

ダム貯水池の濁質除去に関する水理学的研究

Hydraulic study of removing turbid water in dam reservoir

東京理科大学 理工学部 正員 大西 外明
電源開発株式会社 関西支社 正員 ○喜多村 雄一

1. 緒言

ダム貯水池は利水と治水の両面で有効に運用されつつあり、現代の人間活動や産業活動に欠くことのできないものとなっている。しかし、一方、近年に至り貯水池の濁り長期化とそれに伴う水質劣化の傾向が、いくつかの貯水池で発生し、その対応が貯水池開発計画と貯水池操作計画の両面で重要な課題となっている。池水の濁り長期化の軽減策を親規の貯水池開発面から考えると、流域の地質、土地利用状況、気象や洪水特性を考慮に入れて、ダム高（貯水池容量）および取・放水口位置・構造を適切に選定することが必要となる。また、それを貯水池の維持管理の立場から考えると、流域の土地利用状態の管理、池水の現状把握と応急処置 — 取・放水量や方法の適正化や各種の濁り対策、水質改良策等 — の実施が必要と考えられる。

以上の様に多様な側面をもつダム貯水池濁り現象に関する研究の一環として、本論文は、まず実際の貯水池における池水内の密度分布特性を現地観測データを基に検討し、その結果を基にして、水質変化の主要な原因の一つとなりうると思われる貯水池内濁み水域の水塊を除去する際に考慮すべき密度流論的側面を明らかにし、将来の新しい貯水池の設計・計画面へ資しようとするものである。

2. 貯水池の密度分布特性の現地観測結果と考察

貯水池の濁り長期化とそれに伴う水質変化を軽減する方法としては、原因となる土砂や有機物質等を池内に流入させない面からのものと、一たん流入したこれらの物質を除去する面からのものとが考えられる。後者の方法では(i)貯水池の水質変化を防止するために、貯水池内にこれらの物質を長期間停留させないこと、(ii)貯水池からの放流に伴う下流河川の濁りの継続時間を出来る丈、短くおさえることがのぞましい。しかしこの2つの事項は互に相反する側面をもっている。すなわち、一般には貯水池の濁水を放流すれば、下流河川水の濁りは増加すると考えられる。そこで、両者を両立させ得る可能性を探るために、Kダム貯水池における池水の水温と濁度に関する実測値の検討を行なった。このことは、従来の選択取水等に関する解析的研究で導入してきた密度分布の仮定条件を検証する上でも興味をもたれることである。Kダム貯水池はダム高約100 m、総貯水量 $130 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、年間平均流入流量は約 $1200 \times 10^6 \text{ m}^3$ であり、安芸ら¹⁾による池水の交換回数に関する指標 α が約9.2であり、成層型と混合型のほぼ境目にある規模をもつと考えられる貯水池である。図1は、1978年6月15日における貯水池内の水温分布(°C)と濁度分布(ppm)を示す。この時の上流河川からの流入流量(以後 Q_{in} という)は $24 \text{ m}^3/\text{sec}$ 、ダム中腹の取水口から発電所へ流入する流量(以後 Q_{01} という)は $35.8 \text{ m}^3/\text{sec}$ 、ダム頂からの越流量(以後 Q_{02} という)は $3.8 \text{ m}^3/\text{sec}$ である。水温は池の水面近傍の薄い層で高く、その層から取水口位置標高までの間ではほぼ均等となり、その下層部では10°C以下の低温となっている。ダム越流部に向う流れは典型的な表層密度流を形成し、上流からの流入水は底層密度流として流下したのち、大部分は水平方向に転じて中層密度流となって取水口へ向い、上流よりの流入水のごく一部は取水口標高以下の底層の濁み層へ流入している状態を示している。この図で注目されるのは、中間層の密度流内の濁度は底層のそれよりも高いことであり、池水の密度分布は水温により支配されていることを知ることができる。

図2は、同年8月23日の水温と濁度の分布状態であり、 $Q_{in} = 11.64 \text{ m}^3/\text{sec}$ 、 $Q_{01} = 11.06 \text{ m}^3/\text{sec}$ 、 $Q_{02} = 2 \text{ m}^3/\text{sec}$ の状態を示す。池水内の乱れが少ない池水成層期に相当し、取水口標高面に強い水温躍層面があり、

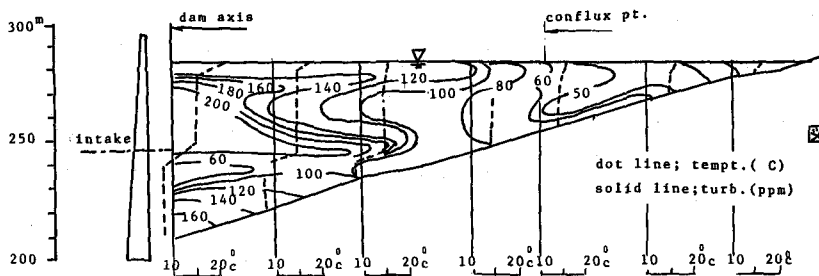


図1. 水温分布(°C)と
濁度分布(ppm)
(June. 15. 1978)

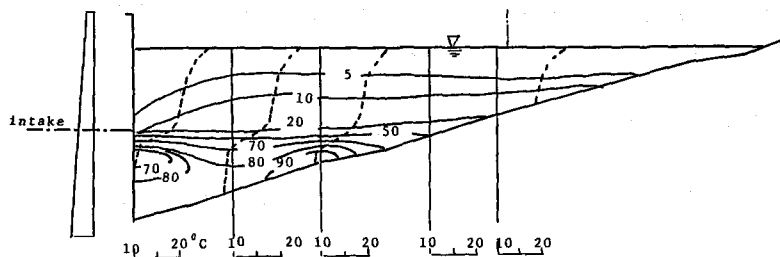
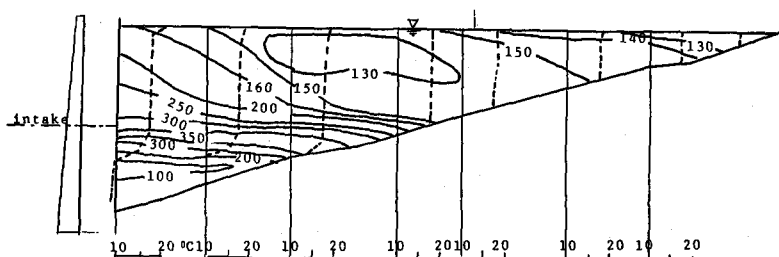


図2. 水温分布と濁度分布
(Aug. 23. 1978)



3. 水温分布と濁度分布
(Sept. 14. 1978)

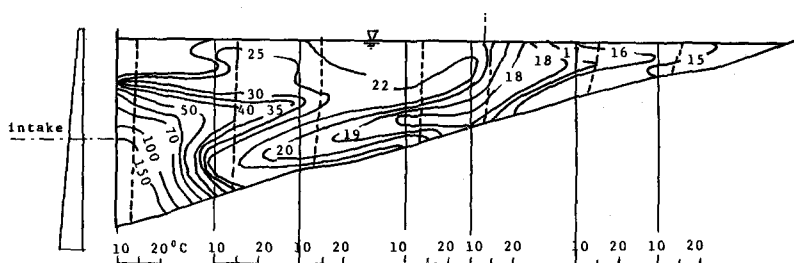


図4. 水温分布と濁度分布
(Nov. 12. 1977)

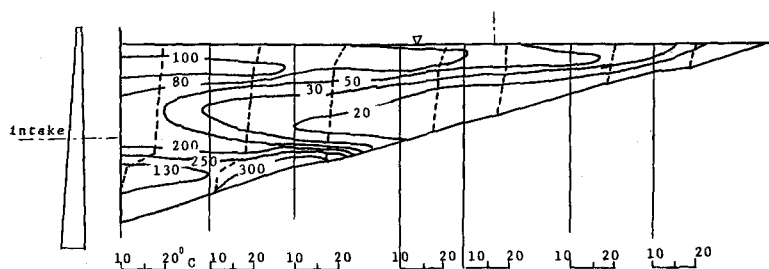


図5. 水温分布と濁度分布
(Sept. 27. 1978)

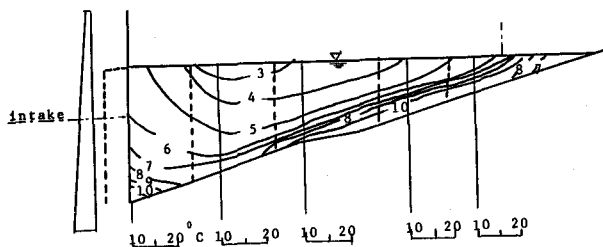


図 6. 水温分布と濁度分布
(Feb. 21. 1982)

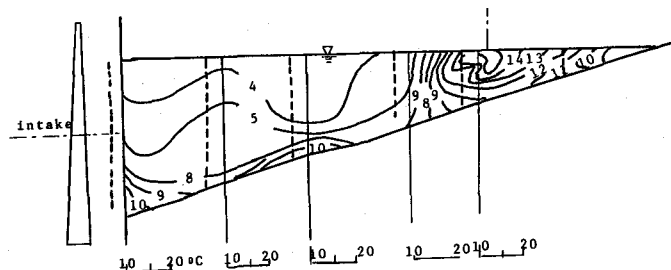


図 7. 水温分布と濁度分布
(Feb. 13. 1983)

濁度は底層ほど高くなっており、取水口に向う流れは二成層密度流の様相を示している。これらの観測結果から、この貯水池では、流入河川流量が少ない時には、取水口に標高以下の水塊は澱み域となり、外側領域との交換性が少ない状態に保たれていることがわかる。この底層の澱み域と上部水域の内の内部境界面の安定性を知るために、1978年の最大洪水に見舞れた9月9日～13日間の17号台風出水1日後、9月14日の状態を検討した結果が図3.である。この時の流量は $Q_{in}=260\text{ m}^3/\text{sec}$ 、 $Q_{01}=60\text{ m}^3/\text{sec}$ 、 $Q_{02}=154\text{ m}^3/\text{sec}$ である。水温躍層面は、取水口標高より約10数m下方に移動しているものの、すでに安定化していることがわかる。ここで注目されるのは、内部境界面上・下層における濁度分布であり、上層では上の部分ほど濁度が低く、下層ではその逆となっている。このことは、洪水の最強時には貯水池のほぼ全水深にわたって鉛直混合が生じ、上層に移った高濁度の水塊がダム頂もしくは取水口を通して下流へ放出されたことを示唆している。図4.は1977年11月12日の出水時の測定結果であるが、この図により鉛直方向の質量交換の状態をより明確に知ることができる。なお、従来より表層取水によりダム下流への放流水の濁りを低減できると考えられているが、図3.の結果からは、ダム底部に放流口を設けることにより、かえって下流河川水の濁りを少なくしうることを予測しうる。図5.は、17号出水後8日の9月27日の状態($Q_{in}=20\text{ m}^3/\text{sec}$ 、 $Q_{01}=62\text{ m}^3/\text{sec}$ 、 $Q_{02}=0$)であるが、流れはほぼ二成層状態に戻っているものの、濁度分布は依然として反転したままであり、底部放流口により比較的濁度の低い底層水を除去しうる可能性を示唆している。この点については、後でさらに詳細に論じることとする。

つぎに、貯水池水温が水深方向に一樣な場合についてであるが、図6.と図7.にそれぞれ、1982年2月21日および1983年2月13日の実測結果を示す。この場合、上流より流入した濁水は底層流として流下するが、ダム背面で底部澱み層を形成することなしに、取水口からダム下流へ放出されている。この傾向は、この貯水池の場合は前記のように密度成層の形成は主として水温差によってなされ、濁質の寄与度が少ないことと、図6.と図7.の場合は池水の水温がほぼ一樣であることを考慮すれば当然の現象といえる。

以上の検討の結果として次の事がらが推論できる。

- (i) 通常の状態では、貯水池内の鉛直方向の流体密度分布は水温により支配され、流入土砂の寄与度は少ない。

- (ii)取水口標高面を境にしてその上部が流動層、また、その下部が澱み層となる期間が長い。
- (iii)ある程度以上に大きな洪水の流入により、内部境界面は破壊されて鉛直混合が生じるが、水温差による内部境界面は、比較的早い期間内 — 1 週間以内 — に再び形成されて安定化する。しかし、濁質は早期に沈降しない状態がある期間は継続する。
- (iv)(iii)の状態下では底部放水口により、下流河川水の濁りを低く保ったまま底部澱み層を除去しうる可能性がある。
- (v)冬から初春には、貯水池内の流動は均等性流体の流れとして取り扱おうと考えられる。

3. 貯水池底部澱み層の排除孔の水理

上記の(iii)と(v)を勘案すると、澱み層内の水塊は少くとも1年に1回は層外の水と交換されるが、梅雨期と台風期の出水時を除く春、夏、秋の相当長い期間は池内に停滞するものと考えられる。特に洪水量の少ない年、あるいは、貯水池内へ腐敗性の有機物質等が流入して澱み層内に滞ると、その部分の水質を変化させるのみならず、貯水池の底質も腐敗させて、貯水池全体の水質劣化の原因の一つともなりうるので貯水池の水質保全の見地からは、底部澱み層を除去する方策を講じることが有用であろうと判断される。たとえば、新設のダムにおいては、従来から大ダムで設置されても余り使用されない排砂ゲートを、澱み層内の水塊除去の観点から見直す為の設計・製作上の技術開発が有用であると考ええる。そのような観点から、ここでは澱み層排除孔を計画する場合を想定して、排除孔容量算定上の考え方について考察を行う。そのさいに考慮に入りたい事項は次のとおりである。

(a)澱み層の水だけを除去すること（澱み層より上部の水は各種の利水目的のために貴重なものであるためである）。(b)排除孔開放の期間を出来るだけ短くすること（下流河川への影響を少なくするためである）。後者の観点からは、洪水の出水時に合せて排除を計ることがのぞましい。また、前節における検討結果(iv)を参考にすると、出水後ある期間は下流河川水の濁度を比較的低く保ったまま澱み層の排除を計りうると予測される。また、出水時には、上層へまき上げられた有機性インパクトのかなりの部分は、ダム越流部が排除されるであろうと期待される。

前節において記したように、貯水池内の密度分布は、出水のピーク時を除けば、大部分の期間は取水口標高を境にして2成層状態をとるものと仮定してよいので、図8.に示すような解析モデルを想定する。

最も単純な場合として、貯水池は幅 B の長方形であり、澱み層排除孔も幅 B 、高さ d の長方形と仮定する。貯水池内の上層と下層の深さと密度をそれぞれ、 (h_2, ρ_2) 、 (h_1, ρ_1) とし、澱み層排除孔から内部境界面までの鉛直距離を h_a とする。洪水の出水時は、洪水流の一部をダム頂から越流させるので、その越流水深を h_b とする。また、澱み層排除孔、取水口およびダム越流部における流量をそれぞれ Q_{in} 、 Q_{01} 、 Q_{02} とする。その場合、ダム越流量 Q_{02} は次式で与えられる。

$$Q_{02} = C_1 B h_b^{3/2} \quad (C_1 : \text{越流部流量係数}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

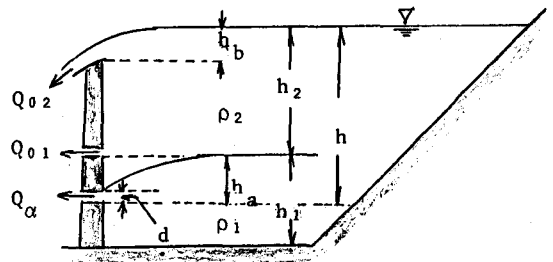


図8 ダム放流水の2成層解析モデル

次に澱み層排除孔からの流量を求めるために、内部境界面ぞいの流線についてエネルギー式を適用すると、水の粘性を無視し、かつ、静水圧分布を仮定すると次式をうる。²⁾

$$\frac{ha}{d} = 1 + \frac{F_i^2}{2} \dots\dots\dots (2)$$

$$F_i = \frac{U_b}{\sqrt{g'd}} \quad (\text{内部フルード数}) \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 $g' = g(\rho_1 - \rho_2)/\rho_1$ 、 g = 重力の加速度、 U_b = 上層水が混入しない状態での澱み層排除孔の流速、 ha = 排除孔 数高より内部境界面までの高さである。澱み層から流出する流量は Q_a とすると、 $U_b = Q_a/Bd$ 、これを式 (2) に代入すると次式をうる。

$$Q_a^2 = 2 g' B^2 d^2 (ha - d) \dots\dots\dots (4)$$

内部境界面の高さ ha を与えたとき、下層水のみが流入する限界状態の条件は、式(4)を d で微分して、 0 とおくと

$$d \leq \frac{2}{3} ha \dots\dots\dots (5)$$

で表わされる。したがって、澱み層排除孔から下層水のみを流す時の最大流量 $Q_{a\cdot\max}$ は、式(4)、(5)より、

$$Q_{a\cdot\max} = B \sqrt{g'(\frac{2}{3} ha)^3} \dots\dots\dots (6)$$

一方、澱み層排除孔から貯水池水面までの高さを $h (= h_1 + ha)$ とすると、孔からの流量 Q_a は

$$Q_a = C_2 a \sqrt{2gh} \quad (C_2: \text{オリフィス流量係数}, a: \text{孔面積} = Bd) \dots\dots\dots (7)$$

である。下層のみ排除するための条件は、式(7)で求める Q_a が式(6)の $Q_{a\cdot\max}$ より小さくなくてはならない。

図 5 の場合を例にして、試算すると、 $h_1 \approx h_2 = 40\text{ m}$ 、 $\rho_1 = 1000\text{ kg/m}^3$ (水温 10°C)、 $\rho_2 = 998\text{ kg/m}^3$ (水温 20°C) であるから、 $ha = 30\text{ m}$ と仮定すると、 $Q_{a\cdot\max}/B = \sqrt{9.8 \times 0.002 \times (\frac{2}{3} \times 30)^3} = 12.7\text{ m}^3/\text{sec/m}$ 。また $C_2 = 0.6$ とすると、 $Q_a/B = d \times \sqrt{2 \times 9.8 \times (40 + 30)} = 37\text{ m}^3/\text{sec/m}$ 。したがって $d = 0.34\text{ m} (< 30\text{ m})$ と計算される。以上のように、澱み層を排除する場合の下流への放流水の平均濃度は、上層と下層の濃度をそれぞれ C_1 、 C_2 とすると、

$$C = C_1 Q_a + C_2 (Q_{01} + Q_{02}) / (Q_a + Q_{01} + Q_{02}) \dots\dots\dots (8)$$

4. 貯水池濁水放流が下流の濁り継続時間に及ぼす影響

次に、澱み層排除孔の設置が下流河川の濁りに及ぼす影響を検討するために、K 貯水池を対象にして鉛直一次元の仮定のもとに数値シミュレーションを行なった。そのさいの水平層に関する基礎方程式は次のとおりである。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{(\alpha + D)}{A} \frac{\partial}{\partial y} (A \frac{\partial T}{\partial y}) - \frac{1}{\rho C A} \frac{\partial}{\partial y} (A \phi) - \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial y} (VAT) + \frac{B}{A} (U_i T_i' - U_o T) \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{(\alpha + D)}{A} \frac{\partial}{\partial y} (A \frac{\partial C}{\partial y}) - \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial y} (VAC) + \frac{B}{A} (U_i C_i' - U_o C) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial y} (W_o AC) - \frac{W_o C}{A} \frac{\partial A}{\partial y} \dots\dots\dots (10)$$

$$\frac{\partial VA}{\partial y} = B (U_i - U_o) \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 $T(y)$: 標高 y の水温、 $C(y)$: 標高 y の濁度、 $U_i(y)$: 標高 y の流入水平流速、 $U_o(y)$: 標高 y の放流水平流速、 $V(y)$: 標高 y の鉛直流速、 W_o : 懸濁粒子の沈降速度、 T_i' : 標高 y の流入水量 (連行後)、 C_i' : 標高 y の流入水濃度 (連行後)、 $A(y)$: 標高 y の貯水池平面積、 $B(y)$: 標高 y の貯水池平均幅、 $\phi(y)$: 標高 y に達する輻射熱、 α : 分子拡散係数、 D : 渦動拡散係数、 ρ : 水の密度、 C : 水の比較、 t : 時間

ダムに設けた取水口と越流部に向う貯水池内の流れの流速分布、および、貯水池上流における流入河川水の流れの流速分布と流入層厚は、安芸ら³⁾の考え方に準じて、式(9)~(11)の基礎式を差分化し、気象、洪水流量、発電所の運転に関する流量の値としてKダム貯水値における1978年の1年間の実測データをインプットして、東京理科大学情報センターの計算機を用いて数値解析を行なった。放流水の水温の解析値と実測値との比較を図9に示す(紙面の関係で洪水時を中心とした前後の期間のみを図示した)。ついで、貯水池からの放流の条件を表1のように変えて、それぞれの場合について水温と密度の分布と年間の変化の状態を解析した。図9、図10中にその結果を示す。Case 1の水温解析値は良い一致を示しており、また、澱み層排除

表1 数値シミュレーションの条件

Case	ダム越流部標高	発電所取水口標高	流 量 の 条 件
1	281m	250m	1978年の運転実績による。
2	#	230	発電所取水口流量はCase 1と同じ
3	#	281	同 上

時に対応しているとみられる Case 2と Case 1の濁度の間には顕著差は認められない。その理由としては、出水時にはダム越流量が発電用水量の約5倍に達するために、下流河川の濁度は越流水により支配されること、また、出水時の底層部の濁度が表層部よりも必ずしも高くないことによると考えられる。

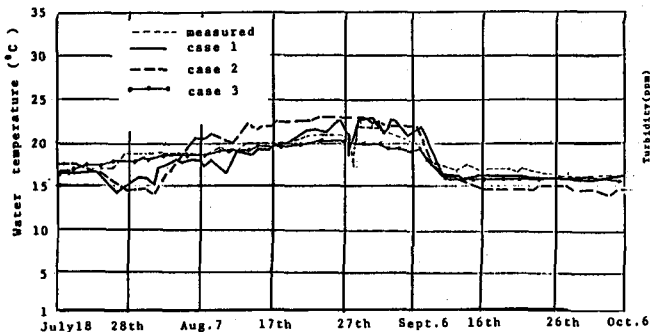


図9 ダムからの放流条件が下水水温に及ぼす影響

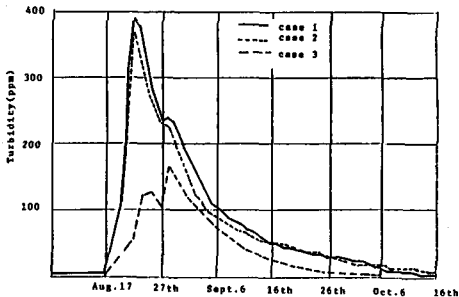


図10 ダムからの放流水が下水濁度に及ぼす影響

5. 結 語

以上の検討結果を要約すると、検討対象としたダム貯水池の場合、(i)貯水池の密度分布は主として水温により支配され、(ii)発電所取水口標高面に安定度の高い内部境界面が形成される。(iii)洪水出水時には、界面は破壊されることもあるが、出水後早い時期に再び安定化する。しかし、濁度の鉛直分布は相当長期に亘り反転状態を保つ。(iv)有機性のインパクトは下層の澱み層内に停滞し易いので、この層を排除することは水質劣化を防ぐために効果的であり、その排除を洪水出水時に行えば、下流に及ぼす影響を少なくおさえることが可能である。

参 考 文 献

1) 安芸周一、白砂孝夫：貯水池濁水現象の調査と解析、電中研報告 74505、(1974)
2) Harleman, D.R.F et al : Submerged Sluice Control of Stratified Flow, Proc.ASCE. (1958)
3) 1) に同じ