

## 琵琶湖全域における流動・水質数値解析結果について

日本大学

正員 ○山敷 庸亮

(独)水資源機構

正員 駒田 達広, 正員 柳生 光彦

(株)日建設シビル

正員 福壽 真也, 曾我部 浩

## 1. はじめに

近年、琵琶湖北湖深層部の溶存酸素（DO）が年々減少していることが観測値によって明らかとなっている。琵琶湖北湖深層部 DO の回復には、例年 1 月中旬～2 月上旬頃に発生する全層循環（表層から湖底までの完全混合）が深層部 DO の回復（増加）に大きく寄与している。また、全層循環以外にも河川水や湖岸冷却による密度流が DO の供給源となっているという考えも示されているが十分に実態が解明されていない。

本研究では、姉川から琵琶湖に流入する河川水の挙動が琵琶湖に与える影響を考察するため、琵琶湖全域を対象として年間を通じた水質分布の変化を解析することを目的に、非静水圧三次元湖流・水質解析モデルを構築した。今回、琵琶湖北湖の水温、溶存酸素分布に着目して、実測値と計算値を比較考察した。対象とする流域の概要を図 1 に示す。

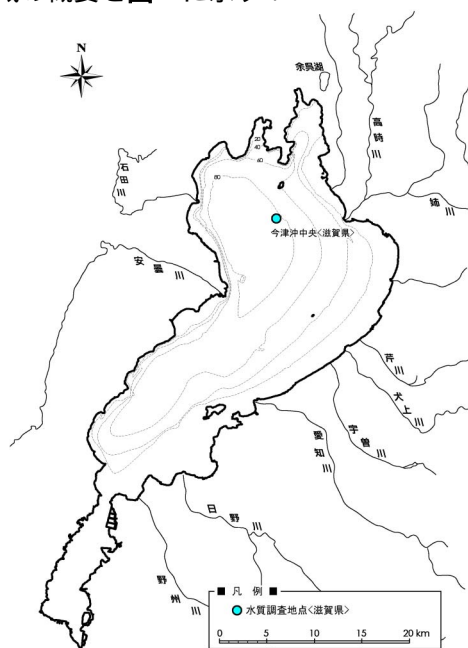


図 1 琵琶湖流域の概要

## 2. 解析の概要および方法

(1) 数値解析モデル<sup>1)</sup>

数値解析モデルは、LES (Large Eddy Simulation) を用いた非静水圧三次元流動水質モデルであり、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 Navier-Stokes 方程式 (2), スカラー輸送方程式 (3) である。

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

$$\frac{\partial (\bar{\rho} u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} u_i u_j - \lambda_{ij})}{\partial x_j} = \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \bar{\rho} F_j \frac{\partial x_j}{\partial x_i} + f \bar{\rho} \left( u_2 \frac{\partial x_1}{\partial x_i} + u_1 \frac{\partial x_2}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\bar{\beta})}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\beta} u_j - \chi_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( K \frac{\partial \bar{\beta}}{\partial x_j} \right) + S \quad (3)$$

$$f = 2\omega \sin \phi \quad (4)$$

ここで,  $x_i, x_j$  は東西方向 ( $i, j=1$ ), 南北方向 ( $i, j=2$ ), 鉛直方向 ( $i, j=3$ ) 座標を,  $u_i, u_j$  ( $i, j=1,2,3$ ) は水の流速,  $\beta$  はスカラー量 (水温, 濁度),  $\mu$  は水の粘性係数,  $K = k/\rho_0$  で  $k$  は分子拡散係数,  $\rho_0$  は水の標準密度,  $P$  は圧力,  $\rho$  は水の密度,  $F$  は重力加速度,  $S$  はスカラー量の生成項を示す。また,  $\omega, \phi$  はそれぞれ地球自転の角速度 ( $7.27 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ ), 対象水域の緯度で, コリオリパラメータ  $f$  は  $8.39 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$  とした。

なお, 式 (2) に示される SGS (subgrid-scale) ダイナミック応力  $\lambda_{ij}$  および式 (3) の SGS フラックス  $\chi_j$  は以下に示す Mixed Scaling Formation Model で表す。

$$\lambda_{ij} - \frac{\delta_{ij}}{3} \lambda_{kk} = -2C_\mu \bar{\Delta}^{4/3} \bar{S}_{ij} + L_{ij}^m - \frac{\delta_{ij}}{3} L_{kk}^m \quad (5)$$

このうち, モデル定数  $C_\mu$  は次式で定める。

$$C_\mu = \frac{(K_{ij} - \Psi) \bar{S}^T}{2\Gamma \bar{S}^T} \quad (6)$$

$$K_{ij} = \bar{\rho} u_i u_j - \bar{\rho} u_i u_j^T \quad (7)$$

$$\Psi_{ij} = \bar{\rho} u_i u_j - \bar{\rho} u_i u_j^T \quad (8)$$

$$\Gamma = \bar{\Delta}^{4/3} \bar{\Delta}^{-4/3} \quad (9)$$

ここで,  $\bar{\cdot}$  はグリッドフィルタ操作,  $\cdot^T$  はテストフィルタ操作を示す。

なお, 本モデルでは高濁度水塊の密度流解析を行うため Boussinesq 近似を用いず, 水の密度は水温と濁度の関数式 (10) とした。

$$\bar{\rho} (\text{kg/m}^3) = 1,000 \times (C_0 + C_1 - C_2 T^2 + C_3 T^3) + \sigma_w C \quad (10)$$

ここで,  $C_0 = 0.9991$ ,  $C_1 = 2.8124 \times 10^{-5}$ ,  $C_2 = 6.1832 \times 10^{-6}$ ,  $C_3 = 1.7855 \times 10^{-8}$ ,  $T$  は水温 ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\sigma_w$  は浮遊砂の密度 ( $=1,650 \text{ kg/m}^3$ ),  $C$  は濁度 (度) である。

## (2) 解析条件

湖内水質の初期条件は国土交通省、滋賀県による定期観測結果、境界条件の流況条件は姉川（野寺橋地点）の流量、他の流入河川は逆算流入量（流域面積で配分）、水質条件は姉川（野寺橋地点）の水質自動観測結果、他の流入河川は定期観測結果を用いた。気象条件は

キーワード 琵琶湖, 三次元流動・水質解析, LES モデル, 水温, 溶存酸素 (Dissolved Oxygen)

連絡先 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14 日本大学理工学部土木工学科 TEL. 03-3259-0665

AMeDAS データを用いた。湖流については、初期流速を 0m/s とし準備計算期間を設定して解析を行い、風および摩擦による水表面・湖底でのせん断応力を境界条件として与えた。これらの条件のもと、図 2 に示ような格子幅（水平方向 500m、鉛直方向 2m）に分割し流動・水質解析を行った。対象期間は 2000 年の 1 年間とした。

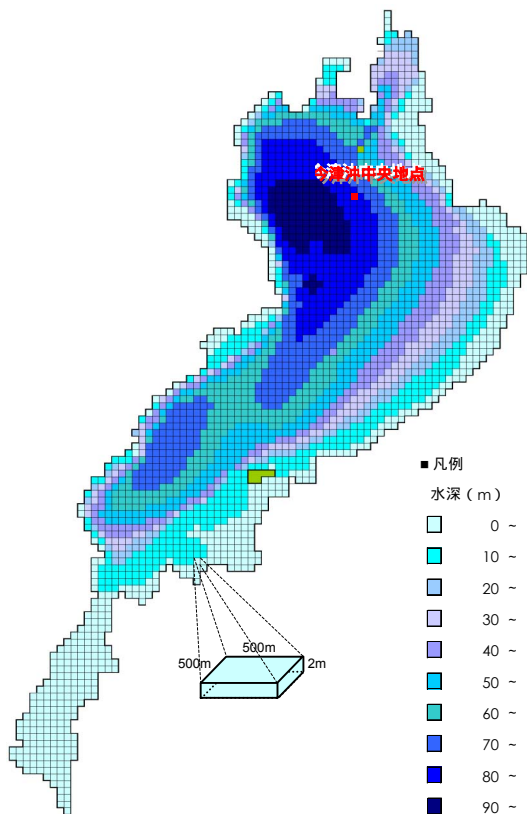


図 2 数値解析に用いた琵琶湖水域分割図

### 3. 結果および考察

モデルの再現性確認のため、実測値が存在する今津沖中央地点の定期水質調査結果と計算値との比較を行った。以下に計算結果の一部を示す。

図 3 に水温コンター図、図 4 に水温鉛直分布図を示す。これより、年間を通じて計算値は実測値が示す成層の形成から崩壊の過程を概ね良好に再現しており、

特に、5 月～12 月頃まで、水深 20m 付近に水温躍層が形成されている状況を計算値はほぼ再現できている。

図 5 に溶存酸素コンター図を示す。年間を通じて計算値は実測値とほぼ同様な傾向を示している。特に底層溶存酸素は 2 月に回復しその後 11 月まで徐々に減少しているが、計算値は、ほぼ再現できている。

今後の課題として、ここで再現性を確認したモデルを用いて DO の消費・回復の主要因子を検討するとともに姉川河川水の影響の程度を定量的に把握したいと考えている。

### 参考文献

- 1) 山敷庸亮, 松井三郎, 禰津家久, 熊谷道夫: 琵琶湖還流の数値シミュレーション, 水工工学論文集, 第 44 巻, 2002.2.

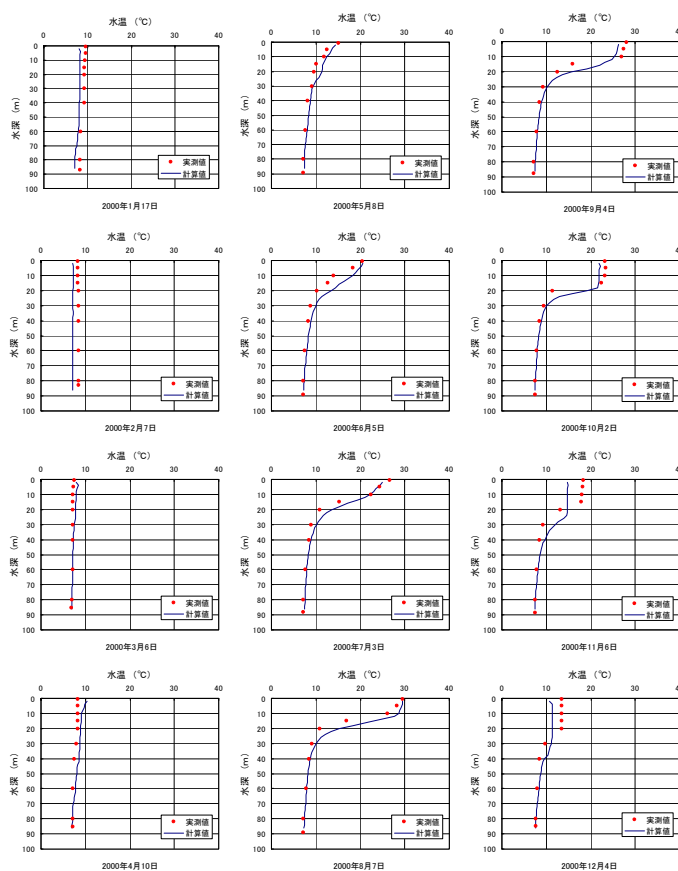


図 4 水温解析結果鉛直分布図（2000 年，今津沖中央地点）

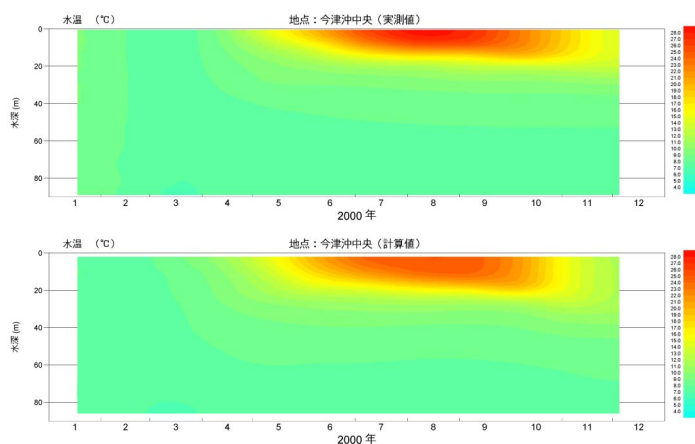


図 3 水温解析結果コンター図（2000 年，今津沖中央地点）

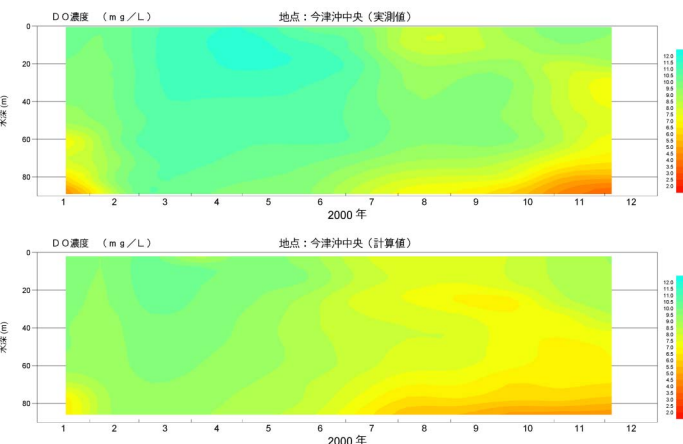


図 5 溶存酸素コンター図（2000 年，今津沖中央地点）