

七ヶ宿貯水池における洪水時の濁質の流動、 堆積過程に関する観測と数値解析

FIELD OBSERVATION AND NUMERICAL SIMULATION ON TURBIDITY AND
SEDIMENTATION IN THE SHICHIKASHUKU RESERVOIR

梅田 信¹・横山勝英²・石川忠晴³

Makoto UMEDA, Katsuhide YOKOYAMA and Tadaharu ISHIKAWA

¹学生会員 工修 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 環境理工学創造専攻 日本学術振興会特別研究員
(〒226-0065 横浜市緑区長津田町 4259)

²学生会員 工修 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 環境物理工学専攻 日本学術振興会特別研究員

³フェロー 工博 東京工業大学教授 大学院総合理工学研究科 環境理工学創造専攻

Field observations were carried out for a flood intruding into the Shichikashuku reservoir. The measurements can be classified into three types: (1) measurement of the turbidity of inflow water, (2) survey of the flow structure of turbid water in the reservoir, (3) measurement of the precipitation amount in the reservoir. The results show the characteristics of movement of wash load in the reservoir.

The current in the reservoir during the flood is numerically simulated using 3-D $k-\epsilon$ turbulent model in order to reproduce the turbidity profiles and the sedimentation distribution. The calculation results were in accordance with the measurement, and the model presented in this paper will give valuable information for the management of the reservoir.

Key Words : field measurements, 3-D $k-\epsilon$ model, reservoir sedimentation

1. はじめに

河川上流部において洪水時に流送される土砂の大半は、河床材料よりはるかに細粒な濁質であり、ウォッシュロードに区分される。しかし大きなダム湖が建設されると、微細な濁質も湖内で沈降するようになり、その量の大きさのために、有効貯水容量に影響を及ぼす。また、濁質に付着する栄養塩も沈降するため、貯水池の長期的水質環境に影響を及ぼす。

濁質の堆積による有効貯水容量の減少は、湖内の堆積分布に依存する。すなわち、水利用頻度の高い浅部への堆積は影響が大きく、深部への堆積は影響が少ない。また、沈殿した栄養塩の溶出は溶存酸素状態に依存するので、水温躍層より浅い部分への堆積と深い部分への堆積とでは、その後の水質変化への影響度は異なるであろう。さらに、浅い部分に堆積した濁質は、風浪や乱流によって再浮上して移動する確率が高い。以上のことから、流入した濁質の堆積空間分布の把握は、貯水池管理上重要であると考えられる。

このため、貯水池に流入した細粒土砂の流動及び堆積現象に関する研究は古くから行われている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。これらの多くは、室内実験に基づくもので、また解析も比較

的単純な境界形状に対してのものだった。一方、近年、水理計測技術の進歩と共に、濁水流動の状況を現地で計測できるようになってきた⁵⁾。また、計算機の発達にともない、乱流モデルを用いた三次元流動計算が可能となった⁶⁾。

そこで本研究では、宮城県七ヶ宿貯水池において著者らが観測した濁質流動・堆積現象⁵⁾⁷⁾について、 $k-\epsilon$ モデルを用いた三次元数値シミュレーションを行い、濁度と流速の鉛直分布及び堆積空間分布の再現性を検討した。

2. 現地観測

(1) 観測地の概要

図-1に七ヶ宿貯水池流域を示す。同貯水池は、阿武隈川水系白石川に建設された多目的貯水池であり、総貯水容量は約1億 m^3 、最大水深は約45m、湛水延長は4.1kmである。流域面積は237 km^2 あり、その93%は森林で、残りの主な土地利用は田畑、集落となっている。

主な流入河川は白石川と横川で、両河川の流域面積の合計は全流域面積の78%を占める。貯水池上流端には貯砂ダムが設けられており、白石川と横川は貯砂ダムの

直上流で合流し、貯水池へ流入する。そのため、ベッドロードはここで遮断され、貯水池へ流入するのは、ほとんどがウォッシュロード成分であると考えられる。したがって、貯砂ダム越流水の濁度を計測しておけば、貯水池に流入する土砂量を概略把握できる。

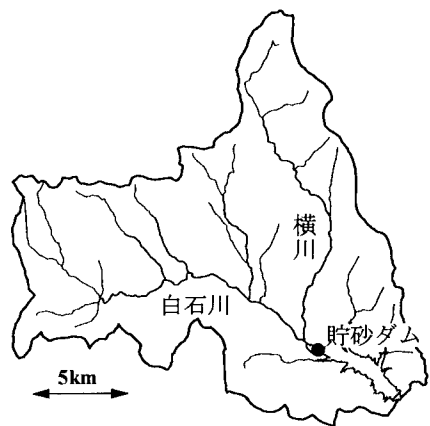


図-1 セケ宿貯水池流域

(2) 観測項目

筆者らは、1996年9月22～23日に東北地方を通過した台風17号による洪水を対象として、次に述べる現地観測を実施した。貯水池の平面形状と観測点の配置を図-2に示す。

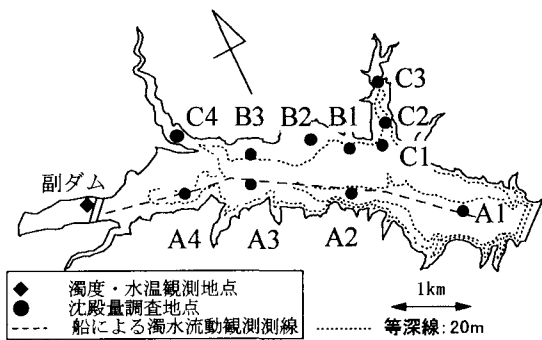


図-2 貯水池観測点

- ①流入水濁度測定：貯砂ダム地点に自記式濁度計（アレック電子製MTB-16k）及び自記式水温計（アレック電子製MDST）を設置して、流入水の濁度、水温を1時間間隔で計測した⁷⁾。
- ②貯水池内濁水観測：音響測深機とADCPを船に搭載して走行し、濁水の流動状態を観測した。また、時々船を停止し、多項目水質計（アレック電子製ACL-1180）を用いて、水温、濁度の鉛直分布を計測した⁵⁾。
- ③貯水池内沈殿量調査：図-1に示した観測点に沈殿物採取用のビンを設置して、洪水時に流入した濁質の沈殿量分布を調べた⁷⁾。

なお、洪水前の貯水池成層状態は別途計測している。その結果によれば、水深15m付近に水温差約12度の強い季節成層が形成されていた。また、湖内の濁度は5ppm以下

であり、洪水の濁度と比べれば無視できる濃度であった。

(3) 観測結果の概要

図-3は、貯砂ダム地点における流量、濁度、水温及びダム管理所で計測された風向風速である。なお、流量と

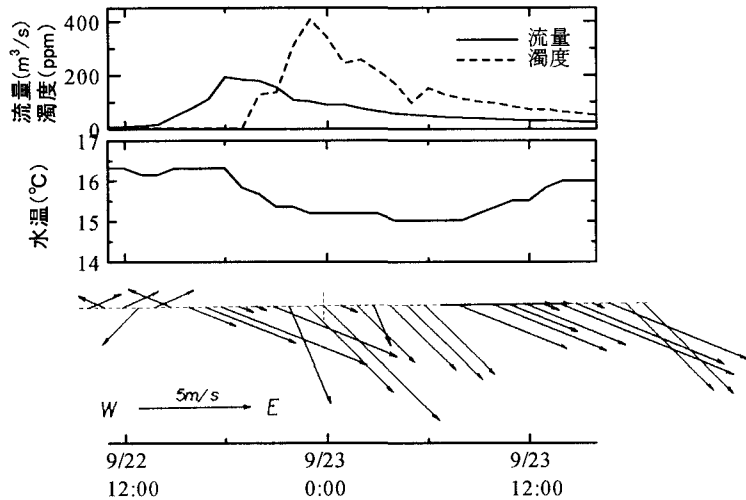


図-3 洪水観測時系列データ

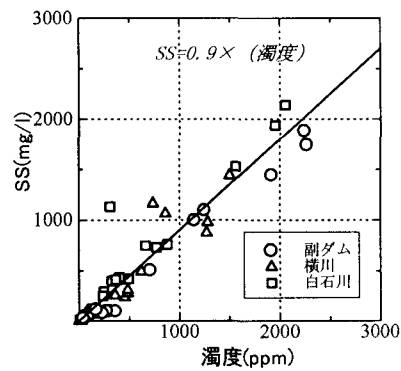


図-4 濁度-SS相関図

風のデータは建設省の計測記録を用いている。また、計測に用いた濁度計は50μmカオリンについてキャリブレーションされたSS換算値を出力するようになっており、その出力値とSSの関係は別途行われた採水分析から図-4のように求められている⁷⁾。

また、流量と濁度の立ち上がりに比較的大きな時差が生じていることが分かる。これは貯砂ダムに貯留されていた水が洪水初期に押し出された後に、洪水濁水が貯砂ダム地点に到達するためである。このことは、濁度の上昇と水温の低下の時刻が対応していることから分かる。なお、次節で述べる数値シミュレーションでは、図-3のデータを入力条件として使用する。

図-5は、図-2に破線で示した滞筋沿いでの濁水流動観測の結果を示したものである。上から順に、音響測深機、ADCP、水質計による観測結果である。図の左側が河川流入部、右側が堤体になっている。

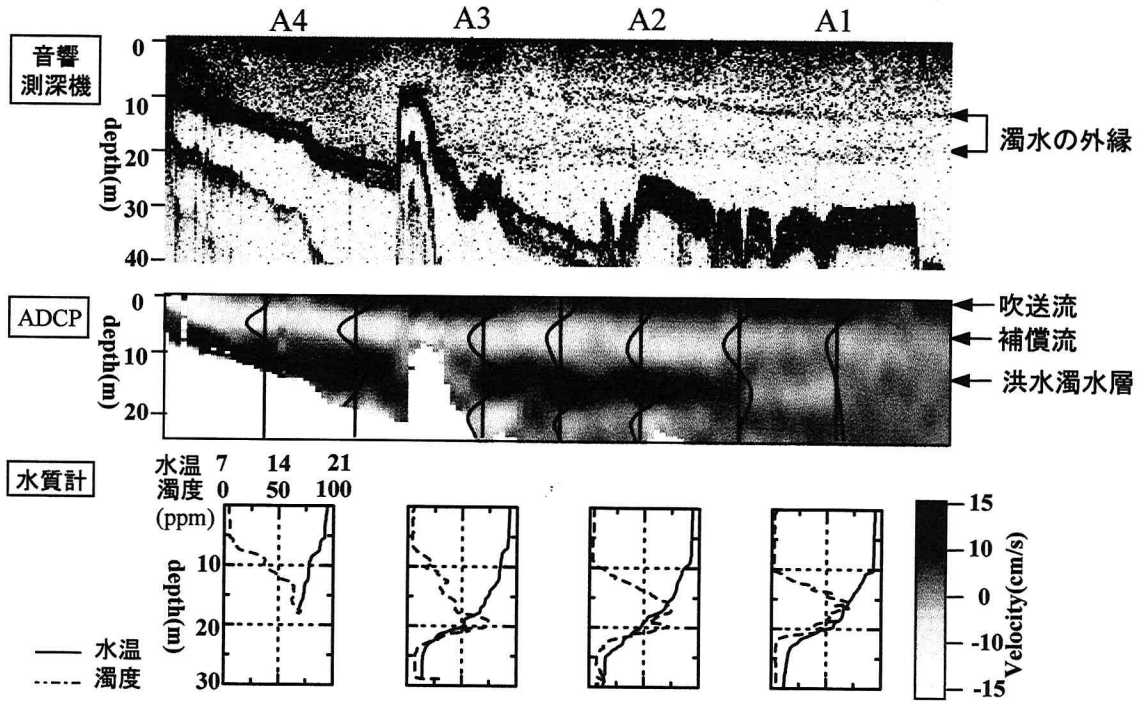


図-5 貯水池内濁水観測結果

これらの図から、流れの特性が以下のように読みとれる。流入濁水は傾斜ブルームとして斜面上を流れ下った後、A3地点とA4地点の中程で湖底より離れ、水温躍層に沿って水深10～20m付近に水平に侵入している。また、流速図より、表層には吹送流が発達し、吹送流と濁水流の間に補償流が起きていることが分かる。濁度の最大値は、70ppm程度であり、図-3に示した流入水の最大濁度の5分の1程度となっている。

なお、③の沈殿量調査結果については、計算結果とともに4章で示す。

3. 計算モデル

本章では、三次元k-εモデルを用いて流入濁水の流動と濁質の沈降を計算し、濁度分布、流速分布及び堆積量分布の観測結果と比較する。

(1) 基礎方程式

基礎方程式は、以下に示すとおりである。ただし、z方向の運動方程式には、ブシネスク近似を施している。

x方向の運動方程式：

$$\frac{Du}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_L \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_L \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_T \frac{\partial u}{\partial z} \right) = f_v - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1)$$

y方向の運動方程式：

$$\frac{Dv}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_L \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_L \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_T \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -f_u - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (2)$$

z方向の運動方程式：

$$\frac{Dw}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_L \frac{\partial w}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_L \frac{\partial w}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_T \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \delta g \quad (3)$$

乱れエネルギー k の保存式：

$$\frac{Dk}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_{Lk} \frac{\partial k}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_{Lk} \frac{\partial k}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_{Tk} \frac{\partial k}{\partial z} \right) = P_r + G - \varepsilon \quad (4)$$

散逸率 ε の保存式：

$$\begin{aligned} \frac{D\varepsilon}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_{L\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_{L\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_{T\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) \\ = C_1 \frac{\varepsilon}{k} P_r + C_1 (1 - C_3) \frac{\varepsilon}{k} G - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (5)$$

相対浮力の保存式：

$$\frac{D\delta}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_{L\delta} \frac{\partial \delta}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_{L\delta} \frac{\partial \delta}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_{T\delta} \frac{\partial \delta}{\partial z} \right) = S \Rightarrow 0 \quad (6)$$

濁度の拡散方程式：

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + (w - w_0) \frac{\partial C}{\partial z} \\ - \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_{LC} \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_{LC} \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_{TC} \frac{\partial C}{\partial z} \right) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

連続式：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

ただし

$$\begin{aligned} P_r = \nu_t \left[2 \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} + \right. \\ \left. \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right\} \right] \end{aligned}$$

$$G = -g \nu_{T\delta} \frac{\partial \delta}{\partial z}, \nu_T = \nu + \nu_t = \nu + C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \nu_L = 0.01 L^{4/3}$$

$$\nu_{Lk} = \nu_L, \nu_{Tk} = \nu_T, \nu_{L\varepsilon} = 0.77 \nu_L, \nu_{T\varepsilon} = 0.77 \nu_T$$

$$\nu_{L\delta} = 1.2 \nu_L, \nu_{T\delta} = 1.2 \nu_T, \nu_{LC} = \nu_L, \nu_{TC} = \nu_T$$

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_3 = 1.0, C_\mu = 0.09$$

ここで、 x 、 y は水平座標、 z は鉛直上向き座標、 u 、 v 、 w は、それぞれ x 、 y 、 z 方向の流速、 k は乱れエネルギー、 ε は粘性散逸率、 δ は相対密度差、 C は濁度である。また p は圧力、 ν_t は鉛直方向の渦動粘性係数、 ν_{tz} は鉛直方向の実効動粘性係数、 ν_L は水平方向の渦動粘性係数、 ν_{Li} 、 ν_{Lj} は、それぞれ物理量 i の鉛直、水平方向の渦動拡散係数、 L は計算メッシュサイズ、 f はコリオリ係数 ($8.6 \times 10^{-5} 1/s$)、 g は重力加速度、 w_0 は濁質粒子の沈降速度である。

相対密度差は水温と濁度の関数と考えられるが、今回の観測データによると水温の影響の方がはるかに大きい。そこで本研究では、 δ が水温のみによって定まるとしている。また、日射の影響や大気との間の熱輸送を考えると、厳密には δ は保存量ではない。しかし、洪水流入前に季節成層が発達していることと計算期間が短いことからその影響は小さいと考え、生成項 S をゼロとしている。

C_1 、 C_2 、 C_μ は k - ε モデル固有の係数であり、ここでは標準的な値を使用している。一方 C_3 については、0～1の範囲で種々の提案がなされているが⁹⁾、ここでは道奥⁹⁾及び尹¹⁰⁾を参考にして、 $C_3=1$ とする。

以上の基礎方程式を有限体積法で離散化し、SIMPLE解法により解いた。

(2) 計算条件

計算格子にはスタガード格子を用いた。鉛直方向の格子間隔 Δz は、全領域で1mとした。一方、水平面内の格子間隔については、貯水池の地形的特徴から、諸量の変化率は横断方向に大きいと予想されるので、長軸方向の間隔 Δx を100m、短軸方向の間隔 Δy を50mとした。また流入部付近では特に流れの変化率が大きいと考えられるので、上流端付近の約5分の1の区間では、 $\Delta x=50m$ 、 $\Delta y=25m$ とした。なお、計算時間ステップは、 $\Delta t=60$ 秒としている。

計算期間は、洪水発生数時間前の1996年9月23日午前11時から、ほぼ洪水が収まった24日午後5時までの30時間とした。

初期流速場は静止状態とした。また、初期水温状態として、図-6に示す洪水発生直前の水温観測結果を与えた。 k と ε の初期値は、計算が不安定にならない程度に十分小さな値を与えた。

流速の境界条件として、水面はrigid wall、側面・湖底面での流速は0とした。また、側面・湖底面では k 、 ε 、 δ のフラックスは0とした。なお、実際の洪水時には水位が約2m上昇したが、図-5、6の水位スケール及び水温躍層、濁水層の水深から考えて、無視できる水位変動だと考え、水面をrigid wallと仮定した。

計算入力となる流入水の流量、水温、濁度及び風向・風速は、図-3に示した1時間ごとの観測値を与えた。なお、貯水池脇の支川からの流入は不明であることから、貯水池への流入は貯砂ダムを通過するもののみとした。前述のように、貯砂ダム上流の流域面積は、全流域面積

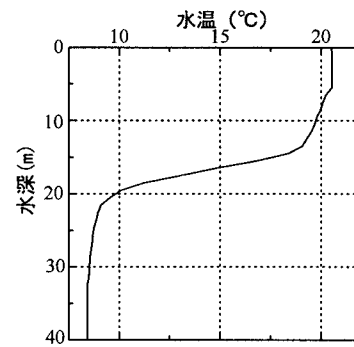


図-6 初期水温プロファイル

の78%であることから、このことによる誤差は、それほど大きくないと考えられる。

上流端の流入条件と下流端の流出条件は、以下の考えのもとに与えた。流入部及び流出部付近では、後述するように急変流的な流れが形成されるが、その水平スケールは数十mであり、本研究で設定しているグリッドサイズと同程度である。したがって、本計算のスキームで局所的な急変流を表現しようとすると無理が生じる。そこで、流入部及び流出部から少し離れた地点で予想される流れを、以下のように境界条件として与えることとした。

流入水は、貯砂ダムを越流した後に湖水の下に潜り込み傾斜プルームを形成すると考えられるが、この部分は急変流的であり、本研究のグリッドサイズでは表現できない。そこで、上流端断面の下半分から濁水が流入するものとして、流量をその断面積で除して求めた流速を上流端境界条件として与えた。

流出部の流速分布は、以下のように与えた。まず、本計算では水面をrigid wallとして扱っているので、流入量と等しい放出量を設定することとした。七ヶ宿貯水池ではオールサーチャージ表層放流としているので、洪水吐を越流する部分は急変流となり、本研究のグリッドサイズでは表現できない。しかし洪水吐から少し離れた地点では、水温躍層より上部の水が流出口に向かうと考えられる。そこで、洪水吐き口の位置を考慮して、堤体の北側半分の幅で、水深15mまでの水が流れ出るものとして、流出量をその断面積で除した流速を下流端境界条件として与えた。

水面での応力条件は、以下のように与えた。

$$\nu_T \frac{\partial u}{\partial z} = (U_*^2)_x \quad (9)$$

$$\nu_T \frac{\partial v}{\partial z} = (U_*^2)_y \quad (10)$$

なお、 U_*^2 は風応力の x 方向、 y 方向成分であり、風応力の絶対値は、次の式から求めた¹¹⁾。

$$\rho_w U_*^2 = 0.5 \times 10^{-3} \rho_a U_{10}^{2.5} \quad (11)$$

U_{10} は10m高風速だが、ここではダム管理所で計測されている風速記録を与えた。 ρ_a は空気の密度、 ρ_w は水の密度である。

濁質濃度 C についての湖底境界条件は、湖底面における堆積を考慮し、

$$v_{TC} \frac{\partial C}{\partial z} + w_0 AC = 0 \quad (12)$$

という条件を与えている¹²⁾。ここに、 A は底面吸収係数である。本研究では、静的沈降を仮定して、 $A=1$ とした。

濁質粒子の沈降速度 w_0 は、以下のように決定した。まず、貯水池内で採取した沈殿物の粒度組成を遠心沈降式の粒度分析装置（島津製作所製SA-CP3L）で分析した。この装置は、ストークス則を仮定して沈降速度から粒径

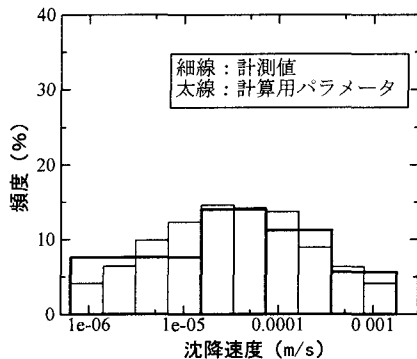


図-7 濁質沈降速度分布

を導出するようになっている。そこで、出力された粒度分布にストークスの式を当てはめて、沈降速度の分布を逆算したところ、図-7の細線の結果を得た。そこで、計算に用いる代表沈降速度と各成分割合を図-7の太線及び表-1のように定めた。

表-1 計算に用いた濁質粒径と対応する沈降速度

粒径 (μm)	沈降速度 (m/s)	割合
31.232	8.00×10^{-4}	12%
14.142	1.63×10^{-4}	24%
6.404	3.35×10^{-5}	30%
1.951	3.11×10^{-6}	34%

4. 計算結果

(1) 濁水流の鉛直分布

滞筋上の観測点(A1～A4)における貯水池長軸方向流速及び濁度の鉛直分布の計算結果を、観測結果と併せて図-8に示す。どちらも観測時点と同じ時刻の計算値を示している。水面付近では順流となっているが、これは下流向きの風によって吹送流が形成されているためである。また、水深15m付近を中心として濁水流が侵入し、下流まで到達している。さらに、これらの流れの間には、上流へ向かう補償流も生じている。

計算結果は、流速分布については多少誤差は大きいものの、濁度の観測結果と計算結果は概ね一致していることが分かる。

(2) 堆積量分布

計算終了時点(T=30時間)には、濁水流フロントがダムサイトに到達し、ほぼ水平な成層状態が形成された。したがって、これ以後は大きな移流は生じないと考えられる。また、前述のように本貯水池は表層放流を行っているが、下流側表層付近の濁度はほぼゼロ(図-8下段の右図)であるため、ほとんどの濁質はそのまま貯水池に沈降すると考えられる。そこで本研究では、T=30時間以降については浮遊している濁質が垂直に沈降するものとして取り扱い、すでに堆積している量と合わせて、洪水後の堆積量分布を推算した。その結果を図-9に示す。

(厳密には、すべての濁質が沈降するまでの計算を続行すべきだが、三次元計算であるため、計算時間が膨大になるため簡略化した。)

図-9では、平面分布図が計算結果を示し、棒グラフで

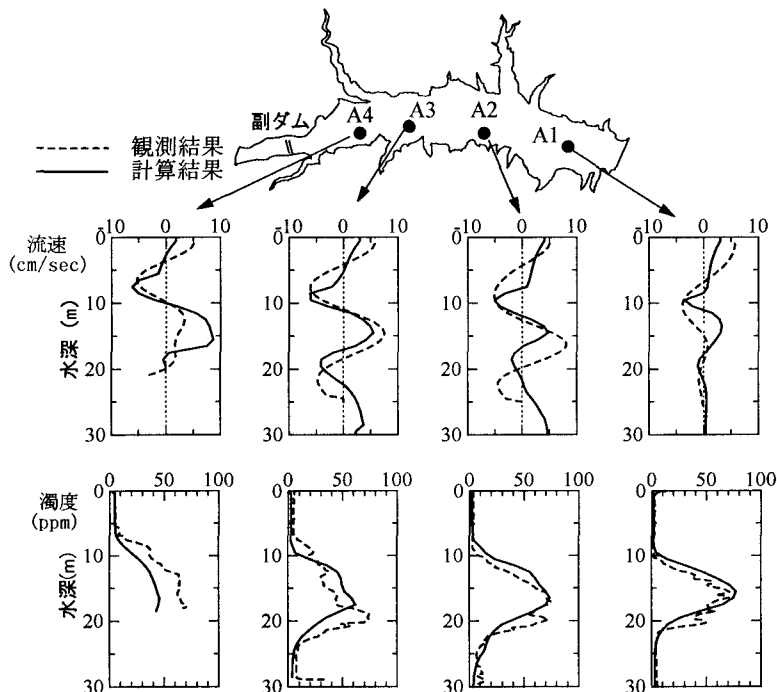


図-8 流速・濁度プロファイルの比較

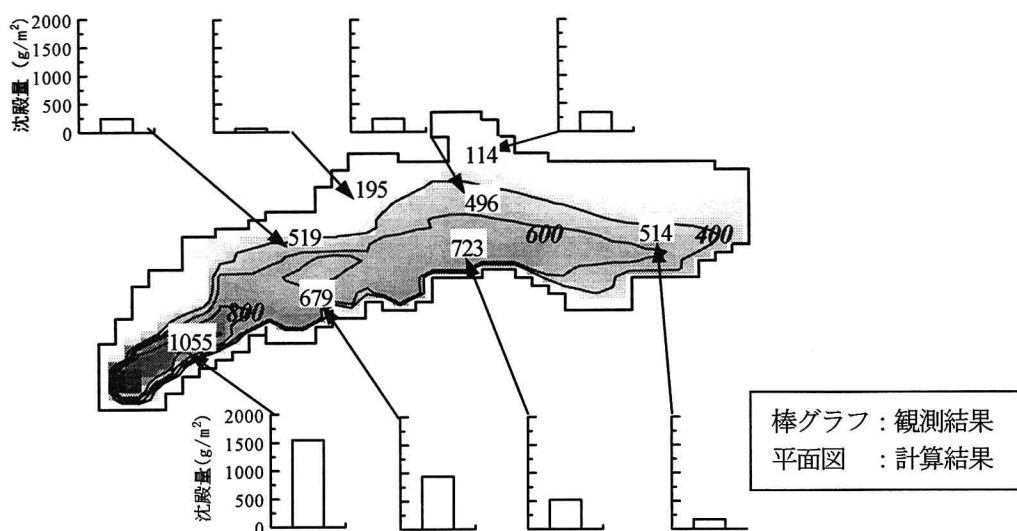


図-9 濁質堆積量分布の比較

それぞれの観測地点における観測結果を表している。また観測地点での計算堆積量は、矢印の先端に記してある。ただし、図-4に示したように $SS=0.9$ (濁度)であるので、この関係を用いて換算した結果を堆積量として比較している。

計算結果も観測結果も、貯水池南寄りの滞筋側により沈殿しているという傾向が一致している。計算堆積量を観測堆積量と比較すると、観測値が上流から下流に向かって漸減しているのに対し、計算値は比較的一様になっている。すなわち、上流側では過小評価、下流側では過大評価となっている。

このような堆積分布は、表-1に設定した沈降速度の割合の影響を強く受けている。実際、この割合を10%内外で変化させると堆積分布はかなり変化する。したがって、計算精度をさらに向上させるには、懸濁物質の沈降速度を精度良く推定する必要があると考えられる。

5. おわりに

本研究では、宮城県の七ヶ宿貯水池を対象に、洪水時の濁水流動及び濁質堆積過程現象を $k-\epsilon$ モデルによる3次元流動シミュレーションによって再現した。その結果、流速、濁度、濁質堆積量のいずれの計算結果も、観測値とある程度一致した。

このような数値シミュレーションは貯水池管理のための有効なツールになると考えられる。しかし、今回の計算は、上流端及び下流端の局所的な急変流を表現できるほど精緻では無いため、ある程度便宜的な境界条件を与えている。また、計算精度を向上させるには、懸濁物質の沈降速度の推定精度を上げる必要があると考えられる。この点については、今後検討して行きたいと考えている。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、建設省東北地方建設局の助力を頂いた。記して謝意を表する。

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、土木学会論文集、No.237、pp.37-50、1975.
- 2) 福岡捷二、福島祐介：成層化した二次元貯水池で分岐する密度流の解析的研究、土木学会論文集、第249号、pp.73-84、1980.
- 3) 福岡捷二、福島祐介：成層化した二次元貯水池で分岐する密度流の実験的研究、土木学会論文集、第293号、pp.85-77、1980.
- 4) Parker,G.,Garcia,M.,Fukushima,Y and W. Yu:Experiments on Turbidity Currents over Erodible Bed, J. of Hydraulic Research, vol. 251, No.1,1987.
- 5) 横山勝英、石川忠晴：貯水池に侵入する濁水流の可視化計測、可視化情報、vol.16、Suppl.,No.1、pp.139-142、1987.
- 6) 横山勝英、石川忠晴、正岡孝治、植木洋：七ヶ宿貯水池における春期プランクトンブルームの時空間分布特性、水環境学会誌、第21巻、第1号、pp.23-28、1998.
- 7) 梅田信、横山勝英、石川忠晴：七ヶ宿貯水池におけるウォッシュロードの流入・流動・堆積過程に関する観測と考察、水工学論文集、第41巻、pp.777-782、1997.
- 8) 吉澤徹 他：乱流解析、数値流体シリーズ3、東京大学出版、p.229、1995.
- 9) 道奥康治、辻本剛三、宮本仁志：吹送密度流の流動・混合特性、水工学論文集、第37巻、pp.293-298、1993.
- 10) 尹 鐘星、中辻啓二、村岡浩爾：風応力作用化の成層水域における密度界面の挙動及び混合特性—水理実験と数値実験—、水工学論文集、第39巻、pp.811-818、1995.
- 11) 水理公式集、土木学会、p578、1985.
- 12) 小松利光、押川英夫、矢野真一郎、山崎智弘：沈降性粒子の平面2次元拡散堆積モデルの高精度化、海岸工学論文集、第44巻、pp.1026-1030、1997.

(1998. 9. 30受付)