

成層型ダム湖における濁水特性と 選択取水効果に関する事例的研究

A CASE STUDY ON THE BEHAVIOR OF TURBIDITY CURRENT IN DAM RESERVOIRS AND SELECTIVE WITHDRAWAL METHOD

堀田哲夫¹・陳飛勇²・山下芳浩³・東海林光⁴

By T. HOTTA, F.Y. CHEN, Y. YAMASHITA, H. SHOJI

¹正会員 工学 (株)建設技術研究所技術統括 (〒103-8430 東京都中央区日本橋本町 4-9-11)

²正会員 工博 (株)建設技術研究所河川部 (〒103-8430 東京都中央区日本橋本町 4-9-11)

³非会員 工学 (株)建設技術研究所河川部 (〒103-8430 東京都中央区日本橋本町 4-9-11)

⁴正会員 工修 (株)建設技術研究所河川部 (〒103-8430 東京都中央区日本橋本町 4-9-11)

In this paper we present the behavior of turbidity current in stratified reservoirs. First, continuous calculations over 10 years for two dams were conducted. The results suggest that the extension-period of high turbidity water depends on the flood discharge and the stratification condition of dam reservoirs. Then a trial study was conducted to find a critical parameter, which can be used to determine whether an extension-period of high turbidity water will be induced. Finally, the effect of selective withdraw, as a kind of countermeasures to reduce the extension-period of high turbidity water, were predicted. The results show that this countermeasure is useful when a flood discharge is not so large.

Key Words: Turbidity current, dam reservoir, discharge, stratification, and selective withdrawal

1. はじめに

我が国で、ダム貯水池の濁水現象が社会問題となり始めたのは、一ツ瀬ダム、早明浦ダムなどでそれらの現象が顕在化した昭和40年代半ばからである。それ以来、電力中央研究所、旧建設省土木研究所、大学等で各種調査研究が行われ、現象の解明と各種予測モデルの開発が行われた¹⁾²⁾。さらに、それら技術の実際ダム湖への適用が幅広く実施され、近年築造されたダム貯水池では、有効な対策として選択取水設備(表層取水設備含)が多く設置されている。

一方、近年は従来の漁業被害や、景観・浄水処理被害等の視点に加え、生物生息環境への影響、流砂系の総合土砂管理との関連などで、濁水長期化現象への注目度が高まりつつある。そのため、選択取水に加え、曝気、流入端フェンス、バイパスなどの対策が試行されてきたが³⁾、一部の既設ダムでは、濁水長期化現象の軽減及び防止を図るため、既存の選択取水設備のさらなる有効活用が緊急の課題となってきた。

土木研究所²⁾の検討では、選択取水設備の運用に

ついて、大まかな運用方法を示したものの、一般化が困難なこともあり、洪水規模や発生時期、さらに取水設備の形状や洪水吐の位置との関係を踏まえた効果的な選択取水設備の運用方法について検討した研究は殆ど見られない。また、成層期のダム運用はダムの規模や濁水特性に関わらず、表層取水が一般的となっている。

本研究はこのような状況を踏まえ、数値シミュレーションモデルを活用し、実用的な視点から様々な洪水条件において、成層型貯水池における濁水長期化現象とその対策としての選択取水運用について検討を行う。すなわち、各種洪水の生起状況(規模・時期及び水温成層状況)と濁水長期化の関係の定量化を試行し、選択取水が有効と考えられる中小規模出水について、その効果の予測及び対応洪水規模の限界の検討を行う。

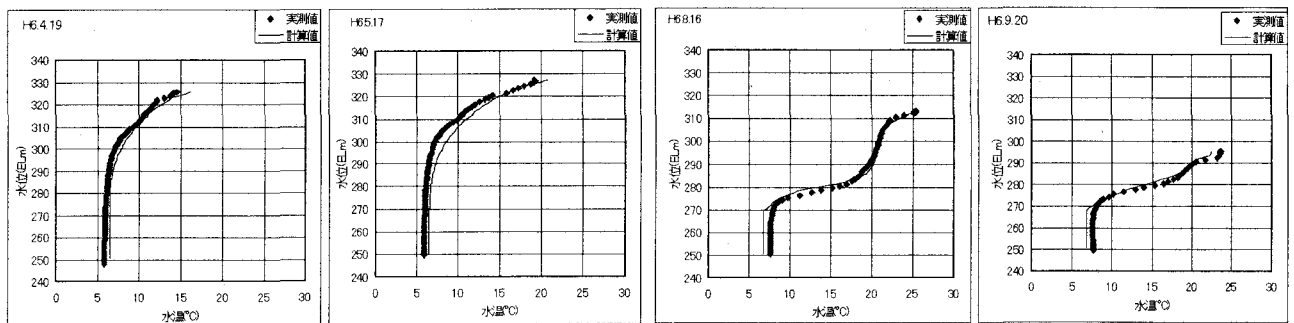
2. シミュレーションモデルの構築

(1) モデルの構成

解析に用いたモデルは松尾ら⁴⁾が開発したダム湖

① Aダムにおける水温検証結果 (H6)

ダムサイト



② 濁度鉛直分布の検証 (Aダム, H5.8.17 出水)

ダムサイト

ダムサイトから 1km

ダムサイトから 2.6km

ダムサイトから 4.2km

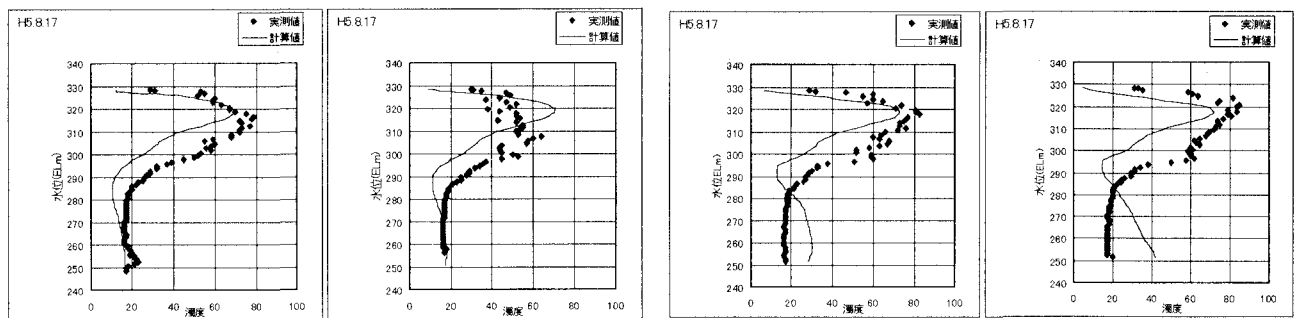


図-1 水温・濁度の検証計算結果

水理・水質モデルを参考にして作成したものであり、鉛直 2 次元の水理・濁質モデル及び熱収支モデルから構成されている^{3),5)}。

(2) モデルの検証

貯水池における濁水現象及びその対策効果を把握するため、これら現象の再現性及び精度について検討した。

本モデルは既にわが国の多数の貯水池に適用され、様々な角度から検討が行われており、現地データをよく再現することが示されている(例えば、文献3)、5))。ここでは、その一例としてAダムにおける水温・濁度の検証計算結果を図-1に示す。

図-1①は、平成6年の貯水池内水温の計算値と実測値の比較である。Aダムは四国に位置するため、春季から秋季にかけて強い水温躍層が形成される。図を見ると貯水池は4月から受熱期にはいり、8月には強固な水温躍層が形成されている。

図-1②は、平成5年8月に生じた洪水の計算値と実測値の比較である。計算値は、濁水の流入位置、ピーク値などを概ね再現できていることが分かる。

3. 濁水長期化現象と洪水流入条件の関係

(1) 検討対象ダムの選定および流入河川の流況

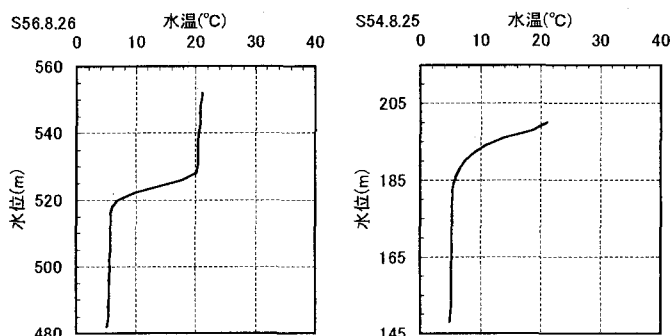
成層型ダムでの選択取水効果を検討するため、検討対象ダムは水深が比較的大きく、年回転率が小さいものから選定した。対象ダムは、最大水深が約110m、年平均回転率が6回/年である関東のBダムと、最大水深が約60m、年平均回転率が5回/年である東北のCダムである。但し、放流設備の運用ルールは、我が国の他ダムで一般的に採用されている以下の2パターンとした。

- ・ 平常時表層取水(2ダムとも)。
- ・ 洪水時ではBダムは中層(洪水期制限水位より20m下)コンジット放流、Cダムは上層オリフィス放流(常満敷高)。但し、Cダムはオールサーチャージ方式であるため、夏期の水位低下時には洪水の相当量を貯留し、水位回復を行うことがある。

検討対象期間は、Bダムの利水計算実施期間中の最大出水(S57.8.2洪水、日平均流量955m³/s)を含

表-1 ダム流入河川流況表(m³/s)

	豊水	平水	低水	渇水	最大
B ダム	19.86	15.57	11.79	9.25	277.0
C ダム	15.80	7.19	4.00	2.09	189.5



(a) Bダム

(b) Cダム

図-2 対象ダムの水温成層状況

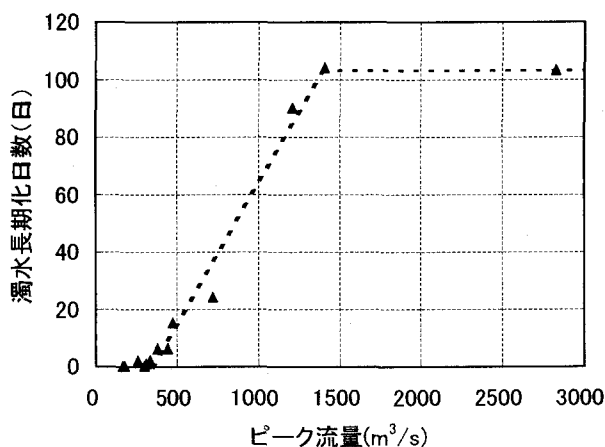


図-3 Bダムにおける洪水流量と濁水長期化日数の関係

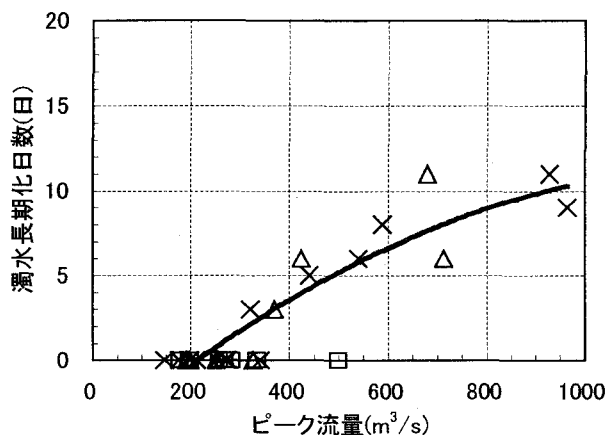


図-4 Cダムにおける洪水流量と濁水長期化日数の関係

む昭和 56 年～平成 2 年の連続 10 ケ年，C ダムは昭和 46 年～平成 2 年の連続 20 ケ年とした．検討対象期間の流入河川の流況を表-1 に示す．

入力条件は流入，放流口別の放流量，気象条件，流入水温・SS などである．流入 SS は実測データより得られた流量～SS 濃度関係式より算定し，その粒度組成は実測データを用いて 4 分割とした．各粒径の沈降速度はストークスの式より求めた．

(2) 水温成層状況

検討対象とした 2 ダムの水温成層状況を図-2 に示す．B ダムは 6 月下旬からコンジット部の放流口から放流を行い，貯水位を夏期制限水位まで低下させるため，明瞭な二次水温躍層が形成される．

一方，C ダムは常に表層放流を行うため，一次水温躍層しか見られない．

(3) 洪水時中層放流ダムにおける濁水長期化現象

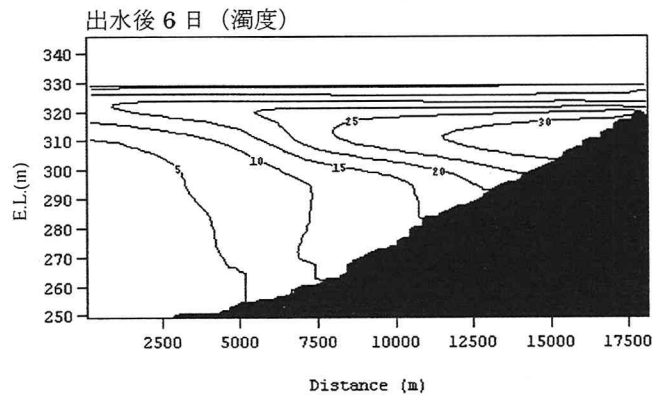
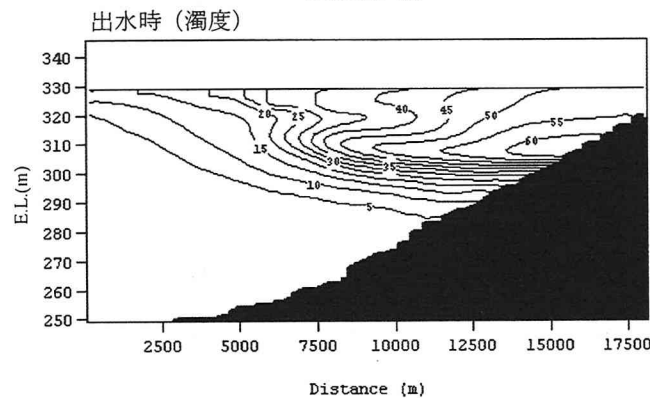
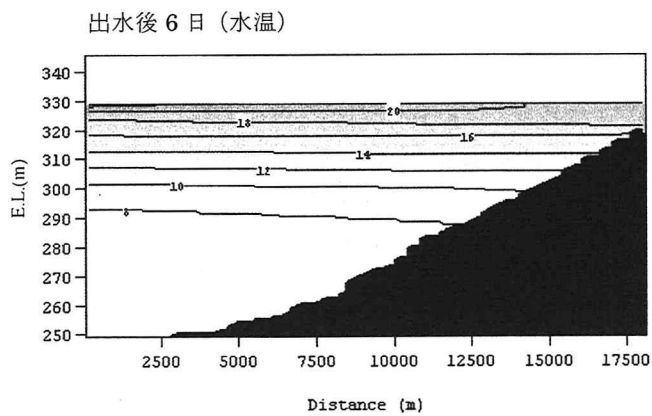
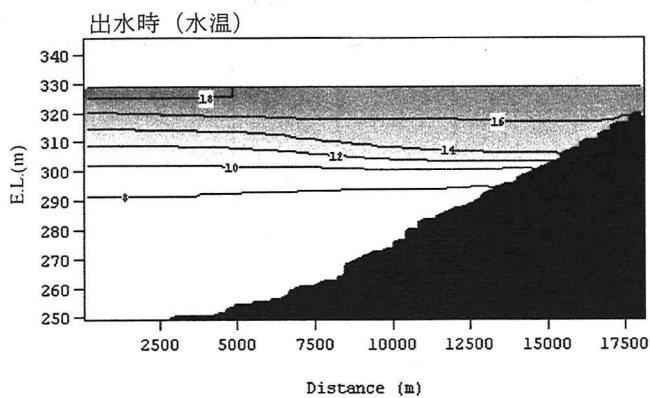
B ダムの予測期間を対象に，洪水ピーク流量と濁水長期化日数との関係を図-3 に整理した．ここに，濁水長期化日数は，流入 SS 濃度が環境基準

(SS=25mg/l) 以下であり，かつ放流 SS 濃度がこれを越える日数である（放流濁水の目標値はダムの流域特性や下流の社会環境を考慮して決定されるが，本研究では便宜上，環境基準値を指標として用いた）．

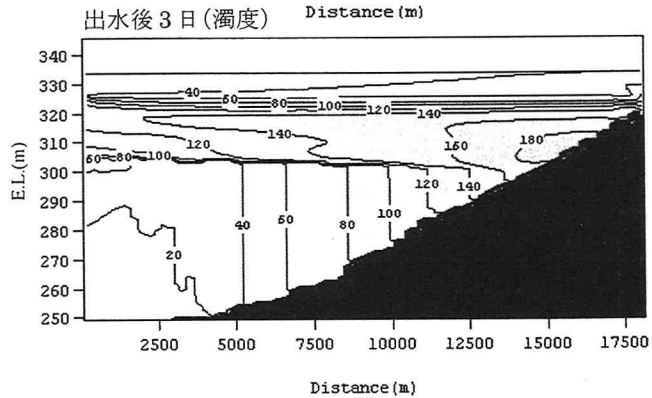
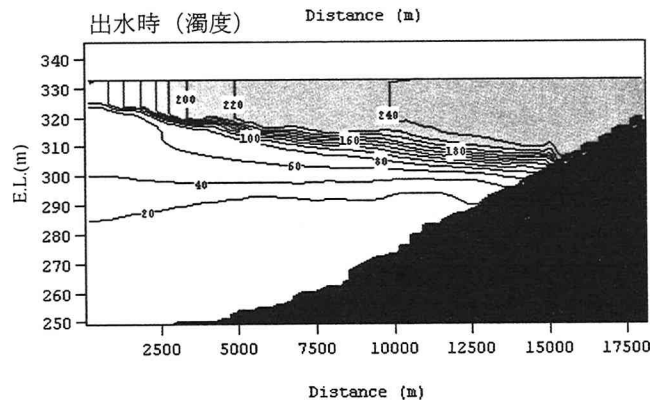
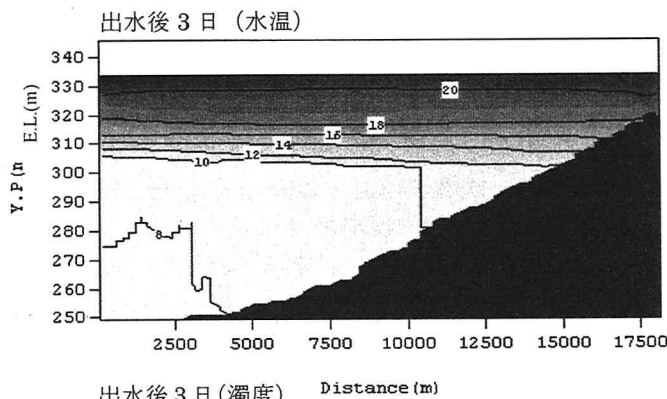
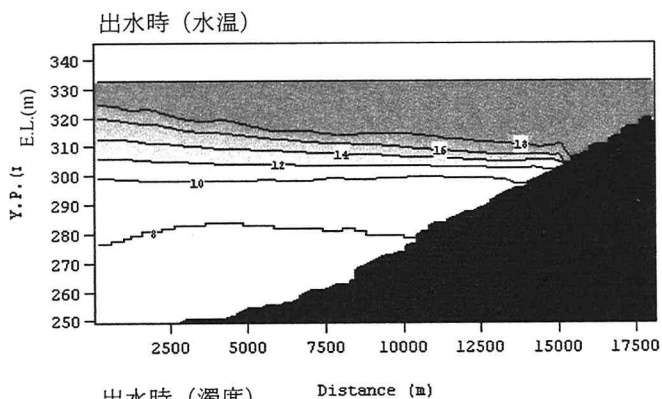
図-3 から，濁水長期化現象は洪水ピーク流量が約 300m³/s を越える場合に見られることがわかる．洪水流量が 300～1400m³/s では，流量の増加に伴って濁水長期化日数が増加するが，1400m³/s を越えると，あまり変化は見られない．これは，ある程度以上の洪水では β （ β は，洪水流入総量と洪水発生前のダム容量の比である．）が 1 以上となり，ダム湖の貯留水が洪水による流入水と入れ替わるためである．なお，B ダムは流域に畑地が広く分布しており，流入濁質量は非常に多い．

(4) 常時表層放流ダムにおける濁水長期化現象

C ダムにおける濁水長期化現象を図-4 に整理する．ここに，三角形で示しているのは流量ピークが二つ以上である洪水（いわゆる 2 山洪水），正方形は貯水池水位が低下しており，洪水のほぼ全量を貯留することによって水位回復を行っている場合である．



①小規模出水による濁度分布($\beta=0.2$)



②中規模出水による濁度分布($\beta=0.9$)

図-5 中小規模出水による貯水池内濁水挙動

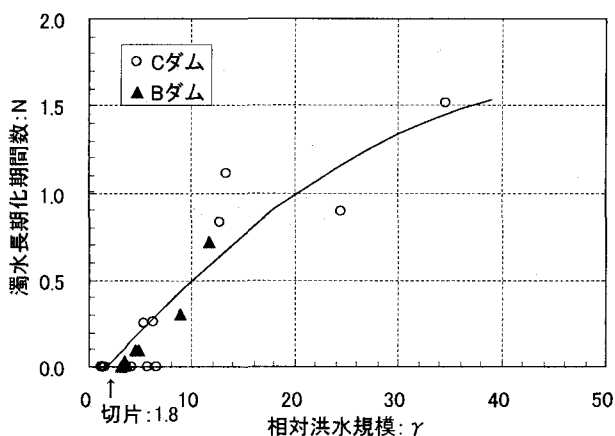


図-6 濁水長期化現象の生起条件

図を見ると、全量貯留する洪水ではほとんど放流が行われないため、ダム湖が一種の沈砂池となり、濁水長期化現象はあまり生じない。

洪水ピークが2回以上発生した場合は、濁水長期化の日数が多少ばらつくが、全量貯留する洪水を除けば、濁水長期化日数と洪水ピーク時間流量との間には良い相関があるといえる。また、濁水長期化現象は、洪水ピーク流量が約 200m³/s を超える場合に見られる。

(5) 小規模出水におけるダム湖内濁水挙動

図-5①は D ダムにおける出水時と出水後の水温・濁度変化の一例である ($\beta=0.2$)。図から出水時の濁水が中層を流下している様子が見られる。これは濁水が水温躍層に沿って流入するためであり、濁質のピーク層は躍層よりやや低い位置に存在する。出水後は表層放流が行われ、濁質が徐々に放流されるため、水温躍層下に存在する濁質ピーク層の濁度はダムサイトから上流に向かって低減していく。

(6) 中規模出水におけるダム湖内濁水挙動

図-5②は、中規模出水 ($\beta=0.9$) 時とその後の貯水池内水温・濁度分布である。この出水では明確な濁質のピーク層が見られず、躍層より上層は様に高い濁度を示している。また、出水後は、濁質が貯水池内に帯状に滞留している様子が見られる。出水後は、洪水によって破壊された一次躍層が受熱期初期と同様に再形成されるため、取水による中間流が形成され、このような現象が見られる。この濁質のピーク層は濁水長期化の原因となる。

4. 濁水長期化現象の発生条件と選択取水方法

(1) 濁水長期化現象の発生条件

濁水長期化現象とその発生条件や依存因子の関係

を求めることは、ダム運用及び濁水制御の観点から重要である。以下では、2つの無次元数を提案し、これらの関係の一般化を試行的に検討する。

3.で述べたように、水温躍層より上の水（以下、温水層）が洪水による濁水と入れ替われば、濁水長期化現象が発生する。その濁水長期化現象は濁質が水温躍層以下に沈降するまで継続する。そこで、濁水長期化の指標として以下の無次元数を導入する。

$$\text{濁水長期化期間数: } N = NC \times W_s / H_Y \quad (1)$$

ここに、NCは濁水長期化日数（NCは濁水基準によって当然変化するが、ここでは 25mg/l を SS 基準として用いる）、 W_s は濁水長期化の原因となる微細土砂の沈降速度（ここでは、通過重量百分率 10% に対応する粒径: d_{10} より算定した）、 H_Y は洪水前温水層厚である。

すなわち、濁水長期化に影響する微細土砂が躍層下まで沈降する時間 (H_Y / W_s) を用いて、濁水長期化日数を無次元化したものである。

一方、洪水規模の指標としては、 β が広く用いられているが、3.(3)、(4)においてピーク流量も重要なファクターであることを示した (β が同じでもたらだら続く洪水に比較して、短期間のうちに終了する洪水の方が濁り易い)。そこで、洪水規模の指標として、洪水ピーク流量を含めた以下の無次元数を導入する。

$$\text{相対洪水規模: } \gamma = V_F / V_Y \times Q_P / Q_{ave} \quad (2)$$

ここに、 Q_P は洪水ピーク流量、 Q_{ave} は洪水期間平均流量、 V_F は洪水総流入量、 V_Y は洪水前の温水層容量である。 V_F / V_Y は、中小規模洪水の濁水現象に影響する温水層容量を用いた β と考えることができる。

定義した無次元数を用いて、対象2ダムにおける中小規模洪水と濁水長期化日数との関係を図-6に整理した。ただし、流量ピークが2回以上となる洪水及び、全量貯留する洪水は除いてある。

図を見ると、無次元長期化期間数と無次元相対洪水規模の間に相関関係が見られる。図から相対洪水規模 γ が約 1.8 を越えると濁水長期化現象が生じている。つまり、 γ が 1.8 より小さい場合、流入濁水は温水層で希釈され、濁水長期化現象はほとんど生じないが、 γ が 1.8 以上となると温水層の希釈能力が限界に達し、濁水長期化現象が生じる。

本研究は濁水長期化期間と洪水規模の定量的な関係を試行的に求めたものであるが、検討対象ダムは2ダムであり、一般化には実測データを含む他ダムの資料を更に収集する必要があることを付記する。

(2) 中小規模出水における選択取水効果検討

明瞭な躍層が存在する場合の小規模出水（洪水後も躍層が残存する）に対する濁水対策は、選択取水が有効であると考えられる。一方、中規模出水の場

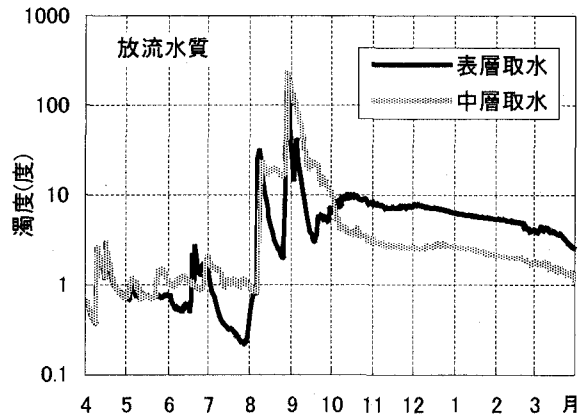
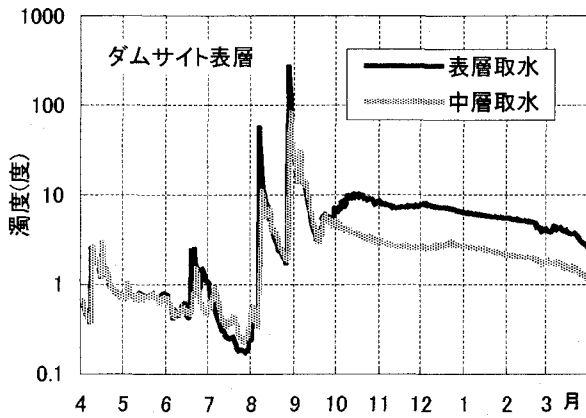


図-7 選択取水による濁水対策効果

合は、濁水が温水層の水と入れ替わり、濁水長期化現象が発生する。

4.(1)で述べたように、流入濁水の特性は相対洪水規模 γ によって変化する。したがって、選択取水設備を有効に利用し、水温躍層を低下させることによって相対洪水規模を小さくすれば、濁水長期化現象をある程度制御出来るものと考えられる。期待される効果は、以下の2つである。

- ①温水層容量が大きくなり、 $\gamma=1.8$ となる洪水ピーク流量、あるいは洪水流入総量が大きくなる。つまり、濁水長期化現象が生じる流量が大きくなる。
- ②コンジット部に洪水吐きがある場合、躍層位置を洪水吐き数高と合わせれば、濁水の早期排除が可能となり、 $\gamma>1.8$ のような洪水でも濁水長期化を軽減できる。

ここでは、E ダムを対象に常時表層取水と常時中層取水を行った場合の濁水長期化現象の発生程度を図-7に比較する。ちなみに、9月の洪水による γ は前者で26.3、後方で3.3であった。中層取水を行った場合は、洪水時と直後に放流濁度が高くなっているが、10月以後、貯水池が対流期に入るとダムサイト表層、放流とも表層取水と比較して濁度がほぼ半減していることが分かる（E ダムの目標濁度は5度であるので、非常に効果がある）。これは、中層取水を行った結果、水温躍層が低下し、相対洪水規模が小さくなった効果と洪水時濁質の早期排除効果のためである。

5. まとめ

本報告は濁水長期化現象とその要因を数値シミュレーション結果から試行的に検討したものである。結果は、以下の通りである。

- ①濁水長期化現象はダム成層状況、洪水規模と生起時期、濁質の粒径等が複雑に関連した現象であり、濁水長期化日数はこれらに大きく左右される。本検討では、相対洪水規模 γ をその発生程度を示す指標として提案した。
- ②選択取水設備を用いて水温躍層を低下させることによって、濁水長期化現象の生起流量を大きくすることが可能である。また、コンジット部の放流設備とあわせて、濁質の早期排除が可能となり、濁水長期化現象を軽減できる。
- ③成層が破壊されるような大規模洪水に対しては、選択取水設備の機能を期待することは出来ない。したがって、選択取水の限界についても認識する必要がある。

参考文献

- 1) 安芸周一, 白砂孝夫: 貯水池流動形態のシミュレーションの解析その1, 発電水力, NO.134, pp.53-66, 1975.
- 2) 森北佳昭, 天野邦彦: 貯水池水質の予測・評価モデルに関する研究, 土木研究所報告, 第182号-1, 1991.
- 3) Chen, F.Y., Yoshida, N, Sekine, H, Hotta, T, and Murata, K.: A prediction method and conservation measures of water quality in dam reservoirs, *Proceedings of the Second International Summer Symposium*, JSCE, pp.397-400, 2000.
- 4) 松尾直規, 山田正人, 宗宮功: 貯水池上流端における流動特性と淡水赤潮現象との関係, 水工学論文集, 第40巻, pp.575-581, 1996.
- 5) 堀田哲夫, 金内剛, 東海林光: ダム貯水池での濁水濁水現象と貯砂ダムによる対策効果について, 河川技術論文集, 第7巻, pp.209-214, 2001.

(2001. 10. 1受付)