

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

米山 望¹・井上素行²

¹ 正会員 (財) 電力中央研究所 我孫子研究所 (270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

² 正会員 東京電力(株) (100-0011 東京都千代田区内幸町 1-1-3)

揚水発電所貯水池特有の三次元乱流や水温・濁質濃度による密度変化と流れの相互作用、大幅な水位変動を考慮した水温・濁質挙動の高精度予測手法を開発した。本手法の特徴は、(1) 水温・濁質の移流拡散による貯水池水の密度変化を考慮した三次元乱流解析手法を用いていること (2) 貯水池内の密度成層度と乱流量を考慮して求めた渦動粘性係数を水温・濁質の拡散に反映させることで、密度成層の破壊及び形成過程を解析できること (3) VOF 法を用いて揚水発電所貯水池の水面挙動を解析していることである。

揚水発電所貯水池での流動、水温・濁質濃度分布の現地測定結果および同貯水池の数理模型実験による水温・濁質濃度分布の測定結果と本手法による解析結果を比較したところ、本手法の妥当性が確認された。

Key Words: pumped storage reservoir, water temperature, turbidity, 3D numerical simulation, free surface

1. はじめに

揚水発電所は上部貯水池と下部貯水池の間を水路で接続し、昼間の電力需要が多いときに上部貯水池から下部貯水池に水を落として発電し、電力需要の少ない夜間に下部貯水池から上部貯水池に揚水運転により水を汲み上げて、ふたたび昼間の発電に使うというように一定量の水を繰り返し使用するシステムである。

また、揚水発電所は発電出力が大きいため使用水量が 300 ~ 600m³/s 程度と非常に多く、かつ運転時間を 8 時間程度確保するため貯水池の容量が一般の水力発電所に比べて大きい。

以上のような特徴を有する揚水発電所貯水池に、上流域から降雨に伴って大量の濁水が流入した場合には、微粒 (10 ミクロン以下) の濁質が長期に亘り浮遊滞留することにより貯水池内平均濁質濃度の高い状態が継続し、その結果下流河川が長期に亘って濁ることがある。

このような濁水長期化現象を軽減するため、電力会社では揚水運転を自主的に規制するケースが生じている。

一方、近年の電力需要の昼夜の格差拡大に伴う大型火力、原子力等のベース電源との組み合わせによる効率的な発電運用、さらに非常用電源としての起動性の良さ等から、揚水発電所の運転時間はここ数十年間で約 2 倍にも増加しており、電力の安定供給上その重要性はますます増大している。

著者らは、揚水発電所における濁水長期化現象を軽減し、かつ、発電所機能を極力確保するための合理的

なダム・発電所運用方策の研究に取り組んでいる。本論では、揚水運転時の大流量の放流が貯水池内に浮遊滞留している濁質の巻き上げ挙動や濁水長期化現象に与える影響を定量的に検討するため、三次元数値解析を用いた貯水池内水温・濁質挙動の予測手法を開発するとともに、その妥当性を現地測定結果および数理模型実験結果を用いて検証した結果を報告する。

貯水池における濁質挙動予測については、これまで幾つかの手法が開発されている。その代表的なもの一つに (財) 電力中央研究所が開発した鉛直二次元解析法¹⁾があり、長期的な水温・濁質濃度変化の予測手法として多くの水力発電所に適用されている。また、二次元解析法としては、岩佐らが開発した鉛直二次元解析法^{2),3)}があり、河川からの濁水の流入過程とそれに伴う成層の変化等、洪水後の濁水長期化現象の解析に用いられている。さらに、三次元解析法の開発⁴⁾が行われつつあるが、揚水発電所で見られる以下のような現象を高い精度で予測できる手法はこれまでに開発されていない。

- ・ 揚水運転時の貯水池内流況は、洪水並の大流量放流が水中噴流となり、地形の影響を受けた循環流を伴う複雑な三次元乱流となる。
- ・ 貯水池内の流動は、貯水池内水温分布および上部貯水池と下部貯水池の水温差に大きく影響される。
- ・ 濁水流入後、貯水池内の場所による濁質濃度差は非常に大きくなるため、濁質による密度変化が流

れに与える影響を無視できない。

- ・取水口からの水中噴流が貯水池下層に浮遊滞留している濁質を巻き上げて、貯水池上層の濁質濃度を上昇させるとともに、下層の濁質濃度を低下させる。
 - ・揚水運転は通常深夜に8時間程度行われるが、その間水位が数メートルから数十メートル上昇し、また、揚水流量も時間的に変化するため、貯水池内の流況は絶えず変化する
- そこで、下記の機能を組み込んだ予測手法を開発した。
- ・詳細な解析メッシュ上での密度変化を考慮した三次元乱流解析により、水中噴流とそれに伴う循環流を適切に再現するとともに、水温・濁質挙動による密度変化と流れの相互作用を精度よく評価する。
 - ・下層に浮遊滞留している濁質の巻き上げに影響を与える鉛直方向の流速は、静水圧近似を用いない鉛直方向運動方程式により直接解析する。
 - ・下層に浮遊滞留している濁質の巻き上げに影響を与える乱流拡散を精度よく再現するため、乱流量と鉛直方向の密度差を考慮して、渦動粘性係数を変化させる。
 - ・水面の解析法にVOF法を用いることにより、揚水運転に対応した貯水池全体の水位上昇および噴流近傍の部分的な水面変動を精度よく再現する。

2. 予測手法の開発

(1) 基礎方程式

貯水池水の密度変化と流れの相互作用を適切に評価するために、密度変化を伴う非圧縮性流体解析手法にしたがって貯水池水の流動および水温・濁質挙動を予測する。ここで、圧縮性流体解析と非圧縮性流体解析の区別は、運動によって生じる圧力変化に伴って密度が変化する効果(圧縮性の効果)を考慮するか否かである。本解析では密度を水温と濁質濃度のみの関数として圧縮性の効果は無視している。すなわち貯水池水の密度 ρ [kg/m³]は水温 T [°C]および濁質濃度 C [kg/m³=10³mg/l]を用いて

$$\rho = \rho_0(T) + \left(1 - \frac{\rho_0(T)}{\rho_{sd}}\right) C \quad (1)$$

により定まるとする。ここで、 ρ_0 [kg/m³]：清水の密度、 ρ_{sd} [kg/m³]：濁質粒子の密度であり、清水の密度 ρ_0 と水温 T の関係は物性値表から近似した次式で与える。

$$\rho_0(T) = 4.0704 \times 10^{-5} T^3 - 7.7617 \times 10^{-3} T^2 + 5.5301 \times 10^{-2} T + 999.91 \quad (2)$$

流速の各方向成分 u_i [m/s]、圧力 p [N/m²]、水温 T および濁質濃度 C の瞬時の挙動は、

- ・運動方程式($i = 1, 2, 3$)

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = \rho G_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3)$$

- ・水温 T の移流拡散方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(T u_j - \alpha \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = 0 \quad (4)$$

- ・濁質濃度 C の移流拡散方程式

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(C u_j + C w_j - \beta \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) = 0 \quad (5)$$

- ・質量保存方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (6)$$

によって記述することができる。ここで、 G_i [m/s²]：単位質量あたり外力の各方向成分、 ν [m²/s]：動粘性係数、 α [m²/s]：熱拡散率、 β [m²/s]：濁質拡散率、 w_j [m/s]：濁質の沈降速度であり、

$$\tau_{ij} = \rho \nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \delta_{ij} \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (7)$$

である。ここで、 $\delta_{i,k}$ はクロネッカーのデルタであり、 i, j, k について各方程式の同一項内で2度同じ記号が現れるものに対しては、1,2,3にわたり総和を取るものとする。また、貯水池内の濁質粒径を一様粒径 d として扱うことが可能で、粒子レイノルズ数 $Re(w_0 d / \nu)$ が1以下の場合、沈降速度 $w_j = (0, 0, -w_0)$ は

$$w_0 = \frac{g}{18\nu} \frac{\rho_{sd} - \rho}{\rho} \cdot d^2 \quad (8)$$

と表せる。

次に、これらを用いて乱流解析を行うため平均操作を施す。式(1)、式(4)、式(5)および式(8)は、変数 u_i, ρ, T, C を

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (9)$$

等とレイノルズ平均量とその変動量にわけた後、式全体をレイノルズ平均する。ここで、 $\bar{\quad}$ ：レイノルズ平均、 \prime ：レイノルズ平均変動量である。

式(3)および式(6)は、流速 u_i を

$$u_i = \tilde{u}_i + u''_i \quad (10)$$

として、ファール平均量とその変動量に、圧力 p をレイノルズ平均量とその変動量にわけたあと式全体をレイノルズ平均する。ここで、 $\tilde{\quad}$ ：ファール平均、 $\prime\prime$ ：ファール平均変動量である。

ファール平均は密度加重平均とも呼ばれ、

$$\tilde{u}_i = \frac{\overline{\rho u_i}}{\bar{\rho}} \quad (11)$$

と表される⁵⁾。 $\overline{\rho u_i}$ は、流速 u_i にファール平均を適用すれば、式 (11) を変形して

$$\overline{\rho u_i} = \bar{\rho} \cdot \tilde{u}_i \quad (12)$$

となり、密度 ρ を平均変動量と変動量にわけないため、式を簡略化できる。

式 (1)、式 (3) ~ 式 (6) を上記の手順で平均操作すると、

・平均操作した水温 T と濁質濃度 C と貯水池水密度 ρ の関係式

$$\bar{\rho} = \rho_0 (\bar{T}) + \left(1 - \frac{\rho_0 (\bar{T})}{\rho_{sd}}\right) \bar{C} \quad (13)$$

・平均操作した運動方程式 ($i = 1, 2, 3$)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\rho u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{\rho u_i u_j}}{\partial x_j} &= \bar{\rho} G_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{\tau}_{ij} - \overline{\rho u_i' u_j'} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、上式を導く際に、式 (3) の左辺第二項に関して、以下のような変形を用いている。

$$\begin{aligned} \overline{\rho u_i u_j} &= \overline{\rho \tilde{u}_i \tilde{u}_j} + \overline{\rho \tilde{u}_i u_j'} + \overline{\rho u_i' \tilde{u}_j} + \overline{\rho u_i' u_j'} \\ &= \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j + \overline{\rho u_i' u_j'} \end{aligned} \quad (15)$$

・平均操作した水温 T の移流拡散方程式

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{T} \cdot \tilde{u}_j - \alpha \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} + \overline{T' u_j'} \right) = 0 \quad (16)$$

・平均操作した濁質濃度 C の移流拡散方程式

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{C} \cdot \tilde{u}_j + \bar{C} \cdot \tilde{w}_j - \beta \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} + \overline{C' u_j'} \right) = 0 \quad (17)$$

・平均操作した質量保存方程式

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{\rho \tilde{u}_j}}{\partial x_j} = 0 \quad (18)$$

・平均操作した沈降速度式

$$\tilde{w}_0 = \frac{g}{18\nu} \frac{\rho_{sd} - \bar{\rho}}{\bar{\rho}} \cdot d^2 \quad (19)$$

が得られる。

また、乱流エネルギー ($k \equiv \overline{\rho u_i' u_i'} / 2\bar{\rho}$) 方程式は、

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho} k}{\partial t} + \frac{\partial \overline{\rho \tilde{u}_j k}}{\partial x_j} &= - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\bar{\rho} \nu + \frac{\bar{\rho} \nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \\ &- \overline{\rho u_i' u_j' \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j}} - \bar{\rho} \epsilon \end{aligned} \quad (20)$$

乱流エネルギー散逸率 ($\epsilon \equiv \nu \overline{\rho u_i' u_i' u_i' u_i'}$) 方程式は、

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho} \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \overline{\rho \tilde{u}_j \epsilon}}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\bar{\rho} \nu + \frac{\bar{\rho} \nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \\ &+ C_{\epsilon 1} \bar{\rho} \frac{\epsilon}{k} \overline{u_i' u_j' \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j}} - C_{\epsilon 2} \bar{\rho} \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (21)$$

と表される⁵⁾。ここで、

$$\bar{\tau}_{ij} = \bar{\rho} \nu \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \delta_{ij} \frac{2}{3} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \right) \quad (22)$$

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \bar{\rho} \nu_t \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \delta_{ij} \frac{2}{3} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \bar{\rho} k \delta_{i,j} \quad (23)$$

$$\nu_t = \begin{cases} \frac{C_\mu}{1+0.1B} \frac{k^2}{\epsilon} & (B > 0) \\ C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} & (B \leq 0) \end{cases} \quad (24)$$

$$-\overline{T' u_j'} = \frac{\nu_t}{Pr_T} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \quad (25)$$

$$-\overline{C' u_j'} = \frac{\nu_t}{Pr_C} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} \quad (26)$$

また、 $Pr_T = 1/1.6^6)$ 、 $Pr_C = 1/1.2^7)$ 、 $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\epsilon = 1.3$ 、 $C_{\epsilon 1} = 1.45$ 、 $C_{\epsilon 2} = 1.92$ 、 $C_\mu = 0.09$ とした。

これらの平均操作に際し、変動成分の高次の相関項は無視している。

式 (20)、式 (21)、式 (23) および式 (24) では密度変化がない場合とはほぼ同一の形式を用いているが、本研究で対象とする貯水池水のように、急激な平均密度の変化がない流れではその正当性が認められている⁵⁾。

式 (24) 中の B は密度成層度の渦動粘性係数 ν_t への影響を考慮した係数であり、次節において述べる。

以上の式 (2)、式 (13) ~ 式 (26) を必要に応じて離散化して用いる。

(2) 密度成層度の渦動粘性係数 ν_t への影響

乱れエネルギーに対する密度成層の強さを表す無次元数として、局所 Richardson 数

$$Ri = - \frac{g}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_3} / \left(\frac{\partial \tilde{u}_1}{\partial x_3} \right)^2 \quad (27)$$

がよく用いられる。これは、浮力による乱流エネルギーの消滅と剪断力による乱流エネルギーの生成の比を密度勾配、流速勾配で表したものである。

牛島⁶⁾ は式 (24) 中の B を

$$B = 25 Ri = -25 \frac{g}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_3} / \left(\frac{\partial \tilde{u}_1}{\partial x_3} \right)^2 \quad (28)$$

とすると渦動粘性係数 ν_t が牛島が実施した実験結果⁶⁾ をよく再現することを明らかにしている。しかし、本手法に式 (28) を適用したところ同式中の流速勾配が大き

く変動し、安定に計算できなかった。一方, Launder⁸⁾は, $\partial \bar{u}_1 / \partial x_3$ の代わりに同じ次元を持つ ε/k を用いて

$$B = -\frac{g}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_3} / \left(\frac{\varepsilon}{k}\right)^2 \quad (29)$$

とする式を提案している (ただしこの場合は, $k = \overline{u_i' u_i'}/2$, $\varepsilon = \nu \overline{u_{i,j}' u_{i,j}'}$ である)。この式も牛島の実験結果をよく再現する⁶⁾。式(29)に2.(1)で定義した k, ε を代入して用いたところ安定に計算できたため, 本手法ではこの方法を用いた。

(3) 圧力誤差方程式

本予測手法では SIMPLE 法⁹⁾に基づいた流動解析を行っている。その際, 流速・圧力の修正に用いられる圧力誤差方程式は以下のように導出される。なお, 以下の説明では

$$\tilde{u}_i (i = 1, 2, 3) \rightarrow U, V, W \quad \bar{p} \rightarrow \rho \quad \bar{p} \rightarrow p \quad (30)$$

と表し, 添え字ルールを以下のようにした。

- ・ 計算セル C を考え C の中心で定義される値には添え字 C で表す。
- ・ 計算セル C から見て, 東西南北上下方向の隣接する計算セルを $C_E, C_W, C_N, C_S, C_T, C_B$ と表し, これらのセルの中心で定義される値にも同じ大文字添え字をつけて表す。
- ・ 計算セル C と隣接する計算セルの境界面で定義される値には, 隣接する計算セルの添え字を小文字にして表す。
- ・ 計算セル C の間隔を (x 方向の場合) Δx_C と表し, 計算セル C の中央と隣接する計算セルの中央間の距離を (隣接するセルが C_E の場合), Δx_e と表す。

貯水池水の運動方程式 (式(14)) の流速 U_e に関する離散化式は,

$$\rho_e U_e = \rho_e^0 U_e^0 + \frac{p_C - p_E}{\Delta x_e} \Delta t + [\text{移流項その他}]^0 \Delta t \quad (31)$$

計算セル C の質量保存方程式 (式(18)) の離散化式は

$$0 = \frac{\rho_C - \rho_C^0}{\Delta t} + \frac{\rho_e U_e - \rho_w U_w}{\Delta x_C} + \frac{\rho_n V_n - \rho_s V_s}{\Delta y_C} + \frac{\rho_t W_t - \rho_b W_b}{\Delta z_C} \quad (32)$$

と書ける。ここで上付き添え字 0 は Δt 秒前の値であることを示す。

流速値および圧力値は誤差を含んだ推定値 \hat{U}, \hat{p} と考えられ, 推定値を真値に誤差 U''', p''' を加えたものと定義すると,

$$\hat{U} = U + U''' \quad (33)$$

$$\hat{p} = p + p''' \quad (34)$$

と書ける。推定値を用いて求めた質量保存方程式 (式(32)) の誤差を D とすれば, 式(32)は以下のように書き換えられる。

$$D = \frac{\rho_C - \rho_C^0}{\Delta t} + \frac{\rho_e \hat{U}_e - \rho_w \hat{U}_w}{\Delta x_C} + \frac{\rho_n \hat{V}_n - \rho_s \hat{V}_s}{\Delta y_C} + \frac{\rho_t \hat{W}_t - \rho_b \hat{W}_b}{\Delta z_C} \quad (35)$$

式(35)から式(32)を辺々引き算すると

$$D = \frac{\rho_e U_e''' - \rho_w U_w'''}{\Delta x_C} + \frac{\rho_n V_n''' - \rho_s V_s'''}{\Delta y_C} + \frac{\rho_t W_t''' - \rho_b W_b'''}{\Delta z_C} \quad (36)$$

が得られる。

同様に, 離散化した運動方程式 (式(31)) を推定値および真値で表し辺々引き算すると,

$$\rho_e U_e''' = \frac{p_C''' - p_E'''}{\Delta x_e} \Delta t \quad (37)$$

となるので, 式(37)を式(36)に代入して整理すると圧力誤差方程式

$$A_e p_C''' + A_e p_E''' + A_w p_W''' + A_n p_N''' + A_s p_S''' + A_t p_T''' + A_b p_B''' = D / \Delta t \quad (38)$$

が得られる。ここで,

$$A_e = \frac{-1}{\Delta x_C \Delta x_e}, A_w = \frac{-1}{\Delta x_C \Delta x_w}, A_n = \frac{-1}{\Delta y_C \Delta y_n}, A_s = \frac{-1}{\Delta y_C \Delta y_s}, A_t = \frac{-1}{\Delta z_C \Delta z_t}, A_b = \frac{-1}{\Delta z_C \Delta z_b}, A_c = (-1) \times (A_e + A_w + A_n + A_s + A_t + A_b)$$

である。

(4) 水面の取り扱い

水面形状および水面変形の解析には Hirt らが開発した VOF 法¹¹⁾に改良を加えたものを三次元化して用いている^{12), 13)}。VOF 法は各計算セル毎に流体充填率 F (液体セルは $F = 1$, 気体セルは $F = 0$, 共存セルは $0 < F < 1$) を定義して水面形状を表現し, 水面の移動は F 値の移流で表現する。

F の移流は計算セル C の場合, 式(18)に基づいた次式で算定する。

$$0 = (F_C^n \rho_C^n - F_C \rho_C) \Delta x_C \Delta y_C \Delta z_C + [Q_F]_e - [Q_F]_w + [Q_F]_n - [Q_F]_s + [Q_F]_t - [Q_F]_b \quad (39)$$

ここで、 Q_F は計算セルの各境界面を Δt 間に横切る質量である。また、上付き添え字 n は、 Δt 秒後の値であることを示す。

長期の継続計算では F の値に誤差が蓄積して液体セルの F 値が 1 から離れることがある。これを放置すると計算領域内全体が影響を受け質量保存が成り立たなくなることがある。本予測手法では以下に示す方法で F 値を補正した。

Δt 秒前における液体セル C の流体充填率を $F_C^0 (\neq 0)$ とすると、液体セル C のこの時点における質量過不足 E_F は、

$$E_F = \rho_C^0 (1 - F_C^0) \Delta x_C \Delta y_C \Delta z_C \quad (40)$$

となる。この過不足を Δt 秒間で解消するために、質量保存方程式 (式 (35)) の左辺に $E_F / \Delta t \Delta x_C \Delta y_C \Delta z_C$ を加えた次式

$$D = \frac{\rho_C - F_C^0 \rho_C^0}{\Delta t} + \frac{\rho_e \hat{U}_e - \rho_w \hat{U}_w}{\Delta x_C} + \frac{\rho_n \hat{V}_n - \rho_s \hat{V}_s}{\Delta y_C} + \frac{\rho_t \hat{W}_t - \rho_b \hat{W}_b}{\Delta z_C} \quad (41)$$

で求めた D を圧力誤差方程式 (式 (38)) に代入した。これにより、(不足の場合) 周囲から多めに質量が流入することとなり、流速値の誤差と同時に質量の過不足を解消することができる。

(5) 移流拡散方程式の離散化

水温・濁質濃度の移流拡散方程式 (式 (16) および式 (17)) は、両式を積分した後、離散化して解析に用いる。濁質の移流拡散は以下の式となる。

$$0 = (F_C^n C_C - F_C C_C) \Delta x_C \Delta y_C \Delta z_C + [C_F]_e - [C_F]_w + [C_F]_n - [C_F]_s + [C_F]_t - [C_F]_b \quad (42)$$

ここで、 C_F は隣接する計算セルとの境界を横切る濁質量であり、鉛直境界面中央での平均鉛直流速と沈降速度の和が W_{r_i} と表されるとき、

$$\frac{[C_F]_i}{\Delta x_C \Delta y_C} = \max(W_{r_i}, 0.0) F_C C_C - \max(-W_{r_i}, 0.0) F_T C_T - \frac{F_T + F_C}{2} \left(\frac{v_{tT} + v_{tC}}{2Pr_C} + \beta \right) \frac{C_T - C_C}{\Delta z_i} \quad (43)$$

と表せる。なお、上式中の $\max()$ は、かつこの大きい値をとる関数とする。水温も同様な式を用いる。

(6) 境界条件

境界条件は、液体と地形の境界 (固液境界)、液体と気体の境界 (気液境界: 水面)、および、解析領域境界 (液液境界: 取水口内部の境界 (水面無し) と上流側境界 (水面あり)) において、流速、圧力、乱流量 (乱流エネルギーと乱流エネルギー散逸率)、水質 (水温と濁質濃度) を設定する。このうち、乱流エネルギー散逸率、水質はともに、境界近傍で境界面の法線方向には値が変化しない (以下、勾配 0 と呼ぶ) とし、境界面に接する流速成分は境界面上で 0 とする。その他について、境界毎に示す。

a) 固液境界

法線方向流速成分を 0 とし、圧力は勾配 0、乱流エネルギーは境界面に接する計算セル内で 0 とする。濁質は底面境界において沈降速度に従って解析領域外に沈降させた。なお、今回対象とした解析では、貯水池底面に高流速が到達しないため、底面に到達した濁質の巻き上げは考慮せず、巻き上げの対象を貯水池内に浮遊滞留している濁質のみとする。

b) 気液境界

法線方向流速成分は水面の上昇速度を流速定義位置に外挿して与えた。圧力については、共存セル内の水面位置で 0 として共存セルに接する液体セルの圧力との線形補間により共存セル内圧力定義位置での値を求めた。水面での乱流量は欄津らの研究¹⁴⁾を参考にして、乱流エネルギーは共存セル内に接する気体セルの乱流エネルギー値を共存セルの値の 80% とする。

c) 液液境界 (水面無し)

取水口内部の境界では、取水口に到達する導水路の曲がりなどの影響で取水口出口での流速分布が上方に偏っている等、水路トンネルの線形の影響を強く受けることが実測により確認されている。本検証解析では、取水口直後 (10m) の流速分布が実測と一致するような、流入流速および乱流境界条件を与えた。圧力は勾配 0 とする。

d) 液液境界 (水面含む)

貯水池全体を再現できない場合、水面を持つ液液境界において流出入させながら、計算領域内の水位を制御する必要がある。本予測手法では、計算領域内で液液境界面に接する水面の平均水位が所定の値になるように、液液境界において圧力値を設定した。

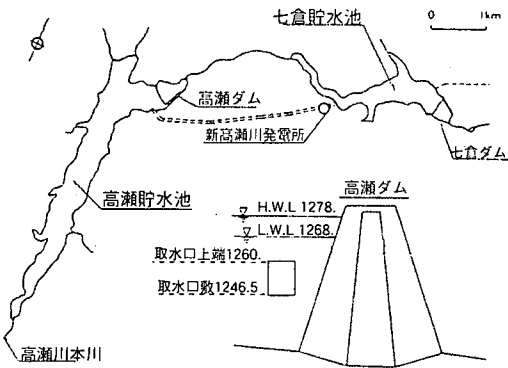
(7) 予測解析の流れ

予測解析の流れは SIMPLE 法のアルゴリズムに乱流、水温・濁質および水面変動の評価を加えた以下のとおりとした。

- i. 時刻 t ですべての物理量の値が既知とする。

表一 高瀬ダム貯水池および発電所諸元

高瀬ダム	種類	ロックフィルダム
	高さ ダム天端標高	176m E.L.1280m
高瀬貯水池	総貯水量	76,200,000m ³
	有効貯水量	16,200,000m ³
	利用水深	10m
	高水位(H.W.L)	EL.1278m
	低水位(L.W.L)	EL.1268m
	湛水面積 湛水長	1.78km ² 4.95km
取水口	取水口数	2門
	形状寸法 (幅)	15.5m
	形状寸法 (高さ)	13.8m
	敷標高	EL.1246m
新高瀬川 発電所	最大出力	128万kW
	最大使用水量 (発電時) (揚水時)	660m ³ /s 440m ³ /s
	有効落差	243.6m



図一 高瀬流域概要図

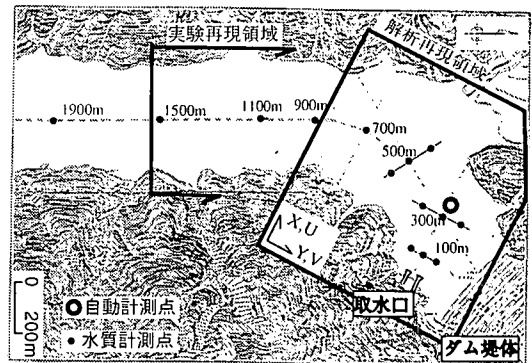
- ii. 式 (24) を用いて、渦動粘性係数 ν_t を求める。
- iii. 運動方程式 (式 (14)) の離散化式から Δt 後の流速の推定値 $\hat{U}, \hat{V}, \hat{W}$ を求める。
- iv. 式 (16) ~ 式 (21) の離散化式等から Δt 後の乱流エネルギー k および乱流エネルギー散逸率 ϵ 、水温 T 、濁質濃度 C を求め、式 (13) から Δt 後の貯水池水の密度 ρ を求める。
- v. 式 (41) によりすべての液体セルについて質量保存の誤差 D を求める。
- vi. すべての液体セルの誤差 D の最大値が一定値以下の場合、流速の推定値 $\hat{U}, \hat{V}, \hat{W}$ を真値 U, V, W として次に進み、そうでない場合、すべての液体セルについて作成した圧力誤差方程式 (式 (38)) からなる連立一次方程式を解き、式 (37) および式 (33)、式 (34) を用いて流速・圧力を修正し v に戻る。
- vii. 式 (39) に基づいて水面形状を変形させ、水面での流速、圧力の境界条件、水面を持つ液液境界での圧力の境界条件を設定し、ii. に戻る。

3. 予測手法の検証

本予測手法を高瀬貯水池に適用して、手法の妥当性を検証した。この検証では、流況および流速の現地測定結果と本予測手法を用いた解析結果を比較した後、小規模な洪水が発生した翌日の揚水運転を対象として運転前後に実施した水温・濁質濃度分布の現地測定結果と解析結果を比較した。また、複数の異なる初期水温・濁質濃度分布条件下での挙動を検証するため、濁水流動の水理模型実験結果と比較した。

(1) 対象貯水池の概要

対象とした高瀬貯水池は出力 128 万 kW の新高瀬川発電所 (混合揚水式) の上部貯水池である。流域の概要を図一 1、関連する諸元を表一に示す。

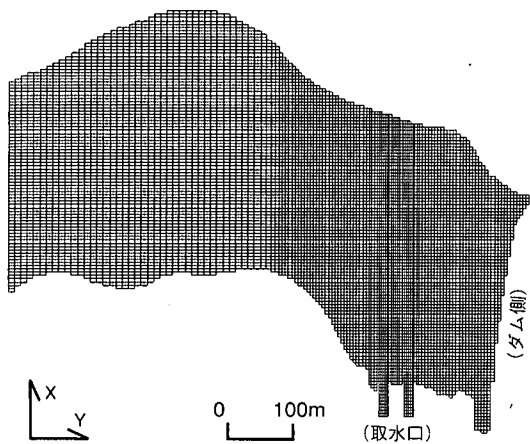


図二 高瀬貯水池

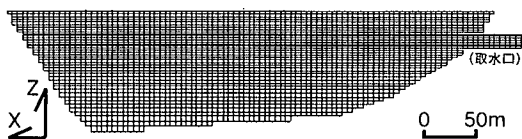
取水口はダム直上流の右岸側に位置しており、1号取水口 (ダム堤体側) および2号取水口 (上流側) の二基が設置され、各取水口にそれぞれ二台の水車発電機 (一台あたりの最大揚水流量 110m³/s) が接続されている。H.W.L (標高 1278m) での貯水池の形状を図一 2 に示す。

(2) 解析範囲およびメッシュ分割

解析範囲は揚水運転時の流況分布を考慮して、取水口、ダム堤体および取水口の対岸を含むおよそ 300m × 700m の領域とした (図一 2 参照)。解析地形は、貯水池地形を測量図から、取水口部を設計図から読みとり作成し、座標系は X 軸を取水口中心軸に合わせた三次元座



(a) 取水口を含む水平断面 (E-E 断面)



(b) 取水口を含む鉛直断面 (B-B 断面)

図-3 解析地形メッシュ図

標系とした。

解析メッシュ図を図-3に示す。解析メッシュは取水口からの高流速水中噴流部およびその周辺を細かくした可変メッシュとし、総メッシュ数は1,031,888 (X方向164×Y方向143×Z方向44)、メッシュ間隔はX方向5m、Y方向3.1~10m(平均6.23m)、Z方向1.9~10m(平均2.76m)とした。

(3) 現地測定結果と解析結果の比較

a) 実測の概要

揚水時の貯水池内の水平流況測定を平成9年8月30日、揚水運転時の取水口前面における定点流速分布測定、鉛直流況測定、濁水中の懸濁質粒度分布測定および水温・濁質濃度測定を平成10年9月15日~21日に行った。

流況測定および定点流速分布測定は、観測船をトランシット (TOPCOM 社製) による直線誘導と光波測距儀 (ジオメーター社製) による距離誘導を併用して陸上からトランシーバにより測定位置に誘導し、超音波ドップラー流速計 (RDI 社製) を用いて行った。測定は午前6時から8時にかけて行なった。流況測定は観測船を航行させながら、水平流況測定は水深方向に10mピッチ、鉛直流況測定は水深方向に2mピッチで流速値を測定した。また、定点流速分布測定は各定点ごとに10分間停止して水深方向に2mピッチで測定し

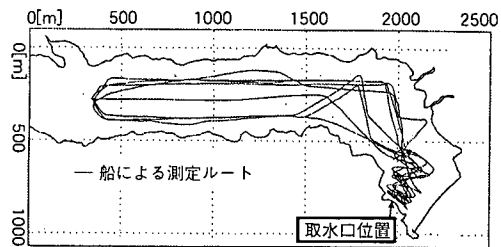


図-4 水平流況測定説明図

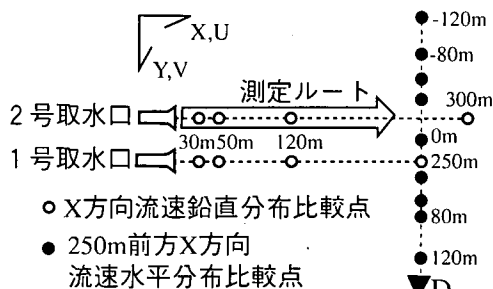


図-5 定点流速分布測定、鉛直流況測定説明図

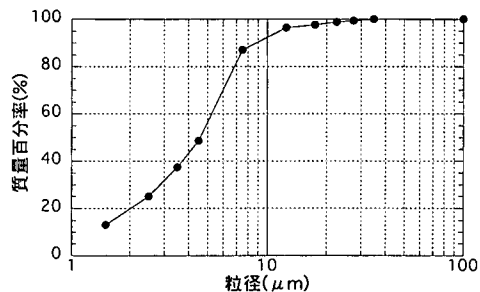


図-6 現地粒度分布図

た。水平流況測定ルートを図-4に、定点流速分布測定の計測点、鉛直流況測定ルートを図-5に示す。高瀬貯水池、七倉貯水池 (下部貯水池) では、両貯水池内にそれぞれ設置されている自動計測点 (高瀬貯水池については図-2参照) において水温・濁質濃度鉛直分布を計測しているが、さらに空間的な分布を把握するため、平成10年9月の測定期間中の8時と15時に高瀬貯水池の水質計測点 (図-2参照) において水温・濁質濃度分布の測定を行った。濁質濃度は光透過式濁度計、水温をサーミスタを用いて計測した。

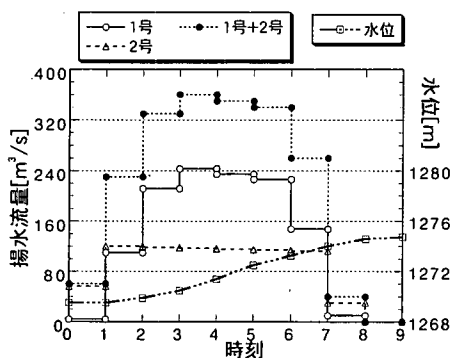
濁水中の懸濁質の粒度分布測定の結果、高瀬貯水池内の濁質は図-6に示すような粒度分布を持ち中央粒径は4.8μmであった。

b) 検証解析の概要

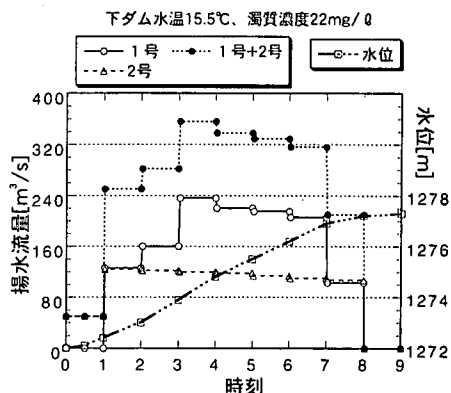
検証解析は図-7、図-8、図-9に示す運用データに基づく水位、流量条件で行った。この際、解析範

表一 2 検証解析の概要（現地測定結果との比較）

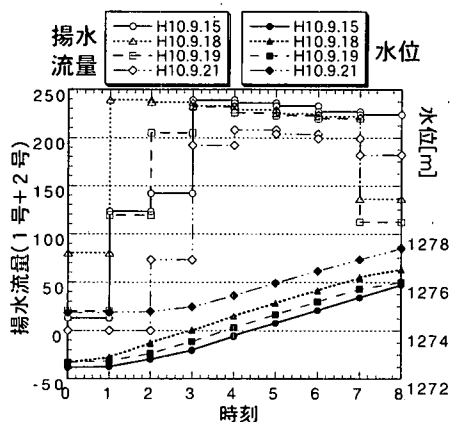
ケース名	測定日	解析との比較項目	揚水水温	揚水濁質濃度
現地解析 1	H9.8.30	揚水時の貯水池内の水平流況測定	12.5℃	21mg/l
現地解析 2	H10.9.17	揚水前後（前日 15 時、当日 8 時）の水質比較	15.5℃	22mg/l
現地解析 3	H10.9.18	揚水時の X 方向流速横断分布定点測定（40m 間隔）	12.0℃	20mg/l
〃	H10.9.15	揚水時の X 方向流速横断分布定点測定（60m 間隔）	12.0℃	20mg/l
現地解析 4	H10.9.19	揚水時の X 方向流速縦断分布定点測定および鉛直流況測定（2号取水口前面）	12.5℃	19mg/l
現地解析 5	H10.9.21	揚水時の X 方向流速縦断分布定点測定（1号取水口前面）	12.0℃	20mg/l



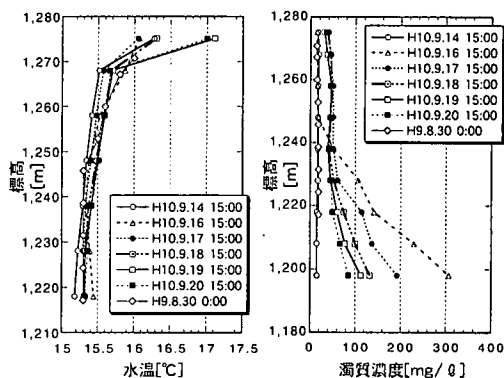
図一 7 平成 9 年 8 月 30 日運用データ



図一 8 平成 10 年 9 月 17 日運用データ



図一 9 流速測定時運用データ



図一 10 現地水質測定結果

図の上流側境界（液境境界）における平均水位を運用データに合わせた。また、図一 9 に示した日時の運用では 1 号取水口、2 号取水口ともほぼ同じ揚水流量であった。検証解析ケースと比較対象とした計測項目および揚水の水質条件を表一 2 に示す。水温・濁質濃度分布の初期条件は揚水運転前日の 15 時に測定した結果をもとに作成した。実測結果を図一 10 に示す。同図のうち、平成 9 年 8 月 30 日 0 時のデータは自動計測

点で測定された値であり、平成 10 年 9 月のデータは水質計測点（全 14 点）の計測値を標高別に平均した値である。平成 10 年 9 月 16 日のデータに基づいて水温・濁質挙動を比較した現地解析 2 の初期条件は水質計測点の空間的な配置を考慮して作成し、他の解析の初期条件は標高別に平均した分布を解析範囲全体に与えて作成した。また、流入水の水質は七倉貯水池での現地測定結果から定め、濁質粒子は現地の中央粒径

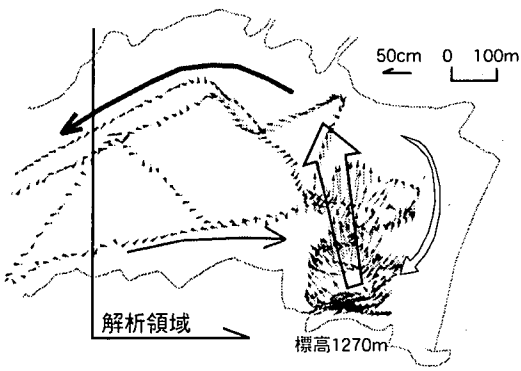


図-11 実測流況（水平断面）

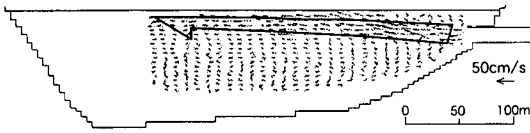


図-12 実測流況（2号取水口中央）

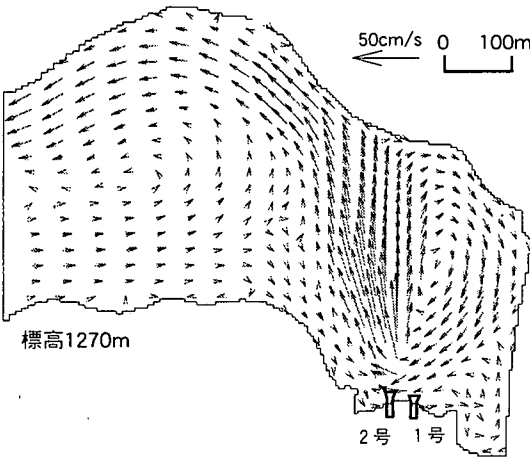


図-13 現地解析1の流況（水平断面）

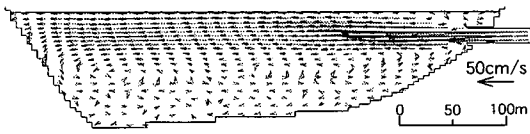


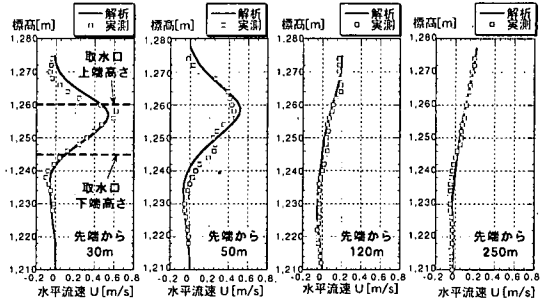
図-14 現地解析3の流況（2号取水口中央）

である $4.8\mu\text{m}$ の一様粒径を持つものとした。

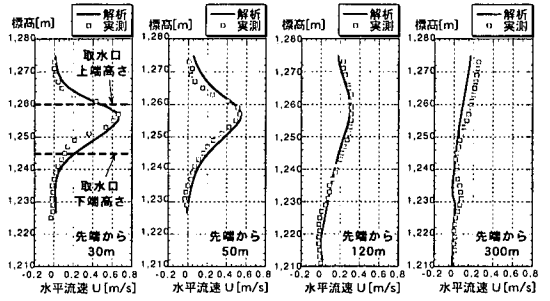
c) 流況の比較

図-11は平成9年8月30日の水平流況測定で得られた揚水時の表層（標高1270m）での流動形態、図-12は平成10年9月19日の鉛直流況測定で得られた2号取水口前面の流動形態である。

取水口からの噴流が対岸に達したあと、ダム側に旋



(a) 1号取水口前方のX方向流速鉛直分布（現地解析5）



(b) 2号取水口前方のX方向流速鉛直分布（現地解析4）

図-15 流速分布の実測と解析の比較

回する流れと上流に向かう流れに別れること、上流に向かった流れの一部は旋回し取水口に向かうことが観測されている。このように地形の影響を受けた流れの特徴は他の揚水発電所でも見られる¹⁵⁾。

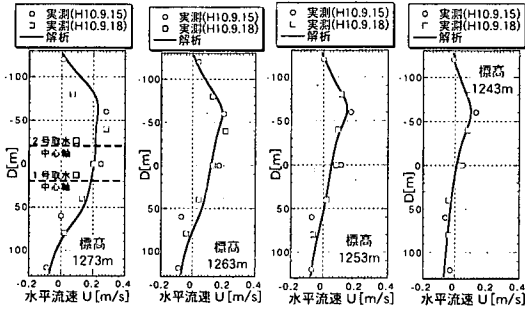
また、取水口からの速い流れは水面近くを流れ、取水口より底層では方向の定まらない小さな流速となることが観測されている。

図-13は現地解析1から得られた午前7時時点の水平断面（表層レベル：標高1270m）での流況であり、図-14は現地解析3から得られた鉛直断面（2号取水口中央）での流況である。両図から検証解析結果は現地において測定された揚水運転時の貯水池内の流れの全体的な特徴をよく再現している。

d) 流速分布の比較

図-15(a), (b)はそれぞれ、平成10年9月21日、19日の実測結果と検証解析結果（現地解析5および4：午前7時時点）の比較である。

また、図-16(c)は平成10年9月15日および18日の現地測定結果と検証解析結果（現地解析3：午前7時時点）の比較である。計測点および図-16(c)中のDの位置は図-5に示した。



(c) 取水口から250m前方でのX方向流速横断分布(現地解析3)

図一 16 流速分布の実測と解析の比較

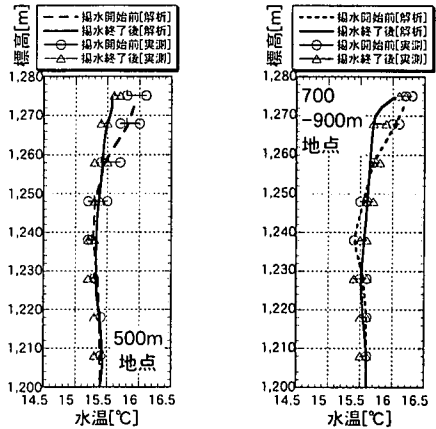
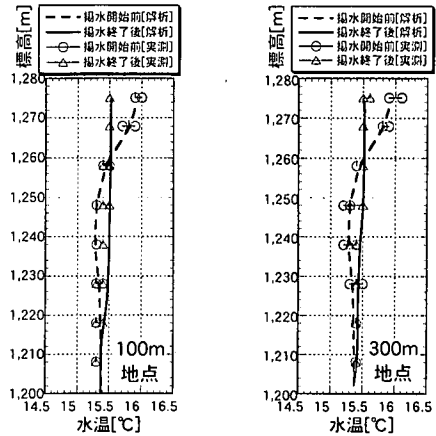
現地測定結果から取水口前面の流れは、①両取水口からの流れは標高1256～1258m付近にピークを持つ水中噴流となること、②先端から120m地点において1号取水口前面では流速のピークが水面近傍の1270m付近で最大20cm/s、2号取水口前面では1260mで最大30cm/sになるなど両取水口で異なる流速分布となること、③250m前方の横断分布に関しては、放水流の流速のピークが上流側(D=60m付近)に偏り、ダム側(D=100m)では逆向きの流れが生じること、1273mではD=60mから20m程度まで20cm/s以上の流速値を持つことが観測されている。

図一 15 および図一 16 から検証解析結果はこれらの特徴を精度よく再現していることがわかる。

e) 水温分布の比較

図一 17 は小規模な洪水が流入した直後の平成10年9月16日15時の水温・濁質濃度鉛直分布の実測結果を初期条件として翌17日0時から8時にかけて実施された揚水運転時の運用データに基づいた解析(現地解析2)を行い、揚水運転終了時の17日8時に行われた水温鉛直分布実測結果と解析結果を比較した結果である。実測結果のうち100m地点、300m地点、500m地点は図一 2 に示した横断方向計測点三点の最大値と最小値を、700-900m地点は両地点の測定値をプロットした。また、解析結果に関しては100m地点、300m地点、500m地点は三点を結ぶ線分上の標高別の平均値、700-900m地点は両地点を結ぶ線分のうち解析領域に含まれる部分の標高別平均値とした。

実測結果から①水面近傍においては取水口に近い部分では流入水(15.5℃)により水温躍層が破壊され、取水口から遠くなるにつれてその破壊度合いが小さくなることや、②100m地点および300m地点では標高1210mから水面までの領域がおおむね流入水温と同じになることが観測されている。図一 17 から検証解析結



図一 17 実測と解析の水温分布の比較

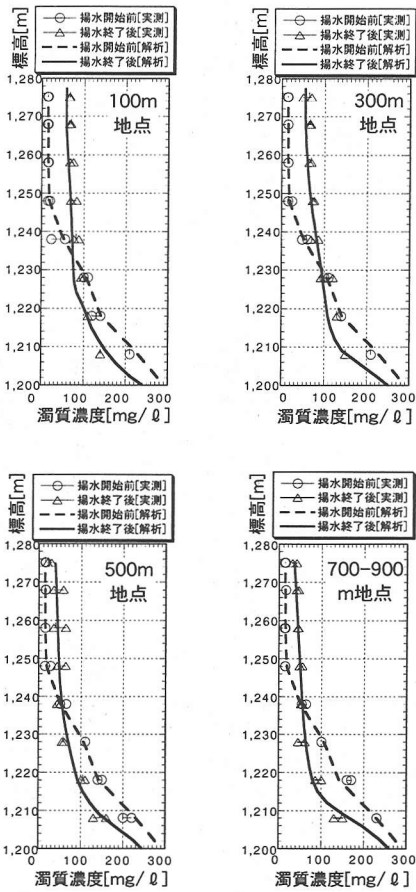
果はそれら全体的な特徴を精度よく再現していることが分かる。

f) 濁質濃度分布の比較

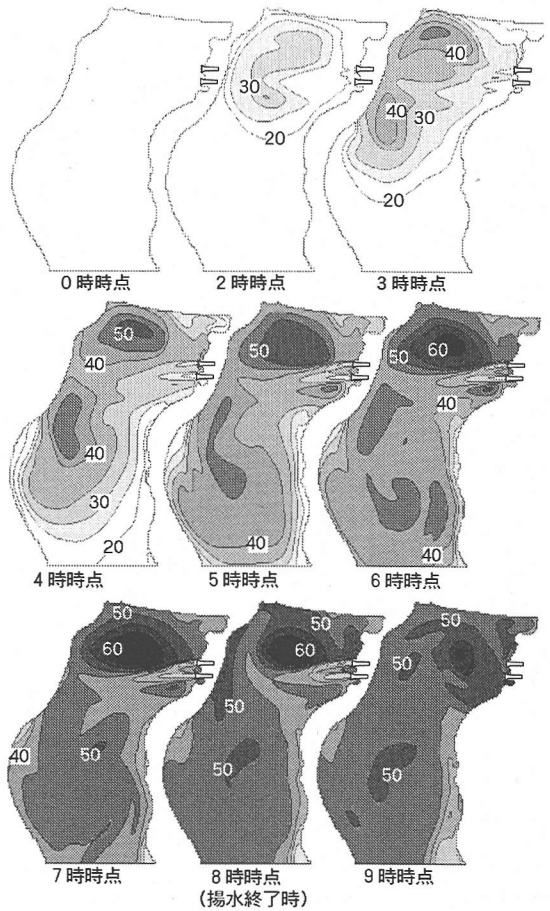
同様に、17日8時に行われた濁質濃度鉛直分布の実測結果と解析結果との比較を図一 18 に示す。

実測結果より、濁質濃度は①標高1235m以上では取水口に近い部分で濁質濃度の増加が大きく、遠くなるにつれて増加がやや小さくなること、②標高1230m以下では運転前に比べて濁質濃度が減少することが分かる。図一 18 から、検証解析結果はこれらの特徴を精度よく再現していることが分かる。

また、午前0時から午前9時までの取水口上端レベル(標高1261m)における濁質濃度分布を図一 19 に示す。同図では、濁質濃度の高い領域は放流水によりダム側と上流側に分けられること、ダム側では図一 13 で見られた旋回流の中心に濁質が滞留すること、上流側では移流により濁質が広がっていることが分かる。また、揚水流量が急減した7時から8時、さらに停止した後の8時から9時にかけて、旋回流中心の濁質濃度



図一 18 実測と解析の濁質濃度分布の比較



図一 19 濁質濃度分布の時間変化 (単位=mg/l)

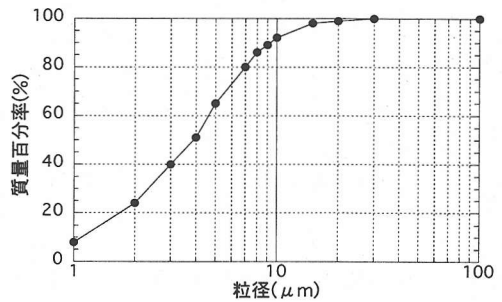
が次第に低下し一様化する傾向が見られる。

(4) 水理模型実験結果と解析結果の比較

a) 実験方法

図一 2 に示した実験再現領域の 1/200 スケール三次元模型を用いてフルード数相似に基づく水温・濁質流動実験を平成 8 年度に行った。模型は測量図をもとに作成し、濁質の模擬には粒径が細かく均質な粒度分布が得られるカオリンを使用した。図一 20 に実験に用いたカオリンの粒度分布を示す。中央粒径は $3.8\mu\text{m}$ であり、現地での中央粒径が $4.8\mu\text{m}$ よりやや小さく、フルード数相似を満たす粒径より大きい、沈降速度は非常に小さいため、現地 8 時間相当 (3 4 分程度) の実験時間内では濁質濃度分布に与える影響は小さいと考えて採用した。

実験は、カオリンを上流側から流入させて初期濁質濃度分布を作成し、その時点の水温・濁質濃度分布を測



図一 20 実験での濁質粒度分布図

定した後、水位を L.W.L に固定した状態で清水による揚水放流を開始し、一定時間継続後、揚水を停止して水温・濁質濃度分布を測定した。濁質濃度を光透過式濁度計、水温をサーミスタを用いて測定した。実験パラメータは揚水流量および初期水温・濁質濃度分布と

表-3 検証解析の概要（水理模型実験との比較）

ケース名	実験名	水位条件	揚水流量	揚水時間	水質分布	揚水水温
実験解析1	実験1	L.W.L 固定	110m ³ /s×2 固定	12 時間	図-22(a) 参照	8.8℃
実験解析2	実験2	〃	165m ³ /s×2 固定	9 時間	図-22(b) 参照	14.7℃
実験解析3	実験3	〃	165m ³ /s×2 固定	9 時間	図-22(c) 参照	12.0℃
実験解析4	実験4	〃	220m ³ /s×2 固定	6 時間	図-23 参照	12.2℃

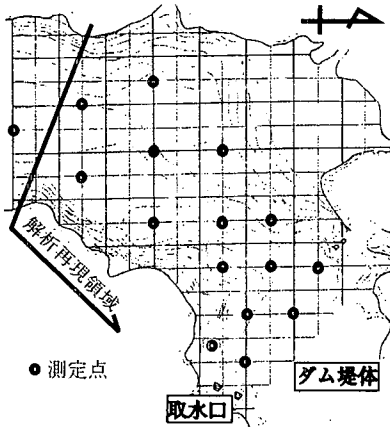


図-21 実験での測定点と解析再現領域

し、測定点は図-21 に示した 16 点とした。なお、実験時の最大流速は 0.05m/s であり、放水口前面の水深は 0.5m 程度であるため、放水口前面の流況は乱流状態といえる。

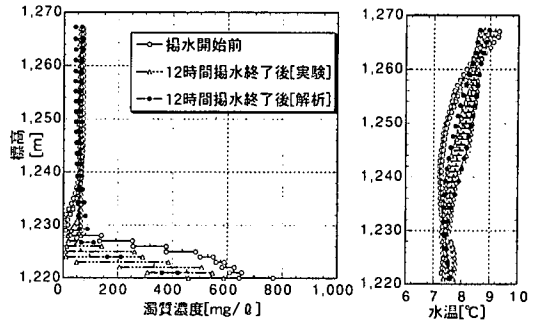
b) 検証解析の概要

検証解析を行ったケースの概要を表-3 に示す。流量と時間は実物換算値である。検証解析は模型と同じスケールで行い、濁質は一様粒径 (3.8μm) とした。水温・濁質濃度分布の初期条件は、実験での初期状態が概ね成層状態であったため、実験で測定した 16 点の鉛直分布を標高毎に平均して得られた分布を解析範囲全体に与えた。

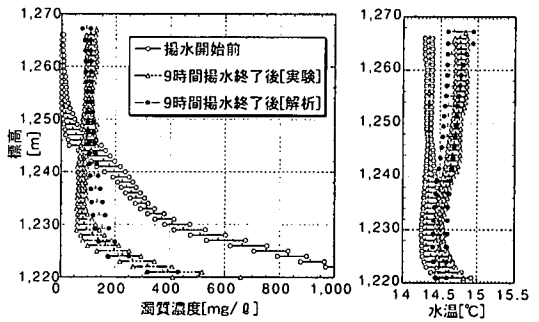
c) 濁質濃度・水温分布の比較

揚水前後の濁質濃度・水温の変化を比較した結果を図-22、図-23 に示す。これらの図は実験結果および解析結果の各標高における水温・濁質濃度の最大値、最小値および平均値を表示したものである。

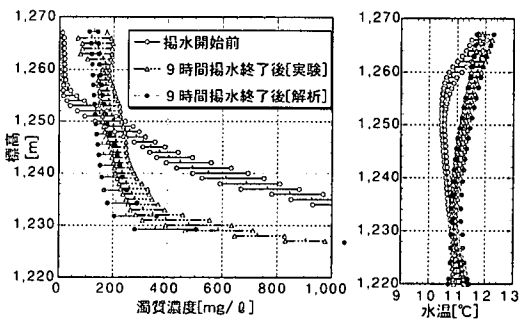
実験結果から、①高濁質濃度層が低く、揚水流量が小さい実験1では濁質濃度分布がほとんど変化しないこと、②高濁質濃度層が実験1に比較して上層にあり流量も大きい実験2、3、4では取水口敷レベル (標高 1246.5m) 以上の濁質濃度が上昇し、それ以下では減少すること、③揚水終了後の濁質濃度分布は、標高



(a) 実験1との比較：揚水流量=220m³/s



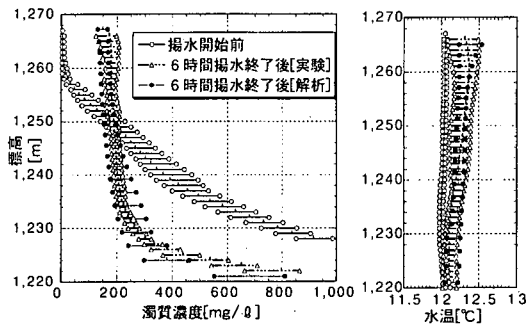
(b) 実験2との比較：揚水流量=330m³/s



(c) 実験3との比較：揚水流量=330m³/s

図-22 濁質濃度・水温分布の実験と解析の比較 1

1235m 付近から水面近傍まで概ね一定の値となり、それより下層では高濁質濃度となっていること、④水温分布は取水口敷レベルから水面までの間で大きく変化するが、それ以下の高濁質濃度領域では余り変化しな



実験4との比較：揚水流量=440m³/s

図-23 濁質濃度・水温分布の実験と解析の比較 2

いことが分かる。

検証解析結果はこれらの特徴を精度よく再現しており、本予測手法により様々な条件での濁質挙動を解析できることが確認された。

4. おわりに

本論文では、揚水発電所揚水運転時の大量放流が貯水池下層に浮遊滞留する濁質の巻き上げ挙動や濁水長期化現象に与える影響を定量的に検討するため、大量放流による三次元乱流、貯水池水の密度変化と流れの相互作用、大幅な水面変動など揚水発電所貯水池特有の現象を考慮した貯水池内水温・濁質挙動の予測手法を開発した。また、この手法を揚水発電所の上部貯水池である高瀬貯水池に適用し、現地計測・水理実験結果と比較したところ、本手法は流況、水温・濁質の挙動を精度良く予測・再現できることが分かった。

今後は、本予測手法を用いて、貯水池内の水温・濁質を含めた流動特性を詳細に把握するとともに、濁水長期化現象を軽減する揚水発電所の運用方法についての検討を行う予定である。

なお、本研究を進めるにあたって貴重な意見を頂いた電気事業連合会「水質保全問題検討会」の委員各位、貴重なご指導を頂いた京都大学井上和也教授ならびに細田尚助教授に謝意を表します。

参考文献

- 1) 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, 1, その1, 発電水力, No.134, 1975.
- 2) 岩佐義朗, 松尾直規, 井上素行: 貯水池の濁度解析について, 京都大学防災年報, 第21号 B-2, 1978.
- 3) 岩佐義朗, 松尾直規: 貯水池水理の解析モデルとその水温予測への適用, 土木学会論文集, No.308, 1981.
- 4) 梅田信, 横山勝英, 石川忠晴: セク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, 水工学論文集, 第43巻, 1999.
- 5) 大宮司久明, 三宅裕, 吉澤徹: 乱流の数値流体力学-モデルと計算法, 東京大学出版会, 1998.
- 6) 牛島省: 温度成層流における乱流現象のモデル化とその適用性に関する研究, 学位論文, 京都大学, 1989.
- 7) 細田尚: 開水路流れにおける乱流拡散機構に関する水理学的研究, 学位論文, 京都大学, 1990.
- 8) Launder, B.E.: On the Effects of a Gravitational Field on the Turbulent Transport of Heat and Momentum, Journal of Fluid Mech., Vol. 67, 1975.
- 9) Patankar, S.V. and Spalding, D.B.: A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flow, Journal of Heat Mass Transfer, Vol.15, 1972.
- 10) 小国力ら: 行列計算ソフトウェア-WS, スーパーコン, 並列計算機, 丸善, 1991.
- 11) Hirt, C. W. and Nichols, B. D.: Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, Journal of Computational Physics, Vol.39, 1981.
- 12) 米山望, 守屋祥一: VOF法を用いた自由液面の数値解析手法, 水工学論文集, 第39巻, 1995.
- 13) 米山望, 角湯正剛: 自由液面解析コード(FRESH)の開発-三次元化と並列化-, 電中研報告 U95063, 1996.
- 14) 瀬津家久, 中川博次: 修正 $k-\epsilon$ モデルによる開水路乱流の数値計算, 土木学会論文集, No.387, 125-134, 1987.
- 15) 後藤孝臣, 土山茂希: 揚水発電所湛水池内流動状況に関する調査とその考察, 水工学論文集, 第41巻, 1997.

(2000.9.28 受付)

PREDICTION METHOD FOR WATER TEMPERATURE AND TURBIDITY
IN PUMPED STORAGE RESERVOIR
USING 3D NUMERICAL SIMULATION CODE

Nozomu YONEYAMA and Motoyuki INOUE

It is the purpose of this report to present and verify a prediction method developed to analyze behaviors of water temperature and turbidity in a pumped storage reservoir. The features of this method are (1) to treat a density current by applying a numerical method for incompressible flow with density variation, (2) to calculate a fluid density stratification by using $k-\epsilon$ turbulent model and (3) to be applied to a flow involving free surface with VOF method. The prediction method is applied to local measurements in Shin-Takase pumped storage reservoir and its 1/200-scale model experiments. The obtained numerical solutions of water temperature and the turbidity distributions agree well with those results.