

非静水圧モデルを用いた貯水池水質解析

独立行政法人 水資源機構 総合技術推進室 正会員 ○中尾 武史*
 独立行政法人 水資源機構 総合技術推進室 岩崎 健次*
 独立行政法人 水資源機構 総合技術推進室 酒井 健寿*
 (株)日水コン 正会員 南條 雅志**

1. はじめに

我が国のダムは、洪水調節や水資源開発により社会基盤整備の一翼を担ってきたが、一方で、河川水を貯留することから種々の水質問題を生起させる場合があり、曝気循環設備やフェンス等の水質保全施設が導入されてきた。現在、これらを効率的かつ効果的に計画・運用していくことが重要となっており、このためには、貯水池の水理・水質現象を適正に再現できる解析モデルの導入が必要不可欠となっている。その解析モデルの1つとして、近年、ダム貯水池の水理・水質現象の解析には鉛直2次元モデルを用いることが一般的となっているが、計算時間との兼ね合いから静水圧分布を仮定した1次元多層モデルが多くの場合用いられる。しかしながら、1次元多層モデルは、鉛直方向の運動量の輸送を考慮していないため、鉛直流速の計算値に適正さを欠く場合や、曝気循環設備のような鉛直方向に力を及ぼす対策を直接的に評価できない等の課題を有している。

そこで、本稿では、鉛直方向の運動量輸送を表現し、計算時間を可能な限り短縮するための数値解析手法として HSMAC 法を採用した鉛直2次元モデルの実ダムへの適用・実用化を試みた結果について報告する。

2. 計算手法

鉛直2次元モデルの基礎式として連続式、運動方程式を以下に示す。

・連続式

・運動方程式(x方向：流下方向)

・運動方程式(y方向：鉛直方向)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{式 1})$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{mx} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{my} \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (\text{式 2})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{mx} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{my} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \delta g \quad (\text{式 3})$$

ここに、 t ：時間、 x ：水平軸、 y ：鉛直軸(上向き正)、 (u, v) ： (x, y) 方向の流速、 (D_{mx}, D_{my}) ： (x, y) 方向の渦動拡散係数、 P ：圧力、 ρ ：水の密度、 ρ_0 ：水の基準密度、 $\delta = (\rho - \rho_0)/\rho_0$ ：密度差、 g ：重力加速度である。

数値解析モデルとしては、連続式を満たすように速度と圧力を同時に補正し反復的に解く方法である半陰解法の HSMAC(SOLA)法を採用した。具体的な計算方法を以下に示す。

■Step1：前時刻の圧力 P^n を用いて運動方程式より仮の速度 u^* 、 v^* を算定する。なお、加速度項及び拡散項は簡略化して $F(u, v), G(u, v)$ として表わす。ここに、 n ：時間ステップ数である。

$$u^* = u^n - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{\partial P^n}{\partial x} + \Delta t F(u^n, v^n) \quad (\text{式 4})$$

$$v^* = v^n - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{\partial P^n}{\partial y} + \Delta t G(u^n, v^n) \quad (\text{式 5})$$

■Step2：連続式が成立するように、速度及び圧力を補正し反復的に解く。

・速度 u^*, v^* から現時刻の圧力 P^{n+1} 、速度 u^{n+1}, v^{n+1} を算定する。

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^n - \rho \left[2\Delta t \left(\frac{1}{\Delta X^2} + \frac{1}{\Delta Y^2} \right) \right] \left(\frac{\partial u^*}{\partial x} + \frac{\partial v^*}{\partial y} \right) \quad (\text{式 6})$$

・全格子において連続条件を満たすように、収束条件値 ε を下回っているかどうかを判断する。それを満足していなければ反復計算を行い、満足していればその時間ステップの解が得られたと判断し、次のステップに進む。ここに、 k ：反復ループ数、 ε ：一定値(速度や計算格子長によって適宜設定する)である。

$$u^{n+1} = u^n - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{\partial P^{n+1}}{\partial x} + \Delta t F(u^n, v^n) \quad (\text{式 7})$$

$$v^{n+1} = v^n - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{\partial P^{n+1}}{\partial y} + \Delta t G(u^n, v^n) \quad (\text{式 8})$$

$$\Delta P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^{n+1} \Big|_{k+1} - P_{i,j}^{n+1} \Big|_k < \varepsilon \quad (\text{式 9})$$

なお、水温収支則、SS 収支則等の基礎式については会場にて提示する。

キーワード 貯水池水質解析、鉛直2次元モデル、非静水圧、HSMAC 法、水質保全施設

連絡先 * 〒338-0812 埼玉県さいたま市桜区神田 936 TEL 048-853-1695

** 〒191-0065 東京都日野市旭が丘 4-7-107 日水コンアーク 21 ビル TEL 042-584-7930

3. 適用結果

モデルの再現性については、機構所管の既設ダムのうち浦山ダム(図1, 分画フェンス導入)及び寺内ダム(図2, 曝気循環設備導入)を対象に検証を行った。貯水池形状について、流下方向 $\Delta x=200\text{m}$, 鉛直方向 $\Delta y=1\text{m}$ として計算メッシュを分割した。なお、曝気のモデル化は、気泡により生じる力(浮力)により鉛直上向きの力が生じし、上向きの流れが発生するように表現した。フェンスのモデル化は、フェンス設置位置とその範囲(フェンス高さ)において、流下方向の移流・拡散現象を生じさせないことで表現した。

図3に示すように、浦山ダムの水温鉛直分布は概ね再現されている。また、浦山ダムの濁りについては、図4に示すように、出水後の濁水がフェンス下端以深へ潜り込み、その後、徐々に低減する傾向が表現できている。寺内ダムの水温検証結果は図5に示すように、曝気循環設備を稼働させると、湖水循環が図られる傾向が表現できている。以上、計算値は実測値を概ね再現できていることから、密度流としての流れの解析結果は妥当であることが確認される。

なお、計算時間については本モデルでは約70~120時間/10ヶ年(○メッシュ数: 浦山ダム=24×108, 寺内ダム=16×53, ○PC仕様: CPU=Pentium4 3.8GHz, 64bit対応, メモリ: 512MB×2)であった。

4. おわりに

HSMAC法を適用することにより、計算時間を短縮し、且つ水質保全施設が設置された場においても適正な鉛直流速を表現することが可能となった。これにより、本鉛直2次元モデルにおいて、良好な水質再現性が得られることを確認した。ただし、収束条件値 ε を適正に設定し収束性を確保しつつ、さらに計算時間の短縮を図ることが課題の1つとして挙げられる。

参考文献

- ・C. W. Hirt, B. D. Nichols and N. C. Romero, SOLA A Numerical Solution Algorithm for Transient Fluid Flows, LosAlamos Scientific Laboratory LA-5852, pp. 1-50, 1975
- ・安斎浩一, 湯流れ解析プログラム t-flow2d の使い方, pp1-16, 2002

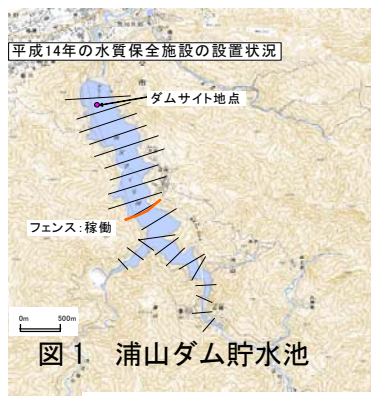


図1 浦山ダム貯水池

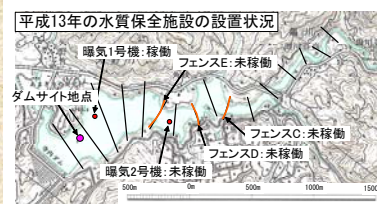


図2 寺内ダム貯水池

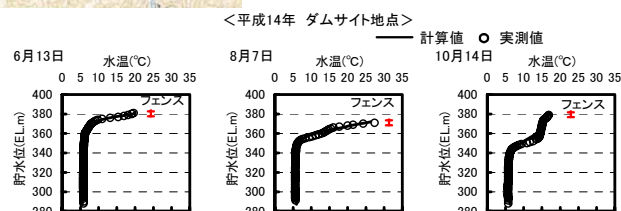


図3 浦山ダムにおける水温計算結果

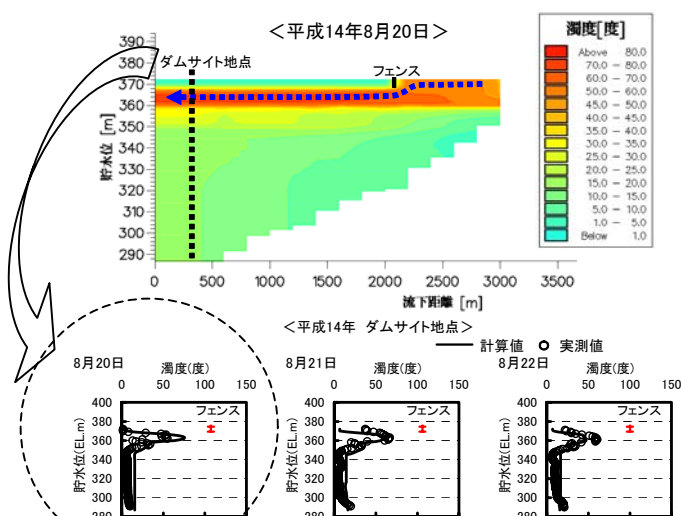


図4-浦山ダムにおける出水直後の濁度計算結果

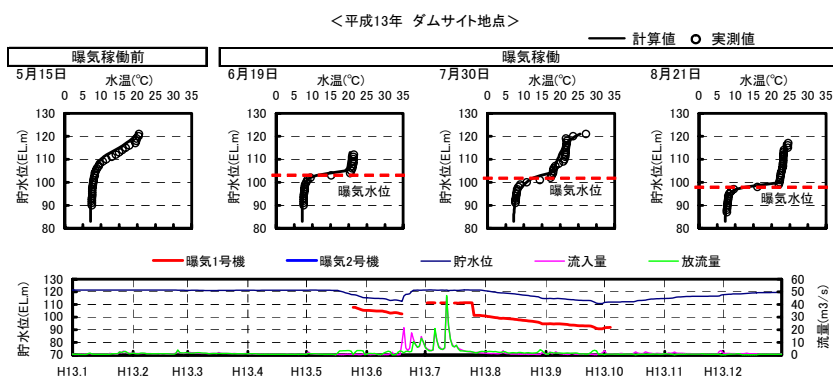


図5 寺内ダムにおける曝気稼働前後の水温鉛直分布