

CIP-Soroban 法に基づく鉛直二次元貯水池モデルの実水域への適用

東京工業大学 学生員 ○小島 崇
 東京工業大学 正会員 中村 恭志
 東京工業大学 フェロー 石川 忠晴

1. はじめに

貯水池の水温分布は、地形条件、気象条件、流入・流出条件によって時空間的に変動する。その結果として生じる密度構造は、湖水の流動、物質輸送、水質変化、生物生息状況に大きな影響を及ぼす。したがって、貯水池の運用管理を行うにあたり、水温分布の把握が重要となると考えられる。

貯水池内の水温分布を把握する試みは、数値シミュレーションにより以前より行われているが、湖水の流動および乱流混合が水温構造に及ぼす影響については、あまり詳細に取り扱われていなかった¹⁾。数値シミュレーションを今後の貯水池管理に応用していくにあたり、この点を検討しておく必要がある。また、特に長期間の変動を対象とする場合には水温成層界面における数値拡散誤差を適切に処理する必要がある、複雑な地形条件と自由水面の変動も適切に考慮可能なことが数値モデルには求められる。

貯水池計算モデルに要求される上記事項への回答として、筆者らは CIP-Soroban 法²⁾と内部境界条件法³⁾を組み合わせた鉛直二次元貯水池モデルの開発を現在進めている⁴⁾。本報告では、宮城県にある七ヶ宿貯水池を対象として開発した鉛直二次元貯水池モデルの適用を試み、長期間の水温分布の計算結果と現地観測の比較から開発した数値モデルの有効性の検証を行う。

2. 計算手法

基礎方程式は、三次元の連続式、運動方程式、 $k-\varepsilon$ 乱流モデルの方程式、熱量の輸送方程式である。これらを横断方向に積分して鉛直二次元方程式系を導出した。熱の授受については、梅田らの研究⁵⁾を参考にしてモデル化を行った。

CIP-Soroban法²⁾は、鉛直方向に伸びる計算軸上で算盤の珠の様に計算格子点を適時移動させて成層界面など物理的に重要な領域の計算精度を動的に向上させる方法であり、格子点間の補間に3次精度CIP補間を用いることで流体方程式を精度よく解析する手法である。本研究では、以下の水温および熱量増分の鉛直勾配を組み合わせたモニタ関数 M を用いて各格子軸上での格子点の鉛直位置の更新を行った。

$$M = \sqrt{1 + (\alpha \partial T / \partial z + \beta \partial \phi / \partial z)^2} \quad (1)$$

ここで、 α , β は定数、 T は水温、 ϕ は熱量の増分、 z は鉛直上向きの座標である。モニタ関数 M は水温成層の界面付近と熱量授受の大きな水面付近で大きな値を取り、その値をもとに格子点を水温成層界面と水面付近に自動的に集中させて計算精度の向上を図っている(文献2)。

また開発したモデルでは水面及び湖底面地形の微小な変動をも適切に考慮するため、計算格子点を水面及び地形面上に常に配置することで、内部境界条件法を用いて動力学的及び力学的条件を水面上及び地形面上の正確な位置に課すことを可能としている。

3. 七ヶ宿貯水池への適用

(1) 計算条件

七ヶ宿貯水池は、宮城県南部の白石川に建設された総貯水容量が $109 \times 10^6 [\text{m}^3]$ の多目的貯水池である。図-1に計算に用いた湖底面形状及び横断方向の幅 B を示す。 x 軸は流下方向に取った水平座標、 z は鉛直上向き座標とし、横断方向の幅 B は x 軸と直交方向(主流方向に垂直な方向)に取った。赤破線で示した $x=3200[\text{m}]$ 地点ではサーミスタチェーンを用いて水温の鉛直分布が観測されている。計算格子は格子軸を $\Delta x=100[\text{m}]$ で等間隔に 38 本、格子点は格子軸上に夫々 55 点用いた。

キーワード：数値解析、密度成層、CIP-Soroban 法、貯水池

連絡先：〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259 番地 G5-3 TEL：045-924-5515

気象条件及び流入・流出条件として観測値を使用した。流入・流出流量、ダム水位、気温、河川流入水温、日射量及び風速を図2-(a),(b),(c)に示す。計算期間は、1996年4月1日から10月1日までの半年間行った。ただし、4月1日から1ヶ月間を助走計算期間とし、初期条件として4月1日の河川流入水の水温を貯水池全体に一樣に与え、水塊は静止状態とした。水面の初期値は観測データから鉛直基準面上44.65[m]で水平に設定した。

(2) 計算結果

図3に $x=3200$ [m]における水温鉛直分布の時系列変化を示す。(a)は現地観測結果、(b)は計算結果である。授熱期に入る6月ごろから水温成層が形成され始めること、8月から9月にかけて表層水温がピークを迎えるが水深20[m]以下では依然水温が 10°C を下回り明確な水温躍層が形成されることなど、計算結果は現地観測結果を良好に再現している。図2-(c)及び図3-(a),(b)における矢印は風速 6[m/sec] を超える強風時を示しているが、現地観測・計算結果ともに強風時の風応力による鉛直混合の促進が確認できる。一方、非強風時の水温成層厚は観測結果では観測結果より薄くなっている。この差異の原因としては、ダム管理所における風観測値の代表性の問題や、鉛直二次元モデルでは考慮できない湖岸での内部碎波などの影響が考えられる。しかしながら、同じく $x=3200$ [m]における水深平均水温の時間変化を比較してみると(図4参照)、仮定した貯水池内初期水温の影響が5月から7月ごろにかけて見られるものの、全体的に平均水温の変動を計算結果は良好に再現しており、開発したモデルで貯水池における水塊への熱量授受の総和量自体は良好に再現されていると考えられる。

4. まとめ

CIP-Soroban法²⁾により、貯水池流動と熱収支の鉛直二次元解析モデルを構築し、七ヶ宿貯水池を対象に長期水温解析を実施した。計算結果を観測結果と比較したところ、夏場の鉛直混合がやや小さく計算されていたが、長期間の水温構造の変化を概ね再現することができた。

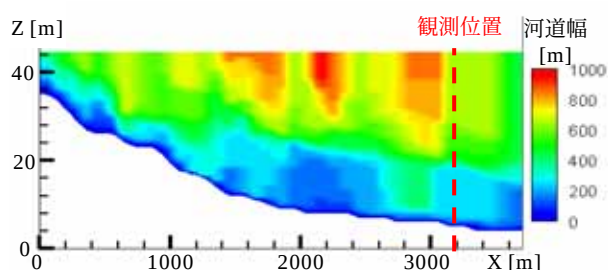


図-1. 七ヶ宿貯水池の河道幅形状。

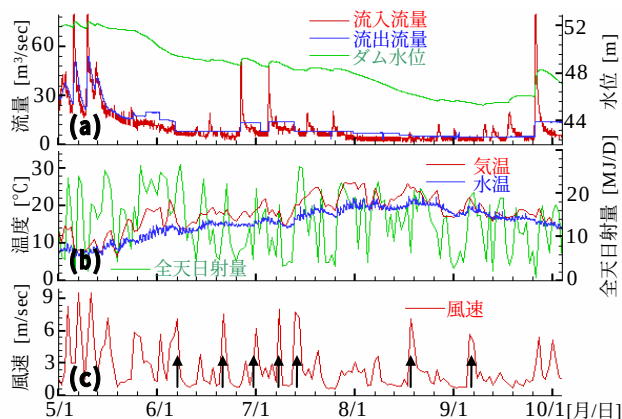


図-2. 入力条件。(a)流入・流出流量とダム水位、(b)気温・水温と全天日射量、(c)風速の時系列データ。

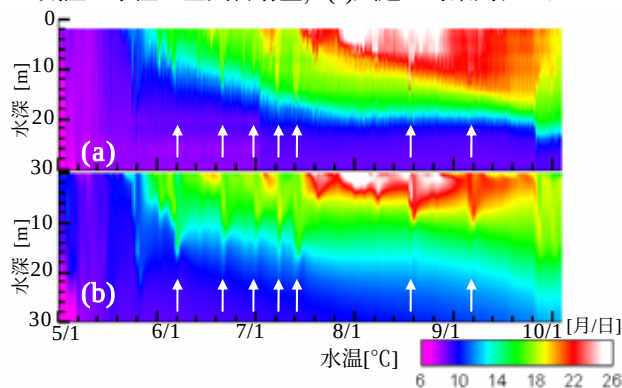


図-3. 水温鉛直分布の時系列変化。(a)現地観測結果、(b)CIP-Soroban法による計算結果。

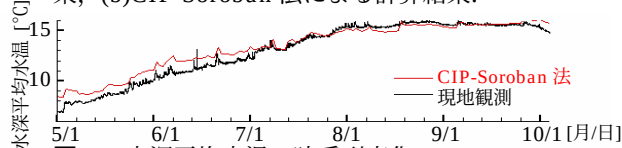


図-4. 水深平均水温の時系列変化。

参考文献

- 1) 戸田賢治, 貯水池の熱的特性に関する基礎的検討, 東北大学大学院修士論文, 1993.
- 2) 工藤健太郎, 石川忠晴, 中村恭志: 境界条件を計算領域内部に設定する流体運動計算手法の開発, 水工学論文集, 第48巻, pp.691-696, 2004.
- 3) 滝沢研二, 矢部考, Tayfun E. Tezduyar, ソロバン格子を用いた流体計算, 日本機学会計算力学講演会, 第17回, 2004, pp.1-2.
- 4) 小島崇, 中村恭志, 石川忠晴, CIP-Soroban法に基づく貯水池鉛直二次元流動モデルの基礎的検討, 土木学会年次学術講演会, 第61回, 2006, pp.575-576.
- 5) 梅田信, 池上迅, 石川忠晴, 富岡誠司, ダム貯水池における洪水時濁質流動に関する数値解析, 水工学論文集, 第48巻, 2004, pp.1363-1368.