

日吉ダムにおける冷濁水放流問題の対策と成果

川上 貴宏¹

¹独立行政法人水資源機構 日吉ダム管理所 (〒629-0335 京都府南丹市日吉町中神子ヶ谷68)

出水や濁水に伴う日吉ダムからの冷水・濁水放流により、下流河川ではアユ生育への影響や、観光・川下り時の景観障害等の問題が発生している。この問題に対し、学識経験者や漁業関係者等を交えた「日吉ダム冷濁水対策検討会」の場で発生メカニズムや対応策を議論し、「日吉ダム冷濁水対策マニュアル(案)」をとりまとめ、それに基づき実運用を行っている。

本稿では、既存施設を活用した冷濁水放流対策について、運用方法及びこれまでの実績から得られた成果、及び対策の見直しの経緯について報告する。

キーワード 冷水放流、長期濁水放流、水質保全設備、底部取水、冷濁水対策マニュアル

1. はじめに

日吉ダムは1998年4月から供用が開始され、今年で16年目を迎えた。その間、度重なる出水や濁水に対し、防災操作(洪水調節)や利水補給を行い効果を発揮してきたところであるが、同時に出水や濁水に伴う冷濁水放流が発生し、アユ稚魚の成育への影響や川下り等遊覧時の景観障害等の問題が発生している。この問題に対し、日吉ダムでは2005年4月より「日吉ダム冷濁水対策検討会」を設立し、冷濁水発生メカニズムの推定、対応策について学識経験者を交えて議論してきた。2007年3月に「日吉ダム冷濁水対策マニュアル(案)」(以後、マニュアルという。)が策定されたのを機に実運用に移し、対策効果の検証を行っている。また、毎年開催される同検討会にて運用成果を報告し、必要に応じてマニュアルを改定するなど、継続した対策を実施している。

2. 日吉ダムにおける主要な施設の概要

(1) 取水・放流設備

日吉ダムの放流設備及び水質保全設備の位置を図-1に示す。

選択取水設備は、円形多段式のローラーゲートからなっており、取水可能範囲はEL.191.4m～173.0m、最大選択取水量は27m³/sである。低水時のダム放流は、この設備より取水している。貯水位が選択取水範囲以下に低下した場合、または、ダムからの放流量が27m³/s～50m³/sの場合、最下段のゲートを6m引き上げ、選択取水設備底部(EL.162.6m)からの取水を行う。50m³/sを超える量を

放流する場合は、常用洪水吐き(敷高EL.156.0m)からの放流となる。

また、日吉ダム上流の世木ダムでは、関西電力(株)が発電用取水設備を持っており、ここから日吉ダム下流の新庄発電所に送水することで、発電を行っている。新庄発電所は日吉ダム建設に伴い、ダム調節式発電から発電容量を有しない流れ込み式発電に変更となり、日吉ダムの完全従属運転となっている。世木ダムにおける取水量は11.16～11.6m³/sである。



図-1 取水・放流設備及び水質保全設備位置図
(深層曝気装置は2011年に複合型曝気装置に改造)

(2) 水質保全設備

貯水池底層部の嫌気化対策として、1998年3月に水没式深層曝気装置を2基設置している。吐出口標高EL.155m、吐出空気量は堤体に近い1号機が0.70Nm³/s、2号機が1.40Nm³/sである。また、1999年に、冷水放流対策として散気式浅層曝気装置(吐出空気量0.5Nm³/s)を1基設置している(吐出口標高EL.157m)。

なお、深層曝気装置については、余剰空気を浅層循環に有効利用するための改造を2011年に行い、現在はこの水没式複合型曝気装置¹⁾(図-2)と散気式浅層曝気装置での運用を行っている。

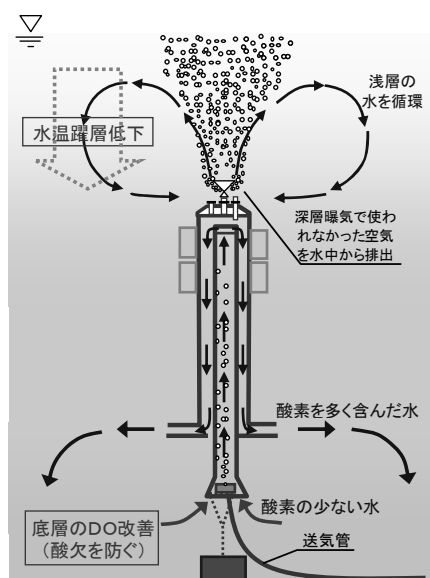


図-2 水没式複合型曝気装置

3. 冷濁水放流のメカニズム

水温躍層が十分に下がっていない5月～7月に中規模以上の出水が発生すると、ダムからの放流量が選択取水設備の能力(27m³/s)を超え、選択取水設備底部もしくは常用洪水吐きゲートからの放流となり、冷水放流となる。また、大きな出水が無いまま渇水になり、貯水位が選択取水範囲以下に低下した場合も、底部取水口が水温躍層以下の場合、冷水放流となる可能性が高い(図-3)。

長期濁水放流は、ダム湖全体が濁水化した場合で、主に貯水池の循環期(概ね11～3月)にかけて起こりやすい。出水が成層期(概ね4～10月)である場合、出水後、貯水池に水温躍層が形成され、鉛直方向の対流が弱まる。これにより、濁質が沈降し、貯水池は表層から清澄化する。ダムからの放流量が27m³/sを下回った時点で選択取水設備により表層取水が可能となり、濁水放流は比較的短期間で終了する。出水が循環期である場合、鉛直方向の対流が強く、濁質が沈降しにくく、全層の高濁度化が長期に渡るため、長期濁水放流が発生する。

10月後半に出水が起きた2004年は、出水後、貯水池の循環期となったため、図-4のように貯水池全体の高濁度化が長く続き、放流濁度が10以上の日数が34日にも及んだ。さらに、貯水位も夏期の洪水貯留準備水位(EL.178.5m)から平常時最高貯水位(EL.191.4m)の移行期間であったため、流入水とともに大量の濁質をダムに貯留したことも長期濁水放流の一因となった。

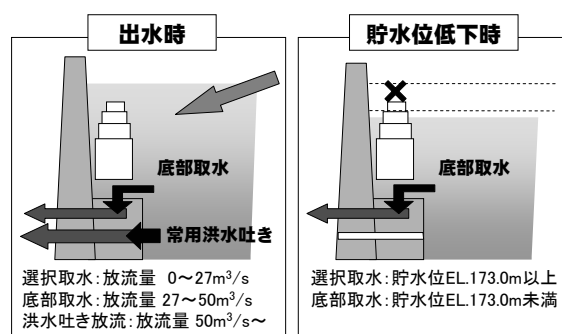


図-3 冷水放流発生メカニズム

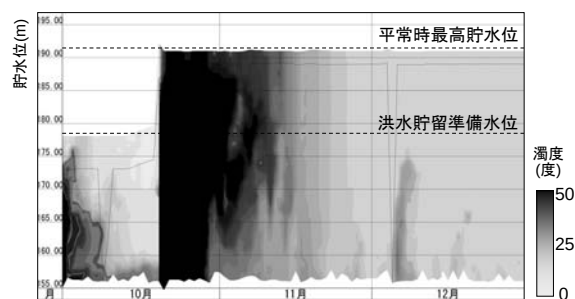


図-4 2004年10月出水前後の貯水池濁度鉛直分布

4. 「日吉ダム冷濁水対策マニュアル(案)」の策定

冷水放流の定義は、一般に過去10年間の流入水温より低い水温の放流を指す場合が多い。また、濁水放流の定義は、一般に流入濁度より高い濁度(もしくはSS)の放流を指す場合が多い。日吉ダムにおいては、現地観測結果、地元漁業協同組合の要望、学識経験者の意見等を基に、冷濁水放流を表-1のとおり定義した。

冷水放流対策はアユの生育への影響を回避する目的であるため、アユの生育適温下限の15℃を目安とした。ただし、4月はダム建設に係る環境影響評価等で示されている「放流水温は過去の流入水温の変動幅の範囲内であること」とした。その後、冷水放流の定義を2012年に改定した。改定に至った経緯は後述する。

濁水放流対策は、日吉ダムにおいて濁度が10度以下の場合、残流域からの流入があることで、下流の川下り等が行われる地点において2～5度以下となり清澄化していると考え、目標放流濁度を10度以下とした。

表-1 日吉ダムにおける冷濁水放流の定義(改定前後)

冷水放流	改定前	4月: 放流水温が過去の流入水温の最低値を下回る。 5月～9月: 放流水温が15℃を下回る。
	改定後	5月～9月: 流入水温が15℃以上であるにもかかわらず、放流水温が15℃を下回る。 ※2012.03改定
長期濁水放流		流入水が清澄になっても、ダム放流水が濁度10度以上で、1週間以上継続する。

マニュアルは、16ページからなる本編と、22ページからなる水質担当者向けの解説編がある。出水時等で操作の判断を迫られた際に速やかに判断できるようにフローチャートを多用し、わかりやすさを重視している。このマニュアルは、日吉ダム冷濁水対策検討会にて、早急に実施可能な対応策を優先的に抽出し、日吉ダムにおける既設の設備の運用を見直すことにより、大きな費用負担なしに冷濁水問題の解消・緩和が見込める方法を対策として取りまとめたものである。よって、大きな費用負担が発生するもの（取水設備の改造等）、管理規程外の実施（事前放流、維持流量の見直し等）は対象としていない。表-2に冷濁水放流対策一覧及び各対策の実施期間を示す。次章では、表-2の見出しに従い、冷濁水発生状況ごとに対策を述べたあと、運用実績及びマニュアル策定前後の効果を検証する。

表-2 冷濁水放流対策の実施期間
※対策見出し左の番号は5章の項目番号に一致

対 策	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
(1) 出水時の冷水放流対策												
選択取水設備取水標高の操作（出水直前）												
混合放流（流入量ピーク後かつ降雨終了後）												
選択取水設備による一時貯留（5月）												
(2) 取水位低下に備えた冷水放流対策												
浅層曝気の最適運用												
(3) 平水時（5月）の冷水放流対策												
底部取水（温水層温存操作）												
(4) 長期濁水放流対策												
放流施設を活用した高濁度水の優先放流												
新庄発電所活用による清水バイパス効果												
(5) 貯水位低下時の濁水放流対策												
深層曝気の最適運転（特に大出水後）												

5 マニュアル（案）に基づいた運用と成果

(1) 出水時の冷水放流対策の実績とその効果

出水時の冷水放流対策の操作フローを図-5に示す。出水時の流入量の増加によって、表層取水から底部取水及び常用洪水吐き放流への取水口切り替えにより冷水放流が予想される場合は、アユなどの下流河川の生物への影響を考慮し、選択取水設備の取水深を段階的に低下させて、急激な放流水温の変化を和らげる。これは、アユが前歴水温より5℃以上低い水塊を避ける習性²⁾があることから設定したものである。

出水中は管理規程に基づく通常の実施を行う。その後、流入量がピークに達した後かつ降雨終了後、選択取水設備と常用洪水吐きの両施設から放流する混合放流（図-6）を行う。これは、選択取水設備により取水された水温の高い表層水と、常用洪水吐きから取水された低温の底層水を混合し下流に放流することにより、冷水放流の

低減及び時間短縮を図る対策である。

また、貯水位に余裕があるドローダウン期（洪水期に向けた貯水位低下操作：4月～6月15日）の出水時は、小規模であれば、選択取水可能流量以上の流入水を一時的に貯水池に貯留することにより、冷水放流の原因である底部取水または常用洪水吐きからの放流を回避する。

2012年6月の出水（図-7）では、流入量の増加により選択取水底部からの取水が予測されたため、段階的に取水深を下げ（図中①）、放流水温の激変を緩和した。底部取水に切り替わる際の水温変化は3.4℃/hと、対策しない場合（6.9℃/h）と比較し、半分程度になった。また、ピーク確認後、ダム放流量が54m³/sになった段階で、選択取水設備表層及び常用洪水吐きからそれぞれ27m³/sずつ放流する混合放流（図中②、図-6）を行い、冷水放流時間を6時間短縮させた。

出水による冷水放流は、これまで27回発生している。それをマニュアル策定前後（1998～2006年及び2007年～2012年）で比較すると、選択取水設備から底部取水に切り替わるときの放流水温変化（図-8）の平均は、策定前の4.9℃/hから2.6℃/hに大幅に縮小した。冷水放流時間も25時間から9時間に大幅に短縮していることから、マニュアルの効果が現れているといえる。ただし、各年最初の出水時は水温躍層が十分に下がっていないため、最低水温が低くなる傾向がある。

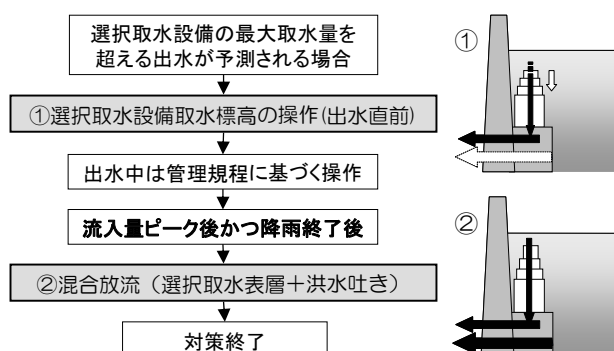


図-5 出水時における冷水放流対策の操作フロー



図-6 出水後期の混合放流状況

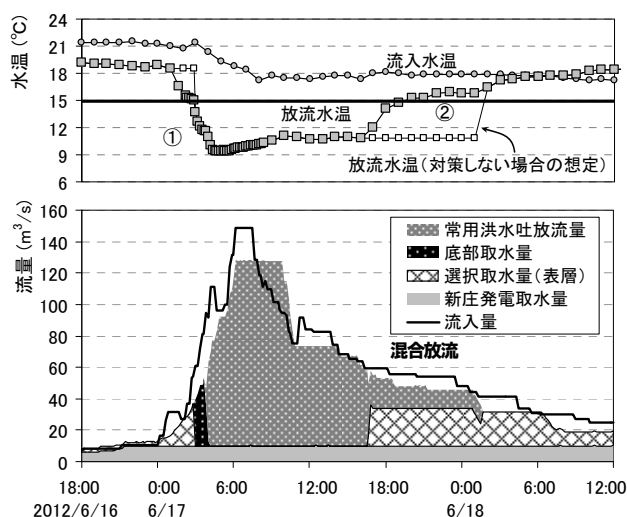
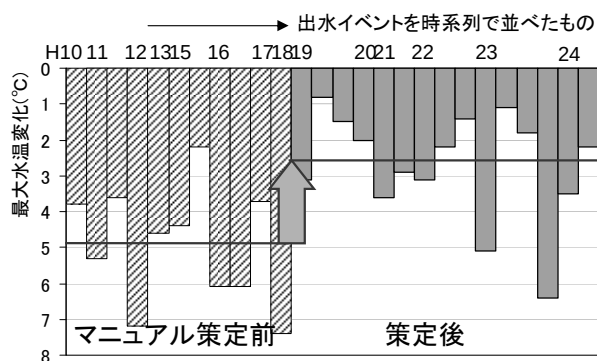


図-7 2012.06出水時のハイドログラフ及び水温変化

図-8 マニュアル策定前後における
選択取水表層→底部取水時の水温変化
(出水前から底部取水だった1回を除く)

(2) 取水位低下時の冷水放流対策の実績とその効果

渇水により貯水位が選択取水可能水位を下回る場合、底部取水口からの取水となる。このとき、取水口付近の水温が15℃以下の場合、冷水放流となる。その事態を防ぐために、浅層曝気装置を5月から連続運転させ、温水層の拡大を図っている。この運転は、底部取水口付近の水温が15℃以上になるまでとし、貯水池内の濁水の巻き上げが懸念されるときは停止する。表-3にこれまでの貯水位低下による冷水放流発生状況を示す。マニュアル策定後、冷水放流時間がいずれも0になっている。

なお、2001年より下流基準点（新町下）における確保流量を $6.46\text{m}^3/\text{s} \rightarrow 5.0\text{m}^3/\text{s}$ に見直し、さらに2010年からは、 $4.0\text{m}^3/\text{s}$ にて暫定運用することにより、一層のダム利水容量の確保（温存）が図られ、以前と比較し渇水時の貯水位低下速度が緩やかになっている。

浅層曝気運転による効果は出水時にも表れており、5月下旬～7月上旬に初めて底部取水を行った出水において最低放流水温を比較したところ、マニュアル策定前後で平均1.9℃の上昇が見られた。

表-3 冷水放流の発生状況（貯水位低下時）

期間	流入水温 (°C)	最低放流水 温 (°C)	水温差 (°C)	冷水放 流時間
1998. 9. 8～22	24.0	10.1	13.9	366
2000. 8. 4～9. 12	27.2	12.1	15.1	130
2002. 8. 13～10. 15	28.2	21.5	6.7	0
2005. 6. 28～30	26.7	9.3	17.4	41
2007. 9. 27～10. 27	23.8	24.7	-	0
2008. 8. 18～9. 30	27.7	20.6	7.1	0
2009. 9. 10～10. 8	22.2	21.5	0.7	0

(3) 春先の温水層の温存操作実績とその効果

当初のマニュアルでは、4月も表-1のとおり冷水放流を定義していたため、2010年までは、当該期間も表層の温かい水を放流していた。しかし、これだと5月のアユ放流時に下流河川の水温が15℃を確保できないことが多い。5月以降の放流水温を上げるために、4月までは低水温の水を放流しても問題ないとの漁業関係者からの意見を受け、2011年より、水温躍層が形成され始める3月から4月末まで底部取水を基本とし、冷水を優先的に抜くことにした。その間、表層付近は太陽輻射と気温上昇により暖められ、温水層の温存につながる。5月からは選択取水設備からの表層取水に切り替える。この対策は、貯水位低下時の冷水放流対策にもつながる。

図-9では、対策未実施の2010年までは、表層1～2m以深では急速に水温が低下しているのに対し、対策を実施した2011年、2012年で温水層が水深5 m付近まで到達し、一定の効果が認められた。しかし、5月の放流水温は対策前後で大きな違いが見られない（図-10）。5月に放流水温が15℃を下回る日数は、対策前平均で8日に対し、2011年は15日、2012年は17日であった。これは、洪水調節を伴う出水が5月に2回あったこと（2011年）や気温が平均気温を大幅に下回ったこと（2012年）など、4～5月の気象条件により大きく左右されることから、今後も対策を継続し検証していく。

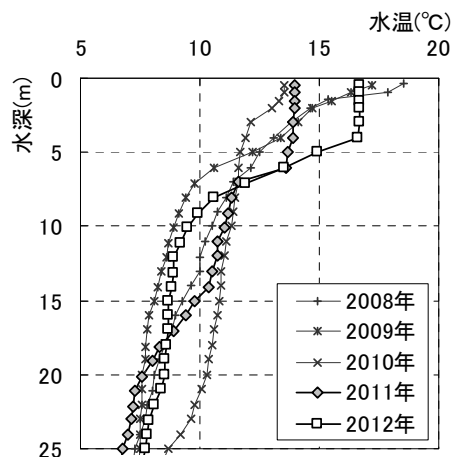


図-9 各年5月1日における貯水池水温鉛直分布

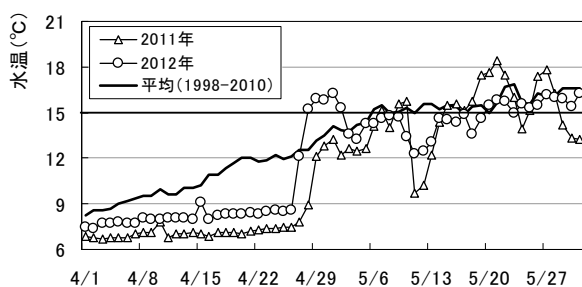


図-10 4～5月におけるダム下流水温（日平均）

※2011年は5/12-14及び5/29-31は出水のためゲートからの放流

(4) 高濁度優先放流の実績とその効果

高濁度水の優先放流は、出水後の一定期間、貯水池内の高濁度層から優先して取水することにより貯水池内の早急な清澄化を図る対策である。濁水放流期間は、当初のマニュアルでは出水後1週間としていたが、下流河川の状態を考慮し、流入濁度が10を下回るまでに変更した。流入濁度が10を下回ったら、速やかに選択取水設備を表層取水に切り替える。その際、日吉ダムに比べ早く清澄化する世木ダムの新庄発電所取水設備からの放流を清水バイパスとして活用し、日吉ダムからの放流を可能な限り少なくする。なお、冷水放流対策と異なる操作となる場合は、下流への影響を考慮し、その都度判断を行う。

2011年5月の出水（図-11）では、貯水池中層に濁質が流入したため、洪水ピーク後かつ降雨予測がないと判断された時点から、選択取水設備を用いた高濁度層からの取水と常用洪水吐きゲートからの混合放流を行った。ゲート放流終了後は、選択取水深を表層にするとともに、ダムからの放流を極力少なくした。混合放流は、濁水放流期間を短縮させるものではないが、貯水池内に貯留される濁質を少なくすることで、次回出水時や貯水位低下時の濁水放流対策につながるものである。

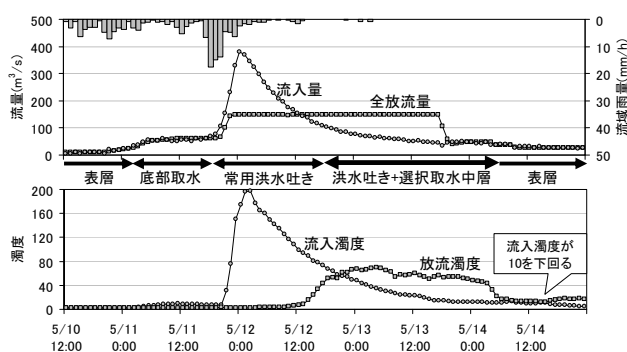


図-11 2011.5出水時のハイドログラフ及び濁度変化

(5) 貯水位低下時の濁水放流対策

大きな出水後に渇水になり、貯水位が選択取水可能水位を下回り底部取水口からの取水となる場合、濁水放流の可能性はある。2010年の事例では、大出水により上流から濁度1000を超える水が大量に貯水池に流入し、その

大半を貯留した。濁質は時間の経過とともに沈降したが、貯水位低下速度が大きく、底部取水口付近の濁水を放流する懸念が生じた。その後の降雨により貯水位が回復し底部取水は行わなかったものの、出水から数ヶ月経過してからの濁水放流対策が新たな課題となった。

2011年も同様に、大出水後に渇水傾向となり、濁質の沈降が追いつかないことが懸念された。特に、EL.160m付近以下で濁質の沈降が進んでいないことから、深層曝気運転による影響と推測した。8月18日に深層曝気装置を停止してからは、濁質の沈降が早くなり、同一標高における濁度低下も速くなった（図-12）。これを、底部取水口付近と、常用洪水吐きゲート付近の濁度の時系列変化で見ると（図-13）、曝気停止以降、常用洪水吐き付近の濁度は急低下しているのに対し、底部取水口付近は緩やかなままであった。曝気停止により濁質の沈降は促進するが、それにより底部取水口付近が早く清澄するかは今後の検討課題である。また、深層曝気装置の運転を停止すると、貯水池底層のDOの低下が著しく、嫌気化が進行することも課題である。

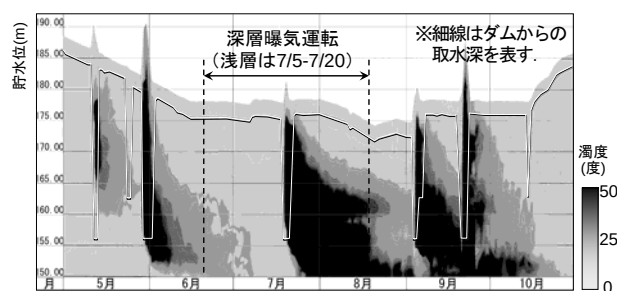


図-12 2011年5～10月の貯水池濁度鉛直分布

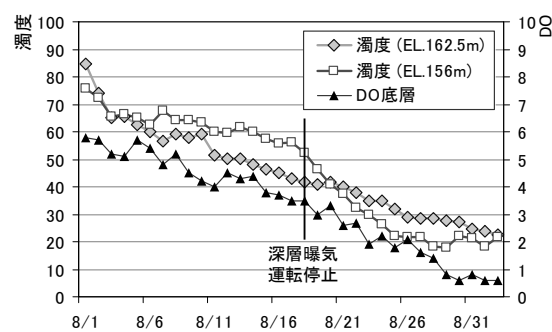


図-13 2011年8月の濁度と底層DO変化

※濁度は底部取水口(EL.162.5)及び常用洪水吐き(EL.156)付近

6 日吉ダム冷水対策からの成果と課題

マニュアル実運用の成果として、5章に示したような冷水放流の回避・期間の短縮や急激な放流水温の変化の緩和、最低水温の上昇等の効果が確認された。さらに、職員の意識向上や引き継ぎの効率化といった副次的な効

果も現れている。人員の異動が頻繁にある事務所にとって、引き継ぎ事項に漏れが生じたり、新しい担当者が慣れるまで時間がかかる場合があるため、マニュアルがあればどういう操作を行えば良いかの指針となり、結果的にミスや失念を減少させることができると考える。

一方で、対処方法が確立されずマニュアルに記載できない課題もある。例えば、非洪水期・貯水池循環期の洪水時の濁水放流対策では、洪水期同様、出水後に貯水池内の濁水を速やかに放流し水位を下げ、流入水が清澄化した段階で貯留し希釈させる方法が有効であるが、貯め上げの時期に水位を意図的に下げることはいたずらに利水容量を減少させることになり適切ではない。また、出水時に選択取水深の段階的な低下を行ったとしても、構造上底部取水に切り替わる際に取水位置が10m近く低下するため、急激な水温変化が避けられない。これらの課題は今後も継続して検討していく必要がある。

7 おわりに

漁業関係者などの改善要望者、関係自治体を含めた検討会にて、既存施設の有効活用による冷濁水対策を検討しマニュアルを作成してから本年で7年目を迎えた。日吉ダムでは、マニュアルに基づく実施と検証を継続的に行うことで、効果的な対策となりつつある。

マニュアル実運用の結果、対策の見直しや新たな対策の検討が必要とされた場合、PDCAサイクルに基づき、

仮説を立て、試験運用を行い、その検証結果を基に実運用を行い、必要に応じてマニュアルの改定を行う。さらに、日吉ダム冷濁水対策検討会を毎年開催し、1年間の事象や運用成果を報告し議論することで、マニュアルを形骸化させずに継続して対策を実施できていることも着実な成果につながっている。

このマニュアルは日吉ダムに特化してあるため、他ダムでそのまま適用するのは難しい。しかし、事象の細かい違いはあれ、冷濁水放流や富栄養化等の水質問題を抱えているダムは多い。設備の新設等の新たなハード対策は予算上採用しにくいことから、現有の施設をうまく活用して、PDCAサイクルに基づき実行・検証・改善を繰り返し行っていくことで、ソフト対策のみでも問題の劇的な緩和に繋がることもある。

施設の構造上、冷濁水放流が不可避な場合もあるが、日吉ダムでは、今後も冷濁水放流による影響がより少なくなるようマニュアルの検討・見直しを図っていき、着実な成果に結びつけていきたい。

参考文献

- 1) 佐藤友宣, 岩松裕二. 2012. 新たな曝気装置の開発「水没式複合型曝気装置」の実現報告. 平成24年度国土技術研究会
- 2) 本田晴朗. 1983. アユの遡河行動におよぼす濁りおよび水温低下の影響. 海洋科学. Vol. 15 No. 4; 223-225