

# 三次元解析モデルによる東郷池の湖流および塩分侵入に関する数値実験的研究

## Numerical Experiment of Water Motion and Salinity Intrusion in Lake Togo by Using the Three-dimensional Model

○齋 幸治\*・原田昌佳\*\*・吉田 勲\*\*  
SAI Koji, HARADA Masayoshi and YOSHIDA Isao

### 1. はじめに

鳥取県中部に位置する東郷池は、湖水面積 4.1km<sup>2</sup>、平均水深約 2.1m、最大水深約 4.6m の規模の湖である。また、橋津川を通じて海水が流入するため汽水湖であり、そのため特にヤマトシジミ漁が盛んである。橋津川には防潮水門が設置されているが、現在では水産資源の増産を目的とした湖水の塩分管理が実施されている。東郷池の水環境の保全や改善に配慮した適切な塩分管理を行なうためには、水域の流れや塩分輸送のダイナミクスに関わる詳細な研究は重要な課題となる。そこで本研究では、三次元解析モデルを用いた数値実験により湖流の流動特性と塩分の移流分散特性について検討した。

### 2. Operator Splitting 法による計算方法

平均湖面上に原点をとり、水平方向に  $x, y$  軸、鉛直上向きに  $z$  軸とする右手系の直交座標系（水面  $z=\zeta$ 、湖底  $z=-h$ ）を考える。三次元モデルの基礎式は、連続の式、運動方程式および水温  $T$  と塩分  $S$  の拡散方程式を  $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$  からなる control volume に関して積分することにより得られる（Table 1 参照）<sup>1)</sup>。式(1)~(5)の数値解法として、申ら<sup>2)</sup>が提案した Operator Splitting 法を採用した。本法は、一回のタイムステップを三段階に分割し、それぞれの段階で考慮される項の特性に応じた差分式を用い、部分的な implicit 法によって解の安定化と計算時間の短縮化を図るものである。第一段階では、運動方程式中の全ての移流項と水平方向の粘性項を考慮し、Adams-Bashforth 法により中間値  $u^*, v^*$  を求める。拡散方程式については全ての項を扱い、同様の差分スキームにより新しい時刻の  $T^{n+1}$  と  $S^{n+1}$  を求める。第二段階では、運動方程式の鉛直渦動粘性項とコリオリ項を考慮し、差分スキームは Clank-Nicholson 法を用いる。ここでは第一段階で求めた  $u^*, v^*$  を修正することで  $u^{**}, v^{**}$  を求める。第三段階では、まず Clank-Nicholson 法を用いて連続の式を差分化し、 $\zeta$  のみを変数とする差分式を誘導する。SOR 法により新しい時刻の  $\zeta^{n+1}$  を求め、次いで流速成分  $u^{n+1}, v^{n+1}, w^{n+1}$  を求める。なお、水の密度は水温と塩分の関数として評価する。

Table 1 Governing Equations in the Three-dimensional Model

<p>・連続の式</p> $uA_x _{x_i}^{x_{i+1}} + vA_y _{y_j}^{y_{j+1}} + wA_z _{z_k}^{z_{k+1}} = 0 \quad (1)$	<p>・水温生成項: <math>q_t</math></p> $q_t = -\frac{1}{\rho c_{vp}} \frac{dQ_z}{dz}, \quad Q_z = Q_s \exp\{-\eta(\zeta - z)\} \quad (6)$ <p><math>c_{vp}</math>: 水の比熱 (<math>=4.171 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}</math>)  <math>Q_z</math>: 短波放射による熱フラックス  <math>\eta</math>: 光の消散係数</p>
<p>・運動方程式(x 軸方向)</p> $\frac{\partial}{\partial t} \int_V u dV = f \int_V v dV - \frac{1}{\rho_0} \int_{A_x} p dA_x _{x_i}^{x_{i+1}} - \left( uuA_x _{x_i}^{x_{i+1}} + uvA_y _{y_j}^{y_{j+1}} + uwA_z _{z_k}^{z_{k+1}} \right) + \left( v_h \frac{\partial u}{\partial x} A_x _{x_i}^{x_{i+1}} + v_h \frac{\partial u}{\partial y} A_y _{y_j}^{y_{j+1}} + v_v \frac{\partial u}{\partial z} A_z _{z_k}^{z_{k+1}} \right) \quad (2)$	<p>・鉛直方向の渦動粘性(拡散)係数(<math>\text{m}^2/\text{s}</math>): <math>\nu_v, K_v</math></p> $\nu_v = \nu_{v0} (1 + 10R_i)^{\frac{1}{2}}, \quad K_v = K_{v0} \left( 1 + \frac{10}{3} R_i \right)^{\frac{3}{2}} \quad (7)$ <p><math>\nu_{v0} (K_{v0})</math>: 中立状態の鉛直渦動粘性(拡散)係数  <math>R_i</math>: 局所リチャードソン数</p>
<p>・運動方程式(y 軸方向)</p> $\frac{\partial}{\partial t} \int_V v dV = -f \int_V u dV - \frac{1}{\rho_0} \int_{A_y} p dA_y _{y_j}^{y_{j+1}} - \left( uvA_x _{x_i}^{x_{i+1}} + vvA_y _{y_j}^{y_{j+1}} + vwA_z _{z_k}^{z_{k+1}} \right) + \left( v_h \frac{\partial v}{\partial x} A_x _{x_i}^{x_{i+1}} + v_h \frac{\partial v}{\partial y} A_y _{y_j}^{y_{j+1}} + v_v \frac{\partial v}{\partial z} A_z _{z_k}^{z_{k+1}} \right) \quad (3)$	<p>・各方程式の水理変量とパラメータの定義</p> <p><math>u, v, w</math>: <math>x</math> 軸, <math>y</math> 軸, <math>z</math> 軸の流速成分 (<math>\text{m/s}</math>)  <math>f</math>: コリオリ係数  <math>\rho_0</math>: 水の基準密度 (<math>=1.0 \text{ g/cm}^3</math>)  <math>\nu_h (K_h)</math>: 水平方向の渦動粘性(拡散)係数 (<math>\text{m}^2/\text{s}</math>)  <math>T, S</math>: 水温 (<math>^{\circ}\text{C}</math>), 塩分 (<math>\text{psu}</math>)</p>
<p>・水温の拡散方程式</p> $\frac{\partial}{\partial t} \int_V T dV = \int_V q_t dV - \left( uT - K_h \frac{\partial T}{\partial x} \right) A_x _{x_i}^{x_{i+1}} - \left( vT - K_h \frac{\partial T}{\partial y} \right) A_y _{y_j}^{y_{j+1}} - \left( wT - K_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) A_z _{z_k}^{z_{k+1}} \quad (4)$	
<p>・塩分の拡散方程式</p> $\frac{\partial}{\partial t} \int_V S dV = - \left( uS - K_h \frac{\partial S}{\partial x} \right) A_x _{x_i}^{x_{i+1}} - \left( vS - K_h \frac{\partial S}{\partial y} \right) A_y _{y_j}^{y_{j+1}} - \left( wS - K_v \frac{\partial S}{\partial z} \right) A_z _{z_k}^{z_{k+1}} \quad (5)$	

\*鳥取大学大学院連合農学研究科, The United Graduate School of Agricultural Science, Tottori University, \*\*鳥取大学農学部, Faculty of Agriculture, Tottori University, キーワード: 三次元解析, Operator Splitting 法, 塩分成分

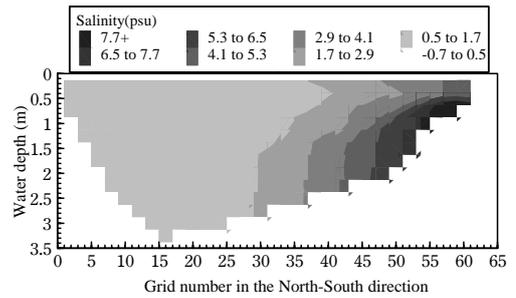
### 3. 吹送流と塩分の移流分散

ヤマトシジミの産卵時期は夏季であり、その産卵、孵化は塩分の影響を強く受けるため、湖水の適切な塩分管理が最も求められる時期である。そこで、夏季を想定した吹送流と塩分拡散の数値実験を行った。計算期間は日中の12時間である。離散化に伴う計算条件は  $\Delta x = \Delta y = 100\text{m}$ ,  $\Delta z = 0.25\text{m}$ ,  $\Delta t = 10\text{s}$  である。渦動粘性係数と渦動拡散係数の鉛直成分は **Table 1** 中の式(7)の成層化関数を用いて評価し、水平成分は  $v_h = K_h = 10\text{m}^2/\text{s}$  の一定値で与えた。河川の影響については橋津川のみを考慮し、その流量は年間最大値から設定した  $6\text{m}^3/\text{s}$  が計算期間中常に流入すると仮定する。また、橋津川から東郷池に侵入する海水の流動状態は弱混合型にあるものとし、上層では  $15\text{psu}$  程度、下層では  $35\text{psu}$  の海水が遡上するものと仮定する。水温と塩分の初期値は領域内一定とし、それぞれ  $27^\circ\text{C}$ ,  $0.5\text{psu}$  とする。また、東郷池周辺では日中に海風（北風）が卓越することを考慮し、年平均風速である  $3\text{m/s}$  の北風が領域内に一様に吹くと仮定する。計算開始12時間後の計算結果を次のように図示し、考察する。**Fig. 1** は吹送方向の最長距離となる南北断面内の塩分の等高線を示す。**Fig. 2** は同じ南北断面内の  $v$  と  $w$  の湖流ベクトルを示す。なお、 $w$  は水平流成分と比べて極めて微小であるため、500倍のスケールで表している。**Fig. 3** は水面から  $0.125\text{m}$ ,  $0.625\text{m}$ ,  $1.625\text{m}$ ,  $3.125\text{m}$  の深さの水平流成分の湖流ベクトルをそれぞれ示す。

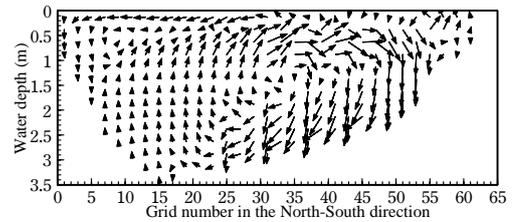
計算結果の特徴を以下にまとめる。(1)湖北部では海水侵入の影響による塩分成層の形成がみられるが、水平方向の塩分勾配は小さい (**Fig. 1**)。 (2)湖北部での海水の侵入形態は緩混合型に分類される。(3)湖北部において水平方向のスケールの小さい激しい内部循環流が生じている (**Fig. 2**)。 (4)湖北部～中央部で比較的速度が大きく、湖南部では  $0.125\text{m}$  層で順流、 $0.625\text{m}$  層で逆流、 $1.625\text{m}$  層で流れが停滞し、 $3.125\text{m}$  層では順流が生じている (**Fig. 3**)。以上のように風速  $3\text{m/s}$  の場合、水域は成層化し、水深スケールでの水塊の鉛直混合は抑制された。そのため、平均風速程度の風が長期間継続した場合、湖底付近で貧酸素水塊の発生や栄養塩類の溶出などの水環境の悪化が懸念される。

### 4. おわりに

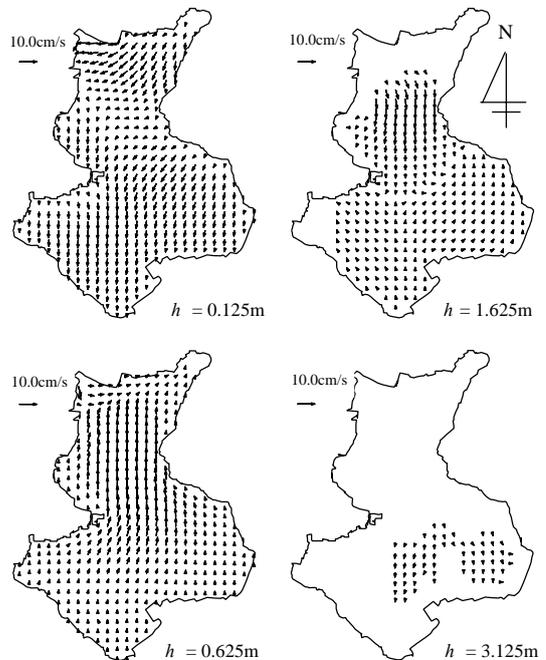
本研究では、Operator Splitting 法を援用した流れと塩分拡散に関する三次元解析モデルを構築し、東郷池における海水流入時の湖流の流動特性ならびに塩分の侵入過程について検討した。今後は本モデルを基礎に、高次の捕食者を考慮に入れた生態系モデルの構築を進める予定である。  
**参考文献** 1) 岩佐ら (1983) : 琵琶湖湖流の三次元的な解析, 京都大学防災研究所年報, Vol. 26(B-2), pp. 151-152. 2) 申ら (1988) : 湖の流れの数値解析に関する基礎的研究, 京都大学防災研究所年報, Vol. 31 (B-2), pp. 575-588.



**Fig. 1** Vertical distribution of salinity



**Fig. 2** Vertical distribution of lake currents



**Fig. 3** Horizontal distribution of lake currents