

## 琵琶湖内流動解析モデルと 分布型流出モデルを用いた流域モデル統合化

山敷庸亮\*・小林 健一郎\*\*・松本 拓\*\*\*・佐山 敬洋\*・寶馨\*

\*京都大学大学防災研究所

\*\*京都大学生存基盤ユニット

\*\*\*京都大学大学院工学研究科

### 要 旨

本研究では琵琶湖における流動特性の解析と流域からの流入水、特に洪水流の流入水の影響の評価を行なうため、琵琶湖三次元流動解析モデルであるBiwa-3Dと、分布型流出モデルであるOHyMoSの統合を試みた。統合されたモデルを用いて2002年の夏期における流出・流動解析を行なった結果、特に夏期における水温躍層形成と東岸からの流入河川水の影響が大きい事が解析結果より判明した。また年間を通じた計算において冬期の混合特性と湖面の冷却に流入河川水の影響も見られる事が示唆された。

キーワード: Biwa-3D, OHyMoS, 三次元流動解析, 水温成層, 流入河川水

### 1. はじめに

我が国最大の閉鎖性水域である琵琶湖の流動特性は流域からの栄養塩や洪水流入イベントにより大きく影響を受ける。琵琶湖内部の水質の将来像を予測するためには琵琶湖流域からの流入特性をできるだけ高精度なモデルにて再現するのが望ましい。

琵琶湖の湖流解析モデルと流域モデル統合の試みは10年前から始められたが、その多くは流域モデルや琵琶湖流動モデルのどちらかを簡略化したものである。本研究においては琵琶湖流動生態系モデルに関しては三次元非静水圧モデルであるBiwa-3Dの利用と流域モデルに関しては分布型流出モデルであるOHyMoSを統合する試みを紹介する。

### 2. モデル化の手法

Biwa-3D<sup>1)</sup>は自由水面を有する閉鎖性水域コリオリ力を含んだ三次元の運動方程式とスカラー輸送方程式を数値解析することにより流れ場を決定し、その後スカラー輸送方程式と連動した生態系解析モジュールにより各時間ステップ毎に計算し、水質モジュールと流動モジュールを三次元非定常で解析する。Biwa-3Dにおいては非静水圧モデルで圧力をMAC法により解析し、離散化手法は改良型Semi-Lagrangianスキームを用いている。

本研究で統合する分布型流出システムは佐山ら<sup>2)</sup>によるOHyMoSを用いた淀川流域モデルである。

### 3. 基礎式

Biwa-3Dは大きく分けて三次元非静水圧の流動解析モジュール、富栄養化解析モジュールからなり、琵琶湖の初期水温、流入河川データ、気象条件、初期水質項目などを入力すると、年間の水質を予測可能である。初期条件は、水平方向格子サイズ(500m×500m)、鉛直50層(2m間隔)となっている。

流動解析モジュールにおいてはLESを用いた非静水圧三次元解析により湖流を計算する。本モジュールに用いられる支配方程式は連続式(1)、格子平均操作を行った回転系における非圧縮性NS方程式(2)とスカラー量輸送方程式(3)である。

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j - \lambda_{ij})}{\partial x_j} = \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial x_i} + \bar{\rho} F_j \frac{\partial x_3}{\partial x_i} + f \bar{\rho} (\bar{u}_2 \frac{\partial x_1}{\partial x_i} + \bar{u}_1 \frac{\partial x_2}{\partial x_i})$$

$$\frac{\partial(\bar{\beta})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\beta}_i \bar{u}_j - \chi_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (K \frac{\partial \bar{\beta}}{\partial x_j}) + P_s \quad (3)$$

ここに  $x_i$  は東方向(i=1)、北方向(i=2)そして上方向(i=3)を示す。 $f$  はコリオリパラメータ、 $u_i$  (i=1,2,3) はそれぞれの方向の水の流速、 $\beta$  はスカラー量を、 $\mu$  は水の粘性係数、 $K = k/\rho_0$  :  $k$  は水の分子拡散係数、 $\rho_0$  は水の標準比重を、 $P$  は圧力を、 $\rho$  は水の比重を、 $F$  は重力を、 $S$  はスカラー量の生成項を示す。本モデルの特徴は、通常ブジネス近似される密度項を連続式・運動方程式に残し陽的に解析を行なっている点である。そのため、SGSモデルも全て密度項を含んだものとなっている。式(2)に示される SGS ダイナミック応力  $\lambda_{ij}$  と式(3)中の流束  $\chi_j$  は下に示す Mixed Scaling Formulation Model<sup>2)</sup>であらわす。

$$\lambda_{ij} - \frac{\delta_{ij}}{3} \lambda_{kk} = -2C_\mu \bar{\Delta}^{4/3} \bar{S}_{ij} + L^m - \frac{\delta_{ij}}{3} L_{kk}^m \quad (4)$$

モデル定数  $C_\mu$  は以下により定める。

$$C_\mu = \frac{(K_{ij} - \Psi) \bar{S}^T}{2\Gamma \bar{S}^T} \quad (5)$$

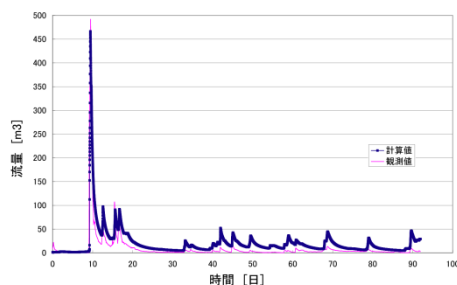
ここに、

$$K_{ij} = \rho u_i \bar{u}_j - \rho u_i u_j \quad (6)$$

$$\Psi_{ij} = \rho u_i u_j - \rho u_i u_j \quad (7)$$

$$\Gamma = \bar{\Delta}^{-4/3} \bar{\Delta}^{-4/3} \quad (8)$$

ここに、 $\bar{\Delta}$  は空間平均操作におけるグリッドフィルター幅、 $\bar{()}$  はテストフィルター操作



を示す。

$$\bar{\Delta} = \sqrt{\delta x_H \delta x_V} \quad (9)$$

ここに  $\delta x_H$ 、 $\delta x_V$  はそれぞれ水平・鉛直方向格子サイズである。また、テストフィルター幅は以下の通りである。

$$\bar{\Delta}^T = 2\sqrt{\delta x_H \delta x_V} \quad (10)$$

また、式(3)中の SGS フラックスは以下の通りである。

$$\chi_j = -\frac{C_\mu}{\rho T} \bar{\Delta}^{-4/3} \frac{\partial \bar{\beta}}{\partial x_j} + P_j \quad (11)$$

ここに

$$P_j = \bar{\beta} u_j - \beta u_j \quad (12)$$

$$\frac{1}{T} = \frac{\rho}{C_\mu} \frac{(N_j - \Theta_j) B_x}{\Gamma B_x^2} \quad (13)$$

$$N_j = \bar{\beta} u_j - \beta u_j \quad (14)$$

$$\Theta_{ij} = \bar{\beta} u_j - \beta u_j \quad (15)$$

各ステップ毎に格子サイズ、テストフィルターサイズの乱流諸量を計算し、動的にモデル係数を算定している。

#### 4. 気象境界条件

レーダ・アメダス 2002 年を用いて、琵琶湖に流入する河川の集水域である北端 35.75、南端 34.41、東端 136.62、西端 135.25 の領域での 7 月 1 日 1 時～9 月 30 日 24 時の各一時間降水量を採取し元データとし、このデータを OHyMoS 琵琶湖淀川流域モデル<sup>4)</sup>の入力条件として流出計算を行ない、Biwa3D の流入境界条件とした。

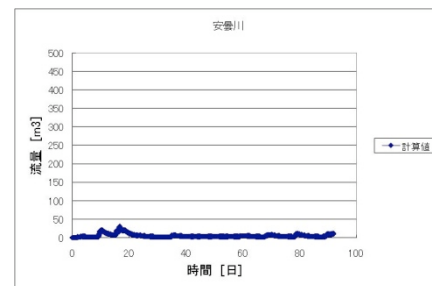


図 1 野洲川における流量の計算値と観測値の比較

夏期(7-9月)の流量

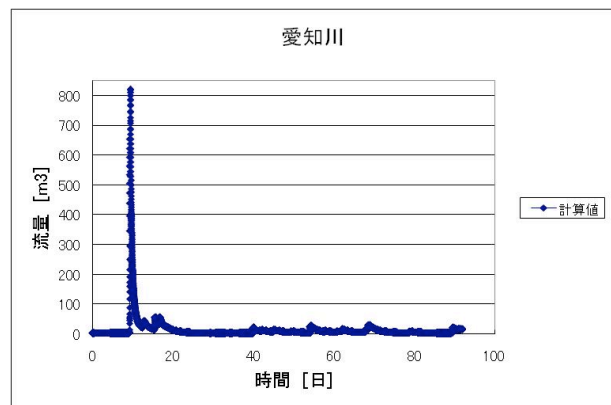
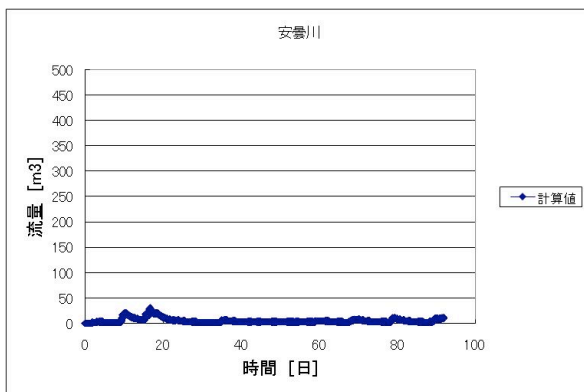
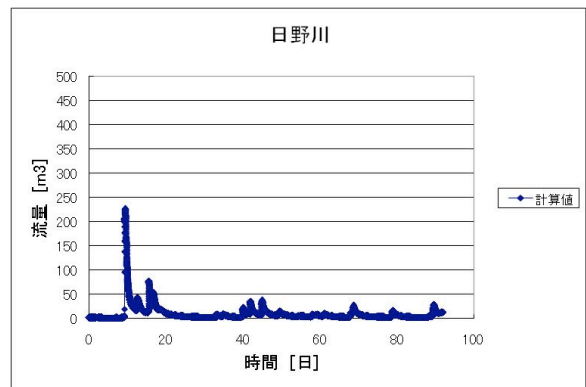
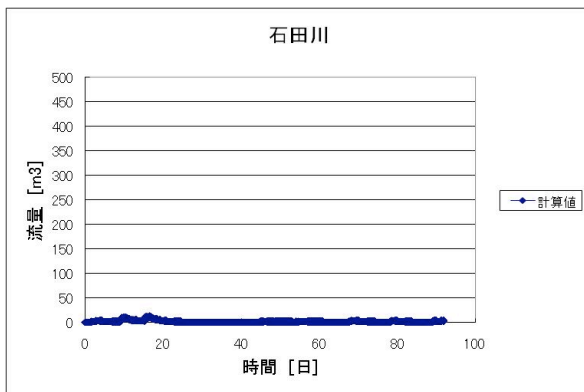
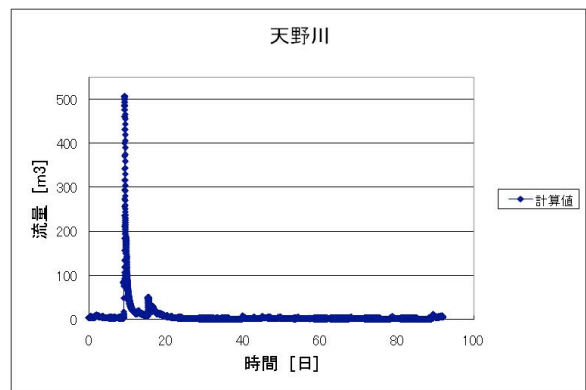
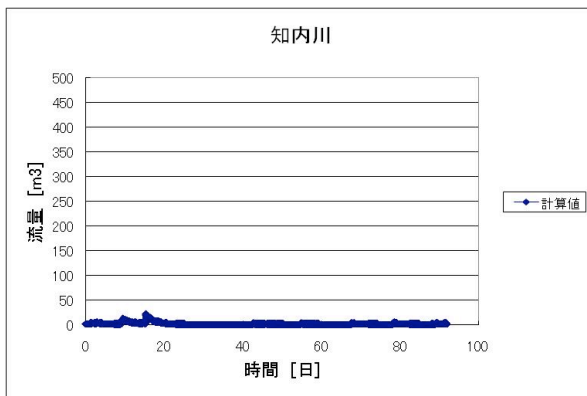
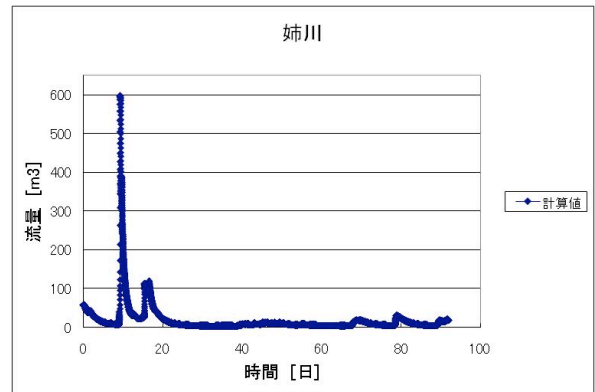
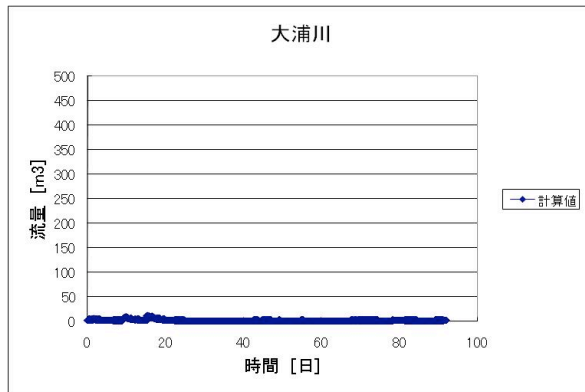


図 2.1 湖西岸に流入する河川の

図 2.2 湖東岸に流入する河川の夏期（7-9月）の流量

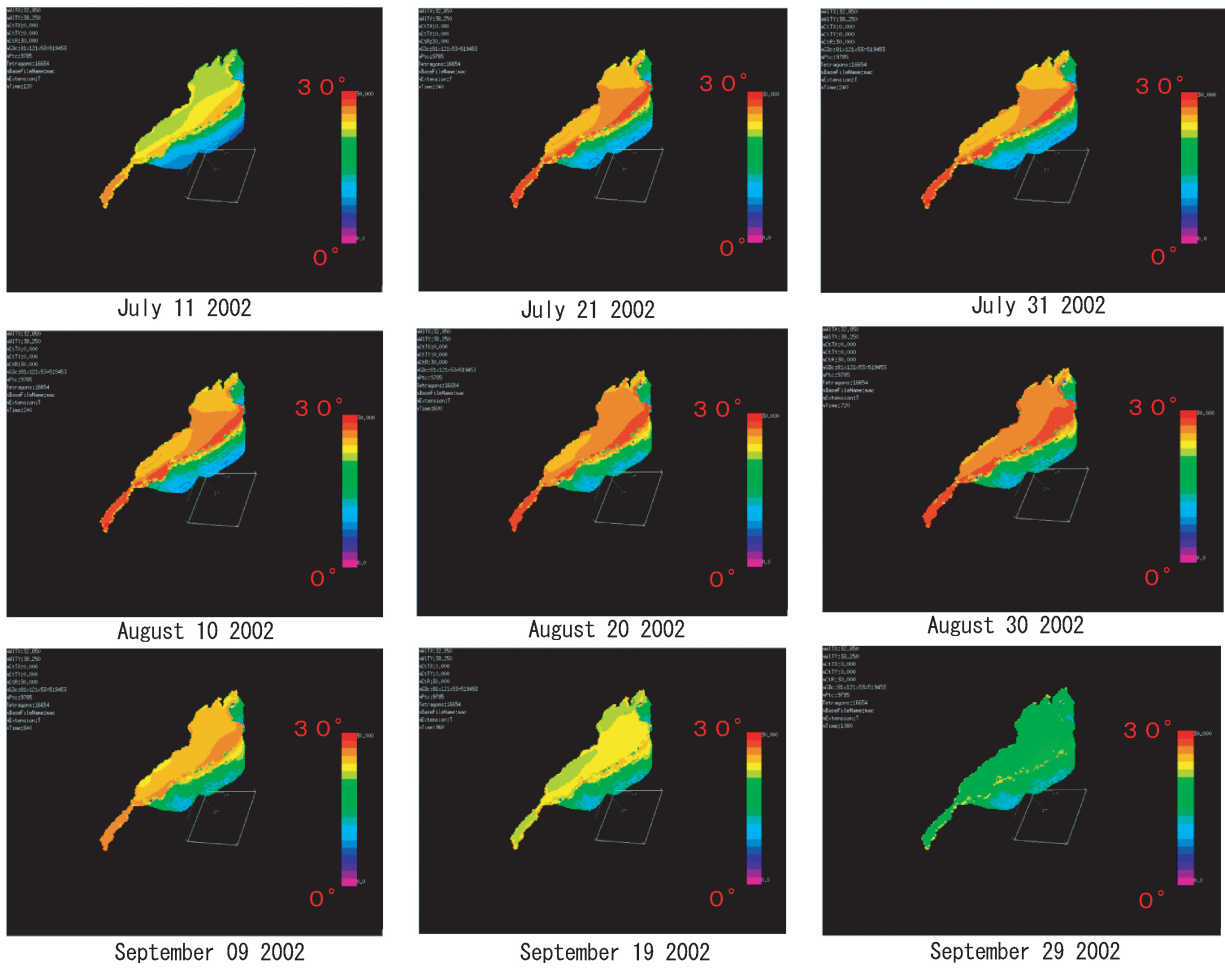


図 3 Biwa -3D により計算された夏期の琵琶湖水温分布

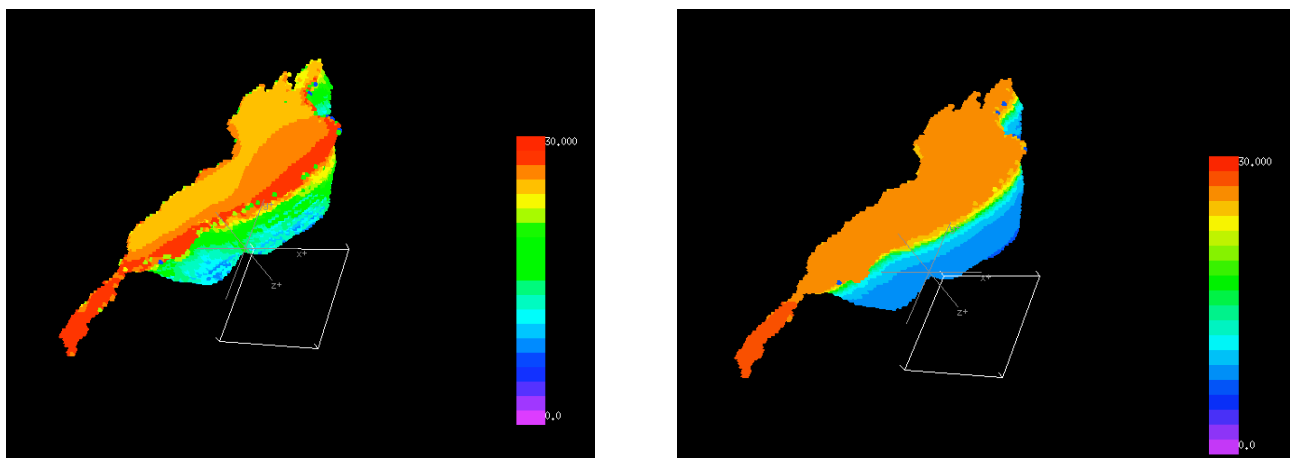


図 4 2002 年 8 月 7 日におけると計算結果（左）と観測結果（右）の比較

## 5. 計算結果

図1にOHyoMoS淀川流域モデルによる野洲川の計算値と実測値の比較を掲載する。分布型流出モデルとレーダーアメダスデータの特性のとおり計算期間においてピーク流量流出時を含め良く再現されていることがわかる。

OHyoMoSを用いた琵琶湖西岸、東岸に流入する河川流量の計算結果を図2-1、図2-2に示す。湖の西北側の安曇川、石田川、知内川、大浦川と東側の姉川、天野川、愛知川、日野川を並べて示したが、2002年7月～9月の流量ではその西北側河川と東側河川で顕著な結果が得られた。東側では計算開始10日前後に顕著な流出が現れており、後述の琵琶湖表面付近の水温分布に影響を与えていると考えられる。図3にこれらの河川流出を入力値としたBiwa-3Dによる夏期水温の三次元分布の計算結果を示す。初期水温値は琵琶湖環境科学研究センターによる水温観測値を用いた。シミュレーション結果から考察すると、概ね7/1～9/30の水温分布は典型的な成層期の水温変化とみてとれる。図4に2002年8月7日の観測結果(F-Probe観測結果・琵琶湖研究所提供)、Biwa-3Dによる計算結果を示した。観測結果は湖中央部を北から南(すなわち縦方向)に縦断して鉛直分布をとったものであり、東側と西側の差異は観測できない。しかしながら表面温度の絶対値についてはおおむね再現できている。観測結果にくらべて計算結果は鉛直の成層がややぼやけているようであるが、

おおむね再現できているといえる。成層の解像度については夏場において鉛直拡散係数の評価が過大となった事、内部波の影響を過大評価した点などが考えられ、今後モデル及びパラメータの修正を図る必要がある。

## 6. 参考文献

- 1) Yamashiki Y, Matsumoto M, Tezuka T, Matsui S, Kumagai M. 2003. Three-dimensional eutrophication model for lake biwa and its application to the framework design of transferable discharge permits, Hydrological Processes, 17(14):2957-2973.
- 2) Yamashiki Y, Kumagai M, Chunmeng J, Nezu I, Matsui S. 2003. Numerical Simulation of Thermally Induced Gyres in Lake Biwa, Hydrological Processes, 17(14):2947-2956.
- 3) Yamashiki Y. 2000. Proposed Three Dimensional Hydrodynamic and Ecological Model for Eutrophication Analysis – PAMOLARE3D, WORKING DOCUMENT, EXPERTS' MEETING ON THE STRATEGIC APPROACH FOR THE DEVELOPMENT AND DISSEMINATION OF A NUMERICAL MODEL ON EUTROPHICATION, Proceedings 22-24 March 2000, Davis California USA, IETC Report 11, UNEP-IETC: 48-61.
- 4) 佐山敬洋, 立川康人, 寶馨, 増田亜美加, 鈴木琢也. 2008. 地球温暖化が淀川流域の洪水と貯水池操作に及ぼす影響の評価, 水文・水資源学会誌 21(4):296-31

### Numerical Simulation of Temperature Distribution of Lake Biwa using Lake-Catchment Integrated Model

Yosuke YAMASHIKI\*, Kenichiro KOBAYASHI\*\*, Taku MATSUMOTO\*\*\*, Takahiro SAYAMA\*, Kaoru TAKARA\*

\*Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

\*\*Institute for Sustainability Science, Kyoto University

\*\*\*Department of Urban and Environmental Engineering, Kyoto University

### Synopsis

Biwa-3D Model, consisted with Hydrodynamic components featuring non-hydrostatic solver with Semi-lagrangian grid scheme and ecological components for nutrients and phytoplankton solver has been integrated with distributed hydrological modeling system OHyoMoS. Effects of river water intrusion both for west and east side of the basin of the lake on the development of thermal stratification have been evaluated and found that the amount of water flown from eastern side is larger than that from western side of the lake, which may affect horizontal distribution of thermal stratification.

**Keywords:** Biwa-3D, OHyoMoS, 3D Numerical Simulation, Thermal Stratification, Inflowing River