

横山ダム貯水池における洪水時の濁水調査

名古屋大学 足立 昭平

名古屋大学 中村 俊六

1. まえがき

貯水池における河川濁度の変化過程を解明するため、筆者らは揖斐川横山ダム貯水池を対象として、建設省横山ダム管理所の協力を得て、実測基礎資料の著積に努めているが、本報告は、その一環として行なわれた昭和50年台風6号洪水、および昭和51年台風17号洪水時の、各濁水調査結果と、それに基づく貯水池濁度シミュレーションについて報告するものである。

(1) 貯水池および流域の概要

横山ダムは、岐阜県の揖斐川上流に、洪水調節およびかんがい、発電を目的として、昭和39年3月に築造され、建設省中部地方建設局横山ダム管理所により管理されている多目的ダムである。

ダムの高さは80.8m、有効水深27.5m、総貯水量および有効貯水量は、それぞれ43,000,000m³、33,000,000m³であり、発電およびかんがい用の取水には、三段式半円形ローラーゲート2基を使用していて、かんがい期(5月～9月)には、原則として表面取水を行なっている。

貯水池の平面図および縦断面図を示すと図-1のようである。図中の番号は、各種測量用の測点番号を示している。同図からわかるように、貯水池の平面形状は、比較的大きな支川(坂内川)を有することと、水路巾に比して水路長が長いことによって特徴づけられている。

また、貯水池の縦断面形状は、測点番号12付近より上流に発達した堆砂段丘によって、それより上流の河道部ともいべき領域と、それより下流の貯水池部ともいべき領域に区分できよう。坂内川においても、本川との合流点より約500m上流から、同様な堆砂段丘が形成されている。

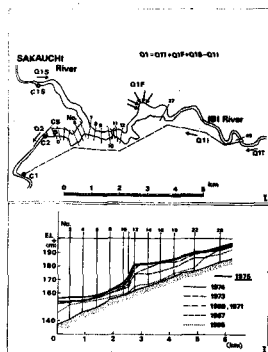
流域は、図-2に示す471K²である。流域内は分水嶺によって図のように3つの地区に区分することができ、それぞれを、徳山地区および坂内地区、藤橋地区と呼称すれば、これらのうち徳山地区が全体の約3/5の面積を占めている。流域内には、同図に示すように7ヶ所にロボット雨量局、3ヶ所にロボット水位局が、それぞれ設けられている。

なお、流域の地形は、北部から西部にかけて古生層(粘板岩、砂岩、チャート、輝緑凝灰岩)が広く分布しているが、北東部は花崗セシ緑岩によって、南部は黒雲母花崗岩によって、それぞれ古生層がつかぬかれている。

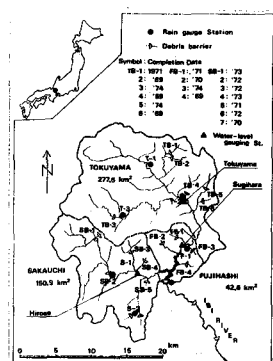
(2) 濁水調査の概要

昭和50年台風6号洪水時には、主として洪水後の貯水池内濁度分布および水温分布の各変化過程に着目し、洪水後約2週間にわたり貯水池内を調査した。測定地点は、原則として測点番号1, 3, 5, 8, 11, 12, 15, 18の8地点であり、測点番号12より上流を午前中、下流を午後測定した。濁度分布の測定は、原則として水深5m毎に採水した試料水を、ポイック積分球式濁度計を用いて行なった。

昭和51年台風17号洪水時には、主として流入河川水の濁度および水温の各変化過程に着目して、図-2中の、徳山および杉原、広瀬の各ロボット水位局地点付近において、洪水ピーク時には数時間毎に、流量観測および濁度測定(採水)、水温測定を実施した。



(図-1) 貯水池平面図縦断面図



(図-2) 流域平面図

2. 調査A-昭和50年台風6号洪水後の貯水池内濁水調査

昭和50年8月28日に中部地方を襲った台風6号は、揖斐川の流域に伊勢湾台風を上回る豪雨をもたらした。流域の総雨量について、台風6号および伊勢湾台風、昭和40（表-1）総雨量の比較（単位mm）年9月豪雨とを比較すると、表-1のようである。

これを見ると、台風6号時の雨量は、ほとんどの観測所で伊勢湾台風時の値を上まわっていて、台風6号洪水の規模の大きさを物語っている。また、昭和40年9月豪雨との比較では、昭和40年9月豪雨における徳山地区へのきわだった集中性にに対し、台風6号による豪雨は、比較的流域内に均一にもたらされたことがわかる。

台風6号洪水後の貯水池内濁水調査（以下、これを調査Aと呼ぶ）は、8月24日から9月5日まで、日曜日を除く毎日行なわれた。

図-3は、調査結果の一部を、等水温線および等濁度線によって示すものである。同図は、左右にそれぞれ水温分布、濁度分布が一对になって示されていて、最上部の一对は、記号および数字の説明図である。以下、図-3について簡単に説明を加え、調査Aによって得られた主要な知見を記す。

〔8月24日〕台風通過の翌日である。測定はダム前面100m地点でのみ行なわれた。池内は洪水により擾乱され、ほぼ一様水温となっているが、下層部に18～18.2℃の高濁水がある。この高濁水は、いわゆる泥送密度流の形で池底部に流入したと思われる。

〔8月27日〕26日までは表面取水とゲート放流が行なわれていたが、この日以後31日まで、下段取水のみとなる。

流量の減少と取水位置の低下によって、流出による流れの領域が、中層部に移動し、上層部に濁水の残留が見られる。

図中、太破線およびアミガケ部分は、安芸・白砂⁽¹⁾による次式から死水域を推定したものである。

$$d = G^{-1/3} (Q / S \sqrt{g e}), \quad e = (f_o - f_z) / f_o \cdot z \cdots \cdots (1)$$

ここに、 d = 流動層厚、 G = 日野・大西⁽²⁾の無次元数、 Q = 流出流量、 S = 出口開口角、 g = 重力の加速度、 e = 密度勾配、 f_o = 流出点の密度、 f_z = 流出点より鉛直方向に z だけ離れた点の密度である。

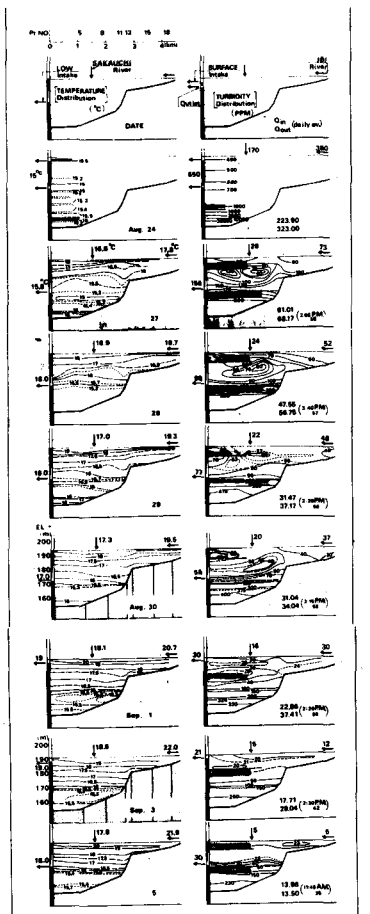
ここでは $G = 0.324$ を用い、下段取水の時は流動層下端を $EL + 17.1m$ とした。

上式により算出された流動層厚は、調査結果に見られる濁水の残留や流動状況を良く説明し得ていて、ほぼ妥当なものと思われる。

また、坂内川と本川との合流点付近における濁度分布を見ると、坂内川からの流入水は、合流点よりやや上流において噴出するように合流し、本川からの流入水との混合領域は、堆砂段丘前面に及んでいるように見うけられる。

〔8月28日～30日〕坂内川から流入した比較的低温で濁度の低い水が、取水口への流れを形成していて、本川からの流入水は、上層部に流入しているように見受けられる。

観測所名	台風6号	伊勢湾台風	40年9月豪雨
塚	347	329	445
徳山	402	406	1,057
門入	587	354	371
杉原	443	361	—
川上	584	451	428
諸家	645	529	—
藤橋	285	354	462



（図-3）台風6号洪水後の貯水池内水温分布、濁度分布

なお24日以後、水温逆転層より下層部は、流出流れから独立していて、水温逆転部分では常時自然対流が生じ、対流により濁度物質の沈降は阻害されて、その付近の濁度変化はきわめてゆるやかである。

また、坂内川からの流入水の噴出点は、流出流量の減少とともに少しづつ下流に移動するとともに、噴出位置が不明確になっている。

さらに水温分布と濁度分布双方について坂内川流入水の噴出点近傍を見ると、噴出する層はその日の流入水と同一な密度層よりわずかに下層であって、流入後の連行（あるいは混合）現象によって、流入水の密度が若干変化してから合流しているものと思われる。

〔9月1日〕再び表面取水に切換えられた。坂内川からの流入水の噴出点が下流側に移動し、不明確になるとともに、取水による流れが主として本川からの流入水によって形成されているように見うけられる。

また、下層部の水温が下って密度勾配が安定になり、濁度は徐々に下り始めた。

〔9月3日〕全体に濁度の低減はゆるやかであり、池内の濁度物質の沈降速度は小さいものと思われる。

〔9月5日〕9月4日に再度下段取水に切換えられた。池内は清浄な流入水により急激に清水化しているが高濁水がまだ下層にあって、流動層内に一部連行されているように見うけられる。また、流動層と下層との境界付近には、弱い2次躍層が形成され始めている。

なお、調査期間中流入水および流出水の各水温、濁度も若干測定されているが、それらの結果はすでに土木学会昭和51年度年次学術講演会にて報告済なので、ここでは割愛させていただく。

3. 調査B－昭和51年台風17号洪水時の濁水調査

昭和51年9月上旬に、きわめてゆっくりと日本に上陸した台風17号は、直接中部地方を襲いはしなかったが、いわばその前期豪雨ともいべき豪雨を流域内にもたらした。

本調査（以下、これを調査Bと呼ぶ）は、その豪雨時を含む9月9日から9月21日まで、洪水ピーク時には数時間毎に行われたものである。

調査結果を図－4～6に示す。

図－4、5は、それぞれ、揖斐川本川徳山地点と杉原地点、および坂内川広瀬地点における調査結果である。両図の再上段は、時間雨量であり、それぞれの流域内における雨量記録を算術平均したものである。

また2段目は、流量の時間変化を示すものであり、徳山地点および広瀬地点については、流量観測結果から作成された水位－流量曲線を使用して、水位記録から算出した。杉原地点については、

（杉原地点流量＝貯水池総流入量－広瀬地点流量＋揖斐川電工取水量）

なる関係式から求めた。

3段目は、濁度の時間変化であり、実測値を丸印で示してある。実線は単に実測値を結んだもの、破線は推測値である。

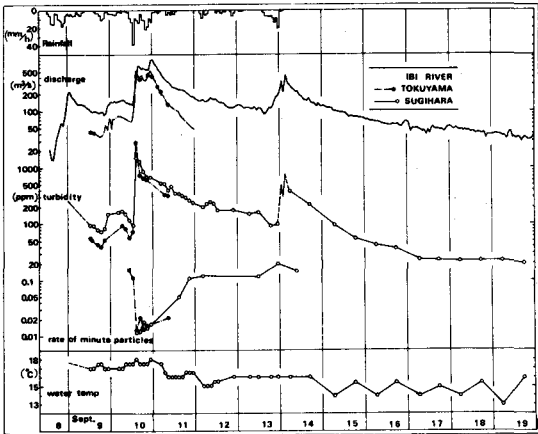
4段目は、採水した試料を24時間静置した後に再び試料表面水の濁度を測定して、静置前の濁度で除した値の時間変化を示すものである。24時間静置しても沈降しない程度に微小な濁度物質の含有率を示すもので、濁度物質の平均的な沈降速度の目安を得ることを目的として測定した。以下この値を微粒子率と呼ぶことにする。

両図の最下段は、水温の時間変化を示している。

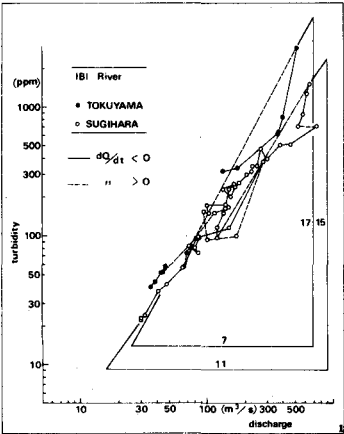
図－6は、貯水池水に関する調査結果である。再上段に貯水池の水位変化を示してある他は、図－4、5と同様な表示がなされている。

なお、調査期間中に2回、ダム前面100m地点において、池内の濁水調査が、また、一部の濁水試料についてコールターカウンターによる粒度分析が、それぞれ行なわれているが、調査Aにおける結果と同様であることのみを報告して、ここでは割愛させていただく。

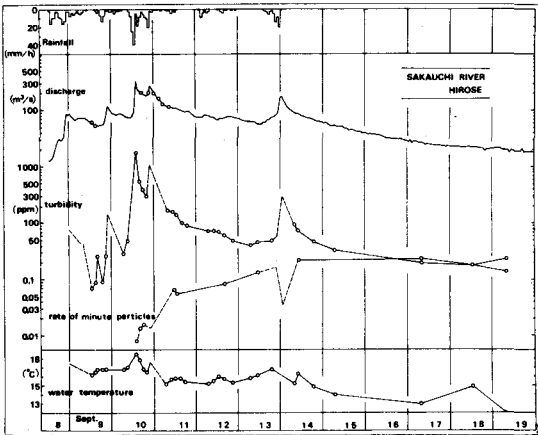
さて、図-4～6を見ると、濁度および微粒子率、水温の各時間変化は、いずれも流量の時間変化と良く対応しているように見受けられる。対応関係をより明確、定量的に知るために、濁度と流量に関する相関図を図-7、8に、微粒子率と濁度に関する相関図を図-9に示す。



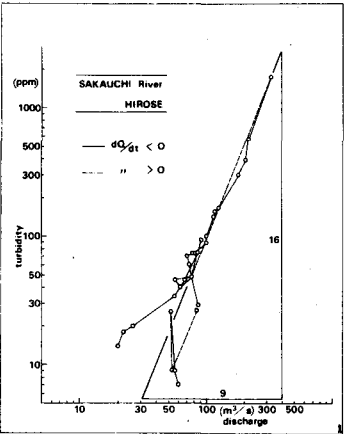
(図-4) 本川における調査結果



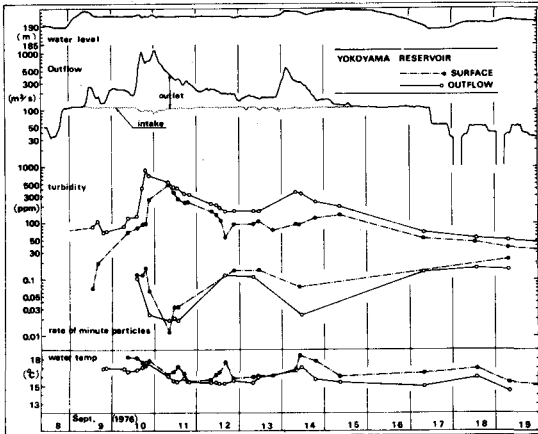
(図-7) 本川における流量-濁度相関図



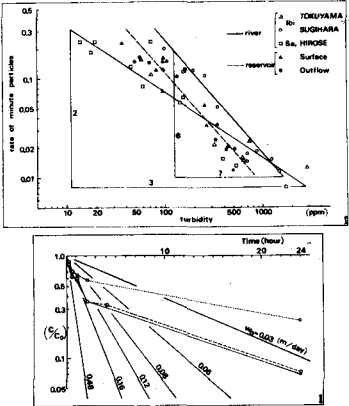
(図-5) 坂内川における調査結果



(図-8) 坂内川における流量、濁度相関図



(図-6) 貯水池における調査結果



(図-9-上) 微粒子率と濁度の関係

(図-10-下) 微粒子率と沈降速度の関係

解析的な検討は今後の課題として、ここではとりあえず現象論的に把握することにすれば、両図から以下の知見が得られよう。

(1) 流量(Q)と濁度(C)との間には、 $C = K Q^n$ の関係があり、 K 、 n は同一地点については、ほぼ一定と見なし得る。従来経験則として用いられている浮流土砂量公式と同様な表現をすれば、 Q_0 (濁度物質質量) $= Q \cdot C = K Q^{(n+1)} = K Q^m$ となる。いまの場合、広瀬地点で $m = 3.4$ 、徳山地点で $m = 2.8$ 、杉原地点で $m = 2.4$ が妥当であろう。

(2) 微粒子率(r)と濁度(C)との間には、 $r = k C^{-p}$ の関係があり、広瀬および徳山の両地点において $p = 2/3$ 、杉原地点において $p = 8/7$ 程度である。

(3) 同一河川については、下流の地点ほど m も p も大きい。(貯水池も河川の一部と考える。)

さらに、濁度物質の平均的沈降速度(W_0)と、微粒子率(r)との関係を知るために、8種の静置試料について、試料表面水の濁度の時間変化を測定した結果を示すと図-10のようである。同図の横軸は静置時間、縦軸は表面水の濁度の、初期濁度に対する比を示している。微粒子率は24時間後の C/C_0 で与えられる。また、 W_0 をパラメーターとする直線群は、平均沈降速度が、 $dc/dt = w_0 C/h$ なる関係式で得られると想定したときの、各 w_0 (一定)に対する C/C_0 の時間変化を示すものである。(ここに、 h は濁度測定のために試料水が減じられた量を、試料静置用メスシリンダーの深さで表わしたものである。)いま便宜上、濁度物質の平均的沈降速度が、 C/C_0 がある値(たとえば0.5)になるまで、上式を満足しながら変化すると仮定したときの w_0 で与えられるとすれば、同図よりつぎの想定が許されよう。

(4) 微粒子率(r)が小さい程、平均的沈降速度(w_0)は大きい。第1次近似的には、 g を一定値として $w_0 = g/r$ なる関係がある。(しかし実際には、左の第1次近似式中の g は、時間の経過とともに減少する。)

そして図-4~6の最下段に示した水温の時間変化については、

(5) 流量の変化が激しいとき(洪水のピーク時前後)には、流量の増加とともに水温は上昇し、流量がピークを過ぎると水温は急激に低下しはじめる。流量のてい減のしかたがゆるくなると、水温には徐々に日変化が現われはじめる。

4. 調査結果に基づくシミュレーション解析

貯水池における濁水現象の特徴の一つは、濁水の流動機構が貯水池水温分布の形成機構と密接な関係有することである。ここでは、この特徴を有効に活かした解析モデルとして、安芸・白砂⁽³⁾の提案した鉛直一次元(移流分散)モデルをとりあげ、上述の濁水調査による知見に基づいて、その横山ダム貯水池への適用性を検討し、若干の修正を試みよう。

安芸・白砂のモデルは、米国MITで開発された水温予測手法に、電力中央研究所における実験結果、および濁度取支をとり入れたものである。説明の便宜上、以下これをM-Dモデルと呼ぶことにする。

M-Dモデルでは、流出による流動層の厚さを前述の(1)式で計算し、流入による流れについては、流入過程での連行現象を考慮したうえで、流れは密度流として流下し、等密度の標高に達してから水平方向に層状に流入するとしている。このことは、本報告調査Aで得た知見にほぼ合致するものである。

しかしながら、M-Dモデルを横山ダム貯水池における濁水現象に適用するに際しては、つぎに述べる2点について検討の必要があるように思われる。

すなわちその第1点は、2本の河川からの流入水のとり扱いについてである。M-Dモデルでは、貯水池を厚さ ΔZ の水平層に分割し、それぞれの層における貯水池全域についての平均値を用いて計算が行なわれる。このことは、本川からの流れも、支川からの流れも、ともに貯水池全体に影響を及ぼす、としていることになる。現実には、本報告調査Aにおいて見られたように、双方の川の流れが混合し合うのは、堆砂段丘より下流部と思われるから、そのままでは坂内川からの流れを過小評価することになる。

また第2の点は、濁度物質の沈降速度についてである。本報告調査Bにおいて見られたように、貯水池に流入する濁水は、単に量的のみならず、質的にも時々刻々変化しているのであるから、質に関するパラメーターである沈降速度を定数として扱うことは妥当とは思われない。ひとつの便法として、貯水池全体の平均的な沈降速度を時間的に変化させるという方法もあるが、平均のとり方に問題が残ると思われる。

このような考察に基づいて、筆者らはつぎのような修正を試みた。

(1) 貯水池を8つの領域(本川部、支川部、貯水池部とし、本川部と支川部を総称して河道部と呼ぶことにする)に分割する。この場合、それぞれの接合部における境界条件の設定が必要であるが、ここではつぎのように設定した。

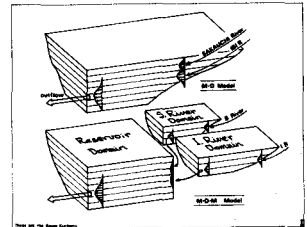
すなわち、河道部始点では、流入水は河道部内の同一密度層に流入するとし、終点では河道部からの流出水は、貯水池部の同一密度層に流出しようとするとし、さらに貯水池部始点では、河道部からの流出水が貯水池部の同一密度層へ流入するとして、流速分布の算出法および貯水池部の終点における境界条件については、M-Dモデルと同様にした。(図-11参照)

(2) 濁度については、池内の濁度を鉛直方向位置(標高)と時刻とに関する2次元変数としてとり扱う。すなわち、Iを鉛直軸、Jを時間軸に関する添字とすると、池内の濁度CはC(J, I)としてとり扱うことにした。

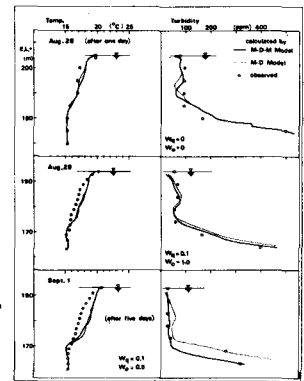
この方法によれば、流入水が質的に時間変化する現象を容易に導入し得るとともに、貯水池からの流出水の平均的な沈降速度も同時に算出され得て、同一河川中における貯水池群における河川濁度の変化過程を解析するうえにも有効であろう。

以上の修正をしたモデルをここではM-D-Mモデルと呼ぶことにする。

図-12は、調査Aの期間中について、M-DモデルとM-D-Mモデルによってシミュレーションした結果の一部を示すものである。ただし、流入時の連行係数を0とし、池表面における熱交換を省略して代りに池表面水温に実測値を与えて簡略化している。初期条件は8月27日のダム前面の実測値、流入流量は貯水池総流入量を集水面積比で2河川に分割して与えている。流入水温として正午頃の水温を用いたこともあって、水温分布の計算結果は、両モデルとも良好とはいえないが、濁度分布については修正の効果が良く表われていてM-D-Mモデルの有効性を示しているように見うけられる。



(図-11)モデル説明図



(図-12)シミュレーション結果

5. 結言

以上、横山ダム貯水池における洪水時の濁水調査の概要を報告するとともに、調査結果に基づくシミュレーションについて報告した。M-D-Mモデルの有効性にはなお検討を要するが、ひとつの前進として評価し得るものと考えられる。最後に、末尾ながら調査において絶大なる御協力をいただいた建設省横山ダム管理所ならびに名古屋大学土木工学科水理研究室の各位に対し深甚なる謝意を表する次第である。また、計算には名古屋大学大型計算機センター FACOM230 を用い、研究経費において文部省科学研究費補助金 - 自然災害特別研究および奨励研究 - の補助を受けたことを記して謝意を表する。

(参考文献)

- (1, 3) 安芸周一, 白砂孝夫; 貯水池流動形態のシミュレーション解析, 発電水力, 16134, 1975
- (2) 日野幹雄, 大西外明; 成層密度流におよぼす point sink の高さの効果, 土木学会論文報告集, 第163号, 1969