

密度躍層のある場における濁水の挙動に関する研究 (4)

—貯水池濁度の解析手法を中心として—

芦田 和男・江頭進治・古谷 健

STUDIES ON THE TURBID WATER FLOWS IN STRATIFIED RESERVOIRS (4)

—ANALIZING METHOD OF TURBIDITY IN RESERVOIRS—

By Kazuo ASHIDA, Shinji EGASHIRA, and Tsuyoshi FURUYA

Synopsis

The flow patterns in density stratified reservoirs are clarified. One of these patterns, which we call type I in this study, is as follows. In upstream side of the plunging point, there forms a flow in which the mixing action is large, then the current is transformed into a density underflow on bed, and then a middle layer flow is formed between the sub-thermocline forming near surface and the main one forming at the depth of intake work.

Considering these flow patterns, the numerical model is presented to analyze the turbidity distribution in reservoirs. Of course, the method comprises the profiles of velocity and diffusion coefficients developed by authors in each flow pattern.

The method is applied to the turbid water phenomena occurred at Kazaya reservoir and proved to be appropriate.

1. 緒 言

洪水流入に伴い懸濁物質を含む河川水が貯水池に長期間滞留することにより、濁水長期化現象が起り、環境問題や利水障害などが生じている。この問題が水工学の問題として取り上げられ約10年が経過し、その間、観測・調査、実験・理論的研究により濁水構造の理解が深められ、つぎのような濁度解析法が提案されてきた。

村本・道上・藤田¹⁾ (1974) は、混合の活発な貯水池を対象として、連続式を用いて Black Box 的に貯水池濁度を論じた。この場合、貯水池水と流入水とがよく混合し、近似的に濁度が貯水池全体にわたって一様であることが要求される。

安芸・白砂²⁾ (1975) は、Huber・Harleman・Ryan³⁾ (1972) が提案した水温などの水質分布に関する鉛直一次元解析法を濁度解析に適用し、妥当な結果を得た。その後、足立・中村^{4,5)} (1977, 1978) は、流入支川や濁度物質の粒度分布の問題について検討し、この手法を発展させた。しかし、この方法は、池水が水平方向に瞬間的に混合し、水平面内の分布が一様となることが要求されるため、流下区間が長くて、流下方向の濁度分布が問題になるような貯水池においては、適合性に乏しいように思われる。

芦田・江頭⁶⁾ (1976) は、こうした点に注目し、貯水池を鉛直混合の激しい上流域と、密度流的な扱いが必要な下流域に分割し、それぞれの領域に対して、一次元分散方程式および二次元拡散方程式を適用して貯水池濁度を論じた。これらの研究において、池水の運動学的条件、つまり流速分布として、Koh⁷⁾ (1966) な

どの取水理論が適用されるか、芦田・江頭の方法のように独自の研究成果が用いられてきた。しかし、流速分布も同時に解析しようとする試みもなされている。岩佐・野口・児島⁹⁾(1975)は、水温分布に関する二次元解析において、運動方程式を用いて流速分布も同時に解析した。その後、この方法は、岩佐・松尾・井上⁹⁾(1978)によって濁度解析にも適用されている。また、宮永・白砂¹⁰⁾(1977)は、流水の連続条件のみから流速分布を解析する試みを行った。

貯水池濁度解析法の代表的なものは、上述のようであるが、Box モデル、鉛直一次元モデルおよび二次元モデルなど、それぞれに特徴があり、貯水池の規模、水文・気象条件および運用条件などに応じて、これらの解析法を適当に選択すれば、現在、ある程度までは貯水池濁度を論ずることができる。

しかし、濁水問題に対して、撰択取水などによる対策を考える場合、池内の濁度分布や流出濁度を的確に予測する必要がある。そのためには、池内の流れの形態や輸送特性などに関する研究成果を解析法へ導入していく必要がある。こうした観点から、本報においては、2次躍層の低下過程、潜入点水深に関する知見ならびに流速分布や拡散係数に関する研究成果を、著者ら(1976)が先に提案した方法へ導入し、この方法の改良を試みる。

2. 濁度物質の輸送特性からみた貯水池の領域区分

2.1 貯水池濁度分布の一例

受熱期において規模の大きな貯水池では、一般に、表面近傍に水温躍層が形成され、取水口軸近傍にも強い水温躍層が形成される。そのため、池水の流動や輸送特性が鉛直方向に顕著に変化する。また、流下方向にも流れの形態が変化する。

Fig. 1 は、このような貯水池の典型的な例として、風屋貯水池で観測された1974年7月台風出水後の濁度分布を示したものである。この時、流出濁度はほぼ最大値を示し、流入濁度は 50 PPM 以下である。同図において、S-3、S-2 および S-1 断面は、それぞれ潜入点近傍、流入水が一次躍層と河床の間を流下する区間および一次躍層と二次躍層の間を流下する区間に対応している。Fig. 2 には、これらの断面における水温と濁度の鉛直分布が示されている。まず、流水断面の小さい S-3 についてみると、水温および濁度は表面に向かって若干上昇しているが、流入水と池水とはよく混合して一様に近い分布をなしている。S-2 断面では、一次躍層の領域で濁度が急激に低下し、水温こう配のない河床面と一次躍層間では、ほぼ一様な分布になっている。S-1 断面では、一次および二次躍層の領域で濁度は急激に変化し、これに挟まれた水温の変化が顕著でない領域では、ほぼ一様な分布形をなし、二次躍層より下方では、これによって濁質の拡散が抑制されるため、濁度はまだ上昇していない。

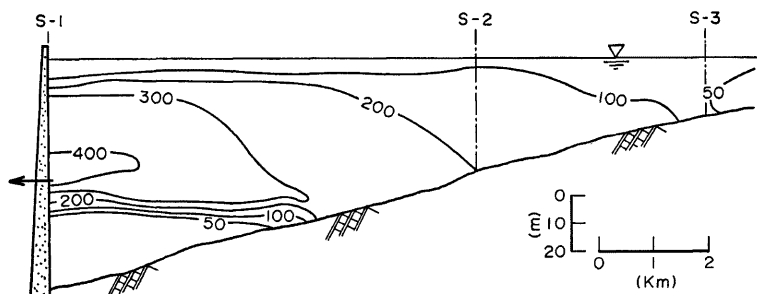


Fig. 1 Turbidity distribution after a flood in Kazaya Reservoir.

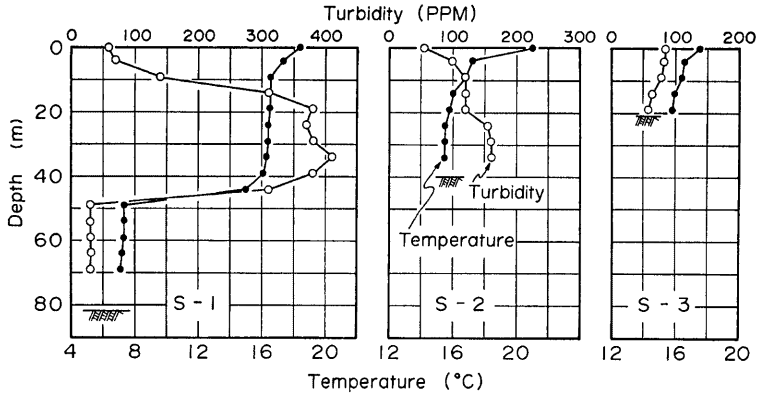


Fig. 2 The vertical profiles of temperature and turbidity at three sections shown in Fig. 1.

以上要するに、濁度分布は、流下方向へも顕著に変化し、鉛直方向へは、鉛直混合の指標となる水温分布に対応して、その分布形が定まることが明らかである。換言すると、輸送特性が、水温躍層の有無によって大きく変化することに対応している。

2. 2 流れの形態変化と領域圧分

Fig. 3 は水温成層化した貯水池における流れの形態変化を示したもので、流水断面積の小さい上流域では、流入水は池水とよく混合して流下し（拡散型）、流水断面の増加に伴い水面下に潜入り、下層密度流を形成する。さらに流下し、二次躍層に到達すると、中層密度流となって流下する。これは、二つの水温躍層が顕著に発達している場合の典型的な流れの形態変化であるが、表面近傍の躍層強度が弱い、流入量がかなり大きい場合は、拡散型の流れから直接上層密度流へ変化する。流入水が多量の濁質を含有するか、あるいは異常低温の場合は、底層水の密度より流入水のそれが大きくなり、下流端まで下層密度流として流下する。

このように、貯水池では流下方向に流れの形態が変化するが、これらはつぎのように分類できる。

type I : 拡散型	→	下層密度流	→	中層密度流
" II : 拡散型	→		→	上層密度流
" III : 拡散型	→	下層密度流	→	
	↓		↓	
	潜入点水深 (H_p)		二次躍層水深 (h_i)	

いま、貯水池水深を $H(x)$ とすると、type I は、 $H(x) < H_p$ で拡散型の流れ、 $H_p < H(x) < h_i$ で下層密度流、 $h_i < H(x)$ で中層密度流である。type II は、 $H(x) < h_i$ で拡散型、 $h_i < H(x)$ で上層密度流になる。type III は $H_p < H(x)$ で下層密度流になる。しかし、 $h_i < H(x)$ で下層密度流が形成されるには、流入水温 20°C 、底層水温 4°C として流入水の SS 濃度は約 3,000 重量 PPM 程度が要求され、池水との混合稀釈を考慮するとかなり大きな出水が必要である。

受熱期の貯水池における流れの形態変化は一般に、上述のように分類できる。洪水時、表面の水温躍層は破壊されやすい状態にあるが、洪水直後 2～3 日で回復するので、type I が最も一般的な形態変化であることが推察される。

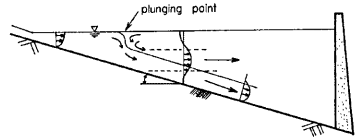


Fig. 3 Changes of the flow pattern in a stratified reservoir.

つぎに、流れの形態変化を規定する潜入点水深 (H_p) および二次躍層の位置 (h_i) の推定法について略述しよう。

著者¹¹⁾ (1978) らは、潜入点水深と下層密度流の層厚とは共役水深になることを導き、ついで下層流の層厚と水理量との関係を論じ、次のような実用式を提案した。

$$H_p = 0.362 q^{2/3} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho g i} \right)^{-1/3} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 q : 単位幅流量、 $\Delta \rho$: 貯水池表層水と流入水の密度差、 i : 河床こう配。中川¹²⁾ (1979) は、実験によって上式の妥当性を検証した。一方貯水池規模の現象に関して岩崎・三王¹³⁾ (1978) らおよび石橋・秋元¹⁴⁾ (1977) らの観測値と比較したのが Fig. 4 である。同図によると、(1) 式の算定値が若干大きく現われるが、実用的には十分であるように思われる。

躍層面の位置 h_i については、Huber らの鉛直一次元モデルを用いると平水時の解析はできる。しかし、この手法では、洪水期間中の位置を的確に予測することは困難である。そこで、著者¹⁵⁾¹⁶⁾ (1977) らは、先に、乱流連行による躍層の侵食低下過程を次式で考察した。

$$h_i(t) = \left(\frac{5K}{g} \int_0^t \frac{q^3}{\Delta \rho} dt + h_{i0} \right)^{1/5} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 h_{i0} : 初期躍層の水深、 $\Delta \rho$: 流入水と貯水池底層水の密度差、 K : 連行率に関連した実験定数、 $K=0.0015$ 。上式は、池源および風屋貯水池におけるいくつかの洪水に対する観測値により、その妥当性が検証されている¹⁵⁾¹⁶⁾。

以上のように、潜入点水深および躍層の位置が、それぞれ (1) 式および (2) 式を用いて推定でき、したがって、前述の流水の形態変化が合理的に把握できる。また、Fig. 1, 2 に示したように、流れの形態と濁質

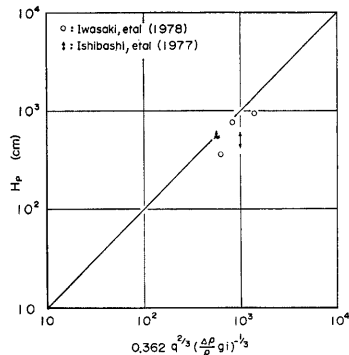


Fig. 4 The relation between predicted values and observed ones concerning the water depth of plunging point.

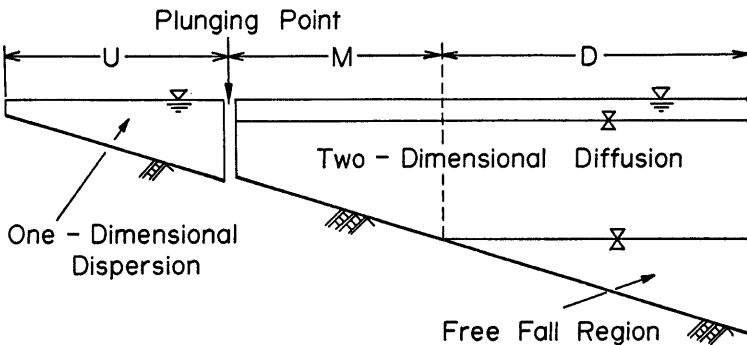


Fig. 5 Classification of the basic equations applied to the transport phenomena in a reservoir.

の輸送特性とは密接に関連しており、これらを総合して、濁質の輸送特性に注目した貯水池分割を行うと Fig. 5 のようである。領域 U は、潜入点より上流の拡散型の流れの領域で、濁質は断面内にはほぼ一様に分布する (Fig. 2, S-3)。領域 M は、下層密度流の領域であり、底面と一次躍層の間において濁質は一様に分布するが、表面近傍の水溫躍層によって濁質の鉛直輸送が著しく減少するため、表面近傍では濁度が急減する。領域 D は、中層密度流の領域で、躍層近傍での濁度分布は前者と同様であり、二つの躍層の水溫こう配の小さい領域では、ほぼ一様な濁度分布が形成される。また二次躍層下方は、一般に死水域となり顕著な流れは形成されない。したがって、この領域は、自由沈降領域であると見なしてよい。以上は type I の流れに関する領域区分であるが、type II に対しては、領域 M がなく、領域 U と領域 D に貯水池が分割されているものと考えることができる。

3. 解析モデル

3.1 基礎方程式と境界条件

(1) 基礎方程式

前章で考察したことから、濁質の輸送方程式として、領域 U では、移流分散方程式、領域 M および D では、二次元移流拡散方程式が用いられ、自由沈降領域では、単に鉛直一次元の移流方程式が適用される。これらは、それぞれ次式のようなものである。

領域 U ($H(x) < H_p$) :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{Q}{A} \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(AK_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

領域 M, D ($H_p < H(x)$) :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + (w + \omega_0) \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

自由沈降領域 :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \omega_0 \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 C : 領域 U の断面平均濃度、 Q : 流量、 K_x : 分散係数、 A : 流水断面積、 c : 濃度、 u, w : 流速の x, z 成分、 ω_0 : 濁質沈降速度、 ϵ_x, ϵ_z : 拡散係数の x, z 成分。なお、 x 軸は水面に、 z 軸はこれより鉛直下向きにとられている。

(2) 境界条件

各領域の長さを L_U, L_M および L_D として、まず、領域 U に対する (3) 式の境界条件について調べよう。上流端の流入濁度は、便宜的に流量の関数として、

$$C_i = f(Q), \quad (x=0) \quad \dots\dots\dots (6a)$$

のように表示できるものとする。しかし、流入濁質は広範な粒径からなっており、このうち大きな粒径成分は、流下過程において堆積し、濁水長期化には関与しない。風屋貯水池において、1974年7月出水を対象として、このような状況を検討したものが Fig. 6 および Fig. 7 に示されている。出水のピークは7日から8日にかけて発生しているため、Fig. 7 において、8日の放流水のものは他のものより粒径が大きくなっている。しかし、その後の、9日、10日のダムサイト水面 ($z=0$) および14日のダム湖中央の水深 34 m および 46 m の資料間には、顕著な差は見られず、90%程度が 10μ 以下の粒径からなっている。一方、Fig. 6 の流入水の粒度分布を見ると、 10μ 以下が60%程度で、これより大きな粒子もかなり存在するが、これらは、流下過程において大半が堆積するので、濁水長期化現象には関与しないものと思われる。したがって、濁質を単一粒径として扱う場合は、これらのことを考慮して、(6) 式を次のように書き換える必要がある。

$$C_i = F(D_c) f(Q), \quad (x=0) \quad \dots\dots\dots (6b)$$

ここに、 $F(D_c)$: 流入濁質のうち濁水長期化に関与する限界粒径以下の占める割合。

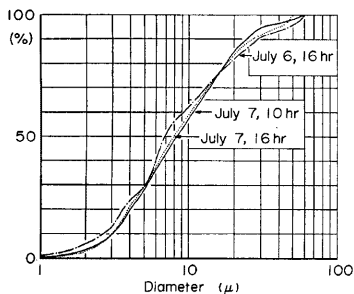


Fig. 6 Particle size accumulation curves of the turbid substances in inflow water at Kazaya reservoir.

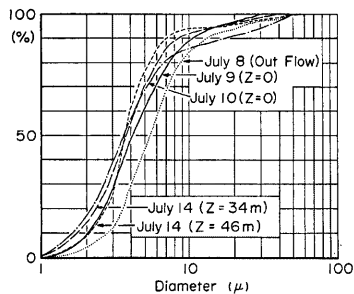


Fig. 7 Particle size accumulation curves of the turbid substances suspending in Kazaya reservoir.

下流端の境界については、領域 U から M への輸送は移流によるそれが卓越すると考えると、これは次の移流方程式で与えられる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{Q}{A} \frac{\partial C}{\partial x} = 0, \quad (x = L_U) \quad \dots\dots\dots (7)$$

領域 M および D に関する (4) 式の境界条件については、つぎのようである。この領域の上流端においては、濁度の連続条件から、領域 U の濁度を C_U として、

$$c = C_U(t, L_U), \quad (x = L_U, \quad 0 \leq z \leq H_p) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ダム地点では、表面近傍の躍層面の位置を h_{is} として、 $0 \leq z < h_{is}$ で反射の条件、 $h_{is} \leq z \leq h_i$ で移流方程式が適用されるものとする、次式で与えられる。

$$\frac{\partial c}{\partial x} = 0, \quad (x = L_U + L_M + L_D, \quad 0 \leq z < h_{is}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = 0, \quad (x = L_U + L_M + L_D, \quad h_{is} \leq z \leq h_i) \quad \dots\dots\dots (10)$$

なおダムクレストにおいて余水放流や表面取水が行われている場合は、 $0 \leq z \leq h_i$ で (10) 式が適用される。水表面においては、一般的に使用されている平衡状態の式、

$$\varepsilon_s \frac{\partial c}{\partial z} - \omega_0 c = 0, \quad (L_U \leq x \leq L_U + L_M + L_D, \quad z = 0) \quad \dots\dots\dots (11)$$

が適用される。領域 M の底面においては、堆積・浮上がないものとする、上式と同じ式が用いられる。

$$\varepsilon_s \frac{\partial c}{\partial z} - \omega_0 c = 0, \quad (L_U \leq x \leq L_U + L_M, \quad z = H(x)) \quad \dots\dots\dots (12)$$

領域 D の躍層の下端では自由沈降の条件が使えるものとする、

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \omega_0 \frac{\partial c}{\partial z} = 0, \quad (L_U + L_M \leq x \leq L_U + L_M + L_D, \quad z = h_i + \Delta h_i) \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 Δh_i : 二次躍層面と躍層下端までの厚さで、 $2 \cdot \Delta h_i$ は躍層の厚さに相当する。

自由沈降領域の輸送方程式に対する境界条件は、領域 D の濁度の連続条件から次式のように与えられる。

$$c = c_D(t, x, h_i + \Delta h_i), \quad (L_U + L_M \leq x \leq L_U + L_M + L_D, \quad z = h_i + \Delta h_i) \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 c_D : 領域 D の濁度。

以上、境界条件について述べたが、これらをまとめて Fig. 8 に示す。

3. 2 流速分布と拡散係数

流速分布に関する議論は著者¹⁷⁾¹⁸⁾ (1975, 1978) らによって十分なされており、拡散係数についても別の

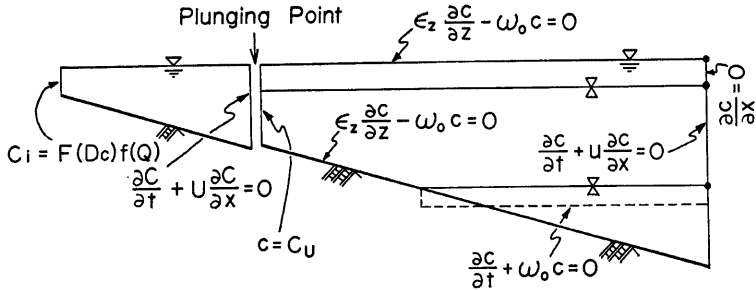


Fig. 8 Boundary conditions.

論文¹⁹⁾ (1979) で考察されている。したがってここでは、これらの結果のみについて述べる。

(1) 流速分布

まず、領域 M の下層密度流域に関して、水面から一次躍層面 h_{IS} では、次の 2 次曲線と与えられる。

$$u = \left\{ \frac{3}{2} \left(\frac{h_{IS}-z}{h_{IS}} \right)^2 - 3 \left(\frac{h_{IS}-z}{h_{IS}} \right) + 1 \right\} u_{IM}, \quad (0 \leq z < h_{IS}) \quad (15)$$

$z = h_{IS}$ から最大流速点 $z = d_m$ 間および、これから河床面間の流速は、それぞれ次式のようなである。

$$u = u_m - \frac{u_{*U}}{\kappa_U} \ln \frac{\beta_U + \kappa_U}{\beta_U + \kappa_U (z - h_{IS}) / (d_m - h_{IS})}, \quad (h_{IS} \leq z \leq d_m) \quad (16)$$

$$u = \left\{ A_r + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{H(x) - z}{k_s} \right\} u_{*b}, \quad (d_m < z \leq H(x)) \quad (17)$$

ここに、 u_{*U} ：躍層面のまきつ速度。 κ_U 、 κ ：カルマン定数で、 $\kappa = 0.4 \neq \kappa_U$ 。 β_U ：無次元混合距離。 A_r ：定数、 $A_r \approx 8.5$ 。 k_s ：相当粗度。 u_{*b} ：底面まきつ速度。 $H(x)$ ：貯水池水深、また、界面および河床面の抵抗係数をそれぞれ f_{IM} 、 f_b とすると、最大流速点 d_m は、

$$d_m = (f_{IM} H(x) + f_b h_{IS}) / (f_{IM} + f_b) \quad (18)$$

このようにして求められる d_m を (17) 式に代入すると、最大流速 u_m が求まり、(16) 式で $z = h_{IS}$ と置くと界面流速 u_{IM} がわかる。これらはそれぞれ、

$$u_m = \left\{ A_r + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{H(x) - d_m}{k_s} \right\} u_{*b} \quad (19)$$

$$u_{IM} = u_m - \frac{u_{*U}}{\kappa_U} \ln \frac{\beta_U + \kappa_U}{\beta_U} \quad (20)$$

つぎに、領域 D の中層密度流の流速分布について略述する。表面と一次躍層面間では、(15) 式と同様、2 次曲線、つぎのように与えられる。

$$u = \left\{ \frac{3}{2} \left(\frac{h_{IS}-z}{h_{IS}} \right)^2 - 3 \left(\frac{h_{IS}-z}{h_{IS}} \right) + 1 \right\} u_{ID}, \quad (0 \leq z < h_{IS}) \quad (21)$$

ここに、 u_{ID} ：一次躍層面の流速（後述）。主流域では無次元混合距離 β およびカルマン定数 κ を用いて、つぎのように示される。

$$u = u_{mD} + \frac{u_{*U}}{\kappa_U} \ln \frac{\beta_U + \kappa_U (z - h_{IS}) / (d_{mD} - h_{IS})}{\beta_U + \kappa_U}, \quad (h_{IS} \leq z < d_{mD}) \quad (22)$$

$$u = u_{mD} + \frac{u_{*L}}{\kappa_L} \ln \frac{\beta_L + \kappa_L (h_i - z) / (h_i - d_{mD})}{\beta_L + \kappa_L}, \quad (d_{mD} \leq z \leq h_i) \quad (23)$$

ここに、 u_{mD} ：最大流速、 u_{*U} 、 u_{*L} ：一次躍層面 $z = h_{IS}$ および二次躍層面 $z = h_i$ のまきつ速度、 d_{mD} ：最大流速点。いま、一次および二次躍層面の抵抗係数をそれぞれ f_{IU} 、 f_{IL} とし、せん断応力の直線性を仮定

すると, d_{mD} は次式のように求められる。

$$d_{mD} = (f_{iD} h_i + f_{iL} h_{iS}) / (f_{iU} + f_{iL}) \quad \dots\dots\dots (23)$$

また, 最大流速 u_{mD} は, (23) 式を用いて次式のように示される。

$$u_{mD} = \frac{q}{h_i - h_{iS}} + \frac{d_{mD} - h_{iS}}{h_i - h_{iS}} \frac{u_{*U}}{\kappa_U^2} \left(\kappa_U - \beta_U \ln \frac{\beta_U + \kappa_U}{\beta_U} \right) + \frac{h_i - d_{mD}}{h_i - h_{iS}} \frac{u_{*L}}{\kappa_L^2} \left(\kappa_L - \beta_L \ln \frac{\beta_L + \kappa_L}{\beta_L} \right) \quad \dots\dots\dots (24)$$

ここに q : 単位幅流量。(22) 式において $z = h_{iS}$ と置くと, (21) 式右辺の u_{iD} が次のように求められる。

$$u_{iD} = u_{mD} - \frac{u_{*U}}{\kappa_U} \ln \frac{\beta_U + \kappa_U}{\beta_U} \quad \dots\dots\dots (25)$$

なお, これらの分布形に対して重要な κ_i ($i=U, L$) および β_i ($i=U, L$) は, それぞれ次式で示されることが明らかにされている。

$$\kappa_i = \frac{2 \times 0.4}{1 + \sqrt{1 + 2 BK(U/u_{*i})^3}}, \quad (B=1, K=0.0015) \quad \dots\dots\dots (26)$$

$$\beta_i = 120(U/u_{*i})^{-3} \quad \dots\dots\dots (27)$$

ここに u_{*i} : 界面まきつ速度で, $i=U, L$ のとき, それぞれ一次および二次躍層面のまきつ速度に対応する。

以上が前章で示した type I の流れに関する流速分布形であるが, type II の流れに対しては, 領域 M が存在しないと見なし, (23) 式で $d_{mD} = 0$ と置けば流速分布形が求められる。

(2) 拡散係数

安定な密度成層場での拡散係数は中立状態のそれに比べて, 著しく減少することが知られている。まず, 領域Mについて, 自由表面から一次躍層面間の平均的な拡散係数は, 界面のそれで近似できるとすると,

$$\varepsilon_z = \gamma_2 (U/u_{*U})^{-4} q \frac{d_{mD} - h_{iS}}{H(x) - h_{iS}}, \quad (0 \leq z < h_{iS} + \Delta h_{iS}) \quad \dots\dots\dots (28)$$

界面から最大流速点間では,

$$\varepsilon_z = \left\{ \gamma_2 (U/u_{*U})^{-3} + \frac{1}{2} \kappa_U \right\} \left(\frac{U}{u_{*U}} \right)^{-1} q \frac{d_{mD} - h_{iS}}{H(x) - h_{iS}}, \quad (h_{iS} + \Delta h_{iS} \leq z \leq d_{mD}) \quad \dots\dots\dots (29)$$

最大流速点から河床面の間では,

$$\varepsilon_z = \frac{\kappa}{2} \left(\frac{U}{u_{*L}} \right)^{-1} q \frac{H(x) - d_{mD}}{H(x) - h_{iS}}, \quad (d_{mD} < z \leq H(x)) \quad \dots\dots\dots (30)$$

ここに, γ_2 : 実験定数, $\gamma_2 \approx 10$, κ_U : カルマン定数で (26) 式によって算定される。また, (30) 式の適用領域では密度こう配が, ほとんど無視できるので, $\kappa = 0.4$ と置ける。

つぎに, 領域 D の $0 \leq z < h_{iS}$ および $h_i < z \leq h_i + \Delta h_{iS}$ における拡散係数は, それぞれ次式のように与えられる。

$$\varepsilon_z = \gamma_2 (U/u_{*L})^{-4} q \frac{d_{mD} - h_{iS}}{h_i - h_{iS}}, \quad (0 \leq z < h_{iS}) \quad \dots\dots\dots (31)$$

$$\varepsilon_z = \gamma_2 (U/u_{*L})^{-4} q \frac{h_i - d_{mD}}{h_i - h_{iS}}, \quad (h_i < z \leq h_i + \Delta h_{iS}) \quad \dots\dots\dots (32)$$

また, これらの中間層の密度こう配がそれ程大きくない領域では, つぎのように与えられる。

$$\varepsilon_z = \left\{ \gamma_2 (U/u_{*U})^{-3} + \frac{1}{2} \kappa_U \right\} \left(\frac{U}{u_{*U}} \right)^{-1} q \frac{d_{mD} - h_{iS}}{h - h_{iS}}, \quad (h_{iS} \leq z < d_{mD}) \quad \dots\dots\dots (33)$$

$$\varepsilon_i = \left\{ \gamma_2 (U/u_{*L})^{-3} + \frac{1}{2} \kappa_L \right\} \left(\frac{U}{u_{*L}} \right)^{-1} q \frac{h_i - d_{mD}}{h_i - h_{iS}}, \quad (d_{mD} \leq z \leq h_i) \quad \dots\dots\dots (34)$$

ここに, κ_U, κ_L : カルマン定数で, (26) 式を用いて算定される。以上が type I の流れに対する拡散係

数であるが、type II に関しては、 $h_{is}=0$ 、 $d_{mD}=0$ において (32) 式および (34) 式を用いて推定される。

以上、貯水池濁度の解析モデルが示されたが、流入量と流出量が近似的に等しく、中層取・放水が行われている場合には、この方法が直接適用できる。しかし、上層および中層取・放水が同時に行われている場合、それぞれの流量に対応した流速や拡散係数を算定し、これらを独立に加算することによってこれらの分布形を推定する必要がある。

なお、流れの場を設定するには、 h_{is} 、 h_i に関する初期条件や、洪水後の水温分布を把握する必要がある。これに関しては、Huber・Harleman・Ryan (1972) の鉛直次元解析手法が用いられる。

4. 解析モデルの適用例

風屋貯水池における1974年7月、9月の二つの出水例について濁水解析を行い、観測値との比較から解析モデルの検討を行う。解析は、前述の各方程式を差分近似式に書き換えて行われたが、この際、格子間隔は、 $\Delta x=500$ m、 $\Delta z=2\sim 3$ m 程度にとられている。また風屋ダム貯水池は、流域面積 553 km²、総貯水容量 1 億 3 千万 m³ をもつ発電専用貯水池で、ダム頂部には洪水余水放流のためのクレストゲートが設けられ、ダム中段には最大取水能力 60 m³/s の取水管が取り付けられている。

4.1 流出濁度

Fig. 9 には7月出水、Fig. 10 には9月出水に対する流出濁度の計算値 C_{out} と実測値が比較され、流入量 Q 、 10μ 以上の濁質成分を除いた流入濁度 C_i ($F(D_c)=0.667$) も示されている。なお、濁質の平均粒径は、濁水調査資料²⁰⁾ (1976) を参考にして、 $D=4\mu$ ($\omega_0=0.00143$ cm/s、 $\nu=0.01$ cm²/s) が使われている。

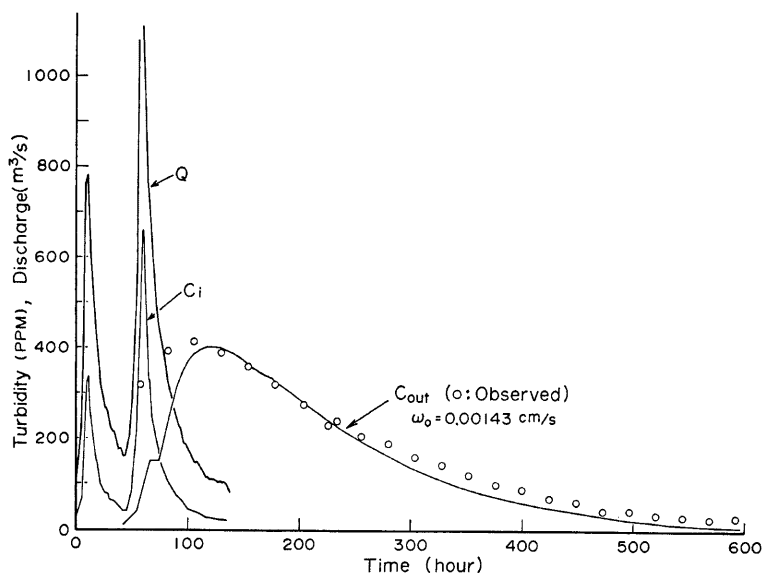


Fig. 9 The relation between predicted curve and observed values concerning the turbidity of the out-flow water. (The flood was occurred at the beginning of July in 1974).

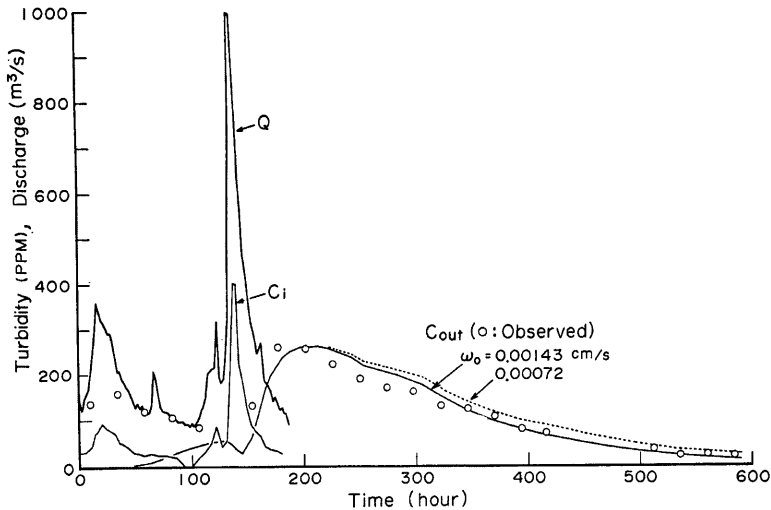


Fig. 10 The relation between predicted curve and observed values concerning the turbidity of the out-flow water. (The flood was occurred at the beginning of September in 1974).

図から明らかなように、流出濁度が最大値を示した後、計算値と実測値とはよく一致している。しかし、立上りの段階において、両者にはかなりの相違が見られる。これは、ダム近くへ流入する小支川や残流域からの流入水が、早い段階にダム地点に到達することや、貯水池濁度の初期条件の設定法に原因があるように思われる。後者の原因についてみると、7月出水直前の貯水池濁度は、二次躍層領域に最高 50 PPM 程度の雲状濁水塊があり、二つの躍層に挟まれた流動層では 10~20 PPM 程度で、9月出水前の8月8日の観測値では、躍層領域に 100 PPM 程度の濁水塊があり、流動層は 10~20 PPM 程度であった。一方、数値計算においては、初期条件は 0 とされている。したがって、初期条件に関する問題点は、これを正しく設定することにより除かれ、また、小支川や残留域からの流入水の条件を解析モデルに組み込めば、流出濁度の上昇期に関しても、かなりの確に予測できるであろう。しかし、濁水長期化現象は、ピーク後の通減特性が重要であることを考えると、通減部の流出濁度を予測できれば十分であるように思われる。

つぎに、流出濁度に及ぼす沈降速度の影響を検討しよう。濁質は Fig. 7 に示すように、かなり広範な粒径からなっており、これを単一粒径として扱う場合、何%粒径を代表径に選ぶか重要な問題である。Fig. 10 には、 $D=4\mu$ の計算値に加えて、 $D=2.8\mu$ ($\omega_0 \approx 0.00072$ cm/s) として算定される結果が示されている。流出濁度のピーク値およびその出現時は、 $D=4\mu$ の場合と同様であるが沈降速度が小さいため、濁度の通減部が、よりゆるやかになる。例えば、流出濁度が 50 PPM 以下になるのが前者より 3 日程度遅れる。

4. 2 貯水池内の濁度分布

7月出水に関して池内濁度分布の計算値が Fig. 11 および Fig. 13 に、実測値が Fig. 12 および Fig. 14 に示されている。Fig. 11 および Fig. 12 は、Fig. 9 に示す流出濁度が最大値を示す時点の池内濁度分布であり、両図を比較すると、400 PPM の高濃度濁水塊は、計算値ではかなり広い範囲に形成されていることがわかる。しかし、200 PPM や 300 PPM の等濁度線は、ほぼ一致しており、また、全体的な形状はかなりよく再現されているように思われる。Fig. 13 および Fig. 14 は流出濁度が減少し、約 200 PPM 程度を示す時点の分布形状である。流下方向の濁度こう配は、実測値に比べて計算値の方が若干大きく現われている。しか

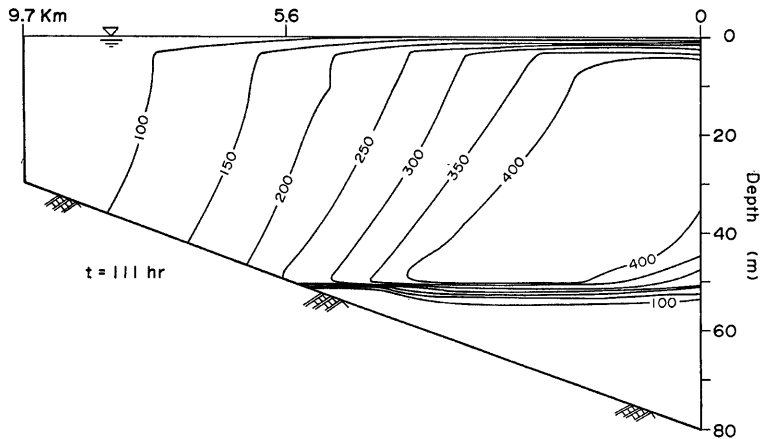


Fig. 11 Turbidity distribution predicted by the method concerning the flood shown in Fig. 9.

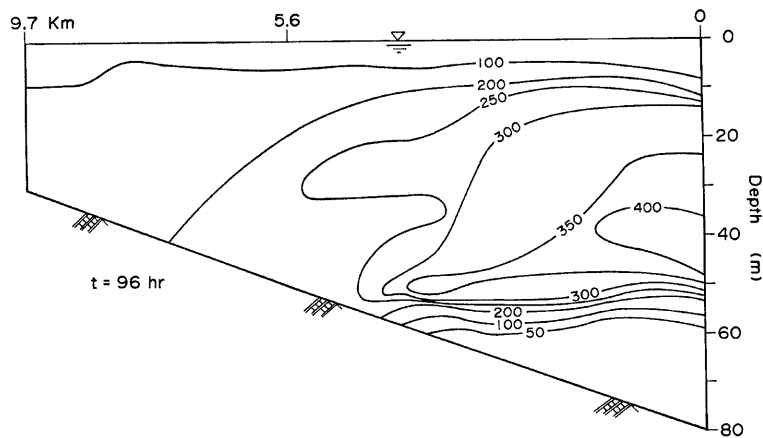


Fig. 12 Turbidity distribution measured concerning the flood shown in Fig. 9.

し、池内濁度分布の全体的な形状は、かなりよく再現されているものと思われる。

Fig. 15～Fig. 18 には、9月出水に対する計算値と実測値が示されている。**Fig. 15** と **Fig. 16** は、流出濁度が最大値を示す時点の分布形状で、**Fig. 17** と **Fig. 18** は通過部の池内濁度を比較したものである。この出水に関しても前者と同様の傾向が見られ、流れの場の設定、とくに躍層の厚さ $2 \cdot dh_s$ および $2 \cdot dh_i$ の推定法や拡散係数の推定精度等に若干の問題があるように思われる。また、100 PPM の等濁度線を目安に、計算値と実測値を比較すると、前者の方が深い位置に現われており、自由沈降領域では等濁度線が粒子沈降に伴って移動することから考えて、濁質粒径として若干大きなものが採用されていることが推察される。

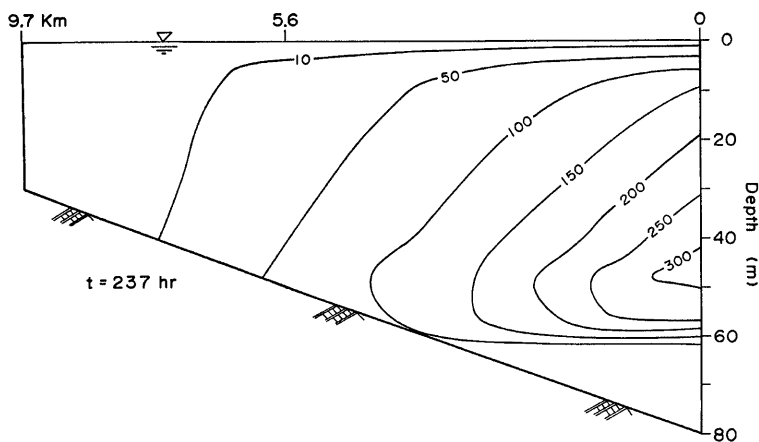


Fig. 13 Turbidity distribution predicted by the method concerning the flood shown in Fig. 9.

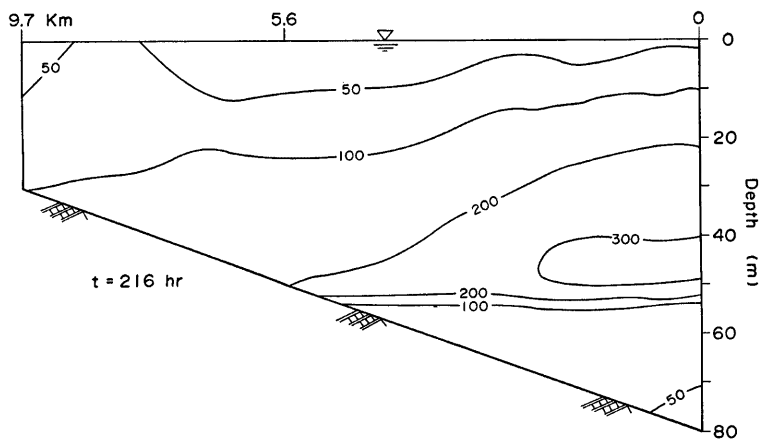


Fig. 14 Turbidity distribution measured concerning the flood shown in Fig. 9.

本章では、解析手法の適用例について述べたが、流出濁度に対しては、十分これを予測することが可能である。また、池内濁度に対しても、上述のような若干の問題点は残るが、全体的な池内濁度分布は推定できることが明らかである。

5. 結 語

著者らが先に提案した予測モデルに対し、水理学的な考察に基づいて重要な修正を加え、改良された予測モデルを提案した。さらに、これを用いて実際の濁質現象を解析した。本研究で得られた結果は次のよう

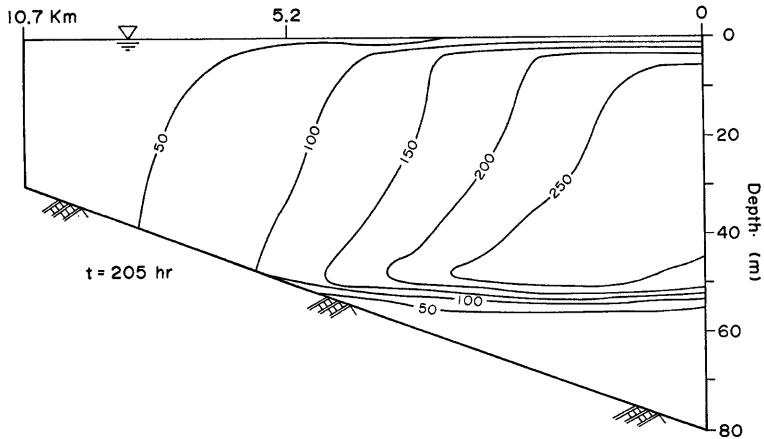


Fig. 15 Turbidity distribution predicted by the method concerning the flood shown in Fig. 10.

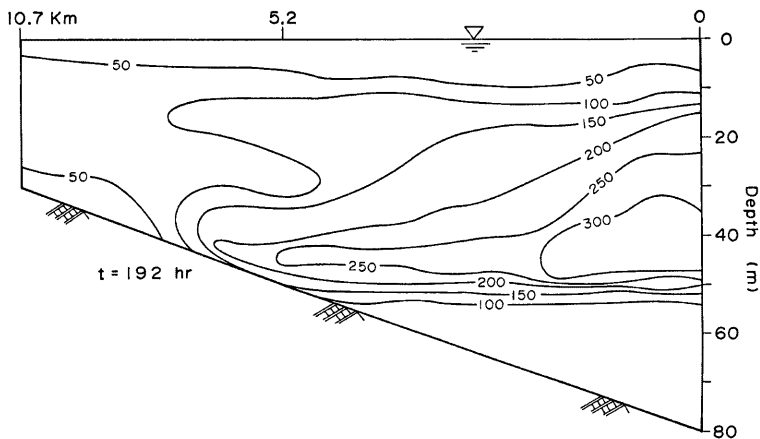


Fig. 16 Turbidity distribution measured concerning the flood shown in Fig. 10.

ある。

(1) 貯水池における水温および濁度の観測例や水理学的知見に基づき、貯水池における流れの形態変化について考察した。流れの形態変化は、潜入点を境に起り、これより上流は拡散型、下流側が密度流型の流れになる。

(2) 貯水池内の濁質の輸送特性は、流れの形態変化と密接な関連があり、潜入点より上流では、ほぼ一様分布になり、下流部では、特徴的な鉛直分布が形成される。

(3) 濁度解析のための貯水池分割に関して、先のモデル（1976）では、二次躍層面と河床との交点を境に、上流側が一次元、下流側が二次元領域に分割されていたのに対し、本モデルでは、(1) および (2) の結果

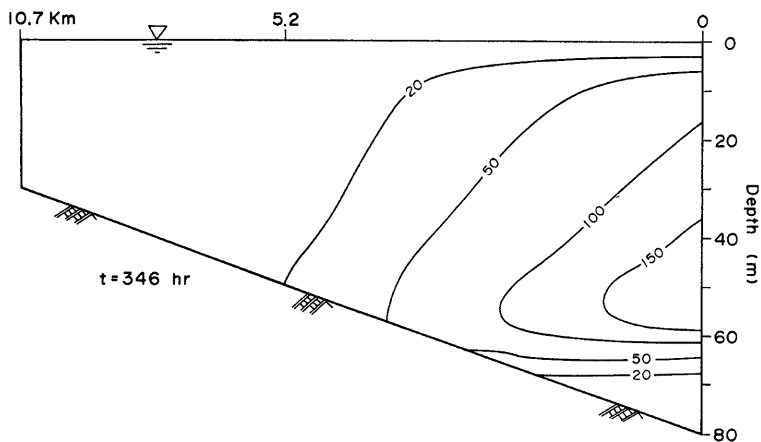


Fig. 17 Turbidity distribution predicted by the method concerning the flood shown in Fig. 10.

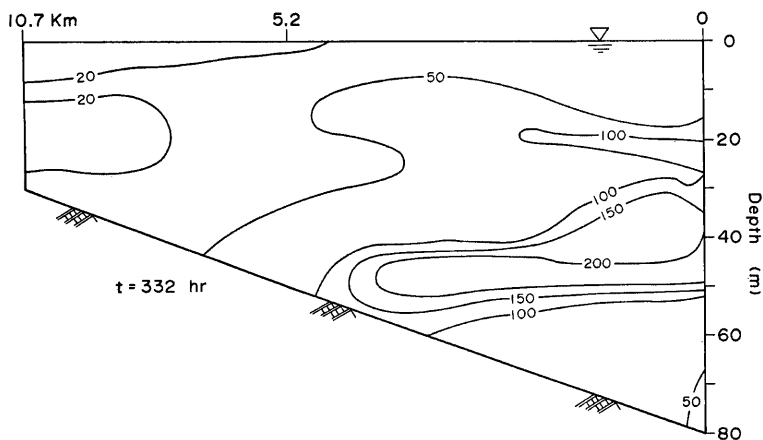


Fig. 18 Turbidity distribution measured concerning the flood shown in Fig. 10.

を総合することにより、潜水点水深より上流側を一次元領域 (U), 下流側を二次元領域とし、さらに二次元領域が下層密度流域 (M) および中層密度流域 (D) に分割された。さらに領域Mと領域Dの境界を定める二次躍層面の挙動が解析手法へ導入された。

(4) このように大幅に修正された解析モデルを用いて実際の貯水池濁水現象を解析した。先のモデルによると、流出濁度のピークが、著しく遅れる傾向²⁰⁾を示していたが、本モデルでは、この点が十分改良された。

(5) 貯水池内の濁度分布に関しても、全体的な分布形状は再現できることが明らかにされた。

(4) および (5) の結果を総合すると、ここで提案した貯水池濁度の解析法は、十分妥当なものであることが推察されるが、貯水池内の濁度分布をさらに的確に予測するには、躍層の厚さの推定法や拡散係数の分布などの問題点を究明する必要がある、また、濁度物質の粒度分布の影響等について考察する必要がある。さらに、この解析法を種々の貯水池、とくに、ダム地点における取・放流条件の複雑な貯水池へ適用するなど、より一般的な手法へ改良するには、流速分布などの設定法について考察を進めなければならない。

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。ここに記して感謝の意を表す。また、資料・図面作成などで助力いただいた京都大学防災研究所吉田義則技官に深謝する。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 安芸周一・白砂孝夫：貯水池の流動形態のシミュレーション解析，発電水力，No 134，1975，pp. 37～50.
- 3) Huber, W.C., D.R.F. Harleman and P.J. Ryan: Temperature Prediction in Stratified Reservoirs, Proc. ASCE, Vol. 98, HY4, 1972, pp. 645～666.
- 4) 足立和平・中村俊六：横山ダム貯水池における洪水時の濁水調査，第21回水理講演会論文集，1977，pp. 15～20.
- 5) 中村俊六・足立昭平：濁水化貯水池における濁質粒度の変動，土木学会論文報告集，279号，1978，pp. 61～68.
- 6) 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 (2)，京都大学防災研究所年報，第19号 B-2，1976，pp. 311～327.
- 7) Koh, R.C.Y.: Viscous Stratified Flow towards a Line Sink, J. Fluid Mech., Vol. 24, 1966, pp. 555～575.
- 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，18号 B，1975，pp. 565～574.
- 9) 岩佐義朗・松尾直規・井上素行：貯水池における濁度解析について，京都大学防災研究所年報，21号 B-2，1978，pp. 319～329.
- 10) 宮永洋一・白砂孝夫：貯水池内の濁度の二次元解析，土木学会，第32回年次学術講演会講演集-II，pp. 336～337.
- 11) 江頭進治・芦田和男：貯水池密度流の潜入点水深の推定，第15回災害科学シンポジウム，1978，pp. 481～482.
- 12) 中川 一：下層密度流に関する基礎的研究，京都大学卒業論文，1979，pp. 7～14.
- 13) 岩崎敏夫・三王英寿・阿部至雄・大杉 勉：貯水池における凝集性懸濁物質の挙動について，第22回水理講演会論文集，1978，pp. 113～118.
- 14) 石橋 毅・秋元 保・白砂孝夫他：成層型貯水池内の流れと熱収支の現地観測，第21回水理講演会論文集，1977，pp. 1～8.
- 15) 芦田和男・江頭進治：成層化した貯水池における濁度物質の挙動，第21回水理講演会論文集，1977，pp. 39～44.
- 16) Ashida, K. and S. Egashira: Hydraulic Characteristics of Thermocline in Reservoirs, 17th Cong. of IAHR, Vol. 2, 1977, pp. 33～40.

- 17) 芦田和男・江頭進治：泥水密度流に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，237号，1975，pp. 37～50.
- 18) 芦田和男・江頭進治：成層密度流の流速分布則に関する研究，京都大学防災研究所年報，21号 B-2，1978，pp. 455～465.
- 19) 江頭進治・芦田和男：成層密度流の流れの構造に関する研究，京都大学防災研究所年報，22号 B-2，1979，pp. 355～381.
- 20) 新宮川水系濁水調査委員会：新宮川水系濁水調査報告書，1976，pp. 76.