

ダム貯水池における洪水時濁水挙動に関する数値解析

NUMERICAL MODELING OF FLOODWATER INTRUSION AND FINE SUSPENDED SEDIMENT BEHAVIOR IN A STRATIFIED RESERVOIR

梅田 信¹・池上 迅²・石川忠晴³・富岡誠司⁴

Makoto UMEDA, Jin IKEGAMI, Tadaharu ISHIKAWA and Seiji TOMIOKA

1 正会員 博(工) (財)ダム水源地環境整備センター 研究第二部
(〒102-0086 東京都千代田区麹町 2-14-2 麹町 NK ビル)

2 正会員 修(工) (株)日水コン 河川事業部 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 4-7-107)

3 フェロー会員 東京工業大学教授 大学院総合理工学研究科 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259)

4 正会員 (財)ダム水源地環境整備センター 研究第二部

This paper presents a development of a numerical model that simulates flood water intrusion into a stratified reservoir and fine suspended sediment behavior. The model is based on laterally averaged vertical 2-dimensional equations and k- ϵ turbulence model, which are solved by using SIMPLE scheme.

A laboratory experiment was conducted on settlement of fine suspended sediment and a tentative modeling is proposed to estimate settling velocity of fine solid. The model is validated by simulating the flood event on which the field measurement was conducted. Vertical distributions of suspended sediment concentration are well reproduced and effectiveness of the proposed model is demonstrated.

Key Words: dam reservoir, numerical simulation, fine suspended sediment, settling velocity

1. はじめに

ダム貯水池における濁水現象は、環境面を含めた工学的な問題として、特に 1970 年代頃に活発に研究が進められた^{1),2),3),4)}水質現象である。この当時の研究成果により、洪水時に河川から流入する濁水の流動構造に関しては、かなり理解が進んだと言える。しかし濁水現象についての課題が、これらの研究により完全に解決されたとは言えない。特に近年、ダムの下流河川における生態系に対する影響や流砂系土砂管理などの観点からも、より効果的な濁水現象の制御手法の確立が望まれている。

貯水池内における濁水現象の防止・軽減策として、現在有力なものとして、選択取水設備⁵⁾や流動制御フェンスなどが挙げられる。これらは、貯水池内の流動を制御することによる保全策であることから、設置・運用について検討を実施する際には、主として流動シミュレーションによることとなる。したがって、このような検討で用いる解析モデルには、濁質の流動に関して高い精度が要求されることになる。しかし現在のところ、次の 2 点について解析上の課題があると考えられる。

貯水池の流動・水質シミュレーションモデルは、比較的高度な 3 次元モデル^{6),7)}も、近年開発されている。し

かし、実務的な検討においては、計算負荷などの点から多くの場合は、静水圧近似を施した鉛直二次元モデル⁸⁾を用いている。そのため、洪水流入時や上述の流動制御による対策検討において、解析精度が必ずしも十分ではない場合があると考えられる。これが第一の課題である。

二点目として、濁質の沈降速度の推定精度が課題として挙げられる。貯水池内で比較的長期間に渡って浮遊している濁質は非常に微細な粒子であり、粒径は概ね 10 μm 以下である。この程度の大きさになると、ブラウン運動や粒子自身の電気的な反発力あるいは乱流などの影響により、ストークス則で算出される値よりも、かなり小さくなることが、これまでにも指摘されてきている^{2),9)}。しかし濁質の沈降速度の推定については、ストークス則以上のモデル化は為されていない。

本研究では、これらの課題点を踏まえ、実用性と先端性(精度)のバランスを考慮した流動シミュレーションモデルの開発を行った。すなわち、鉛直二次元ではあるものの、動圧解析や k- ϵ 乱流モデルを導入したモデルの検討をしている。また濁質の沈降過程に関しても、確率的沈降という新たな考え方を提案し、これに基づくモデル化を行った。そして、現地観測データを用いて、モデルの再現性に関する検証をした。

2. シミュレーションモデルの概要

ダム貯水池は、一般に横断方向のスケールが流下方向に比べ小さいことから、水の流れの特徴として、上下流方向及び鉛直方向（密度流）の変化が大きいということが挙げられる。したがって、流動・水質挙動の解析モデルを構築する場合、鉛直二次元モデルとすることが多く、本研究でもこの考え方を採った。

基礎方程式は、連続式、ブシネスク近似した運動方程式、 k - ϵ モデル式、水温と濁度の輸送方程式からなる：

$$\frac{\partial}{\partial x}(uB) + \frac{\partial}{\partial z}(wB) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D(Bu)}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x}\left(v_L B \frac{\partial u}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(v_{eff} B \frac{\partial u}{\partial z}\right) = -\frac{B}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\tau_x}{n_s \cdot n_y} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{D(Bw)}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x}\left(v_L B \frac{\partial w}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(v_{eff} B \frac{\partial w}{\partial z}\right) \\ = -\frac{B}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + Bg\delta + \frac{\tau_z}{n_s \cdot n_y} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{D(Bk)}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x}\left(v_L B \frac{\partial k}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{v_{eff}}{\sigma_k} B \frac{\partial k}{\partial z}\right) \\ = BP_r - Bg \frac{v_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial \delta}{\partial z} - B\epsilon + \frac{F_k}{n_s \cdot n_y} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{D\epsilon}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x}\left(v_L B \frac{\partial \epsilon}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{v_{eff}}{\sigma_\epsilon} B \frac{\partial \epsilon}{\partial z}\right) \\ = C_1 B \frac{\epsilon}{k} P_r - C_2 B \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{F_\epsilon}{n_s \cdot n_y} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{D(BT)}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x}\left(v_L B \frac{\partial T}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{v_{eff}}{\sigma_T} B \frac{\partial T}{\partial z}\right) = \frac{Bh}{\rho C_w} + \frac{F_T}{n_s \cdot n_y} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(BC)}{\partial t} + \frac{\partial(BuC)}{\partial x} + \frac{\partial(B(w-w_s)C)}{\partial z} \\ - \frac{\partial}{\partial x}\left(v_L B \frac{\partial C}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{v_{eff}}{\sigma_C} B \frac{\partial C}{\partial z}\right) = \frac{F_C}{n_s \cdot n_y} \end{aligned} \quad (7)$$

また、上記において、

$$P_r = v_t \left[2 \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (8)$$

$$v_{eff} = v + v_t = v + C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (9)$$

$$v_t = 0.01(\Delta x)^{4/3} \quad (10)$$

$$\delta = \frac{\rho_r - \rho(T, C)}{\rho_r} = 1 - \frac{\rho_w(T)}{\rho_r} \left[1 + C \left(\frac{1}{\rho_w(T)} - \frac{1}{\rho_s} \right) \right] \quad (11)$$

である。ここに、 x = 流下方向の水平座標、 z = 鉛直上向きの座標、 u = x 方向流速、 w = z 方向流速、 k = 乱れエネルギー、 ϵ = 粘性散逸率、 δ = 相対密度差、 T = 水温、 C = 濁質濃度 (SS)、 w_s = 濁質の沈降速度、 g = 重力加速度、 τ_i = i 方向に働く河床面せん断応力、 p = 圧力、 ν = 水の動粘性係数、 ν_t = 鉛直方向の渦動粘性係数、 ν_L = 水平方向の渦動粘性係数、 Δx = x 軸方向の空間刻み、 $n_s \cdot n_y$ = 側岸部に垂直な単位ベクトル n_s と横断方向の単位

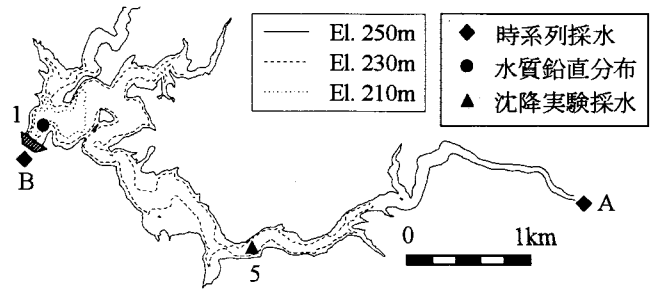


図-1 Xダム平面図と観測地点

ベクトル n_y の内積である。また、 $C_1, C_2, C_\mu, \sigma_k, \sigma_\epsilon$ は k - ϵ 乱流モデルの標準値を採用した。

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3 \quad (12)$$

これらの基礎方程式を有限体積法により離散化し、圧力補正は、SIMPLE 法により行っている。

流速に関する壁面境界条件は、鈴木ら¹⁰⁾に倣って与え、 k と ϵ は、壁関数法を用いて与えた。また、濁質の堆積・巻き上げについては、梅田ら¹¹⁾による式

$$F_C = 15\epsilon - w_s C \quad (13)$$

により考慮している。

3. 対象フィールドにおける現地観測¹²⁾

(1) 現地観測の概要

現地観測は、東北地方に位置する X ダムで実施した。流域面積が 172km²、総貯水容量は 3.1 × 10⁷m³ の中規模な貯水池である。貯水池の平面図を図-1 に示す。

現地観測は、2001 年 8 月 22 日に生じた洪水時に実施した。観測項目は、流入水と放流水の採水・分析及び貯水池内の多地点における水質の鉛直分布計測である。

流入水の採水地点は、サーチャージ水位 (EL251m) における背水区間の直上流である地点 A で行った。放流水の採水は、地点 B において、洪水吐及び発電取水の両者について行った。測定・分析項目は、水温・濁度・SS の 3 項目を、採水した全サンプルに対して行った。また流入水に対しては、粒度組成の分析を、流量の増減に合わせて 4 サンプルについて実施した。

貯水池内の水質分布計測は、洪水発生の日である 8 月 22 日から 31 日までの 10 日間に渡り、1 日 1 回の頻度で行った。またその後は、週 1~2 回程度の頻度とした。

(2) 観測結果の概要

詳細な観測結果については、別報¹²⁾を参照頂きたいが、ここではシミュレーション上重要な結果を示しておく。

図-3 に流入及び放流水の観測結果を示す。上から流入量・放流量、流入 SS・放流 SS の時系列を示している。発電放流は表層放流 (水面下 2.5m) であり、洪水はオリフィスゲート (EL.230.0m) より放流されている。放流 SS を除いては、後述するシミュレーションの境界条件に用いている。

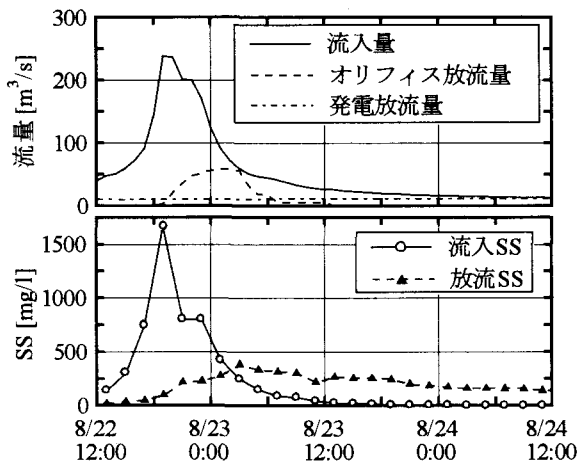


図-3 洪水時流入・放流時系列の観測結果

出水時に流入地点Aで採水したサンプルの粒度分析結果を図-2に示す。シミュレーション時にパラメタとして用いる流入濁質の粒度組成は、この結果より作成した。

4. 濁質沈降のモデル化と検証計算

(1) X ダムにおける流動計算条件

計算期間は、洪水発生の前日に当たる8月21日から観測を終了した9月7日までの約2週間である。計算格子は、水平方向に200m、鉛直方向に1mの大きさとし、計算時間間隔は30秒とした。ただし、Xダム貯水池は図-1からも分かるように、下流部に比較的大きな入り江が二ヶ所存在する。この入り江における流動及び流入も考慮するために、支流に関する領域分割もしている。

計算初期条件として、貯水位はダム管理所における実測値を用いた。水温及びSSの分布は、8月22日16時の地点1における実測値（鉛直分布）を貯水池内に水平一様分布として与えた。流入量・放流量及び放流施設の操作については、1時間ごとのダム管理記録を元に与えた。

流入水温と流入SSの入力時系列は、次の2通りの与え方をしている。まず、約2時間間隔で測定値のある期間（図-3）については、時間的に線形補間することで時系列データを作成した。それ以外の場合については、実測値を元に、水温については気温と、SSについては流量との相関式を作成して流入条件を推定した。水温とSSのデータは、上記の計算領域分割を行った二つの支川についても測定していることから、それぞれについての流入条件を与えている。本川流入に対する水温とSSの推定式を一例として挙げると下記ようになる。

$$T_w = 0.12T_A + 19.32 \quad (14)$$

$$C_m = 0.05Q^{2.02} \quad (15)$$

ここに、 T_w =流入水温[°C]、 T_A =気温[°C]、 C_m =流入SS[mg/L]、 Q =流入量[m³/s]である。

流入SSの粒度分布は、地点Aにおける洪水ピーク時に近い測定（8月22日21:00）結果を元に与えた。沈降

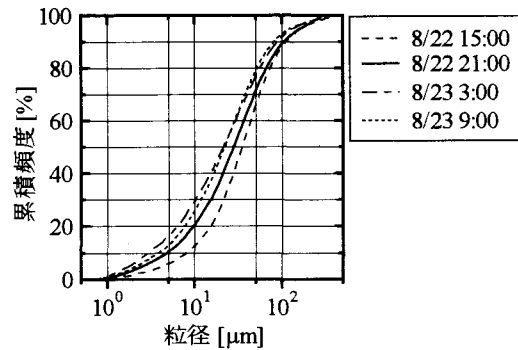


図-2 洪水時の地点Aにおける濁質の粒度組成

速度設定の詳細は、次章で述べる。

計算期間を出水から約2週間としていることから、気象因子による水温変化についても、考慮する必要があると考えられる。本研究では、日射及び水面における熱損失については安芸・白砂¹³⁾に倣って与えている。熱収支計算のために必要な気象データ（気温、風速、湿度、日射量、雲量）は、ダム管理所を含む近傍の観測点におけるデータから推定して与えている。

(2) 濁質の沈降現象に関する仮説

第1章で述べたように、現地における濁質の沈降をモデル化するためには、ストークス則とは異なる物理過程を想定する必要があると考えられる。本研究では、以下のような仮説に基づいて、濁質の沈降実験を実施し、この考え方による濁質沈降のモデル化を行った。

濁質の沈降は、次の二通りの沈降過程の組み合わせによっていると仮定した。一つ目は、ストークス則のように、沈降速度が個々の粒径の関数になっていると考えるものである。これを「ストークス則的沈降」と呼ぶことにする。これは、従来の濁質沈降のモデル化（沈降速度の算出）である。二つ目として、本モデルのポイントとなる点であるが、「確率的沈降」を考慮した。これは沈降速度が粒径に依存しない沈降現象を想定したものである。すなわち、ある粒径範囲（特に微細成分を想定する）については、沈降速度を粒径の関数としないものである。何らかの確率的な要因（例えば粒子同士の衝突によるフロックの形成や乱流による運動など）により、浮遊状態（沈降速度ゼロ）から沈降状態へと移行する、あるいは沈降速度が変化すると考えるものである。

本研究では、これらの二つの沈降過程に関して、次節に述べる定性的な実験を行った上で、濁質の沈降のモデル化を検討した。

(3) 濁質沈降実験

a) 定性的実験の方法と考え方

前節に述べた濁質の沈降現象に関する仮説について検討するために定性的な実験を以下の要領で実施した。

実験に用いる濁水は、出水時にXダム上流部（地点5）において、2002年10月2日の出水時に採水したものを

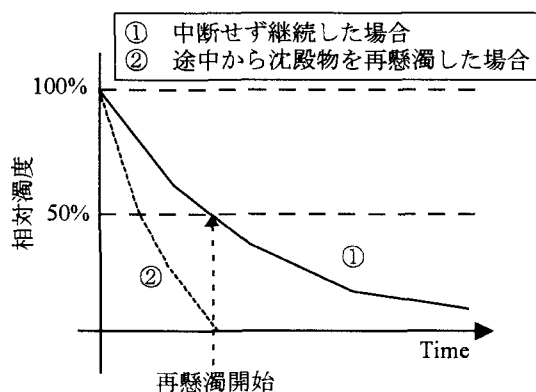


図-5 ストークス則的沈降現象による濁度時系列の模式図

用いた。採水は、概ね流量ピーク付近をねらって行った。

実験方法の概要は、以下の通りである。まず、試料に含まれている比較的粗粒な濁質を除くため、懸濁水作成後 24 時間程度放置し、初期懸濁水を作成した。これを高さ 0.65m、直径 0.1m の沈降筒に、再度よく攪拌したうえで、注入し実験を開始した。また沈降筒の底には、沈殿した濁質を収集するための受け皿を設置した。このような装置を 2 本用意して実験を実施した。開始後は、1 日 1 回の頻度で、沈降筒の中央（高さ 0.32m）に設置したコックから採水し、濁度を測定した。

初期懸濁水の濁度から 50% 程度まで下がったところで、次の 2 ケースに分け、並行的に沈降試験を再開した。① 中断せずにそのまま継続する。② 底の受け皿から回収した沈殿物を分散させ、沈殿時に生じた凝集状態を破壊する。この濁質により懸濁水を作成して（すなわち沈殿物のみで、再度初期条件を作る）、実験を再開する。

この実験により、以下のような点について検討する。まず沈降現象が「ストークス則的」とであるとすると、図-5 のようにケース②は、再懸濁を開始した日数で沈降が終了することになる。それに対して、「確率的沈降」の要素があるとすると、沈降速度は粒径などによって決定されない。そのため、図-4 のように沈殿物を分散させて懸濁したケース②は、ケース①とほぼ同等の減衰率を取ると予想される。

b) 実験結果

ケース②の開始は、ケース①の濁度が、初期濁度のほぼ半分となった、実験開始後 3 日目として実施した。

両ケースの濁度時系列に対して、それぞれの初期値で基準化した相対濁度を算出し、時系列プロットすると、図-6 のようになる。ここで、ケース①の初期濁度は 158.7 度、ケース②は 54.5 度であった。実験開始時に粗粒分を除いていることから、濁度の時系列を片対数プロットすると、概ね直線的な減衰曲線となっている。沈殿物を分散させたケース②について見ると、沈殿物を回収し再懸濁を開始した 3 日後において、相対濁度はおよそ 0.45 である。すなわち、ケース①の減衰率とほとんど差がないことが分かる。単純に粒径に従って沈降速度が決定されるストークス則的な考え方に従えば、この時点で相対濁

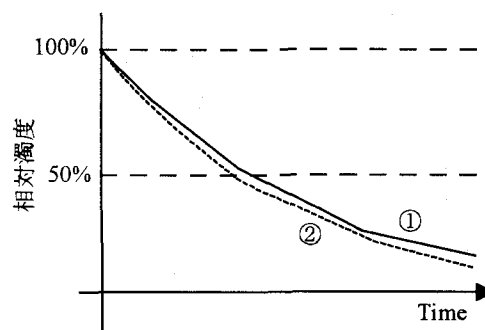


図-4 確率的沈降現象による濁度時系列の模式図

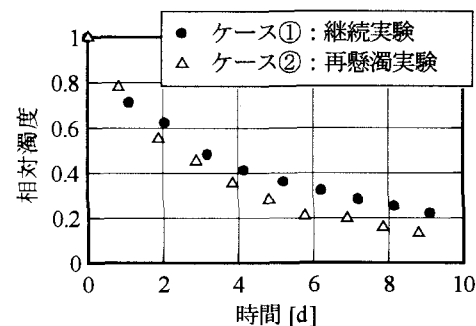


図-6 沈降実験結果（相対濁度値の時系列）

度はほぼ 0 となっているはずである。

実験方法の原理上、ケース①において、実際に 3 日後で沈殿しているものには、3 日で沈降筒の高さを沈降させるものだけではなく、沈降速度の遅い成分も含まれている。そのため、ストークス則的であったとしても、ケース②では 3 日で完全に 0 になる訳ではないと考えられる。しかしながら、そのような事を考慮しても、濁度の減衰率はかなり小さいと思われる。このことから、微細な懸濁物質については、単純に粒径やストークス則による沈降速度では、説明しきれない要素が関わっていると考えられる。

c) 定量的実験

次に、より大型の沈降筒を用いて、さらに長期的な濃度変化を調べる実験を行った。この結果を用いて、現地の再現計算パラメタを決定するものとした。

実験装置は、高さ 2.0m、直径 0.2m の沈降筒を用いた。実験手順は、次の通りである。まず沈降筒を恒温室に設置し、実験試料を均一混合したものを注水して静置する。この際、全流入 SS に対して、沈降特性を調べるという観点から、先ほどのように粗粒分を除くような操作は行わないものとした。

沈降筒の中央部に設置した採水コックより、以下のような時間間隔で採水を行った。実験開始から 24 時間以内は 3～12 時間間隔、1～7 日後は 1 日間隔、そして 7 日後から実験を終了する 42 日後は 3 日～14 日間隔とし、徐々に採水間隔を延ばした。分析項目は濁度、SS とした。なお分析に要する水量などの関係から、濁度は全サンプルについて分析し、SS は代表サンプルについて実施した。

図-7 に実験結果として、SS の時系列を示す。粗粒分

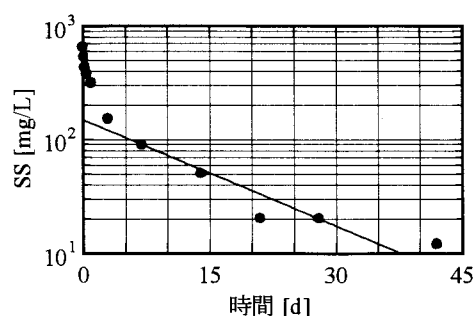


図-7 定量的沈降実験の結果

を含んでいることから、実験開始から1日以内での変化が大きい。しかしその後は、前節で示したように、片対数紙上で概ね直線的に減衰していることが分かる。

(4)沈降現象のモデル化

定性実験の結果より、濁質の沈降にはストークス則で表現される現象のほか、何らかの確率的な要素も作用している可能性が示唆された。そこで、この確率的な要素を定式化した濁質沈降モデルを検討した。

沈降特性によって、濁質が次の3種の粒子に区分されると仮定する。A粒子：確率的沈降に支配されており、ほとんど沈降速度を持たずに浮遊している粒子。B粒子：A粒子がある一定の反応速度で変換され生じるもので、比較的大きな沈降速度を持つ粒子。C粒子：ストークス則に従った沈降速度を持つ粒子。

実験結果から、濁度の減衰は図-7のように概ね指数関数で近似できる。そこで、濁質の沈降を放射性崩壊とのアナロジー、すなわち個々の原子（粒子）の崩壊（沈降）は確率・統計的に記述される現象であるとして考えた。したがって、A粒子とB粒子の変換は、一次反応式で表現することができ、両者の生成・消滅に関して、以下の式でモデル化できる。

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -\alpha A \quad (16)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \alpha A \quad (17)$$

ここに A = A 粒子の濃度、 B = B 粒子の濃度、 α = 反応速度であり、SS の減衰率（図-7 の傾き）から設定できる。

また沈降モデルの粒子区分は、次のように設定した。ダム湖内に長期間浮遊し濁水長期化の原因となる粒子は、概ね $10\mu\text{m}$ 以下の成分である。そこで、本研究では $10\mu\text{m}$ 以下の濁質は確率的沈降に支配されており、逆にそれ以上の粒径成分はストークス則的沈降に因っていると仮定した。これは、かなり極端な区分であると言える。すなわち、実際には $10\mu\text{m}$ 以上であっても、確率的沈降に因っている部分や、その逆に数 μm の濁質でもストークス則的に沈降するものもあるかもしれない。しかし現段階では、このモデル化自体が仮説であることから、仮説の試行・検証という観点も含め、このような設定とした。

表-1 検証計算における沈降速度分布の設定

粒径 [μm]		代表値	沈降速度	頻度
起	至		[m/s]	[%]
0.34	10.76	A粒子	0.0	24.0
		B粒子	5.62×10^{-2}	
10.76	19.14	14.35	1.78×10^{-4}	13.1
19.14	34.03	25.52	5.62×10^{-4}	20.7
34.03	60.51	45.38	1.78×10^{-3}	19.6
60.51	107.61	80.70	5.62×10^{-3}	13.0
107.61	191.36	143.50	1.78×10^{-2}	6.1
191.36	340.29	255.18	5.62×10^{-2}	3.5

(5)沈降速度の設定

ストークス則から与える C 粒子の粒径区分は、対数グラフ上で概ね等幅になるよう、実測値の粒度範囲内を 6 区分した。それぞれの区分に対する代表粒径（沈降速度）は、分割した粒径区間の中央値とした。表-1 に設定結果を示す。

反応速度 α は、第3節 c) の定量的実験の結果から求めた。実験開始から3日目以降は、SS 濃度の時間変化が、片対数プロットすると直線的である。この近似曲線の傾きが、反応速度に相当する。その結果、図-7 のような直線が求められ、 $\alpha = 8.28 \times 10^{-7} [1/\text{sec}]$ が得られた。

さて、微細粒子成分 A・B の沈降速度は、現段階ではきちんとした根拠を立てて与えることが難しい。そこで、本研究では次のように設定した。まず A 粒子についてであるが、文献¹²⁾にも示されているように、濁水層は8月23日から8月31日までの8日間ですべてほとんど下降していない。若干の低下は見られるが、これは水温成層の連行に伴うものであり、濁質自体の沈降に因るものではないと考えられる。そこで A 粒子の沈降速度はゼロとする。それに対して B 粒子の沈降は、速やかに進むものと仮定した。しかし実験・観測結果などから、沈降速度を決定する根拠が、現在のところ無い。そこで本論文では、流入 SS のうち最大の成分である、粒径 $250\mu\text{m}$ 程度に相当する $5.62 \times 10^{-2} \text{m/s}$ を仮定した。

(6)X ダムにおける検証計算

図-8 に前章で検討した確率的沈降モデルを導入した SS の計算結果を示す。濁水層の変動を概ねよく再現していると考えられる。しかしながら、特に検証期間の中盤において、計算結果が SS 分布を過大に評価する傾向が見られる。また、点線は $10\mu\text{m}$ 以下の粒径についても表-2 に示したように成分分割して、ストークス則から沈降速度を求め計算した結果である。特に下層での再現性が劣ることが分かる。したがって、本研究で提案した沈降モデルの方が、全体的な再現性は良いと言えるであろう。

本論文では、ストークス沈降と確率的沈降という二つのモデル化を端的な形で区分して与えた。しかし、実際の現象では、両者が混在する形で存在していることが予想される。つまり、粗粒成分についても確率沈降的な要素があり、逆に細粒成分もストークス的な沈降もある

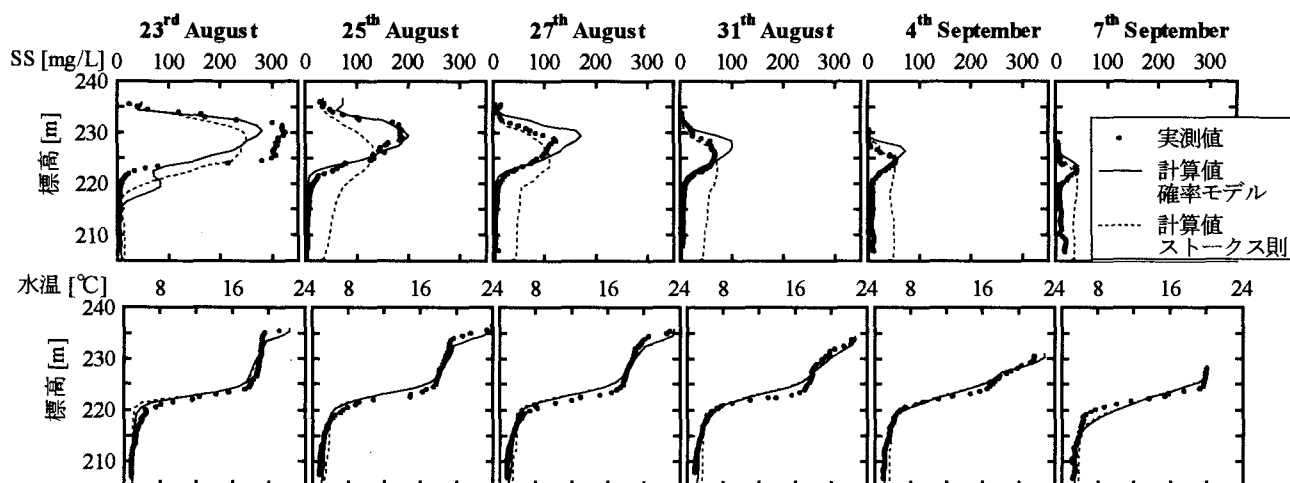


図-8 確率的沈降モデルを導入した計算結果

と考えられる。本論文では、両者を単純に二分して設定した。その影響が、再現性にも表れていると考えられる。

5. おわりに

本研究では、貯水池における洪水時濁水挙動について、実務的検討における精度向上を目指した数値モデルを開発した。本論文の結論は、以下の通りである。

1) シミュレーションモデル構成において、従来の多くのモデルと同様に鉛直二次元の解析モデルとしたが、流動解法については、SIMPLE 法及び $k-\epsilon$ 乱流モデルを導入し、より精度の高い解析を行えるようにした。

2) ストークス則では、過剰に大きく評価されがちであった濁質の沈降速度の与え方に関して、確率的沈降現象という考え方を導入した新しいモデル化を提案した。

なお本論文で行った濁質沈降のモデル化は、かなり大胆であると言え、個々の仮定については、はっきりしない点も多い。しかしながら、貯水池内の濁質挙動という大枠の現象に対する再現性は、かなり良好であったと言える。したがって、濁質の沈降には、本研究で提案したような確率・統計的な考え方で定式化されうる現象が関与していることが想像される。

今後は、他ダムの濁水現象に対しても、このモデルの再現性を確認したいと考えている。検証事例が増えることにより、モデルの再現性及び適用範囲などが、はっきりしてくるであろう。また、より詳細な室内実験・現地実験を実施し、“本当の”濁質沈降メカニズムを解明していくべきであることは、言うまでもない。

参考文献

- 1) 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, 第237号, pp.37-50, 1975.
- 2) 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.
- 3) 岩佐義明, 松尾直規, 井上素行: 貯水池における濁度解析について, 京大防災研年報, vol.21, pp.319-329, 1978.
- 4) 福岡捷二, 福岡祐介, 村田和夫, 荒井健: 成層化した二次元

表-2 10 μ m 以下の成分に対するストークス則による沈降速度の設定

粒径 [μ m]			沈降速度 [m/s]	頻度 [%]
起	至	代表値		
0.34	0.61	0.45	1.78×10^{-7}	0.9
0.61	1.08	0.81	5.62×10^{-7}	1.2
1.08	1.91	1.44	1.78×10^{-6}	2.4
1.91	3.40	2.55	5.62×10^{-6}	5.2
3.40	6.05	4.54	1.78×10^{-5}	8.3
6.05	10.76	8.07	5.62×10^{-5}	6.0

貯水池に流入する密度流の実験的研究, 土木学会論文報告集, 第293号, pp.65-77, 1980.

- 5) 堀田哲夫, 陳飛勇, 山下芳浩, 東海林光: 成層型ダム湖における濁水特性と選択取水効果に関する事例的研究, 水工学論文集, 第46巻, pp.1079-1084, 2002.
- 6) 梅田 信, 横山勝英, 石川忠晴, 銭 新, 高橋迪夫: セケ宿貯水池における濁質の流入・流動・堆積過程に関する観測と数値シミュレーション, 土木学会論文集, No.656 / II-52, pp.255-268, 2000.
- 7) 米山 望, 井上素行: 三次元数値解析による揚水発電所貯水池内水温・濁質挙動の予測手法, 土木学会論文集, No.684 / II-56, pp.127-140, 2001.
- 8) 例えば, 堀田哲夫, 浅枝 隆, 富岡誠司, 陳 飛勇, 山下芳浩, 東海林光: 下層密度流によるダム貯水池の濁水長期化現象とその対策, 水文水資源学会誌, 第16巻, pp.236-245, 2003.
- 9) 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), 京大防災研年報, 19B, pp.311-327, 1976.
- 10) 鈴木伴征, 石川忠晴, 銭 新, 工藤健太郎, 大作和弘: 利根川河口堰下流部における貧酸素水塊の発生と流動, 水環境学会誌, vol.23, pp.624-637, 2000.
- 11) 梅田 信, 長峯智徳, 長廣 遙, 石川忠晴, 宇多高明: 霞ヶ浦湖心部における底泥の巻き上げ過程に関する研究, 水工学論文集, Vol.45, pp.1171-1176, 2001.
- 12) 梅田 信, 富岡誠司: ダム貯水池における洪水時微細土砂の流下過程について, 河川技術論文集, 第9巻, pp.359-364, 2003.
- 13) 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, vol.134, pp.37-50, 1975.

(2003.9.30 受付)