CIP-Soroban 格子法に基づく貯水池鉛直二次元流動モデルの基礎的検討

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	忠治

1. 序論

貯水池では水温の空間変動による微小な密度差が常 に生じている.これに起因する密度流現象は貯水池の 流動特性に変化を及ぼし,水域の物質循環,水質変化, 生態系に大きな影響を及ぼすことが示唆されており, 貯水池における密度流を高精度に予測しうる数値解析 モデルの開発は環境保全計画の策定の面からも希求さ れている.

一般的に流動モデルの数値解析精度は用いる計算格 子点の配置によって大きく左右される.特に貯水池な どのように,水温などの急峻な成層界面の表現が流動 解析精度を決定する重要な要因と成る場合には,如何 に界面付近での格子の解像度を向上させるのかが計算 精度向上には欠かすことが出来ない.筆者らはこの問 題を解決するため計算格子点の位置を自由に移動可能 なSoroban格子法と高精度移流解法であるCIP法とを 組み合わせた鉛直 2 次元汽水域流動モデルを先に提案 している.計算格子点は各計算ステップにおいて成層 界面など物理量分布の急峻な領域に自動的且つ動的に 集中配置することが可能であり,汽水域における塩分 成層を伴う密度流現象への適用によりその有効性を示 している¹⁾.

本研究では、上記 CIP-Soroban 流動モデルへ日射・ 放射による水温変動と風応力のモデルを導入し、鉛直 2 次元貯水池流動モデルへの拡張を行った.検証計算と して V 字谷形状を有する仮想的な貯水池に開発モデル を適用し、CIP-Soroban 流動モデルの貯水池における 密度流解析における有効性について検討を行った.

2. 計算手法

基本的な計算手順は、先に提案した鉛直2次元汽水域 モデル¹⁾に準じている.基礎方程式は、三次元の連続式、 運動方程式、水面の移流方程式、*k*-*ε*乱流方程式に加 え、水温の輸送方程式を河道横断方向に積分する事で 導かれる¹⁾.このうち水温の輸送方程式は以下のように 与えられる.

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} \left(1.2 \nu_L B \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial z} \left(1.2 \nu_T B \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\phi}{\rho_a C_w}$$
(1)

ここで、主流方向をx、鉛直方向をzとし、B(x,z):河 道幅、T(t,x,z):水温、 $\phi(t,x,z)$:熱収支、 ρ_a :空気の密度、 C_W :水の比熱である.

水温成層の形成から崩壊過程及び水温躍層の再現を 行うためには、気象条件に伴う熱収支及び風応力が重要 な要素となる.本研究では熱収支の式や風応力のモデル 化には梅田らの方法²⁾に従った.貯水池の水面における 熱収支 ϕ_{surf} は全天日射量 ϕ_l ,長波放射 ϕ_L ,潜熱 ϕ_e ,顕 熱 ϕ_r を用い、次式で仮定した.

 $\phi_{surf} = (1-r)b\phi_l - \phi_L - \phi_e - \phi_e$ (2) ここで, r:水面反射率, b:水面吸収率である. 各熱損 失分に対しては, 長波放射 ϕ_L はSwinbankの式, 潜熱・ 顕熱 $\phi_e + \phi_e$ はRohwerの式などの, 経験式から算出した. また, 水深dでの熱収支 ϕ_d は, Lambert-Beerの法則に 基づき,

 $\phi_d = (1-r)(1-b)\phi_l \exp(-\eta d)$ (3) とした.ここで、 η :減衰率である.水面では(2)式、水 中では(3)式の関係を用いて熱収支を計算する.温度と 密度の関係は次の近似式を用いた.

 $\rho_w = -5.948 \times 10^{-3} T_w^2 + 3.452 \times 10^{-2} T_w + 999.9$ (4)
水面に働く風応力は、次の様に考慮した。

$$\tau_{surf} = C_D \rho_a W^2 \tag{5}$$

ここで、 τ_{surf} :風応力、W:水面風速、 C_D :抵抗係数である. 実際の計算手順は汽水域モデル¹⁾と同じく時間分割の

考えに従い行われ,熱収支の計算は非移流項の計算ステ ップに追加される¹⁾. Soroban格子の各時間ステップにお ける配置は,水温の空間鉛直勾配を指標として界面位 置を判定し,温度躍層付近に格子点を集中配置するよ うにした¹⁾.

3. モデル計算

開発した貯水池流動モデルの有効性の検討を行なう 為に,以下の様な仮想ダムを対象に検証計算を行った.

(1) 貯水池形状

モデルケースとして、図-1に示すような∨字谷に貯 水池が形成された場合を考える. *x*は谷軸流下方向に

キーワード: 数値解析,密度成層,CIP-Soroban,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 取った水平座標, zは鉛直上向き座標として,鉛直座 標 基 準 面 に 対 す る 元 河 床 (V 字 谷 の 基 底) は b(x) = -x/160 + 31.0[m] とした.また,貯水池幅は $B(x,z) = \{z-b(x)\} \times 20 + 10[m]$ とした.

貯水池の初期水面は鉛直基準面上 41mに設定した. また貯水池延長は 4,800mとした.その結果,貯水池の 最大水深は 41m,貯水体積は約 3.0x10⁷m³となり,我が 国の平均的貯水池規模と概ね一致する.なお,Soroban 格子は図-2 に示す様に,軸をx方向に等間隔で 30本用 意し,格子点は各軸上に 30 個,合計 900 個とした.図 中の濃淡は水温,白丸は格子点を現している.格子点 は図-2 に示すように水温躍層に集中配置している.

(2) 計算条件

計算には気象条件および流入・流出条件の時系列が 必要となる.ここでは宮城県にある七ヶ宿貯水池で 1996年に観測された時系列を与えることとした.

まず受熱期における水温成層の形成の様子を調べる ために、5月1日から約1ヶ月半の期間について計算 を行った.図-3に気温,流入水温,風速の時系列を, 図-4に流入量と全天日射量の時系列を示す.

(3) 計算結果

図-5 に貯水池上流部と下流部での 50 日間の鉛直水 温分布の時間変化を示す. 図中では淡いほど高温を表 している.計算条件が受熱期に相当するため,表層水 温は風速や流入水温の時間的変動の影響を受けながら も徐々に増加しているようすが確認できる.

水温成層の縦断分布の変化を図-6 に示す.計算開始 (a)3日目では既に連続成層が形成されており,縦断的に ほぼ一様であった.しかし(b)7日目には,図-3,4に示 すように低水温の流入水の流量が増加したため、密度流 による傾斜プルームが発生し,貯水池中層に貫入してい る様子が見られる.その後(c)11日目には強風の影響で 鉛直混合が進んで成層が緩やかになり,貯水池中央部表 層に暖水塊が,底層に弱い傾斜プルームが形成される様 子が計算されている.

4. 結論

CIP-Soroban 法に基づく貯水池流動モデルの開発を 行った.日射・放射による水温変動と風応力のモデル を導入し,検証計算として V 字谷形状を有する仮想的 な貯水池に開発モデルを適用した.検証の結果,本モ デルが受熱期などにおける温度成層の形成過程を妥当 に計算可能なことを確かめ,ソロバン格子が貯水池流 動解析においても有効であることが確かめられた.

参考文献

1) 中村恭志,小島崇,石川忠晴, CIP-Soroban法による河 道幅を考慮した汽水域二次元数値モデルの開発,水



工学論文集, 第50卷, 2006.

海田信,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, pp.1363-1368, 2004.