

# 琵琶湖の流動と水質のシミュレーション

## Simulation of flow and water quality in lake Biwa

○田上 愛子 (大阪大学) 久保 洋昭 (大阪大学) 加賀 昭和 (大阪大学)

近藤 明 (大阪大学) 井上 義雄 (大阪大学)

Aiko TANOUE\*<sup>1</sup> Hiroaki KUBO \*<sup>1</sup> Akikazu KAGA\*<sup>1</sup> Akira KONDO \*<sup>1</sup> Akira KONDO \*<sup>1</sup> Yoshio INOUE \*<sup>1</sup>

Osaka University \*<sup>1</sup>

For Lake Biwa a 3-dimension hydrodynamic model(water flow and temperature) and water quality model (phytoplankton, zooplankton, inorganic nitrogen, organic nitrogen, inorganic phosphorus, organic phosphorus, DO, particulate COD and dissolved COD) were developed. These models are carried out for 1 year by using the climate data in 2007. The number of grid is 71×131×86(500m horizontal grid and 0.5m, and 2.5m vertical grid) About the hydrological model, the vertical temperature simulation generally represented the seasonal variations. In water quality model, several water qualities on the surface represented the measured data. But some parameters should be improved to correctly predict.

### 1. 研究背景と目的

#### 1.1 琵琶湖における環境問題

近年、琵琶湖では富栄養化と北湖湖底近傍の低酸素化といった環境問題が懸念されている。この環境問題を引き起こす原因として考えられているのが例年厳冬期に生じていた鉛直混合の弱体化である。

琵琶湖では春から夏にかけて湖面が温められ、鉛直方向に約 20℃の水温差をもつ水温成層が形成される。夏の間、表層では植物プランクトンの光合成によって酸素が供給される一方、底層では有機物の分解と呼吸のために酸素は消費されるのみであり、酸素不足の状態である。その後、秋から冬にかけて湖面が冷やされると水の密度差によって鉛直方向の水の循環が生じる。この循環が生じることで湖表層の酸素が湖底まで供給され、現在の琵琶湖の水質が保たれている。

鉛直混合の弱体化の原因としては、地球温暖化の影響によって冬場でも水温成層が維持され易くなっていることや降雪量の減少によって流入河川の水温が上昇していること、また暖冬と厳冬のふり幅の大きな気象変動などが上げられているが、現時点では具体的な相関性は見出されておらず、水環境保全の観点から、その規模や発生メカニズムの解明が急務となっている。

### 2 琵琶湖流域モデル

#### 2.1 琵琶湖流域モデルの概要

淀川流域水系モデルによる河川流量・水温を境界条件

として、琵琶湖流動場モデルは流向・流速・水温を計算する。琵琶湖水質モデルは、琵琶湖流動場モデルによって得られた計算結果と淀川流域水系モデルによる河川流量・水質を境界条件<sup>2)</sup>として、植物プランクトン、動物プランクトン、有機態窒素、無機態窒素、有機態リン、無機態リン、DO、SS 性 COD、溶解性 COD の濃度を計算する。また計算に必要な気象データは、GPV data を利用し、1 時間毎に更新して使用する。

また、本研究で用いる琵琶湖水文モデルの特徴としては以下の 3 点が挙げられる。

#### (1)気象条件

気象庁客観解析データを内挿によって各メッシュに適応させ、1 時間毎に更新しているため、より詳細な湖面での熱収支・流れの再現が可能となる。

#### (2)河川条件

56 の河川を考慮しているが、流入量・流入負荷については淀川流域圏水系モデルの計算結果を入力データとして取り入れている。そのため将来予測を行う際にも降雨流出・土地利用・人口分布などを考慮した入力値を用いることができる。

#### (3)メッシュ

水平方向に 500m 格子、鉛直方向には、季節を通して変化の大きい水深 30m までを 0.5m 格子、30m 以深を 2.5m 格子とした。これより、鉛直方向の混合に影響を及ぼす水温成層の形成をより正確に評価することを可能としている。

## 2.2 計算領域

Fig1 に琵琶湖流域モデルの計算領域と水深を示す。

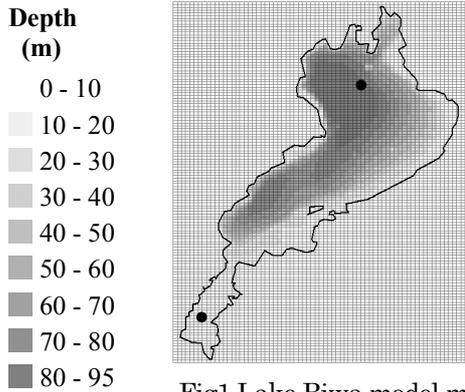


Fig1 Lake Biwa model mesh

水平計算領域は琵琶湖全体を含む 36km×65.5km である。水平格子は 500m×500m で格子数は 72×131, 鉛直方向は水深 30m までを 0.5m 間隔, 30m 以深では 2.5m 間隔とし, 格子数は 86 である。また水深は滋賀県琵琶湖環境科学研究センター<sup>1)</sup>の 4 次メッシュ琵琶湖水深データを用いる。座標は、水平面上の領域の南西端を原点とする x,y 軸をとり、湖底より鉛直上方を上向きとして z 軸をとる。なお計算期間は 2007 年の 1 年間とする。

## 2.3 流動場モデル

### (1) 支配方程式

流動場モデルの基礎方程式はブジネスク近似, 鉛直方向に静水圧近似を仮定し, 流体の運動方程式, 連続の式, 熱の保存式で構成されている。以下に基礎式を示す。

#### a. 運動方程式(x,y 方向)<sup>3)</sup>

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + v_h \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + v_h \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + v_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{g}{\rho} \int_z^0 \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + v_h \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + v_h \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + v_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{g}{\rho} \int_z^0 \frac{\partial \rho}{\partial y} dz \quad (2)$$

#### b. 静水圧近似

$$0 = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\rho}{\rho_0} g \quad (3)$$

#### c. 連続の式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

#### d. 熱の保存式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \kappa_h \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \kappa_h \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \kappa_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (5)$$

ここで  $u, v, w$ : x,y,z 方向の流速( $\text{ms}^{-1}$ ),  $T$ : 水温(K),  $p$ : 圧力( $\text{N/m}^2$ ),  $\rho$ : 湖水密度( $\text{kgm}^{-3}$ ),  $\rho_0$ : 基準湖水密度( $10^3 \text{kgm}^{-3}$ ),

$g$ : 重力加速度( $9.8 \text{ms}^{-2}$ ),  $f$ : コリオリ・パラメータ ( $8.34 \text{E}-5 \text{s}^{-1}$ ),  $\nu_h(\nu_z)$ : 水平(鉛直)方向の渦粘性係数 ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ),  $\kappa_h(\kappa_z)$ : 水平(鉛直)方向の渦拡散係数( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )

### (2) 計算条件

初期値について、流速は各成分(x,y,z)のいずれも 0m/s とした。水温は滋賀大学の遠藤ら<sup>3)</sup>が毎月一度水深 0.5m 間隔で測定しているデータを使用する。なお水平方向は一定とする。計算期間は 2007 年の 1 年間であるが、助走期間を含めて 2006 年 7 月から計算を開始した。さらに気温差を  $\pm 1^\circ \text{C}$  の差をつけてシミュレーションを行った。

## 3 水質モデル

本モデルで取り扱う生態系構成要素は「植物プランクトン」「動物プランクトン」「有機態窒素」「無機態窒素」「有機態リン」「無機態リン」「溶存酸素」「SS 性 COD」「溶存性 COD」の 9 つである。

各構成要素は、化学的・生物的過程による変化と、移流・拡散による影響を考慮する。各構成要素の時間変化は以下のように表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = A_h \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + A_h \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + A_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + Q_c \quad (6)$$

また Fig3 に水質モデルの概念図を示す。

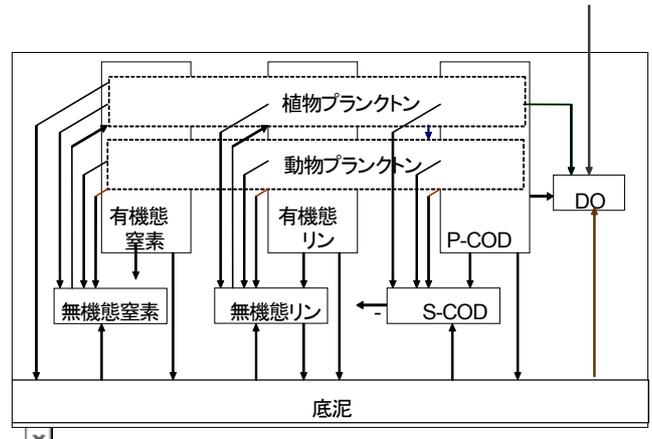


Fig3 Conceptual diagram in water quality model

## 4 計算結果と考察

### 4.1 流動場モデルの計算結果

#### (1) 経年変化

北湖の今津中央沖地点を通り、琵琶湖流域メッシュモデルの y 軸に平行な温度断面図を描画した。2007 年の経年変化を 1 月 5 日から 5 日毎に描画した断面図をつなげることで、季節変動を確認した。Fig4 に 6, 8, 10, 12 月の午前 9 時の断面図を示す。夏にかけて表層の水温が上昇し、その後表層が冷やされ 12 月には一様に低い水温となっている様子が確認された。これは実際の成層化の様子とも一致し、モデルによって季節変動の様子がよく表現されているといえる。

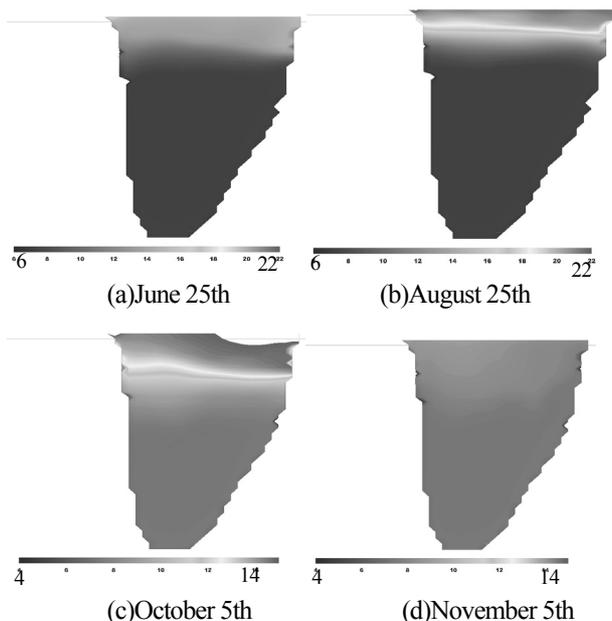


Fig4 Seasonal change in vertical distribution of water temperature.

### (2) 鉛直循環

例年、鉛直方向の循環が生じている2月前半について鉛直温度断面図を3時間毎に描画し鉛直混合の再現について検討した。2月3日と2月12日の0時の水温分布をFig5に示す。

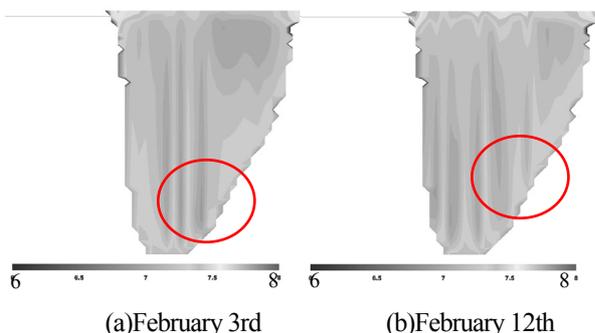


Fig5 Seasonal change in vertical distribution of water temperature in February.

Fig5において丸で囲まれた箇所では湖底まで冷たい水が達している様子が確認される。本モデルでは中央部から冷やされていく様子が確認できるが、熊谷ら<sup>4)</sup>によると鉛直方向の循環は、岸に沿って表層で冷やされた水が湖底へと潜り込んでいくのではないかと考えられている。そのため、今後も詳細な実測データの収集とともに検証を行う必要がある。

### (3) 気温差の影響

気温差が水温の鉛直分布に及ぼす影響はかなり小さかった。気温差による湖面での熱量は日数を経るほど蓄積されていくことや、琵琶湖の水の滞留時間は5.050年であることから、初期値の条件を完全に取り去り、気温差による影響を考察するためにはさらに長期でモデルを動かすことが必要である。

## 4.2 水質モデルの計算結果

### (1) 湖面における比較

「植物プランクトン」「全窒素」「全リン」「DO」「COD」の各項目について滋賀県琵琶湖環境科学研究センターの北湖観測地点今津中央沖の表層と湖底、南湖観測地点唐崎沖中央における表層での観測値と計算値の比較を行った。Fig6に(a)植物プランクトン、(b)全窒素、(c)リンの北湖湖底表層における計算値と観測値の比較を示す。植物プランクトンについては夏から秋にかけての濃度がかかなり大きく評価されている。全体的に季節変動の影響が大きい。これは現在のプログラムでは、高温になると植物プランクトンの活動が鈍くなる高温阻害を考慮した温度制御を考慮していないため、高温時の植物プランクトンの増殖が大きくなってしまったためではないかと考えられる。

一方窒素では季節変化が比較的良く観測値と一致している。DOやCODにおいても北湖表層では概ね実測値と一致している。

しかし、北湖表層ではよく一致していても湖底や南湖ではあまり実測値と一致しない場合も見られた。北湖と南湖では貯水量や表面積に大きな差があることから、現在では一様に与えているパラメーターに特徴づけを行うことでモデルの精度が向上されることが考えられる。

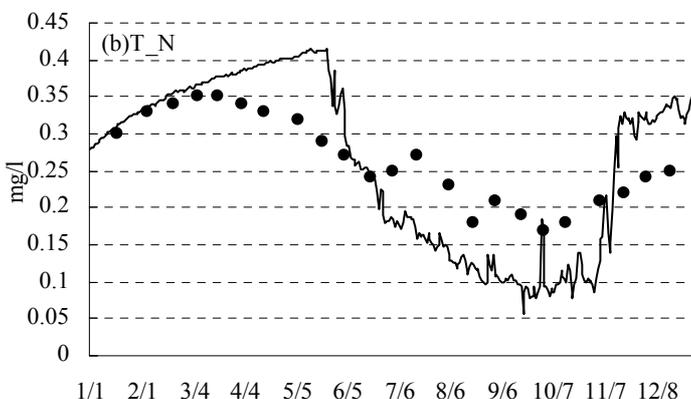
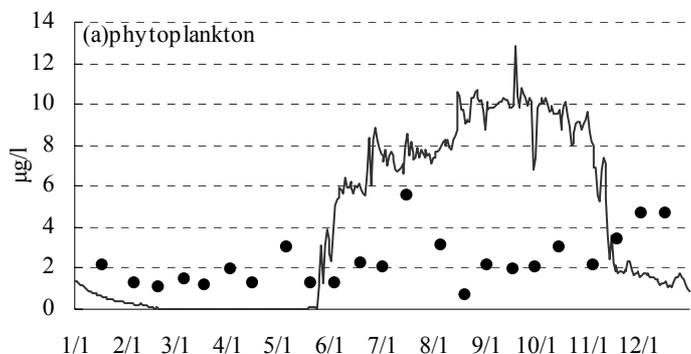


Fig6 Time series of observed and calculated value.

### (2) 溶存酸素の鉛直分布

Fig7に左上から2, 4, 6, 8, 10, 12月における溶存酸素

のモデルによる計算値と観測値についての比較を示す。溶存酸素の観測値は月に1度0.5m, 5.0m, 10m, 15m, 20m, 30m, 40m, 60mの各地点で行われている滋賀県琵琶湖環境科学研究センター<sup>1)</sup>で計測されている水質モニタリング調査によるものである。

湖底での低酸素化を表現するのに溶存酸素のモデルの精度は重要であるが、現段階ではほぼ垂直の分布をとり、特に冬季で実測値との一致があまりよくない。これはモデルによって鉛直方向の流れが十分に再現されていない可能性が考えられる。また全体的に湖面での再曝気量が少なく評価されている。パラメーターの改善が必要である。<sup>6)</sup>

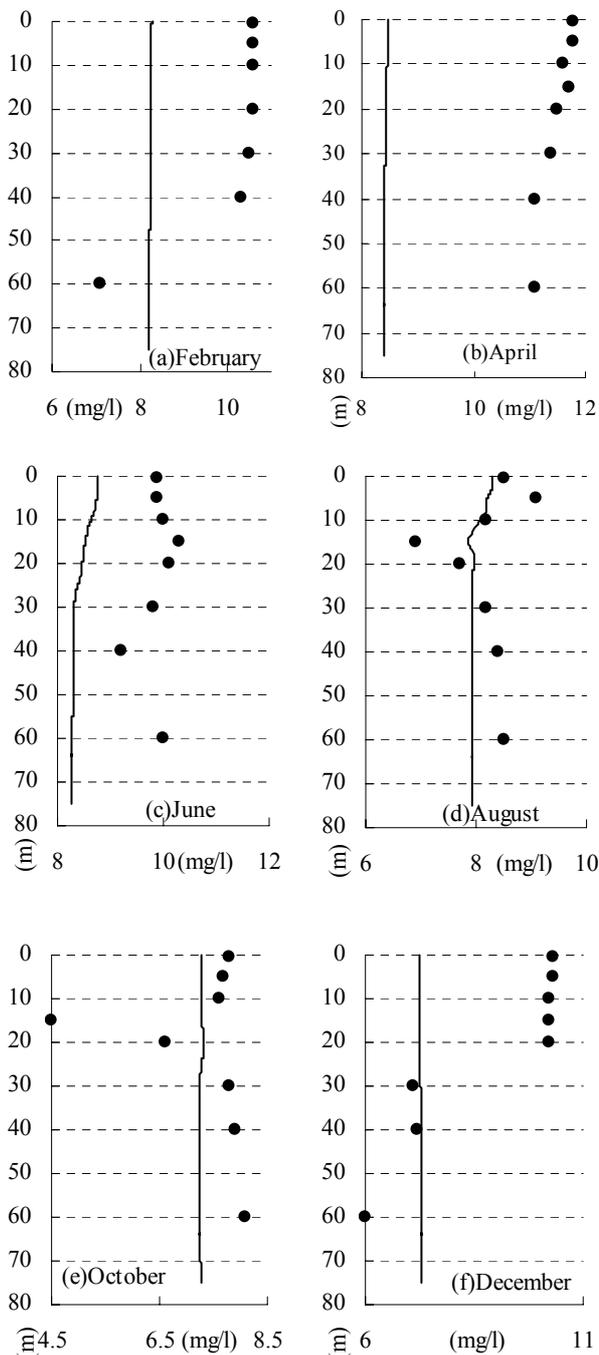


Fig7 Vertical profile of DO

## 5. 研究のまとめ

本研究では水文モデルと水質モデルのそれぞれについて、文献や既存研究を参考にしながら理論的なモデル構築を行い、パラメーターの検討やについて評価を行った。

流動場モデルでは鉛直方向においておおまかな季節変動は表現できていることがわかった。しかし、実際に湖底の様子を観測することは難しく、どの程度冬季の鉛直循環が再現できているのかは今後も検討の必要がある。

水質モデルでは、今回あまり実測値とあわなかったパラメーターについてはもう一度検証を行う必要がある。特にプランクトンの濃度に関しては窒素やリンなど他の構成要素にも及ぼす影響が大きいいため、さらなる精度向上が必要である。生態系のシミュレーションはパラメーターの設定が難しく、実測などをもとに根拠のあるパラメーターの検討を行うことが今後の課題である。

また、両モデルを通して、北湖と南湖、表層と湖底で一定のパラメーターを与えているが、それぞれの特徴に応じたパラメーター設定を行った方が、よりモデルの精度は向上されると考えられる。

現状では計算期間が短いことで、初期値の影響が残ってしまうなど、気温差の影響が十分にモデルに反映できなかったことが考えられる。琵琶湖の水の滞留時間を考慮に入れ、計算時間を長くすることやモデルの計算速度を向上させることも今後の課題である。

## 参考文献

- 1) 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター, 水質常時監視測定結果  
<http://www.lberi.jp/asp/bkst/Telemeter/bkstSuisituMenu.asp>
- 2) 久保洋昭: 琵琶湖流域の水文モデルの開発, 大阪大学大学院修士論文, 2008
- 3) 安間智之, 小路剛志, 伊藤弘之, 藤田光一, 流域水物質循環モデルを用いた東京湾と流入河川における水質変遷再現について, 水工学論文集, 第50巻, 2006
- 4) 遠藤修一 (滋賀大学教育学部), 琵琶湖の水温・水質データ  
<http://www.edu.shiga-u.ac.jp/~endoh/>
- 5) 秋友和典, 黒木聖夫, 大久保賢治, 熊谷道夫: 3次元数値モデルで再現された琵琶湖の熱循環, 琵琶湖研究所所報 21号, 28-42, 2002
- 6) 北澤大輔, 熊谷道夫: 流動場-生態系統合モデルによる琵琶湖生態系シミュレーション, 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター研究速報 59巻, p.21-25, 2007