低水放流設備の放流能力が小さな自然調節式ダムの濁水長期化対策の一考察

大島　正憲[1]・後藤　早苗[2]・小松　直矢[3]・泉澤　宗浩[4]

[1]正会員　八千代エンジニヤリング株式会社（〒111-8648 東京都台東区浅草橋 5-20-8 CS タワー）
E-mail: ms-oshima@yachiyo-eng.co.jp

[2]八千代エンジニヤリング株式会社（〒111-8648 東京都台東区浅草橋 5-20-8 CS タワー）
E-mail: sn-goto@yachiyo-eng.co.jp

[3]静岡県交通基盤部河川砂防局河川企画課（〒420-8601 静岡県静岡市葵区追手町 9 番 6 号）
E-mail: kasenki@pref.shizuoka.lg.jp

[4]静岡県袋井土木事務所河川改良課（〒437-0042 静岡県袋井市山名町 2-1）
E-mail: fukudo-kasen@ pref.shizuoka.lg.jp

太田川ダムは平成 21 年の供用開始後，度々洪水後に濁水長期化現象は生じた．このことより，選択取水設備より，洪水後に高濁度層からの濁水早期放流を実施したが，選択取水設備の放流能力は 1.97m^3/s と小さく，十分な濁水早期放流効果が得られなかった．このことより，選択取水設備の運用を変更し，水温躍層形成前から水深の深い箇所から放流を行い，水温躍層を低下させ，躍層上の水温勾配を緩和させ，密度を一定にすることで濁質の沈降を促進し，貯水池表層に清澄水を回復させる運用を検討した．躍層低下放流により躍層の水深を 5m 低下させることができ，水温勾配の緩和により，放流濁度 10 以上の日数は年間 22 日（令和 3 年）短くできたことがシミュレーション計算により確認できた．

Key Words : *Measures for long-term persistence of turbid water, Selective intake facility , Draw dawn for lower the postion of thermocline, Eary draw dawn for turbid water, Vertical 2D model*

1．はじめに

(1) ダム貯水池の濁水長期化現象

ダム貯水池の濁水長期化現象は洪水時に発生した濁水が貯水池に滞留し，長期にわたって濁水を放流することで，下流河川の水利用（浄水処理，親水機能の低下），河川景観の悪化，水産資源への影響，水域生態系へ影響を与えるものである．

ダム貯水池における濁水長期化問題は，電力需要が必要となった戦後復興から高度成長期にかけ，大規模なダムが建設された昭和 30 年代から 40 年代にかけて顕在化した．このうち，宮崎県の一ツ瀬川上流に建設された一ツ瀬ダム（S38 年竣工, 九州電力），高知県の吉野川上流に建設された早明浦ダム（S50 年竣工, 水資源機構）などは，ダム竣工直後に発生した台風による斜面崩壊で，大量の濁水が発生し，その後，長期にわたって濁りが貯水池に滞留したことで長期にわたって濁水が放流され，社会問題に発展した濁水長期化現象である．これらのダムは，総貯水容量が２億 m^3 を超える我が国でも有数の大規模なダムで，その後，濁水長期化対策の契機となった．我が国は静岡糸魚川構造線，中央構造線をはじめ，日本列島には多くの断層が分布し，地変動による変質を受けた地質は脆弱で，粘土・シルトの細粒分が多く含まれる．また，我が国は火山立国でもあり，流域や水源に火山が存在するダムも多く，このようなダムの流域には熱水変質を受けたシルト・粘土の細粒土砂が分布する．このような細粒土砂が洪水で貯水池に流入し，濁質が沈降できず，長期にわたって貯水池に滞留することで濁水長期化を引き起こす．また，渇水時には貯水位が低下することで，貯水池流入部の堆砂土砂を流水が洗堀，巻き上げ，貯水池を濁水化する渇水濁水が見られる．このような濁水長期化現象は，流域面積数 k㎡ の小規

模なダムでも発生しており，身近な問題として捉えられる[1),2)]．

ダムの濁水長期化問題が顕在化して半世紀以上が経過し，各ダムにおいて濁水長期化軽減対策を講じてはいるもの，抜本的な対策がなく，現在に至っている．**表-1** は我が国で実施されている濁水軽減対策について示したものである．このうち，流域対策は，ダム管理者が実施することはできないため，治山事業や森林管理者の協力が必要となる．濁水バイパスは，洪水時の濁水をバイパスさせるため，流量規模大きくなり現実的ではない．現在，堆砂対策の排砂バイパストンネルとして天竜川水系のダム等で活用されている．清水バイパスは，洪水後に清澄な流入水をバイパスして下流に放流するものであるが，ダムからの必要な放流量に対して清水の流入量が確保できるかの課題が存在する．フェンスは中小規模の洪水に対して濁水を貯水池の中底層に導き，コンジットや選択取水設備と併用して濁水の早期放流が期待できるが，大規模洪水への対応は難しい[3)]．

表-1　ダムおける濁水長期化対策

場所	対策	対策内容	備考
流域	治山・砂防	山地，渓流からの崩壊，土砂流出を防止し，濁質発生防止を行う。	・ダム管理者で実施できない。 ・治山事業，山林管理者の協力が必要。
	森林整備 樹林帯	裸地や貯水池周辺に植林等を行い，濁質及び濁水の流入低減を図る。	
流入河川	貯砂ダム (副ダム)	貯水池流入部に貯砂ダムを設け，細粒土砂の堆積を防止し，堆砂土砂の巻上げを防止。	・維持掘削が必要。
	堆砂土砂対策	貯水池流入部に堆積する細粒土砂の洗堀・巻上げを軽減するため掘削，落籍固定する。	・濁水濁水対応
	濁水バイパス	流入濁水をバイパスし，貯水池に濁質の流入を低減する。	・排砂バイパストンネルとして堆砂対策が主眼
	清水バイパス	洪水後，清水をバイパスし，下流河川の濁水を低減させる。	・濁水低減につながる清水取水量確保が課題
貯水池内	表面取水設備	濁質沈降後の貯水池表層の清澄水を取水。	・発電ダムで採用
	選択取水設備	洪水時は濁水が流入する濁水層より取水，洪水後は表層の清澄水を選択的に取水。	
	フェンス	洪水時の濁水を貯水池の中・底層に誘導し，表層に清水を温存する。	・フェンスの維持管理が必要 ・選択取水設備等と併用で効果
	早期濁水放流	洪水時及び洪水直後に高濁度層から濁水の早期放流を行い，貯水池内の濁質を減らす。	・濁質低減効果を得られる放流規模が必要

（2）太田川ダムの濁水長期化問題

静岡県森町の太田川水系の上流に位置する太田川ダムは洪水の調節，水道用水の供給及び流水の正常な機能の維持を目的として，静岡県交通基盤により建設された堤高70.0mの重力式コンクリートダムで，平成21年度に供用を開始した．流域の地質は，新生代古第三紀堆積岩類の頁岩，砂岩頁岩の互層，砂岩からなり，比較的土砂流出しやすい地質である．



図-1　太田川ダム位置図（静岡県HP）

ダム竣工後，平成23年には夏季から秋季に連続した洪水により，平成26年及び29年には秋季に発生した洪水で流入した濁水が貯水池に滞留し，秋季の全層循環期を迎え，翌年2月頃まで3か月以上にわたって貯水池全層が濁水化し，春季のアユの放流に影響を与えるなど，放流濁水の長期化が地域の社会問題となった．これら濁水が長期化した際は，いずれも24時間で200mm以降の降雨を記録している．**図-2**及び**図-3**は，濁水が長期化した平成29年～30年の貯水池の水温，濁度分布を示したものである．また，**図-4**に濁水長期化が生じた年の放流濁度の経時変化を示した．

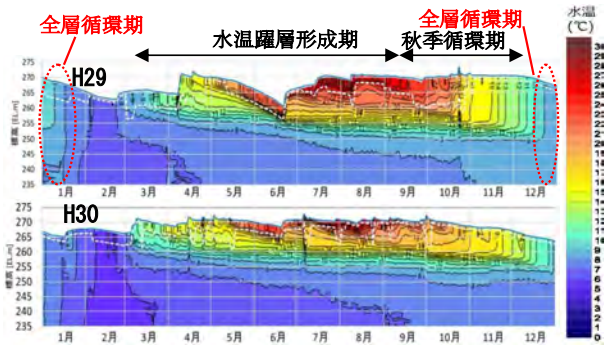


図-2　H29～H30の貯水池水温分布

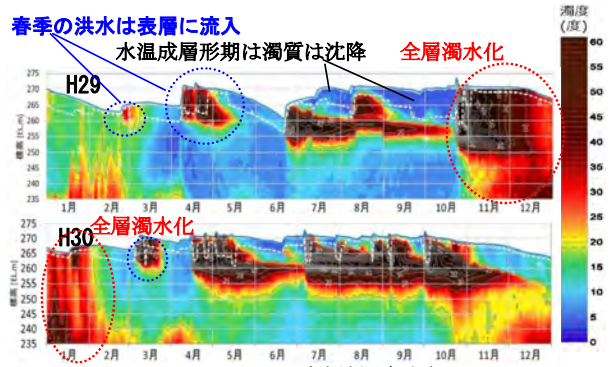


図-3　H29～H30の貯水池濁度分布

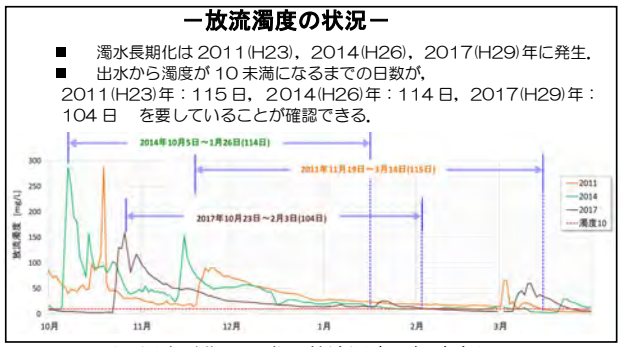


図-4　濁水長期した際の放流濁度の経時変化

2．太田川ダムの濁水対策と課題

（1）太田川ダムの濁水対策

太田川ダムでは，このような濁水長期問題に対応するため，学識経験者，漁協・森林組合等の関連機関，地域住民の代表及び行政機関からなる「太田川

ダム濁水対策検討会」を設け，濁水長期化軽減対策を検討してきた．対策の実施に際しては，太田川ではアユの遊漁が盛んなこと，夏季は下流部で親水活動が行われていることより，洪水後，早期に放流濁度を10度以下にすることを目標とした．その結果，対策案は選択取水設備を活用し，洪水時～洪水後，濁度の高い層より選択的に取水を行い，貯水池内の濁水を早期に放流する早期濁水放流を実施することとし，平成28年度より下記の要領で実施している．

－濁水早期放流の実施要領－

・流入濁度が 10 度を超えた段階で，貯水池の濁度のピーク層に取水位置を変更し，最大 1.97m³/s を，最長 6 日間放流

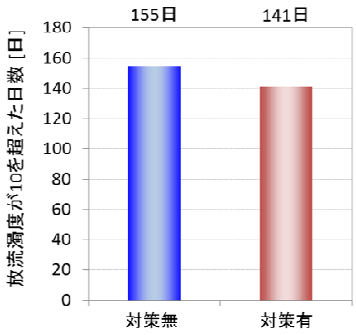


図-5　放対策の有無による流濁度 10 度を超えた日数

図-5は濁水長期化が生じた平成30年の放流濁度が10度を超えた日数を示したものである．なお，日数比較については，実測データを踏まえて，鉛直2次元モデルを用いたシミュレーションによる比較である．

濁水早期放流により，放流濁度が10度を超えた日数は14日減少した．

しかしながら，年間の140日以上は放流濁度は10度を超えていた．

(2) 太田川ダムの濁水対策の課題

堤体の中・底層に洪水吐きコンジットゲートが設置されたダムでは，図-6に示すように，洪水で流入した濁水を，水温躍層付近の貯水池中・底層に誘導し，濁水の早期放流を実施することで，洪水後，貯水池内の濁水を減少させるとともに，貯水池表層に清澄水を確保する．このように，濁水早期放流は中・底層に設置した放流量の大きい洪水吐きを併用し，密度流の流動特性を利用することで効果を発揮する．

太田川ダムにおいて放流濁度の低下日数が限られていしまうのは，太田川ダムの選択取水設備の放流能力が1.97 m³/sと小さく，濁水の早期放流効果が小さいことがあげられる．

また，太田川ダムは，EL.255.0m～EL.260.0m付近に強固な水温躍層が形成されるため，中小規模の洪水は水温躍層付近に流入・滞留する傾向がある[4]．

(2) 太田川ダムの濁水対策の課題の検証

a) シミュレーションモデルによる検証

太田川ダムの濁水対策の課題について，シミュレーションモデル及び洪水時の現地観測を実施して検証を行った．図-7は令和2年7月及び令和3年7月出水時の貯水池内の濁水の挙動を示したものである．洪水時に常用洪水吐からの放流量が多い場合，濁水は貯水池表層の常用洪水吐きに導かれ，貯水池中層以上に滞留していることわかる．

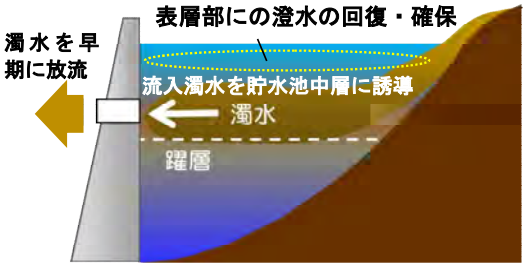


図-6　早期濁水放流の対策機構

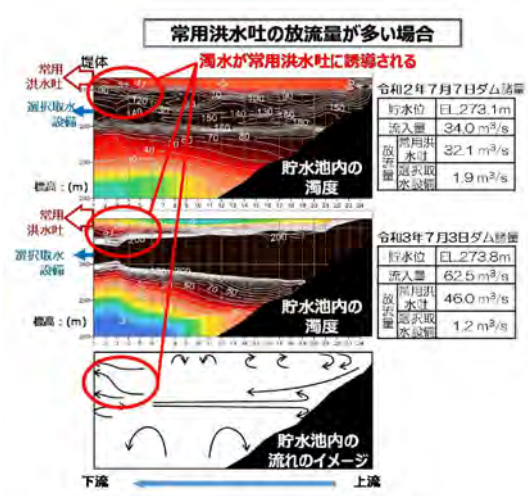


図-7　シミュレーションモデルによる濁水の挙動

b) 現地観測による検証

図-8は平成30年9月洪水における貯水池の水面を示したものである．ダムサイト上流の網場付近より，濁水が水面に表れているのが確認できる．

図-9，図-10は令和4年7月洪水において，ダムサイト洪水吐き左岸及び取水設備付近，上流網場地点で観測した水温，濁度の鉛直分布を示したものである．現地観測結果からも，水温は洪水吐き表層で約4℃低下し，濁度は洪水吐き表層で約5度上昇し，中



図-8　洪水時の濁水の挙動

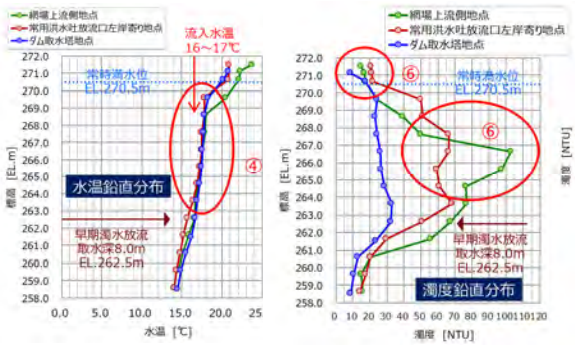


図-9　洪水時ダムサイト近傍濁度観測結果

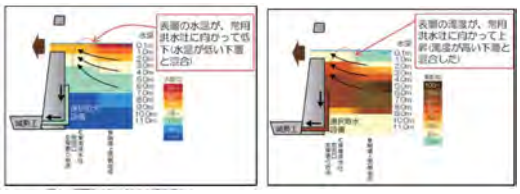


図-10　自然調節方式ダムの濁水放流イメージ

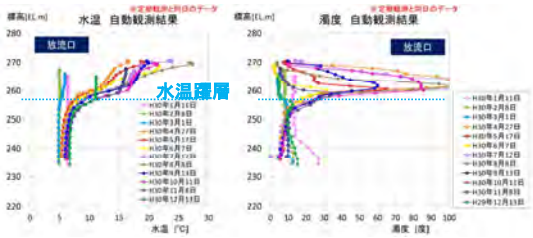


図-11　ダムサイト水温・濁度鉛直分布(H30)

層の濁度は最大で約30度減少しており，網場付近の中層の濁水が，洪水吐き表層に導かれていることが確認された．

3. 既存施設を活用した濁水軽減対策の検討

太田川ダム貯水池の濁水長期化は，以下の３つの要因により生じている．

以上の要因対して，濁水長期化を軽減するための対策について表-2に整理した．

－太田川ダムの濁水長期化の要因－

①貯水池表層の 10~15m(EL.255.0m～EL.260.0m)付近に強固な水温躍層が形成されるため，中小規模の洪水は，水温躍層付近に流入し，密度差により沈降しきれず滞留する傾向がある．

②高濁度層より早期濁水放流を実施しているものの，選択す水設備の放流能力 1.97m³/s とが小さいため，濁水放流効果が小さい．

③自然調節式のダムのため，洪水時に流入した濁水は，ダムサイト付近で表層の誘導され，貯水池中・底層に濁水を導く流動制御が難しい．

これら対策手法のうち，各対策手法の適用について検討を行い，現在の大田川ダムの選択取水設備を有効活用し，早期に対応可能な対策として，躍層低下放流を採用した[注1),注2),注3)]．

なお，浅層曝気装置については，設備の他に維持管理や動力に必要な電気代がかかることを勘案し，対策案から除外した．他の対策については，今後の有効な対策であるとして△とした．

表-2　太田川ダムの濁水長期化要因に対する濁水軽減対策手法

	対策概念	対策方法	実績
①	水温躍層を下げ，表層水温勾配を緩くし，濁質の沈降を促す．	・躍層低下放流 ・浅層曝気	早明浦ダム 日吉ダム等
②	選択取水設備の放流能力を増加させ，早期濁水放流量を増やす．	・選択取水設備の改造	二瀬ダム 緑川ダム等
③	貯水池底層から濁水を放流できるよう，流動制御を行う．	・濁水防止フェンスの設置 ・底部放流設備の設置 ・水位低下設備の活用	風屋ダム等

表-3　当面の太田川ダムの濁水軽減対策手法

	対策	概要	評価
①	躍層低下放流	選択取水設備の運用変更．新たな施設改造は生じない．	○
	浅層曝気	曝気装置の導入，維持管理，動力費が必要．	×
②	選択取水設備の改造	設備の改造に係る調査・設計等費用と時間を要する．	△
③	濁水防止フェンスの設置	フェンスのみでは流動制御できない．底部放流設備との併用が必要．	△
	底部放流設備の設置	底部放流管を設置するための調査・設計費用等費用と時間を要す．	△

4. 躍層低下放流による濁水軽減対策

躍層低下による濁水軽減対策は，太田川ダム下流においてアユの遊漁が盛んなことより，アユの遡上や放流が本格化する春季に冷水を放流して影響を与えないよう，水温躍層が形成され始める３月~４月に貯水池の中層より取水を行い，水温躍層を低下させるものである．図-12は躍層低下放流のイメージを示したものである．

水温躍層を低下させることで，以下の効果が期待できる．

－太田川ダムの躍層低下放流の効果の仮説－

① 洪水時に濁水を低い層に流入させることで，表層に清澄水を確保する．

② 貯水池表層の水温勾配が緩和することで，密度差が小さくなり，濁質の沈降を促進させる．

③ 表層部の層厚が深くなり，表層部の濁水の希釈が期待できる．

④ 水温勾配が緩和することで，取水による流動層が厚くなり，濁水の早期放流を促進する．

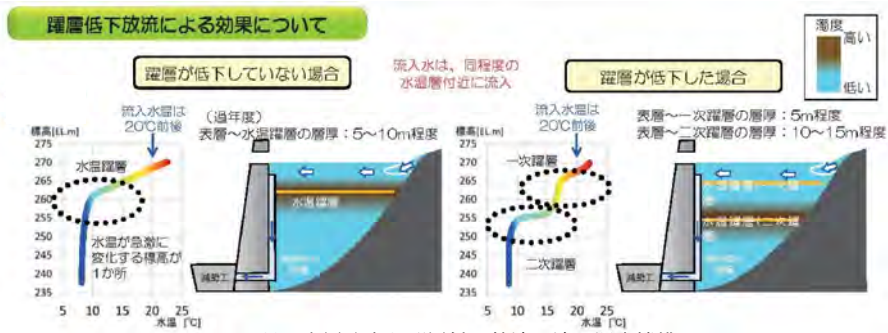


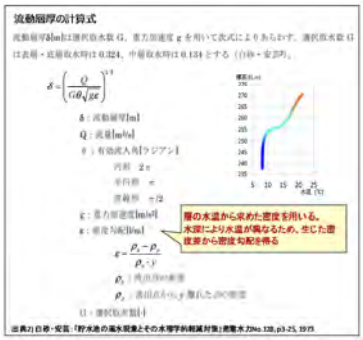
図-12　表層取水と躍層低下放流の流入濁水機構

－躍層低下放流による濁水軽減対策－

① 水温躍層形成前の 3 月~4 月に EL.250.0m より中層取水を行い，水温躍層を低下する．

② 洪水時は，流入濁度 10 度以上で，濁度の高い層より濁水早期放流 1.97m^3/s を実施．

③ 早期濁水放流を 6 日間を目安に，貯水池表層の清澄水の水深と表層取水した場合の流動層厚を算出し，清澄水の厚さ>流動層厚を確認し，表層取水に切り替え．



5. 躍層低下放流による濁水軽減対策の結果

以上の躍層低下放流方法に基づき，太田川ダムにおいて選択取水設備を用いた躍層低下放流を実施した場合の放流濁度の軽減日数について，シミュレーションモデルにより検討を行った．図-13に躍層低下放流の有無によるR3年の貯水池の水温，濁度の鉛直分布の経年変化を示す．

【水温躍層の形成状況】

・躍層低下放流により，水温躍層は5.0m程度低下している．

・躍層低下により，秋季の全層循環への移行が２週間程度遅れる．

【貯水池濁度の分布】

・躍層低下放流により，濁度50度以上の高濁度層流入位置が，3.0~5.0m程度低下している

・5月の出水時は，躍層低下放流と濁水早期放流の併用により，EL.260.0m以上の濁度が低下．

・8月の出水以降，表層部は躍層低下放流により清澄水の厚さが厚く確保されている．

・11月の全層循環への移行期は躍層低下放流により遅れ，表層部の濁度は低くなっている．

図-14は躍層低下放流により，放流濁度が10度を超えた日数を対策無と比較しものを示したもので，躍層低下放流を行うことで22日間短縮できた．

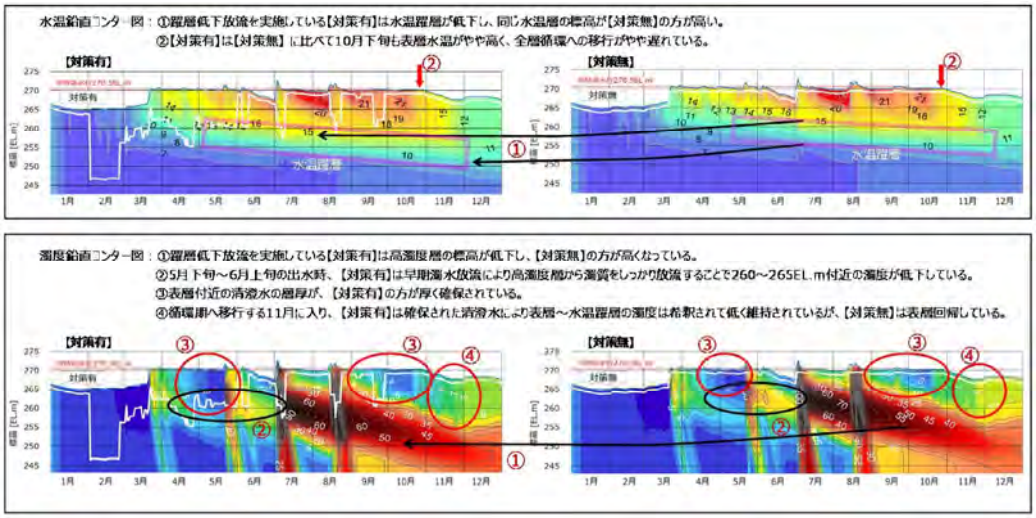


図-13　躍層低下放流と表層取水の貯水池水温・濁度分布シミュレーション計算結果

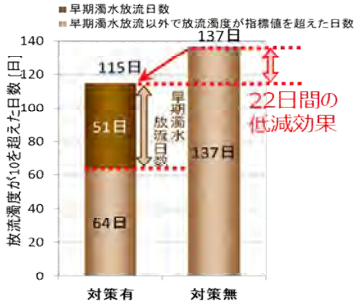


図-14 躍層低下放流の有無の放流濁度10度以上の日数（令和3年）

5. まとめ

本検討では，これまで報告事例がなかった低水放流設備の放流能力が小さい自然調節式のダムの濁水長期化軽減対策について，以下の事項が確認できた．

・低水放流設備の放流能力が小さなダムでは，洪水時の濁水の流動特性を勘案した，早期濁水放流による改善効果に限界がある．
・自然調節式のダムでは，常用洪水吐きが貯水池の表層に敷設されているため，流入濁水は貯水池表層に導かれ，中・底層に誘導することは難しい．
・春季に躍層低下放流を行うことで，洪水後，貯水池表層に清澄水を確保することが可能となり，放流濁の軽減に寄与する．

以上を踏まえ，今後は，躍層低下放流の実績を蓄積するとともに，底部放流設備の活用などの太田川ダムのような自然調節ダムの既存設備を有効活用による対策等について検討を加えていく．

付録

NOTES

注1) 津田守正，小谷口雅義，博井涼太，早明浦ダムにおける選択取水設備の運用，四国地方整備局管内技術・研究発表会資料,2018

注2) 川上貴宏，日吉ダムにおける冷濁水問題の対策と成果，平成25年度近畿地方整備局研究発表会資料,2013

注3) 電源開発株式会社，熊野川における濁水長期化軽減），第19回熊野川における総合的な治水対策協議会資料3-2,2022

REFERENCES

1)村上俊樹，鈴木祥広，大石博之，中尾登志雄：一ツ瀬ダム上流における長期濁水化に関与する土砂分布地点と地質構造の関係，土木学会論文集G（環境），Vol68, No.7，pp.251-257，2012．［Murakami,H.Suzuki,Y.Oishi, H. and Nakao,T.:Relationship between the distribution points of sand containing difficult-to-settle fine particles and the geological tructure in an area upstream from a dam:The case study on Hitotsuse Dam Basin,Miyazaki,Transaction of the japan Society of Civil Engineers,Vol68,No7,pp.251-257,2012.］

2)野池悦雄：飛騨川水系ダム群の濁水対策について，ダム工学，Vol.7，No.4，pp.241-253，1997.
［Noike,E.:Operation of Dams in the Hida River,Aiming at Reduction of Turbid Water,Journal of Japan Society of Dam Engineers, No.157,pp.43-55,1996.］

3)柏井条介，櫻井寿之：貯水池機能の保全設備－濁水長期化対策－，ダム技術，No214，pp12-pp26，2004
［Kashiwai,J.Sakurai,H:Protection facilities for Reservoir function,Engineering for Dams,No214,pp12-pp26,2004］

4)鈴木伴征，櫻井寿之，柏井条介：川治ダム貯水池の洪水時濁水現象，水工学論文集，第48巻，pp.1357-1362，2004．［Suzuki,T. Sakurai,H. Kashiwai,J:Turbid Water Behavior During Flood in the Kawaji Dam Reservoir,Annual journal of Hydraulic Engineerinng,jsce, Vol48，pp1357-1362,2004］

(Recieived June 19, 2023)
(Accepted August 21, 2023)

IN NATURAL REGULATION DAM OF SMALL DISCHARGE CAPACITY OF DISCHARGE FACILITY FOR LOW WATER, A STUDY OF MEASURES FOR LONG TERM PERSISTENCE OF TURBID WATER

Masanori OSHIMA, Sanae GOTO, Naoya KOMATSU, Munehiro IZUMISAWA

Since the Ota River Dam came into service in 2009, the phenomenon which prolonged turbid water discharge has frequently occurred after flooding. Therefore, early discharge of turbid water from the nepheloid layer after flooding has been conducted using a selective intake facility, but the discharge capacity of the selective intake facility was only 1.97 m³/s. That capacity was not enough to achieve the effect of early discharge of turbid water. Therefore, we considered the operation which will recover clarified water in surface layer. That method was that the operation of the selective intake facility was changed and the water was discharged from deeper layer before the formation of thermocline to lower thermocline, thereby reducing the water temperature gradient above thermocline and keeping the density constant and promte to sink turbidity. We confirmed that cline lowering discharge through the alleviation of the water temperature gradien, lowered 5m depth of thermocline layer and is able to short 22 days per year (2021) which the number of days with a discharge turbidity of over 10 by simulation calculations.