

# ダム水位低下運用と排砂バイパスを組合せた 水力発電用ダム調整池堆砂対策

SEDIMENT MANAGEMENT IN HYDROPOWER REGULATING RESERVOIR  
BY HYBRID METHOD OF DRAW-DOWN OPERATION AND SEDIMENT BYPASS

奥村 裕史<sup>1</sup>・角 哲也<sup>2</sup>  
Hirofumi OKUMURA, Tetsuya SUMI

<sup>1</sup>正会員 工修 電源開発株式会社 土木建築部 土木技術室 (〒104-8165 東京都中央区銀座6-15-1)

<sup>2</sup>正会員 博士(工) 京都大学防災研究所 水資源環境研究センター (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

Reservoir sedimentation is one of the most important problems for securing long term achievement of hydropower operation in the future. In order to solve the problem, we have to note that there are two major types of hydropower stations, which are storage type and regulating type. We have already discussed that we have to focus on sediment management in regulating type reservoirs more than storage type ones from the view point of flood disaster prevention in reservoir areas. In this paper, we studied on technical and economical feasibility of hybrid method of draw-down operation and sediment bypass by numerical analysis, and we found that the hybrid method was very advantageous in both ways. We also analyzed the impact of sediment supply to dam downstream river by sediment bypass and found that it was possible to keep the safety of the river channel by some effective excavation and that the improvement of the river environment would be expected.

**Key Words :** Reservoir sedimentation, Draw-down operation, Sediment bypass, Hybrid method

## 1. はじめに

既設水力発電設備を持続的に利用していくにあたり、最重要課題の1つはダム湖における堆砂対策である。著者らは既に、水力発電用ダム湖について貯水池と調整池とを区別して堆砂状況および堆砂問題の分析を行い、対策について検討を行ってきた<sup>1),2)</sup>。その結果、洪水被害リスク抑制の観点から調整池の堆砂対策を優先的に実施すべきことが分かり、さらに調整池を特性に応じて3つのタイプ(川タイプ、中間タイプ、池タイプ)に分け、それぞれにダム水位低下運用を主とした経済性のある堆砂対策を提案した<sup>1)</sup>。調整池のタイプ分けは、堆砂が調整池全域にわたって生じているか否か、および、出水時に調整池が川のような状態となっているか、池のような状態となっているかの2点を基に行った。3タイプのうち、川タイプと中間タイプについては、提案した対策が物理的に可能であり、経済的にも有利であることを示したが<sup>2)</sup>、池タイプについての検討が残されている。

図-1は、我が国における堆砂対策事例を基にして、ダム湖の土砂管理方法を場所(ダム湖内、またはダム湖末端)や方法により分類したものである<sup>3)</sup>。この図から、

ダム湖へ流入してくる土砂に対しどのように対処するのか、排除すべき堆砂はダム湖内のどの位置に存在するのか、などから適用実績のある堆砂対策が示される。図-2は、ダム湖回転率とダム湖寿命の関係からダム湖の特性に応じて適用可能な堆砂対策を導くものである<sup>4)</sup>。図に発電用ダム湖を貯水池と調整池に区別してプロットしているが、それぞれプロットされる領域が異なっており、貯水池には、貯砂ダム設置や土砂還元が、調整池には、フラッシング排砂やスルーリング排砂が堆砂対策として適用性があることが分かる。これらの既往の研究成果から示される堆砂対策を、発電用ダム湖の水文水理条件および流域環境条件等に応じてどのように選定していけば良いかが課題である。

本論文では、発電用ダム調整池のうち、池タイプの堆砂対策について、河床変動数値解析により物理的有効性を、また、対策費用の算出により経済的可能性について検討する。対策としては、ダム水位低下運用をベースとするが、既往の研究成果等から排砂バイパス等を組合せた場合の有効性を河床変動解析および経済性分析により比較検討する。また、排砂バイパス設置によるダム下流河川へ土砂供給の影響についても、正負の両面から検討を行う。

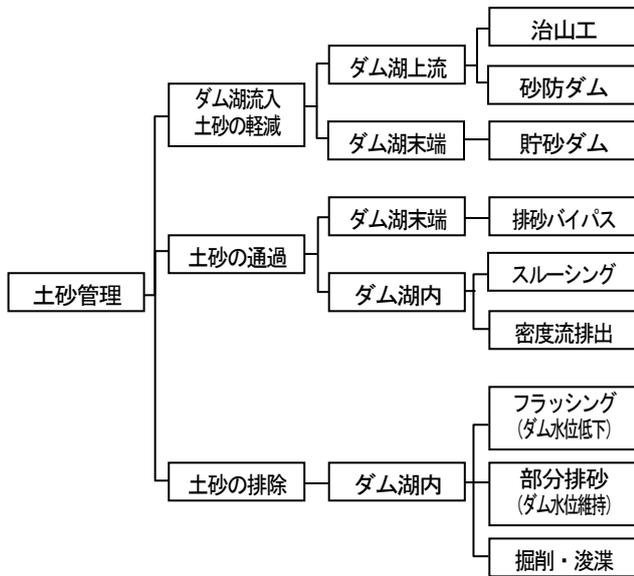


図-1 ダム湖土砂管理方法分類

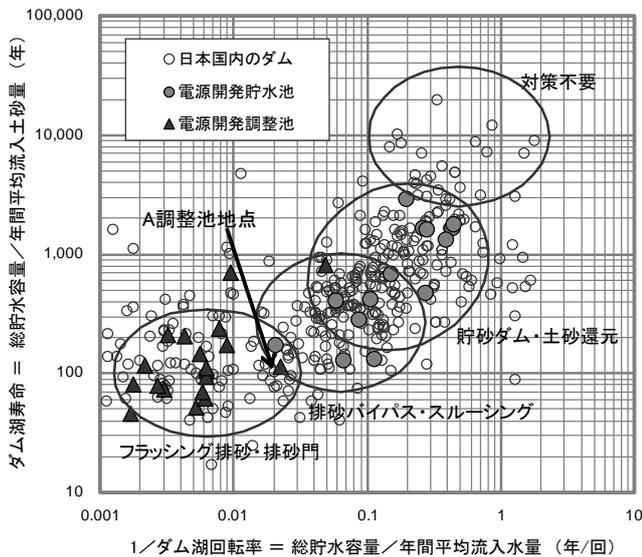


図-2 ダム湖回転率とダム湖寿命による堆砂対策区分

## 2. 池タイプ発電用調整池の堆砂対策

### (1) 池タイプ発電用A調整池の概要

池タイプ発電用ダム調整池の堆砂対策検討の対象としてA調整池を設定する。A調整池は電源開発株式会社が保有する池タイプの調整池で唯一堆砂対策を必要としている地点であり、流入土砂量が多いためダム湖寿命が短く、図-2に示す通りダム湖回転率の逆数は0.02程度である。堆砂対策の主たる目的は洪水被害リスク抑制であり、掘削排除を行っている。

A調整池の諸元を表-1、貯水池平面形状、貯水池縦断形状等を図-3および図-4示す。A調整池の平成22年堆砂量(全堆砂率)は11,591千 $m^3$ (27.0%)、年間平均

表-1 発電用A調整池の諸元

項目	内容
総貯水量	43,000千 $m^3$
流域面積	801 $km^2$
建設後経過年数	49年
堆砂量	11,591千 $m^3$
全堆砂率	27.0%
調整池ダム高×ダム長	76m×211m

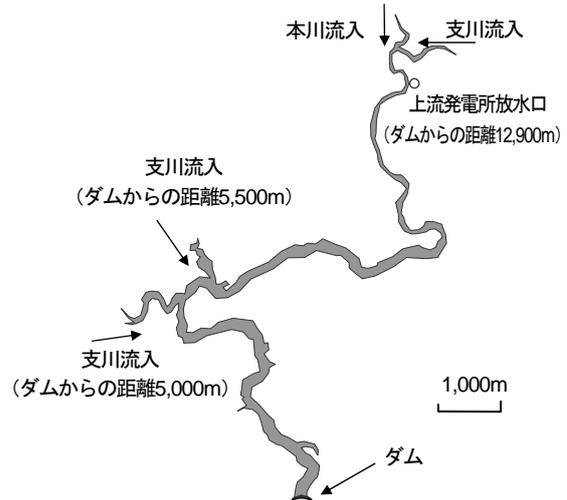


図-3 発電用A調整池 平面形状

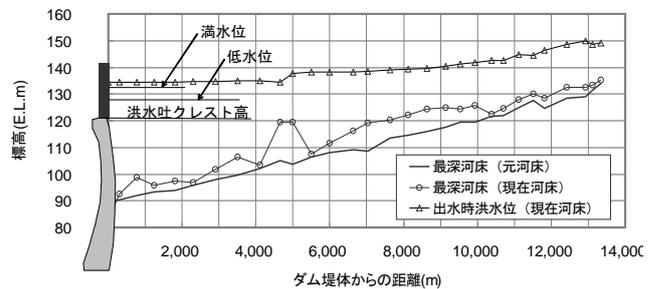


図-4 発電用A調整池 河床縦断形状および洪水位

堆砂量は約240千 $m^3$ である。A調整池の特徴は、図-3および図-4に示すように、ダム上流5,000mの地点に顕著な土砂流入をもたらす支川が流入していることである。この支川土砂流入は調整池内に凸形状の堆砂をもたらし、洪水水位上昇の要因となっていることが分かる。ダムから5,500mの地点に流入している支川からの土砂流入は少ない。また、ダムからの距離7,000mから10,000mの間にも堆砂が多く、同じく洪水水位上昇の要因となっている。

A調整池では、洪水被害のリスク抑制を目的として、年間約130千 $m^3$ 程度の掘削排除(陸上)を実施している。しかし、流入土砂量が多いため、当面の洪水水位上昇抑制達成が限度である。また、掘削排除した堆砂は土捨場へ運搬処理しているが、山間部に土捨場用地を継続的に確

保していくことは困難であり、土捨場に頼らない持続性のある堆砂対策が必要な状況である。

### (2) 池タイプ発電用A調整池の堆砂対策

図-1によると発電用A調整池のように調整池上流域・末端、および調整池内に堆砂があるような場合、掘削排除・浚渫、ダム水位運用によるフラッシング、設備対応となる排砂バイパスや貯砂ダム、等の様々な対策が実施されていることが分かる。また、図-2にA調整池のプロットを示すが、堆砂対策としてフラッシング排砂や排砂バイパスが適用可能であることが分かる。

これら既往の研究結果と現地条件等を基に堆砂対策候補を選定すると、掘削排除（陸上・水中）、出水時ダム水位低下運用、排砂バイパス設置（設備対応）の3つが挙げられる。掘削排除は調整池内のどの位置の堆砂でも排除することが可能であるが、A調整池はダムおよび調整池の規模が大きく、ダム水位低下運用および排砂バイパス設置はそれぞれ単独では効果の及ぶ範囲が限定的となってしまう。A調整池では出水時にダム水位を低下させても、調整池全域で大きな掃流力を得ることはできない。一方、排砂バイパスは地形的な制約からダムから5,000m地点の支川からダム下流の区間のみが設置可能である。よって、出水時ダム水位低下運用と排砂バイパス設置は単独で十分な堆砂対策とはならず、他の対策方法と組み合わせる必要がある。表-2に同程度の効果が得られる堆砂対策としてCASE-1からCASE-4の4通りの組み合わせを設定し、河床変動数値解析および費用算出により、各対策の比較分析を行う。

### (3) 河床変動解析による堆砂対策の効果

河床変動数値解析は一次元不等流混合粒径河床変動モデルを用いて行った。モデルは、粒径100mm程度の掃流砂から、浮遊砂、粒径0.1mm以下のウォッシュロードまでを扱うものであり、掃流砂量式および浮遊砂濃度式は、芦田・道上式<sup>9)</sup>を用いた。河床変動モデルは、新庄らの検討<sup>9)</sup>と同様のものであり、詳細は参考文献<sup>9)</sup>を参

表-2 発電用A調整池 比較分析堆砂対策ケース

ケース名	堆砂対策内容		
	掘削排除 (陸上・水中)	出水時ダム水位 低下運用 <sup>※1</sup>	排砂バイパス 設置 <sup>※2</sup>
CASE-0	対策を実施せず		
CASE-1	○ 排除量160千m <sup>3</sup>		
CASE-2	○ 排除量100千m <sup>3</sup>	○	
CASE-3	○ 排除量60千m <sup>3</sup>		○
CASE-4		○	○

※1 調整池上中流域の堆砂および流入土砂を下流域まで掃流すること目的とし、調整池流入量が1,000m<sup>3</sup>/secを越えると洪水吐ゲートを解放し、ダム水位を洪水吐クレスト高+越流深まで低下する。数日間定水位を保持した後、ゲートを閉じ水位回復を開始する。

※2 ダムから5,000mの位置に流入する支川からの流入土砂をダム下流までバイパスするものであり、他地点実績を基に約70%の土砂がバイパスされ、30%は貯水池へ流入すると設定した。

照されたい。なお、モデルの精査は、調整池内堆砂量および河床材料粒度を基に仮設定した流入土砂の量および粒度を調整対象として、平成4年から平成21年までの18年間の流入量、堆砂量、ダム水位、河床位等の実測データを基に行なった。当該18年間の間には、A調整池の既往最大流量5,231m<sup>3</sup>/secの出水、堆砂掘削排除の実績が含まれている。

河床変動数値解析の結果を図-5に示す。堆砂対策を実施しないCASE-0を除いて、18年後の浸水被害リスクの抑制効果が各ケースで得られた。バラツキはあるものの、浸水リスクの高いダムから5,000mと10,000mの地点において必要な洪水水位上昇の抑制効果が得られた。対策を実施しないCASE-0では、支川合流点での河床位上昇、本流からの流入土砂による中上流域の河床位上昇が生じ、ダムからの距離4,500mから上流で数mの洪水水位上昇が生じている。ダム水位低下運用を行うCASE-2およびCASE-4では合流点と中上流域の堆砂が下流方

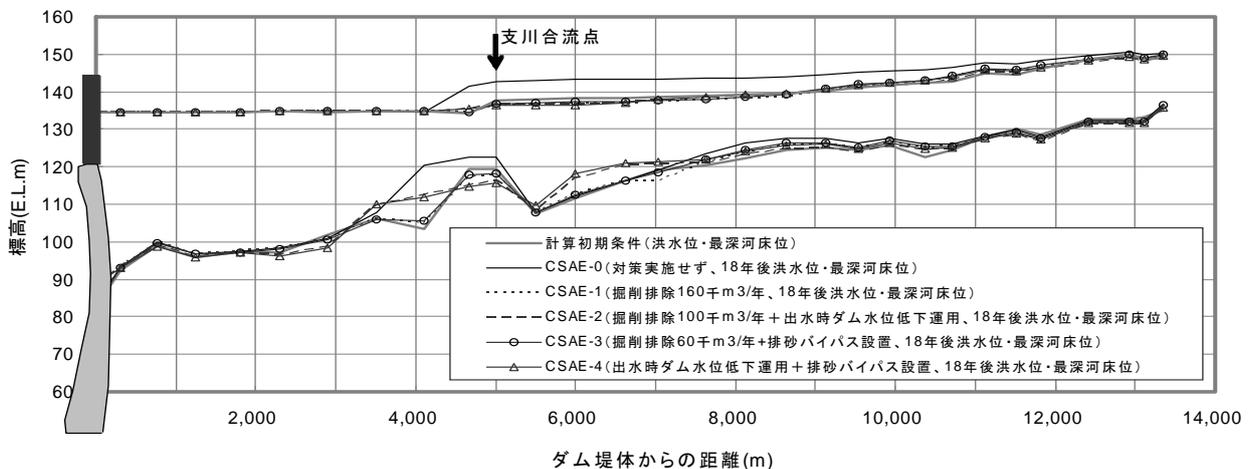


図-5 発電用A調整池 河床変動数値解析結果

向に移動していることが確認できる。なお、バイパスのみを設置し、ダム水位低下運用を行わないCASE-3では、同程度の効果を得るために合流点で20千m<sup>3</sup>の水中堆砂排除（陸上では40千m<sup>3</sup>の堆砂排除）を行っている。

#### (4) 堆砂対策の経済性検討

効果がほぼ同程度である各ケースの堆砂対策を、今後30年間にわたって実施した場合の費用を表-3に示す。各費用の単価は、掘削排除は実績を、ダム水位低下運用では発電減少（減電）を、また、排砂バイパスは既往の実績を参考にし、いずれも社会的割引率は用いていない。表から、掘削運搬土捨（陸上・水中）に要する費用が大きく、CASE-1、CASE-2では総費用の大半、CASE-3では半分程度を占めていることが分かる。その次に排砂バイパスの設置・メンテナンスに要する費用が大きく、CASE-3では総費用の半分、CASE-4では大半を占めていることが分かる。

掘削運搬土捨（陸上・水中）を実施しないことが経済性を高める条件であり、CASE-4は排砂バイパス設置に初期設備投資を要するものの、最も経済性が高い結果となった。また、設備投資は短期的には高コストであるが、費用検討期間を50年、100年と長くすればさらに経済性は高くなる。

A調整池の検討結果から、池タイプ調整池については、支川からの流入土砂を含む複数の流入土砂源を有するような地点で堆砂対策が必要となることが推察される。この場合、流水の力を利用する出水時のダム水位低下運用と排砂バイパス設置（設備対応）を組合せた対策が有効であり、通常行われる掘削排除による対策よりも経済性が高い結果となった。

### 3. 排砂バイパスがダム下流河川へ及ぼす影響

排砂パイパスを設置し運用すると、バイパスを通してダム下流に土砂が供給される。その結果、ダム下流河川の河床位および河床材料の変化等が生じる。これらの変

表-3 発電用A調整池 堆砂対策費用（今後30年間）

対策方法	項目	30年間の費用
CASE-1	掘削運搬土捨（陸上・水中）	28,140
	掘削運搬土捨設備工	2,850
	調査検討（土捨場）	300
	環境影響対策費用	234
	合計	31,524
CASE-2	掘削運搬土捨（陸上・水中）	17,460
	掘削運搬土捨設備工	1,950
	ダム水位低下運用による減電	480
	調査検討（土捨場）	300
	環境影響対策費用	144
	合計	20,334
CASE-3	掘削運搬土捨（陸上・水中）	9,660
	掘削運搬土捨設備工	1,350
	排砂バイパス設置・メンテナンス	8,400
	環境影響対策費用	900
	合計	20,310
CASE-4	ダム水位低下運用による減電	480
	排砂バイパス設置・メンテナンス	8,400
	環境影響対策費用	900
	合計	9,780

単位：百万円

化が、河川の治水安全度および河川環境に及ぼす影響について検討を行なった。

#### (1) 治水安全度への影響

排砂バイパスの設置により、年平均70千m<sup>3</sup>の土砂がダム下流河川へ供給されることとなる。A調整池から河口までの約50kmの区間には、河道幅や勾配が変化している箇所がある。そのような箇所に土砂は堆積しやすいが、土砂堆積による河床位上昇が洪水リスクの上昇となる可能性がある。よって、供給された土砂がどのように移動・堆積するかを予測するため、河床変動解析を行った。数値解析は調整池内と同様に次元不等流混合粒径河床変動モデルを用い、平成7年から平成20年までの14年間の実測データを基にモデルの精査を行った。ここで、実測データには、熊野川河床調査委員会<sup>7)</sup>が昭和40年代

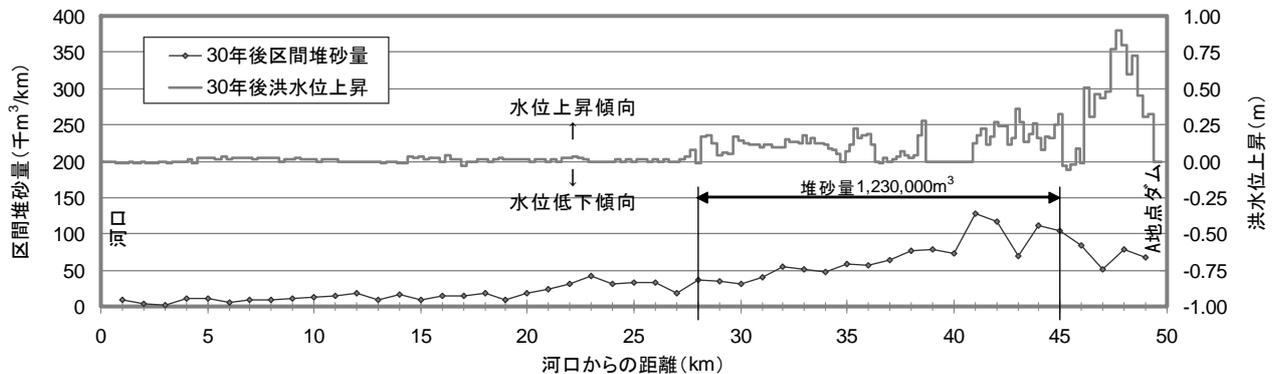


図-6 A調整池ダム下流 河川区間堆砂量・出水時洪水水位の変化（30年後）

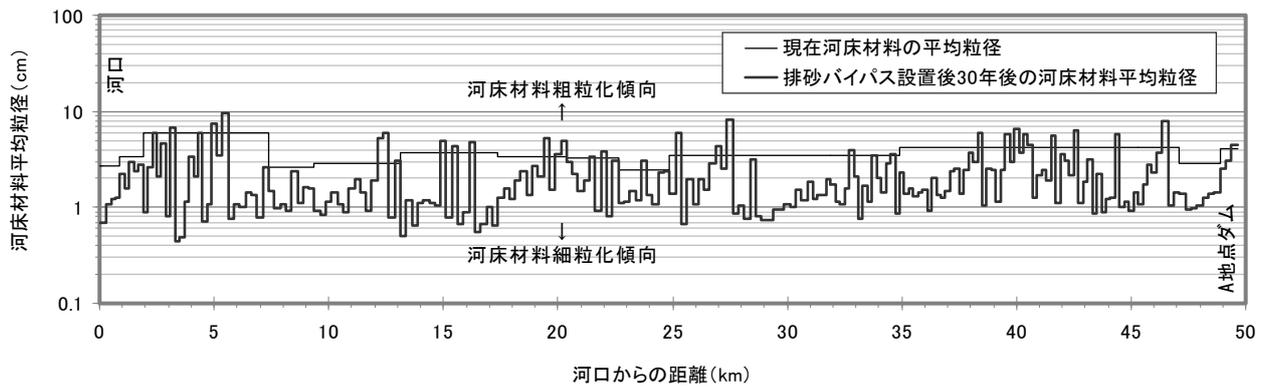


図-7 A調整池ダム下流 河床材料平均粒径の変化 (30年後)

から当該地点の約40断面について河床位および河床粒度を連続測定してきた記録等を用いた。30年後の区間堆砂量および出水時洪水位の変化を図-6に示す。

図から、河口から28kmから50kmの区間で洪水位上昇が生じていることが分かる。河口から45kmより上流では50cm以上の上昇が生じているが、この区間はダム完成後に河床材料が抜けて大きく河床低下していた場所である。河道内の堆砂量については、ほぼ全域に生じているが、ダムに近いほど多くなる傾向がある。

洪水位が上昇している区間で周辺に道路、橋梁、民家等の社会資本があり対策が必要となるのは、河口から28kmから45kmの区間であり、その区間の30年間での堆砂量は1,230千 $m^3$ である。河口から45kmの地点からダムまでの区間の河川は、兩岸が崖であり社会資本は存在しない。洪水位上昇への対策として、掘削排除することを考えると、毎年の必要掘削排除量は年平均約41千 $m^3$ である。70千 $m^3$ を排砂して41千 $m^3$ を下流で掘削することは一見非効率なように見えるが、掘削した土砂は河口まで運搬し養浜材として有効利用することを想定する。河口付近の海岸材料の粒度分布はおおよそ掘削する河床材料の粒度分布と整合している。養浜に必要な掘削、海岸までの運搬等の単価は4,100円/ $m^3$ であり、年間で総額168百万円の費用を要する。この費用を排砂バイパス設置ケースの費用に上乘せしても、排砂バイパス+ダム水位低下運用の方が調整池で掘削排除するケースよりも経済的に有利である。下流河道で掘削排除する土砂は、調整池よりも市街地に近く、建設資材としての市場価値も高く、有効利用方策は引続き検討が必要である。

## (2) 河川環境への影響

排砂バイパスの設置により、年平均70千 $m^3$ の土砂(平均粒径1.14cm, 均等係数3.93)がダム下流河川へ供給されることから、河川環境に影響が出ることが予想される。河床変動数値解析結果を用いて、現在の河床材料平均粒径と30年後の平均粒径との比較を行った。河床材料平均粒径の変化を図-7に示す。図から排砂バイパス設置・運用によって、河床材料の平均粒径は、場所ごとに違いはあるものの概ね数cm程度であったものが、

1cm~2cm程度に変化していることが分かる。

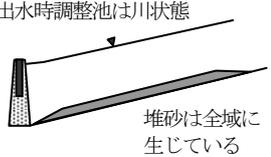
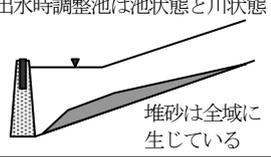
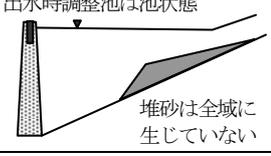
粗粒化した河床は、中小規模の出水では移動することが無く、河床砂礫に繁茂した藻類が剥離・更新されず、魚類や底生昆虫の餌になりにくい藻種が繁殖することが指摘されている<sup>8)</sup>。また、河床が粗い材料ばかりであると、生息する生物種類数が減少し生物多様性を確保できなくなることも指摘されている<sup>9)</sup>。最近の研究では、河床材料の空隙率変化に細砂が影響することが指摘されており<sup>10)</sup>、また、空隙率変化や河床材料の移動し易さが魚類の産卵場適性の指標となる河床の柔らかさに影響することが指摘されていることから<sup>11)</sup>、上流からの土砂供給と下流河川の魚類繁殖とは相関性があるといえる。このように排砂バイパストンネル設置によるダム下流河川への土砂供給は、河川環境を改善する効果が期待できる。

## 4. 発電用ダム調整池の総合的な堆砂対策

著者らは、発電用ダム調整池の堆砂対策として、掘削排除ではなくダム水位運用を主とする対策について検討してきた。表-4に示す通り、発電用ダム調整池を堆砂形状や洪水時の水面形状により、川タイプ、池タイプ、中間タイプの3つに分け、それぞれに堆砂対策を提案した。本論文では、池タイプの検討を、土砂流入量が多く、また支川からの流入土砂が顕著なA調整池を対象に行い、ダム水位低下運用と排砂バイパスを組み合わせた堆砂対策の有効性を示した。前報で示した川タイプ、中間タイプの堆砂対策と合わせると、発電用ダム調整池における有効な堆砂対策は表-4に示す通り完結した。

発電用ダム調整池は、多くの場合上流に貯水容量の大きな貯水池を有している<sup>1)</sup>。調整池に対する貯水池の総貯水量は平均で20倍程度であり、調整池で出水時にダム水位低下運用を実施しても、ダム水位の回復のために特別な運用をする必要はない。また、ダム水位低下運用により一時的な発電停止が生じるものの、出水時であることから、調整池上流に位置する貯水池を使用する発電所や近傍の他水力発電所が高出力で稼働していることが期待でき、電力供給に与える影響は小さいと考えられる。

表-4 水力発電用ダム調整池のタイプ別堆砂対策

タイプ	堆砂位置および 出水時水位の概略図	平均* ダム高	平均*設計 洪水量	平均*洪水吐 高/ダム高	対象ダム数* (割合%)	著者らが提案する堆砂対策
川タイプ	 <p>堆砂は全域に 生じている</p>	27m	8,000m³/s	54%	5 (26%)	・ 出水時にダム水位低下運用を行い、堆砂および流入土砂を洪水吐ゲートからダム下流へ供給する。(スルーシング排砂)
中間タイプ	 <p>堆砂は全域に 生じている</p>	42m	4,000m³/s	29%	9 (48%)	・ 出水時にダム水位低下運用を行い、堆砂および流入土砂を洪水水位上昇に影響しない位置へ導く、または洪水吐ゲートからダム下流へ供給する。掘削排除等によりフォローする。
池タイプ	 <p>堆砂は全域に 生じていない</p>	58m	2,700m³/s	13%	5 (26%)	・ 出水時にダム水位低下運用を行い、堆砂および流入土砂を洪水水位上昇に影響しない位置へ導く。必要に応じて設備対応(排砂バイパス、貯砂ダム、等)によりフォローする。

※電源開発株式会社が所有管理する水力発電用ダム調整池についての整理である

## 5. おわりに

本論文では発電用ダム調整池のうち、池タイプの堆砂対策について検討を行った。また、排砂バイパスによりダム下流河川に土砂が供給されることの影響についても検討を行った。得られた主要な結論は以下の通りである。

- 1) 発電用ダム調整池のうち、池タイプでは、本川上流や支川からの流入土砂量が多い場合に堆砂対策を必要とする。このような場合にはダム水位低下運用と排砂バイパスを組合せる方法が効果的であり、経済的に有利であることが分かった。
- 2) 排砂バイパスによるダム下流河川への土砂供給の影響を河床変動解析により検討した結果、一部区間で河床堆積が認められるものの、河床の堆砂を掘削排除することにより治水安全度は確保できると考えられる。また、下流市街地に近く有効利用の可能性が高まり、河川環境の改善効果も期待できる。

ダム水位低下運用を主とする堆砂対策は、物理的に適用可能である地点が多く、掘削排除による堆砂対策に比較して経済性が高い。しかしながら、多くの発電用ダム湖の堆砂対策は掘削排除により行われている。その理由として、発電用ダム湖の堆砂対策の目的が上流域の河床位上昇・洪水水位上昇に起因する洪水被害リスクの抑制である場合が多く<sup>12)</sup>、排除すべき堆砂が比較的陸上機械のアクセスが良い場所に多く存在し、排除量も膨大でないことが挙げられる。このため、大きな設備投資を要せず、直ちに実施できる当面の対策としての掘削排除を選択する傾向がある。しかしながら、掘削排除は費用が高く、土捨場の確保に迫られる現状を考慮すれば持続的な

方法とは言い難い。従って、本論文で総合化を図ったダム水位運用を主とする堆砂対策方法を、調整池の特性に応じて各地点へ適用していく必要がある。

なお、発電用ダム湖における堆砂進行の影響として、現状では洪水被害リスク上昇を主たる事項として扱っているが、水力発電設備を今後50年、100年と持続的に使用していくことを考えた場合、有効貯水容量の減少に伴う発電システムの効率低下についても適切に評価し、必要な対策を早期に立案して実施していく必要がある。

## 参考文献

- 1) 奥村裕史，角 哲也：発電用ダム貯水池および調整池における堆砂等の特性を考慮した堆砂対策，電力土木，No.350, 2010.
- 2) 奥村裕史，角 哲也：水力発電用ダム調整池における堆砂特性等を考慮した水位低下運用によるスルーシング排砂，水工学論文集第55巻，2010.
- 3) Tetsuya SUMI and S.A. Kantoush : Sediment Management Strategies for Sustainable Reservoir, pp353- 362, Proc. ICOLD annual symposium , 2011.
- 4) 角 哲也：排砂効率および環境適合を考慮したダム堆砂対策の選択，土砂管理とダムに関する国際シンポジウム～第2回東アジア地域ダム会議～，pp17-28, 2005.
- 5) 芦田和男，道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第206号，pp.59-69, 1972.
- 6) 新庄高久，藤田裕一郎ら：1次元河床変動解析に関する実測データに基づく考察，水工学論文集第51巻，2007.
- 7) 熊野川河床調査委員会：熊野川河床調査委員会報告書，2005
- 8) 池淵周一編著：ダムと環境の科学Ⅰーダム下流生態系ー：京都大学学術出版会，2009.
- 9) 竹門康弘：貯水ダムが下流域生態系を及ぼす影響評価～流況変化・土砂供給減少による底質環境と低生物群集の応答～，京都大学防災研究所年報第46号B，2003.
- 10) 藤田正治，堤大三：河床材料の空隙率の変化を考慮した河床変動モデルとその適用，河川技術論文集第14巻，2008.
- 11) 鈴木崇正，角 哲也，竹門康弘，中島佳奈：土砂供給に伴うアユ産卵環境の変化予測に関する研究，京大防災研究所年報第54号B，2011.
- 12) 社団法人電力土木技術協会：水力発電用ダム堆砂に係る調査と啓発調査報告書，2006

(2011. 9. 30受付)