

# 貯水池における濁度解析について

岩佐 義朗・松尾 直規・井上 素行

## TURBIDITY ANALYSIS IN RESERVOIRS BY MEANS OF MATHEMATICAL SIMULATIONS

By *Yoshiaki IWASA, Naoki MATSUO and Motoyuki INOUE*

### Synopsis

Control of stored waters in multi-purpose reservoirs becomes very important in qualitative management of water resources. In this study long-durated turbidity of flows in reservoirs resulting from flood flows is researched by making use of field observation in a typically stratified reservoir. Mathematical procedures in simulation techniques for reservoir hydraulics are explained and an application to real behaviours in thermally stratified flows with high turbidity is also made and discussed with fruitful results.

### 1. 結 言

貯水池における貯留水の質的管理に関する緊急研究課題は、冷水、濁水長期化、ならびに富栄養化の3つである。これらの課題の問題点は利水目的上異なったものではあるが、いずれも貯水池のもつ水理特性の詳細な把握により、明らかにされうるのであろう。このため、筆者らは数年前より一連の報告<sup>1), 2), 4), 5)</sup>において、まず長い時間スケールからみたとき、我が国の多目的貯水池のもつ水理、水文的性格を、過去の観測資料によって定性的に分類し、それぞれのもつ特徴を明らかにした。<sup>3)</sup> その成果はさらに一般化され、現在行政レベルの冷水・濁水マニュアル<sup>6)</sup>作成の基礎となっている。ついで成層型貯水池の水理を、水温成層の形成とその破壊、ならびにそれらと濁度の影響といった短い時間スケールでの問題について、定量的に論じ、そのシミュレーション手法の開発に努めてきた。<sup>2), 4), 5)</sup>

本報告では、これらの成果をもとに上述の3課題のうち、濁水長期化の問題を中心として、貯水池の水理特性の定量的な取扱いと、そのシミュレーション手法についてまとめる。まず洪水後の濁水長期化の実態を、現地での観測資料を整理することにより、水温成層の変化との関連から論じ、ついでこの現象の数学的モデル化への基本的な考え方、ならびにシミュレーション手法について述べる。さらに、シミュレーションを行なうときの種々の問題点について検討するとともに、大規模かつ典型的な成層型貯水池である高知県早明浦貯水池における濁水長期化をシミュレーションし、その結果を水理学的に考察して、解析法の有用性と問題点について論ずる。

### 2. 早明浦貯水池における濁水長期化の実態

早明浦貯水池は典型的な成層型貯水池であるが、昭和51年9月の17号台風の流入により成層は破壊され、高濁度水が貯水池内にほぼ一様に拡がり、その状態は翌年1月まで継続した。それに先立つ7月にも中規模の洪水があり、高濁度水が流入したが、このときは、比較的速やかに、濁度は低減した。この2ケースの洪水後の水温分布、濁度分布の推移を比較することにより、貯水池における濁水長期化の実態とその特徴を明らかにし、濁水長期化の問題を定量的に取り扱うための考察を以下に行なう。

Fig. 1 は7月洪水前後のダム直上流部における水温鉛直分布の推移を示したものである。洪水前の7月19

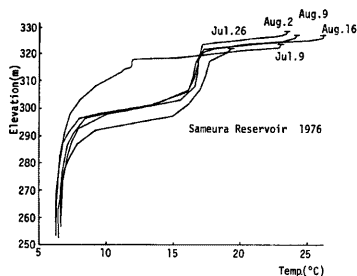


Fig. 1. Temperature Distribution of Waters in Sameura Reservoir (July 1976).

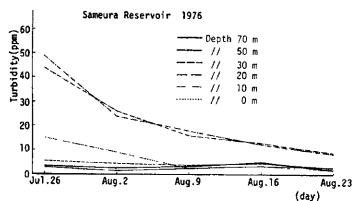


Fig. 3. Temporal Change of Turbidity in Sameura Reservoir.

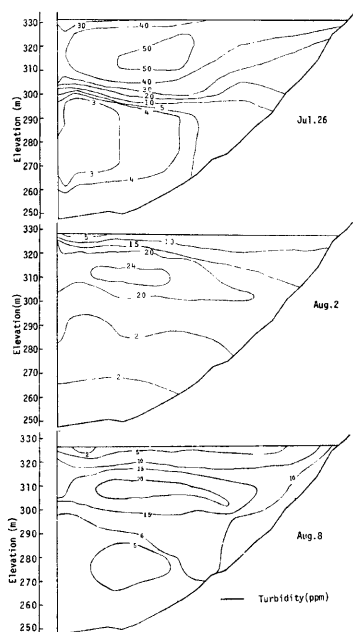


Fig. 2. Spatial Distribution of Turbidity in Sameura Reservoir.

日には表層付近に発達した水温成層がみられるが、洪水の流入によりこの位置での成層は破壊され、移流による水温上昇は水深 20 m 付近にまで及び、成層はその位置まで低下する。その後、再び表層付近にいわゆる一次躍層が形成され、成層形態としては一次躍層と二次躍層が存在する形となる。この間の貯水池の濁度分布を Fig. 2 に示し、また Fig. 3 には、各水深での濁度の低減状況を示している。これらの図より洪水後の濁度分布は、二次躍層上に高濁度領域が帯状に存在し、それ以下ではほとんど濁度の増加はみられないことがわかる。表層からの放流ならびに表面取水により、躍層上の高濁度水は比較的速やかに下流に放流され、濁度は時間の経過とともに低減する。このとき、躍層下では懸濁粒子の沈降のため、わずかに濁度の増加がみられる程度でほとんど変化はない。このような濁度分布の変化と低減状況は、先に述べた水温成層の変化ときわめてよく対応していることがわかる。すなわち、洪水の流入に伴う貯留水の移流は、標高 300 m 以下の低温の高密度層には及ばず、貯留水の流動は、二次躍層によって区切られる形となり、躍層下での水の交換はほとんど行われぬ。このため高濁度水は、躍層上を取水口へ向かって流下する形となり、懸濁粒子の沈降も、乱れや上昇流速のために阻害され、躍層下へ進行しないうちに貯水池から流出してしまう。

このように、洪水後も成層が消滅しないケースである 7 月洪水後の濁度変化に対し、成層が破壊され、消滅してしまう 9 月洪水後の水温分布、濁度分布の推移を示したのが Fig. 4, Fig. 5 である。又、このときの各水深での濁度低減状況を Fig. 6 に示している。これらの図から、洪水の流下に伴わない貯留水の移流、混合は貯水池深部にまで及び、成層は破壊され、底部を除いて水温はほぼ一様分布となり、高濁度水は池内全体に拡がって、中層部に高濁度域が形成されていることがみられる。流入濁度は洪水後、速やかに低減する

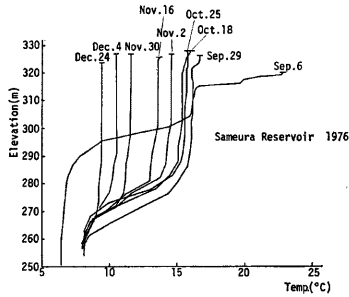


Fig. 4. Temperature Distribution of Waters in Sameura Reservoir (Sept.~Dec. 1976).

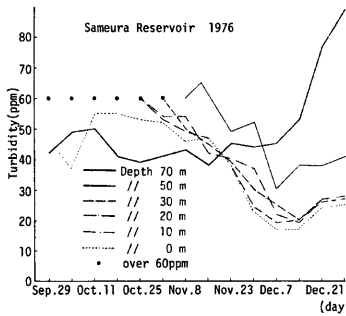


Fig. 6. Temporal Change of Turbidity in Sameura Reservoir.

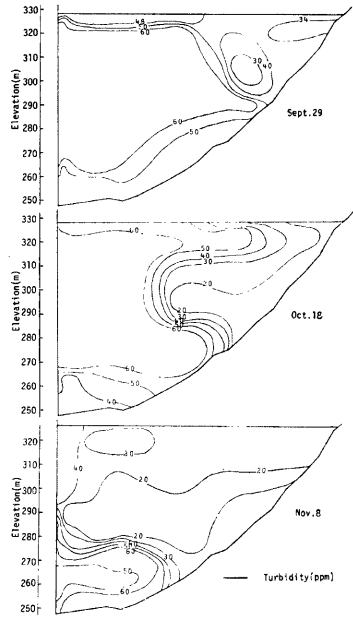


Fig. 5. Spatial Distribution of Turbidity in Sameura Reservoir.

にもかかわらず、池内の濁度は長期にわたり高濃度が継続し、11月に入ってやっと底部（水深70 m）を除いて徐々に低下することがみられる。このような濁水長期化の現象は、先に述べた7月洪水後の様相とは全く異なるものである。これは7月洪水後においては、水温成層の低下があったものの、貯水池の水理学的性格は成層型のままであったのに対し、9月洪水後においては、成層型からむしろ混合型の性格に移行したため、高濁度水の放流は、池水全体が交換されるまで継続するような形となり、また冷却期に入って対流を生じるようになると、まだ沈降しきれない懸濁粒子を再び巻き上げ、沈降による濁度の低減もなかなか進まなかったためと考えられる。

以上のように、洪水後の濁水長期化の現象は、洪水の規模、流入濁度、濁質の構成成分といった流入条件と、洪水前の水温成層の発達状況ならびに洪水後の成層破壊の有無といった貯水池の水理条件の変化、さらには季節、気候、地理的条件といった多くの要素に影響される。このうち、特に洪水時における成層破壊と、高濁度水の流下という時間スケールの比較的小さな現象を解析し、洪水前後の水理特性の変化を明らかにすることが、濁水長期化の問題を取扱う上できわめて重要であろう。このため洪水期間中における、水温、濁度資料の収集をさらに進めることが望まれるとともに、貯水池の水理を流体力学の原理を用いてモデル化し、洪水時、ならびにその後の水温、濁度変化が貯水池を囲む環境条件といかなる対応があるかを数値シミュレーションにより定量的に解析する必要がある。

### 3. 貯水池の水理シミュレーション

#### 3.1 シミュレーション・モデル

貯水池における諸要素の変化を扱う基礎は、質量保存則、運動量保存則、エネルギー保存則という流体力学の原理であり、これらは現実の貯留水に対しては、水の連続式、運動量保存則、濁度（濃度）収支則、水温収支則の形で適用される。基礎原理を適用する方法として、一般にコントロール・ボリューム法が用いられているが、この方法では、対象とする現象の時間的、空間的一様性とスケールが問題となり、適用にあたっては観測資料から、そのような条件を満たす空間の大きさを求め、それをコントロール・ボリュームとする必要がある。<sup>6)</sup> 貯水池における諸要素の変化は、従来より多くの観測によれば、貯水池幅方向には小さく、無視できるものとされており水温についてはその分布が通常層状であり、水深方向のみに変化するとみなされている。このことから貯水池をいくつかの水平層に分割し、これをコントロール・ボリュームとする解析が従来より行なわれてきた。これらの代表例が、Huber-Ryan-Harleman らのいわゆる M. I. T. モデル<sup>7)</sup> や電研モデル<sup>8)</sup> である。さらにまたこれらのモデルでは、運動方程式を省略し、選択取水公式をその定常解として代用しているため、貯水池内の年間水温変化のような時間的、空間的に変化が緩慢で、しかも水平層内における一様性が認められるような場合には、所要の精度が得られている。しかしながら前章でみたように、洪水後の濁度分布は水深方向ばかりでなく、流下方向にも大きく変化し、しばしば濁水塊となって貯水池内を流下し、貯留されることがある。このような濁度分布や、洪水時の成層破壊のように時間的、空間的変化の大きいものを扱う場合には、水平層分割では現象を正しく把握できない。このため、現象の一様性が認められる程度に、流下方向にも分割したものをコントロール・ボリュームとしてとらなければならないことになる。前章でみた早明浦貯水池の観測資料によれば、一様性を満足するには長さ 100 m 深さ 0.5 m 程度に区切る必要があることがみられた。ただし実際の数値計算においては、この程度のものをコントロール・ボリュームとして用いなければならないかどうかは、計算精度上の検討も必要でありこの点については後述する。また富栄養化の指標である窒素やリンについては、現在のところ観測資料も少なく、妥当なコントロール・ボリュームの大きさはこの面よりは評価され得ないが、濁度ほどその変化は大きくないと考えられるので濁水解析のそれを用いても十分であろうと思われる。<sup>6)</sup> この富栄養化の問題については、貯水池内における窒素やリンの挙動が、いまだ明確でなく数学的なモデル化が困難であるため、以下では論ずることなく将来の課題としたい。

以上のような考え方に立ち Fig. 7 のように、貯水池を水深方向および流下方向に分割したコントロール・ボリュームを水平要素とし、それに対して流体力学の諸原理を適用したモデルには、筆者らの二次元モデル<sup>5)</sup>、<sup>6)</sup> がある。その数学的表示は、すでに前報<sup>5)</sup> で述べているが、支川流入を考慮し改めて表示すると次のようである。

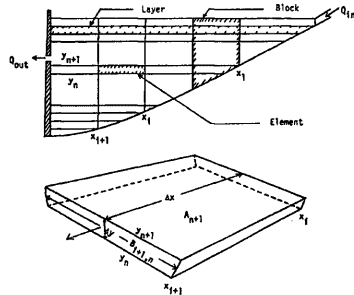


Fig. 7. Control Volumes in Reservoir Dynamics.

1) 水の連続式

$$- \left| v \cdot A \right|_{y_n}^{y_{n+1}} = \left| u \cdot B \right|_{x_i}^{x_{i+1}} \cdot \Delta y + w_n \cdot A_b \dots \dots \dots (1)$$

2) 流下方向の運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{1}{A} \left| u \cdot u \cdot B \right|_{x_i}^{x_{i+1}} - \frac{1}{A \cdot \Delta y} \left| u \cdot v \cdot A \right|_{y_n}^{y_{n+1}} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$+ \frac{1}{A} \left| D_{mx} \cdot B \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x_i}^{x_{i+1}} + \frac{1}{A \cdot \Delta y} \left| D_{mv} \cdot A \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y_n}^{y_{n+1}} - \frac{1}{A \cdot \Delta y} u_b \cdot w_n \cdot A_b \dots \dots \dots (2)$$

3) 鉛直方向の運動方程式（静水圧分布を仮定）

$$P = \int_0^h \rho \cdot g \cdot dy \dots \dots \dots (3)$$

4) 濁度収支則

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{1}{A} \left| C \cdot u \cdot B \right|_{x_i}^{x_{i+1}} - \frac{1}{A \cdot \Delta y} \left| C \cdot v \cdot A \right|_{y_n}^{y_{n+1}} + \frac{1}{A} \left| D_{cx} \cdot B \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x_i}^{x_{i+1}} + \frac{1}{A \cdot \Delta y} \left| D_{cv} \cdot A \cdot \frac{\partial C}{\partial y} \right|_{y_n}^{y_{n+1}} - \frac{1}{A \cdot \Delta y} C_b \cdot w_n \cdot A_b + \frac{1}{A \cdot \Delta y} \left| C \cdot v_0 \cdot A \right|_{y_n}^{y_{n+1}} \dots \dots \dots (4)$$

5) 水温収支則

$$\frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{1}{A} \left| T \cdot u \cdot B \right|_{x_i}^{x_{i+1}} - \frac{1}{A \cdot \Delta y} \left| T \cdot v \cdot A \right|_{y_n}^{y_{n+1}} + \frac{1}{A} \left| D_{Tx} \cdot B \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x_i}^{x_{i+1}} + \frac{1}{A \cdot \Delta y} \left| D_{Tv} \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y_n}^{y_{n+1}} - \frac{1}{A \cdot \Delta y} T_b \cdot w_n \cdot A_b + H \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 $A$ ：水平要素の水平断面積、 $A_b$ ：水平要素の側面の面積、 $\Delta x$ ：水平要素の長さ、 $\Delta y$ ：水平要素の厚さ、 $B$ ：水平要素の幅（貯水池幅）、 $\rho_0$ ：基準密度、 $P$ ：圧力、 $T$ ：水温、 $C$ ：濁度、 $D_m, D_T, D_C$ ：それぞれ運動量、温度、濁度の分散係数（添字  $x, y$  は各方向値を表わす）、 $g$ ：重力加速度、 $h$ ：水深、 $H$ ：単位時間、単位容積あたりの発生温度、 $u$ ；流下方向の流速成分、 $v$ ；水深方向の流速成分、 $w_n$ ；側面の法線方向の流速成分、 $u_b, T_b, C_b$ ；それぞれ側面における流下方向の流速成分、水温、濁度、 $v_0$ ；沈降速度、 $x$ ；流下方向距離、 $y$ ；水深方向距離、 $t$ ；時間、添字  $i, i+1$ ；流下方向の  $i$  断面、 $i+1$  断面、添字  $n, n+1$ ；深さ方向の  $n$  断面、 $n+1$  断面における値を示している。

これらの1)～5)式を階差式に変形し、与えられた境界条件と初期条件によって数値計算を行なうことにより水温、濁度の変化が求められることになる。

3.2 数値計算法とそれに関する検討

計算にあたって1)～5)式を階差式に変形する方法や、上流端、下流端、底面、水表面における境界条件、および数値計算上の安定条件（C.F.L.条件）については、前報<sup>3)</sup>で述べているので、ここでは省略する。支川流入のあるブロックでは、側面境界条件は支川流入流量  $Q_{b, in}$  を既知とし、流入流速  $w_n$  を対数分布で仮定し次の式を満足するように与える。

$$\int_{A_B} w_n dA_B = Q_{b, in} \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 $A_B$ ；側面における支川の流水断面積である。支川の流入のないブロックでは、 $w_n$  は0である。また計算にあたっては、 $u_b = u_i$  とし  $T_b, C_b$  は支川の流入水温、濁度とする。こうして計算に必要な境界条件と、適当な初期条件が与えられれば  $\Delta x, \Delta y, \Delta t$  を数値計算上安定な範囲で適当に選ぶことにより、貯水池内における流速、水温、濁度が計算される。また以下における実際の計算にあたっては、計算の簡略化のため  $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$  を仮定している。

数値計算を行なうときの  $\Delta x, \Delta y$  のとり方は、先に述べた理由により、観測資料から得られるコントロール・ボリュームの大きさに対応して決められなければならない。すなわち計算精度上、コントロール・ボリューム内の現象の一様性を満たすに十分な  $\Delta x, \Delta y$  をとる必要がある。解析の対象とする現象の時間的、空間的一様性やスケールに応じてコントロール・ボリュームの大きさをどの程度にとれば、解析上十分であるかという問題とともに、この点は検討を要す課題である。こうしたことから、以下においては  $\Delta x, \Delta y$  の値が、計算結果にいかに影響するかを調べ、既存の観測資料から得られる水温、濁度分布を精度良く計算するにあたっては、どの程度の  $\Delta x, \Delta y$  をとれば適当かについて検討する。Fig. 8, Fig. 9 は早期浦貯水池

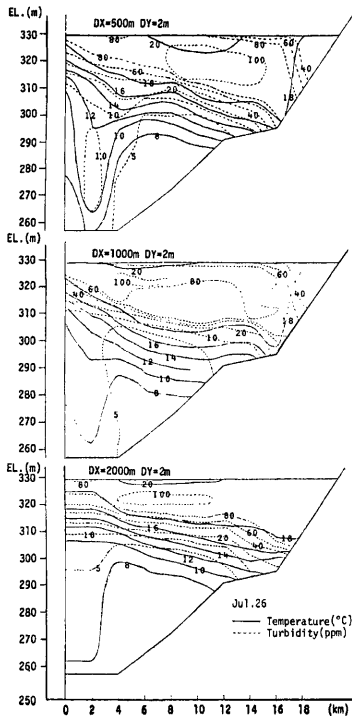


Fig. 8. Temperature and Turbidity Distributions of Stored Waters in Sameura Reservoir (in Cases of Various  $\Delta x$ ).

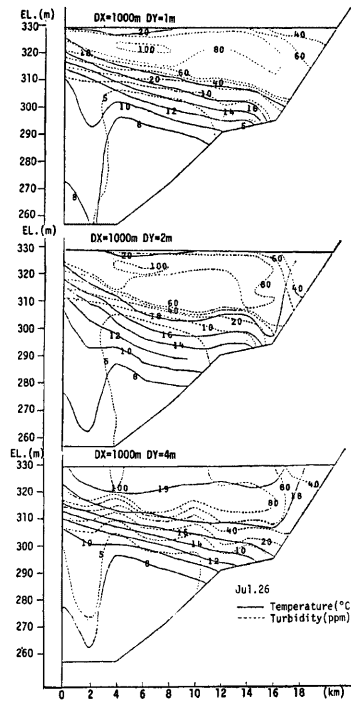


Fig. 9. Temperature and Turbidity Distribution of Stored Waters in Sameura Reservoir (in Cases of Various  $\Delta y$ ).

における 51 年 7 月洪水前後を対象として、 $\Delta x$  を 500, 1000, 2000 m、 $\Delta y$  を 1, 2, 4 m と変えて種々計算をすすめた結果のうち、洪水後の 7 月 26 日の例をそれぞれ図示したものである。又、Fig. 10 はそのときの観測資料による水温・濁度分布を示している。これらの図から、まず水温分布について考察してみると、いずれの計算結果においても、ダム上流部における成層の位置が、実際より 10 m 程度高くなってはいるが、洪水の流入により、流入部において等温線が右下がりとなる傾向は、いずれの場合においてもよく再現されているのがわかる。また、 $\Delta x$ 、 $\Delta y$  を変えることにより、等温線の間隔や傾きに若干の差を生じ、それらを小さくとればする程、空間的变化は顕著にあらわれる傾向はあるが、その程度は大したものではない。つぎに、濁度分布をみると、いずれの場合も観測値より濁度の値は大きいものの、躍層上に高濁度水が貯留されている状況を良く再現している。しかしながら、水温分布において、躍層の位置が実際より高く計算されているのに対応して、高濁度域の位置が実際よりやや高いところにある。 $\Delta y$  を変えることによる影響として、 $\Delta y$  を小さくすればする程、等濁度線が水深方向にやや密になる傾向を生ずるが、一方、 $\Delta x$  を大きくすればする程、流下方向の変化は計算結果に表わされにくくなる。特に  $\Delta x=2000$  m の場合には、濁度分布は層状に近く、流下方向への変化がほとんど表わされていない。以上のことから、水温の変化は濁度に比べ緩慢であるため、この程度に  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  を変えても、計算結果には大きな影響はなく、観測値との不一致は他の要因

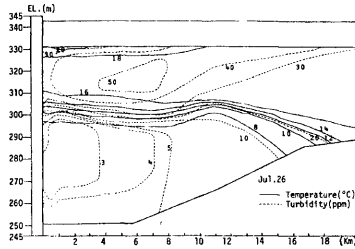


Fig. 10. Observed Temperature and Turbidity Distributions in Sameura Reservoir (26 July 1976).

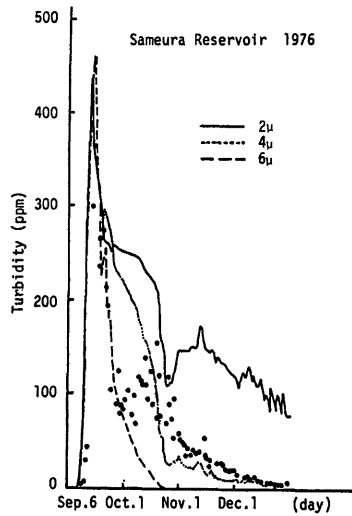


Fig. 11. Estimation of Outflow Turbidities in Cases of Various Particle Sizes.

に負うところが大きいと考えられるのに対し、濁度の場合にはその変化が激しいため、 $dx, dy$  の大きさが計算結果に相当影響し、特に流下方向にはその影響が顕著となり、適当な  $dx$  を選ぶことが精度上不可欠であるといえよう。また、これらの計算結果からのみで、実際の水温・濁度分布を精度良く計算し、現象を正しく説明しうるために適当な  $dx, dy$  の大きさを評価することは困難であるが、各ケースと観測値との比較や従来経験からいっても<sup>9)</sup>、 $dx$  として 1000 m、 $dy$  として 2 m 以上のコントロール・ボリュームを用いることは、比較的大規模な成層型貯水池における濁水長期化現象の数値シミュレーションには、精度上問題があると思われる。

次に、貯水池における濁水長期化のシミュレーションにおいて、計算精度上、大きな影響をもつ沈降速度の取扱について検討しよう。濁度計算における沈降速度の算定には、従来よりストークスの式が慣用されているがそれが適当であるかどうかの問題は別として、平均粒径の懸濁粒子の沈降速度が時間的にも空間的にも、一定と仮定されることが多い。しかしながら、貯水池内における懸濁物質の粒度組成は、時間的、空間的に変化し、とくに洪水後においてはその変化が早くかつ大きいため、一様粒径を仮定した計算では、濁度分布や放流水の濁度の実際を説明するに不十分なことが多い。<sup>9)</sup> Fig. 11 は、早明浦貯水池における 51 年 9 月洪水後の放流濁度について、粒径を一様と仮定し、 $2\mu, 4\mu, 6\mu$ 、と変えて計算した結果と観測値とを明示したものである。この図から、粒径の大きさが計算結果に大きく影響し、その同定は解析上きわめて重要であることがわかる。しかし、いずれの場合にせよ、全期間を通じての満足な解析結果は得られず、一様粒径の仮定は洪水後の濁度変化について十分に説明し得ないものといえよう。そこで、できるだけ現実に近い沈降速度を与え、濁度計算を精度良く行なうために、懸濁粒子の粒度組成の変化を考慮し、濁度  $C$  をいくつかの代表粒径に対する濁度  $C_k$  の集合としてとらえ、それぞれの  $C_k$  について濁度収支則を適用することにより、 $C_k$  の集合としての濁度  $C$  を求める方法を考えてみよう。すなわち、濁度  $C$  を  $C = \sum C_k (k=1 \sim n)$

度分布をいくつかの代表粒径に対する離散的今布におき換えることにより求められる。Fig. 12 は早明浦貯水池流入地点の濁水の粒度分布を対数確率紙に図示したものであり、Fig. 13 はその平均粒径と標準偏差を、流入濁度の値に対して示したものである。これらの結果から代表粒径とそれらの寄与率を定量化すれば、 $C_k$  の流入条件を与えることができるが、現段階では資料が少なく今後、さらに多くの資料の収集を図る必要がある。

数値計算を行なう上での検討課題の一つとして、対流混合の取扱いがある。冬期において、貯水池水面から大気への熱移動と流入水温の低下による移流効果のための表面水温の低下によって、不安定な密度勾配を生ずると、いわゆる大循環とよばれる対流混合が生じることが知られている。また冬期以外においても、たとえば昼夜の気温変化による表面水温の変化や、洪水時において、低温、高濁度のため密度の高い水が貯水池深部へ流入する現象など、局所的に鉛直方向への大きな水の運動を生じる場合がある。このような貯留水の運動の空間的、時間的スケールがどの程度のものであるかは明らかではないが、貯水池における水温・濁度変化を解析するにあたって無視できないことも多い。そこで、シミュレーションを行なうときには、鉛直方向に不安定な密度勾配を生じた場合には、不安定な部分を水深方向に順次混合し、安定な密度勾配にすることにより、便宜的にこのような対流による水の運動を表わしている。しかしながら、このような平均化操作は、実際の現象の空間的、時間的スケールを十分に理解することなく行なわれるため、現象を正しく表現しているかどうかは不明であり、また計算精度上問題となることも少なくない。このため、今後、このような現象に対する詳細な観測とその結果の解析を進めるとともに、対流による貯留水の運動を考慮したシミュレーション手法を開発し、必要に応じて、その定量的取扱いができるようにしなければならないであろう。

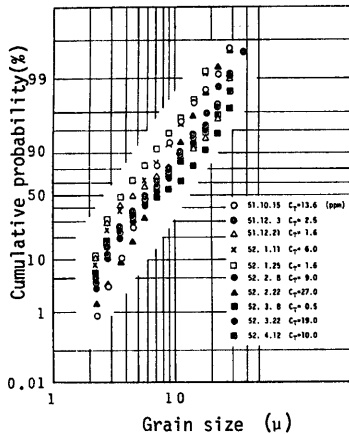


Fig. 12. Log-normal Distribution of Particles in Sameura Reservoir.

### 3.3 早明浦貯水池における数値計算

前述のシミュレーション手法を用いて計算した昭和51年における早明浦貯水池の水温・濁度の結果を示し、それによってこのシミュレーション手法の有用性と問題点ならびに今後の研究課題について述べよう。計算における初期条件として、水温、濁度については、1月5日の観測値を1月1日の水温、濁度として与え、流速については、1月1日の流入量を貯水池へ流出入させ数値計算を続けたときに、ほぼ収束したとみなされる時点における流速の計算値を与えた。 $\Delta x, \Delta y$  は先に述べた検討結果から  $\Delta x = 1000 \text{ m}, \Delta y = 2 \text{ m}$  とした。また、分散係数は一様等方性を仮定し、 $D_{m,x} = D_{m,y} = D_{T,x} = D_{T,y} = D_{e,x} = D_{e,y} = Q_{out} \times 0.01 \text{ (m}^2/\text{day)}$  とし

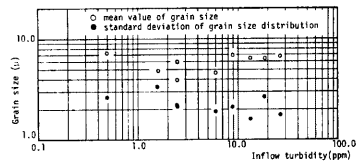


Fig. 13. Mean Grain Sizes and Standard Deviations of Grain Sizes Distributions for Various Inflow Turbidities.



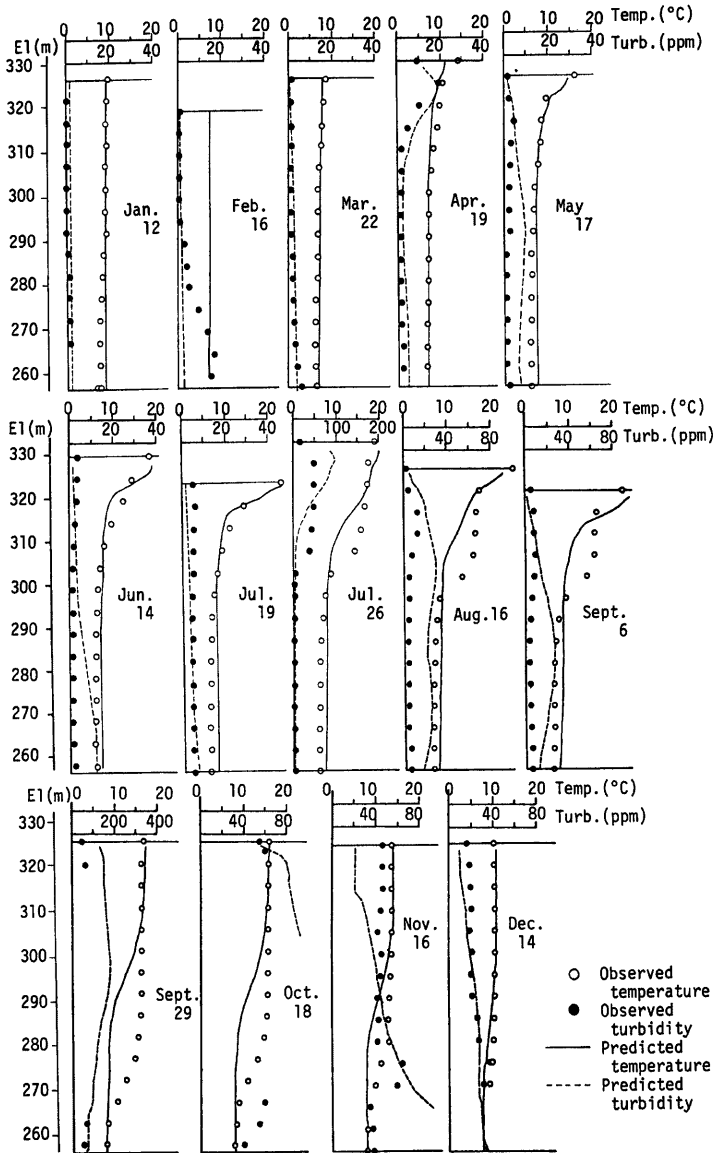


Fig. 14. Vertical Distribution of Temperature and Turbidity of Stored Waters in 1976.

(ここに  $Q_{out}$  = 放流流量), 大気との熱交換に関係する定数の値は, 水面反射係数 = 0.01, 水面吸収率 = 0.5, 日射量減衰係数 = 0.2 としている。沈降速度を算定する場合の粒径は, 先に述べた複合粒径を用い, 流入濁度が 100 ppm 以下では  $2\mu$ ,  $4\mu$ ,  $6\mu$  のものを, それぞれ 25%, 50%, 25% とし, 流入濁度が 100 ppm 以上では, それぞれ 15%, 60%, 25% と仮定した。Fig. 14 は, こうして得られたダム直上流部断面における水温, 濁度の鉛直分布の計算結果を, また Fig. 15 はそのときの放流濁度を示している。これらの結果より, 水温については, 7 月洪水後の成層低下時と 9 月洪水後の成層破壊時において, 観測値との不一致がみられるが, その他の期間ではほぼ良好であることがみられる。一方, 濁度については, 洪水後における値や濁度分布, また, 10 月～11 月初旬にかけての放流濁度に不一致がみられるが, その他の期間では比較的良好な一致が得られている。これらの不一致は, 洪水時における成層破壊のように非常に短時間の時間スケールをもち, かつ微妙に変化するものや, 対流混合に伴う懸濁物質の再浮上による濁度への影響など, 現段階においては評価が難しいところのみられ, それらの原因は, 洪水時における流入水温, 流入濁度資料など入力データの不備 (短時間スケールのものの不足を含めて) や, それに伴う計算の単純化, 対流混合の取扱の単純化など, 実際の現象の時間的, 空間的スケールと対応しない計算方法によるものと思われる。この点は, 今後の詳細な観測や研究により, 資料が整備され, 現象の特性が明らかになれば, 計算法の向上を図ることにより解決されるであろうと考えられる。しかしながら, こうした点を除けば, 一日程度の時間的スケールでの水温分布変化や濁度分布変化, また濁度の伝播過程は, ここで用いたシミュレーション手法により実測値と比較的良好一致した計算が行なわれ, この方法は冷水問題, 濁水長期化問題等の解析に有効であると考えられる。もちろん, より正しく実際現象を把握するためには, 先に述べた問題点の研究をさらに進めるとともに, 数値計算法の改良, 向上が必要であることはいうまでもない。

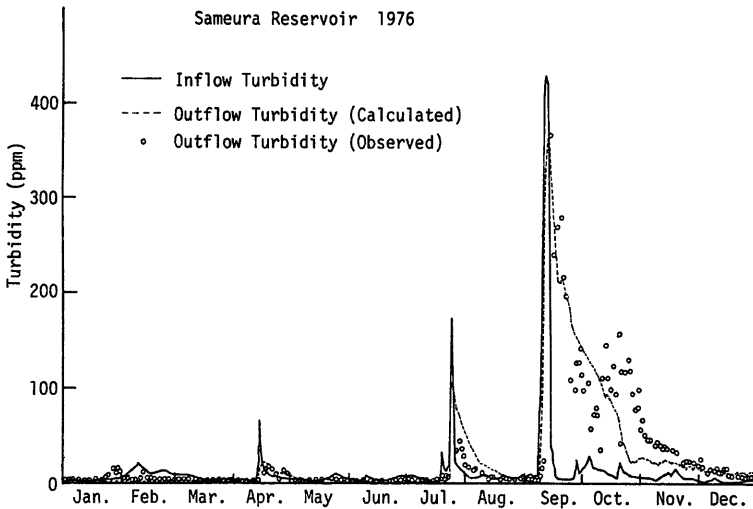


Fig. 15. Estimated Outflow Turbidity and Observed one in 1976.

#### 4. 結 語

貯水池における水理特性の解析について, 濁水長期化の問題を中心に, これまでの研究成果をまとめるとともに, 早明浦貯水池における解析例について述べた。洪水後の濁度分布の特徴を, 観測資料を用いて述べ

るとともに、それが成層の変形や破壊といった水温変化と密接に関連することを明らかにし、そのシミュレーション手法の基本的考え方を展開した。また、シミュレーションを行なうときの  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  のとり方、沈降速度、対流混合の取扱いに検討を加え、計算精度の向上のための技術上の問題を論じた。こうした検討をふまえ、昭和51年における早明浦貯水池の水温、濁度計算を行ない筆者らのシミュレーション解析法が、水温、濁度の貯水池内における基本的な水理的性格の解明に有用であることを示すとともに、なお残された問題点についても考察を加えた。今後は、取扱うべき問題の性質に応じてどの程度まで解析すべきかを考え、それに対応した観測資料の充実と計算法の向上を図らなければならないであろう。

最後に、本研究を行なうにあたり、資料の提供をしていただいた建設省四国地方建設局、および、水資源開発公団の関係各位に感謝の意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 岩佐義朗・井上和也・野口正人：ダム貯水池の成層化過程，京都大学防災研究所年報，第16号 B, 1973, pp. 495-503.
- 2) 岩佐義朗・野口正人・児島 彰：ダム貯水池の水温成層予測法について，京都大学防災研究所年報，第18号 B, 1975, pp. 565-574.
- 3) 国土開発技術研究センター：ダム貯水池に関する水質調査委員会資料，1978.
- 4) 岩佐義朗・松尾直規・遠藤正昭：ダム貯水池の水温予測，京都大学防災研究所年報，第19号 B, 1976, pp. 221-236.
- 5) 岩佐義朗・松尾直規・遠藤正昭：洪水時における貯水池の成層破壊について，京都大学防災研究所年報，第20号 B, 1977, pp. 259-270.
- 6) 岩佐義朗：ダム貯水池における水理特性，日本河川水質年鑑，研究編，1977.
- 7) Huber, W. C., D. R. F. Harleman and P. J. Ryan: Temperature Prediction in Stratified Reservoirs, Proc. of ASCE, Vol. 98, HY-4, 1972, pp. 645-666.
- 8) 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—その一発電専用貯水池の流動形態—，発電水力，No. 134, 1975.
- 9) 綾 史郎・岩佐義朗・松尾直規：濁質の流送過程について，第22回水理講演会論文集，1978, pp. 131-138.