

貯水池に流入，流出する濁質の挙動

Cohesive Sediments into, in and out of a Reservoir

東北大学大学院 学生員 張 旭紅 X. Zhang

東北大学工学部 正 員 首藤伸夫 N. Shuto

1. はじめに

北上川上流の四十四田ダムは発電と洪水調節を目的とする多目的ダムである。洪水期の始まる直前に洪水調節用容量を確保するため水位を下げ、洪水期には制限水位を維持し、その後常時満水位に復帰すると云う経過を辿る。この間、出水にともなって貯水池には土砂が流入し、粒径の大きなものは貯水池内のデルタを構成して貯水池内にとどまるのが普通であるが、細粒のものは条件によっては再び洗掘され浮上してダムの下流へ運ばれる。制限水位期の条件如何により、ダムから放出される水の濁度の方が貯水池に流入する洪水の濁度より大きい事も生じかねない。また、出水に備えて水位を低下せしめて行く時期にも、流入水の濁度はほとんど無いにもかかわらず下流には濁水が流れることも、放流量如何によっては発生し得る。常時満水位の期間中に貯水池の末端付近に沈降堆積した細粒の土砂が再び洗掘されて運搬される可能性があるからである。四十四田ダムの集水域内には赤川がある。その名から知れる通り、通常時にも川水が濁り、河床にはシルト系の堆積物が認められる。このため、四十四田ダム貯水池へ流入する細粒土砂の量は、他のダムにくらべ比較的多く、貯水池内の堆積量も大きい。本論文では、粘土やシルトなどの細粒土砂の発生・貯水池内への堆積・洗掘と再浮上・移動と再堆積あるいは下流への流出の過程を明らかにするために行った実測の結果について報告する。

2. 流域の状況と実測の方法

四十四田ダムの流域面積は1196 km²、貯水池末端の船田橋地点では1080.9 km²となっている。図-1は、流域、及び我々の採水地点を示している。流域の西には奥羽山系、東には北上山系がある。奥羽山系から流下する支川は、松川（流域面積200.4 km²）、赤川（221.5 km²）である。上流に岩洞湖をもつ北上山系の支川丹藤川は丹藤橋の下流で北上本川と合流して南下する。

各支川は地形、地質も違い、出水の状況も異なり得るので、河川水濁度への寄与にも差があるであろう。採水地点はこの違いを検出出来るように、しかも採水の便をも考えて橋の存在する地点を選んだ。

水深が大きい岩姫橋地点以外では、表面近くの水を橋上からバケツを降ろして採取した。6月の岩姫橋地点では、北原式採水器を使用して鉛直方向に数点の採水した。採取した試料はポリ容器の小瓶にいれて持ち帰り、原則として6時間以内に積分球式濁度計で測定した。

3. 集水域で発生する濁質

四十四田より上流の流域は、図-1にも示した通り、松川、赤川、丹藤川の3支川と北上本川とに大別される。各流域での濁質発生の特徴を知るために、昭和61年7月12日から14日まで（洪水時）、及び昭和62年7月13日から16日まで（平水時）の2回、13地点で濁度の実測を行なった。

赤川の源には旧松尾鉱山がある。ここから流出する水は、現在では中和処理されている。しかしながら、その影響は皆無ではなく、赤川の濁度は平水時でも高い。昭和62年の調査では、赤川下流の西根地点で14.5ppmで、その時の松川下流釣橋地点の1.5ppm、北上川本川芋田地点の3.5ppmより遥かに高い値を示している。昭和61年の調査は洪水期に行われ、



図-1 流域及び濁度実測地点

出水時の濁度発生状況がとらえられた。

3. 1 赤川

上流の富士見橋、中流の赤川橋、松川との合流直前の西根橋の3地点で測定が行なわれている。図-2(a)に示すように、出水の初期に3地点殆ど同時に濁度の最初のピークが生じ、上流で330ppm、中流で50ppm、下流で35ppmと上流ほど値が大きい。これは流量のピークには対応していない。流量のピーク時に濁度の第二のピークが生じ、上流から下流へと伝わって行く。富士見橋・赤川橋間、赤川橋・西根橋間の第二のピークの遅れ時間は共に約3時間であった。

出水時に濁度のピークがふたつ現われるのは赤川のみの特徴で、他の支川では観測されなかった。第一のピークは、河床に堆積していた濁質が流量の増加に伴い再洗掘されて生じたものであろう。河床堆積物の量はそれほど多くはないから、これが流出してしまうと河床からの生産は終わり、濁度は一時的に減少する。ついで流域からの降雨流出が濁質を河道に運搬してきて、再び濁度は上昇する。これが第二のピークである。つまり、第一のピークは、平常時に赤川の河床に多くの微細粒子が堆積している事を物語っている。

赤川の濁度第二ピークは上流程大きい。出水低減時の濁度はこれと反対に、上流の方が下流の2地点にくらべかなり小さい。3地点に対応する流域での裸地の占める割合が上流から62%、25%、5%と減って行く事と関連があるかも知れない。

3. 2 松川

松川の平水時の濁度は赤川の1/10と小さいにも関わらず、図-2(b)に示すように、出水時の濁度ピーク(87.5 ppm)は赤川(55 ppm)を上回った。ただし、この逆転は出水のピークをはさむ数時間の間のみに限られる。これは松川の裸地面積が8.7パーセントで赤川の5パーセントより高い事、あるいはこの時の降雨分布などに関連があるのであろう。松川では、上流の松川橋地点のピーク濁度と赤川松川合流点付近のピーク濁度には時間差があるだけで、濁度の値にはあまり大きな差はない。ピークを作る様な濁度発生は上流地域に限られている様である。

3. 3 丹藤川・北上川の合流

丹藤橋での濁度ピーク(30 ppm)は其れより下流の芋田地点のピーク(60 ppm)より遅れて生じている。北上本川の沼宮内では濁度は急速に上昇し、ピークで100 ppmとなり、また急速に下降した。下流芋田地点でも5時間遅れで、ほぼ似た経過を辿った。これらの状況を図-2(c)に示す。芋田での流量のピーク(23.4 m³/s)は沼宮内濁度ピークに1時間遅れて生じ、その後5時間にわたり同程度の水位であった。丹藤川での濁度発生量はあまり影響が大きいと考えられる。

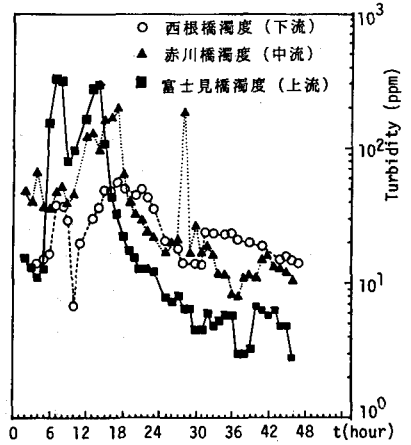


図-2(a) 赤川の濁度

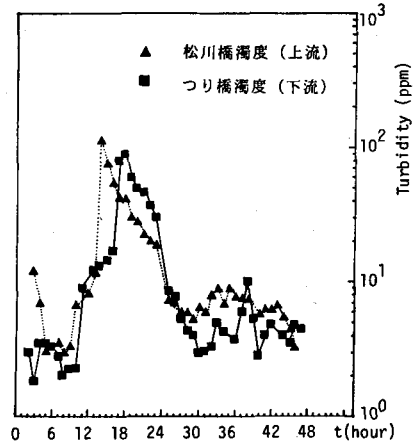


図-2(b) 松川の濁度

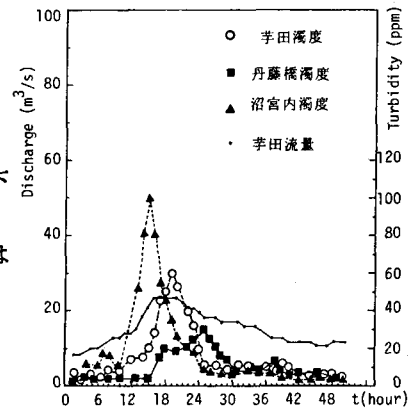


図-2(c) 北上本川と丹藤川の濁度

3. 4 北上川・松川の合流

合流前の芋田・古川地点、合流後の船田橋では水位記録より流量が与えられる。合流直後の啄木地点の流量は、その下流の船田のものとは差がないとして与えた。これと各地点での濁度観測結果から、合流前の北上本川、松川の濁質負荷量を計算し、合流後の啄木地点の濁質負荷量と比較したのが図-2 (d) である。出水初期と末期を除き両者は良い一致を示す。濁度の測定精度は満足しうるものであったといえよう。

4. 水位低減期の貯水池末端近傍での濁度

洪水期が終了すると水位は徐々に回復し、常時満水位に保たれる。これ以後次の年の洪水期までは水位は高く、船田橋地点を通過してきた濁質は岩姫橋地点までに全量沈下堆積してしまうものとみなしてよい。6月になると、洪水に備えて水位を低下させる。此の水位低減期に於ける昭和60年から62年の3年間の実測結果のうち、昭和60年6月のものを図-3に示す。上のなだらかな実線が貯水位、中程の実線が船田橋の流量、点線がダムからの放出量である。濁度は船田橋 (丸印)、岩姫橋 (星印)、ダム直下 (四角印) で測られている。なお、三角印は後にふれる方法で求めた船田橋・岩姫橋間の区間平均掃流力である。当初は、船田橋を通過する河川水の濁度は10ppm程度、岩姫橋では2ppm程度、ダム直下では岩姫橋より若干小さ目である。この時期には船田橋から流入した濁質はすべて岩姫橋迄に沈降してしまう。6月14日頃から岩姫橋濁度が上がり始め、19日には船田橋濁度を上回る。その後数日間は400ppmにも達し船田橋と岩姫橋の間で大量の洗掘再浮上の生じた事をうかがわせる。この時でも船田橋流量には大きな変化が見られないから、洗掘の原因は水位低下による掃流力の増加以外には求められない。洗掘され再浮上した細粒土砂は更にその下流の貯水池部で沈降堆積するから、ダム直下での濁度は殆ど変化していない。昭和61年、62年の実測値でも、同様の事が確認された。時として岩姫橋での濁度は600ppmにも達し、流入濁度にくらべ2桁ほど大きくなる。

以上で述べた岩姫橋濁度は鉛直方向に平均した値である。水位が高くしかも水平に近い貯水池的な状況の下では、濁度は小さく鉛直方向にはほぼ一様な濁度分布をしている。濁度の上昇はまず底面近くから始まる。これが測定にかかったのは水深3m位で、水位はまだ水平に近い貯水池的な時期である。次第に濁度の鉛直面内での平均化が進行し、水深が2mを切ると水面までほぼ同様の高濁度となる。

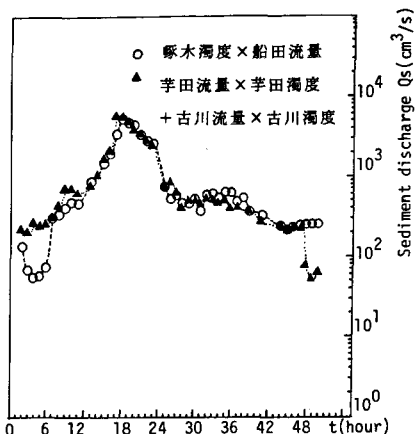


図-2(d) 四支川合流前後の濁質負荷量

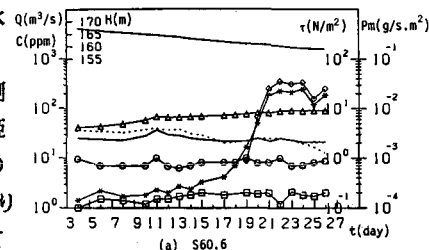


図-3 6月の濁度、洗掘率、平均掃流力

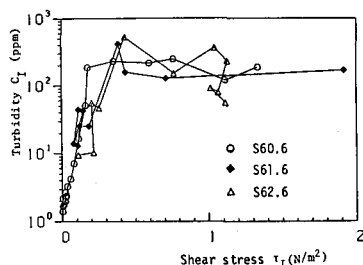


図-4 岩姫の濁度と掃流力の関係

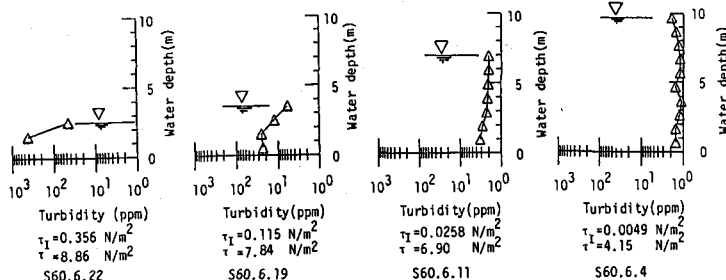


図-5 貯水位の低下に伴う岩姫濁度の変化

濁度の上昇を掃流力の増加と関連させて説明する事を試みる。まずManning則が適用できるものとし、 n の値を仮定する。貯水位から出発して背水計算を行い、船田橋の水位と一致するか否かを確かめる。この時、流量としては、船田橋流量を使用する。船田橋流量とダム放流流量は大きくは異ならないうえに、水位が大きく変化するのは、岩矩橋より上流の川となっている部分であって、船田橋流量に大きく支配されている所だからである。流量の大きさにもよるが、 n は0.029-0.034の間の値を取る事が判った。この値は過去に行なわれた流速分布から求められる0.035に一致する。¹⁾

ところで、岩矩橋では最も水深が深く水面勾配も小さいので、掃流力は船田橋・岩矩橋間の区間内で最小である。図-4に、岩矩橋地点での掃流力と濁度の関係を3年分について示す。ここで推定される掃流力が 0.2 N/m^2 に達するまで濁度は急激に増加し、その後濁度は掃流力の増加如何に関わらず大きな変化を見せない。

掃流力の増加にともなう濁度鉛直分布の変化を図-5に示す。 τ_1 は岩矩橋での掃流力、 τ は区間平均掃流力である。 τ_1 が 10^{-3} N/m^2 、 τ が 4 N/m^2 の程度の時、濁度は小さく、鉛直方向にも一様である。 τ_1 が 0.06 N/m^2 、 τ が 7 N/m^2 を越える頃から下方の濁度が上昇し始める。したがって、動きやすい堆積物上層部の洗掘開始は 0.06 N/m^2 程度としてよい。 τ_1 が 0.3 N/m^2 、 τ が 8 N/m^2 を越えると鉛直分布は又一様に近づく。上下の混合が進むからである。こうなると、一度洗掘された堆積物は殆ど沈降する事がない。此の値が 0.3 N/m^2 で、浮遊継続条件である。この値は、同じ土と水道水を使用して行なった実験での移動開始条件と同じである。²⁾

区間内の最小掃流力は、今の場合最下流地点で生ずる。ここで浮遊継続条件を越えると、区間内で発生した濁質はすべて更に下流へと運ばれる事になる。したがって、下流の岩矩橋を通過する濁質負荷量と上流の船田橋地点から流入するものとの差が、この区間内で洗掘再浮上して濁質量になる。河床面単位面積当たり単位時間当たりの洗掘率 P_m ($\text{g/m}^2\text{s}$)を船田橋濁度 C_F (ppm)、岩矩橋濁度 C_I (ppm)から推定するには、船田橋流量 Q_F (m^3/s)を使って次式で計算すればよい。図-6 水位低減期の洗掘率と平均掃流力

$$P_m = kQ(C_I - C_F)/AH \quad (1)$$

ここで、 k は濁度を $ss(\text{mg/l})$ に換算する係数で、我々の場合、実測の結果に基づき $k=2.6$ とした。³⁾ また $AH(\text{m}^2)$ は河床の面積である。この計算を行なうに当たっては、区間内の流下時間を考慮しなくてはならない。船田橋から岩矩橋までの流下時間は実測や計算に依れば30分程度である。また、船田橋に流入する濁質量は大きくなく、またその時間的変化も此の時期には極めて小さいので、時間差は実際には無視して計算してもよい。

区間内平均掃流力と洗掘率の関係を図-6に示す。 8 N/m^2 程度から洗掘が開始される。水深が低下すると、掃流力は最大で 9.5 N/m^2 位まで増加する。この増加に対応して洗掘率は急速に増えるが、そのうち剪断強度の強い下方の堆積物が現われて洗掘率は低下していく。こうしてやや固い堆積物が表面に現われた状態で洪水期を迎える事となる。したがって、洪水期の洗掘開始を引き起こす掃流力は、水位低減期に経験した最大掃流力 9.5 N/m^2 を上回るものとなろう。

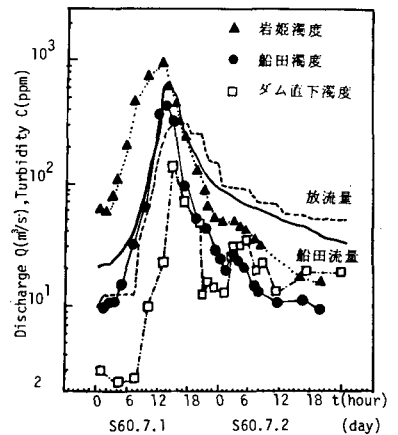
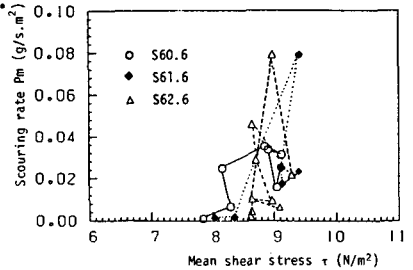


図-7 S60年7月の流入、流出濁度

5. 洪水期における貯水池末端での濁度

制限水位期には、船田橋・岩姫橋間は川の状態になる。流速が小さいと河床は落ちており、区間内での濁度変化は生じない。ところが出水により掃流力が増加すると、この区間内で新たな洗掘が生ずる。

図一七は昭和60年の実測の結果である。船田橋に流入する濁度の最大値は400 ppm程度であるにも関わらず、下流の岩船橋ではその倍近い濁度となる。区間内で激しい洗掘が生じている事を意味している。この時期にはこの区間は川となっているので、平均掃流力は船田橋の流量、水深、区間の平均勾配から等流として計算できる。6月の結果（黒丸、黒三角、黒四角）と、それにひきつづく洪水期の結果（白丸、白三角）を共に示したのが、図一八である。昭和59年の結果も含まれている。洪水期には掃流力が10 N/m²を越えると初めて洗掘が生じ、初期には洗掘率は線形に比例して増加する。いま、実験室内での結果と同様に

$$P_m = C (\tau / \tau_c - 1) \tag{2}$$

の関係が成立すると仮定すると、Cは昭和59年は12.47 N/m²、昭和60年は11.05 N/m²でほぼ一致するが、Cはそれぞれ3.08×10⁻⁴、9.22×10⁻⁴と3倍の開きがある。この差の原因は明かではないが、堆積層厚さが影響しているであろう。

ある程度まで洗掘された後では、洗掘率は掃流力が増加しても減少する。上部の柔らかい部分が無くなり、下部の剪断強度の大きい堆積物が現われるからである。

この両年の測定では、洪水期に現れた最大の掃流力は約50 N/m²であったが、最大洗掘率は45 N/m²に対応して発生している。

図一七は、昭和60年7月1日から3日にかけての観測例であった。台風による出水で、流域平均総雨量は75 mm、貯水池に流入する流量のピークは550 m³/s、ダムからの最大放出流量は330 m³/sであった。流入濁度に比べ、岩姫橋濁度が常に上回り、船田橋・岩姫橋間で盛んに洗掘が生じていた事がわかる。さらに7月2日2時頃から放流水濁度が船田橋からの流入濁度を越えている。これは、船田橋・岩姫橋間での再洗掘の影響がダム下流に及んだものと解釈できる。

6. 年間を通じての沈降と堆積の収支 水位の高い時期である11月から5月迄は、船田橋から流入する濁質はほとんど岩姫橋迄の間に沈降堆積する。従来の観測で、岩姫橋の濁度がきわめて小さいからである。船田橋の流入濁質量は、ここでの流量濁度関係がC_F = 4.53×10⁻²Q₀^{1.52}となる事からもとめられる。⁴⁾ssに換算するには、係数2.6をかければよい。

水位低下期である6月には船田橋・岩姫橋間の堆積物が洗掘されて、その下流の貯水池へ移動して堆積する。岩姫の濁度と貯水位とは図一九に示すようによい相関が見られるので、これを利用する。年によって水位低下の推移は異なるが、今は昭和60年度と同じで

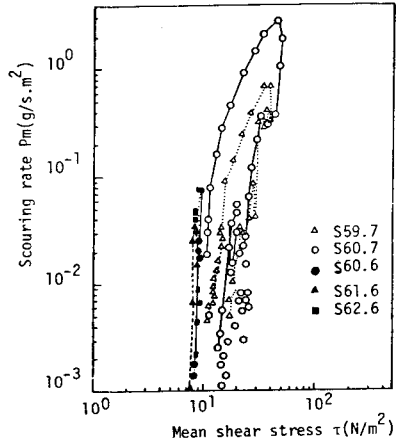


図-8 洗掘率と平均掃流力の関係

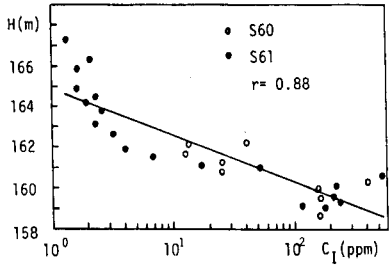


図-9 岩姫濁度と貯水位の関係

表-1 沈降量と洗掘量 (m³)

年	11月-5月 沈降量	6月 洗掘量	7月 洗掘量
S51	7030	3557	
S52	21212	3326	
S53	13857	8538	
S54	8989	6490	
S55	26404	3151	
S56	9600	8541	
S57	16592	4502	
S58	9192	6444	
S59	12456	4465	3103
S60	7910	4112	1360
S61	6806	2424	

あると仮定した。結局、岩姫橋での濁度は昭和60年度と同じで、船田橋での流量、濁度だけは当該年度の資料を使用したことになる。

7月から10月迄の洪水期にあっては、出水の出方に大きく左右されるから、昭和59年、昭和60年のみを対象とする。

10月の水位回復期に関しては、今のところ観測値が無く扱うことが出来ない。

こうして計算した結果を表-1に示す。以上をまとめると、年間を通じての経過は次の通りとなる。

冬期に船田橋を通じて流入する濁質負荷量は、 $7,000\text{ m}^3$ から $20,000\text{ m}^3$ の範囲である。これはほとんど岩姫橋までに沈降し堆積する。

水位低下期に再洗掘され下流へ運ばれて沈降堆積する量は、 $2,500\text{ m}^3$ から $8,500\text{ m}^3$ の程度である。その他は洪水期の掃流力が 10 N/m^2 を越えると洗掘される。昭和59年の例でみると、冬期に供給され岩姫橋迄に堆積したのが $12,000\text{ m}^3$ 、水位低下期に洗掘されここから下流の貯水池に運ばれて再堆積したのが $4,500\text{ m}^3$ 、洪水期にこの区間で洗掘されたのが $3,000\text{ m}^3$ であった。残りの $4,500\text{ m}^3$ は、船田橋・岩姫橋間の高水数に堆積したものであろう。

7. 結論

四十四田ダム貯水池に流入する濁質の発生の特徴、ダム内での挙動、ダム下流への流出に関する実測を行った。

平常時においては、支川赤川での濁度生産が顕著である。その濁度は他支川にくらべ約5-10倍も大きい。これは旧松尾鉱山からの廃水の影響が、まだ完全には解消されていないからであろう。出水があると、赤川だけは、河道堆積物の洗掘、流域からの濁度生産といった、ふたつの濁度ピークが生ずる。他支川では流域からの濁度生産が出水のピーク付近で濁度のピークをもたらす。赤川、松川は同程度の流域面積を有しているにもかかわらず、松川の濁度生産によるピークが赤川のそれより大きいのは松川の裸地の割合が大きい事と関連しているものと考えられる。

流域で発生した微細粒子は貯水池末端で沈降堆積する。11月から5月までの常時満水位期では、船田橋から岩姫橋の間に堆積する。

6月の水位低下期には、掃流力の増加に従って堆積物は移動を始める。堆積物の表面は動き易く、掃流力 0.06 N/m^2 位から移動開始し、 0.3 N/m^2 位でかなり目立った濁度で浮遊し移動を継続する。この値は、実験で得られた移動開始条件と一致する。ただ、この時、区間平均掃流力は 8 N/m^2 であった。水位低下期の最大区間平均掃流力は 9.5 N/m^2 で、これで動かされ得る堆積物はすべて洗掘され、浮上して制限水位期の貯水池に再び堆積する。

洪水が来襲し、船田橋・岩姫橋間で平均掃流力が 10 N/m^2 を越えると新たな洗掘が起こる。洗掘初期には洗掘率と掃流力は線形比例するとして差し支えない。しばらくすると、掃流力が増えても洗掘率はかえって減少する。下部に行けば堆積物の剪断強度が増加する事、堆積物の量は有限である為である。堆積物厚さ、その剪断強度分布を与えないと解決できない。

洪水で再洗掘された微細粒子は、多くの場合貯水池内に再び沈降して下流へは流出しない。我々の観測例では、放流量が $330\text{ m}^3/\text{s}$ に達した場合にのみ、再洗掘されたものの一部がダム貯水池外に流出したのであった。

参考文献

- 1) 伴一彦：東北大学 昭和53年度卒業論文，1978。
- 2) 小暮和史，首藤伸夫：貯水池における濁度物質の堆積と洗掘，第24回水理講演会論文集，pp. 265-270，1980。
- 3) 張旭紅，首藤伸夫：貯水池末端部に堆積した粘性底泥の再洗掘，第41回年次学術講演会，pp. 263-264，1986。
- 4) 田村広文，首藤伸夫：北上川上流域における流出と濁質発生量の解析，第31回水理講演会論文集，pp. 179-184，1987。