

多目的ダム貯水池における濁水長期化調査

Research on long-term turbidity water in multi-purpose reservoirs

建設省土木研究所 正員 ○中 村 昭
同 上 正員 今 村 瑞 穂
同 上 横 道 雅 己

1. まえがき

ダム貯水池の建設による河川水質問題の1つに濁水長期化現象がある。これは、貯水池に流水が長期滞留するために、洪水などによって貯水池に流入し貯水池内に懸濁分散した微細粒子が貯水池内流れによって沈降を阻害され、長期間にわたって高濁度の貯留水が放出される現象といえる。濁水長期化の要因には、流入水の貯水池内での滞流機構、及び常時あるいは洪水時の河川水の懸濁物質の性状・挙動が支配的と考えられている。

一方、濁水長期化問題への対応としては、現在のところ、表面取水設備の設置による水工学的対応、貯水池運用面からの対応等が検討・実施されているが、統一的な対応策は確立されていない。その理由としては、ダム貯水池はその立地条件、規模、目的及び運用方法がそれぞれ異なり、貯水池の水温分布、貯水池水の流動状態、濁度分布が相互に関係して複雑な現象を示すことにある。

本調査は、全国の多目的ダムにおいて観測収集された濁水長期化現象に関する資料の整理を図り、その要因を分析するとともに、これらの要因のモデル化を行なって濁水予測手法を検討したものである。この手法は、基本的には濁水の貯水池流入、貯水池内の流動、沈降等をモデル化し、貯水池を表層・中間層・下層の3層に分割して各層における濁質の収支式をたて、これを数値的に解いてダム放流濁度を予測するものである。本調査に用いた観測資料の大半は、国土開発技術研究センターが「ダム貯水池に関する水質調査委員会」の調査活動の一環として収集したものである。

2. 全国調査の概要

最初にダム貯水池における水質問題の実態を把握するための調査概要を紹介する。

2-1 アンケート調査

ダム貯水池における水質問題の実態を把握するために、昭和49年に全国の約140ダムについてアンケート調査が実施された。

客観的に判断した水質問題としては、堆砂・塵芥その他、濁水、富栄養化、腐水臭気の順である。

次に水質問題の社会的側面について、新聞その他の報道機関に取りあげられたダム数は、冷水が6%、濁水が27%、富栄養化が18%である。濁水問題に対する対応の程度としては、「しばらく様子をみる」といった人が多い。

社会的にとりあげられたダム水質問題が影響を及ぼしている部門をまとめると表-2のようになる。

これによると、冷水は農業部門、濁水は観光・レクリエーション、漁業、上(中)水道と広範な部門に、富栄養化も上(中)水道、漁業、観光・レクリエーションなど広範な部門に影響を与えていることがわかる。

2-2 水質調査要領

表-1. 社会的にとりあげられたことのある水質問題の有無

水 質 問 題	問 題 有 (%)	問 題 無 (%)
冷 水	5.98	94.02
濁 水	27.12	72.88
富 栄 養 化	17.54	82.46
腐 水 臭 気	6.90	93.10
特 殊 物 質	2.59	97.41
有 害 物 質	3.45	96.55
酸 性 水	1.71	98.29
堆 砂 塵 芥	21.55	78.45
合 計	10.86	89.14

表 - 2 水質問題によって発生した問題点

	上(工)水道	農 業	漁 業	レジャー・観光	ダム管理	計
冷 水	3.6	60.7	25.0	7.1	3.6	100(%)
濁 水	21.6	8.0	28.0	36.0	6.4	100(%)
富栄養化	32.4	10.8	24.3	18.9	13.5	100(%)

ダム貯水池における水質問題の原因・対策を究明するため、全国的に統一された方法によって水質状況を把握することを目的として「ダム貯水池（湖）水質調査要領」が昭和50年5月に制定された。同要領は調査の目的を表-3に示すように5ケースに分けている。

このうち、濁水調査はケースⅠ及びⅣであり、調査項目は水温、透明度、水色、DO、電気伝導度、濁度、水

表 3 調査要領分類

種 類		調 査 の 目 的 と 基 本 的 な 考 え 方
ケース	調 査 目 的	
Ⅰ	冷水、濁水調査	(イ) 一般的なダム、貯水池で実施する。 (ロ) 調査地点、調査項目は最小限とする。 (ハ) なるべく調査頻度は多くする。
Ⅱ	富栄養化調査	(イ) 富栄養化の進行しているダム貯水池、その進行が予想されるダム貯水池で実施する。 (ロ) ケースⅠに水質調査項目を追加し、春、夏、秋3回実施する。
Ⅲ	富栄養化調査	(イ) ケースⅡの調査を実施するダム、貯水池のうち生物調査等を必要とする貯水池で実施する。 (ロ) ケースⅡに生物調査項目を追加し、春、夏、秋3回実施する。
Ⅳ	冷水、濁水調査	(イ) 冷水・濁水の顕著なダム貯水池のうち、特に詳細な調査を必要とするダムで実施する。 (ロ) ケースⅠの項目の他SSを加え、調査地点、調査頻度を多くする。
Ⅴ	富栄養化調査	(イ) 富栄養化の進行しているダム貯水池のうち、特に詳細な調査を必要とするダムで実施する。 (ロ) ケースⅢに底質調査項目を加え、その他の調査の分析も詳細とする。 (ハ) 調査地点、調査頻度は多くとる。最低季節変化の把握できる頻度とする。

文気象データ等である。同要領は、昭和50年度途中から適用され、約130ダムで観測資料が収集されている。

2-3 貯水池成層型の分類

貯水池は日射、大気圏との熱授受、流入水・放流水に伴う熱流入・流出等によって独特の水温分布を形成するが、大きく分けると成層型、中間型、混合型に分けられる。各々のダム貯水池がどの型になるかは、気象、流況、貯水容量、取水・放流設備の型式・位置等によって決まると考えられている。水質調査委員会が全国の既設ダム85ダムについて貯水池の成層型（水温経月変化図で判定したもの）と水理指標の関係を調べたところ、表-4のような結果を得ている。

表 - 4

評 価	α	F_D	α'_7
成層が形成される可能性が十分ある	<10	<0.01	<1
成層が形成される可能性がある程度ある	$10 \sim 30$	$0.01 \sim 0.05$	$1 \sim 5$
成層が形成される可能性がほとんどない	$30 <$	$0.05 <$	$5 <$

ここに、 $\alpha = Q_c / V_t$ 、 $\alpha_7 = Q_7 / V_t$ 、 Q_c = 年間総流入量、 Q_7 = 7月総流入量、 V_t = 総貯水容量である。また、 F_D は内部フルード数の1種であって、

$$F_D = \frac{L Q}{H V_t} \sqrt{\frac{\rho_0}{g} \left(-\frac{d\rho}{dz} \right)} = \frac{v}{\sqrt{gH}} \sqrt{\frac{\rho_0}{H} \left(-\frac{d\rho}{dz} \right)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 L = 貯水池長、 Q = 平均流入量、 H = 貯水池平均水深、 V_t = 総貯水容量、 v = 貯水池内平均流速、 g = 重力加速度、 ρ_0 = 基準密度、 $d\rho/dz$ = 平均密度勾配

である。明らかに、これらの水理指標は流況の影響を受けるので、水理指標によって成層型を判定するときには経年的に検討する必要がある。また、 F_D は $d\rho/dz$ の項を含むから今後建設されるダム の成層型の判定を行なうときには $d\rho/dz$ を何らかの方法で推定する必要がある。

2-4 濁水指標の検討

濁水問題としては流入水と放流水の濁度の変化及びその期間長が重要である。これに関与する要因としては貯水池内流動状態、流入濁質量及び濁質の沈降特性が支配的である。図-1は成層型貯水池21ダムの昭和50年夏～51年夏に観測されたダム上下流濁度差の最大値と流域荒廃地・崩壊地面積の相関を示したものである。上下流濁度差を濁水指標の1つと考えると荒廃地・崩壊地面積との間にかなり相関が認められる。

その他の指標については、既設濁水発生ダムについて濁水との関連について調べたところ、1つの要因のみをとり上げて判定することは困難であるが、年間降水量、地すべり地帯、急傾斜地、地質区、グリーンタフ地帯、変成帯、植生等の要因を総合的に考慮すると全国の31県、半数以上の地域で濁水問題発生の恐れがあるとしている。

2-5 今後の調査

今後のダム貯水池水質調査は、調査目的を水質監視のための調査（定常調査）、水質機構解明のための調査（詳細調査その

1）、富栄養化等の特定目的のための調査（詳細調査その2）に分け、改訂調査要領による調査が昭和54年度から実施されている。

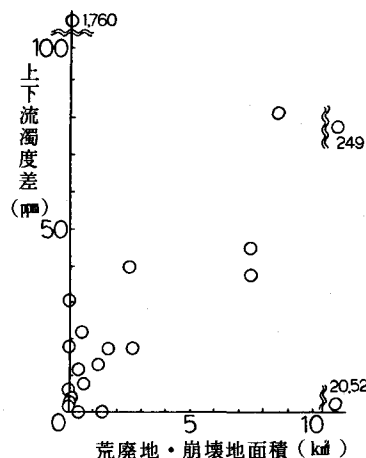


図-1

3. 濁水長期化要因の分析

(1) 貯水池内の水温分布

ダム貯水池内の水温分布は、夏季に表層付近に日射・気温による1次躍層を形成するほか、取水口・放水口標高付近に熱移流による2次躍層が形成される場合が多い。2-3で述べたように、2次躍層の形成は、 α （=年総流入量/総貯水容量）がおおむね10以下の貯水池で見られる。図-2は成層型貯水池の水温分布経月変化図の1例であるが、春から秋にかけて2次躍層が形成され、夏季には安定した成層状態になる。このとき取水口・放水口的位置及び取水・放水量は、表層部の熱移流を促して2次躍層形成の大きな要因となっている。さらに、2次躍層の標高は洪水流入より低下し、洪水規模に応じた低下量を示すとともに、洪水流入量がある限度を越えると躍層は破壊される。

一方、秋から冬にかけて日射量・気温の低下により表面水温が、低層水温より低い状態になると、貯水池内に対流循環がおこり水温躍層は消滅し、その後は水温はほぼ一様となる。

(2) 洪水後の貯水池内濁度分布

成層型貯水池へ濁水が流入すると、流入水は流入水密度

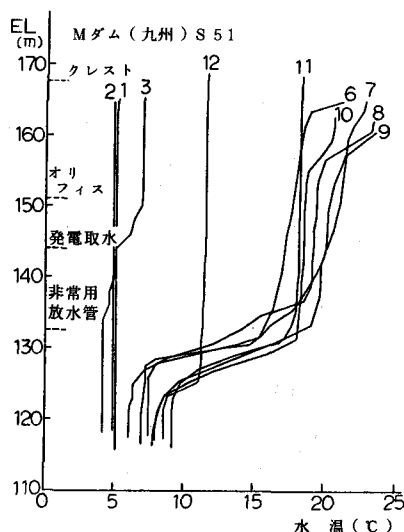


図-2

に等しい密度の層に流入し、密度流となって濁水層を形成するといわれている。図-3は、九州地方Mダムにおける洪水時の貯水池内濁度分布（ダムサイト直上流）の例であり、2次躍層よりも上部に濁水が流入し、この層に滞留した濁水が徐々にダム下流へ放出され濁水長期化の原因となっていることがわかる。図-4は四国地方のSダムにおける濁度分布観測例（ダムサイト直上流）であるが、同様に2次躍層上部に流入した濁水が約1カ月間にわたって放出されていく様子がわかる。

また、貯水容量を上まわるような大洪水が流入したときには、貯水池水の大部分が流入水と入替わり貯水池成層は破壊され、貯水池は全体が懸濁化する。洪水規模に応じて流入濁質も増大するから、洪水後の濁水放出は相当長期化する。

(3) 懸濁物質の粒度分布

濁水長期化の要因としては懸濁物質の沈降特性も重要である。粒径的にみると濁水長期化をひき起す懸濁物質の粒径は数 μ 以下のものが大部分であり、その沈降速度（静水中）も1m/day以下である。

また、洪水時の懸濁物質の粒度分布は洪水ごとに変動し、さらに図-5に示すように洪水ピーク時には粒径の大きなものが増え、洪水が低減するに従って粒径の小さなものが増大する。また、濁水が貯水池内を進入してくるに従って粒度分布は小粒径側へ移行していくようである。したがって濁水予測を行なうにあたっては、濁質の質的变化についても実態を把握しこれらの条件を考慮することが要求される。

また、濁質の沈降特性に関連して、コロイド粒子の分散・凝集状態が重要な要因といわれている。

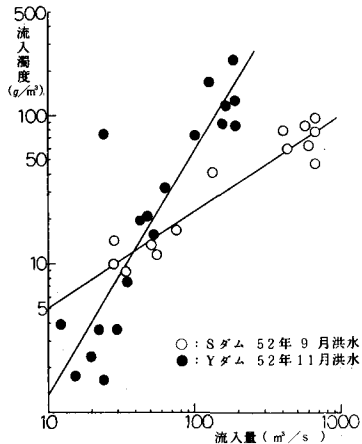


図-6

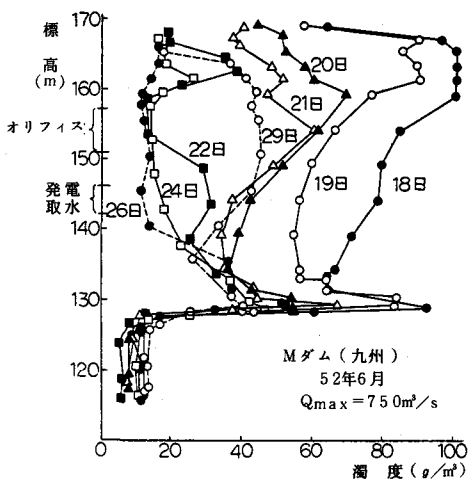


図-3

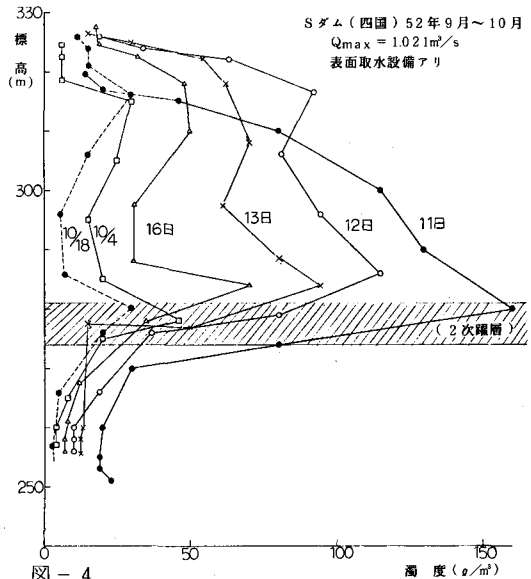


図-4

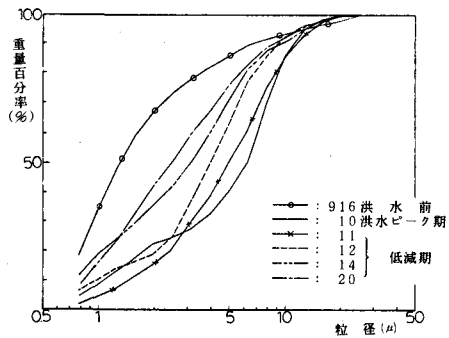


図-5 Sダム 52年9月洪水

沈降試験によって調べたところ、理化学的には河川水の電気伝導度、カルシウム・マグネシウム対ナトリウム・カリウムのイオン比、底質の粒径・風化度が沈降特性に関する指標として挙げられている。²⁾

(4) 流入濁度

貯水池の濁水予測を行なう場合、入力データとして流入濁度が必要であるが、洪水時の流入濁度を連続的に観測することは現実的には困難である。このため、流入濁度と流入量の回帰式を求め、流入濁度を流入量から推定することが行なわれている。流入濁度の推定は濁水予測を実施するうえで、最も重要な要素であり、精度を向上させるために、できるだけ多くの洪水時の観測データを収集する必要がある。図-6は、Sダム及びYダムにおいて観測された流入量と流入濁度の相関を示す。流入濁度の流入量に対する回帰式は、一般に $C_{in} = \alpha Q_{in}^\beta$ 、(α 、 β は回帰式係数)の形で表わせる。

4. ダム放流濁度予測

4-1 概念モデル(3層モデル)

3の濁水長期化要因の分析をもとにして、ここではダム放流濁度予測モデルを作成する。貯水池内の成層状況、流動状況から、本モデルでは貯水池を1次躍層及び2次躍層により表層・中層・下層の3層に分けた。各層の濁度を均一として濁質の連続式をたてると次のようになる(図-7)。

(表層)

$$\frac{C_1' V_1' - C_1 V_1}{dt} = -a \cdot Q_{out} \cdot C_1 - W_1 \cdot A_1 \cdot C_1 + C_x \cdot D_v \quad \dots\dots\dots (2)$$

(中層)

$$\frac{C_2' V_2' - C_2 V_2}{dt} = Q_{in} \cdot C_{in} - b \cdot Q_{out} \cdot C_2 + W_1 \cdot A_1 \cdot C_1 - W_2 \cdot A_2 \cdot C_2 - C_x \cdot D_v + C_2 \cdot V_x \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $D_v = (V_1' - V_1 + a \cdot Q_{out} \cdot dt) \geq 0$ のとき $C_x = C_2$ (上昇) }
 < 0 のとき $C_x = C_1$ (下降) } \quad \dots\dots\dots (4)

$$V_x = V_3 - V_3' \quad \dots\dots\dots (5)$$

(2)式の左辺は濁質量の時間的変化を表わし、右辺第1項は表層からの放流濁質量、第2項は表層から中層への沈降濁質量、第3項は表層厚を一定としたときの水位変化に伴う濁質移動量を表わす。(3)式の右辺第1項は貯水池への流入濁質量、第2項は中層からの放流濁質量、第3項は表層から中層への沈降濁質量、第4項は中層から下層への沈降濁質量、第5項は(2)式右辺第3項と同じ、第6項は2次躍層低下に伴う中層濁質量の増分である。

流入濁度は流入量との回帰式 $C_{in} = \alpha Q_{in}^\beta$ により与え、表層及び中層からの放流量は取放水位置を中心とする流速分布(Gauss分布)を与えるものとした。流動層厚(δ_0)は次式により与えた。

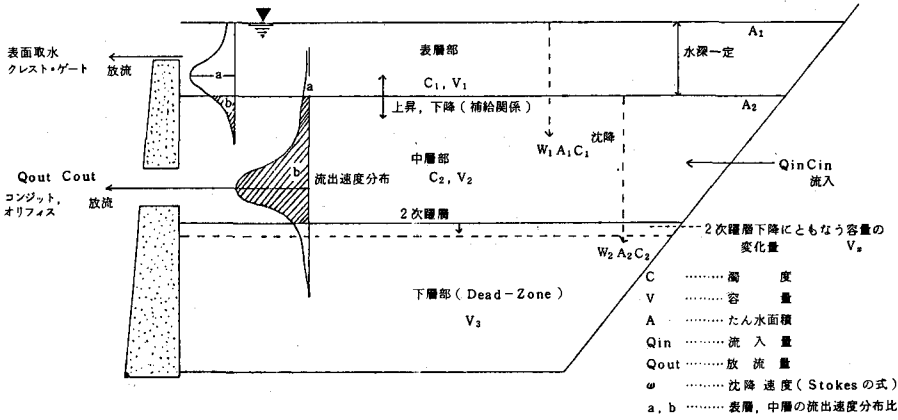


図-7 モデルの概念図

$$\delta_0 = G^{-1/3} (Q_{out} / \theta \sqrt{g \varepsilon_0})^{1/3} \dots\dots\dots (6)$$

G = 日野・大西の無次元数, Q_{out} = 放流量, θ = 流出開口角, ε_0 = 密度勾配, g = 重力加速度

ただし, δ_0 は2次躍層以内とする。2次躍層の位置は, 水温分布の観測値をもとに与えた。また, 洪水流入量の総和が総貯水容量を越えた時点において2次躍層は破壊されるものとした。

4-2 適用例

モデルの検証計算は6ダム10ケースについて実施した。

図-8~図-11は四国地方Sダム(総貯水容量=31,600万 m^3)におけるダム放流濁度予測計算例である。図-8は成層の十分発達していない4月の洪水で, ピーク流入量は350 m^3/s と小規模洪水であるが, 観測値と計算値は良く一致している。濁質沈降速度は粒径を5 μ としてStokes式から求めた。

図-9はピーク流量7200 m^3/s の大洪水である。沈降速度は粒径を5 μ とし, さらに放流濁度が100ppm以下で粒径を3.5 μ と小さくしてStokes式から求めた。

図-10は, 流入濁度の回帰式の係数の感度分析を試みたもので, 回帰式のべき数を ± 0.1 動かしただけで放流濁度に大巾な差を生じており, 本モデルにおいてべき数が重要なパラメータであることがわかる。その他, 代表粒径を変えて沈降速度を変えると放流濁度の高い期間長がかなり変わることが明らかとなった。

図-11は, 流入濁質の粒径分布の時間的変化を考慮して計算したものであり, 大洪水後の相当長期にわたる高濁度放流を良く再現している。

以上の結果, 本モデルはダム放流濁度を比較的簡単に予測でき, 観測値と計算値との適合性も良好であることが明らかとなった。また, 濁質の沈降特性の変化も容易にモデルに組み込むことができる。

5. あとがき

貯水池水質問題を把握するために, 今後とも現地観測資料を収集するとともに要因整理を行なう予定である。

参考文献

- 1) 国土開発技術研究センター, ダム放流設備設計資料報告書, S.5 4.3
- 2) 四国地建, ダム濁水調査業務委託報告書, S.5 4.2

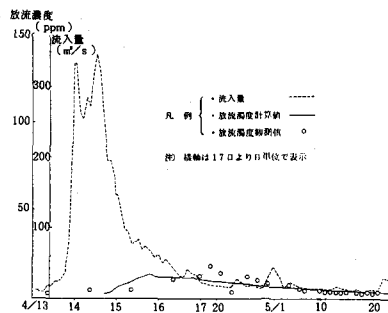


図8 昭和51年4月洪水における検証計算結果

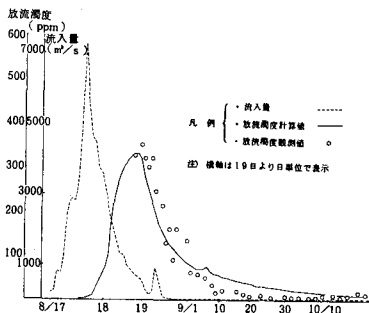


図-9 昭和50年台風5・6号洪水における検証計算結果

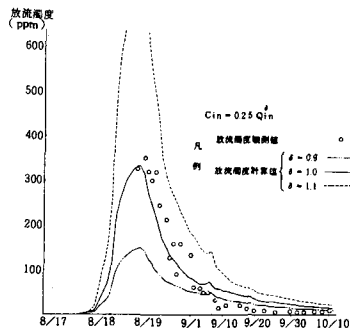


図-10 流入濁度式の感度分析結果

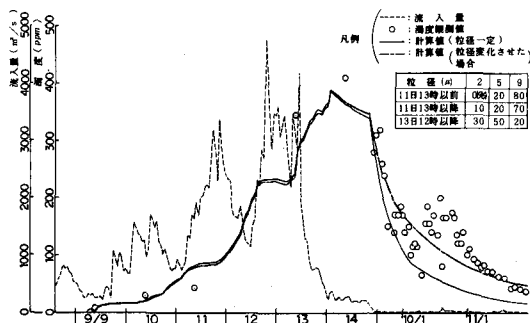


図-11 昭和51年9月洪水(Sダム)