

「N+1」ダムによる水資源開発ダム群の 長寿命化検討

STUDY ON SUSTAINABLE MANAGEMENT OF DAM RESERVOIR GROUP FOR WATER RESOURCES DEVELOPMENT WITH N+1 DAM SYSTEM

小林 潔司¹・角 哲也²・山口 健一郎³・高田 康史⁴

Kiyoshi KOBAYASHI, Tetsuya SUMI, Ken-ichiro YAMAGUCHI and Yasufumi TAKATA

1. フェロー会員 工博 京都大学教授 大学院経営管理研究部/工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 4)
2. 正会員 博(工) 京都大学准教授 大学院経営管理研究部/工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 4)
3. 正会員 工修 (独) 水資源機構関西支社 (〒540-0005 大阪府大阪市中央区上町A番12号 上町セイワビル内)
4. 正会員 博(工) (株) 建設技術研究所大阪本社 (〒540-0008 大阪市中央区大手前1丁目2-15)

In the upper Kizu river basin, five water resources development dams have been constructed. In these dams, reservoir sedimentation causes storage capacity losses. It will be necessary to secure these water resources based on reasonable reservoir maintenance works for a super long term use in the future. It is, therefore, necessary to plan and to carry out efficient and economically feasible reservoir sedimentation management.

In this paper, we study on sustainable management of dam reservoir group for water resources development. As the result, we showed the advantage of dry excavation with the periodical reservoir emptying operation by turns that is enabled by N+1 dam system.

Key Words: Reservoir sedimentation management, dam reservoir group, excavation with periodical reservoir emptying, N+1 dam system, Kizu river

1. はじめに

我が国では、中部地方をはじめとするダム貯水池への土砂流入量が多い水系を中心に、貯水池内の堆砂問題が顕在化してきており、様々な堆砂対策が実施されている。一方では、土砂生産量が突出していない水系のダムにおいても堆砂は着実に進行しており、戦後の高度成長期に建設された多くのダムにおいて、今後40~50年の間には堆砂量が計画値に達するものと推定され¹⁾、健全な水資源を次世代に残すためには、集中的な堆砂対策投資を余儀なくされることが想定される。

本研究は、木津川上流ダム群(図-1参照)を対象に、ダム貯水池が100年以上にわたりその機能を果たしつつ、維持管理の負担を後の世代に集中させないことを目的とし、ダムの計画上の寿命を規定している貯水池堆砂に着目した長寿命化の検討を行ったものである。具体的には、「N+1」ダムを用いたダム群連携運用による長寿命化を提案し、その有効性について検証した。

2. 研究概要

(1) 木津川上流ダム群の堆砂状況

木津川上流ダム群の堆砂状況を表-1に示す(平成18年度時点)。これによると、5ダム全てにおいて、計画以上の速度で堆砂が進行していることがわかる。また、建設からの経過年が30年以上となる高山ダム、青蓮寺ダム、室生ダムでは、計画堆砂容量の40~

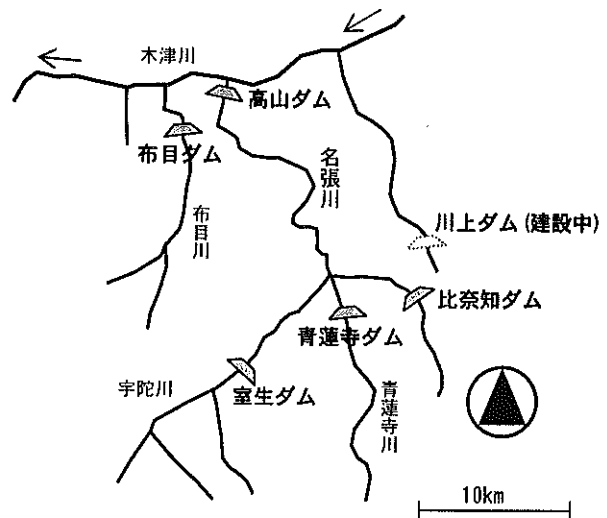


図-1 淀川水系木津川上流ダム群

表-1 木津川上流ダム群の堆砂進行速度 (H18年時点)

	経過年数	計画堆砂容量 (千m ³)	平成18年度実績堆砂量 (千m ³)	堆砂率
高山ダム	37	7,600	3,648	48.1%
青蓮寺ダム	36	3,400	1,484	43.6%
室生ダム	32	2,600	1,120	43.1%
布目ダム	16	1,900	243 (344)	12.8% (18.1%)
比奈知ダム	9	2,400	410	17.1%

※ 上表の堆砂率は計画堆砂容量ベースの値

※ 布目ダムの括弧書きは既に副ダムから浚渫された土砂量も含めた値

50%程度まで堆砂が進行しており、大規模出水時の突発的な土砂流入を勘案すれば、今後十数年の間に、計画堆砂容量を使い切ってしまう恐れがある（表-2参照）。

表-2 木津川上流ダム群の実績最大年堆砂量評価²⁾

	計画堆砂容量	実績最大年堆砂量		
		堆砂量	計画堆砂容量に占める割合	生起確率評価
高山ダム	7,600 千 m^3	621 千 m^3	8.2%	1/52年
青蓮寺ダム	3,400 千 m^3	336 千 m^3	9.9%	1/35年
室生ダム	2,600 千 m^3	314 千 m^3	12.1%	1/45年
布目ダム	1,900 千 m^3	230 千 m^3	12.1%	1/51年
比奈知ダム	2,400 千 m^3	140 千 m^3	5.8%	1/12年

(2) 既往検討成果

角ら²⁾の既往検討成果によると、木津川上流ダム群を対象に、超長期にわたる維持管理のケーススタディを実施した結果、全てのダムにおいて、水位低下掘削（減電補償や利水損失分補償を見込んだ形）を実施した方が、初期に施設投資が必要となる対策手法（例えば、排砂バイパスやフラッシング排砂等）よりも、経済的となる結果が得られている。また、これらの結果を踏まえ、角ら²⁾は、木津川上流ダム群の維持管理として、「ダム群としての土砂排出方法の最適化（5ダム連携による安価な土砂排出）」の可能性を示唆している。

(3) 「N+1」ダムによる連携運用の概要

(1)の堆砂状況および(2)の既往検討結果を踏まえた上で、実際には水位低下掘削の際に利水損失を補償として支払うことは困難であることや、水位低下掘削を極力安価に実施することを勘案し、本研究では、下記のとおり、「N+1」ダムによるダム群連携運用を提案し、その有効性について検証を行った。

- 各ダムでローテーションにより水位低下掘削（陸上掘削のため安価）を実施し、水位低下中のダムは「リフレッシュダム」として位置付ける。
- 水位低下中の貯水池機能低下に対しては、貯水池機能のバックアップ目的で設置する「N+1」番目のダムによりバックアップ補給を行う。

（※ 必要最低限のダム数「N」基に対して、維持管理用のダムを加えた「N+1」基のダム数での維持管理実施の意味）

3. 「N+1」ダムによる連携運用の検討条件

(1) バックアップ運用方法

堆砂容量は、最低水位以下に設定されるが、貯水池は利水放流設備の設置位置まで低下可能である。よって、低下可能水位以上に堆積している土砂については、水位低下の実施により安価な陸上掘削の対象となる（図-2参照）。

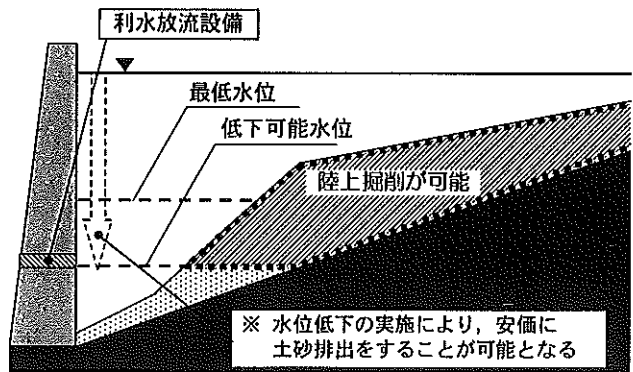


図-2 水位低下掘削の想定

水位低下掘削実施時における貯水池機能の低下に対しては、「N+1」番目のダムよりバックアップ補給を行うことにより、ダム群全体として貯水池機能の低下を招くことなく、順次水位低下掘削を実施できる状態を想定した（図-3参照）。ただし、各ダムの利水補給先を整理した結果、室生ダムについては、貯水池から直接取水がなされており、バックアップ補給を受けることが困難であるため、水位低下掘削の対象からは除外するものとする。

また、「N+1」番目のバックアップ用ダムとしては、バックアップ補給が可能となること、ならびに近隣の水源池であること（管理負担軽減のため）を勘案すれば、現在計画中の川上ダムを利用することも考えられる。

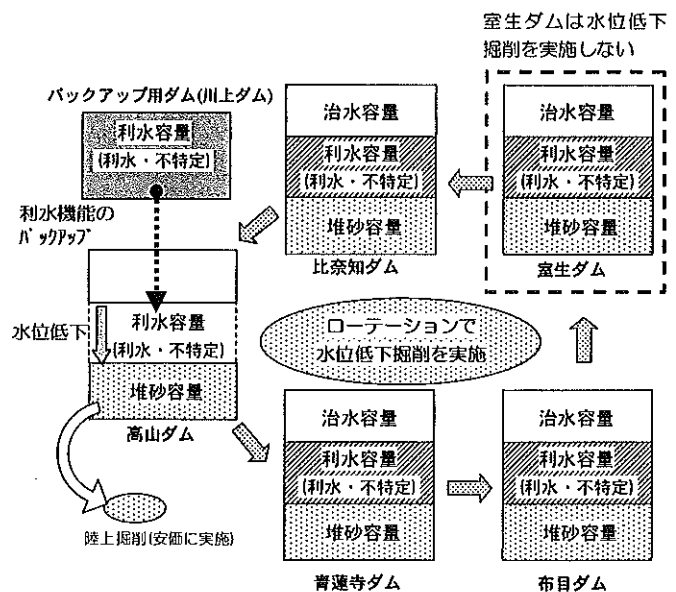


図-3 「N+1」ダムによる連携運用模式図

(2) 検討に用いる年堆砂量の設定

本検討に用いる各ダムの年間堆砂量は、実績堆砂量（表-1）を基に、表-3のとおり設定した。なお、実際の貯水池では、年により年間堆砂量の増減が確認されるが、本研究では、これらの年間堆砂量が毎年継続的に貯水池内に堆積するものとして取り扱う。

表-3 各ダムの年間堆砂量予測

	設定年間堆砂量
高山ダム	98,600 m ³
青蓮寺ダム	41,200 m ³
室生ダム	35,000 m ³
布目ダム	21,500 m ³
比奈知ダム	45,600 m ³

(3) 掘削土砂の処理方針

ダム貯水池内で掘削除去した土砂は、持続可能な対策の実施および土砂連続性確保の観点より、各ダムの下流に置土をし、下流河道に土砂還元することを想定する。この際の土砂処理量については、図-4に示す条件①～③により制約される。

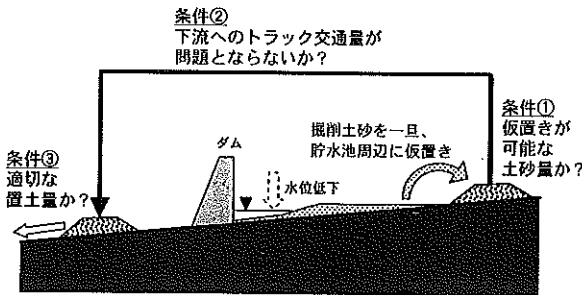


図-4 土砂処理の制約条件

貯水池周辺の地形条件や運搬道路条件より、条件①および条件②について、整理した結果を表-4に示す。なお、条件③の置土量については、本来、下流河道における自然環境へのインパクトが十分小さいことや、所定の流量において十分下流へ流送されること等から設定されるべき値であるが、当該分野は、現時点において既往研究で十分な知見が得られていないため、ここでは、条件③については、制約値を設けないものとする（今後の課題とする）。

表-4 土砂処理量の制約条件

	条件① 貯水池周辺の 仮置き量の制約	条件② トラック運搬の制約
高山ダム	100,000 m ³	56,640 m ³
青蓮寺ダム	42,800 m ³	6,480 m ³
室生ダム	108,200 m ³	24,240 m ³
布目ダム	51,000 m ³	63,360 m ³
比奈知ダム	74,000 m ³	7,680 m ³

※ ハッチング部は各ダムの土砂処理制約量（①と②で小さい方）

(4) 対策費用の設定

a) 掘削費用

大矢ら³⁾によると、運搬距離 T_L (km) に対する単位体積当たりの土砂処理コスト C_s (円/m³) は、下式のとおり表せる。

$$C_s = p \cdot T_L + q \quad (1)$$

ここに、 p ：運搬単価 (円/m³/km)、 q ：排出単価 (円/m³) である。本研究では、大矢らの研究成果より、運搬単価 $p=75$ 円/m³/km、排出単価は、掘削

(陸上) では $q=4,000$ 円/m³、浚渫 (水中) では $q=35,000$ 円/m³を設定した。各ダムの貯水池から下流還元地点 (ダム下流) までの運搬距離も考慮して設定した堆積土砂の土砂処理コストを表-5に示す。

表-5 土砂排出単価の整理

	運搬距離 (km)	運搬単価 (円/m ³)	土砂処理コスト (円/m ³)	
			通常対策時 掘削・浚渫	水位低下 掘削
高山ダム	11.1	830	35,830	4,830
青蓮寺ダム	5.1	380	35,380	4,380
室生ダム	8.7	650	35,350	35,350
布目ダム	4.0	300	35,300	4,300
比奈知ダム	4.2	320	35,320	4,320

※ 通常対策時の排出単価は、常時満水位以上は掘削 (4,000 円/m³)、以下は浚渫 (35,000 円/m³) と仮定
 ※ 室生ダムについては、バックアップを受けることができないため、水位低下運用時も貯水池を保ったままでの排除を想定 (常時満水位以上は掘削 (4,000 円/m³)、以下は浚渫 (35,000 円/m³) と仮定)

b) 大規模回復策の検討

表-3および表-4より、各ダムともに、今後、貯水池に流入してくる土砂の全てを排除することはできないため、対策実施により堆砂進行速度を遅くすることができたととしても、いずれは計画堆砂容量が満砂してしまうことになる。よって、持続的な貯水池維持管理のためには、計画堆砂容量の満砂時には、貯水池機能回復を目的とした大規模回復策 (大規模な土砂排除) を実施する必要がある (図-5参照)。

木津川上流ダム群においては、大規模回復策実施の際には土捨場の確保が困難であるため、最大海 (大阪湾) まで運搬すると仮定すると、1回の大規模回復に要する費用は表-6のとおりとなる。

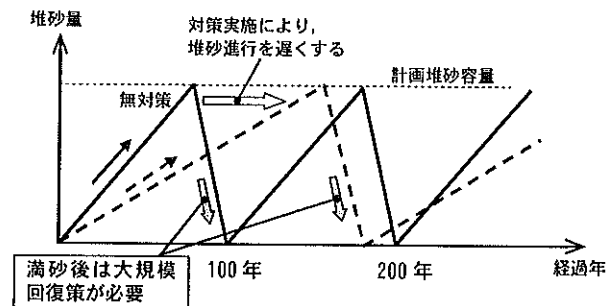


図-5 持続的な貯水池の維持管理イメージ

表-6 大規模回復策に要する費用 (海までの運搬を仮定)

	運搬距離 (km)	運搬単価 (円/m ³)	排出単価 (円/m ³)	1回の回復に必要な費用 (百万円)
高山ダム	97.8	7,335	35,000	321,750
青蓮寺ダム	114.3	8,573	35,000	148,150
室生ダム	85.0	6,375	34,700	106,800
布目ダム	83.8	6,285	35,000	78,440
比奈知ダム	110.6	8,295	35,000	103,910

※ ダム機能維持のため、排出単価は、常時満水位以上は掘削 (4,000 円/m³)、以下は浚渫 (35,000 円/m³) と仮定

(5) 経済性の評価方法

本研究では、初期投資を伴う対策についても検討対象とするため、初期投資の意志決定（バックアップ用ダム設置の可否）の観点より、ある時点における現在価値化したトータルコストで経済性評価を行うものとする。なお、割引率は4%とする⁴⁾。

よって、 T 年後におけるトータルコスト C_{total} は次式のとおりとなる。

$$C_{total} = \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (2)$$

ここに、 C_t : t 年目の発生コスト、 r : 現在価値化の割引率 (=0.04) である。

ここで、経済性の評価対象となる「 T 年後」は、対象施設のライフサイクル等を考慮して設定することになる。

本研究は、超長期にわたる貯水池維持管理の評価を対象としており、計画堆砂容量の対応期間である100年を超えるような期間について評価する必要がある。また一方では、200年を超えるような将来の投資は、通常の割引率4%を基にした現在価値はほぼゼロとなるため、評価が困難となる。

以上より、本研究では、現在から300年後のトータルコストにより経済性の評価を行うものとする。

(6) 連携運用のルール化

「 $N+1$ 」ダムによる連携運用のケーススタディに先立ち、実際の貯水池の運用を勘案し、下記のとおり連携運用のルール化を行った。

a) 複数ダムで水位低下実施が重なった場合

水位低下実施サイクルからの超過年をもとに優先順位を設定する（2ダム同時の対策実施防止）。

b) 大規模回復実施時期

大規模回復中は他のダムの水位低下掘削・大規模回復は実施しないものとする

c) 水位低下時の掘削対象土砂量

低下可能水位以下の容量が満砂するかどうかで下記のとおり場合分けを行う。

- ・ 低下可能水位以下の容量が満砂するまでは、流入土砂量に、低下可能水位以下の堆砂量とそれ以上の堆砂量の比率を乗じた量を掘削対象とする。
- ・ 低下可能水位以下の容量が満砂した後は、満砂後の全流入土砂量が掘削の対象とする。

4. 「 $N+1$ 」ダムによる連携運用の効果

(1) 検討ケース

著者ら⁵⁾の検討成果によると、木津川上流ダム群のように、ダム周辺地域も市街化し、土砂処分や運搬が困難な地域のダムでは、堆砂抑制策により、大規模回復対策をできるだけ後ろ倒しして、その回数を減らす堆砂対策シナリオを基に、対策内容や実施

表-7 検討ケースの整理

	方針
case1 : 無対策	特に堆砂対策を実施せず、「満砂→大規模回復→満砂・・・」を繰り返すケース
case2 : 各ダム単独運用案	各ダム単独運用で通常の堆砂対策（掘削+浚渫）を実施するケース （※下流土砂還元も実施）
case3 : 「 $N+1$ 」ダムによる連携運用	ローテーションにより各ダムで安価な水位低下掘削を実施し、水位低下中は他ダムあるいはバックアップ補給用ダムより、貯水池機能のバックアップを行うケース（※下流土砂還元も実施）

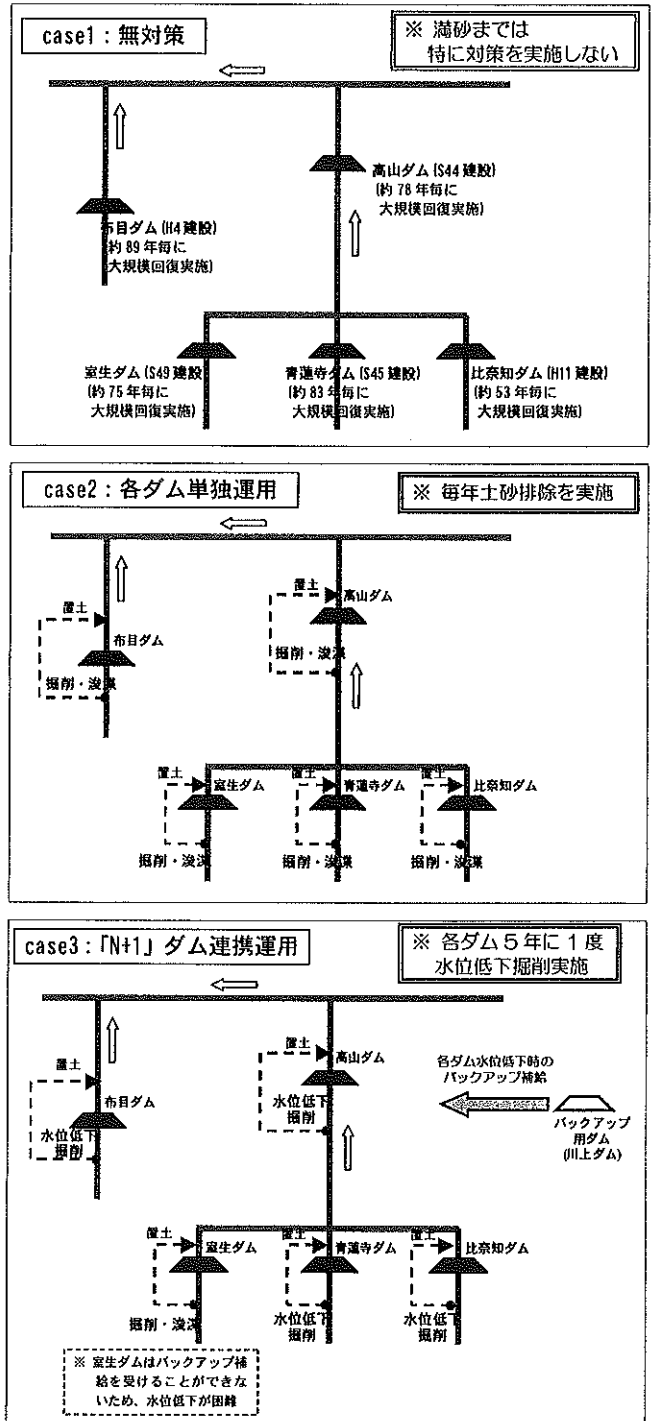


図-6 検討ケース模式図

時期を検討することが必要である。

これを踏まえた上で、本研究の検討ケースを設定した。検討ケースを表-7および図-6に示す。

本研究では、これらcase1~case3について、経済性評価を行い、「N+1」ダムによる連携運用の有効性について検討を行うものとする。

(2) バックアップ用ダムの必要規模および費用

検討ケースのうち、case3（「N+1」ダムによる連携運用）では、バックアップ補給用ダムの設置費用をトータルコストに見込む必要がある。通常、ダム設置費用は、地形・地質条件等により大きく左右されるが、ここでは検討の簡略化を考慮し、図-7に示す我が国の直轄ダム（44ダム）を対象とした「有効容量～事業費」関係⁹⁾より、単位容量当たりの事業費を2,000円/m³（上限値相当）として、バックアップ補給用ダムの設置費用を設定することとする。

木津川上流ダム群のうち、最も利水容量が大きい青蓮寺ダムの利水機能を代替できるダム規模（容量15,400千m³）を想定すれば、バックアップ補給用ダムの設置費用は、30,800百万円となる。

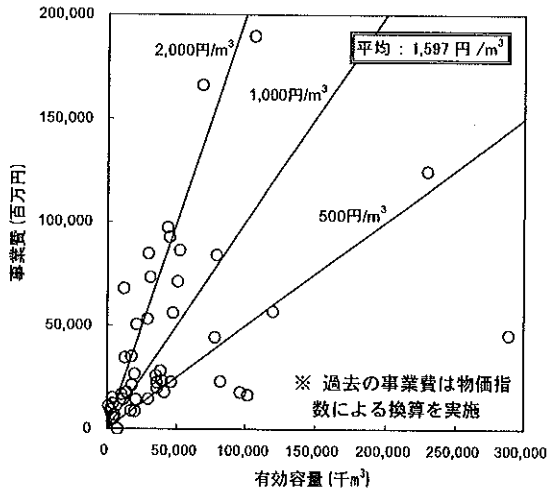


図-7 有効容量～事業費（直轄44ダムの実績）

(3) 経済性の検討結果

case1~case3における300年後のトータルコスト（現在価値化）の算出結果を整理したものを表-8に示す。また、各caseの堆砂率の経年変化および発生コストの経年変化図を図-8～図-10に示す。

これらより、下記の点が考察できる。

a) case1とcase2の比較

case1とcase2の結果比較では、case1（常時は無対策で満砂の度に大規模回復を繰り返す）の方が経済的な結果となった。これは、現在価値化によるコスト算出を実施しているため、運用開始初期の段階では無対策で土砂排出の投資を先延ばしにする（大規模回復まで費用が発生しない）方が経済的な評価となったためである。

仮に、木津川上流ダム群における堆砂量が、現況よりも突出して多ければ、case1における大規模回復の回数が増加し、その結果、case2の方が経済的

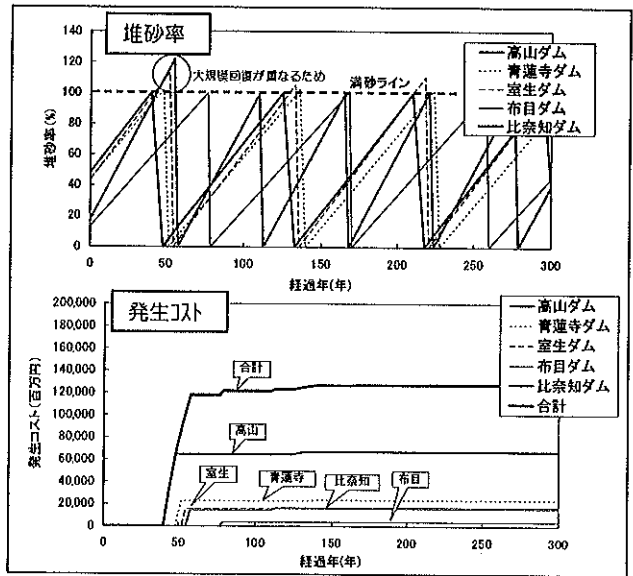


図-8 case1：堆砂率および発生コストの経年変化

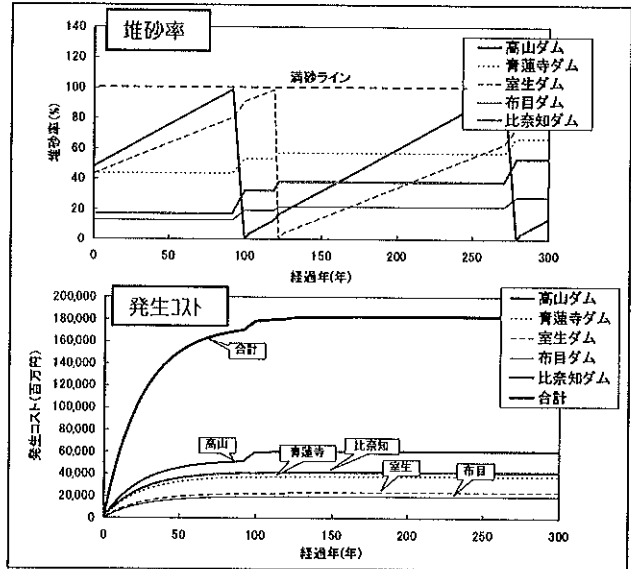


図-9 case2：堆砂率および発生コストの経年変化

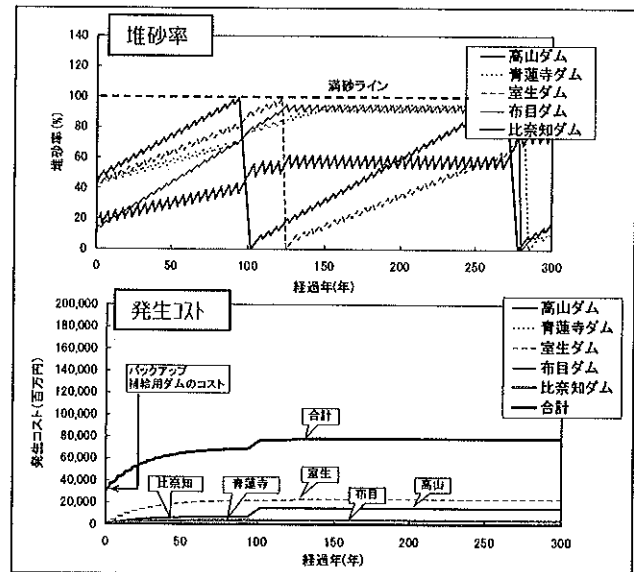


図-10 case3：堆砂率および発生コストの経年変化

表-8 各ケースの300年後のトータルコスト (単位: 百万円)

		高山ダム	青蓮寺ダム	室生ダム	布目ダム	比奈知ダム	バックアップ 補給用ダム	合計
case1	無対策	67,073	23,439	16,285	3,948	16,295	—	127,040
case2	各ダム 単独運用案	60,549	37,585	23,301	19,567	41,519	—	182,521
case3	「N+1」ダムによる 連携運用	15,239	3,676	23,175	1,092	4,289	30,800	78,271

な維持管理手法になるものと推定される。

また一方、発生費用の平準化の観点からすれば、case2の方が有利となる（発生費用の増減が小）。

これらの結果は、今後、他ダムにおいて堆砂対策を検討する際には、各ダムの堆砂条件に応じた適切な排砂シナリオを設定することが重要になることを示している（トータルコストと発生費用平滑化のバランスを勘案する必要がある）。

b) case1とcase3の比較

case1とcase3の結果比較では、case3（「N+1」ダムによる連携運用を実施）の方が経済的な結果となった（300年後のトータルコストで約48,000百万円安い）。また、発生費用の平準化の観点からもcase3の方が有利となる。

これらより、木津川上流ダム群においては、「N+1」ダムによるダム群連携運用を実施することにより、経済面および発生費用平滑化の面で有利となることがわかった。

これは、ダム群として必要最低限の容量に加え、弾力的に使用可能なバックアップ用容量を設けることの有効性を示している。

c) 環境面からの比較

経済性以外に、環境面より各ケースを比較すると下記のとおりである。

- ・ case1では、ダムにより下流河道への供給土砂が遮断されるが、case2およびcase3では、下流河川還元を基本とするため、下流河道の環境へのインパクトは軽減される
- ・ case3では、定期的に水位低下（干し上げ）を実施するため、これに伴い貯水地内の水質改善効果も期待できる⁷⁾

d) 「N+1」ダム連携運用の適用条件

以上の検討結果を踏まえ、「N+1」ダム連携運用の適用条件を表-9に整理する。

表-9 「N+1」ダム連携運用の適用条件

項目	条件
ダム構造	・ダム堤体が水位低下のための放流設備を低標高部に有する
ダム群の配置	・連携運用を行うダム群が近隣に存在する ・互いのダム貯水池機能をバックアップできる位置関係にある（共通の補給先を有するか）

5. まとめ

本研究は、ダム貯水池が100年以上にわたりその機能を果たしつつ、維持管理の負担を後の世代に集中させないことを目的に、貯水池堆砂に着目した長寿命化の検討を行ったものである。

その結果、木津川上流ダム群においては、「N+1」ダムによるダム群連携運用を実施することで、経済面および発生費用平滑化の面で有利となることがわかった。その観点では、今後、川上ダムをバックアップ用ダムとして位置付けた、「N+1」ダムの連携による長寿命化運用の実施が期待される。

本研究の結果を踏まえた上での、今後の課題を以下に示す。

- ・ 大規模出水時の突発的な土砂流入も考慮に入れた貯水池維持管理（リスクマネジメント）も検討する
- ・ 「N+1」ダム運用システムを一般化した上で、他流域にも適用し、本システムの適用条件と有効性の関係を整理する
- ・ 既設ダムの対策のみならず、新規ダムやダム再編・再開発も視野に入れ、「N+1」ダムと同様の機能を有するバックアップ用容量をダム群として所有するような運用も検討する

参考文献

- 1) 角 哲也：日本における貯水池土砂管理，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）論文集，pp. 27-40，2003.
- 2) 角 哲也，森川 一郎，高田 康史，佐中 康起：木津川上流ダム群を対象とした堆砂対策手法に関する検討，河川技術論文集，第13巻，2007.
- 3) 大矢通弘，角 哲也，嘉門雅史：ダム堆砂リサイクルのコスト分析とPFIによる事業化検討，ダム工学 Vol. 13, No. 2, pp. 90-106, 2003.
- 4) 「社会資本整備に係る費用対効果分析に関する統一の運用指針」（国土交通省，平成16年2月）
- 5) 小林 潔司，角 哲也，森川 一郎：堆砂対策に着目したダムにおけるアセットマネジメントの適用性検討，河川技術論文集，第13巻，2007.
- 6) ダム年鑑 2004.
- 7) 八木 裕人：渡良瀬貯水池における干し上げについて，リザーバー，2006. 12.

(2008.4.3受付)