

下層密度流による濁水長期化現象とその対策

BEHAVIORS OF LARGE TURBID CURRENT AND COUNTERMEASURES FOR LONG TERM TURBIDITY PROBLEM IN THE STRATIFIED RESERVOIR

堀田哲夫¹・浅枝 隆²・陳 飛勇³・山下芳浩⁴・富岡誠司⁵・塩見裕亮⁶

T.HOTTA, T.ASAEDA, F.Y.CHEN, Y. YAMASHITA, S.TOMIOKA, Y.SHIOMI

¹正会員 (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)

²正会員 工博 教授 埼玉大学大学院理工学研究科 (〒338-0825 埼玉県埼玉市下大久保 225)

³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)

⁴非会員 (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)

⁵正会員 (財)ダム水源地環境整備センター研究第2部 (〒102-0083 東京都千代田区麴町 2-14-2)

⁶非会員 (財)ダム水源地環境整備センター研究第2部 (〒102-0083 東京都千代田区麴町 2-14-2)

A series of numerical calculation results are shown on dynamic behaviors of turbidity current in the reservoir. With a large volume of the current, it flows down along the bottom of the reservoir, and the return current after clashing the dam contributes much on mixing of the turbid water with surroundings, causing prolonged turbidity in the reservoir.

The mechanism implied possible treatments to reduce the volume of the turbid water. Numerical experiments indicate that successful purging the turbid water by selective withdrawal reduces the turbid water volume as much as 85% and reduces the period of turbid water by 88%. Then, some calculations are conducted to improve the condition of sediment flow in reservoirs. The results suggest that the behavior of sediment flow can be controlled if the stratification condition or the outlet elevation in reservoirs can be changed.

Key Words : Large turbid current, long term turbidity problem, reservoir, countermeasures, stratification, selective withdrawal

1. はじめに

濁水の長期化現象は、特に下流域の利水者、住民からの景観上の苦情や水産資源の減少に対する改善要求として現れる場合が多い。特に、新しい環境アセスメント法が施行されて以来、ダム貯水池の濁水長期化現象に対する関心がさらに高まりつつあり、その現象を評価する技術が要求されている。

水の滞留時間の短い混合型の貯水池では、水の交換が比較的すみやかに行われるため、濁水長期化現象は顕在化しないものと考えられる。これに対して、成層型の貯水池では、池水の滞留時間が長い上に、密度流現象のため、池内には層状の流れが形成され

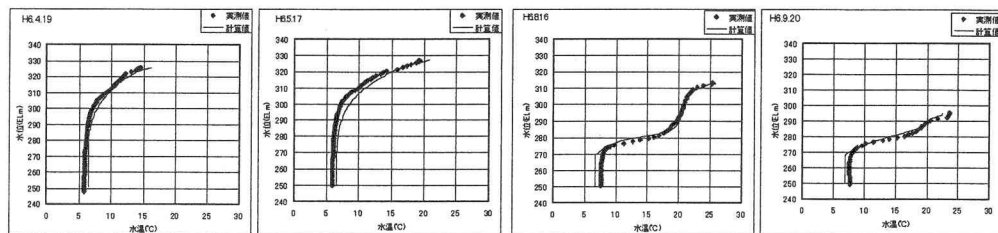
る。一般に、この流れの流速は微粒径懸濁物質の沈降速度をはるかに上廻るものであり、かつ、流れの中にはある程度の乱れの存在も観測されている。したがって、洪水などによって貯水池に流入し、池内に懸濁された微細な粒子は、層状の流れによって沈降が阻害され、洪水規模および成層状況に応じた濁水挙動を呈する¹⁾。

洪水規模を表す指標として安芸・白砂²⁾は次の式を示し、それぞれ $\beta < 1/2$ を小規模洪水、 $1/2 < \beta < 1$ を中規模洪水、 $\beta > 1$ を大規模洪水の判断基準としている。

$\beta = \text{洪水総流入量} / \text{貯水池総容量}$

・ A ダムにおける水温検証結果 (H6 年)

ダムサイト



・ 濁度鉛直分布の検証 (A ダム、H5.8.17 出水)

ST.1(ダムサイト)

ST.2

ST.3

ST.4

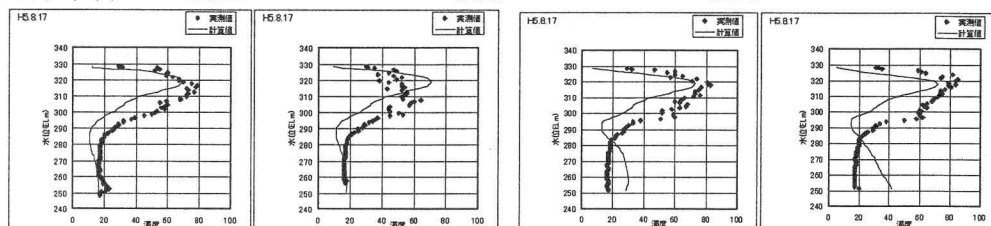


図-1 水温・濁度鉛直分布の計算値と実測値の比較

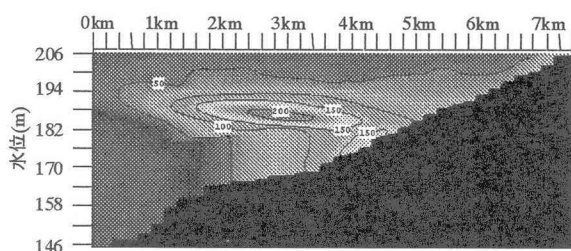


図-2 水温躍層での濁質分岐現象

安芸³⁾の分析によると、濁水の流入特性及び貯水池内での挙動は洪水規模によるものである。洪水規模は小規模から大規模にかけて、濁水流入位置は中層(躍層)、上層(躍層より上層全層)及び全層に変化する。躍層を破壊する全層濁水が生じる場合には重い濁水は河床に沿って貯水池に流入し、下層密度流が発生する。

福岡ら⁴⁾は貯水池における濁水長期化現象が成層した貯水池における濁水流入形態に寄与する現象について実験的研究を行った。そして、流入濁水は濁水の密度により、躍層での分岐有無の2パターンに分けられることを明らかにした。

Young & Lin⁵⁾は有限要素法を用い、ダム湖鉛直2次元モデルを構築して、洪水濁水における密度流および水温・濁質変化を再現した。

しかしながら、これまでの研究はほとんど中小規模洪水を対象としたものであり、躍層を破壊する大規模洪水については対策効果がほぼ無いと考えられている。

ここでは、まず、流入濁水が躍層での分岐を表現

できる数値シミュレーションモデルを構築し、そのモデルを用いて躍層が破壊され、下層密度流が生じた大規模洪水について貯水池での濁水挙動と濁水長期化の関係を解析した。その後、濁水長期化現象の特徴を考慮し、その対策について検討を行った。

2. シミュレーションモデルの構築

(1) モデルの構築

解析に用いたモデルはダム水源地環境整備センターにおいて開発した鉛直2次元モデルである。

このモデルの基礎方程式は鉛直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。モデルの詳細については文献6)、7)を参考する。

(2) モデルの検証

貯水池の濁水現象及び対策とその効果を把握するために、構築したモデルが、これら現象を再現する可能性及び精度について検討する必要がある。本解析に用いた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され現地データをよく再現することが示されている⁶⁾⁸⁾。

ここでは、その例として、Aダムにおける水温・濁度の検証計算結果を図-1示す。Aダムは四国に位置するため、水温躍層を形成する日射量が十分ある。図を見ると貯水池は4月から受熱期にはいり、8月16日には強固な水温躍層が形成されている。計算値はその傾向を良好に再現している。またH5年8月17日の濁水は標高320mに沿って流入する様子が見

られる。これは、水温躍層がこの付近に存在するためと考えられる。

また、流入濁水の水温躍層での分岐は成層化したダム貯水池での重要な現象であるため、この現象を予測できるモデルを構築する必要がある。ここでは、B ダムにおける濁水分岐現象を予測したものを図-2 に示す。図を見ると、本モデルは水温躍層での分岐現象を再現できると思われる。

3. 下層密度流による濁水長期化

水温成層が浅い位置に存在するダムでは、洪水流量が大きくなると、流入濁水は水温躍層を破壊して、下層密度流が生じる。

従来、このような流れは大規模洪水と位置付け、濁水対策効果がほぼないと考えられてきた。例えば、図-3 に示している C ダムでは、洪水時から翌年 3 月まで表層濁度が 10 以上であり、濁水が長期化した。

但し、この洪水の規模は $\beta=0.56$ であるため、貯水池内貯留水を全層入れ替える程度の洪水ではないことが分かる。

この現象を解明し、濁水対策を求めるため、出水時ダム貯水池内濁度分布の時空変化を図-3 にまとめた。

図を見るとピーク時には濁水は河床に沿って流下するが、表層付近には清澄水が残っている(12:00)。ダムサイトに到着した濁水は表層及び中層放流により、表層まで引っ張られ、ダムサイト全層を濁水化する(13:00~14:00)。

洪水低減期になると放流量が減少し、重力による沈降が卓越するため、一度上昇した濁水は再び底層に戻る。この沈降した濁質により、上流方向への圧力差が生じ、逆流が発生する(17:00)。逆流に乗って、底層で上流へ戻った濁水の一部が上流から流入水に巻き込まれ(21:00)、中層を流下する。残り部分は重力の影響によって再びダムサイトに戻る(23:00)。このような順流・逆流を何回か繰り返した後、静止するが、それ以前に、下層に流下してきた濁質はこの流動によって貯水池全体に拡散混合されてしまう。特に、上層で拡散・混合された濁質は微細粒子であるため、なかなか沈降せず濁水長期化が継続する。

4. 濁水長期化対策としての検討

(1) 濁水の流入位置と水温躍層

3.では、濁水長期化現象が生じた下層密度流につ

いて分析したが、ここでは、水温成層状況を制御することより、濁水長期化現象を防止、または軽減する方法について解析を行う。そのため、全層混合を呈した C ダムについて、躍層位置を変化させた場合の濁水挙動の変化を予測した。

現状の C ダムは常に表層取水を行っているため、浅い水温躍層が形成される。この水温躍層を低下させるために、表層取水でなく、中層取水を想定して、予測計算を行った。その結果、水温躍層が放流口付近まで低下した(図-4)。次に、表層取水と中層取水において、ダム湖内の濁水挙動を図-5 に比較する。

図を見ると表層取水する場合は、水温躍層が破壊され、下層密度流が形成される。

一方、中層取水する場合は、一部細かい粒子を持つ濁水が、中層を流下する様子が見られる。水温躍層はこのあたりに存在すると考えられる。また、一部重い粒子を持つ濁水は河床に沿って流下する。それによって下層がある程度濁水化し、洪水後の下層水温は洪水前に比べ上昇すると推定できる。洪水後の SS 分布では、中層付近にピーク層が存在する。つまり、中層取水による水温成層厚の変化は、濁水の流入位置に大きな影響を与えることが予測された。

この場合の放流濁度の変化を図-6 に示す。図によると、常時中層取水の場合は、洪水時の放流濁度が高くとなっているものの、洪水後の高濁度での放流期間は明らかに短くなっている。つまり、洪水時の高濁度流入位置と洪水吐きの位置とが一緒であるため、洪水濁水の早期排除効果が発揮されている。

(2) 下層密度流における濁水の制御に関する考察

わが国における貯水容量 5000 万 m^3 程度の貯水池では、冷水現象を避けるために、表層取水を行う場合が多い。

このようなダムにおける洪水流(あるいは濁水流)は、水温躍層が浅いため、多くの場合、下層密度流となる。このような大量の洪水流(発生頻度は2年に一回程度、洪水流入量は貯水池容量の50%程度)が流入した場合には、貯水池内の成層が安定化した状態にあるとはいえ、非常にダイナミックな流動状態となる。しかも、洪水放流は中層コンジット、あるいは表層クレストで行うため、下層に浸入した濁質を大量に含んだ洪水流はダム堤体に衝突して周囲の水と混合して濁水化を引き起こす。図-6 に示している計算例では、衝突以前の洪水で流入し高濁度水の体積は 3000 万 m^3 であつたにもかかわらず、衝突後は濁度が 20 以上となった濁水の体積は約 4500 万 m^3 にまで増大している。この機構が濁水化の期間を長期化させている要因となっていると考

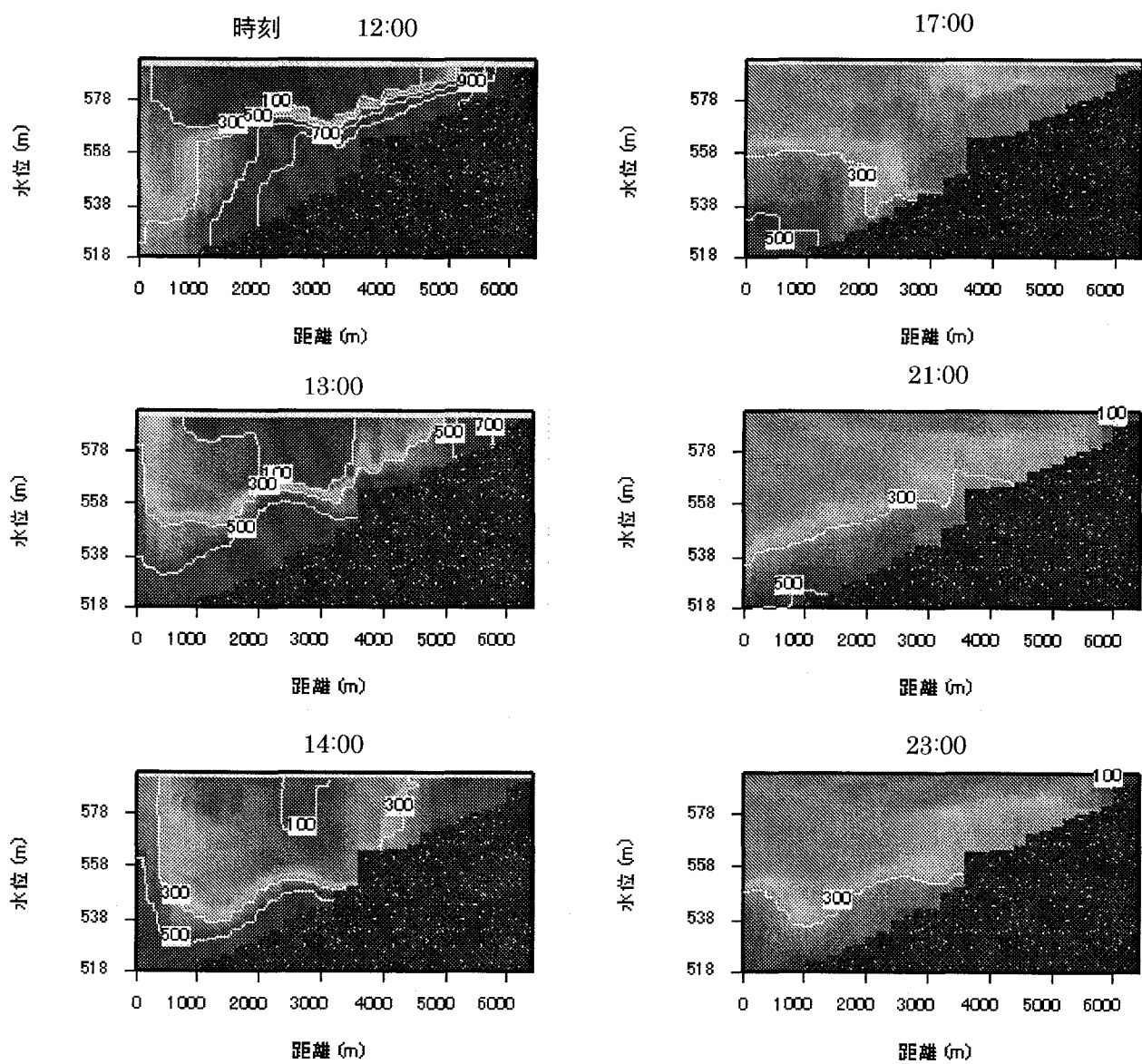
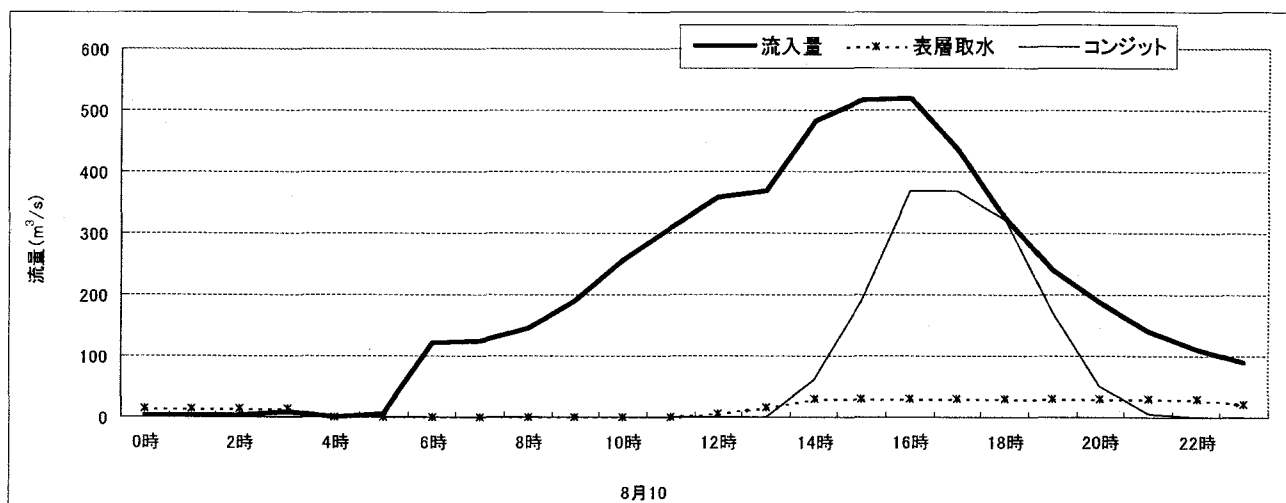


図-3 下層密度流による濁水長期化現象

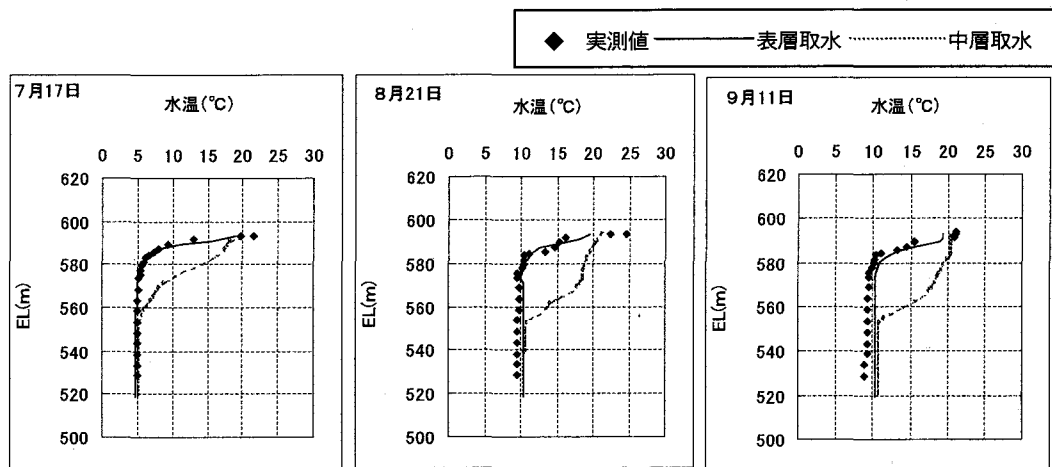
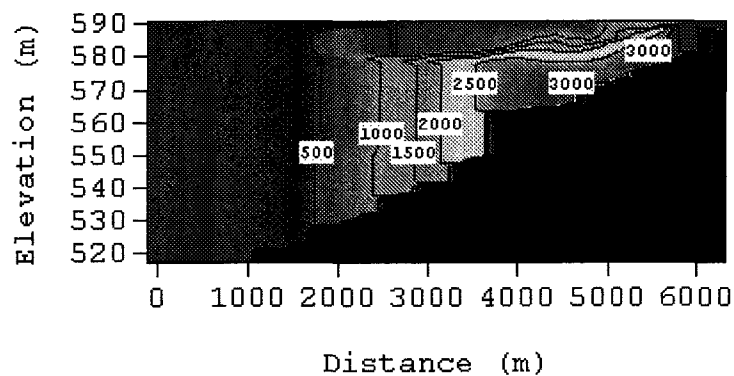
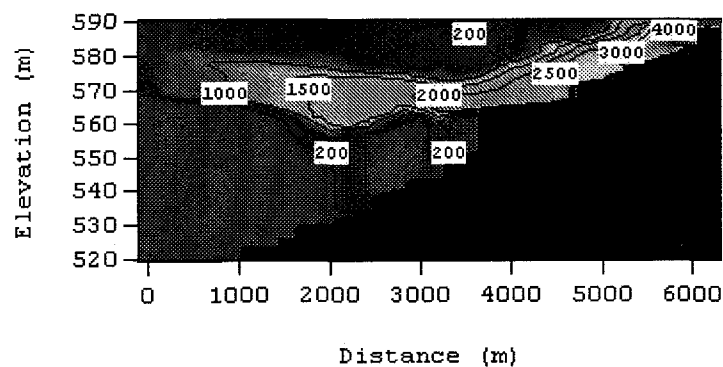


図-4 水温躍層の変化



(a) 表層取水の場合



(b) 中層取水の場合

図-5 取水位置の変化による濁水流入位置の変化

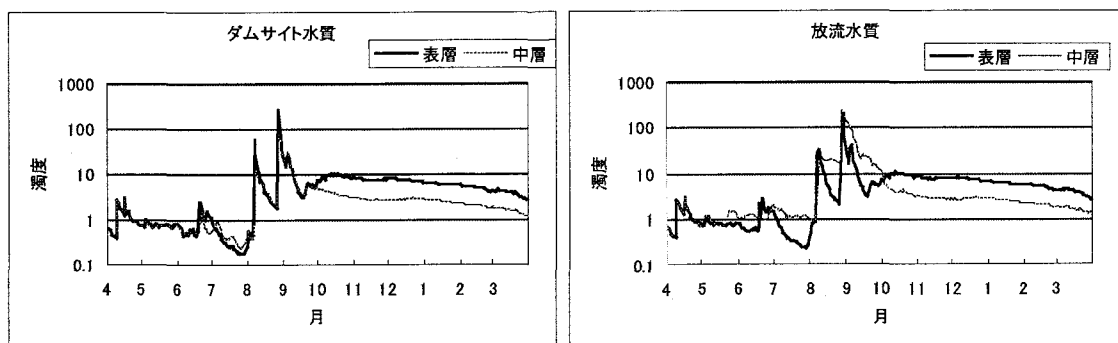


図-6 中層取水による濁水長期化現象の軽減

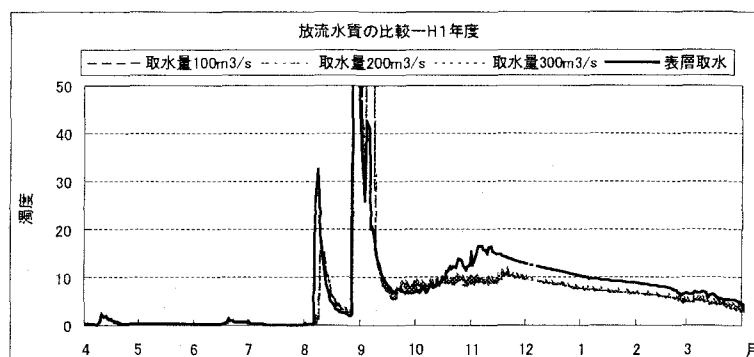


図-7 下層取水による濁水長期化現象の軽減

えられる。

この濁水の周囲水との混合をより軽減するためには、濁質を大量に含んだ下層濁水がダム堤体と衝突する時に周囲水と混合する割合を軽減するか、混合以前に放流することが有効である。

図-7は、選択取水設備を用いて、下層密度流がダム堤体に衝突することを軽減するために、最も濃度の濃い下層から最大取水量を $100\text{m}^3/\text{sec}$ 、 $200\text{m}^3/\text{sec}$ 、および $300\text{m}^3/\text{sec}$ とした場合と下層取水しなかった場合との放流水質の変化を示している。これらの結果を比較すると、選択取水設備を効率よく運用することによって、濁水長期化期間（10月～翌年3月において、放流濁度が10を越える期間）は現状の76日から9日まで軽減できることを示唆している。

以上、現段階ではケーススタディではあるが、貯水池の濁水長期化対策に対し、一つの可能性を示すことができた。

表-1 下層放流量と濁水長期化期間

ケース	濁水期間 (day)	平均放流濁度 (10月～3月)
取水 $100\text{m}^3/\text{s}$	19	7.6
取水 $200\text{m}^3/\text{s}$	16	7.6
取水 $300\text{m}^3/\text{s}$	9	7.4
現状運用	76	9.8

5. まとめ

本報告は数値シミュレーション結果に基づいて、ダム貯水池における濁水流入現象を整理したものである。この分析より、以下の結論が得られる。

- ・ 常時表層取水のダムにおいて、放流水温を確保する前提でなるべくコンジット位置と合わせて取水すると、躍層位置（あるいは濁水流入位置）が下がり、濁水長期化現象を軽減出来ることを明らかにした。
- ・ 濁水長期化は濁質を含んだ大量の密度流が下

層へ流入したときに大きな問題となる。即ち、下層密度流はダム堤体に衝突の後、周囲の大量の水と混合希釈され、問題をより深刻としていることが確認された。この対策として、選択取水設備によって、ダム堤体に衝突する濁水を効率よく放流することによって、濁水長期化を軽減できることが示された。

参考文献

- 1) 山本晃一：ダム建設による放流水の濁度変化，土木技術資料，Vol.13-9，1971.
- 2) 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.134，1975.
- 3) 安芸周一：貯水池の流動形態と水質，大ダム，NO.71，1975.3.
- 4) 福岡捷二，福岡祐介，村田和夫，荒井健，成層化した二次元貯水池に流入する密度流の実験的研究，土木学会論文報告集，No.293/II-1，pp.65-77，1980.
- 5) Young, D.L., and Lin, Q.H.: Density currents during a storm in Te-Chi reservoir of Taiwan, *Proc., 24th IAHR Conference of International Association for Hydraulic Research, Delft, The Netherlands*, pp.801-810, 1991.
- 6) Chen, F.Y., Yoshida, N., Sekine, H., Hotta T. & Murata, K.: A Prediction Method and Conservation Measures of Water Quality in Dam Reservoirs, *Proceedings of the second International Summer Symposium, JSCE, Tokyo, Japan*, pp.397-400, 2000.
- 7) 松尾直樹，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.
- 8) 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.

(2002. 4. 15 受付)