

密度躍層のある場における濁水の挙動に関する研究 (2)

—濁度物質の拡散と流出機構—

芦田 和 男 ・ 江 頭 進 治

STUDIES ON TURBID WATER FLOWS IN STRATIFIED RESERVOIRS (2)

By Kazuo ASHIDA and Shinzi EGASHIRA

Synopsis

Inflows of turbid water into reservoirs during floods cause sometimes stream pollution of long duration within the reservoirs and in the river downstream of the reservoirs.

Laboratory experiments are carried out to investigate the behaviors of turbid water in a nonhomogeneous densimetric flow field. Under experimental and theoretical considerations, two dimensional mathematical model for the routing of the turbidity in thermally stratified reservoirs is presented. Velocity distribution, diffusion coefficient and boundary conditions for the simulation are also discussed.

The turbidity of outflow water and turbidity distribution calculated by the predictive method show fairly good agreement with the experimental results and the data observed for a thermally stratified reservoir.

1. 結 言

貯水池における濁水長期化現象は、隔雪期¹⁾や夏期の洪水期²⁾に多く発生し、粒径十数ミクロン以下の極微細砂が長期間池内に浮遊し、取・放水時の小流量の流れに伴って長期間継続して流出する現象である。

わが国における夏期の貯水池は一般に受熱期にあり、流入・流出に伴う熱移流や大陽副射および大気と水表面における熱交換などによる熱輸送の非平衡により、貯水池の密度(水温)分布は著しく非一様性を帯びる。このような貯水池における濁度物質の輸送機構は、速度場と密度場がそれぞれの諸特性を相互に規定する関係にあるため、非常に複雑である。

大容量の貯水池においては、一般に、洪水後顕著な2次躍層が形成され、躍層近傍の高濃度濁水が小流量の取・放水流れに伴って流出することにより、濁水長期化現象が発生している例が多い。

著者らは、密度躍層の特性が濁水現象に対して重要な意義をもつ場合を対象として、その機構究明に努めており、これまでに、躍層面における渦動拡散係数や turbulent entrainment による躍層の低下過程など、躍層の諸特性がからり明らかにされた^{3),4)}。また、これらの成果を導入して、洪水後の取・放水流れによる密度分布の変化が顕著でない場合を対象とした濁度物質挙動の解析モデルが提案された⁴⁾。

本報においては、前報に続き、濁度物質の貯留・拡散機構に関する実験的検討を加え、上述の解析モデルの若干の修正を行なうとともに、本モデルを適用して実験結果の解析を行なう。また、実際の貯水池における濁水機構のシミュレーションを行ない、観測値とを若干の比較検討を行なう。

2. 濁度物質の貯留・拡散機構に関する実験的検討

2.1 実験方法および実験条件

実験装置の略図は Fig. 1 に示すとおりで、水路幅 28.5 cm、底この配 1/100 および水路全長 23 m であ

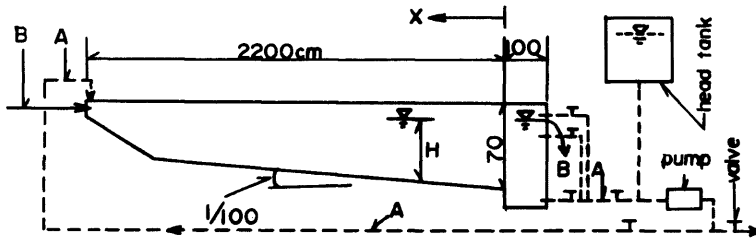


Fig. 1. Sketch of experimental equipment. The length of channel is 23 meter and the width is 0.385 meter.

る。また、水路の片側側壁はコンクリート製で、一方が鋼製であり、発泡スチロール板で断熱されている。

本実験装置は、水路系外との水の交換がないクローズドシステム（システムA）と水路の上流の貯水槽から給水し、下流端において任意の水位で放流できるオープンシステム（システムB）の2種の輸送システムを備えており、それぞれ目的に応じた実験ができるようにされている。

実験は、輸送システムBを用いて、流速分布と濃度分布に関する2種類が行なわれ、流速分布の測定は水素気泡法により、水温分布はサーミスタ温度計により、任意断面における濃度分布は採水法により、水路下流端における流出濃度は通光式濃度計と採水法を併用して測定された。また濁質材料は中央粒径16ミクロン（VA-Tube、分散処理）の微細砂である。

実験条件は **Table 1** に示すものである。本表において、 Q は流量、 X_T 、 X_C 、 X_u は、それぞれ水温、濃度および流速分布の測定が行なわれた断面の位置（**Fig. 1** 参照）で、 H は水温分布の測定断面における全水深である。 h_L は自由表面から境界面（密度こう配が最大にらる位置）までの厚さであり、実験開始後のある時刻における測定値が示されている。 R_{i*} は、 h_L と流量および上・下層の密度差から算定される over-all Richardson Number である。

Table 1. Experimental conditions.

| Exp. No. | Q (l/sec) | X_T (m) | X_C (m) | X_u (m) | H (cm) | h_L (cm) | R_{i*} |
|----------|----------------|--------------|--------------|--------------|-------------|---------------|----------|
| 6-1 | 1.85 | 4.5 | 7.0 2.0 | | 35.6 | 19.0 (41 min) | 4.80 |
| 6-2 | 3.15 | " | " " | | 37.2 | 24.1 (36 ") | 4.04 |
| 6-3 | 4.20 | " | " " | | 38.2 | 26.6 (30 ") | 2.81 |
| 6-4 | 1.85 | " | " " | | 35.8 | 19.2 (38 ") | 5.20 |
| 6-5 | 4.10 | 4.5 | 7.0 2.0 | | 38.2 | 27.1 (33 ") | 3.20 |
| 7-1 | 1.85 | 4.0 | | 3.3 | 35.6 | 18.0 | |
| 7-2 | 3.10 | " | | " | 37.0 | 20.0 | |
| 7-3 | 4.20 | " | | " | 38.2 | 22.6 | |
| 7-4 | 4.20 | " | | " | 38.2 | 23.8 | |
| 7-5 | 3.10 | " | | " | 37.0 | 23.4 | |
| 7-6 | 1.85 | 4.0 | | 3.3 | 35.5 | 21.9 | |

さて、Exp. 6-1~Exp. 6-5 は、濁度物質の貯留・拡散機構を検討するために行なわれたものであり、上流端において、一定濃度の濁水を一定時間定常的に給水した場合の任意断面における濃度の鉛直分布、水温分布および下流端における流出濃度の測定が行なわれた。とくに、Exp. 6-1、6-2、6-3 においては濃度の

鉛直分布に、Exp. 6-4, 6-5 においては躍層面下方の濁度物質の貯留機構に注目した測定が行なわれた。Exp. 7-1~Exp. 7-6 は流速分布に関する実験で、躍層近傍における濁度物質の移流機構を間接的に検討するために行なわれたものである。したがって、水力条件は、前者の条件に対応するように設定されている。

2.2 流速分布に関する実験結果

Fig. 2 には、流速分布に関する実験結果の一例が示されている。本図から明らかなように、境界面にお

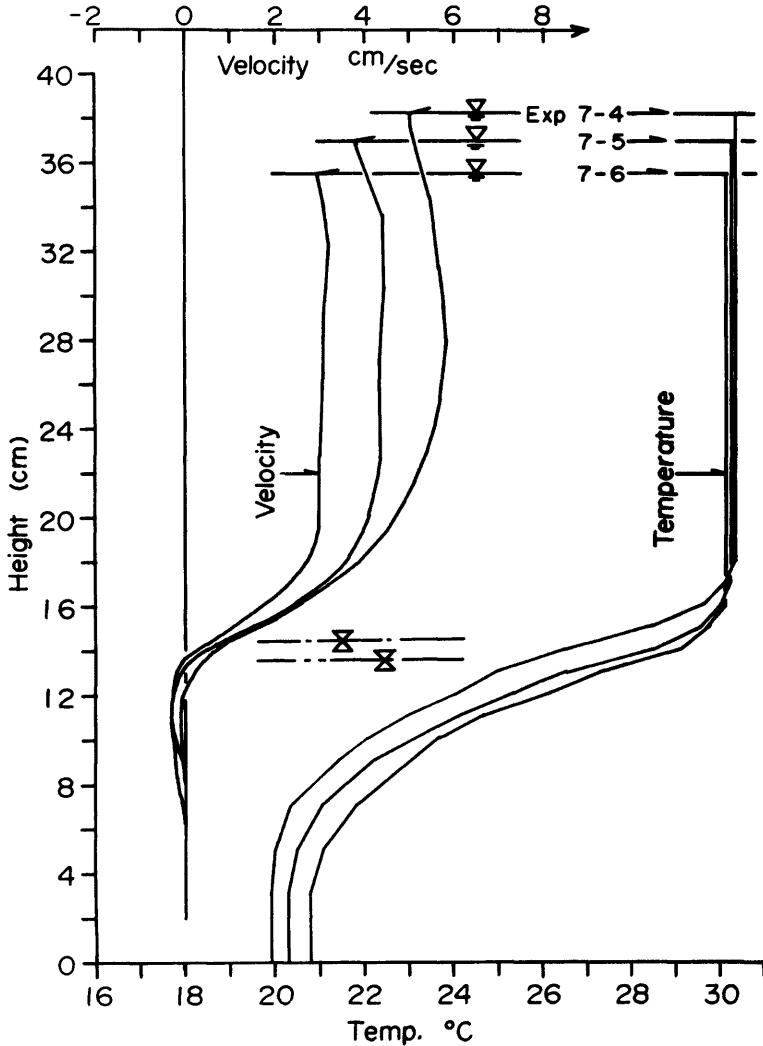


Fig. 2. Velocity distribution measured by hydrogen bubble method.

いて、流速はほぼ0であり、境界面を離れるにしたがい下に凸の形状で流速は増加し、水温が一定になる領域では流速の変化はほとんどない。境界面下方においては、逆流の存在が観察された。しかし微流速であるため、図示の逆流成分の精度は期待できない。

境界面において、流速が0になる結果は、塩水くさび界面において、通常かなり大きな流速のあることが知られていることや、上・下層流体の密度および粘性係数が近接している場合の界面流速に関する Keulegan³⁾の近似理論から得られる結果と非常に異なる。この相違の原因として、流れの場の違いや、レイノルズ数および内部フルード数などの違いが考えられるが、ここに示した流速分布形には、側壁の存在がかなり影響していることも考えられるので、今後十分検討しなければならない。

2.3 貯留・拡散機構に関する実験的検討

ここでは、流量および水位を一定に保ち、一定濃度の濁水を水路上流端から定常的に給水した場合の下流断面における濃度の鉛直分布の変化と下流端における流出濃度の変化特性について検討する。

Fig. 3 (a), (b) には、濃度の鉛直分布に関して、それぞれ $X=7\text{m}$ 地点 (Fig. 1 参照) で測定された Exp. 6-1 の結果および $X=2\text{m}$ 地点における Exp. 6-3 の結果が示されており、前者は 74PPM の濁水を 35.5 分間、後者は 51 PPM の濁水を 32 分間上流端から給水したものである。なお、水温分布の時間的変化も同図に示されてある。

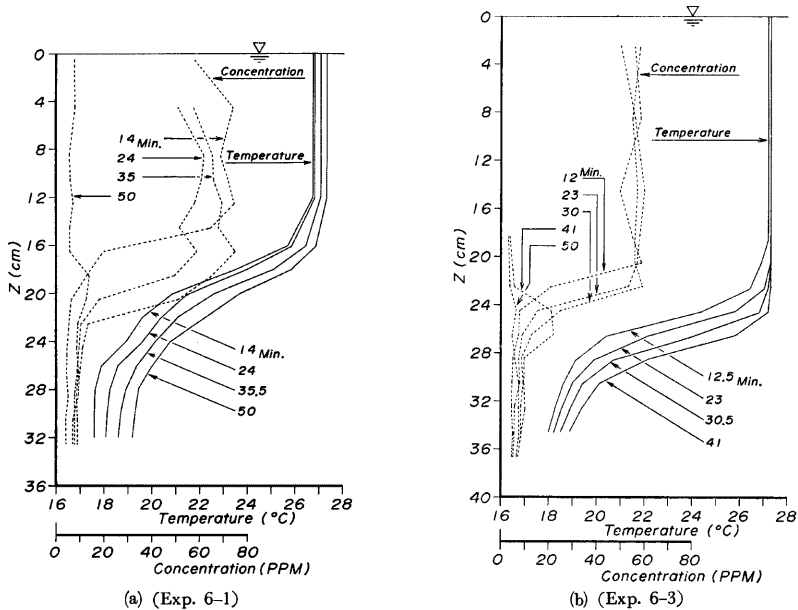


Fig. 3. Distribution of turbid substance concentration changes with space and time.

さて、これらの結果から、前述の流速分布に関する実験結果を考慮しつつ、つぎのような推察ができればよい。まず、表層に流入した濁水は、躍層領域の清水との混合や下方への移流・拡散のため、躍層面近傍においてその濃度を急激に減少させる。したがって、図示のような特徴的な分布が形成される。時間の経過とともに、粒子沈降による移流や鉛直拡散によって濁度物質の輸送が続き、躍層およびその下方の領域の濃度は

漸増する。一方、自由表面近傍においては、表面に向って、濃度の若干の減少がみられる。これは、流量の大きな Exp. 6-3 の結果の方が一様分布に近いことから、粒子沈降速度の影響であることが推察される。すなわち、粒子沈降と鉛直拡散による輸送量の関係から規定される開水路流れにおける平衡状態のそれに近い分布形になっている。Exp. 6-1 の 50 分および Exp. 6-3 の 41 分の分布形は、上流端において濁水の給水が停止され、時間の経過に伴ない表層の高濃度の濁水が流出した後、流速の小さい躍層の領域に濁水が滞留している状態を示すものである。

つきに、躍層面下方領域の貯留過程および流出濁度の時間的変化特性について、Exp. 6-4 の測定結果を用いて検討する。

Fig. 4 には、上流端において 240 PPM の濁水を 32 分間給水した場合、 $X=7\text{ m}$ 地点、 $X=2\text{ m}$ 地点における躍層面下方の濁度物質の貯留過程および流出濃度 C_{out} の時間的変化が示されている。なお、本図の縦軸は上流端における流入水の濃度 240 PPM で規準化されており、 $X=7\text{ m}$ 地点における測定点は自由表面下方 22.2 cm および 28.2 cm の位置にあり、 $X=2\text{ m}$ 地点の測定点は自由表面から 30.6 cm および 36.6 cm 下方にある。参考のため、Exp. 6-4 においては、over-all Richardson Number が大きく、躍層面の低下は緩慢であり、実験開始後 38 分経過した時点において自由表面下方 19.2 cm の位置に躍層面があることを付記しておく。

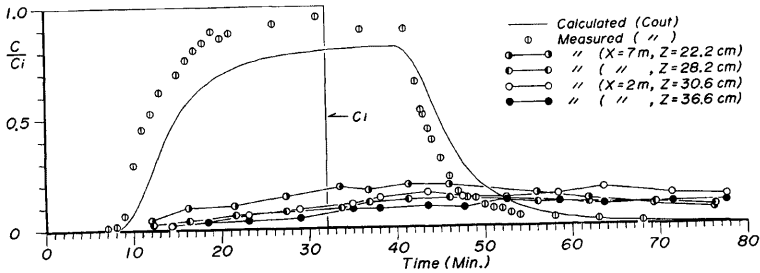


Fig. 4. Variation of turbid substance concentration in the thermocline and in the lower region.

さて、同図から明らかなように、下方領域への濁度物質の輸送により、時間の経過に伴ない濁度物質の貯留が進行し、しだいに濃度が増加する。濃度のピークは、濁度物質の侵入が早い段階に始まる $X=7\text{ m}$ 地点において、早く現われる。また、水深方向の各位置においては、躍層面に近い方が早くピーク値に達し、その下方では十数分遅れてピーク濃度が現われる。この時間的遅れは、粒子沈降による移流時間に対応しているものと考えられる。さらに、両地点における分布特性について詳しく検討すると、つぎのような興味深い考察ができる。 $X=2\text{ m}$ 地点においては、30.6 cm の位置がピーク濃度に達した後、これより 6 cm 下方では十数分遅れてピーク濃度が現われる。しかも、ピーク濃度は 36.6 cm の位置において若干小さくなるが、顕著な差はなく、両地点ともほぼ同様の値をもつ。また、これらの点においては、先述の流速分布の測定結果が示すように、ほとんど流れは存在しない。したがって、躍層領域の下方における粒子の輸送機構として拡散による輸送を無視することが可能であり、粒子沈降に基づく移流のみを考慮すればよいことが明らかである。一方、 $X=7\text{ m}$ 地点における両測定点においては、ピーク濃度の現われる遅れ時間については、前者のものと明瞭な差はみられないが、両測点における濃度の差が顕著に現われ、28.2 cm における濃度が小さくなっている。これは、22.2 cm の測点が躍層領域にあるため、鉛直拡散による輸送が無視できない領域が、この測点より下方より下方まで及んでいるためであることが推察される。すなわち、躍層領域における拡散係数は密度こう配のため非常に小さいことが考えられるが、この領域において、拡散による輸送を考える必要があることを示している。

最後に、流出濁水濃度 C_{out} の時間的変化特性について検討する。図から明らかなように、流出濃度の上昇過程と減少過程における分布形状が異なることが特徴である。上昇期の初期の段階においては、表層の流速の大きな領域における移流・拡散による輸送が卓越し、流出濃度は急激に増大する。さらに時間が経過すると、上に凸の形状を保持しながら漸増する。これは、Fig. 3 に示した実験結果で考察したように、流速の小さな躍層の領域における濃度が時間の経過とともに増加するためである。

一方、流出濃度の減少過程に関しては、つぎのように推察される。上流端における濁水の給水停止の影響が、流速の大きな領域における移流・拡散による輸送の時間的変化として、まず現われ、短時間の間に流出濃度は急激に低下する。それ以後、流出濃度は長時間にわたって遅減する。この遅減機構は、躍層の流速が小さい高濃度濃域の濁水が、徐々に流出する現象であることが考えられる。

以上、本章においては、実験結果に基づいた種々の考察を行なった。

3. 貯水池における濁度物質挙動の解析モデル

まず、従来の水質予測モデルに関する主要な研究を概括し、ここで提案する解析モデルの意義を明確にしよう。Huber・Harleman・Ryan⁶⁾ および Markofsky・Harleman⁷⁾ らは、取水層流れに関する研究成果を適用し、流下方向の変化を省略した鉛直一次元移流拡散方程式を基礎式として、水温、BOD および DO などの水質予測モデルを提案し、岩佐・野口・児島⁸⁾ および岩佐・松尾・遠藤¹⁴⁾ らは 2 次元的な現象まで拡張した予測モデルを提案している。これらの予測モデルは、実験や実際の貯水池に適用され、良好な結果が得られている。一方、沈降性濁度物質を対象としたものには、つぎのような研究がある。合田・海老瀬⁹⁾ は 2 次元移流拡散方程式を基礎式とした 2 層および 3 層モデルを提案しているが、解析的に解を追求しているため、定常的な現象を扱っており、境界条件や流速分布および拡散係数などの問題も含めて、今後多くの問題を残している。村本・道上・藤田¹⁰⁾ は、現地貯水池における観測的研究から、貯水池を Black Box とみなし、この点において連続式を適用した予測モデルを提案している。また、安芸・白砂¹¹⁾ は、Huber⁶⁾ らの考え方に従い、鉛直一次元移流拡散式を基礎式とした予測モデルを提案している。

このように、沈降性濁度物質も含めた水質予測に関して、現象を一次的に扱うものを主として、種々の予測モデルが提案されている。鉛直一次的な予測モデルの最大の欠点は、水温など時間的変化の緩やかな水質の長期予測には適しているが、時間的変動の大きな水質の追跡が不可能なことである。一般的に、水質が問題になるような貯水池においては、平常時における取水流れの最大流速は高々数 cm/sec 程度であり、貯水池における移流時間^{註-1)} は数日程度になる。鉛直一次的な手法においては、この移流時間の評価や貯水池が上流側から浄化するという事実を説明できない。

以上のように、従来の研究に対して検討したが、貯水池における沈降性濁度物質の挙動を予測するには、少なくとも流下方向の変動を扱う必要があるように推察される。

このような観点から、著者¹⁾ らは先に、2 次元移流拡散方程式を基礎式として、密度（温度）躍層のある場における濁度物質の挙動を半無限場の問題として扱うことを提案するとともに、境界条件などについて考察を進めてきた。しかしながら、半無限場の取り扱いにおいては、ダム地点および取・放水に近傍における濁度物質の挙動の機構を導入できない不合理性が残されていた。そこで、本章においては、基礎式に関して若干の考察を進めるとともに、上述の問題点を解決するため下流端における境界条件を考察し、前章で得られた結果を一部適用することにより、有限場における解析モデルを提案する。

簡単のために、ここでは、2 次元的な現象を対象として、前章で示したように濁水が表層を流動する場合の手法について述べる。

前章の実験的考察において、表層の密度一定の領域においてはもちろんのこと、躍層領域においても濁度物質の輸送に関して鉛直拡散の影響を考慮する必要があることが示され、さらに、躍層領域下方においては

註-1) ここで使用した移流時間は、貯水池長 L 、最大流速 V_m とすると、 L/V_m で表わされる。

自由沈降による輸送が卓越することが明らかにされた。このような輸送特性の相違を考慮すると、流れの場を2つの領域に分割し、それぞれの領域において成り立つ輸送方程式を用いて濁度物質の挙動を論じることが非常に有効であることが考えられる。したがって、表層および躍層領域においては、移流拡散方程式が用いられ、その下方の領域においては、移流方程式が用いられる。

Fig. 5 には、前述の実験結果にみられるような、また、洪水放流により1次躍層が消滅し顕著な2次躍層が形成されている場合の水温および密度分布が模式的に示されている。本図において、 h_1 は密度変化が顕著でない領域の厚さ、 h_L は表面と躍層間面の厚さ、 h_2 は躍層領域下面までの厚さ、 H は全水深で、躍層の厚さは $h_2 - h_1$ で表示される。とくに躍層領域を图示したのは、密度こう配の違いにより、拡散係数などの流れ特性が、表層と躍層においては非常に異なることを考慮するためである。また、前述の自由沈降領域は、同図において、 $h_2 < z \leq H$ の領域である。

さて、Fig. 5 に示すように、自由表面に沿って流下方向に x 軸、鉛直下向きに z 軸、時間 t とすると、領域 $0 \leq z \leq h_2$ における濁度物質の輸送機構は、次式のような2次元移流拡散方程式を用いて表示される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + (w + \omega_0) \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (\epsilon_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (\epsilon_z \frac{\partial C}{\partial z}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$(0 \leq t, \quad 0 \leq x \leq L_D, \quad 0 \leq z \leq h_2)$

ここに、 C ：濁水濃度； u, w ：流速の x, z 成分； ω_0 ：濁度物質の沈降速度； ϵ_x, ϵ_z ：渦動拡散係数の x, z 成分。なお、これらの水理量は、 t, x および z の関数であるが、煩雑になるため関数表示を避ける。

上式の左辺第3項について若干の検討を加える。この移流項は、濃度の鉛直分布および躍層領域やその下方領域における濁度物質の貯留過程に関して重要な影響を及ぼす項である。したがって、この項に含まれる流速の成分は、つぎのような理由により、省略することができない。

著者らは、先の研究^{3),4)}において、境界面における流速の z 成分が、連行速度 W_e を用いて次式のように表わされることを示した。

$$w|_{z=h_L} = \frac{\partial h_L}{\partial t} + u \frac{\partial h_L}{\partial x} - W_e \quad \dots\dots\dots (2)$$

もし、躍層面が平行に低下する場合は、 $\partial h_L / \partial t = W_e$ であり、(2) 式は次式のようになる。

$$w = u \cdot \partial h_L / \partial x \quad \dots\dots\dots (3)$$

水路実験や貯水池において、自由表面における水面こう配は無視できるが、界面抵抗のため躍層面においては、若干のこう配が生じる。躍層面近傍の熱境界層や流線方向など検討すべき問題であるが、 $z = h_1$ および流線が躍層面と平行であるとする (3) 式から、 $z = h_1$ における w は、 $w = u \cdot \partial h_1 / \partial x$ ($\partial h_1 / \partial x < 0$) と表示される。したがって、躍層近傍において、次式が成り立つ。

$$w + \omega_0 < \omega_0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

貯水池に長時間浮遊している濁質は、一般に2~6ミクロン程度の粒径のものが大部分を占めており、これらの粒子の沈降速度は $3 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-3}$ cm/sec 程度である。一方、躍層面の平均的こう配は -10^{-3} 以上になることもあるが、平常の取水時においては $-10^{-4} \sim -10^{-3}$ 程度であることが推察される。したがって、躍層近傍において、 $w + \omega_0$ が負の値をもつことも考えられ、粒子沈降による清浄化が著るくさまたげられることになる。

上述のように、 w の分布を的確に推定することは重要な問題であるが、そのためには今後の研究の進展が必要である。したがって、ここでは $w + \omega_0 = \omega_0'$ とおいて、これを見かけ上の沈降速度と呼ぶことにし、

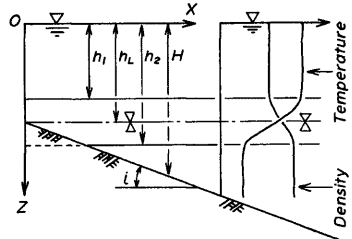


Fig. 5. Schematic distribution of temperature and density, and layered model.

(1) 式の左辺第3項を次式のように形式的に表わしておく。

$$(w + \omega_0) \frac{\partial C}{\partial z} = \omega_0' \frac{\partial C}{\partial z} \quad \dots\dots\dots (5)$$

つぎに、初期および境界条件について検討する。有限場において、(1) 式は、初期条件と4個の境界条件式を用いて解かれる。

初期条件は、初期の貯水池における濁水濃度が無視できれば、 $h_2 < z \leq H$ の自由沈降領域も含めて、次式のように表わされる。

$$t = 0 : C = 0, \quad (0 \leq x \leq L_D, \quad 0 \leq z \leq H) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 L_D は躍層が存在する領域の長さで、 $x = L_D$ はダムあるいは取・放水口の位置である。

$x = 0$ における条件は、上流域からの濁度物質の輸送量によって決められ、次式のように示される。

$$x = 0 : C = F(Q, \omega_0, \epsilon_z, \dots), \quad (0 < t, \quad 0 \leq z \leq h_1) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{\partial C}{\partial x} = 0, \quad (0 < t, \quad h_1 < z \leq h_2)$$

上式において、 F は粒子沈降速度や水理量の関数である。具体的には次章で述べる。第2の式は、濁度物質の流入・流出がない条件である。

つぎに、下流端における条件について検討する。

Fig. 6 には、下流端近傍の流れの状況が模式的に示されている。取水口近傍では、移流項が卓越する流れが形成されるため、濁度物質の輸送機構に関しても移流項の影響が卓越することが推察される。また、この領域(图中的 L_c 区間)の長さは L_D に対して、 $L_c/L_D \ll 1$ となり、無視できる程度のものである。したがって、下流端における濁度物質の流出は移流のみによるものを考える。すると、下流端における境界条件は、領域 $h_L < z \leq h_2$ における条件も含めて、次式のように示される。

$$x = L_D : \left. \begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = 0, \quad (0 < t, \quad 0 \leq z \leq h_L) \\ \frac{\partial C}{\partial x} = 0, \quad (0 < t, \quad h_L < z \leq h_2) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

上式において、第2の式は、ダムによる壁の影響のため濁度物質の輸送がない条件、すなわち、反射の条件である。

自由表面における条件式は、合田・海老瀬⁹⁾ が用いているように、平衡状態の条件を考えると、次式のように示される。

$$z = 0 : \epsilon_z \frac{\partial C}{\partial z} - \omega_0' C = 0, \quad (0 < t, \quad 0 \leq x \leq L_D) \quad \dots\dots\dots (9)$$

躍層領域の下面における条件は、その下方領域が自由沈降領域であるから、自由沈降の条件、すなわち、移流方程式を用いて次式のように示される。

$$z = h_2 : \frac{\partial C}{\partial t} + \omega_0' \frac{\partial C}{\partial z} = 0, \quad (0 < t, \quad 0 \leq x \leq L_D) \quad \dots\dots\dots (10)$$

(9) 式および(10)式における ω_0' は、 $z = 0$ における水面う配および $z = h_2$ における流速が、ほぼ無視できことから、 $\omega_0' = \omega_0$ と考えてよい。

以上、流速分布および拡散係数の分布を与え、(6)、(7)、(8)、(9)および(10)式の条件下に、(5)式を考慮して(1)式を数値的に解けば、領域 $0 \leq x \leq L_D, 0 \leq z \leq h_2$ における濁度物質の挙動が明らかにさ

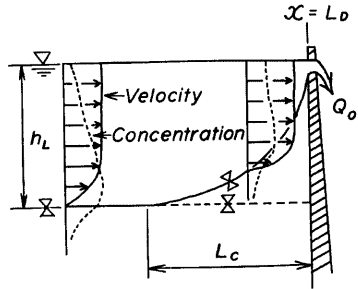


Fig. 6. Schematic distribution of velocity and of concentration near downstream end. This is prepared to consider the boundary condition at $x = L_D$.

れる。このようにして得られた下流端濃度を C_{LD} とすると、流出濁水濃度 C_{out} は次式のように表わされている。

$$C_{out} = \frac{\bar{B}}{Q} \int_0^{h_L} u \cdot C_{LD} dz \quad \dots\dots\dots(11)$$

ここに、 Q ：取・放水流量、 \bar{B} ：流動層の平均河道幅。

また、自由沈降領域における濁度物質の挙動に関しては、 x 方向の移流・拡散による輸送を省略すると、次式で示される移流方式が用いられる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \omega_0 \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots(12)$$

上式は、(6) 式で示される初期条件と、 $z=h_2$ における境界条件のもとで解かれる。

境界条件は、 $z=h_2$ における (1) 式の解を $C(t, x, h_2)$ とすると、濃度の連続条件から次式のように示される。

$$z = h_2 : C = C(t, x, h_2), \quad (0 < t, 0 \leq x \leq L_D) \quad \dots\dots\dots(13)$$

なお、上式は輸送量の連続条件も同時に満足している。

つぎに、流速分布および拡散係数の分布に関して若干検討する。

非一様密度場における流速分布を的確に求めることは、相互にその諸特性を規定する関係にあるため、非常に困難な現状にある。従来、密度が直線分布し、しかも流れによってこれが変形を受けない状態において、非回転流れや層流理論¹²⁾を用いた議論がなされている程度である。躍層が存在する場においては、運動方程式中の重力項の評価が困難であり、今後の研究を待たねばならない。また、一般の貯水池においては、取水層の発達過程および流入水の流れの変形過程など究明すべき多くの問題が残されている。流速分布については、このような現状にあるため、本論においては、実験結果や貯水池における観測結果を参考にして一応実状に適合するような流速分布形を用いておくことにする。

拡散係数の分布についても、不明な点が多く、今後の研究に待つところが大きい。著者らは、前報^{3),4)}においてつぎのような議論を行なった。

開水路流れにおいて、平均的な拡散係数を用い、これを一定とした濃度分布の議論において、かなりよい近似が得られている。したがって、表層の密度こう配の影響を無視してもよい領域において平均的なものを考えると、対数型流速分布則からの類推により、この領域における拡散係数の z 成分は次式のように表示される。

$$e_z = \frac{1}{15} \sqrt{\frac{f_i}{2}} \bar{u} h_L, \quad (0 \leq z \leq h_1) \quad \dots\dots\dots(14)$$

ここに、 \bar{u} ：平均流速、 f_i ：躍層面における抵抗係数で、緩混合および弱混合型塩水くさびの界面抵抗に関する研究成果の適用が考えられる。また、1次躍層が顕著に発達している場合は、平行平板間の対数型2次元流れからの類推により、1次および2次躍層間の領域における拡散係数の z 成分は次式で近似されることが考えられる。

$$e_z = \frac{1}{30} \sqrt{\frac{f_i}{2}} \bar{u} h_L, \quad (h_2 \leq z \leq h_1) \quad \dots\dots\dots(14)'$$

ここに、 h_3 ：1次躍層の厚さ。

躍層領域においても、前者と同様に平均的なものを考え、躍層面におけるそれがこの領域における平均的な拡散係数を与えるものとする。躍層面における拡散係数の z 成分については、前報において連行係数や躍層面の密度こう配を用いて次式のように表わされた。

$$e_z|_{z=h_L} = \frac{\Delta\rho/2}{\partial\rho/\partial z} E\bar{u} = \frac{\Delta\rho/2}{\partial\rho/\partial z} \frac{K\bar{u}}{R_{i*}} \quad \dots\dots\dots(15)$$

ここに、 $\Delta\rho$ ：表層水あるいは流入水と下層水との密度差、 $\partial\rho/\partial z$ ：躍層面の密度こう配、 E ：連行係数、 R_{i*} ：over-all Richardson Number で、内部フルード数の2乗の逆数、 K ：定数で、 $K \approx 1.5 \times 10^{-3}$ 。

また、1次躍層面における拡散係数も式で表わされるため、1次躍層が形成されている場合、この領域における拡散係数も式で推定されるものを考える。

拡散係数の x 成分 ϵ_x については、Webster¹⁹⁾ の風洞を用いた実験的研究から類推して、躍層においてはもちろんのこと、他の領域においても若干の密度こう配のため、 $\epsilon_x < \epsilon_z$ なる関係が推察される。しかしながら、貯水池における濁度物質の挙動に関して、 ϵ_x の推定精度は、支配的な要因とはならないため、ここでは、各領域において、次式を用いて推定することにする。

$$\epsilon_x \doteq \epsilon_z \quad \dots\dots\dots(16)$$

以上、貯水池において躍層が形成されている場合の濁度物質挙動に関する基本的な解析手法が示された。実験結果の解析や実際の貯水池における適用例については、次章で述べる。

4. 濁度物質の貯留・拡散機構に関する数値シミュレーション

4.1 概 説

前章の解析手法を実際に適用する際、躍層の位置および厚さの推定に関する問題や、2次躍層の存在しない貯水池上流部の幾何学的形状を簡単な形に定式化する必要があるとともに、この領域における濁度物質の挙動特性を明らかにする必要がある。

躍層の位置の推定に関しては、岩佐¹⁴⁾らによって取・放水に伴う熱移流や流入部における連行を考慮した取扱いが議論されている。また、著者は前報³⁾において、洪水放流時における turbulent entrainment による躍層の低下過程を論じた。余水放流をダム頂部に行なう貯水池においては、洪水時に低下した躍層は、その後長期間位置の変動がないことから考えて、躍層の低下に関して、turbulent entrainment によるものが支配的な場合もあることが推察される。このような観点から、躍層の低下に関する3種の要因を考慮した解析が進められ、良好な結果が得られつつある。また、躍層の厚さに関しては、躍層面における密度こう配の推定の問題とも関連して、取・放水流れおよび流入部近傍の流れに伴う熱境界層の形成過程に関する考察が必要であり、今後の大きな研究課題であるが、オーダ的には推定可能である。

つぎに、実際の貯水池の平面および縦断形状や濃度分布に関する観測資料を参考にして、貯水池上流部の形状の定式化およびこの領域における解析手法について述べておく。

実際の貯水池において、2次躍層が形成されている領域は、躍層が河床面と交わる位置より下流部であり、この位置より上・下流部において濁度物質は非常に異なった挙動特性を示す。すなわち、上流部においては、一般の開水路流れでみられるような濃度分布形が形成されるが、流水断面積が小さいため鉛直混合が活発に行なわれるとともに、濁質粒径が小さいため1次躍層の領域を除くと、ほぼ一様分布で近似される濃度分布形が形成されることが推察される。また、この領域の流水断面積および水深の変化は、若干の調査資料によって、次式のように表わされるものとする。

$$H = H_0(1 + hX^m), \quad (0 \leq X \leq Lv) \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$A = A_0(1 + aX^n), \quad (0 \leq X \leq Lv) \quad \dots\dots\dots(18)$$

ここに、 H_0 、 A_0 ：貯水池上流端における水深および流水断面積； h 、 a ：各貯水池において決定される定数、 Lv ：貯水池上流部の長さ、 X ：流下距離。なお、上式において、 $m=1$ 、 $n=2$ 程度の貯水池が多いようである。

上述のことから、幾何形状が (17)、(18) 式で表示される貯水池上流部において、濁度物質の挙動を一次元分散方程式を用いて表わすと次式のようなようになる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{Q}{A} \frac{\partial C}{\partial X} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial X} \left(AK_x \frac{\partial C}{\partial X} \right) \quad \dots\dots\dots(19)$$

ここに、 Q ：流量、 K_x ：分散係数。 K_x は、対数型流速分布を考えると、次式のような形式で表わされる。

$$K_x = \alpha \frac{HQ}{A\{6.0 + 2.5 \ln(H/k_s)\}} \quad \dots\dots\dots(20)$$

ここに、 k_s ：相当粗度。

(19) 式において、初期の貯水池の濃度分布から初期条件が決定され、 $X=0$ および $X=L_U$ における境界条件は、それぞれ、貯水池への流入濁度の条件および移流方程式で表示される。

このように、貯水池上流部の領域を考える必要がある場合は、前章で述べた2次躍層が形成されている領域の上流端の条件式((7)式)は、適当な流速分布および濃度分布を考え、両領域の接点において濁度物質の輸送量が等しくなるように表示されなければならない。

4.2 実験結果の解析

ここでは、前章の方法を用いて、水路下流端における流出濃度および任意断面における濃度分布に関する計算結果を示し、実験結果との比較を行なう。

数値計算は、流速および拡散係数の分布を Fig. 7 のように模式化し、(1)式を差分近似式に展開して行なわれた。計算に用いられた諸量は、Table 1 に表示されたものと Table 2 に示すものである。本表において、密度こう配は実験値が用いられ、躍層の厚さ h_2-h_1 は、 $k \cdot \Delta\rho / (\partial\rho/\partial z)$ と表わし、 $k=3\sim 4$ として決められている。

また、(7)式の条件は、 $C=C_i$ ($0 < t, 0 \leq z \leq h_1$) として用いられ、(14)式における f_i には金子¹⁵⁾の式が適用されている。

このようにして算定された流出濃度と実験値とを比較したものが Fig. 8 に示されており、また、2章で

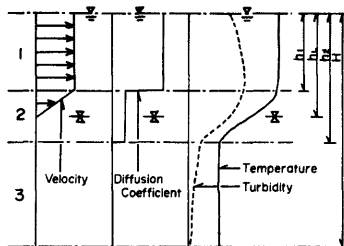


Fig. 7. Distribution of velocity and of diffusion coefficient used for simulation of turbidity routing.

Table 2. Hydraulic conditions prepared for simulation.

| Exp. No. | h_1 (cm) | h_L (cm) | h_2 (cm) | $\Delta\rho$ (g/cm ³) | $\partial\rho/\partial z$ (g/cm ³ /cm) |
|----------|---------------|---------------|---------------|--------------------------------------|--|
| 6-1 | 12.66 | 19.0 | 25.33 | 1.65×10^{-3} | 0.315×10^{-3} |
| 6-3 | 23.0 | 27.6 | 32.2 | $1.81 \times "$ | $0.755 \times "$ |
| 6-4 | 12.8 | 19.2 | 25.6 | $1.73 \times "$ | $0.560 \times "$ |

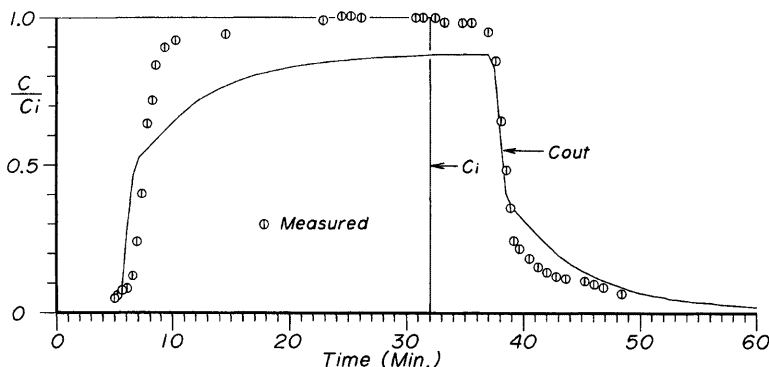


Fig. 8. Variation of turbid substance concentration of outflow. Vertical axis is normalized by turbid substance concentration of inflow. C_{out} : Value from simulation of turbidity routing. \circ : Measured value.

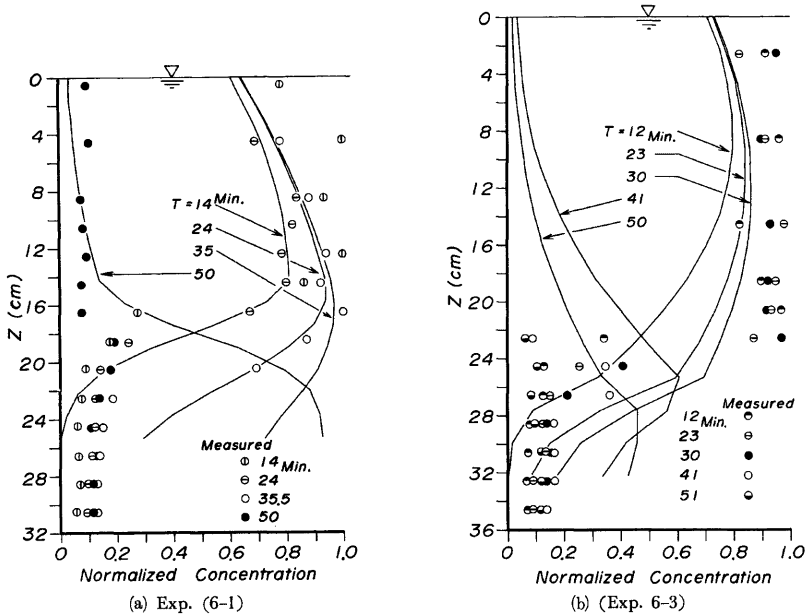


Fig. 9. Distribution of turbid substance concentration changes with space and time. Curves in this fig. are values from simulation.

提示したところの **Fig. 4** にも示されている。**Fig. 9 (a), (b)** には、濃度の鉛直分布形を比較したものが示されている。

流出濃度の計算値において、領域 $h_1 < z \leq h_L$ において流速分布を直線分布で近似しているため、濃度の上昇および減少期において、濃度の増減がゆるやかな傾向を示している。また、濃度の漸増期において、計算値が小さく現われるのは、実験における計測方法の精度の問題も考えられるのが、躍層を通して下方への輸送量が過大に評価されていることが推察される。このことは、**Fig. 9(a)** における両者の比較にみられるように、躍層領域において計算値の方がかなり大きいことから推察される。**Fig. 9(b)** に示す計算値は、前章の(5)式で考察したように、流速の z 成分の分布を考慮して、 $\omega'_0 = 0.008 \text{ cm/sec}$ ($0 \leq z \leq h_1$), $\omega'_0 = 0.002 \text{ cm/sec}$ ($h_1 < z \leq h_2$) として計算されたものであり、 $\omega'_0 = \text{const.}$ として算定されるものよりも、躍層領域の濃度の時間的変化がよく表わされているように思われる。

このように、計算値と実験値とを比較検討した結果、若干の問題点はあるが、両者はほぼ同様の傾向を示しており、解析手法の妥当性が示されたものと考えられる。

4.3 貯水池における濁度物質挙動の数値シミュレーション

ここでは、風屋貯水池における夏期の洪水前後の流量および水温・濃度分布に関する観測結果を参考にし、取・放水濃度および池内における濃度分布に関して3章および4.1節で述べた方法により数値シミュレーションを行ない、観測結果との比較検討を行なう。まず、シミュレーションの条件はつぎのようである。

流入流量 (Q) の時間的変化は、後述の **Fig. 10** に一部折れ線で示されており、0~100 hr において流入量とほぼ等しい放流がダム頂部のゲートを用いて行なわれ、それ以後は、表面から約 42 m の位置にある取

水口から約 60 m³/sec~40 m³/sec の発電取水が連続的に行なわれている。

流入水濃度は、濁度物質として十数ミクロン以下を考慮して、従来の観測結果から、 $C_i=0.0677Q^{1.35}$ なる関係が用いられ、洪水流入後 192 時間経過した時点で $C_i=0$ とされている。

流速分布については、ゲート放流時は先の実験の解析に用いたものと同じものが用いられ、発電取水時には、観測結果を参考にして、次式で示される分布形が用いられた。

$$u = \begin{cases} u_m e^{-(z-h_s)^2/2\sigma^2}, & (0 \leq z \leq h_s) \\ u_m \{1 - (z-h_s)/(h_L-h_s)\}, & (h_s < z \leq h_L) \end{cases} \dots\dots\dots(21)$$

ここに、 h_s : 取水口の位置、 σ : 標準偏差、 $\sigma = h_s/a$

$$u_m = \frac{1}{\frac{1}{2} + \frac{r\sqrt{2\pi} - a}{2a} \frac{h_s}{h_L}} \frac{Q}{Bh_L}$$

$$r = \begin{cases} h_s \int_0^{h_s} e^{-(z-h_s)^2/2\sigma^2} dz \\ h_s \int_{-\infty}^{h_s} e^{-(z-h_s)^2/2\sigma^2} dz \end{cases}, \quad (a=3.5, 0.999 < r)$$

拡散係数は、1 次躍層も考慮して、前章に示したおのおのの式を用いて算定され、その他の諸量はつぎのようなものが用いられている。

$L_T=7.5$ km, $A_0=1400$ m², $H_0=15$ m, $a=0.99 \times 10^{-8}$, $h=2.67 \times 10^{-4}$ (以上、(17) (18) 式参照) ;
 $L_p=5.5$ km, $B=180$ m, $h_1=44$ m, $h_L=50$ m, $h_2=56$ m, $h_3=6$ m, $h_s=42$ m ; $h_s=1.0$ cm,
 $\omega_0=0.065$ m/hr, $d\rho=1.25 \times 10^{-3}$ g/cm², $\partial\rho/\partial z=1.4 \times 10^{-4}$ g/cm³/m, $\alpha=1000$ ((20) 式参照),
 $\sigma = h_s/3.5$

このような諸条件を用いて算定された流出濃度 C_{out} と観測値が Fig. 10 に示されている。図から明らかなかに、両者はかなりよく一致している。洪水は 2 つのピークをもっているが、初めのピークに対応する流出濃度は、60 hr 時点の極大値に対応するものであり、第 2 の洪水ピークに対応するものよりかなり小さい。また、計算値において、 $T=100$ hr において C_{out} が不連続的に変化するのは、ゲート放流の停止の影響である。

つぎに、貯水池下流部における池内濃度分布に関するシミュレーション結果を示し、Fig. 10 の結果と対照しながら若干の考察を行なう。

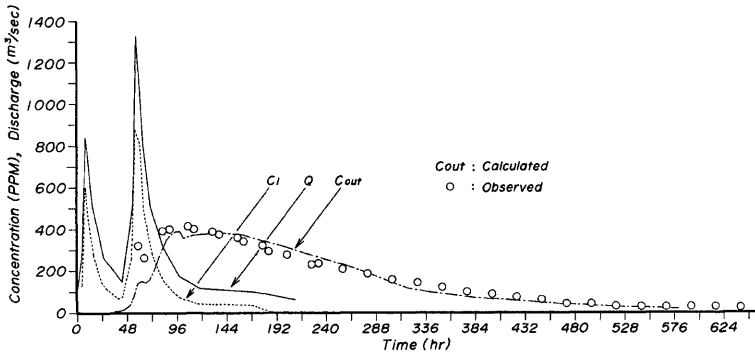


Fig. 10. Variation of turbid substance concentration of outflow from reservoir.
 C_{out} : Value from simulation ; \circ : Observed value ; Q : Discharge of inflow and outflow ; C_i : Concentration of inflow at upstream end of reservoir.

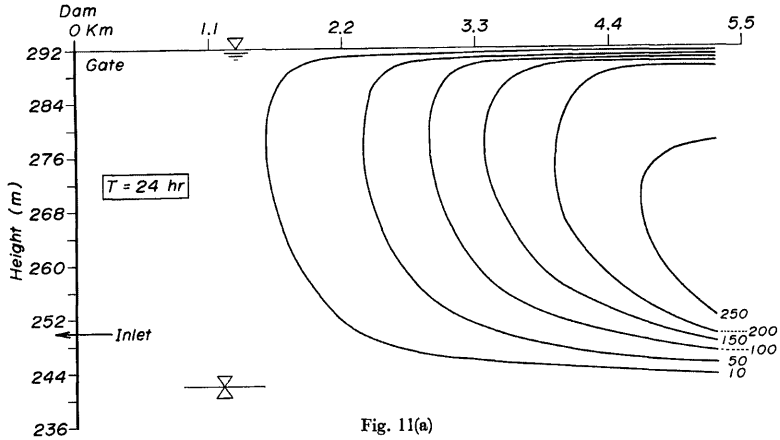


Fig. 11(a)

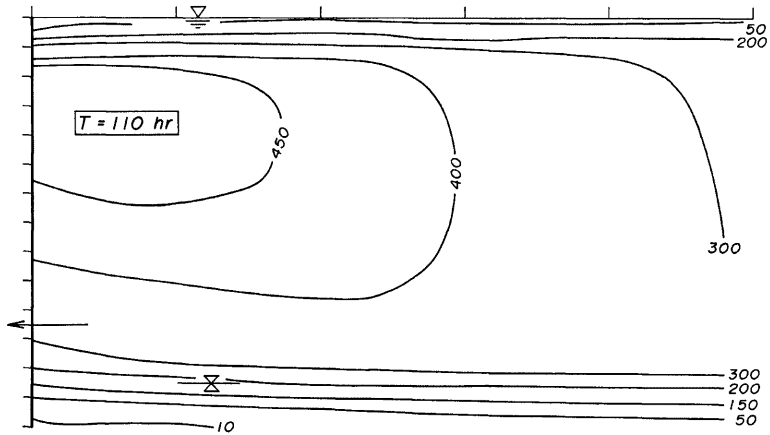


Fig. 11(b)

Fig. 11(a)~(e) には、時間の経過に伴う池内濃度分布の変形過程に関するシミュレーション結果が示されている。図中の数字は濃度で、曲線は等濃度線である。(a) 図は、洪水流入開始から24時間 ($T=24$ hr) 経過し、ゲート放流が行なわれている時点のもので、流出水は、まだ清浄な状態である。(b) 図は、 $T=110$ hr のもので、洪水ピークも過ぎ、かなり時間が経過し、流出水濃度がほぼ最大になっている時点のものである。池内における最大濃度の領域がまさに流出している状態が示されており、躍層領域も高濃度化しつつある。(c) 図は、 $T=260$ hr のもので、表層の高濃度部が流出し、躍層領域に高濃度部が雲状に広がっている状態である。この時点において、流出濃度は約 200 PPM に低下している。(d) 図は、 $T=360$ hr のもので、表層はかなり浄化され、流出濃度も 80 PPM 程度になっている。粒子沈降に基づく移流によって、高濃度領域が躍層下面まで低下している。(e) 図は、洪水流入開始から20日経過した時点のもので、表層はさらに浄化され、流出濃度も 50 PPM 以下になっている。また、最大濃度部は、躍層領域下方へ移動し

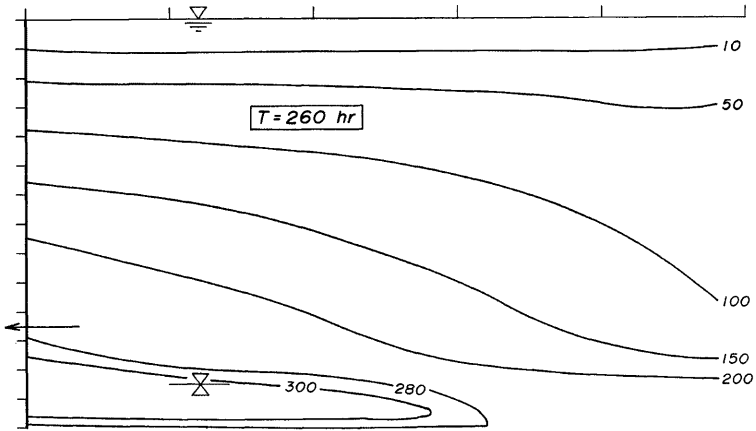


Fig. 11(c)

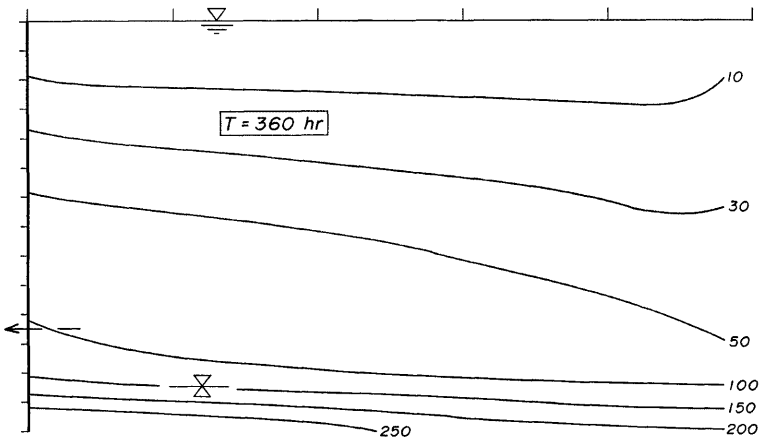


Fig. 11(d)

ている。

貯水池内における濃度分布に関して、観測値との比較はされていないが、上述のシミュレーションの結果は、実際の現象をよく表わしていることが推察される。

5. 結 言

以上、躍層のある場における濁度物質の挙動について、実験的考察および解析手法に関して考察するとともに、本解析手法を用いて水路実験ならびに実際の貯水池における濁度物質の挙動が解析された。得られた結果はつぎのようである。

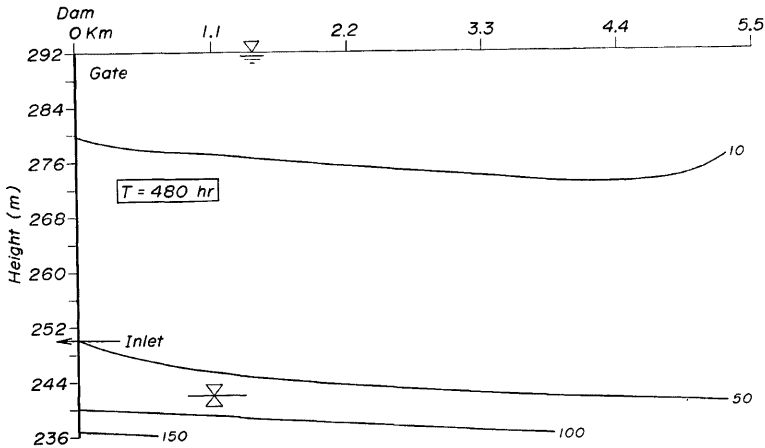


Fig. 11(e)

Fig. 11. Variation of turbid substance concentration in reservoir derived from computer simulation.

濁度物質の輸送機構に関して、粒子沈降および鉛直拡散による輸送を考慮する必要のある領域 ($0 \leq z \leq h_2$) と、粒子沈降による移流が卓越する領域 ($h_2 < z \leq H$) とがあることが明らかにされた。

実験的考察を足掛りとして、2次元的現象を対象とした濁度物質挙動の解析手法が提示され、基礎方程式ならびに境界条件などについて考察された。すなわち、わずかな界面こう配があれば、躍層近傍における流速の鉛直成分は省略できないことを示すとともに、著者らの先の研究に対して、新たな境界条件、すなわち、 $z=h_2$ において (10) 式が、 $x=L_D$ において (8) 式が導入され、有限な鉛直平面における解析手法が示された。

また、実際の貯水池において、2次躍層が存在しない貯水池上流部の領域を考慮する必要のあることを推察し、この領域における濁度物質の挙動を一次元移流分散方程式を用いて表示した。

さらに、濁動拡散係数の分布に関して若干の考察を行ない、適当な流速分布形を仮定して濁度物質の挙動が解析され、シミュレーションの結果と実測値とはほぼ同様の傾向を示し、解析手法の妥当性が示されるとともに、つぎのようなことが明らかにされた。

不等流の影響が無視できるような界面こう配でも、躍層近傍において流速の鉛直成分の影響を考慮すれば、より精度の高いシミュレーションができることが Exp. 6-3 の解析結果より示された。

流出濁水濃度の逓減部の機構は、濁水長期化現象を究明する際の重要な問題であるが、躍層領域の高濃度濁水が小さい移流成分で流出する現象であることが、実験や貯水池におけるシミュレーションの結果でも明らかにされた。

以上のように、興味ある結果が得られた。しかしながら、今後、流速分布や躍層の厚さなど究明すべき多くの問題が残されている。今後、これらの問題の究明に努めるとともに、拡散係数の分布に関してさらにもさらに考察を進め、貯水池における濁度物質挙動の普遍的な予測手法の確立に努める所存である。

また、本論では、躍層の低下過程に関する議論は割愛したが、実際の貯水池において、洪水後どのような位置に躍層が形成されるかは重要な問題であり、これに関しては、後日何らかの形で発表する予定である。本文中、ところどころで貯水池における実際の現象に基づいた考察がなされているが、観測結果ならびに詳しい解析結果についても、後日発表する予定である。

最後に、本研究は一部文部省科学研究費（代表者 足立昭平名古屋大学教授）の補助を受けたことを記し、関係各位に感謝いたします。また、実験および資料整理などで多大の労を煩わした京都大学防災研究所吉田義則技官に対して感謝します。

数値計算は、京都大学大型計算機を用いて行なったことを付記する。

参 考 文 献

- 1) たとえば、八畝 功・大谷守正：濁度が大きい貯水池の密度成層について、第30回年次学術講演会講演概要集第2部、土木学会、1975、pp. 459-460.
- 2) たとえば、足立昭平・中村俊六・石田竜夫：横山ダム貯水池における濁度特性、第30回年次学術講演会講演概要集第2部、土木学会、1975、pp. 316-317.
村本嘉雄・道上正規・藤田裕一郎：出水時における貯水池濁度の挙動について、第12回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集、1975 pp. 215-216.
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、1974、pp. 187-192.
- 3) 芦田和男・江頭進治：密度躍層のある場における濁水の挙動に関する研究(1)―躍層における拡散係数を中心として―、京都大学防災研究所年報、1975、pp. 495-512.
- 4) 芦田和男・江頭進治：非一様密度場における濁度物質の拡散と貯留機構、第20回水理講演会論文集、1976、pp. 173-178.
- 5) Keulegan, G.H. : Laminar Flow at the Interface of two Liquids, RP1591, N.B.S., Vol. 32, 1944, pp. 303-327.
- 6) Huber, W.C., D.R.F. Harleman and P.J. Ryan : Temperature Prediction in Stratified Reservoirs, Proc. ASCE, Vol. 98, No. HY4, April, 1972, pp. 645-666.
- 7) Markofsky, M. and D.R.F. Harleman : Prediction of Water Quality in Stratified Reservoirs, Proc. ASCE, Vol. 99, No. HY5, May, 1973, pp. 729-745.
- 8) 岩佐義朗・野口正人・児島 彰：貯水池内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.
- 9) 合田 健・海老瀬潜一：貯水池の流動と水質との関係について、第18回水理講演会講演集、1974、pp. 193-198.
- 10) 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、京都大学防災研究所年報、第17号B、1974、pp. 585-596.
- 11) 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1 発電専用貯水池の流動形態―、発電水力、No. 134, 1975, pp. 37-50.
- 12) Koh, R.C.Y. : Viscous Stratified Flow towards a Sink, J. Fluid Mech., Vol. 24, 1966. p. 555-575.
- 13) Webster, C.A.G. : An Experimental Study of Turbulence in a Density-Stratified Shear Flow, J. Fluid Mech., Vol. 19, 1963, pp. 221-245.
- 14) 岩佐義朗・松尾直規・遠藤正昭：ダム貯水池における水温予測、京都大学防災研究所年報、第19号B、1976、pp.
- 15) 水理公式集、昭和46年改訂版、土木学会編、第7編7章.