

現地データを基にした貯水池内濁水流の挙動に関する考察

Study on turbid water current penetrating into dam
reservoir through field measurements

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

1. はじめに

河川流域から生産される土砂による貯水池の濁水長期化現象は、下流水域の環境問題に関係した重要な研究問題である。水理学の分野では、貯水池の上流より流入する濁水の挙動は、密度流の代表的な問題の一つとして従来から研究されてきている。しかしその多くは数値解析、理論解析および模型実験によるものであり、現地における観測データを基にした検討例は少ないように思われる。また、貯水池内での濁水の挙動の解析においても、貯水池を無限大の水域と仮定することが多い。しかし、現実の貯水池では下流端のダムが存在が、池内の濁水流の挙動や、貯水池内の濁水分布を支配することが予測されることからダムと濁水との干渉現象を知ることは、貯水池の濁水長期化防止対策を立案する上で重要であると考えられる。

以上の観点から、本論文では実際のダム貯水池における水温と濁度の測定結果を用いて、有限な貯水池内の濁水洪水流挙動を把握し、さらにそれを支配する水理学的な機構を実験と解析とにより明らかにすることを試みる。

2. 貯水池内流動状態の現地観測

Kダム貯水池では、1973年以来、各月に最低1回（最高7回）、ダム軸より上流200m, 2,160m, 4,000m, 6,280m, 7,700m, 10,060m, 11,870m, 13,040m, 13,930mの所に計8ヶの測定断面を設定して、水温と濁度の鉛直分布を測定している。この貯水池では、1976年6月末に表層取水設備が設置され、同年7月26日より表層取水を行って下流河川水の濁度軽減化を計っている。ここでは、ダムと濁水流との関連を見るために、冬期に人工的に水位低下を行った1976年1月から6月までの池内の現象を検討の対象とする。図1から図10は、この期間に得られた測定値から池内の等濁度線と水温の分布を求めて、季節毎に、貯水池内の濁水の流動状態を図示したものである。図中で点線は水温(°C)実線は等濁度線(ppm)を示している。なお、各観測月の貯水池への流入量(Q_i)、池外への流出量(Q_o 、発電取水量とゲート放流量の和)は表1に示すとおりである。図1と図2に示す冬期には、貯水位が低く、水温は鉛直方向に一樣である。このような水域へ上流から流入した濁度(密度)の高い河川水は、池内では底層流となってダムに近づき、そこでその厚さを増している。それは、周囲水よりも密度が大きい底層流が、ダム背面に衝突して生じる段波の存在を示唆してと考えられるが、この現象については後節において詳細に考察をおこなう。なお、ダム背面における底層流(段波)の高さが貯水面に達する時、その貯水池は完全混合型となると考えられる。2月27日(図3)の場合には、流入水の濁度は、池内水よりも小さく、また、表層水温が池内水温に比べて高くなっているために、流入水は支川の合流部の上流で河床より剥離して、それより下流では表層流となって、発電所取水口へ流入している。剥離点の直下流の底層部では濁度が30ppmから90ppm以上に急増しているが、それは剥離時の乱れによって底質がまき上げられることによると考えられる。表層と底層の間の内部境界面が安定を保っていることから、流入量(Q_i)と流出量(Q_o)が共に比較的少なかったものである。なお、底層部には高濁度の池水が停滞しているのが認められる。

3月5日(図4)の場合には、ダム直上流の取水口敷以下の所に軽微な水温躍層面が形成されており、それより下層では約300ppm以上の濁水が停滞している。当日の池内への流入量は本川から34.25 m^3/s ,

支川から $9.45 \text{ m}^3/\text{s}$ 、計 $43.7 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、一方、発電取水量は $59.6 \text{ m}^3/\text{s}$ である。この日の使用水量は、取水口敷（EL. 247.4 m ）から水面までの厚さ 44 m の表層流として貯水池上流より流れ込んでいる。

表 1 観測月の流量（月平均）

月	流入量 (m^3/s)	流出量 (m^3/s)	貯水位 (m)	摘 要
1	8.7	28.8 5.5	266.96	流出量の上段は発電取水量、下段はゲート放流量である。
2	44.5	9.5 1.3	264.01	
3	38.1	36.8 0	288.35	
4	37.8	43.0 0	285.34	
5	56.0	58.4 0	283.16	
6	99.0	85.1 30.0	280.04	

従来の貯水池濁水現象のシミュレーション解析では、“流水中の浮遊土砂が下流につれて沈降するために、下流部ほど濁度が低下する”と考えることが多い。しかし、この場合は水位低下に伴う生産土砂を含む池水のまき上げの方が池水の濁り分布に大きく寄与していることがわかる。また、図 4 によれば、支川合流部では流水断面積が急増するために、流れの状態が急に変化して、底面からの剥離現象が再び発生している。底層水は、ここでもダム背面に衝突して段波を生じつつその高濁度の水塊が移流してダム背部の池底に停滞している。

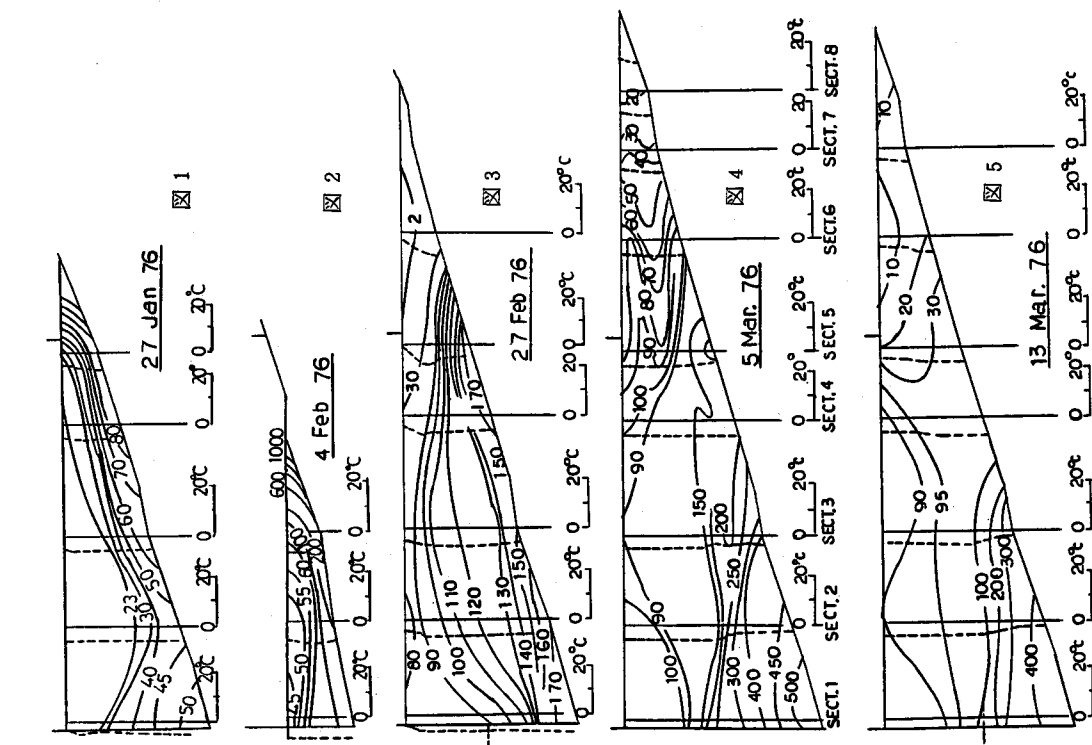
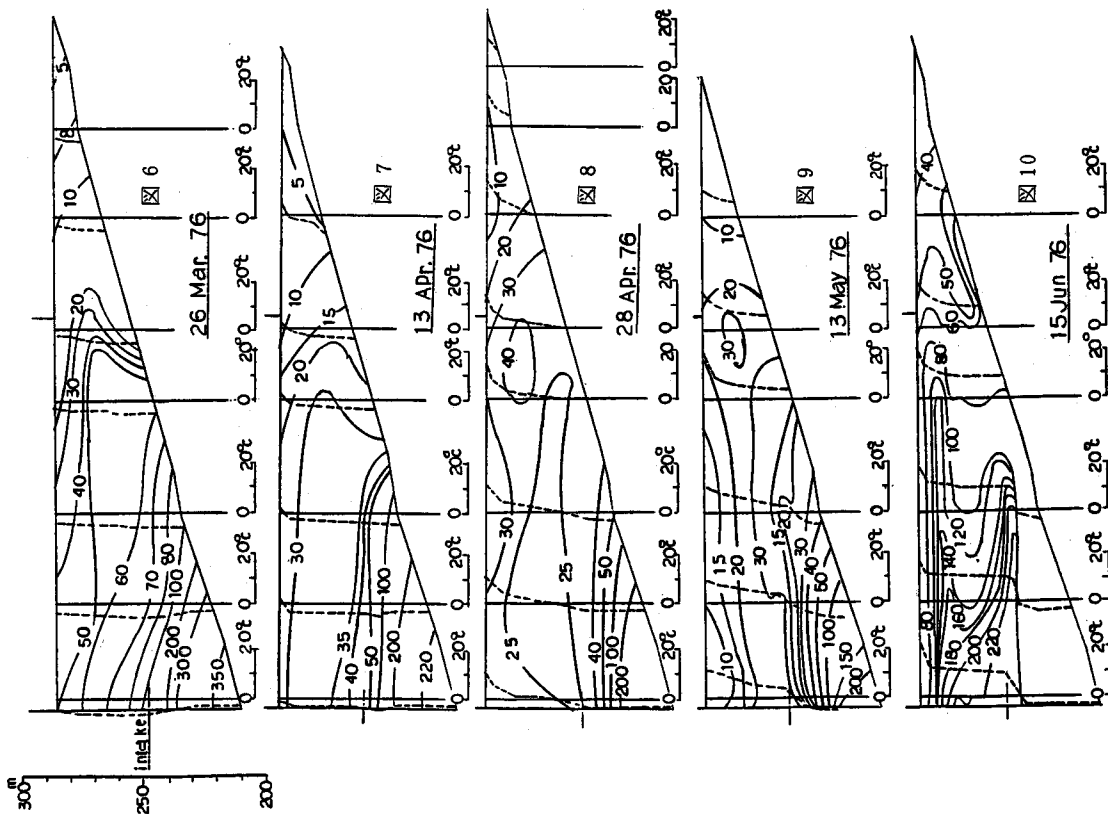
3 月 13 日（図 5）の場合、ダムの直上流の取水口標高以下の水域には比較的低い水温の水塊が停滞している。この場合も、貯水池上流部の表層の濁度は底層を連行しながら下流にいくにつれて増加している。3 月 26 日（図 6）と 4 月 13 日（図 7）には上層水の剥離線は池底にほぼ直交している。その原因としてはイ）発電取水量が急に減少すること、ロ）支川からの流入により、下流の流量が上流部よりも多くなること、ハ）ダム背面で段波が生じること、ニ）下流の流体密度が高濁度、低水温のために上流側の密度よりも大きくなること等が考えられる。

5 月 13 日（図 9）には、貯水位が EL. 282.32 m に低下しており、また発電取水量が多いために、池底部の高濁度の水塊が、取水口標高と等しい高さの池底付近から表層流内へ連行されている。このように、底部の濁み水の表層流内への連行は、ダム背面と直接に接しているヶ所においてではなく、表層流が池底に接する断面付近において生じる。

この流域では 1976 年 6 月 10 から同月 13 日の間に最大 $510.0 \text{ m}^3/\text{s}$ の出水があった。図 10 は、その出水後の 6 月 15 日に測定した結果である。この間には、最大発電用の $60.0 \text{ m}^3/\text{s}$ のほかに $330.0 \text{ m}^3/\text{s}$ の池水をクレストゲートから堤外へ放流した。同図に見られるように、ダムに向う池水の流れは、クレストゲートに向う高温の表層流と取水口へ向う中間層流とに明確に層分離されている。ただし、流入量が流出量を上まわるために、ダム背面での中間層の厚さが増加し（段波発生）、それが上流へ向って逆流していく状態が認められる。図 10 によれば中間層流がダム背面に当たって段波を発生させる場合、中間層流の厚さの増加は上部の内部境界面の上昇の形をとり、下部の内部境界面を下降させることが少ないと考えられる。

以上の検討結果を要約すると

- イ）水位の低い貯水池容量に比較して流入量が大きく、かつ流入水の密度が貯水池水密度よりも大きい時には底層流としてダム背面に達して段波を生じる。段波高さが取水口敷に達しない場合には、濁質は貯水池内にとどまる。
- ロ）貯水位がある程度以上に高いときには、池水は取水口敷高標高付近を境として、それ以下の濁み層とその上部の流動層にわかれる。
- ハ）下層の濁み水塊の流動層内への混入は、内部境界面の全面的な破壊過程によってではなく、流動層が池底から剥離することに伴われることが多い。



- (ニ) 貯水池上流端から流入した河川水は底質を連行しながら濁度（密度）を増すが、一方、流水断面積が増すために流速が低下する。一般に貯水池では、池水の密度は主として水温により支配されるために、底層流は濁度を増すにもかかわらず池底から剥離する。
- (ホ) 剥離は支川合流点の前と後、および取水口敷床付近の三ヶ所でおきやすい。
- (ヘ) 池内へ侵入する中間層流がダムに達してその厚さを増すさい、上部の内部境界面上昇を伴い、下部界面の変化は比較的少ない。

3. ダム背面で生じる段波についての解析的検討

上記の現地観測結果を基にすると、貯水池の濁水長期化現象を考える場合、又、濁水長期化防止策を考える上でダム背面で発生する段波高さを知ることが必要である。

いま、図 11 に示す様な底が水平面に対して θ° 傾斜する 2 次元的形状をもった貯水池を想定する。池の上流から水深 h_1 、流速 V_1 、密度 ρ_1 の底層流が流入して、それがダム背面に達して運動エネルギーが位置エネルギーに変換されて、高さ h_d の段波が発生したとする。ダムからの放流がない場合は、段波内での流速は 0 と考えてよい。ダム背面における反射時の混合を無視すると、I～II 断面間の下層水塊（図 11 参照）に作用する水平方向の力は水圧 P_1, P_2, P_3 （図 11）と底ぞいの摩擦力 F の分力であるから、運動量方程式は

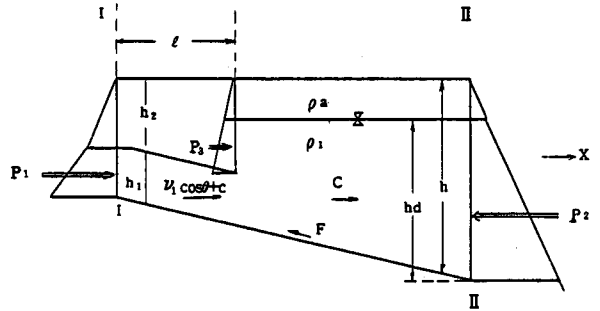


図11 解析モデル

$$P_1 - P_2 + P_3 - F \cos \theta = \rho_1 C^2 h_d - \rho_1 (V_1 \cos \theta + C)^2 h_1 \quad (1)$$

ここに、 C は段波の遡上速度である。周囲の池水の密度を ρ_a 、断面 I における池の水深を h_2 とすると、水圧 P_1 と P_2 はそれぞれ次式で与えられる。

$$P_1 = \rho_a g h_2 h_1 + \frac{\rho_1 g h_1^2}{2} \quad (2)$$

$$P_2 = \rho_a g (h - h_d) h_d + \frac{\rho_1 g h_d^2}{2} \quad (3)$$

ただし、 g は重力の加速度、 h はダム背面における貯水池の全水深である。また、断面 I と段波面との間の水平距離を ℓ とすると、 P_3 は次式で表わされる。

$$P_3 = \frac{\rho_a g}{2} \{ (h_2 + \ell + \tan \theta)^2 - (h - h_d)^2 \} \quad (4a)$$

自然河川では一般に θ は小さく、 $h_2 \gg \ell \tan \theta$ と考えることができるので、上式は次のように近似化される。

$$P_3 \simeq \frac{\rho_a g}{2} \{ h_2^2 - (h - h_d)^2 \} \quad (4b)$$

(1) に (2)～(4) を代入して、 $\theta \simeq 0$ とおくと運動量の方程式は次式となる。

$$\frac{g'}{2}(h_d^2 - h_1^2) + \frac{F}{\rho_1} = (V_1 + C)^2 h_1 - C^2 h_d \quad (5)$$

ここに,

$$g' = (\rho_1 - \rho_a) g / \rho_1 \quad (6)$$

$F = 0$ とすると, (5)は

$$\frac{g'(h_d^2 - h_1^2)}{2} = (V_1 + C)^2 h_1 - C^2 h_d \quad (7)$$

また, 貯水池の単位幅当りの流量を q とすると, $\theta \approx 0$ の時の連続の式は

$$q = V_1 h_1 = C(h_d - h_1) \quad (8)$$

(7)に(8)を代入すると次式をうる。

$$\frac{1}{2}(h_d + h_1) = \frac{q^2 h_d}{g'(h_d - h_1)^2 h_1}$$

いま, 底層流の内部フルード数 F_r を次式で定義する。

$$F_r = V_1 / \sqrt{g' h_1} \quad (9)$$

(9)と(10)より, 結局, 次式をうる。

$$F_r = \frac{(1 - h_1/h_d)}{\sqrt{2}(h_1/h_d)} \sqrt{1 + h_1/h_d} \quad (11)$$

4. 水理模型実験による検討

上記の解析結果の妥当性を確かめるために水理模型実験を行なった。実験水槽は長さ 4 m × 幅 0.2 m × 深さ 0.6 m の両面透明な耐圧ガラス製である (図12)。上流より流入する洪水を模倣した塩水は幅 0.6 m × 高さ

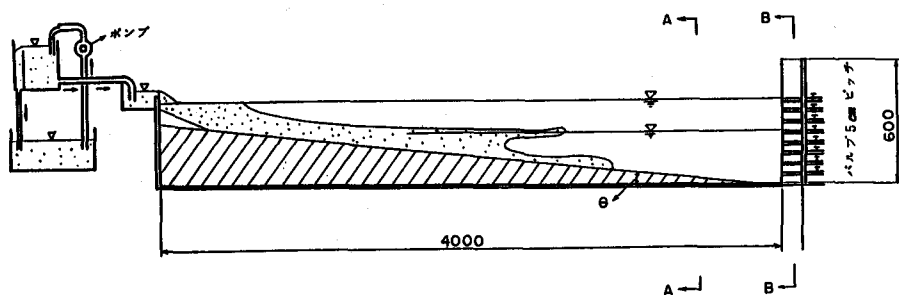


図 12 実験水槽

0.6 m × 深さ 0.6 m の高架水槽で所定の密度をもつ様に調合したのち, 実験水槽上流部より供給した。その供給流量は管路の途中に設けたバルブにより調整した。なお, その供給流量を実験中一定に保つために, 高架水槽内の塩水の水面は常に余水吐面と一致させるようにした。実験水槽の下流端には, 高さ 5 cm ごとに径 0.5 cm の排水口を設けて, 下流端バルブを開閉することにより, 放水口の位置と放流量を自由に選定しうるようにした。なお, 実験水槽内の流れが横断方向に一樣化させるために——流れの2次元性を保たせるために——実験水槽下流端の長さ 30 cm の区間を高さ 5 cm 毎に分割し, それぞれの部分に上記の排水孔を設けた。水路底の形状は, 図13に示すように下流部に 80 cm の水平部をとり, その上流を $\tan \theta = 2.667$ とした場

合（Aシリーズ）と、底全体を $\tan \theta = 0.225$ とした場合（Bシリーズ）について実験を行った。

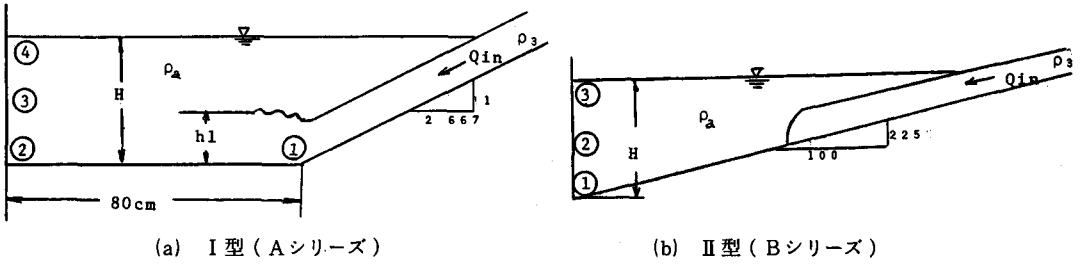


図 13 実験水路の底形状と流体の比重測定点

実験では、貯水池水深、流体密度、流量を変化させて、底層密度流の形状と速度を自動駆動式カメラとビデオによって測定した。また、底層流が上流の傾斜部を経てダム背面に達するまでに、周囲水との混合により、その流体密度を変化させていく状態を知るために、図13に示した測点に電気伝導度計を設置した。なお、流体密度の測定には比重計をも併用した。

実験の結果、底層流の密度は池内への流入点（測点①）において、周囲水の混入（本実験では、供給流量の約10倍のオーダー）により、高架水槽内の流体密度より小さくなるが、それ以後の変化は軽微であることが認められた。そこで、底層流の密度として、池内への潜り込み後の測点①の密度を用い、また、その水深として写真上より測った値を採用して、式(10)により Fr を求めて、式(11)の関係をプロットすると図14のようになる。なお、Bシリーズの場合の Fr は $Fr = V_1 \cos \theta / \sqrt{g' h_1}$ により算定した。

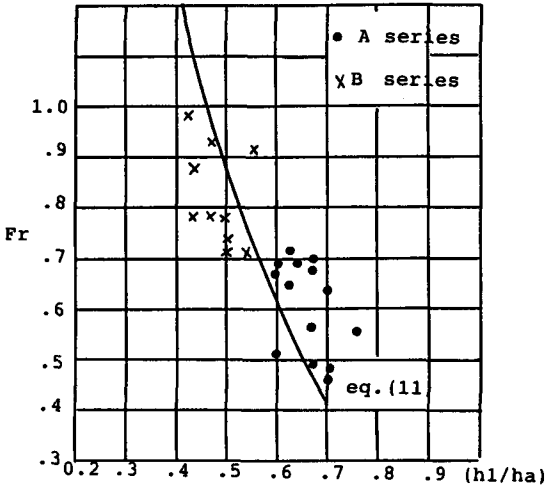


図 14 底層流の特性と段波高の関係

また、図15と図16に底層流の流速に関する実験結果を示す。図14によれば、式(11)の解が実験値と良い一致を示している。また、底層流の流速の実験式（図中の(12), (13)）は、全水深の $\frac{1}{2}$ さをもつ底層流の解 $V_1 = \frac{1}{2} \sqrt{g' h_1}$ に近い値を示している。¹⁾

5. おわりに

現地観測データにより、貯水池内の濁水分布を解析するさい、ダムと濁水流との干渉現象が重要であることを示した。内部界面上を流入する濁水流の解析と実験については後日報告する予定である。

参考文献 1) Turner, J.S.: Buoyancy effects in Fluid (Cambridge Pr.) P. 73.

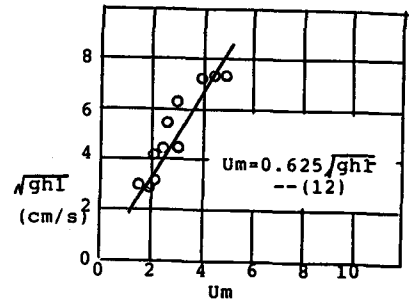


図 15 底層流の流速 (A シリーズ)

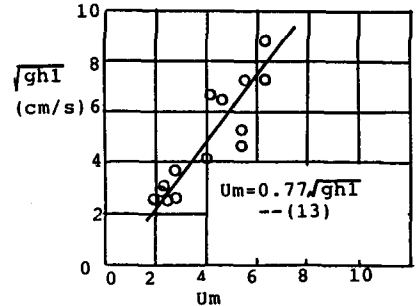


図 16 底層流の流速 (B シリーズ)