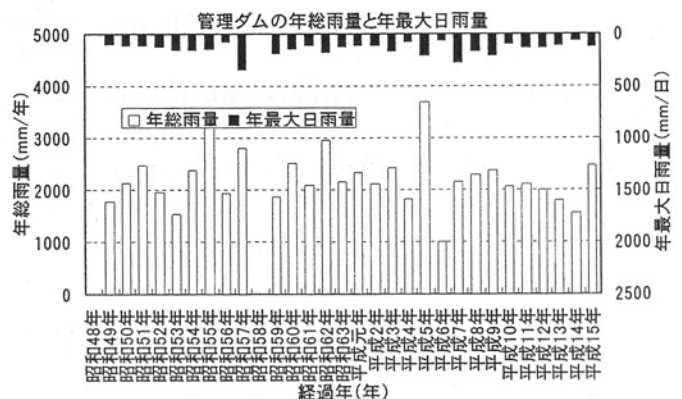


図-4 管理ダムの降雨量と実績堆砂量の推移

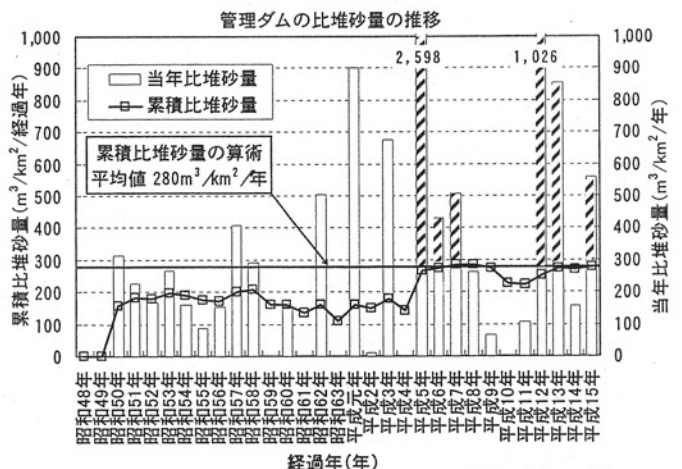


図-5 管理ダムの実績堆砂量と比堆砂量の推移

なっていることが確認できるものの、他年においては、年最大日雨量を含め、流入土砂量と雨量に明瞭な相関が確認できない。

### (2) 実績比堆砂量（算術平均値）の評価

図-4 の実績堆砂量の推移をもとに、比堆砂量を算定すると  $280\text{m}^3/\text{km}^2/\text{年}$  となる。また、実績堆砂量と比堆砂量の推移を図-5 に示し、分析結果を以下に整理する。

- ① ダム流域内で土砂の流入を促進するような災害が発生していないものの、当年比堆砂量と累積比堆砂量は、安定せずに概ね増加傾向にある。
- ② 年総雨量および年最大日雨量は、 $1,500\text{mm}/\text{年}$ 、 $150\text{mm}/\text{日}$ 程度で推移し、平均的な降雨状況にある（図-4 参照）。
- ③ 全 30 年間のデータにおいて、平成 3 年の台風により風倒木が生じ、近傍ダムにおいても土砂発生量が多かった平成 5 年を境に分類すると、実績比堆砂量の算術平均値（ $=280\text{m}^3/\text{km}^2/\text{年}$ ）を超過する発生頻度は、昭和 48～平成 4 年が 33%（ $=6/18$ ；白抜き）、平成 5～15 年が 55%（ $=6/11$ ；ハッチング）となり、後者の方が超過する割合が 6 割程度多い。
- ④ さらに、超過する当年規模は、昭和 48～平成 4 年の平均値が  $180\text{m}^3/\text{km}^2/\text{年}$ 、最大値  $900\text{m}^3/\text{km}^2/\text{年}$  に対し、平成 5～15 年の平均値が  $279\text{m}^3/\text{km}^2/\text{年}$ 、最大値  $2,600\text{m}^3/\text{km}^2/\text{年}$  と後者の方が大きい。

### (3) 堆砂量の増加原因

流域内に占める森林の割合は、土地利用基本計画図をもとに整理した表-1 に示すとおり、昭和 63 年度が 95%、平成 14 年度が 83% と流域内の大部分を占めている。参考までに、表-1 によると、森林地域の減少相当量は、裸地・荒廃地を含む農業地域の増加となっている。

この流域内の森林状況を確認すると、写真-1 に示すとおり、昭和 63 年度から平成 14 年度までの 15 年の経年変化として裸地化の拡大が確認できる。

また、写真資料の提示とともに実施した聞き取り調査によると、林業経営における採算性の悪化や農山村の過疎化などから、手入れが十分に行われない森林が増え、荒廃が進行するとともに、森林の働きの機能低下が懸念されているとのことであった。

一方、ダム運用開始後において、流入土砂量を著しく増加させるような災害の発生は確認されていない。さらに、降雨状況について、年総雨量および年最大日雨量は、 $1,500\text{mm}/\text{年}$ 、 $150\text{mm}/\text{日}$ 程度で推移し、概ね平均的な降雨状況にある。

以上から、堆砂量の増加原因は裸地化および森林の荒廃が主な原因と推定される。

### (4) 今後の見通し

土砂崩壊防止、水源涵養等の公益的機能を発揮させるために計画的に保安林の指定施策が進められているもの

表-1 氷川ダム流域の地域区分の推移

年度	都市地域	農業地域	森林地域	
			国有林	民有林
S63	0%	5%	95%	
			国有林	10% (100%)
			民有林	85% (35%)
H14	0%	17%	83%	
			国有林	10% (100%)
			民有林	73% (44%)

注) 国有林・民有林における()内の数値は、それぞれに対する保安林の割合を示す。

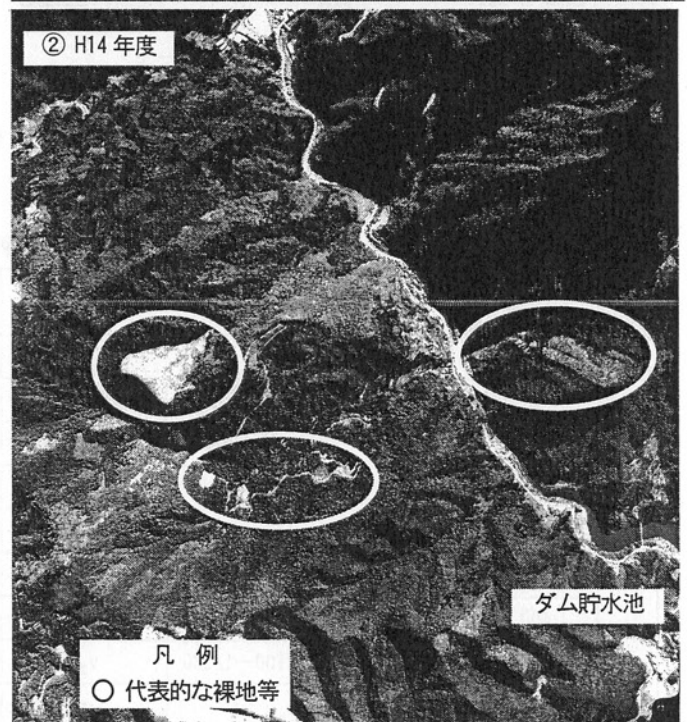
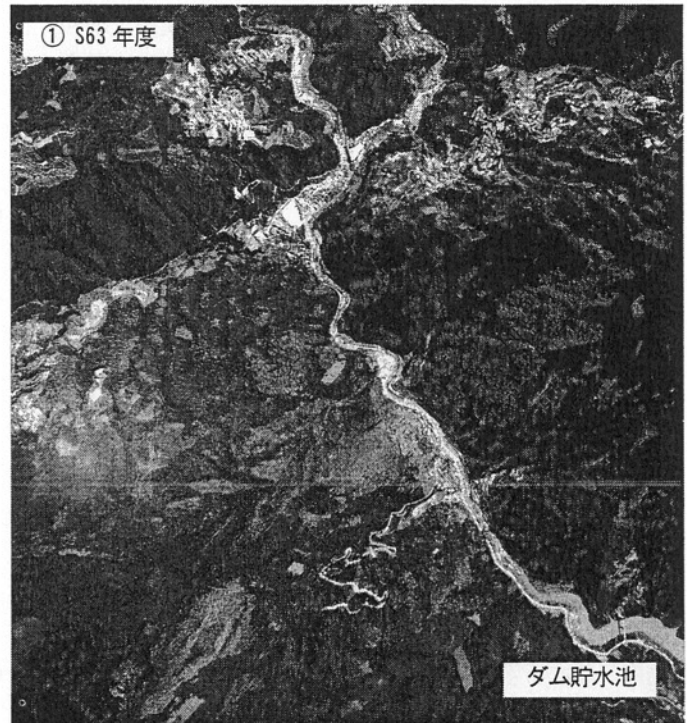


写真-1 代表的な流域の状況（貯水池末端～上流域）

の、表-1 のとおり、民有林における指定率は、昭和 63 年度の約 30% (=0.85×0.35) から平成 14 年度の約 32% (=0.73×0.44) と 15 年の期間で 2%の増加量と微増に留まっている。

すなわち、民有林における保安林未指定区域は、依然として 7 割程度であり、未指定地では十分な手入れが出来ていない状況にあると同時に、長引く林業の低迷から今後も林業離れが進行し、荒廃および裸地化の傾向は引き続き増加すると考えられる。

当ダムにおいて、土砂流入の増加が管理報告で行われているとおり、今後も、土砂流入量は増大する可能性が高いと推定される。よって、計画比堆砂量を実績比堆砂量 280m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/年から設定することは、将来の堆砂容量を過小評価する可能性が高いと考えられる。

#### 4. 計画堆砂量の算定

計画比堆砂量の算定方法には、前述した年堆砂実績を算術平均して求める方法以外に、年堆砂量実績の変動を確率評価して比堆砂量を求める算定方法等がある。

図-4 に示すとおり、年堆砂量は均等ではなく比較的に大きな変動を示し、かつ、算術平均値を超える頻度が近年に多いことから増加傾向にあるものと推測した（前章「3. (2)」参照）。

よって、現状の堆砂実績をより適切に把握するためには、年堆砂量実績の変動を確率評価することが必要と考えられ、水文統計ユーティリティを用いて年堆砂量を確率評価する手法（1,000 年期待値による方法）を適用した<sup>3), 4), 5)</sup>。

##### (1) 水文統計ユーティリティを用いた算定方法

###### ① 確率分布形

式(1)に示すプロットング・ポジション公式を用いて、対数確率紙に横軸；変量（年堆砂量）、縦軸；頻度（確率）

をプロットし、確率分布形を決定する。

なお、年堆砂量が 0m<sup>3</sup> 以下の場合、そのデータを棄却し、確率分布形は、水文統計ユーティリティに示される 12 種類の確率分布形から「岩井法」、「一般化極値分布」、「対数ピアソンⅢ型法 (LogP3)」の三つの分布形を選定し、最も適合度 (SLSC) が良い分布形 (SLSC が小さい値の分布形) を採用する。

$$F(v_i) = \frac{i - \alpha}{N + 1 - 2 \cdot \alpha} \text{----- (1)}$$

ここに、N；標本数、i；標本値（年堆砂量）を小さい順に並べたときの順位、v<sub>i</sub>；i 番目の標本値、F(v<sub>i</sub>)；v<sub>i</sub> のプロットング・ポジション(プロットする非超過確率)、α；0.4 (カナンの公式)

###### ② 年堆砂量期待値

確率分布を用いた場合の年平均堆砂量は、次の期待値として評価することができる。

計算方法の詳細は、表-2 に示すとおりである。

$$V_p = \int_0^{\infty} v \cdot f(v)dv \text{----- (2)}$$

$$= v_1 \cdot f(v_1) + v_2 \cdot f(v_2) + \dots + v_n \cdot f(v_n)$$

ここに、V<sub>p</sub>；確率分布を用いた場合の年平均堆砂量、v；年堆砂量、f(v)；年堆砂量の確率密度関数

###### ③ 確率年 1 の年堆砂量 (v<sub>1</sub>)

v<sub>1</sub>には、年堆砂量の最小値を与えても良いが、堆砂データの増加に伴い、最小値が変化する可能性がある。よって、v<sub>1</sub>=0 とする。

###### ④ 最大確率年 (T<sub>n</sub>) と 1,000 年期待値

ダムの堆砂容量は 100 年間であり、最大確率年には、

表-2 年堆砂量計算シート

No.	①確率年	②超過確率年	③区間確率	④確率年対応の年堆砂量	⑤区間平均年堆砂量	⑥区間年堆砂量期待値 ⑥=③×⑤	⑦年堆砂量期待値の合計
1	1	1	—	v <sub>1</sub>	—	—	
2	2	1/2	1-1/2	v <sub>2</sub>	(v <sub>1</sub> +v <sub>2</sub> )/2	Δv <sub>2</sub>	v <sub>2</sub> =Δv <sub>2</sub>
...	...	...	...	...	...	...	...
	10	1/10	1/9-1/10	v <sub>10</sub>	(v <sub>9</sub> +v <sub>10</sub> )/2	Δv <sub>10</sub>	v <sub>10</sub> =v <sub>9</sub> +Δv <sub>10</sub>
	20	1/20	1/10-1/20	v <sub>20</sub>	(v <sub>10</sub> +v <sub>20</sub> )/2	Δv <sub>20</sub>	v <sub>20</sub> =v <sub>10</sub> +Δv <sub>20</sub>
	...	...	...	...	...	...	...
	100	1/100	1/90-1/100	v <sub>100</sub>	(v <sub>90</sub> +v <sub>100</sub> )/2	Δv <sub>100</sub>	v <sub>100</sub> =v <sub>90</sub> +Δv <sub>100</sub>
	200	1/200	1/100-1/200	v <sub>200</sub>	(v <sub>100</sub> +v <sub>200</sub> )/2	Δv <sub>200</sub>	v <sub>200</sub> =v <sub>100</sub> +Δv <sub>200</sub>
n	T <sub>n</sub>	1/T <sub>n</sub>	1/T <sub>n-1</sub> -1/T <sub>n</sub>	v <sub>n</sub>	(v <sub>n-1</sub> +v <sub>n</sub> )/2	Δv <sub>n</sub>	v <sub>n</sub> =v <sub>n-1</sub> +Δv <sub>n</sub>

100年以上を視野に入れる必要がある。また、1万年、数十万年の確率を考えた場合、確率規模が大きく、堆砂の元となる流域の土砂生産機構そのものの変化が考えられ、このような流入土砂発生は異常状態とし、別途検討すべきと考えられる。よって、最大確率年は、1,000年とし、このときの年堆砂量を1,000年期待値と呼ぶ。

### (2) 実績堆砂量の確率処理

管理ダムの実績堆砂量の確率分布形は、参考文献<sup>3)</sup>に示される①岩井法、②一般化極値分布、③対数ピアソンⅢ型法(LogP3)の三つの分布形から、適合度が最も良い②一般化極値分布となる。

各確率分布形と確率分布形における適合度および一般化極値分布による年堆砂量期待値を図-6および表-3に示す。

よって、実績比堆砂量の確率処理結果による比堆砂量は、流域面積で除して以下のとおりとなる。

$$(\text{確率処理結果}) = 21,617/57.4 \div 377 (\text{m}^3/\text{km}^2/\text{年})$$

### (3) 1,000年期待値による比堆砂量

実績堆砂量の計測結果には、0以下の値が存在し、この値は確率分布に乗らないことが知られている。このため別途取り扱う必要がある。

発生原因には、主に、①貯水位低下や掘削・浚渫等による貯水池外への堆砂の移動、②測量上の誤差の要因が考えられる。前者①については、この量を流入土砂として加える必要があり、後者②についてはこれを取り除く必要がある。

当ダムにおける管理報告によると、後者②が原因と考えられる昭和49、59、61、63年度、平成4、10年度の計6年間に対象データがあり、その要因が言及できない。よって、前項(2)で算定した実績比堆砂量の確率処理結果を補正する。

補正方法は、真値に対して誤差の平均値が0になるものと考え、マイナス値を0として算定した確率処理結果からマイナス値の平均値を差し引きするものとする。

したがって、1,000年期待値による比堆砂量は、以下のとおり293m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/年となる。

$$(\text{1,000年期待値による比堆砂量}) \\ = 377 - 144,000/57.4/30 \div 293 (\text{m}^3/\text{km}^2/\text{年})$$

### (3) 推定式による比堆砂量算定

推定式とは、既設ダムの堆砂データを目的変数、流域特性(地形、地質、崩壊地面積率、降雨等)をパラメータとして回帰分析により求めた相関式である。

当ダムの条件を使用して、①田中による推定式、②吉良の方法、③石外による推定式の3手法<sup>5)</sup>で実施し

た比堆砂量の算定結果を表-3に示す。

算定の結果、概ね200~400m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/年にあることが確認できる。ただし、このような推定式の一番大きな問題点は、式の適用範囲が明確でないことにあるため、近年では、参考値として取り扱われる場合が多い<sup>4)</sup>。

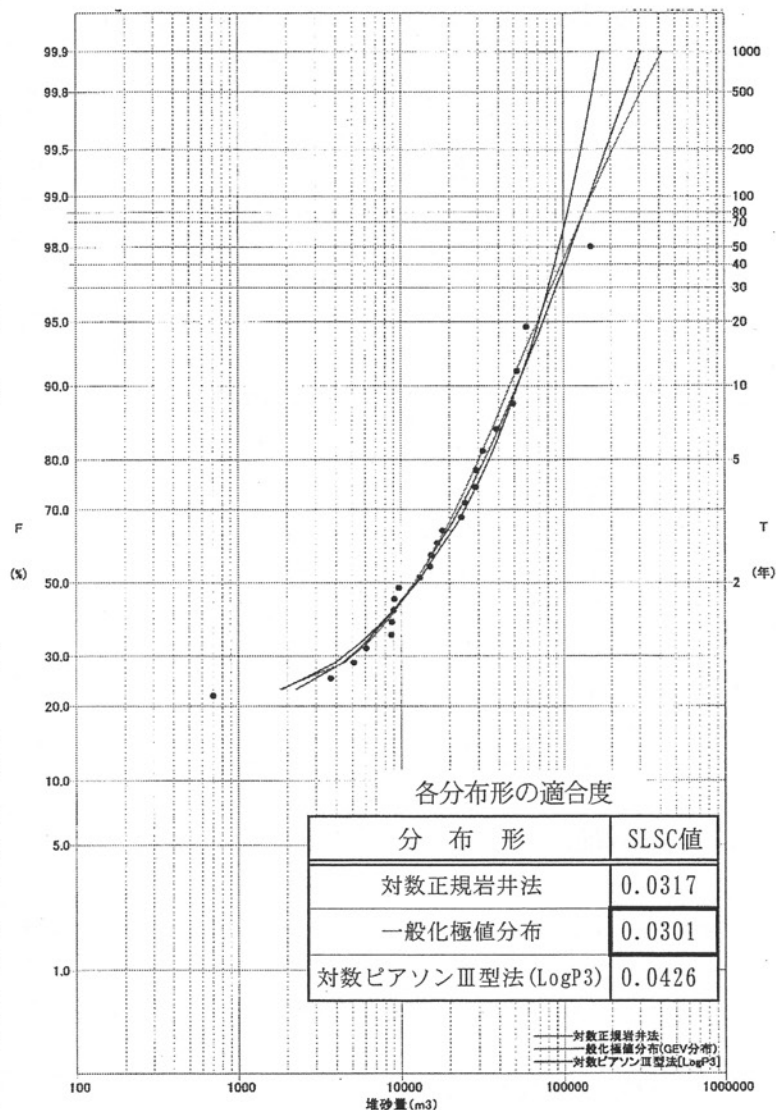


図-6 管理ダム実績堆砂量の確率分布形と適合度

表-3 一般化極値分布による年堆砂量期待値

確率年	確率		各年堆砂量 (m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> /年)		堆砂量 (m <sup>3</sup> /年) × 確率	
	超過確率	① 区間確率	確率年対応の年堆砂量	② 区間平均年堆砂量	区間年堆砂量期待値 ①×②	年堆砂量期待値の合計 Σ(①×②)
1	1.0000		0.00			
2	0.5000	0.5000	12233.89	6116.945	3058.473	3,058.473
3	0.3333	0.1667	19789.39	16011.610	2669.135	5,727.608
5	0.2000	0.1333	30042.38	24915.855	3321.283	9,048.891
10	0.1000	0.1000	46860.84	38451.610	3845.161	12,894.052
20	0.0500	0.0500	68645.81	57753.325	2887.666	15,781.718
30	0.0333	0.0167	84458.49	76552.150	1278.421	17,060.139
50	0.0200	0.0133	108475.99	96467.240	1283.014	18,343.153
80	0.0125	0.0075	135507.41	121991.700	914.938	19,258.091
100	0.0100	0.0025	150303.64	142905.525	357.264	19,615.355
200	0.0050	0.0050	206087.93	178195.785	890.979	20,506.334
300	0.0033	0.0017	247028.95	226558.440	385.149	20,891.483
500	0.0020	0.0013	309539.36	278284.155	361.769	21,253.252
1000	0.0010	0.0010	418836.62	364187.990	364.188	21,617.440

#### (4) 計画比堆砂量の決定

各手法で算定した比堆砂量の検討結果と当ダム建設当時の比堆砂量を表-3に示す。

当ダムの計画比堆砂量は、前述した①当年比堆砂量と累積比堆砂量が安定せずに概ね増加傾向にあること、②民有林の荒廃および裸地化が進行しているなどの現状を踏まえ、将来を想定すると、少なくとも実績堆砂量の算術平均値より大きい値となることが予想される。また、各算定手法により算定した結果は、概ね1,000年期待値程度の値が確認できる(表-3参照)。

したがって、当ダムの計画比堆砂量は、実績値および推定値を包括する300m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/年が妥当と判断し、この値を元にダムとして求められる100年間の堆砂容量を算定するものとする。

表-3 推定式による比堆砂量の算定結果

項目	比堆砂量 (m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> /年)	備考
建設当時の計画値	210	
実績値	実績比堆砂量	280
	1,000年期待値	293
推定式	田中による推定	190~410 中間値 300
	吉良の方法	290
	石外式による推定	130~320 中間値 225

#### 5. 今後の課題

管理ダムでは、建設当時の計画比堆砂量210m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/年から堆砂容量を決定している。しかしながら、前章までの評価のとおり、計画比堆砂量は、300m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/年が妥当であると考えられる。すなわち、以下に示すとおりダムとして求められる100年間の堆砂容量が建設当時の容量では不足することとなる。

$$\begin{aligned} (\text{建設当時の堆砂容量}) &= 210 \times 57.4 \times 100 \\ &= 1,200 (\text{千 m}^3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\text{見直した堆砂容量}) &= 300 \times 57.4 \times 100 \\ &= 1,722 (\text{千 m}^3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\text{建設当時と見直し値の差}) &= 1,722 - 1,200 \\ &= 522 (\text{千 m}^3) \end{aligned}$$

計画比堆砂量の見直し結果から、建設当時の堆砂容量では、500千m<sup>3</sup>程度不足する結果となった。

今後は、貴重な社会資本ストックである既設ダムを将来の治水利水需要に対応することまでを考慮するなど効率的な利用を目指し、排砂処理対策を検討・実施する必要があるとともに、排砂処理した土砂の有効活用方法などを検討する必要がある。

#### 6. おわりに

運用開始後30年が経過した管理ダムの実測堆砂測量結果から、貯水池内への流入土砂量を整理し、計画堆砂量の見直しを実施した。算定手法には、水文統計ユーティリティを用いて年堆砂量を確率評価する手法(1,000年期待値による方法)を採用した。

当管理ダムの管理報告に指摘があるとおり、建設時代に想定した流入土砂量よりも多くの土砂の流入が確認されている。その主な要因として、民有林の荒廃および裸地化が進行しているなどの現状を確認した。また、計画比堆砂量について、建設当時の計画値210m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/年から300m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/年に変更することが妥当と評価され、将来、ダムの利水・治水容量を減少させ、ダム機能の低下が懸念される結果となった。

現在、このような管理状況をもとに、効率的な既設ダムの利用を目指して、排砂処理対策<sup>9)</sup>を検討するとともに、排砂処理した土砂の有効活用方法などの検討を計画している。

一方、ダム堆砂量の算定は、通常、規定した河川断面における測量結果から断面法により求められている。このため実測精度に課題があり、近年、レーザーやソナーによる三次元測量が試みられ、その値と実施値の乖離が問題になっている。

本報告に使用したデータは、従来の断面法による結果であることから、今後、三次元測量の成果を踏まえた検討を行い、測量精度についても検証する必要がある。

謝辞：本報告資料の作成にあたっては、データ資料の提供だけでなく、評価におけるご助言を多数の方からいただいた。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) (財)ダム技術センター；平成17年版、多目的ダムの建設、第7巻、管理編、2005.6、p133
- 2) (財)ダム技術センター；平成17年版、多目的ダムの建設、第3巻、調査Ⅱ編、2005.6、pp212-214
- 3) 柏井条介；水文統計ユーティリティを用いた年堆砂量変動の確率評価、ダム技術、No.206、2003.11、pp32-42
- 4) 柏井条介、小堀久美子；年堆砂量変動の確率評価、ダム技術、No.196、2003.1、pp53-60
- 5) (財)ダム技術センター；平成17年版、多目的ダムの建設、第3巻、調査Ⅱ編、2005.6、pp202-212
- 6) (財)ダム技術センター；昭和62年版、多目的ダムの建設、第2巻、調査編、1987.11、pp55-70
- 7) 建設省河川局開発課；Q&A、補助ダムにおいて、貯砂ダムを計画する場合の留意点について、ダム技術、No.85、1993.10、pp149-152

(2006.5.19受付)