

貯水池における濁度物質の堆積と洗掘
Sedimentation and erosion of turbid materials in a reservoir

東北大学大学院 学生員 ○小暮和史
東北大学工学部 正 員 首藤伸夫

1. まえがき

北上川本川に築造された四十四田ダム貯水池には、2次支川水源域に存在する旧硫黄鉱山からの強酸性廃水の中
和処理に伴う凝集性濁度物質が大量に流入し、泥液状のヘドロとして池内に沈殿・堆積して当貯水池の貯水容量
は急激に減少しており、洪水調節機能の低下は著しい。また、沈殿物中には砒素など有害な成分が含まれているた
め、洪水時における沈殿物の下流河川への流出も懸念される。このため著者らは以前より調査研究を行なっており、
これまでに貯水池内の流動状況、濁度物質の特性およびその沈降・堆積状況、貯水池内濁度分布の計算方法などに
ついて報告した。^{1), 2)}

さらに今回は、濁度物質の堆積と洗掘に関する室内実験を行ない、試算的にはあるが、掃流力と洗掘量の間の
関係式を求めることができた。次に、その関係式を用いて、濁度物質の堆積、洗掘および流出濁度について数値計
算を試み、底面に一旦堆積した濁度物質が洗掘・再浮上する場合には、濁度に急激な増加が生じることを予想した。
さらに今年度は、年間を通じて最も水理条件の変化が激しい水位移行期を中心に現地調査を行ない、上記の濁度の
急増などの現象を実際に観測するとともに、貯水池内の堆積状況の変化について、より詳細なデータが得られたの
でここに報告する。

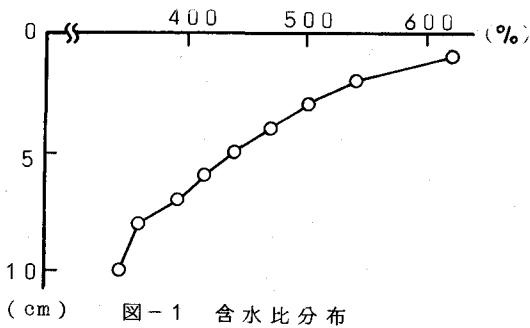
2. 濁度物質の堆積および洗掘特性に関する実験

当貯水池においては、上記のように凝集性を有する濁度物質が大量に流入し、池内に沈降・堆積している。貯水
池内に一旦堆積した濁度物質は、水位低下時などに池底に作用する掃流力によって洗掘・再浮上し、下流に流送さ
れる。その堆積および洗掘特性についてこれまでに、移動限界、浮上限界、洗掘量などについて報告した。その後
も現地試料を用いた実験を継続し特性の把握につとめ、掃流力と洗掘量の関係をより詳細に検討してみた。

まず、現地で採取した試料を希釈攪拌したのちアクリ
ルパイプ内で沈殿させ所定の時間経過した後、堆積層の
含水比の鉛直分布を測定した。図-1はその一例である。
含水比は堆積層表面を最大とし深さ方向に減少しており、
剪断強度はこれとは逆に堆積層表面を最小とし深さ方向
に増加するものと予想される。このような堆積層が洗掘
された場合、洗掘が進むにつれて洗掘をうける堆積物質
の剪断強度は大きくなると考えられる。

次に、同様の試料を用いて流れによる洗掘実験を行な
った。用いた水路は長さ6.0 m、幅0.1 m、深さ0.5 m
の両側面ガラス張りの長方形断面水路で、流量と水深を
変え、掃流力を変化させることができる。試料を希釈攪
拌したのち水路に投入し、18~20時間静置し堆積層
を形成した後、水路に通水し洗掘を開始させる。同時に
水路の上・下流2地点にサイフォン式採水器を設置し、
各々の濁度鉛直分布を測定した。実験条件を表-1に示
す。

洗掘フラックス q_s は、単位時間・単位面積あたりに



Run No.	1	2
掃流力 (N/m^2)	0.316	0.385
初期含水比 (%)	1013	1021
沈殿時間 (hrs.)	20	20
水温 ($^{\circ}C$)	10.0	12.2
pH	4.25	4.25

表-1 実験条件

洗掘される堆積物重量 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{sec}$) として (2-1) 式より求める。

$$q_s = \frac{1}{L} \left\{ \int_0^{H_2} U_2 \cdot C_2 dh - \int_0^{H_1} U_1 \cdot C_1 dh \right\} \quad (2-1)$$

U : 流速, C : 濁度, H : 水深, L : 区間長

添字 1, 2 は各々, 上流, 下流を表わす

また時刻 t_1 から時刻 t_2 までの洗掘量 Q_s は, q_s を積分して次式で求められる。

$$Q_s = \int_{t_1}^{t_2} q_s dt \quad (2-2)$$

実験により得られた洗掘フラックス q_s の時間変化を図-2 に示した。 $t < 5$ (min.) では, $\log q_s$ は時間に対し直線的かつ急激に減少し, $t > 5$ (min.) では, 変化はゆるやかになり, 各々に対し, $q_s = a \cdot \exp(bt)$ と近似できるようである。

粘性土を自然沈降させた場合, その強度に影響を与える因子としては, pH, 水温, 各種イオンの存在および沈殿時間などが考えられる。洗掘フラックス q_s は, それらにより決定される土の強度 τ_y と底面に作用する掃流力 τ の関数であると予想される。そこで q_s を次式のように仮定する。

$$q_s = q_c \left(\frac{\tau}{\tau_y} - 1 \right)^m \quad (2-3)$$

q_c : q_s と同じ次元をもつ比例定数

今, 同一の沈殿条件下で得られた堆積層の剪断強度は常に同じものとする。そして同一沈殿条件でありながら異なる掃流条件下で得られたデータを A, B とし, 次のように定義する。

τ_A, τ_B : データ A, B における掃流力

Q_{si} : 深さ h_i に達するまでの洗掘量

τ_{yi} : Q_{si} (つまり h_i) に対応する剪断強度

q_{sAi}, q_{sBi} : データ A, B の Q_{si} における q_s の値 ($i = 1, 2, 3 \dots$)

(2-3) 式の q_c を堆積物の種類, 沈降条件, および掃流条件によって決まる定数と考えると,

$$q_{sAi} = q_{cA} \left(\frac{\tau_A}{\tau_{yi}} - 1 \right)^m \quad (2-4)$$

$$q_{sBi} = q_{cB} \left(\frac{\tau_B}{\tau_{yi}} - 1 \right)^m \quad (2-5)$$

($i = 1, 2, 3$)

(2-4), (2-5) 式は, 未知数 $m, q_{cA}, q_{cB}, \tau_{y1}, \tau_{y2}, \tau_{y3}$ に対して 6 つの方程式であり, 試算的にそれらの未知数を求めることができる。

Run No. 1 および 2 の沈殿条件は比較的似ており, これを同一と仮定し, 上記の未知数を求めてみた。なお, q_s のデータは洗掘開始後 5 分までの値を用い, $q_s = a \cdot \exp(bt)$ と仮定した。

求められた m および q_c は一定値 ($m = 1.0, q_c \approx 3.0 \times 10^{-2}$) となり, τ_y の変化も少ないようであった。

以上, まとめると次のようになる。堆積層の強度が鉛直方向に一樣でなく, ある分布を有する場合, 洗掘フラックス q_s は時間の関数となる。しかし, 今回の実験および試算による限り, 剪断強度の鉛直方向変化はそれほど大

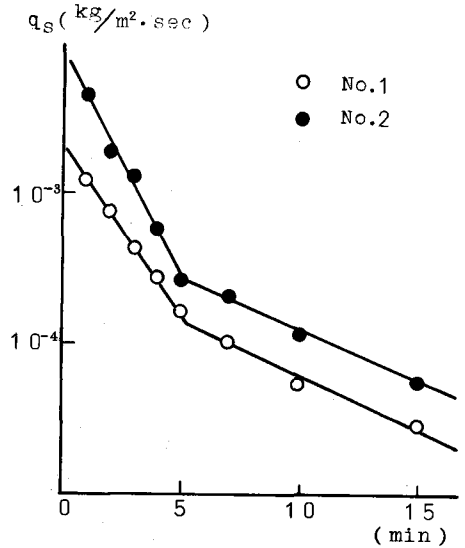


図-2 洗掘フラックスの時間変化

きくなく、 q_s は次のように仮定できると思われる。

$$q_s = q_c \left(\frac{\tau}{\tau_y} - 1 \right) \quad (2-6)$$

q_c, τ_y : 定数

3. 濁度物質の堆積、洗掘および流出濁度の計算

今回は、以上述べた室内実験により得られた、掃流力 τ と洗掘フラックス q_s の関係式を用いて、当貯水池に流入する濁度物質の堆積、洗掘およびダム堤体からの流出濁度の予想に関する数値計算を試みた。

成層化した貯水池に流入する水の温度は、一般に表層水温より低いため、ある点(plunging point)に達すると表層水を進行しながら水面下に潜り込む。その後、流入水は河床に沿って下流し、流入水と等密度の層に達したところで河床から離れ、水平に貯水池内に進入する。

以上のことから、貯水池を3つの区域に分けてモデル化を行なう。図-3に示すように、plunging pointより上流を河道部、plunging pointから水平離床部までを遷移部、そして水平離床部より下流を貯水池部とする。

基礎方程式は、定常状態での物質の連続の式で、移流項は主流方向のみ、乱流拡散は鉛直方向のみを考えた次式とする。

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) - w_o \frac{\partial c}{\partial z} \quad (3-1)$$

u : 主流方向の流速

c : 濁度

ε_z : 鉛直方向の拡散係数

w_o : 濁度物質の沈降速度

ここで、 x は主流方向、 z は鉛直下向きにとっている。

(3-1)に対して陽形式の差分法を用いて計算を行なう。

境界条件としては、まず流入端においては $C = C_0$ 。(初期濁度)とし、鉛直方向に一樣な濁度を与える。河道部の水表面および遷移部・貯水池部の流動層上面においては次式のように与えた。

$$\varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} - w_o C = 0 \quad (3-2)$$

貯水池部の流動層下面においては次の(3-3)式で与えた。

$$\frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad (3-3)$$

そして、河道部および遷移部における底面の境界条件は次のように与えた。

$$\text{洗掘傾向のとき} \quad \varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} - w_o C = q_s \quad (3-4)$$

q_s : 洗掘フラックス

$$\text{平衡または堆積傾向のとき} \quad \varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} - k w_o C = 0 \quad (3-5)$$

k : 堆積の割合を表す係数

($0 \leq k \leq 1$)

底面に堆積した濁度物質の洗掘および堆積については、底面に作用する掃流力 τ によって次のようにして計算した。

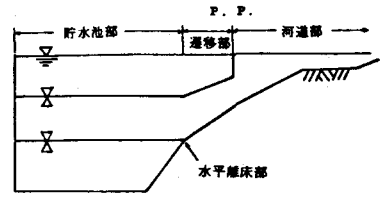


図-3

i) $\tau \geq 0.3 \text{ (N/m}^2\text{)}$ のとき

底面に掃流力によって洗掘されるような濁度物質が存在する場合、洗掘が起こるものとし、(3-4)式中の q_s を前述の実験結果より次のように与えた。

$$q_s = q_c \left(\frac{\tau}{\tau_y} - 1 \right) \quad (3-6)$$

$$\tau_y = 0.3 \quad (\text{N/m}^2)$$

$$q_c = 3.0 \times 10^{-2} \quad (\text{kg/m}^2 \cdot \text{sec})$$

一方、洗掘されるような濁度物質が存在しない場合には、(3-4)式において $q_s = 0$ 、つまり平衡状態が成立するものとする。

ii) $\tau < 0.3 \text{ (N/m}^2\text{)}$ のとき

濁度物質の沈降・堆積が起こるものとし、(3-5)式中の k を次のように仮定した。

$$k = \frac{\tau}{\tau_y} \quad (3-7)$$

貯水池内の水理データが豊富な昭和52年8月4～5日を対象とし、計算を行なった。計算の想定としては、ある水位が長時間続き、それに対応する堆積層が生じていたところへ急に水位が低下して、昭和52年8月4～5日の条件になったとき、濁度がどのように変化するかをみることにした。

堆積層の厚さは、4.0 km地点で0.25 m、3.8 km地点で0.275 m、3.6 km地点で0.30 mと設定した。

図-4は、0.2 km毎に断面平均濁度を算定したものである。実測値は水位急低下時のものではなく、安定した水位がしばらく続き、濁度物質の洗掘はない時期のものである。

図からわかるように、流入水の初期濁度を実測値と等しい30 ppmとしたにもかかわらず、濁度は洗掘が生じた直後には急激な上昇を示し、2000 ppmにも達している。しかし、約10 kmも流下すると濁度は数 ppm となり、濁度物質はこの間にほとんど沈降してしまう。しかし、これほどの高濁度現象が実際に起こった場合は重大であると思われる。

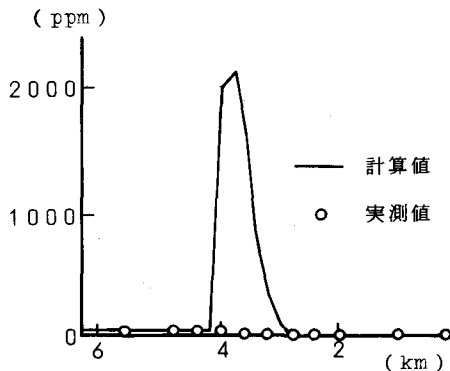


図-4 断面平均濁度

以上より、水位低下などにより濁度物質の洗掘が生じた場合には、かなりの高濁度で濁度物質が下流に輸送されるが、しかしその濁度物質もそれほど流下せず、再び沈降することが予想される。

4. 四十四田ダム貯水池における現地調査

いま述べたように当貯水池に堆積している濁度物質が、水位低下などの水理条件の変化によって洗掘・再浮上した場合には、濁度の急激な上昇が起こることが予想される。今回は、実際にこのような現象が起きているのかを確かめるとともに、濁度物質の堆積状況の変化についてより詳細なデータを得て、濁度物質の流送状況を明らかにすることを目的として現地調査を行なった。

当貯水池の貯水位は、年間を通じて洪水期(7月～9月)と非洪水期(10月～6月)とに分けて調節されており、洪水期には最低水位(EL. 158.0 m)と制限水位(EL. 159.0 m)との間に保たれ、非洪水期には満水位(EL. 170.0 m)付近に保たれており、6月には洪水調節のために貯水位を満水位から制限水位まで徐々に低下させている。貯水池内に沈殿・堆積した濁度物質の堆積状況は、この時期の水位変化に著しく影響され、貯水池上流部に堆積していた濁度物質は、洗掘・流送・沈殿を繰り返して徐々に下流に輸送されるものと思われる。

今回は、年間を通じて最も堆積状況の変化の激しいこの制限水位移行期を中心に調査を実施した。調査項目は、貯水池内の水温分布、濁度分布および濁度物質の堆積厚分布であり、貯水池上流部から流下方向に約0.4 km毎に流

心部において測定を行なった。

図-5は、制限水位移行期における貯水位の変化を示したものである。今回実施した調査の期日を図中に示した。

図-6は、制限水位移行期における貯水池内の水温分布、および濁度分布の実測例である。横軸にはダム堤体を原点として上流に向かって距離がとられている。貯水池内はすでに成層化し始めているようであり、4.0 km付近には流入水の plunging がみられる。同時に、濁度物質の堆積状況を図中に示したが、4～8 km に広範囲に分布しているようであり、この濁度物質の洗掘によりかなりの濁度の上昇が見られる。図中に等濁度線では示さなかったが、約100 ppm で貯水池内に流入したものが、濁度物質の存在する8 km 付近を過ぎると増加し、6 km から7 km 地点では実に3000 ppm を越える濁度が観測された。しかし、かなりの高濁度が生じたにもかかわらず濁度は池内で急激に小さくなりダム堤体では3ppm にすぎない。前述の数値計算の結果から予想したことが確かめられた。

図-7は、同じく制限水位移行期における濁度物質の堆積状況の変化を示したものである。堆積底面は重錘、堆積表面は北原式採水器を利用した測深によって船上より測定し、その差をもって堆積層の厚さとした。濁度物質はこの時期にかなり流送され、水位移行末期には濁度物質は堆積デルタ前面あるいはそれ以上にまで達するようである。

制限水位移行期に観測された貯水池上流部の濁度の鉛直分布状況の一例を示したのが図-8である。図-7よりわかるように、当日ここに示した区間には濁度物質が2 m 前後堆積しており、この濁度物質の洗掘・再浮上により10 km から8.8 km にかけて濁度が高くなり、約40 ppm で鉛直方向にほぼ一様に流入したものが、8.8 km 地点においては底面付近で240 ppm にも達し、それに伴ない濁度の鉛直勾配も大きくなっている。このような現象は、制限水位移行期に非常に特徴的なことであり、同じ時期に実施した他の3回の観測においても同様の結果が得られている。

一方、図-9はすでに洪水期末期、9月20日に観測され

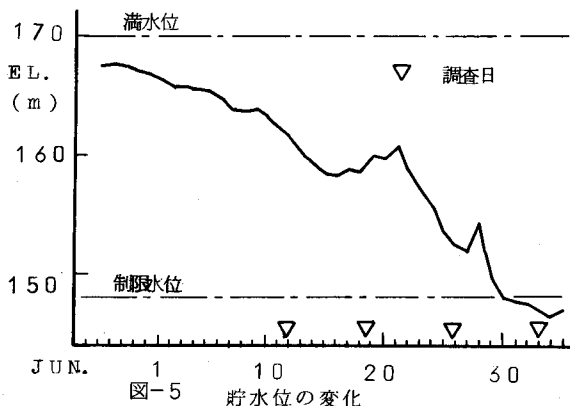


図-5 貯水位の変化

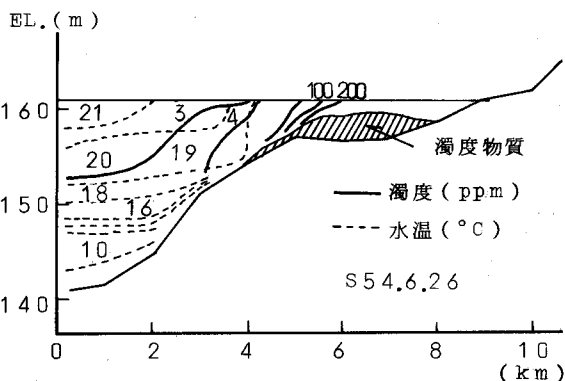


図-6 水温・濁度分布

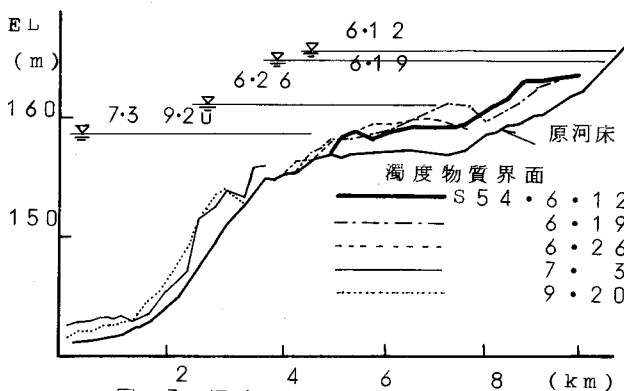


図-7 濁度物質の堆積状況の変化

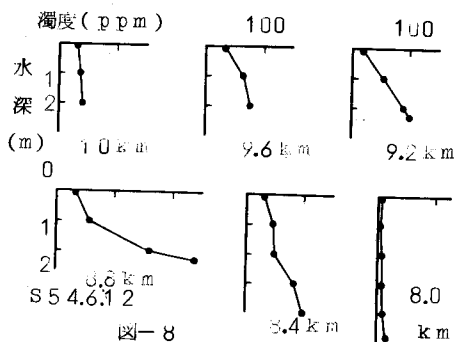


図-8

た濁度の鉛直分布状況である。図-7よりわかるように4.8 kmから3.6 kmの区間には、すでに濁度物質は、ほとんど堆積しておらず、したがってこの区間の濁度も約15 ppmと鉛直方向にはほぼ一様になっている。3.2 km地点は、いわゆる plunging point 直下流であり、濁水が密度流的な挙動を示し、水面下に潜り込みしばらく池底に沿って流下してゆく。同時に、この付近から濁度物質の沈降・堆積が始まっているようである。

以上、今回およびこれまでの調査結果をまとめると、濁度物質の堆積および洗掘の状況は次のようになる。

当貯水池に流入する凝集性を有する濁度物質は、満水位期にお

いては貯水池上流部、おそらくダム堤体から8～10 kmの地点にかなり大量に沈降・堆積する。一旦堆積した濁度物質は、制限水位移行期の水位低下に伴う掃流力の増加により、洗掘・再浮上・流送・沈殿という現象を繰り返しながら、かなりの高濁度で下流に輸送され、同末期および制限水位期にはダム堤体から3～4 km付近に顕著な沈降領域を生じ、大部分はここに堆積する。一部はダム堤体にまでも達すると思われるが、水位低下時でさえダムからの流出濁度はほとんどが数 ppm にすぎず、洪水時を除いては下流河川への影響は少ないようである。このようにして年間を通じて結局、濁度物質の大部分はダム堤体から3～4 kmの沈降領域に堆積し、大規模なデルタの発達・前進を促しているようである。

5. あとがき

四十四田ダム貯水池における濁度物質の堆積と洗掘に関して、室内実験により得られた掃流力と洗掘量との関係式を用いて数値計算を試み、洗掘を現象的には表わし得たと思うが量的に表わすまでには至らなかった。堆積物の剪断強度分布、堆積量の計算方法などを実測、あるいは検討する必要があると思う。また、現地調査については、濁度物質の挙動をかなり詳細につかむことができ、貴重なデータが得られたと思う。

6. 謝 辞

現地調査に際し建設省北上川統合管理事務所、特に四十四田ダム管理支所の協力を得た。また数値計算には東北大学工学部後藤智明助手の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 岩崎敏夫・三王英寿：貯水池における流入濁度物質の挙動について、第21回水理講演会論文集、1977
- 2) 岩崎敏夫・三王英寿・阿部至雄・大杉 勉：貯水池における凝集性懸濁物質の挙動について、第22回水理講演会論文集、1978

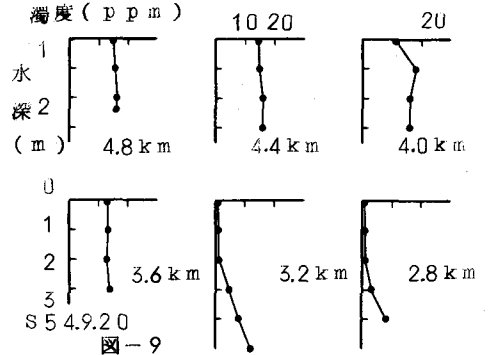


図-9