# 天ケ瀬貯水池の濁水に関する調査研究

村本　嘉雄・道上　正規・藤田裕一郎

# INVESTIGATION ON TURBIDITY IN AMAGASE RESERVOIR

By *Yoshio* MURAMOTO, *Masanori* MICHIUE and *Yuichiro* FUJITA

**Synopsis**

This paper treats the turbidity problem and the sedimentation in Amagase Reservoir. In order to catch the characters of these phenomena we took up observing the concentration of turbidity, the water temperature and the sedimentation rate in Amagase Reservoir in May 1973.

It is clarified from these observed results and other data that the turbidity in the reservoir is closely relatied to the transport rate of wash load in Daido River. By using the calculated transport rate of wash load in Daido River as the boundary condition, the turbidity concentration in the reservoir is analyzed by means of the mass conservation equation which includes the effect of particles with fall-velocity. The calculated results in some cases of flood are in good agreement with the observed values as a whole. As for the detailed parts, however, we leave room for investigating them.

## 1. 緒　　　言

近年水資源確保ならびに洪水制御を目的として，大ダムの建設が脚光をあびている。このようなダムの我々にもたらす恩恵は，非常に大きいものであるが，一方ダム構造物は河川のある種の平衡状態を乱し，予想外の災害をしばしば引起すことがあるので，ダム建設に伴なう河川環境の変化を予測し，それに対処できる方法を考えなければならない。河川環境の問題は，非常に広範多岐にわたるが，本論文ではそのうちの土砂問題を中心に検討することにしよう。

ダム構築によって生じる土砂に関連した諸問題は，主として次のように分類される。

ダム構築
- ① 堆　砂 ─貯水容量の減少─掃流砂・浮遊砂
- ② 背　砂 ─貯水池上流部の河床上昇─掃流砂
- ③ 河床低下 ─ダム下流部の河床低下─掃流砂
- ④ 貯水池の濁水 ─水質変化─微細砂 (wash load)

①～③の問題は従来多くの研究が行なわれており，かなりの精度で予測が可能となっているが，しかし④の問題に関しては，まだ実態調査の段階であり，その詳細な全容は明らかにされていない。したがって，ここでは主として微細粒子による貯水池の濁水の長期化現象を検討する。

貯水池の濁水の長期化現象が最近社会問題化しつつあるが，その影響の対象になるものとしては，河川の底生動物や魚介類，貯水池や河川の美観，農作物および上水や工業用水などである。いま，底生動物に与える濁

水の影響を，津田・御勢[1]の吉野川における研究を引用して検討してみると，河川の早瀬では濁度が20以上，淵の場合濁度が6以上で底生動物に影響を与え始めると言われている。さらに，貯水池は観光資源としても有用であるので，貯水池の濁水の長期化や濁度の低減を制御することが望ましくなってきている。

貯水池の濁水に関する従来の研究で，吉川・山本[2]は小河内貯水池を対象にして，四季によって貯水池濁度のパターンが変化し，中層に濃度の高い濁水層が発生するのは，洪水時と貯水位が低下しつつある時であることを指摘している。一方，安芸・白砂[3]も洪水規模の異なる3出水について濁度と水温分布を検討し，中小洪水の場合に，貯水池の中層に帯状の濁水層が形成され，大洪水の場合には，濃度の鉛直分布はほぼ一様になると指摘している。このように，貯水池の濁度分布は，貯水池の水温成層の形成状態および流入流量や濁度物質の特性に大きく左右されるので，非常に複雑な様相を呈する。したがって，その予測法に関しては，何んら知見を持っていないと言っても過言ではない。

本報告は，宇治川に築造されている天ケ瀬貯水池を対象にして，昭和48年5月から，池内の微細砂の挙動を明らかにすることを目的として，濁水の濃度，堆積量および水温分布に関して観測した結果と，それを定量的に把握するために，簡単なモデルで数値的に検討した結果を述べるものである。

## 2.　天ケ瀬貯水池の濁水調査結果

### (1)　貯水池の概要

天ケ瀬ダムは淀川水系の宇治川に昭和38年に築造され，その総貯水容量は $26.3\times10^6$ m$^3$ である。貯水池への流入水の大部分は琵琶湖流域からのものであって，その流入水は清澄である。一方，洪水時には，流域面積 189 km$^2$ で裸地面積率約5%の大戸川がこの貯水池の主要な土砂供給源となっており，貯水池の堆砂や濁りに関しては大戸川との関係が非常に密接である。さらに，ここにはこの貯水池を下部池とする揚水式発電所の取放水口が設けられており，その最大揚水量 220 m$^3$/sec，最大放水量 248 m$^3$/sec の取放水が行なわれている。

### (2)　観測の方法

微細砂の湖底付近の堆積量を測定するため，水面から 37 m の深さに内径 4.92 cm のメスシリンダーをロープでつり下げて，約1カ月の間にメスシリンダーに堆積する量を観測した。その観測地点は **Fig. 1** に示されており，ダムサイトから 100 m の地点のブイ地点と天ケ瀬ダム発電所取水口の地点であって，メスシリンダー中の堆積量，堆積物の空隙率および堆積物の粒度分布を測定するとともに，これらの地点で，水温の鉛直分布，濃度分布も定期的に観測した。

さらに，湖底の堆積物の粒度分布を縦断方向に約 1 km 間隔，水温および濁水の濃度分布に関しても 1 km 間隔に数回観測した。

### (3)　堆砂形状と粒度分布

**Fig. 2** は常時満水位を基準にした平均河床高の経年ごとの変化と，湖底堆積物の $\phi$ スケール単位の中央粒径を示したものである。天ケ瀬貯水池内には，3.1 km 地点に旧大峯ダムがあり，それより上流側は掃流砂，下流側は浮遊砂の堆積領域になっていることが堆砂形状から判断される。さらに，この状況を適確に把握するために，湖底堆積物の中央粒径の図を参照する

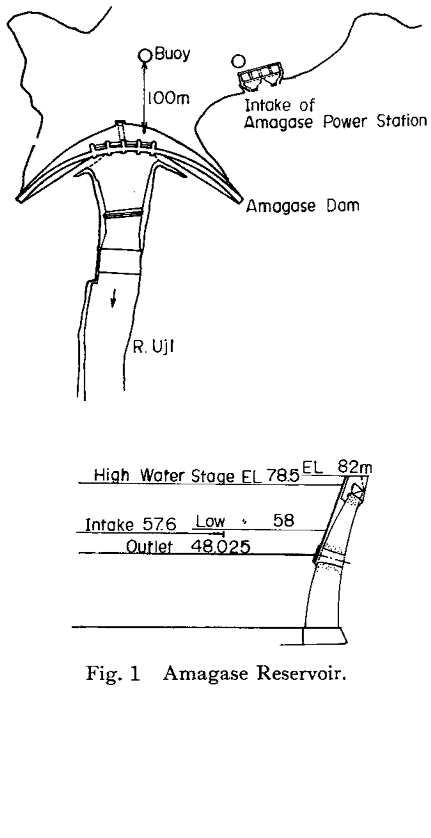


Fig. 1　Amagase Reservoir.

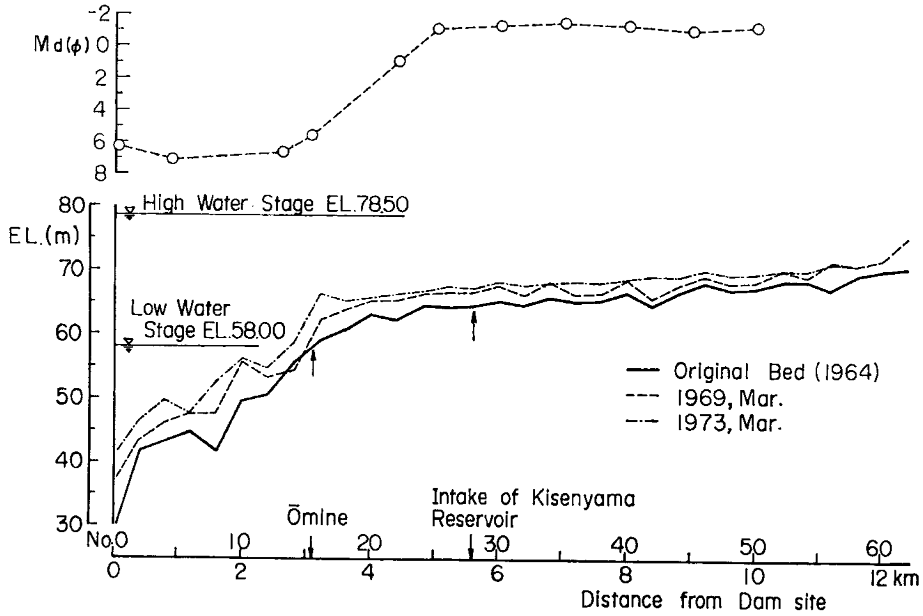


Fig. 2 Bed Profile and median grain size of deposited material in Amagase Reservoir.

ことにしよう。この図によれば，0～2.1 km 区間と 5～10 km 区間では，中央粒径が非常に相違しており，上流区間が純掃流砂の堆積領域で，下流区間が純浮遊砂の堆積領域を形成している。その中間領域 2.1～5 km では，掃流堆積物に浮遊砂部分の堆積物が混入しており，遷移領域的挙動を呈しているが，これは洪水時の流量や貯水位などと関係しているものと考えられる。**Fig. 3** は湖底堆積物の粒度分布形状を示したものであって，浮遊砂の堆積領域では 0.072 mm 以下の粒子のみで構成されている。また，掃流砂の堆積領域では，最大粒径 20～30 mm 程度であって，浮遊砂部分とはまったく相違する分布形状を示している。No. 22 の遷移領域の粒度分布には，浮遊砂と掃流砂部分の粒度が混入していることがこれからも理解されよう。さらに，図中に wash load と記した粒度分布が記入されているが，これは大戸川の wash load の平均的な粒度分布を示したものであって，浮遊砂の堆積や池水の濁りに関与する粒度は，このような上流部の wash load の中に含まれている粒子に密接に関係していることがわかる。

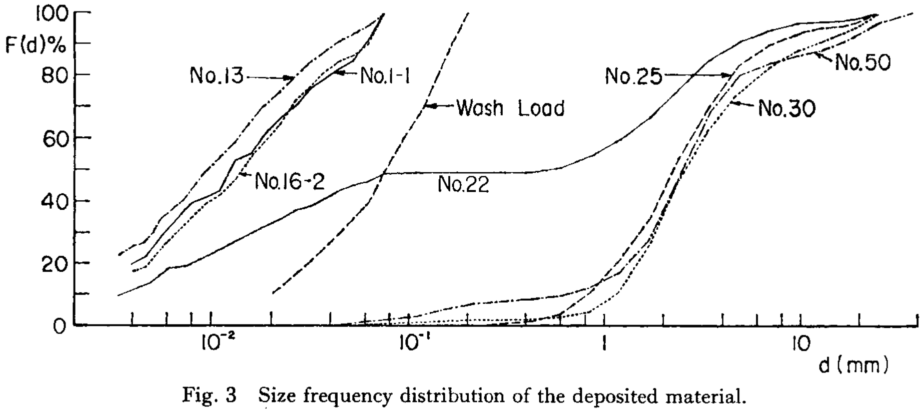


Fig. 3 Size frequency distribution of the deposited material.

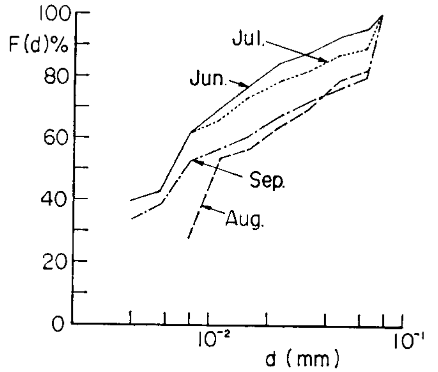


Fig. 4 Size frequency distribution of material deposited in bottle.

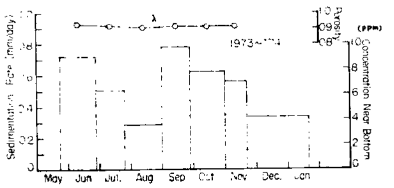


Fig. 5 Sedimentation rate and concentration near bottom every month.

**Fig. 4** はダムサイト近くの湖底付近のメスシリンダー中に堆積した粒子の粒度分布を示したものであるが，この図と **Fig. 3** を比較すれば，メスシリンダーで採集した粒子の粒度分布と湖底堆積物のそれとはよく類似していることが理解されよう。したがって，濁りを呈している部分の粒度分布は湖底堆積物とほぼ類似な粒度分布形であると考えられる。

湖底付近につり下げられたメスシリンダーに堆積した粒子層厚を，約1ケ月毎に観測して見かけ堆積速度を求め，次式で湖底付近の濃度を計算した結果が **Fig. 5** である。

$$C_b=(1-\lambda)S/w_0 \quad \cdots\cdots(1)$$

ここに，$C_b$: 湖底付近の濃度，$w_0$: 粒子の沈降速度 $\approx 0.02$ cm/sec，$\lambda$: 空隙率，$S$: 見かけ堆積速度である。この観測期間中には洪水らしきものが発生しなかったので，湖底付近の濃度や見かけ堆積速度は顕著な季節的変化もなくかつ非常に小さくなっている。したがって，この資料を平年の堆積速度として適用するとそれを過小評価することになると思われるので，さらに観測を続行して，堆積量と堆積速度の関係を検討しなければならない。空隙に関しては，このような微細砂の場合，平均して $\lambda \approx 0.9$ となっており，非常に大きな値を示している。このことから，微細砂の正味の堆積量を推定する場合，見かけ堆積量とは非常に相違することに留意しなければならない。

**Fig. 6** は取水口地点で測定した濁水濃度の鉛直分布を示したものである。この図と **Fig. 5** の湖底付近の推算した濃度とを比較すると，後者は水面下 37 m の月平均の濃度ではあるが，ほぼ実測値と同程度の値を示している。これから湖底付近の濃度の境界条件としては，沈降速度で堆積するという境界条件，すなわち $|D\frac{\partial C}{\partial z}+w_0C|_{z=0}=|w_0C|_{z=0}$ の条件が成立すると考えられよう。

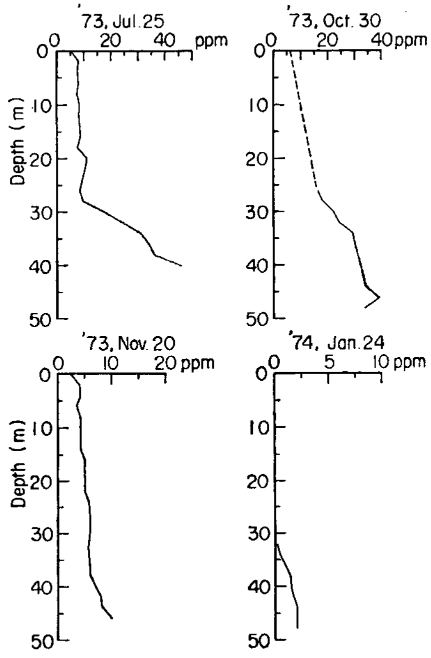


Fig. 6 Concentration distribution observed at intake of Amagase power station.

(4) 濁水の濃度分布

**Figs. 7～9** はそれぞれ7月，10月，11月の鉛直濃度分布の縦断方向の変化を示したものである。**Fig. 7** の濃度分布は流入流量が10数 m³/sec のときで，その前後になんら出水もなく，貯水池内の水が比較的清澄な場合である。この場合には，3～4 km 地点を境界にして上下流で若干異なった分布を呈している。すなわち，上流側では河川の河道的特性を示し，下流側では貯水池的な特性を有している。

一方，**Fig. 8** は10月28日に小出水が発生し，その流入最大流量は約 40 m³/sec で，大戸川から濁水が流入した2日後の池内の濃度分布である。喜撰山発電所の取放水口（約 5 km 地点）を境界にして，下流側では深さ方向に濃度が単調に増加しているが，上流側では取放水口の影響を受けて，上層の方が濃度が高くかつその影響範囲は上流に行くにしたがって消滅している。すなわち，5 km 地点で強い鉛直混合が行なわれ，これより下流に対しては濃度の高い部分が底層に侵入する傾向にあり，上流側では底層に清澄な流入水が侵入し，上層に濃度の高い部分の水が 5 km 地点から逆流していると考えられる。この傾向は出水後27日経過した Fig. 9 においても若干認められる。さらに，Fig. 10 の水温分布を参考にすれば，琵琶湖からの流入水の水温は貯水池内のそれよりも低く，5 km より上流側では底層に侵入していることが理解されよう。5 km 地点では水温分布は強い鉛直混合のため一様化し，それより下流では弱い成層状態となっている。

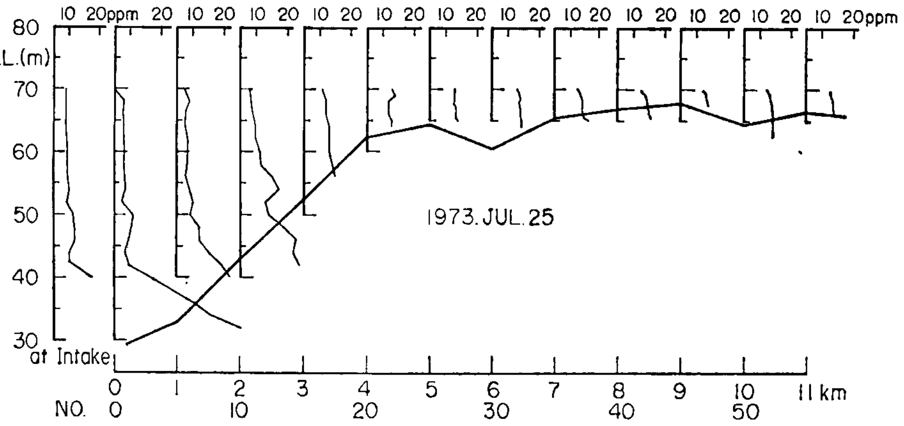


Fig. 7　Concentration distribution of turbidity.

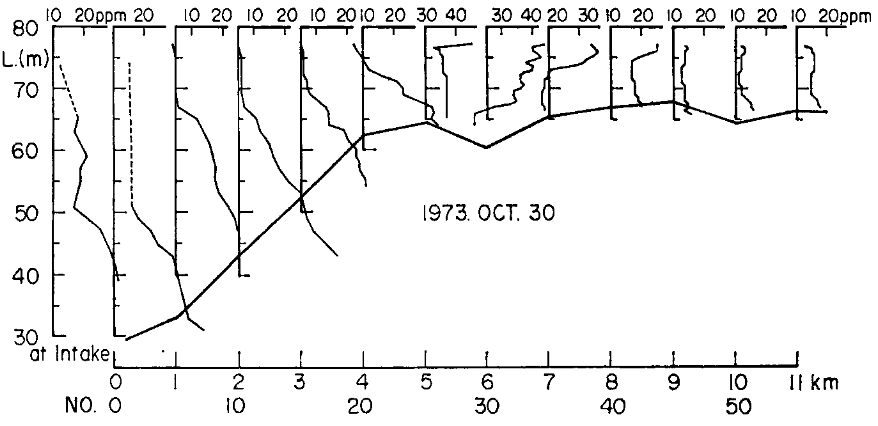


Fig. 8　Concentration distribution of turbidity.

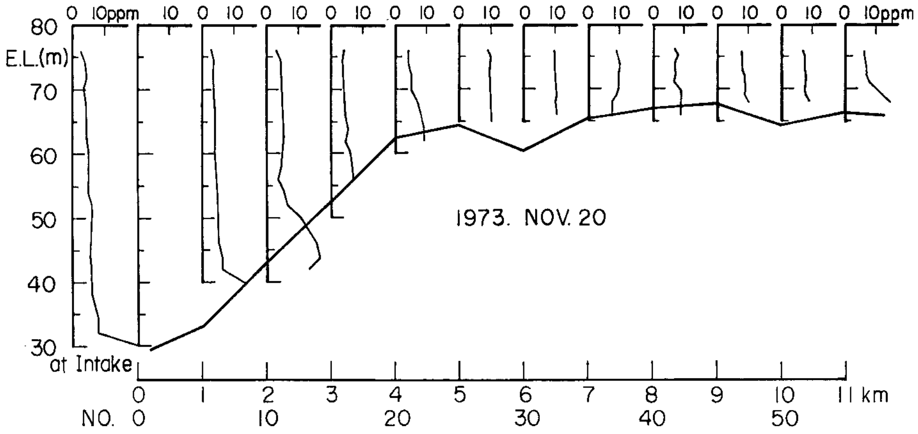


Fig. 9 Concentration distribution of turbidity.

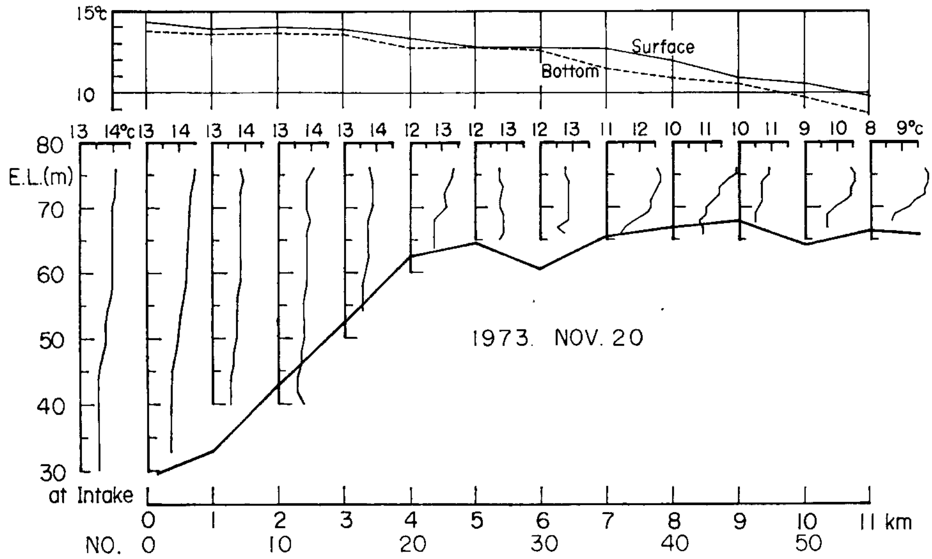


Fig. 10 Distribution of water temperature.

以上の観測結果から，5 km 地点の取放水口は小洪水に対して濃度分布に影響を及ぼしているものと考えられる。

### 3. 貯水池濁度の推算モデル

貯水池濁度を予測するには，流入流砂量やその質的特性，池内の流動的特性，拡散係数および境界条件を把握しなければならない。しかし以上の事項に関して，明確に把握できるものは存在しないといっても過言ではないので，ここでは濃度の連続式を用いて簡単に考察を試みる。

**Fig. 11** を参照して，揚水式発電所の影響を考慮しない場合の濃度の流入流出に関する連続式は次式のように書ける。

$$\frac{d(\beta VC)}{dt}=Q_iC_i-Q_0C_0-kw_0CA \cdots\cdots\cdots(2)$$

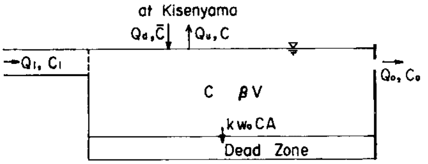


Fig. 11　Definition sketch.

ここに，$Q_i, Q_0$: それぞれ流入および流出流量，$C_i$, $C_0$: それぞれ流入および流出の濃度，$C$: 貯水池濁度の平均濃度，$V$: 貯水容量，$A$: 貯水池の湛水面積，$\beta$: 混合係数，$w_0$: 粒子の沈降速度および $k$: $0<k\leq 1$ の定数である。(2)式の右辺第3項は粒子の沈降速度によって湖底に堆積する量を示しており，非沈降性の粒子の場合に比較して，この項の量だけ速く濁りが消滅することを意味している。

(2)式には，2つの未知数が含まれているので，流出水の濃度を貯水池濃度に比例させることにする。

$$C_0=\gamma C \cdots\cdots(3)$$

この $\gamma$ は濃度分布形に対する補正係数的なものである。(3)式を(2)式に代入して解くと次式を得る。

$$C=e^{-\int\xi dt}\left(\int\eta e^{\int\xi dt}\,dt+C_I\right) \cdots\cdots(4)$$

ここに，$\xi=\{(\gamma Q_0+kw_0A)/\beta V+d\ln(\beta V)/dt\}$, $\eta=Q_iC_i/\beta V$, $C_I$: 初期の貯水池濃度である。とくに，濁水の長期化現象に対しては，濃度の減衰期間が問題になるので，(4)式において濃度ピーク以後の減衰状態を検討する。簡単のために，$\eta=0$, $d\ln(\beta V)/dt=0$ を仮定すると，

$$C=C_{max}\exp\{-(\gamma Q_0+kw_0A)t'/\beta V\} \cdots\cdots(5)$$

のようになる。ここに，$C_{max}$: 濃度のピーク値，$t'$: 濃度のピーク時から測定した時間である。(5)式から明らかなように，沈降性粒子の場合は非沈降性のそれに比較して，濃度の低減係数が $kw_0A/\beta V$ だけ付加されて大きくなる。

また，(5)式から貯水量と流入流量の関係によって濁水の長期化現象の概観を知ることができる。安芸・白砂は濁水の長期化現象に対する目安の指標として，$a$=貯水池年間総流入量/貯水総容量および $b$=1 洪水総流量/貯水総容量の2つのパラメーターを考えて，$a<10$ でかつ $b<1$ の場合に濁水長期化現象が生じやすく，一方 $a>20$ では池水混合が生じやすい混合型になり，長期化現象は生じにくいとしている。

さて，(4)式で貯水池の濃度時間曲線を計算するのは困難であるので，(2)式を差分式に書き改めて数値計算することにしよう。その差分式は次式のように表わされる。

$$C_{j+1}-C_j=\frac{X_j}{Y_j}\Delta t-\left(\frac{Q_j+Z_j}{Y_j}\Delta t+\ln\frac{Y_{j+1}}{Y_j}\right)C_j \cdots\cdots(6)$$

ここに，添字 $j$ および $j+1$ は $j\Delta t$ と $(j+1)\Delta t$ 時刻の値を示す。また，$X=Q_iC_i$, $Y=\beta V$, $Z=kw_0A$, $Q=\gamma Q_0$ である。

次に，揚水式発電所の濃度に及ぼす影響として，i) 貯水池に流入する濁水を一時的に揚水してある時間後に放水することによる一種の濁水の貯留効果と，ii) 放水時の底質土砂の浮上効果が考えられるが，ここでは前者の影響のみを考慮して検討することにしよう。**Fig. 11** を参照して，この場合の濃度の連続式は，

$$\left.\begin{array}{ll}\text{揚水時} & \dfrac{d(\beta VC)}{dt}=Q_iC_i-Q_0C_0-kw_0CA-Q_uC\\[2ex] \text{放水時} & \dfrac{d(\beta VC)}{dt}=Q_iC_i-Q_0C_0-kw_0CA+Q_d\bar{C}\end{array}\right\} \cdots\cdots(7)$$

のように書ける。ここに，$Q_u, Q_d$: それぞれ揚水式発電所の揚水量および放水量，$\bar{C}$: 上部池における揚水した池水の濃度であって，放水時には一定濃度で下部池に流入するものとする。(7)式も(2)式の場合と同様に差分式で数値計算することができる。

## 4. モデルの適合性の検討

前述したように，濁水の貯水池濃度を予測するには，流入端の境界条件を与えなければならないが，これに関しては数年来河川災害部門[4]で流砂観測してきた大戸川の wash load が天ヶ瀬貯水池の濁水を生起させる主要な流砂源であると仮定して，この結果を用いた。すなわち，$C_i$ としては，大戸川の流量を用いて **Fig. 12** の曲線から求められる wash load の値を天ヶ瀬貯水池の流入端条件とした。この wash load の粒度分布は **Fig. 3** に示しているが，その最大粒径は 0.2 mm となっている。

**Fig. 13** は昭和42年の天ヶ瀬貯水池の日流量，取水口地点の濁水濃度ならびに大戸川の wash load の日最大濃度を示したものである。なお，濁水濃度資料は京都府山城水道事務所において測定されたもので，その単位として濁度を用いていたが，1 濁度が 1 ppm にほぼ等しいことが検定の結果判明したので，これをppm単位で書き改めている。この図から明らかなように，7月および10月出水で，大戸川の wash load 濃度および天ヶ瀬貯水池の取水地点濃度も高くなっており，両者の相関がよいことを示している。さらに，ここで重要なことは，7月出水においては多量の wash load が流入していると推測されるが，しかし貯水池の濁度の長期化は生じていない。他方，10月出水では濁水の長期化現象はかなり明瞭に現われていることがうかがえる。この理由として考えられるのは，7月出水では流量が非常に大きくなっており，かつその大部分の流量は琵琶湖からの清澄な水で，貯水池流入流量に占める大戸川などの流量の占める割合は，洪水時に限られていることに依存している。したがって貯水池水の混合が非常に速かに行なわれたので，濁水の長期化現象は生じなかったものと考えられる。一方，10月

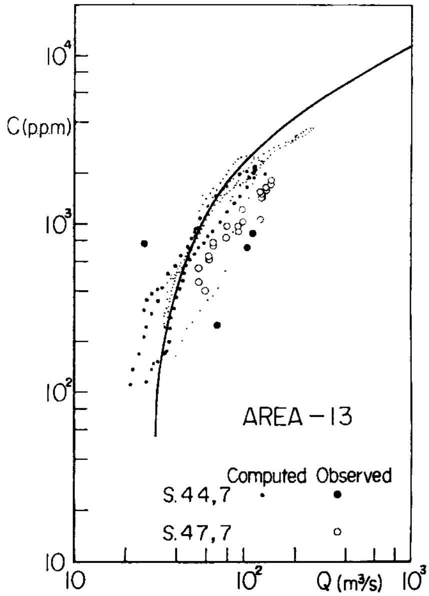


Fig. 12　Relation between sediment concentration of wash load and water discharge in Daido River.

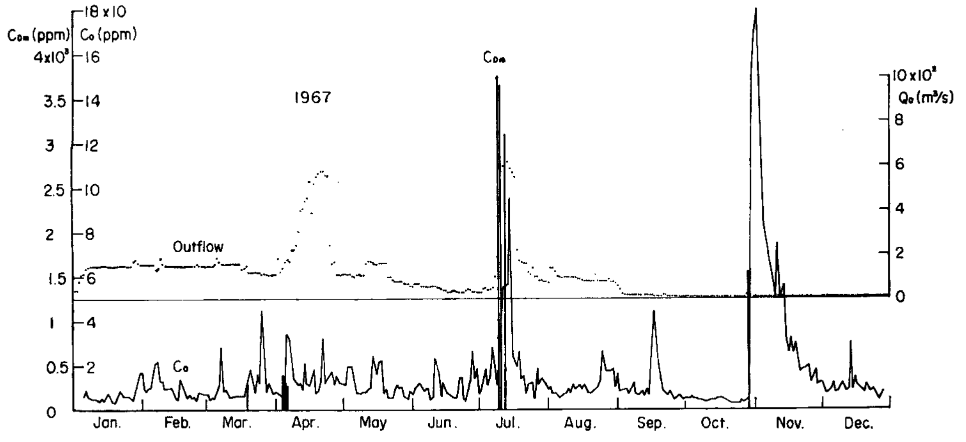


Fig. 13　Changes of turbidity concentration and water discharge in 1967.

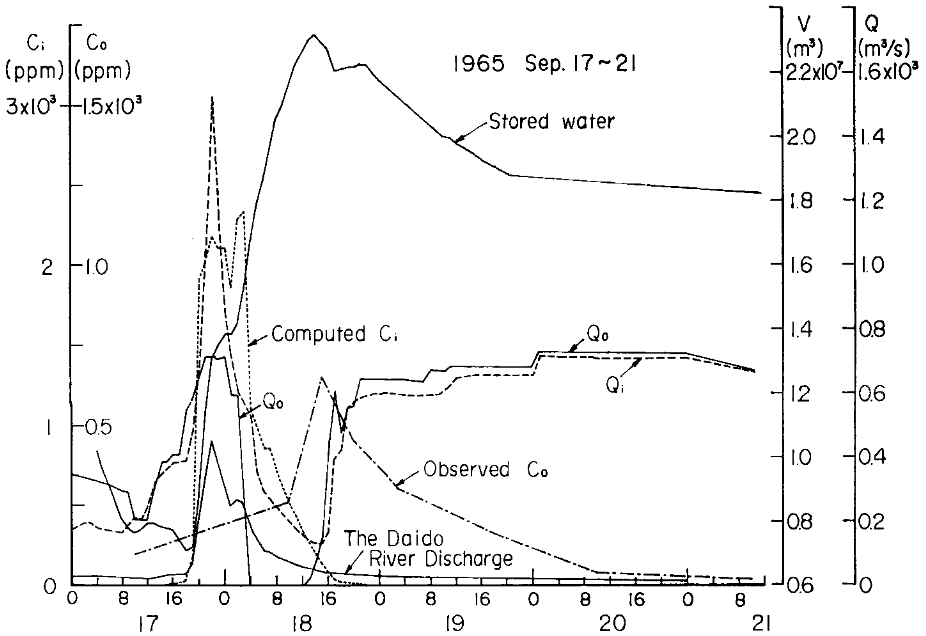


Fig. 14 Hydraulic characteristics of flood in 1966.

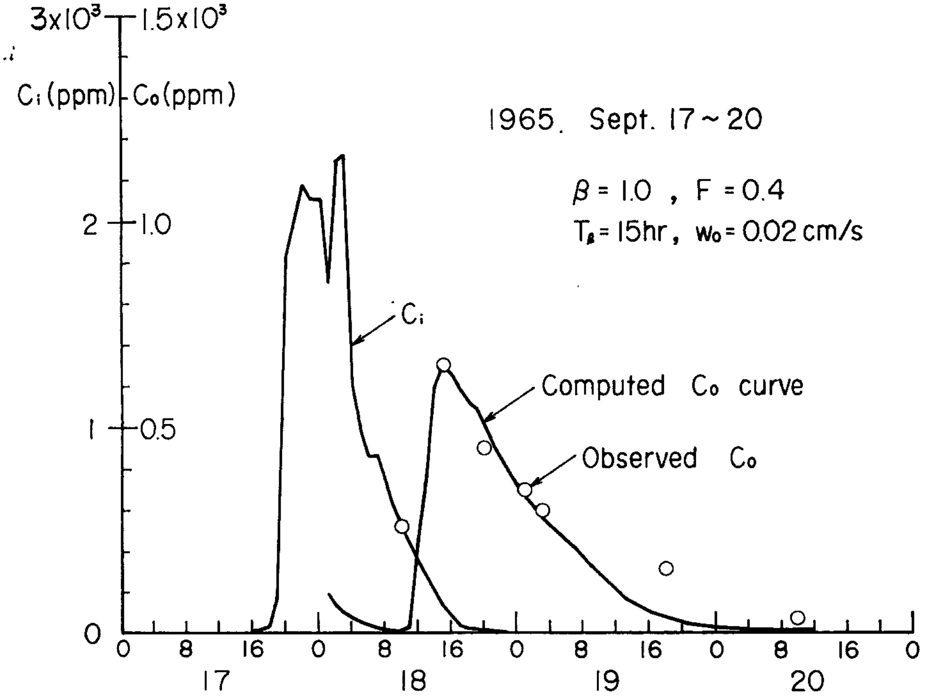


Fig. 15 Comparison between calculated value and observed ones in 1965 flood.

出水の場合には，渇水期であって，琵琶湖からの流量も 10 m³/sec 以下の状態で，小洪水が発生したために，池水の混合が生じにくく濁水の長期化が生じたものと推定される。

次に，洪水時の貯水池濃度の時間的変化を(6)式を用いて検討した結果が **Figs. 14～17** である。**Fig. 14** の昭和40年9月出水は約10年に1回起こる規模の洪水で，その水理特性を図に示している。図中の $C_i$ は大戸

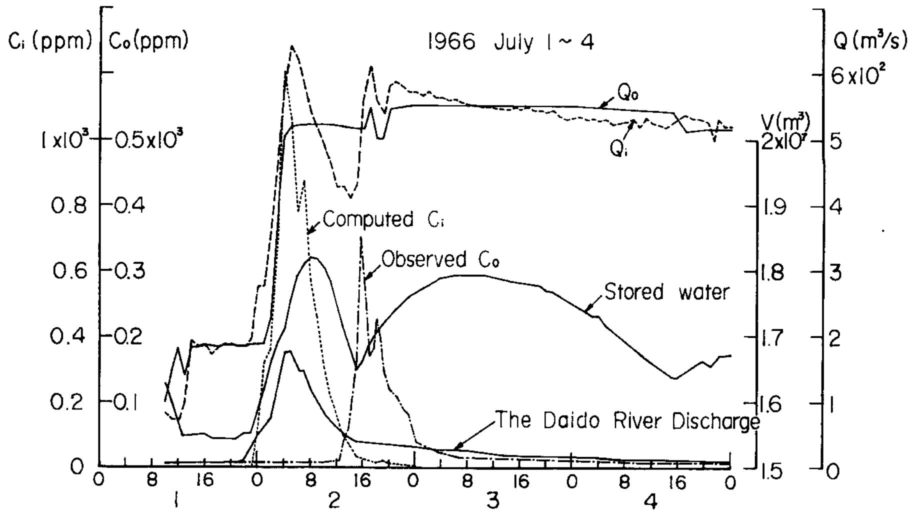


Fig. 16　Hydraulic characteristics of flood in 1966.

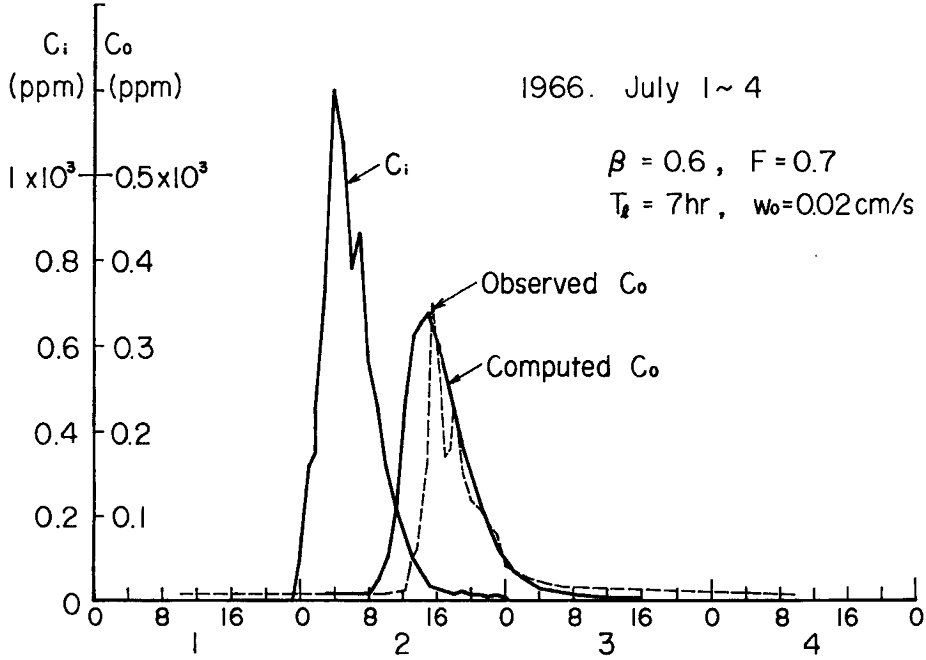


Fig. 17　Comparison between calculated value and observed ones in 1966 flood.

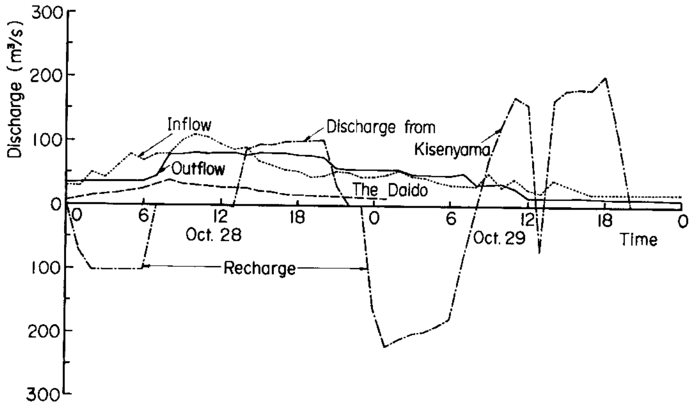


Fig. 18　Hydraulic characteristics of flood in 1973.

川の wash load の計算値から求めた貯水池流入端の濃度である。大戸川の流量が低減してから，琵琶湖から多量の清澄な水が流入しているが，この点が他の河川と相違する大きな特徴点と言えよう。

貯水池の濃度を(6)式で計算した結果と実測値との比較が **Fig. 15** に示されている。ここに，図中の$F$の値は，wash load のすべてが貯水池の濃度に有効であるとは考えられないので，流入端濃度を $FC_i$ として補正した係数である。また，$T_l$ は取水口地点と流入端との間の遅れ時間を示すもので，これは実測値と計算値濃度のピーク値を一致させることによって求めた時間である。$T_l$ の値は貯水池の長さを断面平均流速で除して求められる値とほぼ等しくなっている。

**Figs. 16, 17** は，昭和41年7月の中規模程度の出水の場合のものであって，かならずしも計算値と実測値が良い一致を示しているとは言えないが，このようなモデルによって貯水池濃度の時間的変化を大まかに把握できるものと思われる。

揚水式発電所の取放水の影響を検討するために，その貯留効果に注目して，昭和48年10月出水に関して検討した結果が **Figs. 18, 19** である。**Fig. 19** に揚水式発電所のある場合（(7)式）とない場合（(4)式）の計算値の比較を示しているが，両者の間には顕著な差は見られない。ただ，計算上，揚水式発電所のある場合の方が濁水の長期化の傾向が若干うかがえるが，その細部について検討するには，このようなマクロ的なモデルでは不充分であるようである。また，実測値と計算値の比較においても，十分適合しているとは言いがたく，さらに流入端の境界条件を精度よく推測する方法を検討していく必要があるように思われる。

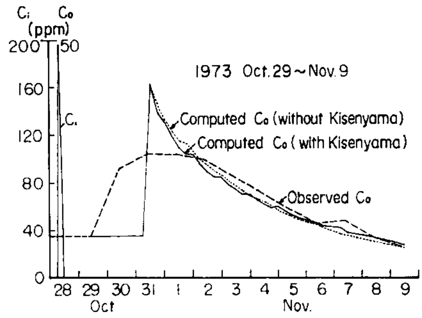


Fig. 19　Comparison between calculated curve and observed one.

## 5. 結　　　語

以上，貯水池濁水の濃度を主体として観測された結果を述べてきたが，まだ観測を開始して1年にもなっていないので，種々のケースの観測結果は得られていない。一応いままでに得られた主な成果を要約して結語とする。

貯水池堆砂に関しては，河床の縦断形状から掃流堆砂領域と浮遊堆砂領域を区分することができるとども

に，堆積土砂の粒度調査からもこれをより明瞭に把握することができた。

濁水に関しては，洪水期においては大戸川から多量の wash load が流入し，池水の濁水濃度は高くなるが，しかし大戸川の流量が低減してから琵琶湖から清澄な水が多量に流入してくるので，池水の混合が速かに行なわれ，濁水の長期化現象はほとんど生じない。一方，渇水期においては，琵琶湖からの流量が少ないため，大戸川の洪水が中小規模のものであっても濁水の長期化現象が生じやすい。

洪水時の貯水池濁度の時間的変化は，大戸川の wash load を流入端条件として，濃度の連続式で計算されるが，比較的計算値と実測値とは良い一致を示した。しかし，細部にわたっては今後検討しなければならない点もかなり含まれている。

さらに，揚水式発電所の取放水が濃度に及ぼす効果を検討し，その貯留効果について計算を試みたが，日単位で濃度を平均化して取扱う場合には，貯留効果は明瞭に現われない。しかし，池内の縦断方向の濃度分布には，取放水口を境界にして差異が生じているので，今後２次元的な解析を進めて検討していく予定である。

今後の課題として，さらに池内の濁水観測を続け，季節的変化や洪水規模による濁水濃度パターンの変化を把握するよう努めるとともに，伝播速度を考慮した解析および２次元の拡散方程式を用いた濃度予測の検討を試みていきたいと考えている。また，揚水式発電所の放水に伴なう底質土砂の浮上効果に関しても，実験ならびに観測によって検討するつもりである。

最後に，本調査にあたって御支援いただいた建設省天ケ瀬ダム管理支所の方々ならびに有益な資料を御提出してくださった京都府企業局山城水道事務所の方々に深く感謝致します。また，観測，資料整理および図面作成に対して助力していただいた，中村行雄技官ならびに研究室の方々に感謝します。

## 参　考　文　献

1) 津田松苗・御勢久右衛門：大滝ダム建築の底生動物に及ぼす影響調査報告書，防災研究協会，昭42.11, pp. 419–457.
2) 吉川秀夫・山本晃一：貯水池の水の挙動に関する研究，土木学会論文報告集，第186号，昭46.2, pp. 39–54.
3) 安芸周一・白砂孝夫：貯水池の流動形態と水質，第18回水理講演会講演集，昭49.2, pp. 187–192.
4) 村本嘉雄・道上正規・下島栄一：大戸川における微細砂の流送過程について，京大防災研究所年報，第16号Ｂ，昭48.4, pp. 433–447.