

貯水池における微細粒子の堆積と濁度に関する調査

京都大学防災研究所 正員 村本嘉雄

京都大学防災研究所 正員 ○ 道上正規

京都大学防災研究所 正員 藤田裕一郎

1. まえがき

近年、水資源確保ならびに洪水制御を目的とした大ダムの築造が脚光をあびている。このようなダムがもたらす恩恵は非常に大きいことは言うまでもないが、その反面、巨大構造物であるため、ダムが河川環境に及ぼすインパクトも大きく、予期せぬ事態を惹起することがある。したがって、ダム築造に際しては、その環境アセスメントが重要視されてきており、その一つの項目として、貯水池における濁水の長期化現象が検討されている。

こうした貯水池の濁水に関する研究の歴史は浅く、貯水池の実態把握に重点がおかれて調査研究が進められてきた。これらの調査研究によって、貯水池の概略的な水理特性、すなわち貯水池の成層型および混合型の分類に関しては、流量と貯水容量の比や内部フルード数のようなパラメータが重要な役割を演ずることが明らかにされるとともに、濁水の長期化現象は成層型貯水池において生じやすいことが指摘されてきた。¹⁾一方、成層型貯水池の水温分布や濁度分布の予測に関して、多くの数値モデルの開発が行われているが、とくに、貯水池の濁度分布に関しては、水温成層状態、流入流量および不確定要素の多い流入濁度の特性に大きく左右されるため、精度の高い予測は困難であり、観測資料の収集解析が望まれている。

本報告は、宇治川に築造されている天ヶ瀬貯水池を対象にして、濁水の挙動、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. 貯水池の概要と観測結果

1) 貯水池の概要： 天ヶ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 $26.3 \times 10^9 m^3$ で、流入水の大部分は琵琶湖からのもので、通常は清澄である。一方、洪水時には、流域面積189km²で裸地面積率約5%の大戸川がこの池内の主要な土砂供給源となっており、貯水池の濁りに関しても、大戸川が重要な役割を演じている。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水口が設けられており、その最大揚・放水量は $220 \sim 250 m^3/sec$ である。

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37mの深さに内径4.92cmのメスシリンダーをロープでつり下げて、約1カ月間にメスシリンダーに堆積する量を観測した。その観測点は図-1に示されており、ダムサイトから100mのブイ地点と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や粒度分布を測定するとともに、水温および濁度分布の定期的測定を行った。また、洪水時の濁水の挙動に関しても観測を実施し、その実態把握に努めた。

3) 池内の粒度特性： 図-2は貯水池の平均河床高の経年変化と、湖底堆積物のφスケール単位の中央粒径を示したものである。池内には、3.1km地点に旧大峯ダムがあり、それより上流側は掃

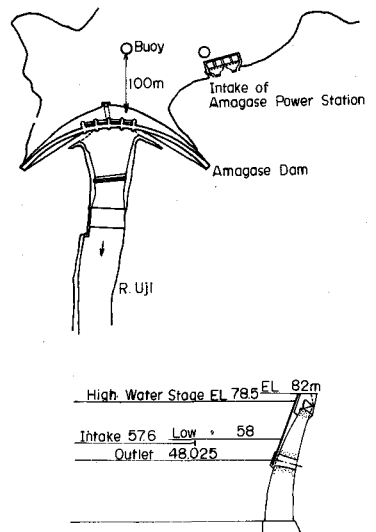


図-1 天ヶ瀬貯水池の概要

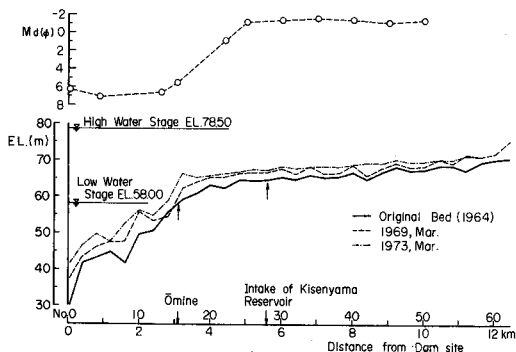


図-2 堆砂形状と湖底の粒度特性

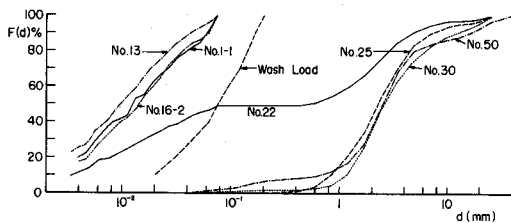


図-3 湖底堆積物の粒度分布

流砂，下流側は浮遊砂の堆積領域になっていることがわかる。さらに，中央粒径の図を参照すれば，この状況を適確に把握することができる。図-3は湖底堆積物の粒度分布を示したものであって，浮遊砂の堆積領域では堆積物は 0.072 mm 以下の粒子のみで構成されている。一方，掃流砂の堆積領域では，最大粒径 $20 \sim 30\text{ mm}$ 程度で，上流河川の粒度特性と類似しており，貯水池のこの部分は河道の流動特性の性格をおびている。また，図中に大戸川の wash load の平均的粒度分布を示しているが，浮遊砂の堆積や池内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推察される。さらに，ダムサイト近くの湖底付近のメスシリンダーに堆積した粒子の粒度分布は，浮遊砂堆積領域の湖底堆積物のそれに非常によく類似している²⁾。

湖底付近につり下げられたメスシリンダーの堆積層厚の測定より，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図-4に示されている。

$$C_b = (1 - \lambda) S / W_s$$

ここに， C_b ：湖底付近の濃度， W_s ：粒子沈降速度， λ ：空隙率， S ：見かけ堆積速度である。

さらに，山城水道で測定されている濁度の毎日試験結果も図中に示されているが，昭和49年の資料に関しては，メスシリンダーで測定した結果の方が山城水道で測定された濁度値よりも大きくなっている。これは，この年には比較的大きな洪水が流入したために，1日一度の測定値の平均値よりも，堆積厚から求めた濁度値の方が大きくなったものと推定される。このような方法からも湖底への微細砂の堆積速度や濁度が測定できるものと思われる。なお，堆積物の空隙率は，平均して $\lambda \approx 0.9$ となっており，非常に大きな値となっている。

4) 洪水時の池内の濁度および水温特性：平常時の濁度特性に関しても検討してきたが，最初に述べたように，この貯水池では琵琶湖からの流入水が大部分を占めているので，濁水の長期化現象はほとんど問題にならないようである。また，これらの観測によって，ダムより4 km地点までの池水が貯水池水としての挙動を呈することが判明した。

図-5は昭和50年6月出水のハイドログラフと各地点における濃度時間曲線を表している。この出水では，貯水池の流入・流出流量が等しくなるように，発電用出水口から放流している。この貯水池の主要な濁度供給流域となっている大戸川での観測結果から，大戸川と瀬田川の合流点での wash load を推算して図示している。この出水のピーク流量は約 $170\text{ m}^3/\text{sec}$ で，洪水の規模は小さく，合流点からダムサイトの約17 kmを17時

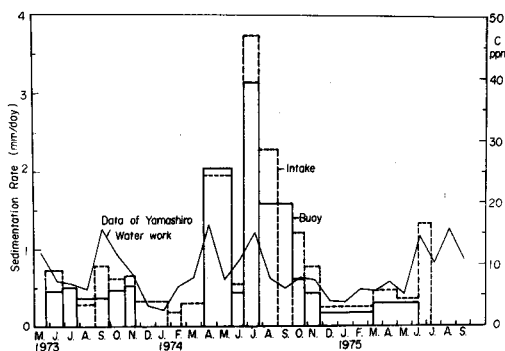


図-4 堆積速度と湖底付近の濃度

間かかって濁水は流下している。池内への wash load の流入量は約 2400 ton であり、一方、池内の濁度物質の全量は約 1000 ton であるので、瀬田川の wash load の約 40% が濁度要因となっている。ここで定義した wash load の粒径は 0.2 mm 以下を対象としているが、濁度物質のそれは 0.072 mm 以下で、wash load の粒度分布において、0.072 mm 以下の粒度の占める割合は約 40% であることを考慮すると興味深い。さらに、出水期間中の流入濁度（喜撰山）と流出濁度の全量はそれぞれ 1030 ton, 950 ton で予想外に堆積量は少ない。

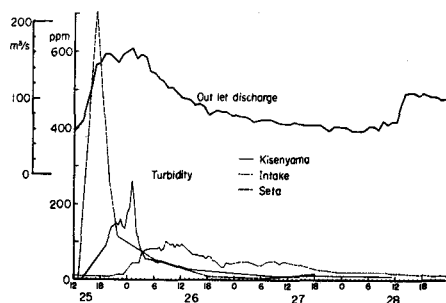


図-5 昭和50年（1975）6月出水の概況

図-6～8は、6月出水の池内における水温と濁度分布の時間的変化特性を表したものである。これらの水温分布図から、流入水温と等しい池水の水温部分に、流入水が侵入している状況がうかがえる。さらに、濁度分布図をみれば、このような池水の流動が鮮明に理解されよう。すなわち、濁水は水温の2次躍層（標高38～45 m）上に侵入しており、中層に帯状に拡がっている。すでに一ツ瀬ダム⁸⁾で観測されているように、躍層が破壊されないような中小規模の洪水では、深水層

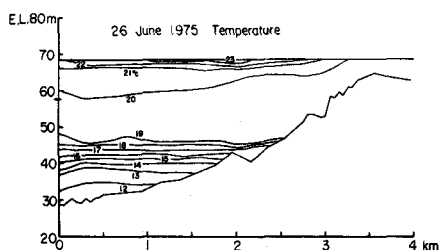
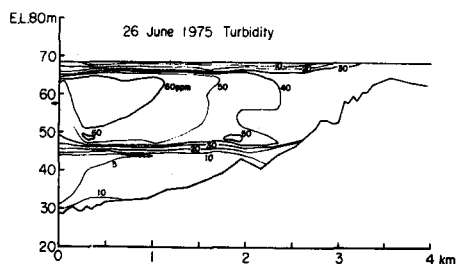


図-6 (a) 水温分布（8:30～10:00）



(b) 濁度分布（8:30～10:00）

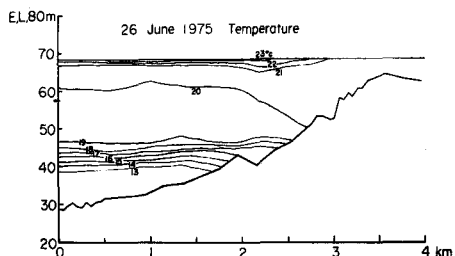
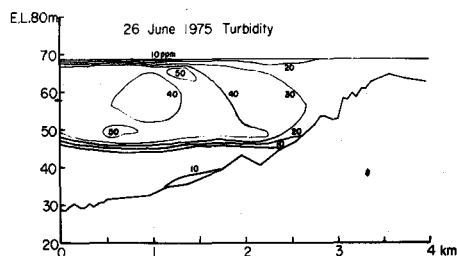


図-7 (a) 水温分布（14:30～16:30）



(b) 濁度分布（14:30～16:30）

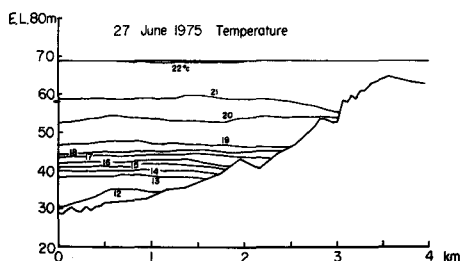
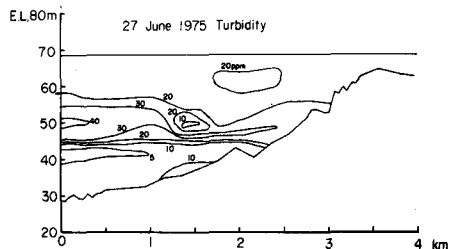


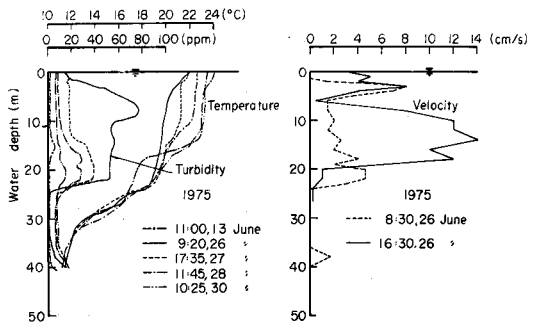
図-8 (a) 水温分布（10:40～12:05）



(b) 濁度分布（10:40～12:05）

の池水はほとんど流動することなく、それより上層に侵入した池水のみが流動している。したがって、躍層面より下層の濁度は高くなっていない。

いま、躍層が破壊されて混合型の貯水池に移行するかどうかを表す内部フルード数を計算すると、ピーク流量に対して $F_r \approx 0.19$ であり、この程度の内部フルード数では躍層は破壊されないようである。アメリカの例では、⁴⁾ 流量と貯水容量比が 3/年であつ $F_r \leq 0.1$ の場合に、成層型貯水池として取扱うことができるようである。



図一 9 取水口における水温・濁度および流速分布

2 次躍層面の位置は時間的にほとんど変化しておらず、流入水温の上昇に伴って、躍層面上の水温分布のみが変化している。濁度分布に関しては、2 次躍層面と 1 次躍層面の間で濃度が高く、深水層で低くなっている。したがって、中層部に 2 次躍層が形成される場合には、濁度物質の堆積量は湖底付近の濃度に比例するため、その堆積量は躍層が存在しない場合に比較して減少するであろう。

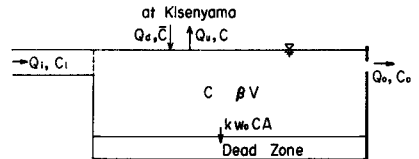
このような時期の水温分布は、縦断方向にほぼ一様で鉛直分布のみが卓越しているが、濁度分布に関しては、鉛直および縦断方向の変化がみられる。これは、後者の流入条件の非定常性が、前者のそれに比較して強いことに依存しているためであろう。

水温・濁度分布から池水の挙動を考察してきたが、この出水時には、取水口地点で流速測定の結果も得られたので、水温・濁度分布と流速分布を併記して、図一 9 に示している。出水時の流入水温は降雨のため低くなっており、洪水の低減にともなって、流入水温が上昇し、それによって池水上層部の水温が上昇するようである。流速分布の測定結果からも、2 次躍層面上にのみ流れが存在するようで、深水層の水は流動していない。このことは、水温・濁度分布から推論した、流入水が 2 次躍層上を流動するという現象を実証しているものと言えよう。

3. 貯水池濁度の推算モデル

貯水池濁度を予測するには、流入流砂量とその粒度特性、池内の熱収支、流動特性、拡散係数および境界条件などを把握しなければならない。しかし、これらの事項に関して明確に把握できるものは少ないので、ここでは濃度の連続式を用いたきわめて簡単な方法で考察を試みる。

図一 10 を参照すると、濃度の流入流出に関する連続式は次のように書ける。



図一 10 記号説明図

$$\frac{d(\beta VC)}{dt} = Q_i C_i - Q_o C_o - k w_o C A \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 Q_i 、 Q_o ：それぞれ流入および流出流量、 C_i 、 C_o ：それぞれ流入および流出・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、 β ：混合係数＝（2 次躍層面より上層部の貯水量）／（全貯水量）、 w_o ：粒子沈降速度および 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表しており、非沈降性の場合に比較して、この項の量だけ速く濁りが低減することを意味している。

(2) 式には、 C と C_o の 2 つの未知数が含まれているので、流出水の濃度 C_o を貯水池濃度 C に比例させるこ

とにする。

$$C_o = \gamma C \dots\dots\dots (3)$$

この γ は濃度分布に対する補正係数である。(3)式を(2)式に代入して解くと次式を得る。

$$C = e^{-\int \xi dt} (\int \eta e^{\int \xi dt} dt + C_1) \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\xi = \{(\gamma Q_o + kW_o A) / \beta V + d \ln(\beta V) / dt\}$
 $\eta = Q_i C_i / \beta V$ 、 C_1 ：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)式において濃度の低減特性を検討する。簡単のため、 $d \ln(\beta V) / dt = 0$ 、 $\eta = \text{Const.}$ を仮定する。

$$C = \frac{\eta}{\xi} (1 - e^{-\xi t'}) + C_{max} e^{-\xi t'} \dots\dots\dots (5)$$

また、 $\eta = 0$ を仮定すると、

$$C = C_{max} e^{-\xi t'} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $C_{max} = C_1$ 、 t' ：ピーク時から測定した時間である。(5)または(6)式より明らかなように、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 $kW_o A / \beta V$ だけ付加されて大きくなる。

つぎに、揚水式発電所の取・放水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濁水の貯留効果と、ii) 放水による底質土砂の浮上効果が考えられるが、ここでは前者のみの影響を考慮して検討しよう。図-10を参照すると、この濃度の連続式は次のように書ける。

$$\left. \begin{aligned} \text{揚水時: } \frac{d(\beta VC)}{dt} &= Q_i C_i - Q_o C_o - kW_o CA - Q_u C \\ \text{放水時: } \frac{d(\beta VC)}{dt} &= Q_i C_i - Q_o C_o - kW_o CA + Q_d \bar{C} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

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、 $\bar{C}$ ：上部池の濃度を表す。

4. モデルの適合性

貯水池の濁水濃度を予測するには、前述したように、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、数年来大戸川で実施してきた流砂観測の結果が用いられている。

まず、昭和50年6月出水に関しては、(2)式と実測値の比較を試みよう。図-5に示したように、ダムサイトから5km地点の喜撰山で測定された濃度を流入端条件として与え、定数を、 $k = 1$ 、 $W_o = 0.01 \text{ cm/sec}$ 、 $A = 402,200 \text{ m}^2$ 、 $V = 8,500,000 \text{ m}^3$ 、 $\beta = 0.78$ として(2)式で計算した結果と取水口における実測値の比較が図-11に示されている。ピーク濃度に関しては、濃度分布の補正係数 γ を1.5とした方が実測値によく適合するようであるが、実測値では2つのピーク濃度が現れている点などは、このモデルと一致しない。この実測資料は山城水道のものをを用いているが、我々の測定した図-9の結果と比較すると、若干大きい値

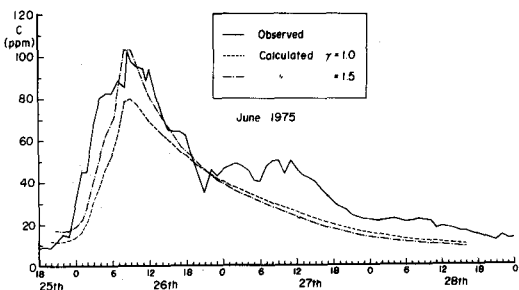


図-11 取水口における濁度の計算値と実測値
(昭和50年6月出水)

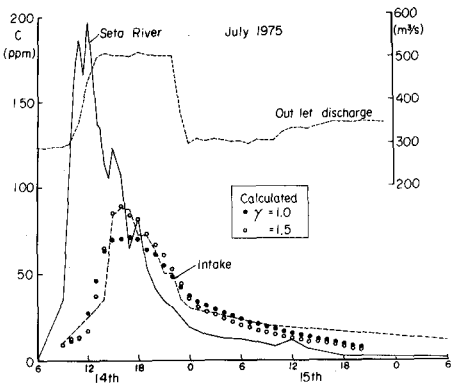


図-12 取水口における濁度の計算値と実測値

となっており、第2のピークは計器のレンジ切換えの誤差でないかと推定される。なおこれらの図において、実測値と計算値のピークが一致するように、ずらし時間を定めている。

図-12は、大規模な出水の場合で、この場合には喜撰山の濃度の実測値がないので、瀬田川合流点の wash load の資料を流入端条件として与えた。この場合の定数として、 $V = 9,700,000 \text{ m}^3$ 、 $A = 480,000 \text{ m}$ を用い、他は6月出水の場合と同じである。計算値と実測値は比較的よく対応しており、このようなモデルでかなりの精度で貯水池の濁度を推算できるものと思われる。

さらに、ピーク濃度の低減特性に注目して、6月出水を(5)および(6)式で検討した結果が図-18に示されている。なお、この場合の計算条件は、 $C_i = 12 \text{ ppm}$ 、 $Q_i = Q_0 = 70 \text{ m}^3/\text{sec}$ を用いている。貯水池の濃度がピークに達してから、流入濁度が0であれば、濃度の低減は指数関係で表されるが、ここに示したように、通常は流入濁度を考慮して、濃度の低減を見積るべきであろう。

揚水式発電所の影響に関しては、(7)式に基づいた検討を試みたが、顕著なその影響は見出せなかった。

5. あとがき

貯水池の濁度物質の特性とその堆積速度、出水時の水温および濁度分布に関する観測結果を中心に述べてきたが、貯水池への流入状況は、流入水温に等しい池水の部分に流入水は侵入する。この場合、2次躍層上に高濃度の濁水が帯状に拡がっており、躍層下の濃度は上層に比較して小さく、濁水は躍層上をすべてダム放水口から流出するかのようである。このような流動状況は、流速分布の測定結果からも明らかにされた。

つぎに、濁度の簡単な推算方法およびその低減特性に関して、濁度の連続式から考察を加え、これらの方法によって貯水池および取水口の濁度予測がある程度可能なことを示した。さらに、詳細な濁度の予測を行うには、濁水の流入条件、躍層面での濁水の挙動、躍層の位置、池内の鉛直および縦断方向の拡散係数の評価を行って、濁度の鉛直、縦断方向の分布を解析しなければならない。

最後に、調査に当り便宜をはかっていただいた建設省天ヶ瀬ダム管理支所および取水口の濁度資料を提供し下さった京都府山城水道事務所の方々ならびに観測に協力いただいた防災研究所の河田恵昭、中村行雄の両氏に感謝いたします。なお本研究は、昭和50年度文部省科学研究費自然災害(代表者、名大 足立昭平教授)によるものの一部であることを付記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 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，pp. 187 - 192.
- 2) 村本嘉雄・道上正規・藤田裕一郎：天ヶ瀬貯水池の濁水に関する調査研究，京大防災研年報，第17号B，昭和49，pp. 585 - 596.
- 3) 白砂孝夫：貯水池濁水対策に関する研究(第1報)，電力中央研究所技術第二研究所報告，昭47.
- 4) Park, G. G. and P. S. Schmidt: Numerical Modeling of Thermal Stratification in a Reservoir with Large Discharge-to-Volume Ratio, Water Resources Bull., Vol. 9, No. 5, 1973, pp. 932 - 941.

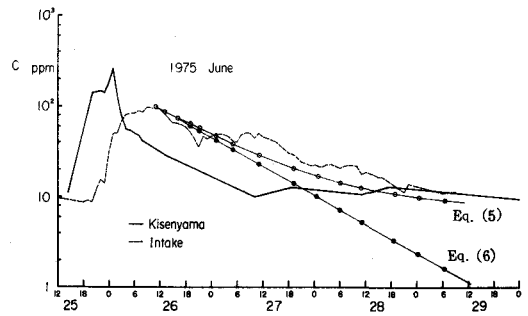


図-18. 濁度の低減特性