

II-262

三次元貯水池流動モデルによる選択取水の効果予測

関西電力（株） 正員 加藤 雅広

（株）ニュージェック 正員 劉 炳義

（株）ニュージェック 正員 南 修平

1. はじめに

治水・利水・水環境に対する社会の要請がますます多様化・高度化している今日において、ダムの水質管理に対する要求が一層高くなりつつある。そこで、冷水放流や濁水長期化、富栄養化などのダム水質問題に対し、曝気装置による貯水池内の循環流の生成や選択放流設備による選択取水など、水温や水質の挙動を制御しようとする対策が考案、実施されている。対策の実効性や施設の規模、効率的な運用方法などを検討するに際し、貯水池の流動を数値シミュレーションモデルにより適切に予測することがきわめて重要である。また、貯水池の水質に異常が発生したときの原因分析や取水・放流の制限検討、利水への影響評価、さらに防止対策や水質管理の強化を行う際に、現地観測資料の分析とともに、数値解析による検討も有力な手段と考えられる。

多くの電力ダムを運営・管理している関西電力では、従来よりダムの流動解析や水質対策の検討に一次元や二次元の数値シミュレーションモデルを活用してきた。しかし、複雑な河道形状を有する貯水池の水理・水質現象に対し、三次元モデルの適用が望まれている。本稿では、このような背景のもとに開発を進めてきた三次元流動モデルの概要およびそれを実際のダムに適用した選択取水の効果予測事例について述べる。

2. 解析モデルの概要

対象となる貯水池の多くは、平面形状（水際）が不規則で、河床も起伏を有する極めて複雑な境界を有するものである。また、河床レベルの違いによる水深の非一様性に加え、流入量・流出量の変化に伴い、水位（自由水面）も時間的に大きく変動する。このような水域を適切に表現するために、デカルト座標系（x,y,z）に代わり、水平面内では境界に相応した直交曲線座標、鉛直方向では相対座標（σ-座標）の複合座標系（ξ, η, θ）を用いる。

流動や水温、および濁質の挙動を記述する支配方程式を、表-1に、また、モデルを構成する各主要パラメータの取り扱いを、表-2に示す。上記の支配方程式をコントロール・ボリューム法で離散化し、流れ場に

表-1 支配方程式の一覧

水の連続式	$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial (u^* h g_{22})}{\partial \xi} + \frac{\partial (v^* h g_{11})}{\partial \eta} \right] + \frac{\partial w^*}{\partial \theta} = 0$
運動量方程式 (ξ方向)	$\frac{1}{h} \frac{\partial w^*}{\partial t} + \frac{1}{h g_{11} g_{22}} \left[\frac{\partial (g_{22} h u^* v^*)}{\partial \xi} + \frac{\partial (g_{11} h v^* v^*)}{\partial \eta} \right] + \frac{u^* v^*}{h \theta} \frac{\partial g_{11}}{\partial \eta} - \frac{v^* v^*}{g_{11} g_{22}} \frac{\partial g_{22}}{\partial \xi} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\partial}{\partial \xi} \right) - \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\partial}{\partial \eta} \right) \right] + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial (g_{22} \sigma_{11})}{\partial \xi} + \frac{\partial (g_{11} \sigma_{22})}{\partial \eta} \right] + \frac{c_{11}}{h \theta} + \frac{c_{22}}{g_{11} g_{22}} \frac{\partial g_{11}}{\partial \eta} - \frac{\sigma_{11}}{g_{11} g_{22}} \frac{\partial g_{22}}{\partial \xi} + f_{\xi}$
静水圧力方程式	$p = p_s + \rho \left[\rho_{11}^* \eta, z, t \right] \xi' = p_s + \rho_{11}^* (z - z_s) + \rho \left[\rho_{11}^* (\xi, \eta, z, t) \right] \xi'$
密度状態方程式	$\rho(\xi, \eta, z, t) = \rho(T, C) = \rho_s + \frac{C}{\rho_c} (\rho_c - \rho_s) = \rho_s + \rho(\xi, \eta, z, t)$
水温収支の式	$\frac{1}{h} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{h g_{11} g_{22}} \left[\frac{\partial (g_{22} h u^* T)}{\partial \xi} + \frac{\partial (g_{11} h v^* T)}{\partial \eta} \right] + \frac{w^* T}{h \theta} = \frac{1}{\rho c_p} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{g_{22}}{g_{11}} \Gamma_{\eta} \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{g_{11}}{g_{22}} \Gamma_{\xi} \frac{\partial T}{\partial \eta} \right) \right] + \frac{\partial}{h \theta} \left(\Gamma_{\theta} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial H}{\partial \theta} = S_T$
濁質(SS)収支の式	$\frac{1}{h} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{1}{h g_{11} g_{22}} \left[\frac{\partial (g_{22} h u^* C)}{\partial \xi} + \frac{\partial (g_{11} h v^* C)}{\partial \eta} \right] + \frac{w^* C}{h \theta} = \frac{1}{\rho c_p} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{g_{22}}{g_{11}} \Gamma_{\eta} \frac{\partial C}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{g_{11}}{g_{22}} \Gamma_{\xi} \frac{\partial C}{\partial \eta} \right) \right] + \frac{\partial}{h \theta} \left(\Gamma_{\theta} \frac{\partial C}{\partial \theta} \right) + S_C$

表-2 モデルパラメータの設定

項 目	設定内容
せん断応力	ブシネスク近似に基づく
渦動粘性係数	$\nu_t = \alpha h u$ $\nu_{tz} = \nu_{tz0} (1 + 10 R_i)^{-0.5}$, $\nu_{tz0} = \kappa \left(1 - \frac{z}{h} \right) u$, $\kappa \approx 0.4$
水温および濁質の拡散係数	$\Gamma_{\eta} = \Gamma_{\eta 0} = \nu_t / \sigma_t$, $\Gamma_{\xi} = \Gamma_{\xi 0} \left(1 + \frac{10}{3} R_i \right)^{-1.5}$, $\Gamma_{\xi 0} = \frac{\nu_{tz0}}{\sigma_t}$
沈降速度	Stokesの抵抗則に基づく
熱収支の各項	- 日射による熱輻射→Harlemanらの式 - 蒸発伝導による熱損失→Rohwerの式 - 有効逆輻射→Swinbankの式

表-3 再現計算条件

項 目	内 容
計算対象期間	平成9年6月1日～6月30日月間
対象水域および計算メッシュ	ダム堤体から3川の流入端までの累計18kmの河道区間とし、平面的な格子点数(図-1を参照)は12480、鉛直方向は12層に分割する。
流入量(図-2)	各河川の水位観測所データ+残流域補正による。
流入水温・SS	出水時の調査データ等に基づく。
粒度分布	1~9.9, 16, 25, 25~100 μmの4階に分割し、実測値に基づく。
気象データ	(日射量、気温、湿度、風速、雲量)日記録等に基づく。

キーワード：三次元モデル、貯水池流動、冷・濁水、選択取水

連絡先：（株）ニュージェック (tel:06-6245-4901)

については基本的に SIMPLE 法、水温とSSについてはADI法を用いて計算を行う。

3. 現地観測データによるモデルの検証

モデルの妥当性を検証するため、紀伊半島中央部の紀伊山脈、葉無山脈を源とする日置川に位置する殿山ダムにおける現地観測データを用いて再現計算を行う。ダム貯水池は、日置川、前の川、將軍川の3川の合流する地点に位置し、地形形状が複雑であり、各支川の流入状況や貯水区間も大きく異なるため、水温構造や濁水の流下過程などの湖内の流動はきわめて三次元性の強いものである。また、殿山ダムは、平均年回転率と7月の平均回転率がそれぞれ32.1と5.3（10年間平均）であり、岩佐・松尾らの分類法によれば、基本的に混合型に分類される。再現計算条件は表-3に示すとおりである。

水温とSS濃度の鉛直分布に関する計算結果と実測値との比較（一例）を図-3と図-4に示す。これらの結果より、両者の全体的適合性からみてシミュレーションモデルが妥当と考えられる。

4. 選択取水の効果予測

殿山ダムにおいて、冷・濁水の改善策として、角落とし方式による選択取水対策を検討している。角落としは全12段あり、全てを挿入する場合、挿入範囲はEL94.042～EL.111.000までとなる。

上記の再現計算と同様の条件を用いて、角落としを全て挿入する場合（表面取水）の放流水温と放流SSについて予測計算を行った。図-5に放流水温と放流SSの比較を示す。ただし、底面取水は、上記再現計算の結果である。図-5から分かるように、出水前（6月20日まで）においては、表面取水の放流水温が2～3℃高くなり、角落としの挿入によって水温成層の形成に伴う冷水放流問題の解決が期待されると考えられる。しかし、出水後においては、表面取水と底面取水による放流水温の差がほとんどなく、これは、洪水流入に伴い鉛直方向に混合が起こり、水温成層が破壊されたためである。一方、放流SSについても、出水後濁りが沈降して値が収束するまでの期間において、角落とし挿入による低減効果が見られた。

5. おわりに

今後、現地の流速測定を実施し、モデルの精度向上および汎用性を図っていく予定である。最後に、本研究を遂行するにあたり、貴重なご助言、ご協力を頂いた立命館大学江頭進治教授、金海生博士に謝意を表します。

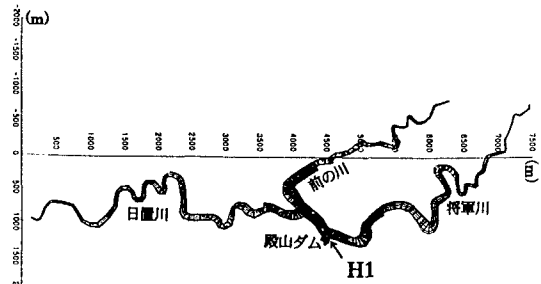


図-1 計算メッシュ（平面）

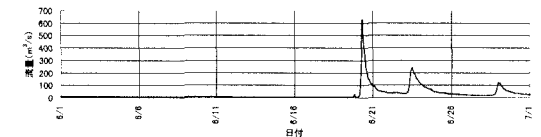


図-2 流入量時系列

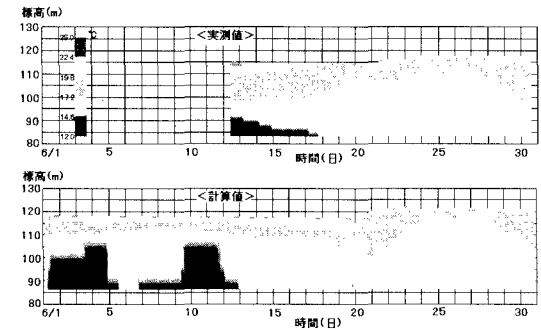


図-3 水温の比較（観測ポイントH1）

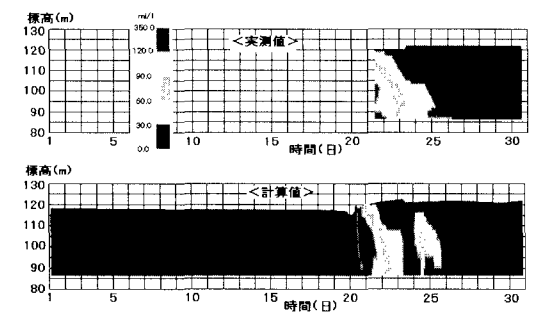


図-4 濁質濃度の比較（観測ポイントH1）

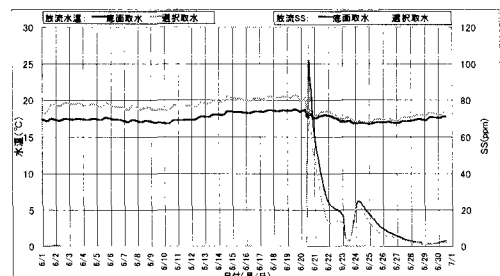


図-5 選択取水による放流水温と放流SSへの影響