

濁質粒度が貯水池濁水現象に及ぼす影響について

EFFECT OF GRADINGS OF SUSPENDED MATERIALS ON
RESERVOIR TURBIDITY PROBLEM

宮 永 洋 一*・安 芸 周 一**

By Yoichi MIYANAGA and Shuichi AKI

要 旨：濁質粒度が貯水池濁水現象に及ぼす影響について、数値解析と模型実験により詳細な検討を加えた。

濁度の予測解析においては、流入濁質粒度の変動、分級による貯水池内の濁質粒度の変化および濁度係数の粒径依存性の3つが重要であることを指摘し、これらを考慮した「粒度分布モデル」を提案した。

実験は、模型貯水池内に水温成層をつくり、濁質としてカオリンを流入させ、水温、濁度、粒度を測定するという方法で行った。得られた結果を数値解析結果と比較し、粒度分布モデルの検証を行った。

1. ま え が き

濁水問題に関連した貯水池内の移流、拡散現象の研究が近年活発に行われている。これらの研究の成果として得られた水理学的知見に基づき、すでにいくつかの比較の実用性の高い数値解析モデルが提案されており、実際の貯水池に適用された例として、安芸・白砂(1974)¹⁾、芦田・江頭(1976)²⁾、岩佐ら(1978)³⁾などのモデルがある。

貯水池内の濁質の輸送は、基本的には移流、拡散、沈降によって行われ、各項目の見積りの正確さがモデルの予測精度を大きく左右するといつてよい。その意味では上述の各モデルとも完成されたものではなく、改良の余地を残している。ここでは沈降項の見積りについて、濁質の粒度分布との関係から従来のモデルの問題点を整理し、その改良の方向づけを行い、本研究の意図するところを明らかにしておく。

濁質の沈降速度を定数または単一粒径粒子の沈降速度として与える方法は、計算が簡単で濁質の平均的な沈降

状況を知るうえでは都合がよいためによく用いられるが、この方法には、以下に挙げるような濁水長期化の本質的要因を考慮できないという欠点がある。

① 洪水時の流入濁質粒度の変動

中村・足立⁴⁾、宮永ら⁵⁾の報告によれば、洪水時に貯水池に流入する濁質の粒度分布は時間的にかなりの変動を示している。したがって貯水池内の濁質の沈降はこの粒度変動の影響を受けるものと考えられる。

② 分級による貯水池内の濁質粒度の変化

粒径による沈降速度の違いにより貯水池内の濁質は分級される。すなわち、時間の経過とともに貯水池内に浮遊している濁質は細粒化され、沈降が遅くなるものと考えられる。

③ 濁度係数の粒径依存性

宮崎ら⁶⁾によれば、濁度係数(浮遊物質濃度/濁度)は粒径に依存し、実験的にほぼ粒径のべき乗に比例するとされている。すなわち、同一の濁質濃度^{注1)}であっても、粒径が細かいほど濁度は高く測定されることになる。河川における現地観測では濁度と濁質濃度に比較的良好な相関がみられるため、従来のモデルにおいては両者が実質的に同じものとして扱われてきたが、実際の貯水池では②に述べた分級効果があるため、両者の関係は時間的に変化するものとみななければならない。このことは重要な意味をもつ。すなわち、従来の濁度の数値解析モデルの開発において行われていたような、濁質濃度の計算値と濁度計による実測値との直接の比較が、必ずしも適当ではないということになるのである。

中村・足立は横山貯水池における観測結果を検討し、濁質の滞留時間の短い中・小規模の貯水池では、①の影響が重要であるとして安芸・白砂のモデルに改良を加える方法を提案している。

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所 土木技術研究所 研究担当

** 正会員 工博 (財)電力中央研究所 土木技術研究所 副所長

注 1) 濁度の原因となる物質の濃度という意味でこの語を用いる。溶液の着色の影響がなければ、浮遊物質濃度と濁質濃度とは同じものとみなしてよい。

岩佐らのモデルでは②の影響も若干考察されているが、解析上の考慮としてはやや不十分である。また③の影響についてはまったく考慮されていない。

本研究は以上の点を踏まえ、従来の貯水池濁水現象の研究において十分な検討がなされているとはいえない①、②の影響、さらにまったく考慮されていなかった③の影響について、数値解析と模型実験により詳細な検討を加え、その重要性を明らかにしたものである。

2. 濁度と濁質濃度の関係

濁度にはいくつかの定義がある⁷⁾が、ここではカオリンの懸濁液を標準液として較正された光学式濁度計による測定値を指すものとする^{注2)}。光学式濁度計にも散乱光式、透過光式、積分球式などの種類があり、それぞれ、試料に入射光 I_0 をあてたときの散乱光強度 I_s 、透過光強度 I_t 、両者の比 I_s/I_t が標準液濃度に対して良好な相関を示すという測定原理に基づいている。この測定原理から明らかなように、いずれの濁度計を用いた場合でも、測定値は試料の粒径の影響を受け、必ずしも濁質濃度と一意的に対応するわけではない。

この点について宮崎ら⁸⁾は、港湾における現地汚泥および人造研磨材を用いた詳細な実験的検討の結果、次の関係式を得ている。

$$\tau = \frac{C}{T_b} = Kd^m \dots\dots\dots(1)$$

ここに、

- τ : 濁度係数
- C : 浮遊物質濃度
- T_b : 濁度
- d : 粒径

であり、 K, m は濁質および濁度計の種類によって異なる定数である。

式(1)の理論的根拠を簡単に考察してみる。試料を入れたセルの厚さ(光路長)を Z とすると透過光強度は次式で与えられる。

$$I_t = I_0 e^{-(\alpha_w + \alpha_a + \alpha_s)Z} \dots\dots\dots(2)$$

ここに、

- α_w : 水による吸収係数
- α_a : 粒子による吸収係数
- α_s : 粒子による散乱係数

散乱光強度については集光範囲にもよるが、平均的に散乱による減衰量に比例するものとするれば、

$$I_s \propto I_0 e^{-(\alpha_w + \alpha_a)Z} (1 - e^{-\alpha_s Z}) \dots\dots\dots(3)$$

となる。光路長が十分短ければ、 $e^{-\alpha Z} \approx 1 - \alpha Z$ とおい

て αZ の高次の項を無視すると、式(2)、(3)より近似的に、

$$I_s/I_0 \propto \alpha_s \dots\dots\dots(4)$$

$$(1 - I_t/I_0) \propto (\alpha_w + \alpha_a + \alpha_s) \dots\dots\dots(5)$$

$$I_s/I_t \propto \alpha_s \dots\dots\dots(6)$$

を得る。式(4)~(6)は、それぞれ散乱光式、透過光式、積分球式の濁度計出力と吸収、散乱係数との関係を表わしている。日野・歌原⁹⁾によれば、 α_a, α_s は理論的に次式で与えられる。

$$\alpha_a = \frac{3}{2} \cdot \frac{C}{\rho_s d} \dots\dots\dots(7)$$

$$\alpha_s = \frac{3}{2} K_m \frac{C}{\rho_s d} \dots\dots\dots(8)$$

ここに、

- ρ_s : 濁質の密度
- K_m : Mie の係数、屈折率と粒径/入射光波長の関数⁹⁾

水による吸収の影響は、補正されるものとし、また、 K_m についても入射光波長(約 0.5 μ) の数倍程度以上の粒径範囲ではほぼ定数とみなすものとするれば、式(7)、(8)よりいずれの測定原理の場合も、

$$\tau \propto d \dots\dots\dots(9)$$

すなわち、濁度係数が粒径に比例することがわかる。これは式(1)で $m=1$ の場合に相当する。宮崎らによれば、 m の値は試料や測定原理によって異なるようであるが、ほぼ1前後をとっている。したがって、式(1)は単なる経験式ではなく、物理的な根拠をもつものである。

本研究の実験に用いたカオリン(比重 2.69)について、 K, m の測定を行った。方法は以下のとおりである。

① 粒径の調整

カオリンの懸濁液を一様に攪拌して一定時間静置後、表面から一定の水深以内に浮遊しているものとそうでないものを分離する。この操作を繰り返して Fig. 1 に示すような5種類の粒度分布に調整した。

② 粒度分布の測定

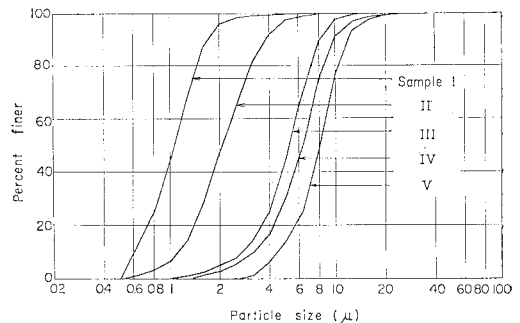


Fig. 1 Particle size distribution curves for kaoline used in measurement of turbidity-suspended solids relations.

注 2) 濁度の単位は「度」で表すものと定義されているが、本論文では「ppm」を用いる。

自動粒度分布測定装置（コーンター・カウンター）を用いた。アパーチャー・チューブは試料 I, II に対して口径 30μ （測定範囲 $0.6 \sim 12 \mu$ ），試料 III, IV, V に対して口径 100μ （測定範囲 $2 \sim 40 \mu$ ）のものを使用した。

③ 濁度の測定

積分球式濁度計（測定範囲 $0 \sim 500 \text{ ppm}$ ）を用いた。

④ 浮遊物質濃度の測定

各試料の約 200 ml を 0.45μ の沓紙を用いて沓過し、 110°C で 2 時間乾燥後、デシケータ内で冷却し、秤量した。

測定結果を Table 1, Fig. 2 に示す。カオリンの場合についても試料 I を除いて式 (1) の関係が成立し、最小自乗曲線として $K=0.41$, $m=0.66$ （粒度の単位は μ とする）を得た。

Table 1 Data of turbidity-suspended solids relations for kaoline.

Sample No.	I	II	III	IV	V
Median diameter $d_{50}(\mu)$	1.07	2.08	5.29	6.34	7.98
Turbidity $T_b(\text{ppm})$	100	255	230	310	180
Suspended solids $C(\text{ppm})$	72.8	152.4	248.7	465.9	323.4
Turbidity factor $\tau=C/T_b$	0.728	0.598	1.08	1.50	1.80

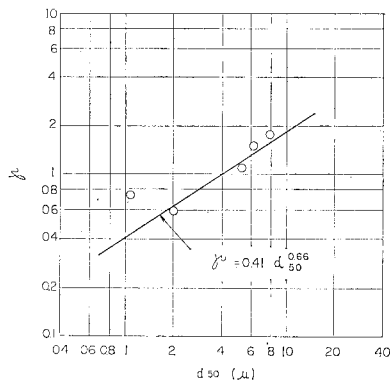


Fig. 2 Turbidity factor-median diameter relations for kaoline.

3. 粒度分布を考慮した貯水池内濁度の数値解析モデル

(1) モデルの概要

これまでに述べたような濁質粒度の貯水池濁水現象への影響を従来のモデルに導入することは、かなり本質的なモデルの改良につながるものと思われる。改良方法の概要を示せば以下のとおりである。

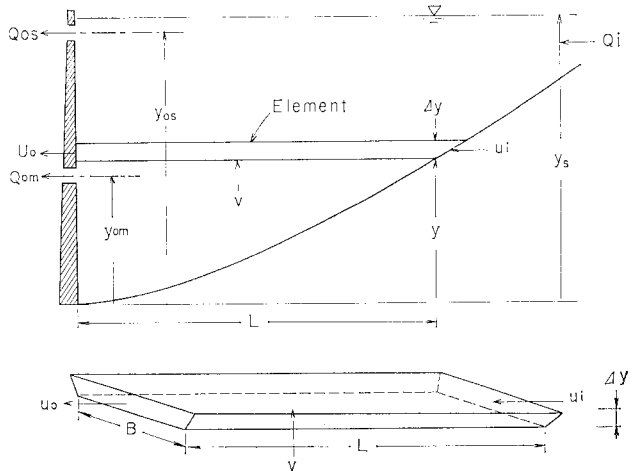


Fig. 3 Reservoir and control volume.

- i) 水温分布・流れの計算は、従来のモデルと同様とする。
- ii) 濁質濃度分布の計算は、沈降項の見積りを除いて従来のモデルと同様とする。
- iii) 濁質はいくつかの離散的な粒径をもつ成分からなるものとし、全体としての濁質の沈降速度は個々の成分の沈降速度の重み付き平均で与えられるものとする。
- iv) 濁質粒度の場所的、時間的変化は、個々の粒径成分別の連続条件によって計算する。
- v) 式 (1) の関係を用いて濁質濃度より濁度を計算する。

本研究では上述の改良を加えたモデルを「粒度分布モデル」とよび、従来のモデル（たとえば、一様粒径として計算しているものは「一様粒径モデル」とよぶこと）と区別しておく。

(2) 計算方法

以下、安芸・白砂のモデルを基礎とする粒度分布モデルの計算方法を示す。他のモデルを基礎とした場合でも基本的には同様である。

a) 基礎方程式

Fig. 3 のように座標系をとる。基礎方程式は次の 4 式である。

① 流量の連続式

$$\frac{\partial Av}{\partial y} = B(u_i - u_0) \dots\dots\dots(10)$$

ここに、

$A(y)$: 貯水池水面積

$B(y)$: 貯水池平均幅

$v(y, t)$: 鉛直流速

$u_i(y, t)$: 水平流入流速

$u_0(y, t)$: 水平流出流速

② 熱量の連続式

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{(\alpha_T + D_T)}{A} \frac{\partial}{\partial y} \left(A \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{1}{\rho c A} \frac{\partial A \phi}{\partial y} - \frac{1}{A} \frac{\partial A v T}{\partial y} + \frac{B}{A} (u_i T_i - u_0 T) \dots\dots(11)$$

ここに、

- $T(y, t)$: 水温
- $T_i(y, t)$: 流入水温
- $\phi(y, t)$: 輻射熱量
- α_T, D_T : 熱に関する分子, 渦動拡散係数
- ρ, c : 水の密度, 比熱

③ 粒径別の濁質の連続式

$$\frac{\partial C f}{\partial t} = \frac{(\alpha_C + D_C)}{A} \frac{\partial}{\partial y} \left(A \frac{\partial C f}{\partial y} \right) - \frac{1}{A} \frac{\partial A v C f}{\partial y} + \frac{\partial w_0 C f}{\partial y} + \frac{B}{A} (u_i C_i f_i - u_0 C f) \dots\dots(12)$$

ここに、

- $C(y, t)$: 濁質濃度
- $C_i(y, t)$: 流入濁質濃度
- $f(d, y, t) dd$: 濁質粒度 $\left(\int_0^\infty f dd = 1 \right)$
- $f_i(d, y, t) dd$: 流入濁質粒度
- $w_0(d, y, t)$: 濁質沈降速度
- α_C, D_C : 物質に関する分子, 渦動拡散係数

④ 濁度と濁質濃度の関係

$$T_b = \frac{1}{K} \int_0^\infty C f d^{-m} dd \dots\dots(13)$$

ここに、

- $T_b(y, t)$: 濁度
- K, m : 定数

b) 境界条件

境界条件は次のように与える.

① 流速に関する境界条件

$$v = 0, (y = 0) \dots\dots(14)$$

$$u_i = Q_i F \{ (y - y_i) / \delta_i \} \dots\dots(15)$$

$$u_0 = Q_0 F \{ (y - y_0) / \delta_0 \} \dots\dots(16)$$

ここに、

- $Q_i(t)$: 流入量
- $Q_0(t)$: 流出量
- $\delta_i(t)$: 流入による流動層厚さ
- $\delta_0(t)$: 流出による流動層厚さ
- $y_i(t)$: 流入水の中心高さ
- $y_0(t)$: 流出水の中心高さ

F は次のような関数である.

$$F(\eta) = \begin{cases} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\eta}{3.92} \right)^2} / \int_{-1/2}^{1/2} B e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x_i}{3.92} \right)^2} d\eta_1 & \left(|\eta| \leq \frac{1}{2} \right) \\ 0 & \left(|\eta| > \frac{1}{2} \right) \end{cases} \dots\dots(17)$$

δ_i, δ_0 を次式で与える.

$$\delta_i = F_i^{-1/2} \left(\frac{Q_i}{B_i \sqrt{\epsilon_i g}} \right)^{1/2} \dots\dots(18)$$

$$\delta_0 = G^{-1/3} \left(\frac{Q_0}{\theta \sqrt{\epsilon_0 g}} \right)^{1/3} \dots\dots(19)$$

ここに、

- F_i : 2次元流入流の内部フルード数
- G : 軸対称流出流の内部フルード数
- B_i : 流入部貯水池幅
- θ : 流出口開口角度
- ϵ_i : 流入部密度勾配 $\left(-\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dy} \right)$
- ϵ_0 : 流出部密度勾配
- g : 重力加速度

F_i の値は経験的に 0.25, G の値は白砂¹⁰⁾の実験結果に基づき表層, 底層取水条件では 0.324, 中層取水条件では 0.134 をそれぞれ与える.

連行を考慮する場合には, 式 (18) で流量を $(1+r)Q_i$ に置き換え (r : 連行係数), また式 (11), (12) の流入水温, 濁質濃度を連行層と混合させた値に置き換える. 連行層は rQ_i の流量で上流端で表層取水を行ったときの流れと同様とみなして式 (19) で計算する.

② 水温に関する境界条件

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0, (y = 0) \dots\dots(20)$$

$$\begin{aligned} & \frac{(\alpha_T + D_T)}{A} \frac{\partial}{\partial y} \left(A \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ & = -\frac{1}{\rho c} (\beta \phi_0 + \phi_a - \phi_e - \phi_c - \phi_{rw}), (y = y_s) \end{aligned} \dots\dots(21)$$

ここに、

- β : 水面における日射の吸収率
- $\phi_0(t)$: 水面に達する日射量 (反射を除いたもの)
- $\phi_a(t)$: 大気輻射量
- $\phi_e(t)$: 蒸発熱量
- $\phi_c(t)$: 伝導熱量
- $\phi_{rw}(t)$: 逆輻射量

野外および実験室内における $\phi_a, \phi_e, \phi_c, \phi_{rw}$ の見積りについては Ryan & Harleman¹¹⁾ の報告に詳述されているので省略する.

③ 濁質濃度および粒度に関する境界条件

$$\frac{\partial C f}{\partial y} = 0, (y = 0, y_s) \dots\dots(22)$$

c) 差分計算式

基礎方程式 (10)~(13) および式 (12) を粒径の全範囲について積分した式を差分化することにより, 鉛直流速, 水温, 濁質濃度, 濁度の計算式が得られる. 要素内の値には j , 要素境界の値には $j, j+1$ などの添字を付けて表すものとすれば以下のとおりである.

① 鉛直流速

$$v_{j,j+1} = \frac{A_{j-1,j} v_{j-1,j} + B_j dy (u_{ij} - u_{0j})}{A_{j,j+1}} \dots \dots \dots (23)$$

$$\begin{aligned} & - A_{j-1,j} v_{j-1,j} C_{Y'}^t f_{Y'n}^t \frac{dt}{dy} \\ & - \frac{1}{C_{j'}^{t+dt}} (w_{0j+1,n} C_{j+1}^t - w_{0j,n} C_j^t f_{jn}^t) \frac{dt}{dy} \\ & + \frac{B_j}{A_j C_{j'}^{t+dt}} (u_{ij} C_i^t f_{in}^t - u_{0j} C_j^t f_{jn}^t) dt \end{aligned} \dots \dots \dots (27)$$

② 水温

$$\begin{aligned} T_j^{t+dt} = T_j^t & + \frac{(a_T + D_T)}{A_j} \{A_{j,j+1} (T_{j+1}^t - T_j^t) \\ & - A_{j-1,j} (T_j^t - T_{j-1}^t)\} \frac{dt}{dy^2} \\ & - \frac{1}{\rho c A_j} (A_{j,j+1} \phi_{j,j+1} - A_{j-1,j} \phi_{j-1,j}) \frac{dt}{dy} \\ & - \frac{1}{A_j} (A_{j,j+1} v_{j,j+1} T_X^t \\ & - A_{j-1,j} v_{j-1,j} T_X^t) \frac{dt}{dy} \\ & + \frac{B_j}{A_j} (u_{ij} T_i^t - u_{0j} T_j^t) dt \dots \dots \dots (24) \end{aligned}$$

ここに、右辺第4項の水温の添字 (X, X') はその水の輸送速度が正のとき (j, j-1), 負のとき (j+1, j) をとるものとする。

③ 濁質濃度

$$\begin{aligned} C_j^{t+dt} = C_j^t & + \frac{(a_C + D_C)}{A_j} \{A_{j,j+1} (C_{j+1}^t - C_j^t) \\ & - A_{j-1,j} (C_j^t - C_{j-1}^t)\} \frac{dt}{dy^2} \\ & - \frac{1}{A_j} (A_{j,j+1} v_{j,j+1} C_Y^t \\ & - A_{j-1,j} v_{j-1,j} C_Y^t) \frac{dt}{dy} \\ & - (\bar{w}_{0j+1} C_{j+1}^t - \bar{w}_{0j} C_j^t) \frac{dt}{dy} \\ & + \frac{B_j}{A_j} (u_{ij} C_i^t - u_{0j} C_j^t) dt \dots \dots \dots (25) \end{aligned}$$

ここに、右辺第3項の濁質濃度の添字 (Y, Y') はその濁質の輸送速度が正のとき (j, j-1), 負のとき (j+1, j) をとるものとする。また第4項の \bar{w}_0 は次式で計算される平均沈降速度である。

$$\bar{w}_0 = \int_0^\infty w_0(d, y, t) f(d, y, t) dd \dots \dots \dots (26)$$

④ 粒度

粒径を離散化して $d_n (n=1, 2, \dots, N)$ とし、各粒径成分の粒度を f_{jn}^t と書くものとするれば次式を得る。

$$\begin{aligned} f_{jn}^{t+dt} = \frac{C_j^t}{C_{j'}^{t+dt}} f_{jn}^t & + \frac{(a_C + D_C)}{A_j C_{j'}^{t+dt}} \{A_{j,j+1} (C_{j+1}^t f_{j+1,n}^t - C_j^t f_{jn}^t) \\ & - A_{j-1,j} (C_j^t f_{jn}^t - C_{j-1}^t f_{j-1,n}^t)\} \frac{dt}{dy^2} \\ & - \frac{1}{A_j C_{j'}^{t+dt}} (A_{j,j+1} v_{j,j+1} C_Y^t f_{Yn}^t \end{aligned}$$

ここに、右辺第3項の粒度の添字 (Y, Y') は濁質濃度の添字と同様に定義される。

⑤ 時間差分 dt の決定

時間差分 dt は、計算の安定条件を満足するものとして次の条件式により決定する。

$$dt = \text{Min} \left(\frac{dy^2}{2 D_T}, \frac{dy^2}{2 D_C}, \frac{dy}{V_{\max}}, \frac{dy}{W_{0\max}}, dt_0 \right) \dots \dots \dots (28)$$

ここに、

V_{\max} : 鉛直流速の絶対値の最大値

$W_{0\max}$: 沈降速度の最大値

dt_0 : 入力データの時間差分

$\text{Min}(\dots)$: 最小値を意味する記号

d) 流出濁度の時間遅れの考慮

濁水が貯水池に流入してから、下流端より流出を始めるまでには時間遅れが存在する。この時間遅れを正確に見積るためには、流下方向の密度勾配に基づく濁水塊の運動を解析しなければならないが、ここでは1次元モデルに対する補正という程度の意味で次のように時間遅れの影響を考慮するものとする。

i) 濁水が貯水池に流入してから水平方向の平均的移動距離 $l(t)$ を次式で計算する。

$$l = \sum_{i>t_i} u_{i\max} dt \dots \dots \dots (29)$$

ここに、

t_i : 濁水流入開始時刻

$u_{i\max}$: 最大水平流入流速

ii) 濁質濃度、粒度の計算式 (25), (27) 中の水平移流項における C_j^t, f_{jn}^t を、 $l < L$ (貯水池長) の期間中はそれぞれ $C_j^{t_i}, f_{jn}^{t_i}$ とおいて計算する。 $l \geq L$ となつてからは元の計算式に戻る。

4. 模型実験によるモデルの検証

(1) 実験目的と方法

粒度分布モデルにより、実際の複雑な濁水現象の予測精度がどの程度向上し得るかを検証するため、大型の貯水池模型を用いて実験を行った。現地観測との比較も重要であるが、その前の段階として、入力条件を制御でき、かつ詳細で精度の高い測定が可能な模型実験により、モデルの多面的な評価を行ったものである。したがって、

模型実験と実際現象との違い、たとえば内部フルード数の相似則によった場合、レイノルズ相似が成り立たないために模型実験では乱れの沈降に及ぼす影響が実際現象と異なることなど、は別の問題と考えている注3)。

実験設備を Photo 1, Fig. 4 に示す。模型水槽は、実際の貯水池を、流れ方向の軸を含む面に対称な形状に単純化し、対称面について2等分したものを想定しており、長さ 36 m、高さ 1 m、水路底幅 0.6 m、勾配 0.023 という比較的大型のものである。側壁の一方は勾配 45° の斜面とし、外側を断熱材で覆っており、他方はガラス張りにして流れを観測できるようになっている。水槽内

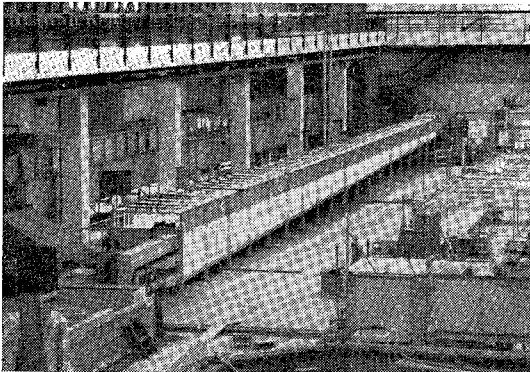


Photo 1 Reservoir model.

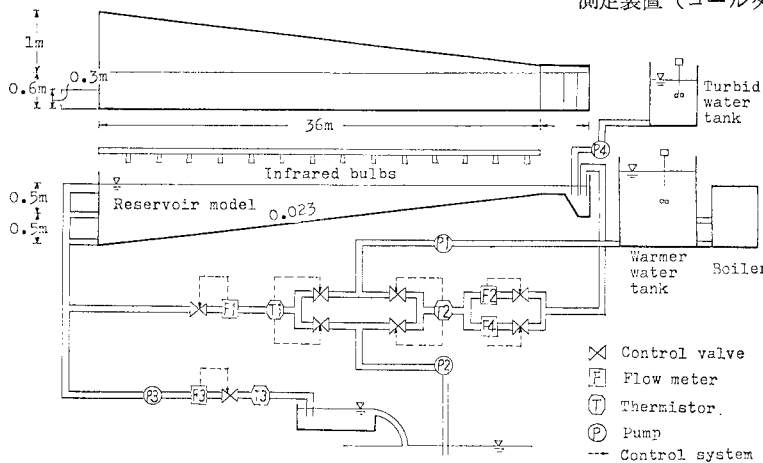


Fig. 4 Schematic diagram of laboratory reservoir system.

Table 2 Measurement section in reservoir model.

Section No.	Temperature					Turbidity			
	I	II	III	IV	V	1	2	3	4
Distance from downstream face (m)	3.0	9.9	17.0	24.7	31.7	3.9	10.9	17.9	25.6
Depth (cm)	93	77	60	42	26	91	75	58	40
Number of measured point	44	36	28	19	10	17	14	11	7

には水温測定用のサーミスターおよび濁水採水用のサイホンが、それぞれ流下方向の5断面および4断面に、2 cm および 5 cm 間隔で設置されており、断面の位置と測点数は Table 2 に示すとおりである。上流端からの流入水の流量、水温、下流端における流出量および揚水時の流入量、水温、赤外線ランプによる放射量などはすべて自動制御される。

実験条件を Table 3 に示す。表中の密度勾配 ϵ は水面と底の差をとったもの(基準密度 $\rho_0=1\text{g/cm}^3$ とする)、また平均的内部フルード数 F_i の定義式における V_i, L はそれぞれ貯水容量、貯水池長である。

RUN 1~4 は流入量、流出量、流入濁度をほぼ一定とし、流入濁質粒度および下流端の流出条件の異なる各場合について、移流、拡散のある場での多粒子沈降による粒度変化を主として測定したものである。RUN 5 は Fig. 5 に示すような入力条件を与え、実際の貯水池の濁水現象に近いと思われる条件のもとで粒度分布モデルの検証を行ったものである。

流入濁質(比重 2.69 のカオリン)の粒度の調整は沈降法によって行い、Fig. 6 に示すような粒度分布を与えた。

水温、濁度、粒度の測定には、それぞれサーミスター、積分球式濁度計(測定範囲 0~500 ppm)、自動粒度分布測定装置(コールター・カウンター、測定範囲 2~40 μ 口径 100 μ のアパーチャー・チューブを使用)を用いた。濁度が 500 ppm 以上の試料は希釈して測定した。粒度の測定は1つの試料について2回行い、その平均をとった。

(2) 数値解析の方法

粒度分布モデルを各実験条件に適用し、濁度、粒度の数値解析を行った。方法は以下のとおりである。

- i) 濁質の各粒径成分の沈降速度 $w_0(d, y, t)$ は Stokes の式で与える。
- ii) 水温分布の計算を省略し、実測値を与える。
- iii) 要素分割は $\Delta y=2\text{cm}$ とする。
- iv) 渦動拡散係数 $D_T=D_C=0$ 、連行係数 $r=0.1$ を与える。

ここに、Stokes の式を用いる 1 つの根拠は、粒径数十 μ 以下の粒子の粒子レイノル

注 3) レイノルズ数のオーダーは模型実験で 10^8 程度、実貯水池で 10^9 程度になる。実貯水池での検証例については文献 15) を参照されたい。

Table 3 Summary of experimental variables and parameters.

RUN No.		1	2	3	4	5
Outlet condition		Surface	Midpoint	Surface	Midpoint	Midpoint
Outflow rate	Q_0 (l/sec)	1	1	1	1	1
Inflow rate	Q_i (l/sec)	1	1	1	1	Fig. 5
Maximum	T_{bi} (ppm)	95	176	84	186	1180
Median diameter of kaoline	d_{50} (μ)	5.4	4.7	3.2	2.9	5.0
Injection period of kaoline	(min)	45	65	45	60	95
$\epsilon = \Delta \rho / \rho_0 H$	(/m)	0.0048	0.0046	0.0039	0.0038	0.0027
$F_i = Q_i L / V_i H \sqrt{\epsilon g}$		0.011	0.011	0.012	0.012	0.019~0.048
Infrared bulb radiation	(cal/cm ² ·min)	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72

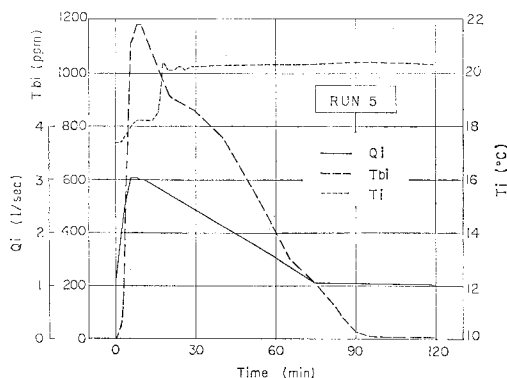


Fig. 5 Inflow rate, water temperature and turbidity in RUN 5.

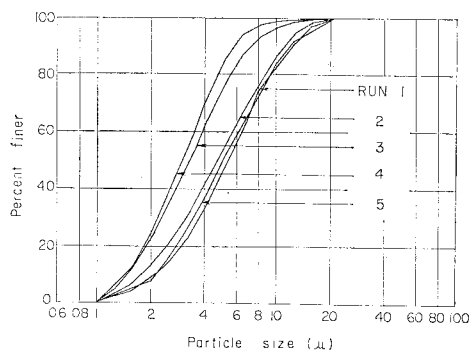


Fig. 6 Particle size distribution curves for kaoline used in RUN 1~RUN 5.

ズ数が 10^{-2} 以下となることであるが、必ずしも実際の貯水池における濁質の沈降が Stokes の式で十分説明し得ると主張するものではない。ここでは不明確なパラメーターなどの導入を避けるための解析の出発点としてこの式を用いるものとする。

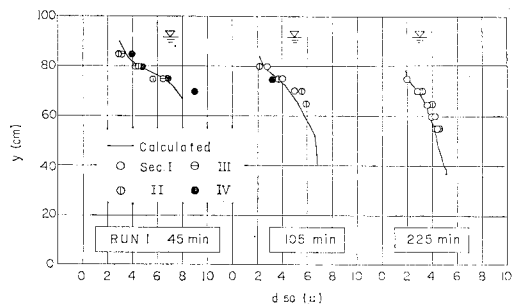
(3) 結果と考察

a) 粒度

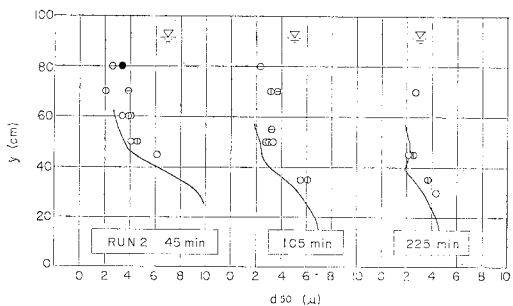
Fig. 7 に濁質の 50% 粒径の鉛直分布を示す。

RUN 1~4 の場合、実測値は分級による濁質の細粒化

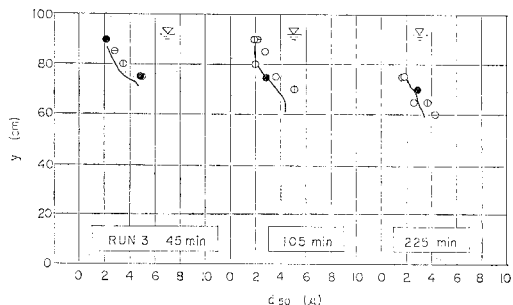
の過程を明確に表しており、また、水平方向の差が比較的小さく、粒度分布はほぼ鉛直一次的であることがわかる。Stokes の式による計算値はこの分級過程を良好に模擬しており、特に表層取水実験 (RUN 1, 3) の場合が実測値とよく一致している。中層取水実験 (RUN 2, 4) の場合には、計算値の曲線が実測値より約 5~10 cm 程度低いが、その差は時間的に広がっておらず、むしろこれは計算上の初期の濁水流入高さの誤差によるものではないかと思われる。また実測値も、50% 粒径が 2μ に近いものは測定範囲 ($2 \sim 40 \mu$) が適切でないため実際より過大な値になっていることが考えられ、これらの点を考慮すると、計算精度、測定精度の範囲内で Stokes



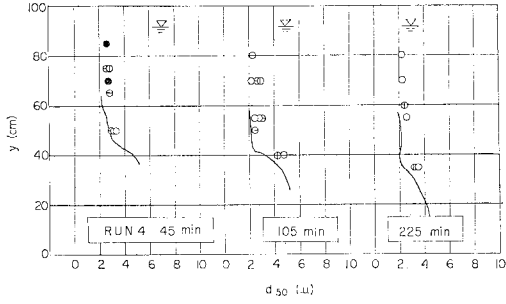
(a) RUN 1



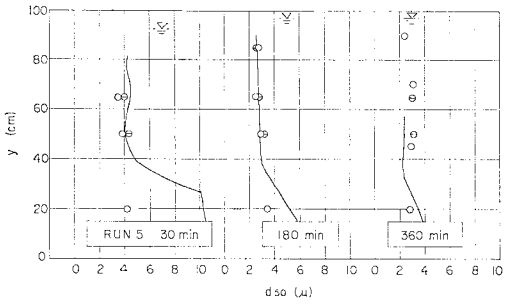
(b) RUN 2



(c) RUN 3

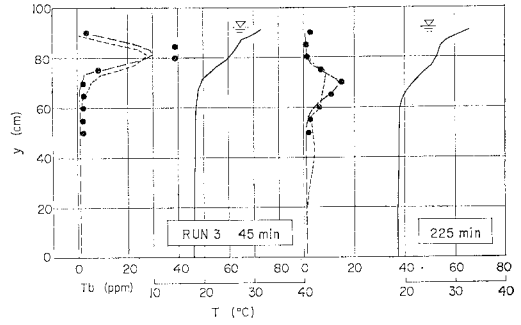


(d) RUN 4

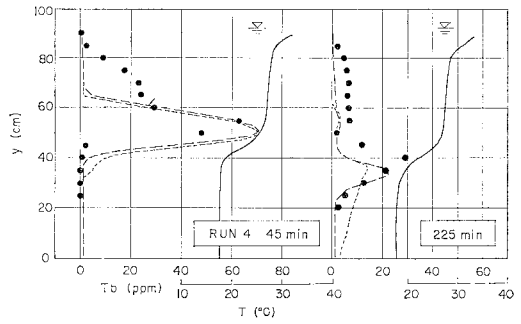


(e) RUN 5

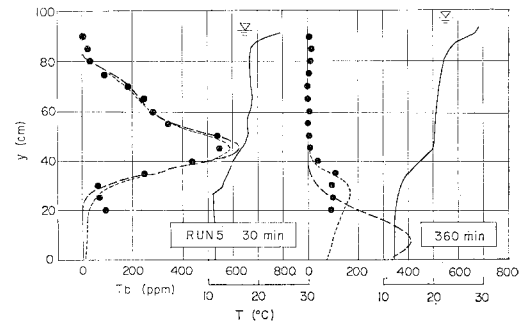
Fig. 7 Comparison between measured and calculated median diameter profiles.



(c) RUN 3

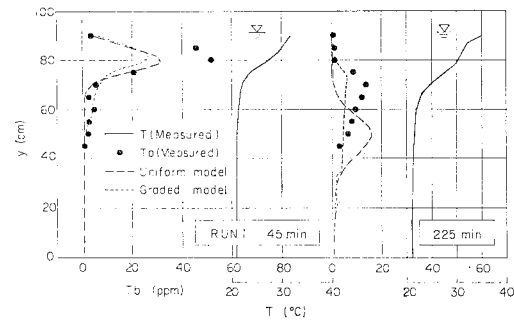


(d) RUN 4

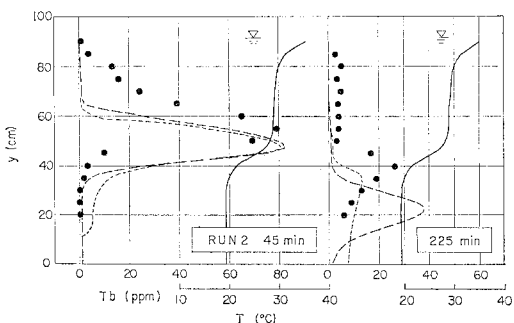


(e) RUN 5

Fig. 8 Comparison between measured and calculated turbidity profiles.



(a) RUN 1



(b) RUN 2

の式は実測値をほぼ的確に説明しているといつてよい。

RUN 5 の場合には、濁水流入初期から実測値が鉛直方向にほぼ一様で、40 cm 以深の計算値との間に大きな差がみられる。この理由は b) に考察する流入濁水の分岐現象によって説明されるものと思われる。

なお、Fig. 7 の計算値で部分的に欠けているところがあるのは、濁度の計算値の低い (2 ppm 以下) ところで粒度の計算を省略したためである。

b) 濁度

Fig. 8 に水温、濁度の鉛直分布を、Fig. 9 に流入、流出濁度の時間変化を、それぞれ示す。水温、濁度の鉛

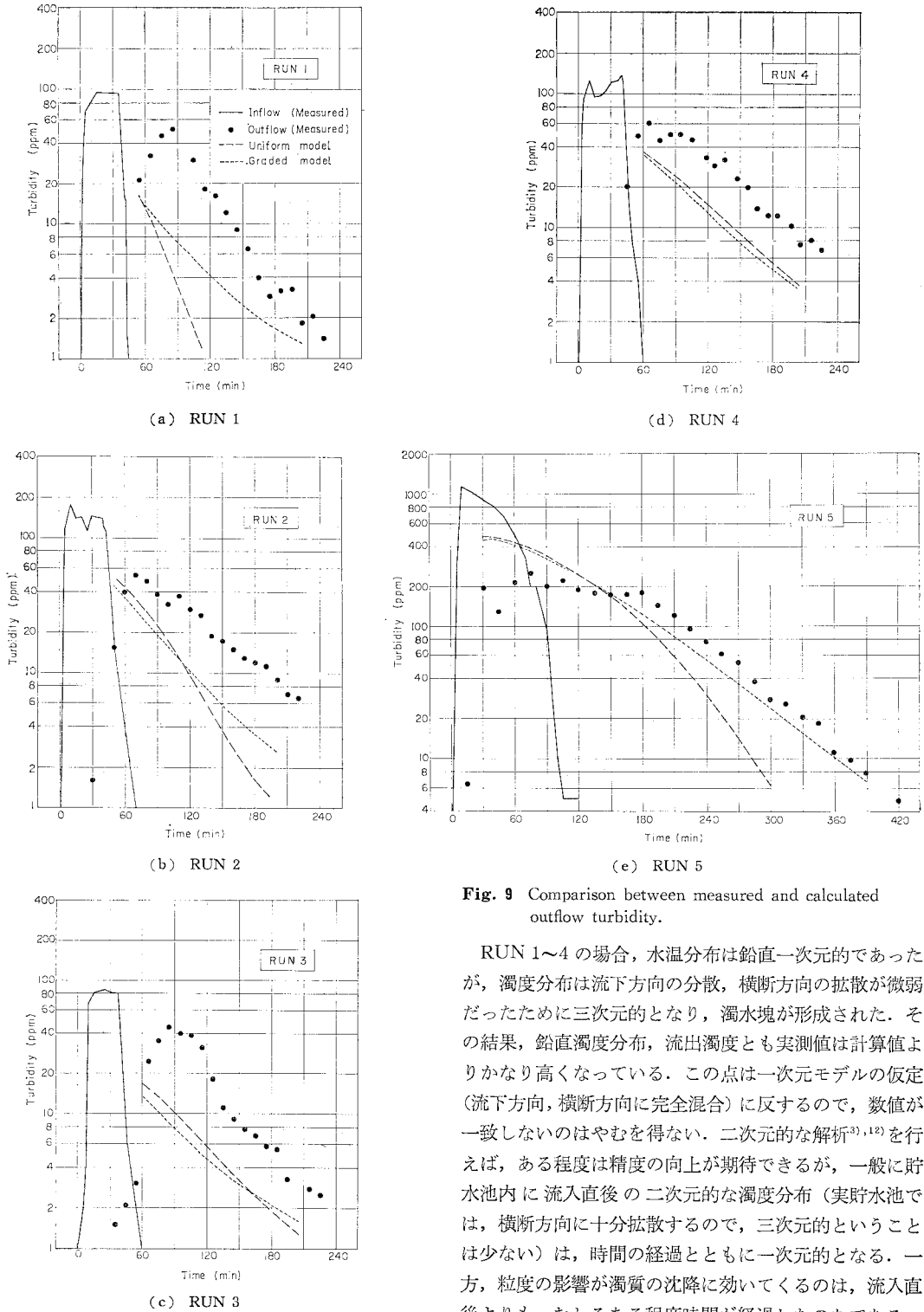


Fig. 9 Comparison between measured and calculated outflow turbidity.

RUN 1~4 の場合、水温分布は鉛直一次元的であったが、濁度分布は流下方向の分散、横断方向の拡散が微弱だったために三次元的となり、濁水塊が形成された。その結果、鉛直濁度分布、流出濁度とも実測値は計算値よりかなり高くなっている。この点は一次元モデルの仮定(流下方向、横断方向に完全混合)に反するので、数値が一致しないのはやむを得ない。二次元的な解析^{(3), (12)}を行えば、ある程度は精度の向上が期待できるが、一般に貯水池内に流入直後の二次元的な濁度分布(実貯水池では、横断方向に十分拡散するので、三次元的ということは少ない)は、時間の経過とともに一次元的となる。一方、粒度の影響が濁質の沈降に効いてくるのは、流入直後よりも、むしろある程度時間が経過したのちである。したがって、実用的には一次元の粒度分布モデルで十分な場合が多いものと思われる。

実験では RUN 5 を除き、特に横断方向の非一様性の

直分布の実測値は水平方向に平均化したものである。また濁度の計算値は粒度分布モデルと一様粒径モデルの 2 種類を記入してある。

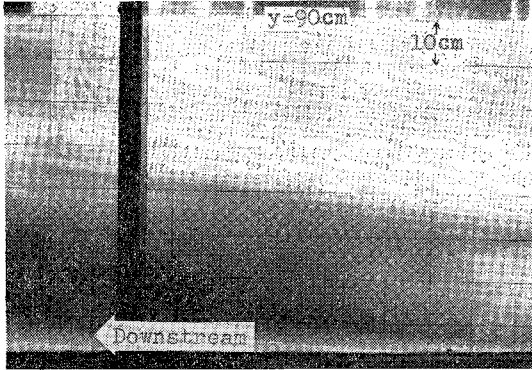
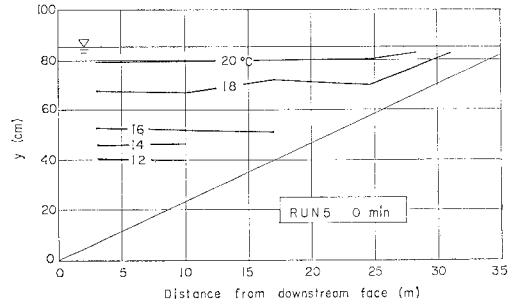


Photo 2 Separate intrusion of turbidwater (RUN 5, 30 min, Sec. 1. The basic flow is from right to left).

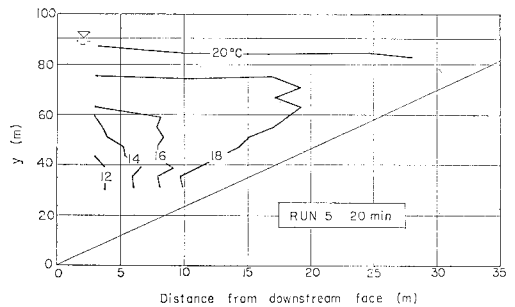
ために濁度分布が一次的とならなかったため、計算値と実測値の数値的な比較は適当でないが、鉛直濁度分布のピークの位置、流出濁度の逆減率などを比較してみると、粗粒子を流入させた RUN 1, 2 の場合は粒度分布モデルの方が一様粒径モデルに比べ実測値に近いことがわかる。微粒子を流入させた RUN 3, 4 では両者の差は小さく、このことは、対象とする濁水期間中に適切な代表粒径を与えさえすれば、一様粒径モデルでも十分有効な場合があり得ることを示唆している。しかし、実際の貯水池では流入濁質粒度の複雑な変動があることを考えると、適切な代表粒径の与え方が難しく、一般的には粒度分布モデルの方が有効であるといえる。

洪水波形の流入量を与えた RUN 5 の場合には、比較的横断方向の拡散が強く、また濁水流入時間も長かったため、他の実験に比べれば濁度分布はより鉛直一次的になっている。ただし、Fig. 8 (e)、Photo 2 にみられるような流入濁水の分岐現象¹³⁾が起り、粗粒子を含む高密度の濁水が底層密度流となって水槽底に流入した。Fig. 10 の水温分布における 18°C の等温線の時間変化に注目すると、まず、(b) で底層密度流が先行して水槽底に進入し、続いて (c) で水平離床流^{注4)}が 60 cm 付近の高さを中心に進入していくのがみられる (Photo 2 参照)。流入水の密度を概算すると、水温 18°C、濁質濃度約 1200 ppm であるから 0.99934 g/cm^3 となり、これを清水の水温に換算すると約 13°C である。ところが底層密度流は 12°C 以下の領域まで進入しており、概算した流入水の平均密度より高くなっている。すなわち、分岐前の底層密度流の段階で上下方向に密度差が生じていたことを示しており、その原因は、この場合には底層密度流と周囲水との混合^{13), 14)}よりもむしろ濁質の分級によるところが大きい。なぜなら、周囲水との混合

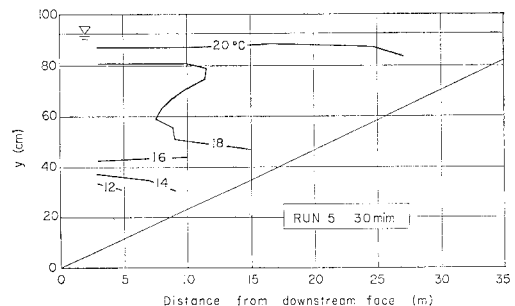
注 4) 浮力効果によって水路床を離れ、水平に流下していく流れの意味。



(a) 0 min



(b) 20 min



(c) 30 min

Fig. 10 Time variation of isotherms showing separate intrusion of turbid water observed in RUN 5.

だけでは流入水の平均密度より高密度の底層密度流の発生を説明できないからである注5)。

計算仮定にないこのような複雑な現象が起こったことの影響は、Fig. 7 (e)、Fig. 8 (e) の底付近の 50% 粒径および濁度の計算値と実測値の差に現れているが全体的な分布の一致はよい。Fig. 9 (e) の流出濁度の計算結果は、粒度分布モデルによる予測精度の向上を示しており、まえがきにおいて指摘したような濁質粒度の影響を考慮した解析が重要であることを裏付けている。

注 5) 塩水を用いた実験ではこのようなことは起こらない。文献 13), 14) の実験はいずれも塩水を用いたものである。

5. 結 論

濁水長期化現象の本質的要因の1つと思われる濁質粒度の影響について、数値解析と模型実験により検討を加えた結果、以下の点が明らかになった。

(1) 濁度と濁質濃度とは異なる。すなわち、濁度係数は粒径依存性をもつため、濁質の連続条件を基礎式とする数値解析によって得られた濁質濃度の値を、濁度計で測定した実測値と直接比較するのは適切でない。

(2) 宮崎らの提案する式(1)は、本実験に用いたカオリン(比重2.69)についても認められ、 $K=0.41, m=0.66$ となった。理論的には $m=1$ となることを示すことができる。

(3) 平均的内部フルード数が0.01、濁度が100 ppm程度の実験における濁質の沈降は Stokes の式によって十分表すことができる。粒子間の干渉の影響は計算精度・測定精度の範囲内で顕著には認められなかった。

(4) 高濃度の濁水を流入させた実験では、流入濁水の分岐現象が観測され、その主たる原因がこの場合には従来説明されているような周囲水との混合によるものではなく、濁質の分級によるものであった。

(5) 従来の濁度の数値解析モデルにおいてまったく考慮されていなかった式(1)を導入し、粒径別の濁質の連続条件を基礎式とする「粒度分布モデル」を提案した。安芸・白砂のモデルにこの改良を加えた場合を模型実験により検証したところ、鉛直濁度分布・流出濁度の予測精度が元のモデルに比べて向上することが示された。

本研究で提案した粒度分布モデルは、流入濁質粒度の複雑な変動を考慮できるばかりでなく、分級に基づく沈降速度の場所的、時間的変化の見積りに関して、いわゆる「実測値と合わせるための」不明確な係数やパラメータを含んでいないという点で一般性があるものといえる。実際の貯水池での定量的な予測においても、比較的大規模な成層型貯水池への適用例ではほぼ満足できる結果が得られている¹⁵⁾。したがって、本モデルは、従来の濁度の予測解析モデルの開発にみられた濁度と濁質濃度の区別の曖昧さを明確にし、かつ予測精度を向上させ得るという意味で、濁水現象の解明に本質的な寄与をなす

ものであるといえよう。

本研究の遂行にあたり、(株)建設技術研究所 森 秀人君(当時・東京理科大学四年)、(株)東京道路エンジニア 高橋 潤君(当時・千葉工業大学四年)ならびに(財)電力中央研究所河川環境研究室諸氏のご協力を得た。また、同水域化学研究室 寺田信之氏には分析機器の使用等でご指導をいただいた。ここに厚く謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 安芸周一・白砂孝夫：貯水池水質の調査と解析(その2) 一成層型貯水池の流動形態と選択取水の数値解析，電力中央研究所依頼報告，No. 74506, 1974.
- 2) 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，No. 19 B, 1976.
- 3) 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，No. 21 B, 1978.
- 4) 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，No. 279, pp. 61~68, 1978.
- 5) 宮永洋一・安芸周一・秋元 保・斎藤 茂：貯水池流入河川における水温・濁度の現地観測および予測，第23回水理講演会論文集，pp. 107~112, 1979.
- 6) 宮崎昭児・早乙女保二・増田勝人：濁度測定における粒径の影響について，港湾技研資料，No. 284, 1978.
- 7) 菅野明男：水質試験(濁度)の進歩，工業用水，No. 200, pp. 54~61, 1975.
- 8) 日野幹雄・歌原英明：浮遊粒子による光の消滅および植物プランクトンの増殖(1)，第22回水理講演会論文集，pp. 49~54, 1978.
- 9) 久保田広ほか：光学技術ハンドブック(増補版)，朝倉書店，pp. 1113~1116, 1975.
- 10) 白砂孝夫：貯水池濁水対策に関する研究(第二報)一選択取水法の水理的検討，電力中央研究所依頼報告，No. 73509, 1973.
- 11) Ryan, P.J. and D.R.F. Harleman: Prediction of the annual cycle of temperature changes in a stratified lake or reservoir, Technical Rep. No. 137, MIT Parson Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, 1971.
- 12) 白砂孝夫・宮永洋一：貯水池内の濁度の二次元解析，第32回年次学術講演会講演概要集，pp. 336~337, 1977.
- 13) 室田 明・中辻啓二・栗本博樹：成層型貯水池における流入濁水の分岐現象について，第33回年次学術講演会講演概要集，pp. 379~380, 1978.
- 14) 福岡捷二・福岡祐介・村田和夫・荒井 健：成層化した貯水池に進入する density front の運動，第22回水理講演会論文集，1978.
- 15) 宮永洋一：懸濁物質の粒度と濁水長期化，電力土木，No. 162, 1979.

(1979.5.7・受付)