

真名川ダム of 弾力的管理に関する マニュアルの構築について

村上 智文

近畿地方整備局 九頭竜川ダム統管理事務所 管理課 (〒910-0021福井県大野市中野29-28)

真名川ダムでは、平面二次元河床変動計算を用いた真名川ダム下流の河床変動特性ならびにダム運用シミュレーションを用いた真名川ダムの水収支の把握により、ダム下流の河川環境を改善しうる適切なダム放流方法を見出し、それらを反映させた弾力的管理に関するマニュアル(案)を作成した。本稿は、その概要について報告するものである。

キーワード 弾力的管理, 弾力放流, 平面二次元河床変動計算, 礫河原維持条件, マニュアル

1. 真名川ダムおよび流域の概要

真名川ダムは、洪水調節および発電、不特定用水を目的として、1979年に九頭竜川水系真名川の中流部に設置された、総貯水容量 115,000 千 m³ の多目的ダムである。ダムの運用は、洪水期と非洪水期に分け、制限水位方式を採用している。(図-1, 図-2)

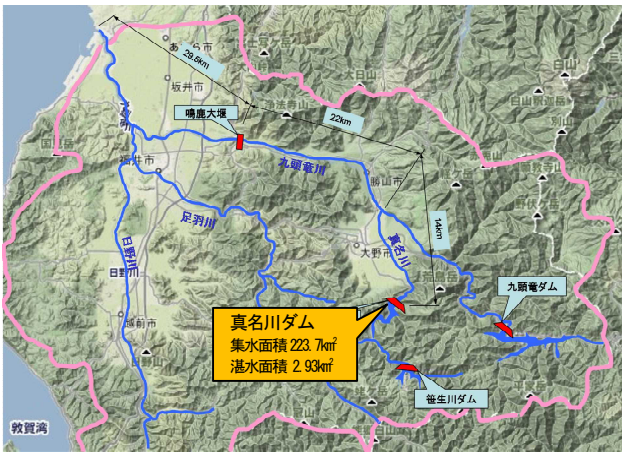


図-1 真名川ダム位置図¹⁾

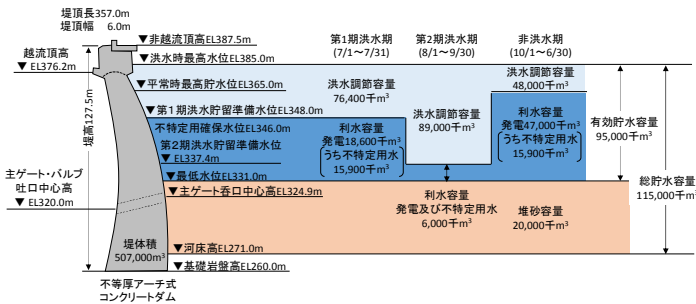


図-2 真名川ダム貯水池容量配分図²⁾

2. 真名川の変遷と現状

真名川ダム完成以降、ダム下流では流量の安定化や土砂供給の減少等が原因となり、滞筋の固定化や河道内の樹林化、ツルヨシの繁茂等、河川環境が劣化している状況がみられた(図-3上段、中段)。そこで、河川環境の保全・向上を目的として、2003年から弾力的管理試験(フラッシュ放流、置土、自然再生試験等)に取り組んでいる。また2011年以降は台風等による大規模な出水が続いていることもあり(図-4)、河道内に繁茂していた植生が流失して礫河原が形成され(図-3下段)、良好な河川環境の指標とされる河原植物であるカワラハハコが確認できるなど、河川環境が回復しつつある。

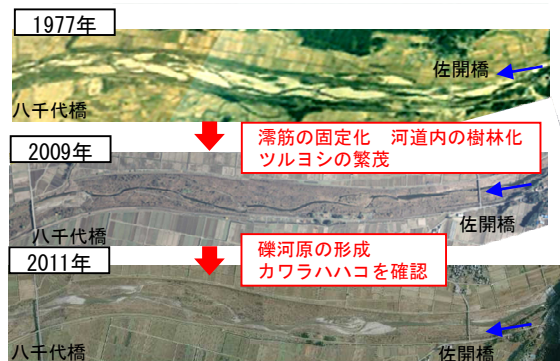


図-3 真名川の変遷 (ダム完成以前(1977年)～近年(2011年))

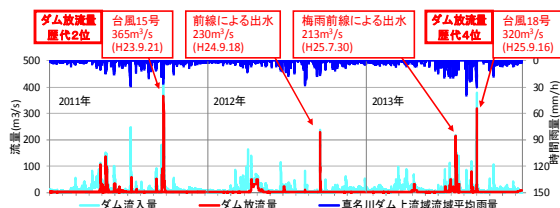


図-4 近年のダムからの流入量・放流量・雨量の時系列グラフ

3. 弾力放流に関するマニュアルの必要性と作成方針 (考え方)

真名川ダムにおける弾力的管理は、洪水調節に支障を及ぼさない範囲で洪水調節容量の一部に流水を貯留し、これを適切に放流しダム下流河川に攪乱を与えることで、ダム下流の河川環境の保全・向上に役立てようというものである。

真名川ダムでは図-5に示すような真名川を目指して2003年から弾力的管理試験に取り組んでおり、2014年からは本格運用へと移行するため、運用基準を明示したマニュアルが必要不可欠であり、マニュアルに記載すべき内容を検討する必要がある。

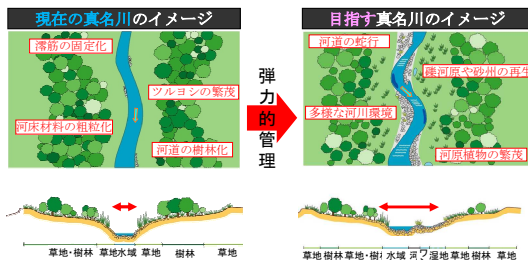


図-5 真名川における弾力的管理のイメージ

真名川ダムの弾力的管理では、ある一定の条件を満たした場合に、制限水位+2mを限度に洪水調節容量の一部に流水を貯留(活用容量)することとしている(図-6)。

この活用容量を利用して、2003年からはフラッシュ放流(あるピーク流量を一定時間放流する)、2011年からは融雪期に自然の中小出水を可能な限り再現するような放流を試みており(表-1)、本格運用では、融雪期にそのような放流を「弾力放流」として実施する予定である。

ただし、活用容量には上限があるため、活用容量内で効率的に放流を行うことによって、植生の繁茂や樹林化を防止し、また礫河原を維持する必要がある、そのためには河川環境を改善しうる(植生の流失を発生させる)適切な放流の規模や頻度を見出す必要がある。ここではそのための検討ツールとして、植生の流失条件の評価が可能な平面二次元河床変動計算を活用することとした。さらに、設定した実施基準に則って弾力放流を行った場合のダムの水収支(貯水量の不足がなく確実に運用できるかを判断するダム運用シミュレーション)や、弾力放流実施時の九頭竜川本川および真名川の安全性(水位上昇等)についても確認しておく必要がある、それらについても検討するものとした。

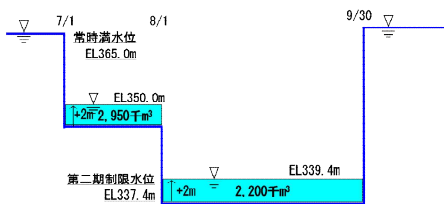


図-6 真名川ダムの活用容量のイメージ

以上より、マニュアルの作成は、図-7に示すような手順で行うものとした。

表-1 これまでの放流状況

実施日	ダム放流量のピーク流量	備考	実施日	ダム放流量のピーク流量	備考
2003.9	25 m ³ /s	フラッシュ放流	2011.5	136 m ³ /s	融雪出水
2004.11	45 m ³ /s	〃	2011.9	365 m ³ /s	台風15号(第2位)
2005.8	25 m ³ /s	〃	2012.4	50 m ³ /s	融雪出水
2005.12	40 m ³ /s	〃	2012.9	230 m ³ /s	前線
2006.11	45 m ³ /s	〃	2013.4	30 m ³ /s	融雪出水
2007.11	45 m ³ /s	〃	2013.7	213 m ³ /s	梅雨前線
2008.11	45 m ³ /s	〃	2013.9	320 m ³ /s	台風18号(第4位)
2010.4	70 m ³ /s	〃			()内は歴代ダム放流量のピーク流量順位

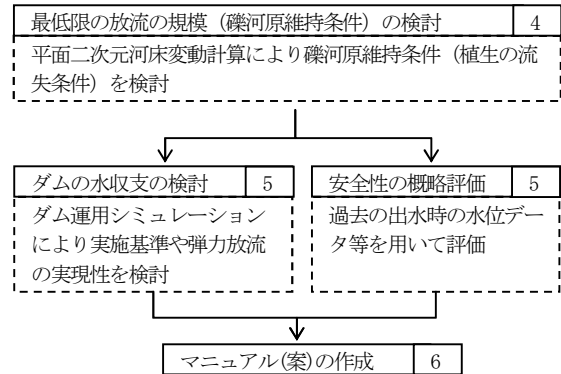


図-7 マニュアル作成フロー(フロー中の数字は見出し番号)

4. 礫河原維持条件の検討

礫河原維持条件を設定するためには、ダム下流の河床変動特性や植生を流失させる掃流力について、平面的に把握する必要がある。そこで、本検討では、それらを把握しうる平面二次元河床変動計算モデルを適用することとし、再現計算によりモデルの妥当性を確認し、次に予測計算により礫河原維持条件を検討した。

(1) 平面二次元河床変動計算モデルの構築(再現計算)

ここでは、平面二次元河床変動計算モデルを構築し、2010~2012年の実際の河床変動状況の再現計算を行うことにより、構築したモデルの妥当性を確認した。

a) 解析モデルの概要

今回用いる解析モデルは、一般曲線座標を用いた非定常平面二次元流れの計算と混合粒径を扱った河床変動計算から構成される。その計算は、ある時間間隔ごとに基礎式を繰り返し解析し、時々刻々と変化する河床形状と流れ場の算定を行う。解析モデルの概要を表-2に示す。

表-2 解析モデルの概要

項目	モデル仕様
モデル分類	平面二次元河床変動計算モデル
粒度モデル	混合砂 多層モデル
メッシュ	置土や自然再生試験の範囲の地形変化を分析評価可能なサイズ(5m~20m)
入力データ	河床高, 粒度分布, 下流端水位, 上流端流量
出力データ	流砂量(土砂収支), 河床高, 粒度分布

b) 再現計算条件の設定

再現計算の条件は、表-3に示すとおり設定した。

表-3 主な再現計算条件 (平面二次元河床変動計算)

項目		内容	
計算対象領域		真名川大橋上流側(1.8k)～佐開橋付近(10.0k)	
計算対象期間		2010年12月～2012年12月(河床高のデータ存在状況から計算対象期間を設定)	
流量		計算期間中に発生した主要洪水を用いた(図-8)	
下流端水位		一次元不等流解析から作成したH-Q式	
計算メッシュ		縦断方向478(20mピッチ、一部重要区間では10mもしくは5mピッチ) 横断方向41(概ね5mピッチ)	
初期河床高		2010年河道(2010年およびそれ以前の横断測量データ、2012年のLPデータから作成)	
植生分布		2010年度の植生調査結果に基づき植生密度および植生高を各メッシュに与えた。	
河床材料の初期粒度分布		2012年度河床材料調査結果に基づき実際の河床変動を再現できるように初期粒度分布を調整して与え、粒径階は6とした。(図-9)	
給砂条件		解析対象とした2洪水の間は、真名川頭首工の土砂吐ゲートが開放されていたことが分かっていることから、排砂を考慮し、掃流砂・浮遊砂を対象とする。給砂量は上流端での水理条件に見合った平衡流砂量で与えた。	
交換層・遷移層および各堆積層厚		0.15m	
空隙率		掃流砂・浮遊砂:0.4	
粗度係数	低水路粗度係数	0.027	流れの計算を実施し計算水位と痕跡水位との比較より妥当性を確認。植生の有無による粗度の変化も考慮。
	高水敷粗度係数	0.050	



図-8 上流端境界で与える流入流量のハイドログラフ

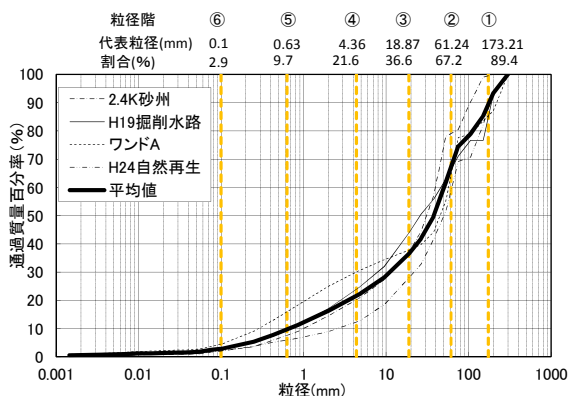


図-9 粒度モデルの粒径加積曲線

上記以外に設定する必要がある計算条件には「植生の流失条件」があり、この条件を如何に設定するかがモデルの精度を左右する重要なポイントとなるが、本検討では、無次元掃流力の最大値(τ_{*max})、無次元掃流力(τ_*)×その発生(作用)時間(hour)の2つを指標として着目した。なお、 τ_* は植生流失条件として一般的に用いられる条件³⁾であるが、これにさらに時間の概念も指標に取り入れた理由は、 τ_* のみを指標とすると、ある一定の値を超えた瞬間に植生が流失する計算となり、実際の植生の流失過程(倒伏・根の部分の浸食等)とは異なってしまうためである。

植生の流失条件は、①2011年9月台風15号時の洪水波形を用いた平面二次元の流れ計算によって各メッシュにおける上記2つの指標の値を求め、②実績の植生の流失状況を航空写真と植生調査結果から確認し、最後に①と②を比較することにより条件を見出すものとした。

図-10は、各メッシュについて計算から得られた2つの指標値の関係および植生の流出状況について整理したものである。図より、概ね $\tau_* \cdot \text{hour} > 1.0$ 、 $\tau_{*max} > 0.05$ の領域に該当するメッシュで植生の流失が発生していることがわかる。よって、本検討では、 $\tau_* \cdot \text{hour} > 1.0$ かつ $\tau_* > 0.05$ となった場合に、植生の流失が発生すると設定した。なお、植生の流失に伴う各メッシュの粗度係数の扱いは、植生が流出した場合、 $n=0.050$ から $n=0.027$ へ変化させるようにした。

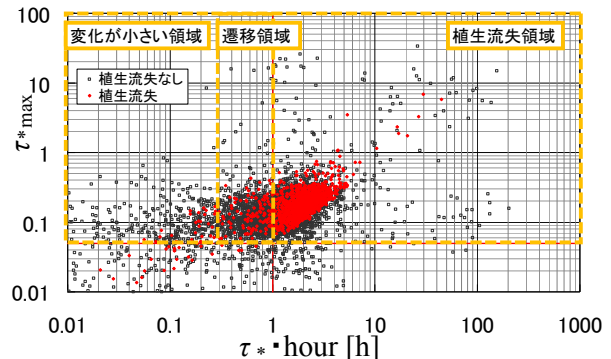


図-10 植生変化(草本類のみ)の有無と無次元掃流力と発生時間の積および無次元掃流力最大値の関係

c) 再現計算結果とモデルの妥当性評価

図-11に2010年を基準とした実測値および計算値の河床変動量の平面分布を航空写真上にプロットしたものを示す。河床変動量分布について、実測値と計算値の傾向は概ね一致している。

また、図-12に植生の流失状況について、実測値と計算値を比較したものを示す。実測値については、台風前(2010年12月)植生調査結果と台風後(2011年12月)の航空写真を用いて植生流失の有無を整理したものである。この図によると、植生流失の状況について、その詳細まで表現できているとは言えないものの、植生が変化した位置等の傾向は概ね一致している。

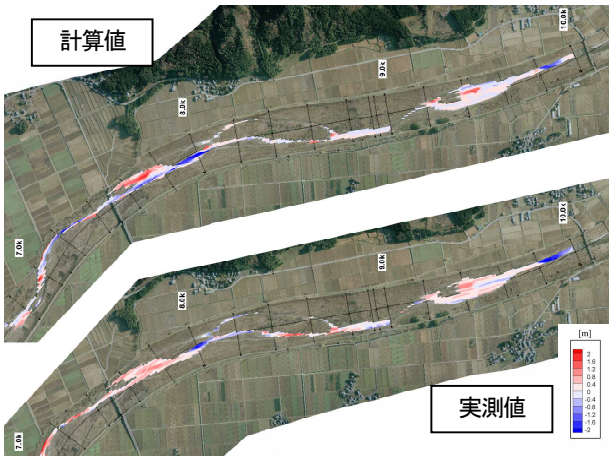


図-11 河床変動量の平面分布の例(上流部)

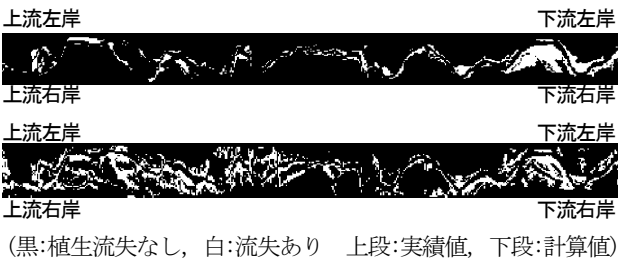


図-12 2011年9月台風15号出水後の植生流失状況

以上、河床変動量や植生変化に関する実測値と計算値の比較より、ここで構築したモデルは、概ね実測値の変化の傾向を再現できており、妥当であると考えられる。

(2) 礫河原維持条件の検討(予測計算)

ここでは、真名川において良好な河川環境を保全・向上(礫河原を維持)していくための適切な攪乱条件、すなわち、ダムからの適切な放流方法(放流量とその継続時間)を見出すことを目的として予測計算を実施した。

a) 予測計算条件の設定

予測計算の計算条件は、基本的には表-3と同様とし、それと内容が異なる項目のみ表-4に示す。

表-4 主な予測計算条件(平面二次元河床変動計算)

項目	内容
流量	150, 200, 250, 300, 350m ³ /sの一定流量を用いる。流量を与える継続時間は12時間とする。
初期河床高	2012年河道(2012年の横断測量データ, 2012年のLPデータから作成)
植生分布	2012年度の植生調査結果に基づき植生密度および植生高を各メッシュに与える
河床材料の初期粒度分布	2012年度河床材料調査結果に基づき初期粒度分布を設定。粒径階は6とした。

※表-3と内容が異なる項目のみ

ここで、適度な攪乱を与える条件については、次のように考えた。

真名川の礫河原を維持するための攪乱条件として、(1)a)で設定した植生の流失条件 ($\tau_* \cdot \text{hour} > 1.0$ かつ

$\tau_* > 0.05$) が挙げられる。しかし、この条件では河川に比較的大きな影響を与えると考えられるとともに、必要となる外力(流量)も大きくなる。活用容量には上限があることに留意すると、礫河原を維持するための攪乱は上記条件より小規模な「適度な攪乱」であることが望ましいと考える。

τ_* に関しては、粒径の移動限界である0.05を閾値として選択するのが合理的である。一方、 $\tau_* \cdot \text{hour}$ は、既出の図-10によれば、 $\tau_* \cdot \text{hour} > 1.0$ で「植生流失領域」、 $1.0 > \tau_* \cdot \text{hour} > 0.3$ で「遷移領域」、 $0.3 > \tau_* \cdot \text{hour}$ が「植生変化の小さい領域」の3つに分類できる。

以上より、本検討では真名川に対して「適度な攪乱」を与えるための条件に、植生の流失がある程度始まると考えられる条件、つまり $\tau_* > 0.05$ かつ $\tau_* \cdot \text{hour} > 0.3$ (以降「適度な攪乱条件」と称する)を採用した。

b) 予測計算結果

図-13は流量ランク別に横軸に経過時間、縦軸に全計算メッシュのうち「適度な攪乱条件」を満足するメッシュの割合を示したものである。これによれば、ある程度時間が経過すると、いずれのケースも割合の時間変化が緩やかになる。どのケースが礫河原維持に有効であるかは評価が難しいが、自然出水を再現するという観点から既往10年間で最大のダム流入流量(表-5 後述)である184.17m³/sに近い200m³/sを放流量の目安とすると、6時間継続させれば全体の2割以上の領域で適度な攪乱条件を満足する。よって、「200m³/sを6時間継続」を礫河原維持の放流方法として採用し、この200m³/sを目標流量とすることとした。

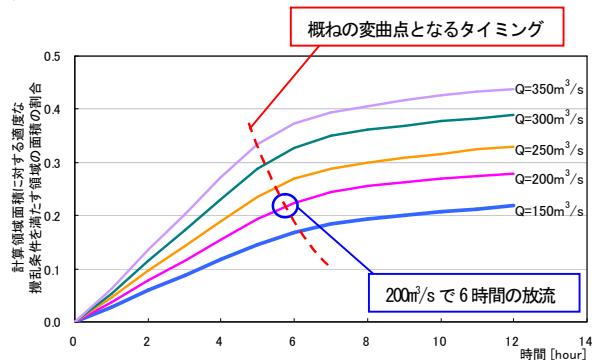


図-13 放流量とその継続時間および適度な攪乱条件を満たす領域面積の割合

5. 水収支の面から見た弾力放流の実現性の検討

ダムへの流入・放流量及び貯水量等、水収支の観点から、弾力放流が実現可能であるか検討を行った。

具体的には、直近10年間(2003年~2012年)のダムの実績運用データを用いて、融雪期に実施する弾力放流に活用容量を使用する場合のダム運用シミュレーションを実施し、弾力放流が可能であるかを評価するとともに、

弾力放流を行った場合の安全性について概略評価を行った。

a) 弾力放流実施基準の設定

直近10年間を対象に、融雪期を3/1~5/31として真名川ダムの運用状況（貯水位、流入量、ダム放流量）を整理するとともに、その結果からダム放流開始時期、融雪期の流入規模やその頻度等を確認し、弾力放流の実施基準を設定した。

真名川ダムの融雪期の運用状況を表-5、図-14に示す。これらの結果より、貯水位がEL. 365m（常時満水位）付近に回復して流入量が100m³/s以上あれば、比較的大きな融雪出水と考えられ、最低限の流量規模が100m³/sとした場合、2年に1回以上の頻度で弾力放流の実施が期待できる。よって、弾力放流は融雪期（3/1~5/31）に、流入量100m³/s以上、貯水位がEL. 365m（常時満水位）付近であることを満足する場合に実施するものとした。

表-5 真名川ダムの融雪期の運用状況

年	ダム放流の開始日	ダム放流開始日~5/31		3/1~5/31	
		最大流入量 (m ³ /s)	流入量100m ³ /s以上の発生回数	最大流入量 (m ³ /s)	流入量100m ³ /s以上の発生回数
2003	4月17日	166.62	1	166.62	2
2004	5月4日	184.17	1	184.17	1
2005	4月12日	73.29	0	79.15	0
2006	4月11日	172.79	2	172.79	2
2007	放流なし	—	—	103.73	1
2008	4月24日	52.85	0	83.07	0
2009	放流なし	—	—	74.41	0
2010	3月16日	122.01	2	122.01	2
2011	4月26日	149.93	3	149.93	3
2012	4月10日	140.08	1	164.26	2
流入量100m ³ /s以上の発生頻度		6回/10年		7回/10年	

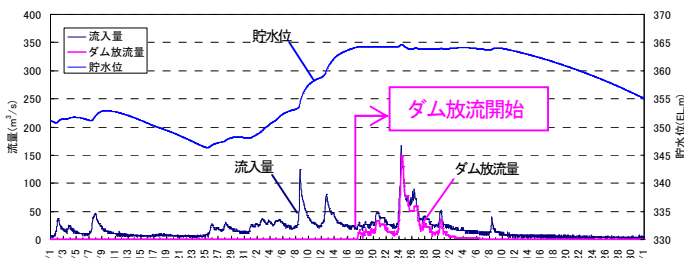


図-14 融雪期の運用状況の一例（2003年）

b) ダム運用シミュレーションの実施

a) で設定した実施基準および4で求めた放流方法で弾力放流を行った場合のダム運用シミュレーションを実施し、放流の可能性を評価した。シミュレーションの条件を表-6に、シミュレーションの実施イメージを図-15に示す。

弾力的管理として弾力放流を実施する場合、放流に用いる水量は活用容量以内に収める必要がある。活用容量は7/1~7/31で2,950千m³、8/1~9/30で2,220千m³とされているが、実際の運用にあたっては、貯められる量はそ

の年の流況により変動するため、貯留できた容量見合いで放流方法（目標流量、その継続時間）を決める必要がある。そこで、本検討では安全側の評価となるように、少ない方の2,220千m³を貯留できたとして、平面二次元河床変動計算結果から求められた目標流量 200m³/sを放流した場合、活用容量以内に収まる継続時間が何時間か、直近10年間の実績の流入波形に対してシミュレーションを実施した。

表-6 ダム運用シミュレーション条件

項目	内容
活用容量	2,220千m ³ （安全側で設定）
対象年	2003~2012の10ヶ年
初期水位 流入量 発電取水量	実績値
ダム放流量	実績ダム放流量のピークで放流量を増大
増加時	放流の原則で放流
低減時	放流の原則の逆で放流し維持流量(0.67m ³ /s)まで低減
貯水位回復時	維持流量(0.67m ³ /s) ※弾力放流を実施した場合、基本的には貯水位回復は行わなくてよいが、本シミュレーションでは、発電への影響（弾力放流を実施した場合としない場合（実績の運用）の貯水位の低下している期間、および貯水位の回復状況）を参考までに確認するため、放流開始貯水位まで回復させることとし、その貯水位に回復すれば計算終了するものとした。（7/1までに回復しない場合は、7/1時点で終了）
貯水池H-V	2010年測量結果に基づく

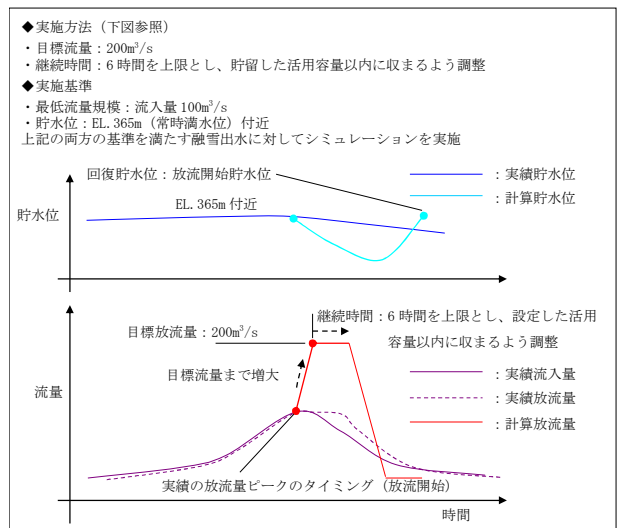


図-15 ダム運用シミュレーションのイメージ

c) シミュレーション結果と安全性の概略評価

シミュレーション結果の一例を図-16に、結果の一覧表を表-7に示す。この結果より、設定した実施基準で弾力放流を実施した場合、直近10年間の流況で評価すると「目標流量200m³/s、6時間継続」を満足する弾力放流は3回、継続時間が4時間を含めると6回実施でき、約2年に1回は弾力放流が実施可能と考えられる。ただし、これらは、活用容量を2,200千m³程度貯留することが前提条件となる。

また、真名川ダムで弾力放流を行ったときの真名川や九頭竜川本川へ与える影響や管理上の安全性について、過去の出水時のデータを用いて概略評価した結果、弾力放流を実施しても、下流河川の施設管理への影響は小さく、安全性は確保できるものと判断した。

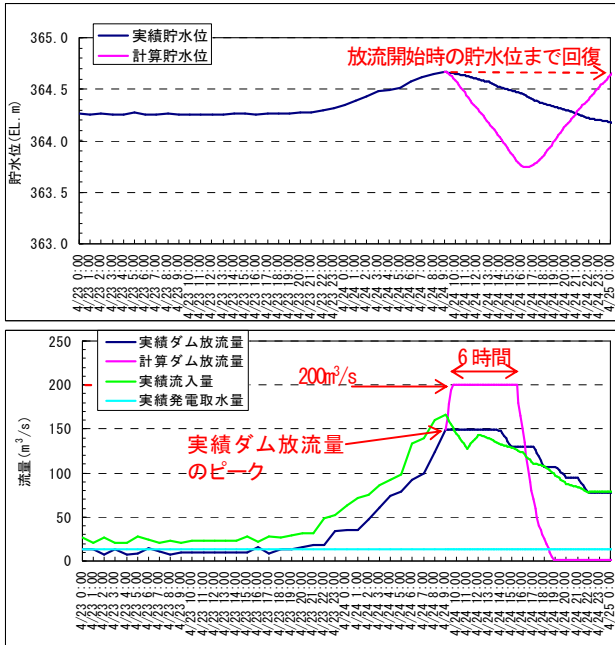


図-16 ダム運用シミュレーション結果の一例 (2003年)

表-7 ダム運用シミュレーション結果

年	使用水量 ^{※1} (千m ³)	200m ³ /s継続時間		水位回復 の判定 ^{※2}	水位低下時間 ^{※3}	
		(hr)	(min)		(hr)	(min)
2003	1,498	6	0	○	15	20
2004	1,318	6	0	○	16	10
2005	2,143	2	50	○	32	30
2006	2,172	4	30	○	20	10
2007						
2008	2,136	1	40	×	1614	0
2009						
2010	2,182	4	40	○	32	30
2011	2,151	4	20	○	25	20
2012	2,004	6	0	○	18	0

※1: 水位低下中の実績流入量-計算放流量からもとまる容量
 ※2: 放流開始の貯水位に回復したかどうかを判定
 ※3: 放流開始により水位低下してから回復するまでの時間

6. マニュアル (案) の作成

真名川ダムの弾力的管理試験を含めたダム操作に関連するルールとしては、①真名川ダム操作規則、②真名川ダム操作細則、③真名川ダム操作実施要領、④真名川ダム弾力的管理試験実施要領の4つが挙げられる。このうちの④に上述の検討結果を踏まえ、表-8に示す項目を追加する形で「真名川ダム弾力的管理マニュアル (案)」を作成した。なお、操作規則・細則については、今後さらに検討を進めた上で変更するものとし、今回は運用面のみを扱うものとしてマニュアル (案) を作成した。

表-8 マニュアル (案) の主要記載項目とその内容

項目	内容
実施目的	ダム下流河川に適度な攪乱を与えることで良好な砂州を維持するなど、ダム下流河川環境を保全・向上すること
実施時期	融雪期の3月1日から5月31日の間
実施基準	以下の条件を全て満たした場合に実施 ・活用期間中に活用容量を貯留できた場合 ・貯水位が常時満水位の標高365メートル付近まで回復した場合 ・流入量が毎秒100立方メートル以上の場合 ・目標放流量を継続した時刻が夜間に及ばないと予想される場合
実施方法	① 通常運用どおりに融雪出水を処理していき、毎秒200立方メートル (目標放流量) までダム放流量を増加 ② 目標放流量の継続時間の上限を6時間とし、貯留した活用容量以内に使用水量が収まるよう継続時間を制御 ③ 目標放流量を所定の時間継続すれば弾力放流が終了 ④ 終了後は流入量までダム放流量を低減
実施頻度	融雪期に1回
中止基準	以下のようなことが想定される場合は中止 ・下流河川で被害が想定される、または発生した場合 ・ダム管理や河川管理に支障を及ぼすおそれがある場合 ・弾力放流を実施することで活用容量以上の容量を使ってしまうと想定される場合

7. まとめ

礫河原の維持などダム下流の河川環境を保全・向上に効果的な放流方法を定めた弾力的管理に関するマニュアル (案) を作成するために各種検討を行った。まず、平面二次元河床変動計算によって、礫河原を維持するための放流方法 (弾力放流) は「200m³/sを6時間継続」と判断した。次に、直近10年間のダム流入等を整理し弾力放流の実施基準を設定し、活用容量2,200千m³を前提に水収支のシミュレーションを行った結果、融雪期に100m³/s以上の流入量が10年中6回あり、その年であれば弾力放流が可能 (約2年に1回実施可能) であることを確認した。さらに、弾力放流を実施したとしても、ダム下流河川の施設管理への影響は少ないことを確認した。以上の検討内容を踏まえ、マニュアル (案) を作成した。

今後は、作成したマニュアルをもとに本格運用へと移行する予定であるが、1,2年は弾力的管理本格運用の試行期間として作成したマニュアル等の検証を行い、その結果を踏まえマニュアルを適宜見直す予定である。また、弾力的管理の本格運用に向けては、弾力的管理に関する記述を操作規則・細則に追加して、操作規則・細則に弾力放流を位置づける (操作規則・細則の変更) とともに、操作実施要領も変更することが必要である。

参考文献

- 岡村政彦: 真名川ダムにおけるフラッシュ放流と河川環境再生の取り組みについて, 河川2009-3号
- 国土交通省 近畿地方整備局 九頭竜川ダム統合管理事務所: 九頭竜川ダム・真名川ダムパンフレット
- 大沼克弘: 植生消長シミュレーションソフトの開発について, 河川2005-12号