

## Numerical Simulation of Water Motion and Salinity Diffusion in Lake Togo by Two-dimensional One-layer Model

榑, 恭平  
鳥取大学大学院農学研究科

原田, 昌佳  
九州大学大学院農学研究院

齋, 幸治  
九州大学大学院生物資源環境科学府

吉田, 勲  
鳥取大学名誉教授

他

<https://doi.org/10.15017/8858>

---

出版情報：九州大学大学院農学研究院学芸雑誌. 61 (2), pp.273-280, 2006-10-27. Faculty of Agriculture, Kyushu University

バージョン：

権利関係：



## 2次元単層モデルによる東郷池の流動特性および塩分の 水平拡散に関する数値解析

榑 恭平<sup>1</sup>・原田 昌佳\*・齋 幸治<sup>2</sup>  
吉田 勲<sup>3</sup>・平松 和昭・森 牧人

九州大学大学院農学研究院生産環境科学部門地域環境科学講座水環境学研究室

(2006年6月13日受付, 2006年7月24日受理)

### Numerical Simulation of Water Motion and Salinity Diffusion in Lake Togo by Two-dimensional One-layer Model

Kyohei SAKAKI<sup>1</sup>, Masayoshi HARADA\*, Kouji SAI<sup>2</sup>, Isao YOSHIDA<sup>3</sup>,  
Kazuaki HIRAMATSU and Makito MORI

Laboratory of Drainage and Water Environment, Division of Regional Environment Science,  
Department of Bioproduction Environmental Sciences, Faculty of Agriculture,  
Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan

### 緒 言

鳥取県中部に位置する東郷池は、周囲10.1km、湖水面積4.1km<sup>2</sup>、平均水深2.1m、最大水深4.6mの海跡湖である。流入河川は舎人川、東郷川、羽衣石川、埴見川の4河川であり、流出河川は橋津川の1河川のみである。また、橋津川が約2.1kmで日本海に達しており、潮汐により海水が遡上し流入するため東郷池は汽水湖である。橋津川には東郷池から約1.5km下流の地点に防潮用水門が魚道とあわせて設置されている。1996年以降、水門操作によって海水流入量が制限され、1996年から2000年までの調査によれば、湖水の塩分は約3 psu以下で推移していた(中村, 2000)。また、東郷池は、水質汚濁防止法の湖沼における環境基準の類型Aに指定されているが、近年ではCODとSSは

いずれも類型Cに相当し、環境基準に適合していない。また、窒素とリンに関する環境基準は指定されていないが、TN、TPともに類型Vに相当し、これらより東郷池が富栄養化していると考えられる(吉田・猪迫, 1995)。また、毎年ではないが夏から秋の期間には赤潮の発生が報告されている(南條ら, 1998)。

東郷池は汽水湖であることから、ヤマトシジミ漁を中心とした内水面漁業が盛んに行われている。その漁獲量は1999年には330tであったが、その後減少し2002年には14tにまで落ち込んだ。ヤマトシジミ量の激減の原因として様々な水環境の悪化が考えられるが、鳥取県栽培漁業センターによれば、湖水の塩分低下がもっとも大きい原因であると報告されている(福井, 1999; 福井, 2003)。そこで、鳥取県は2002年よりヤマトシジミ資源量増大を図るために、産卵期である7~9月

<sup>1</sup>鳥取大学大学院農学研究科農林環境科学専攻生存環境学講座環境計画学分野

<sup>2</sup>九州大学大学院生物資源環境科学府生産環境科学専攻地域環境科学講座水環境学分野

<sup>3</sup>鳥取大学名誉教授

<sup>1</sup>Laboratory of Environmental Planning, Division of Agro-Environment Engineering, Department of Environmental Science and Forestry, Graduate school of Agriculture, Tottori University

<sup>2</sup>Laboratory of Drainage and Water Environment, Division of Regional Environmental Science, Department of Bioproduction Environmental Sciences, Graduate School of Bioresource and Bioenvironmental Sciences, Kyushu University

<sup>3</sup>Emeritus Professor, Tottori University

\*Corresponding author (E-mail: mharada@bpes.kyushu-u.ac.jp)

に塩分が5 psu 以上になるように試験的な水門操作を行っている。しかしながら、富栄養化が進行している水域において湖水の塩分を上昇させることは、赤潮の発生や塩分成層の形成による貧酸素化、さらにはそれに伴う生物の死滅や底質環境悪化が懸念される。そのため、湖内の水環境に配慮した湖水の塩分管理が望まれる。そこで、多量の海水流入が水域内の水質学的、水理学的、生態学的な現象に及ぼす影響を評価することが必要となる。

一方、東郷池において湖流の流動特性や塩分の移流分散過程に関する詳細な研究報告は極めて少ない。閉鎖性水域内の流れや物質拡散の予測に対しては、現地観測資料を基にした水理模型実験や数値実験が頻繁に用いられる。このうち、模型実験による流れや物質拡散の予想は多大な時間や費用が必要とされる。そこで本研究では、数値実験による東郷池の湖流の流動特性および塩分の移流分散特性を検討した。東郷池が浅水湖であることから、計算には2次元単層モデルを採用し、さらにその数値解法には有限差分法として解の安定性に優れ、計算時間が短縮できる Alternative Direction Implicit 法 (以下、ADI 法) を用いた (金子ら, 1975)。

## 方 法

### 1. 解析手法

#### (1) モデルの基礎方程式

平均湖面上に原点をとり、東向きを  $x$  軸、北向きを  $y$  軸、鉛直上向きを  $z$  軸とする右手系の直交座標系 (水面  $z = \eta$ 、湖底  $z = -h$ ) を考える。2次元単層モデルの基礎方程式は、連続の式と N-S 方程式および塩分拡散方程式をそれぞれ  $[-h, \eta]$  の範囲で積分することで得られる。ここで、 $x, y$  方向の流速成分  $u, v$  と塩分  $c$  を水深方向の平均量で定義したとき、2次元単層モデルの基礎式は以下ようになる。

・連続の式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \{ (h + \eta) u \} + \frac{\partial}{\partial y} \{ (h + \eta) v \} = 0 \quad (1)$$

・ $x$  方向の運動方程式

$$(h + \eta) \frac{\partial u}{\partial t} + (h + \eta) u \frac{\partial u}{\partial x} + (h + \eta) v \frac{\partial u}{\partial y} = f(h + \eta) v - g(h + \eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho} (\tau_{x,s} - \tau_{x,b}) \quad (2)$$

・ $y$  方向の運動方程式

$$(h + \eta) \frac{\partial v}{\partial t} + (h + \eta) u \frac{\partial v}{\partial x} + (h + \eta) v \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$= -f(h + \eta) u - g(h + \eta) \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{\rho} (\tau_{y,s} - \tau_{y,b}) \quad (3)$$

・塩分の拡散方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \{ (h + \eta) c \} + \frac{\partial}{\partial x} \{ (h + \eta) u c \} + \frac{\partial}{\partial y} \{ (h + \eta) v c \} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (h + \eta) K_x \frac{\partial c}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (h + \eta) K_y \frac{\partial c}{\partial y} \right\} + S_m \quad (4)$$

・水面摩擦応力

$$(\tau_{x,s}, \tau_{y,s})^T = \gamma_a^2 \rho_a \sqrt{w_x^2 + w_y^2} (w_x, w_y)^T \quad (5)$$

・底面摩擦応力

$$(\tau_{x,b}, \tau_{y,b})^T = \gamma_b^2 \rho \sqrt{u^2 + v^2} (u, v)^T - \beta (\tau_{x,s}, \tau_{y,s})^T \quad (6)$$

ここで、 $S_m$  は橋津川を通じて流入、流出する塩分を表す。また、 $f$  はコリオリ係数、 $K_x, K_y$  は  $x, y$  方向の移流分散係数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )、 $\rho$  は湖水の密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $\rho_a$  は空気密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $\gamma_a^2$  は風の摩擦抵抗係数 ( $= 0.0013$ )、 $\gamma_b^2$  は水底の摩擦抵抗係数 ( $= 0.0026$ )、 $\beta$  は係数 ( $= 1.0$ )、 $W_x, W_y$  はそれぞれ湖面上風速 ( $\text{m}/\text{s}$ ) の  $x$  成分と  $y$  成分である。

#### (2) 計算手法

Fig. 1 のようなスタッガード格子上に水理量 ( $u, v, \eta, h, c$ ) を配置し、式(1)~(4)を差分方程式に展開した。本研究では、計算時間が短縮でき解の安定性にも優れた ADI 法を採用した (今里ら, 1971)。ADI 法は、1つのタイムステップを2分する半陰解法の1つであり、前半タイムステップでは  $x$  方向成分を陰表示、 $y$  方向成分を陽表示し、一方、後半タイムステップでは  $x, y$  方向について陰、陽表示を転換し、差分式を誘導する。

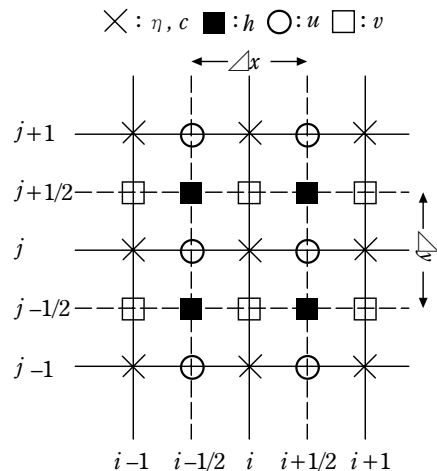


Fig. 1 スタッガード格子と水理量の配置。

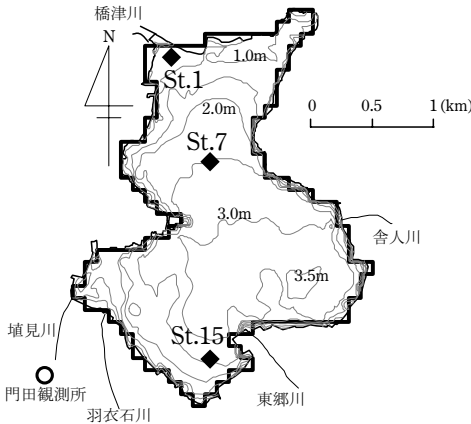


Fig. 2 東郷池の概要と塩分観測地点.

### (3) 計算条件

計算領域を水深分布とあわせて Fig. 2 に示す. 離散化距離は  $\Delta x = \Delta y = 100\text{m}$  とし, タイムステップは  $\Delta t = 10\text{s}$  とした. コリオリ係数は北緯  $35.5^\circ$  の値を用いた. 移流分散係数は対象水域の特性を考慮した固有の値で設定されるべきであるが, 過去に東郷池において移流分散係数に関する研究は行われていない. そのため, 後述のモデルの妥当性の検証においては, 塩分の観測値を十分に再現できるような移流分散係数を  $1\text{m}^2/\text{s}$ ,  $10\text{m}^2/\text{s}$ ,  $100\text{m}^2/\text{s}$  の3ケースで検討し決定した. その結果, 移流分散係数は  $100\text{m}^2/\text{s}$  とした.

次に初期条件は, 計算領域内の全ての流速  $u$ ,  $v$  および水位変動  $\eta$  の初期値をゼロとする, 完全な静止状態とした. また, 東郷池の湖周全体を閉境界とする境界条件とした. なお, 橋津川合流口では式(1)に河川流量  $Q_R$  を与えることで, 橋津川の流入, 流出を考慮した. また, 他の4つの流入河川はいずれも流量が  $1\text{m}^3/\text{s}$  以下の規模の小さい河川であり, 湖流に及ぼす影響が非常に小さいため無視した.

## 2. モデルの妥当性の検証

### (1) 検証方法

Fig. 2 中の観測点において, 2002年度から鳥取県栽培漁業センターにより塩分の連続観測が行われている. この塩分の観測データと2次元単層モデルにより再現した結果を比較することで本モデルの妥当性について検討した.

橋津川水門では, その上流側と下流側の水位が観測されているが, 流量や流速に関する観測は皆無であるため, 水門を通過する水量の把握は困難である. 一方,

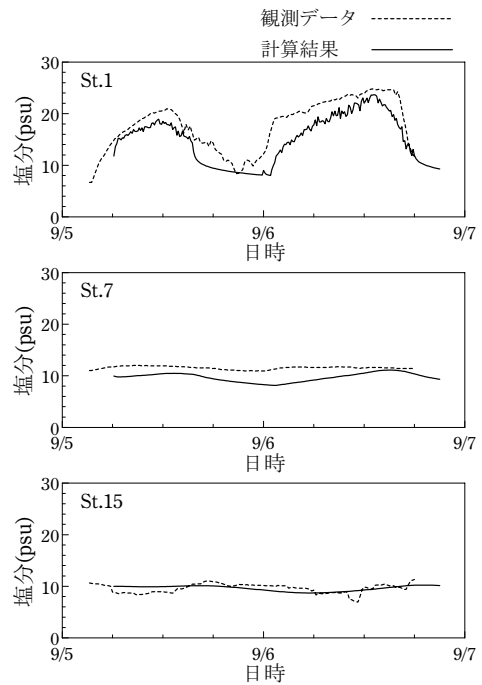


Fig. 3 塩分の観測データと計算値の比較.

石黒ら (2004) は, 魚道において水門の下流側と上流側の水位差ごとに平均流速の鉛直分布を測定し, 海水の流入量を算定するとともに, その簡易推定式として次式を提案した.

$$Q_R = \begin{cases} 12.0 \times \Delta h + 0.70 & (\Delta h \geq 0.01) \\ 41.0 \times \Delta h + 0.41 & (\Delta h \leq 0.01) \end{cases} \quad (7)$$

ここで,  $Q_R$  は河川流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $\Delta h$  は下流側と上流側の水位差 (m) である. 本研究では水門における水位の実測値と式(7)を用いて海水の流入, 流出量を算定した. なお, 同式は魚道を遡上する海水量を推定する式であるが,  $\Delta h$  が負の場合, その値の絶対値を用いて計算された流量  $Q_R$  に相当する潮水が, 同魚道を通じて直接東郷池から流出するものと便宜的に仮定した. 流入水の塩分に関しては後述する.

先述のように水門開放時の河川流量は評価できない. そのため, 水門が閉鎖されており, 魚道の海水流入のみで湖水塩分が上昇している期間を計算対象とした. また, 塩分と水温の初期設定を容易にするため, Fig. 2 の St.1, St.7, St.15 でそれらの値が同程度のとき, 東郷池全域で一様であるとし, そのときを計算の開始時点とした. これらより, 条件を満たしている2003年

9月5日3時～9月6日18時を再現期間とし、計算領域内の水温と塩分の初期値はそれぞれ27℃、10psuとした。なお、風向、風速はケーブルビジョン東伯耆門田観測所の気象データを用いた。

## (2) 検証結果

Fig. 3は各観測地点における計算結果と実測値を比較したものである。これより、計算結果は実測値をやや過小評価している。しかし、実測値が湖底付近の塩分を測定したものであるのに対し、計算結果は水深方向の平均塩分であることから、その違いによって生じた誤差であると推測される。このように計算結果は実測値をやや過小評価しているが、塩分の時間的推移をほぼ再現できているため、本モデルの適用は可能であると判断した。

## 3. シナリオ分析の概要

風と河川が塩分拡散および湖流に与える影響について検討するため、以下の計算条件で数値実験を行った。

まず、風に関する条件は次のとおりである。門田観測所の気象データによれば、東郷池周辺は日中に北風（陸風）、夜間に南風（海風）が卓越するという特徴を

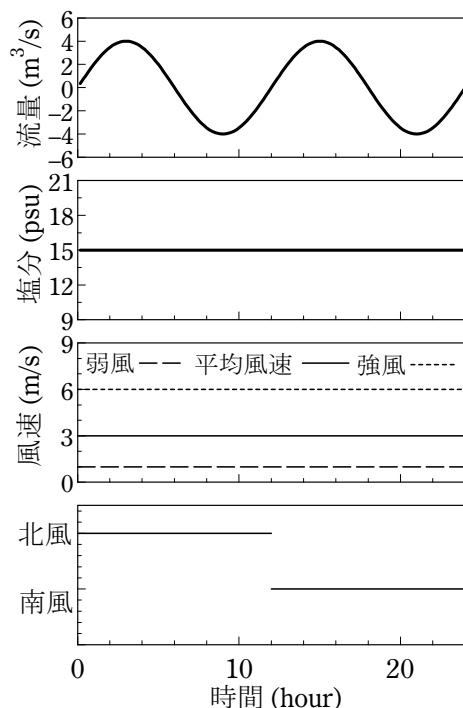


Fig. 4 数値実験における計算条件（1日分）。

有している。そこで、風向は12時間ごとに北風、南風が交互に入れ替わるものとし、初期風向は北風とした。また、風速は東郷池周辺の年平均風速、弱風、強風の3ケースを想定し、それぞれ3.0m/s、1.0m/s、6.0m/sとした。

次に河川流量に関する条件（Fig. 4）は以下のとおりである。橋津川の流入、流出量は潮汐を考慮して12時間周期の正弦波でモデル化し、そのピーク流量は年平均流量を想定した。すなわち、式(7)と水位データから推定した年平均流量4.0m<sup>3</sup>/sを正弦波の振幅とした。また、塩分は水門における観測値の平均値である15psuとした。初期塩分は、年間を通じて東郷池の湖水が完全に淡水化しないことを考慮し、全域で0.5psuとした。以上の計算条件の下、吹送開始後2週間まで計算を行った。

## 結果と考察

### 1. 計算結果

塩分の拡散過程を検討するため、東郷池をFig. 5に示す4つの領域に分割した。また、それぞれの領域の代表点として定点（No.1～No.4）を設定し、各定点における塩分変動に着目した。Fig. 6とFig. 7は風速3.0m/sの結果である。Fig. 6に計算開始からの塩分の経時変化を示す。これより、塩分が定点1、2では約6日後、定点3、4では約8日後に定常的変動に達している。つまり、東郷池全域において塩分の拡散は吹送開始後約8日で定常的変動に達する。Fig. 7に定常的変動に達した後の河川流量と定点の塩分を

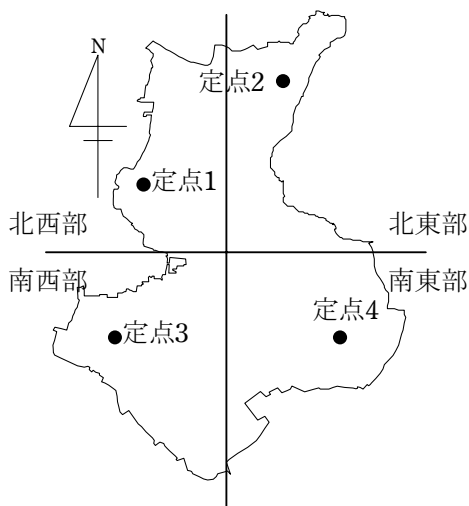


Fig. 5 数値実験における領域および定点。

示す。これより、定点1, 2では約3時間、定点3, 4では約6時間のタイムラグが生じている。また、風速1.0m/s, 6.0m/sにおいても同様な結果が得られた。以下、定常的変動に達した後の塩分拡散ならびに湖流の流動特性を検討する。

#### (1) 塩分拡散の検討

風速3.0m/sの結果を用いて、北風時、南風時のそれぞれの塩分分布の時間的推移を比較することで、風向が塩分拡散に及ぼす影響を検討した。Fig. 8に北風が作用する0時から12時の塩分分布を、Fig. 9に南風が作用する12時から24時の塩分分布をそれぞれ3時間毎に示す。ここで、0時、12時の塩分分布は流入直前の分布である。

Fig. 7より、定点1, 2では約4~12psu、定点3, 4では約6~8psuの範囲で変動している。これより、遡上した海水の影響は空間的に異なることが分かる。また、ピーク流量を4.0m<sup>3</sup>/sとした場合、東郷池全域においてヤマトシジミの産卵期に最適な塩分をほぼ満たしていることが分かる。さらに、Fig. 8およびFig.

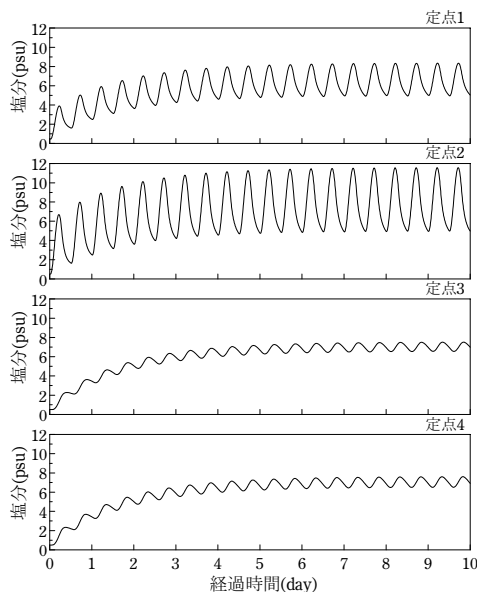


Fig. 6 計算開始からの塩分の経時変化 (風速3.0m/s)。

9を比較すると、塩分分布の時間的推移に顕著な違いは見られず、風向が塩分拡散に与える影響は小さいことが分かる。また、風速1.0m/s, 6.0m/sにおいても同様の結果が得られた。

#### (2) 湖流の流動特性の検討

北風、南風が作用する時の湖流の流動特性を Fig. 5中の4つの領域で検討した。Fig.10に風速3.0m/sの北風、南風のそれぞれの場合で、流れがほぼ定常に達したときの湖流ベクトルを示す。

北西部では北風および南風において順流が生じ、北東部では両風向において逆流が生じている。また、南西部では北風で反時計回りの還流が生じ、南風で時計回りの還流が生じている。さらに、南東部ではいずれの風向においても流速が1.0cm/s未満と非常に小さく、流れは停滞状態にあると考えられる。また、風速1.0m/s, 6.0m/sにおいても同様の結果が得られた。

ここで、4つの領域のうち南東部と南西部に注目した。Fig.11は過去と現在のヤマトシジミの生息分布を示している。これより、南西部と南東部の沿岸部で過

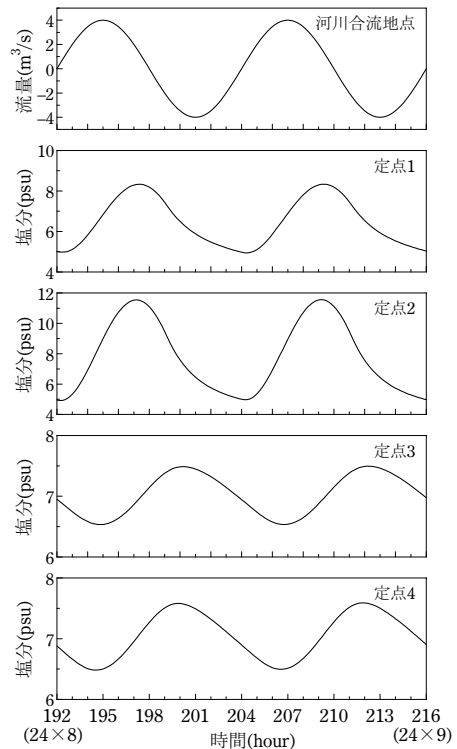


Fig. 7 定常的変動時の河川流量と塩分 (風速3.0m/s)。

去にヤマトシジミの生息が確認できたが、現在、南東部にヤマトシジミの生息は確認されていない。また、Fig.12の底泥分布より、南東部はヘドロなどが沈積しており、底質環境が悪化している領域である。これより、劣悪な底質環境がヤマトシジミの生息に影響していると推測される。南東部と南西部には4本の流入河川があり、有機物などの流入負荷の影響を強く受ける。Fig.10に示したように、南東部では流れが停滞状態にあるため、有機物やデトリタスなどが沈積しやすい環境下にあると推測される。一方、南西部では強い還流が生じており、そのため有機物が南東部に比べて沈積しにくいと推測される。このような湖流の流動特性に

よって底質環境、さらには現在のヤマトシジミの生息分布に違いが生じたと考えられる。

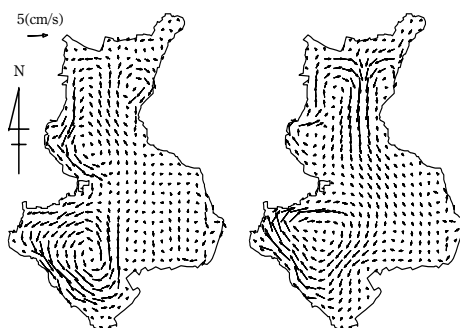


Fig. 10 風速3.0m/sの北風および南風作用時の湖流ベクトル（左図：北風、右図：南風）。

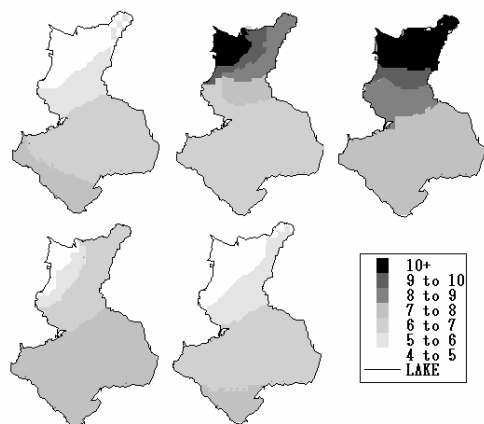


Fig. 8 風速3.0m/sの北風作用時の塩分分布の推移（上段左から右へ：0時、3時、6時、9時、12時）。

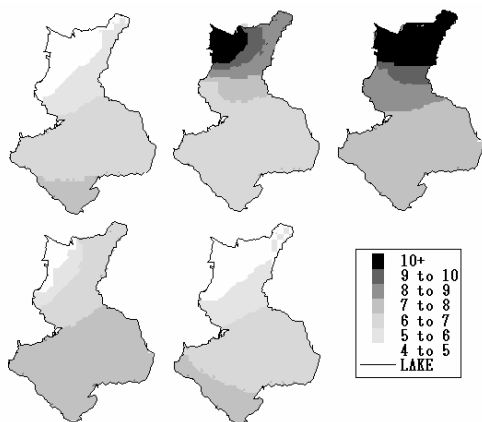


Fig. 9 風速3.0m/sの南風作用時の塩分分布の推移（上段左から右へ：12時、15時、18時、21時、24時）。

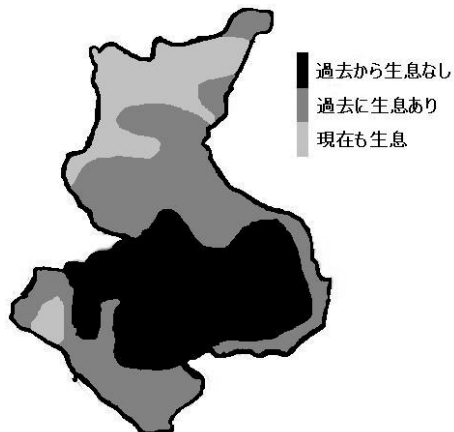


Fig. 11 ヤマトシジミの生息分布（米原，2004）。

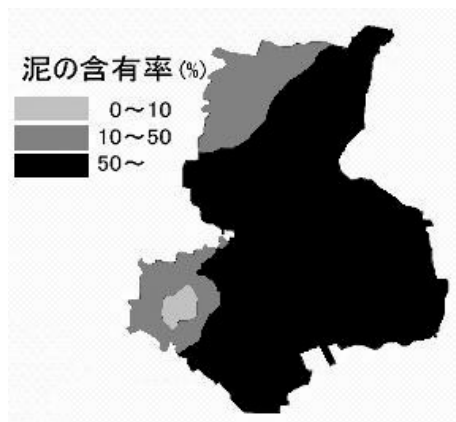


Fig. 12 底泥分布（米原，2004）。

## 要 約

本研究では、ADI法を用いた2次元単層モデルにより、東郷池の塩分拡散および湖流の流動特性について検討した。まず、湖内の塩分に関する観測データを本モデルにより再現したところ、良好な結果が得られ、モデルの妥当性が認められた。

次に橋津川の河川流量を振幅 $4.0\text{m}^3/\text{s}$ 、周期12時間の正弦波でモデル化し、風速を $3.0\text{m}/\text{s}$ 、風向を日中に北風、夜間に南風で設定し、シナリオ分析を行った。その結果をまとめると以下の通りである。

河川流量、風速、風向が湖内の塩分変動に与える影響を検討した。その結果、風速、風向に関わらず湖内塩分は北西部と北東部で $4\sim 12\text{psu}$ 、南西部と南東部で $6\sim 8\text{psu}$ の範囲で変動した。これより、ヤマトシジミの産卵、孵化にとって最適な塩分である $5\text{psu}$ 以上を維持するためには、海水の流入量を $4.0\text{m}^3/\text{s}$ 程度に調整することが必要であると考えられた。

次に、風向が流動パターンに及ぼす影響を検討した。その結果、両風向において北西部では順流が生じ、北東部では逆流が生じた。また、南西部では北風で反時計回り、南風で時計回りの還流が生じた。さらに、南東部では両風向で流速が $1.0\text{cm}/\text{s}$ 未満と非常に小さく、流れが停滞状態にあると考えられた。また、南西部と南東部に注目した結果、南東部における底質環境や現在のヤマトシジミ生息分布に湖流の流動特性が関係し

ていることが示唆された。

## 文 献

- 福井利憲 1999 ヤマトシジミ増殖試験. 平成11年度鳥取県水産試験場年報: 149-150
- 福井利憲 2003 東郷池におけるヤマトシジミ資源回復の試み. 第4回全国シジミシンポジウム in 小川原湖: 441-445
- 今里哲久・金成誠一・国司秀明 1971 琵琶湖の水の流動に関する数値実験的研究 - 主として1層2次元モデルについて. 京都大学防災研究所年報, 14(B): 451-464
- 石黒潤・檜谷治・福井利憲 2004 東郷池に流入する海水遡上量に関する研究. 土木学会中国支部第56回研究発表会: 151-152
- 金子安雄・堀江毅・村上和男 1975 ADI法による潮流と汚染拡散の数値計算 - 大阪湾に適用した場合について. 港湾技術研究報告書, 14(1): 1-17
- 中村幹雄 2000 日本のシジミ漁業 - その現状と問題点. たたら書房, 鳥取, 1-17, 176-186頁
- 南條吉之・福田明彦・矢木修身・細井美由彦 1998 汽水湖におけるアオコおよび赤潮発生への制御に関する基礎的研究. 水環境学会誌, 21(18): 530-535
- 米原邦彦 2004 東郷池の水質とプランクトン優先種におけるシジミの分布について. 鳥取大学大学院修士論文: 1-24
- 吉田 勲・猪迫耕二 1995 下水道施設の設置および土地利用状況の変化にともなう東郷池の水質の変遷. 水環境学会誌, 18(10): 823-828



## Summary

In brackish lakes undergoing artificial salinity management, the demonstrating countermeasure scenarios for optimum salinity management is crucial for protecting water environment and increasing the production of water resources. Arming at the fundamental research on this issue, the authors constructed a two-dimensional numerical model that utilized Alternative Direction Implicit method (ADI) to examine lake currents and salinity dispersion. We applied this model to Lake Togo in Tottori Prefecture, Japan, and investigated the effect of wind speed and its direction on the flow pattern of wind-driven currents, and the effects of river discharge, wind speed and its direction on the spatial distribution of wind-diffused salinity.

When we modeled river discharge using a sine-curve with an amplitude of  $4.0 \text{ m}^3/\text{s}$  and a cycle of 12 hours, the salinity in the northwest and northeast areas fluctuated in the range of 4~12 psu. In the southwest and southeast areas, it fluctuated in the range of 6~8 psu. The result indicated that an approximate discharge of  $4.0 \text{ m}^3/\text{s}$  is needed to maintain the optimum salinity of level in Lake Togo during the breeding season of Yamato-shijimi (*Corbicula japonica* PRIME).

The horizontal distribution of wind-driven currents in the northwest area in the cases of north and south winds was the same direction as the wind; in the northeast area, it was the opposite direction of the wind. The southwest area had clockwise currents under the north wind and counterclockwise currents under the south wind. The southeast area had very weak currents in the cases of north and south winds. Comparing the southwest and southeast areas, it was concluded that the pattern of wind-driven currents are connected to the environment of the bottom sediments and the habitat area of Yamato-shijimi.