

姉川から琵琶湖に流入する雪解け水の流入挙動解析

日本大学 正員 ○山敷 庸亮
 (独)水資源機構 正員 木戸 研太郎, 正員 柳生 光彦
 (株)日建設計シビル 正員 福壽 真也, 曾我部 浩

1. はじめに

冬季における琵琶湖の流動が生態系に与える影響は極めて大きく、特に、例年1月中旬～2月上旬頃に発生する全循環（湖底までの完全混合）は深層水の溶存酸素の回復（増加）に大きく寄与している。また、全循環以外にも河川水や湖岸冷却による密度流が溶存酸素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のが現状である。姉川・高時川でも春季の雪解け水（融雪水）が琵琶湖深層部の溶存酸素変化に及ぼす寄与を指摘する意見があり、現象把握・定量的評価が重要な課題となっている。

本研究では、姉川河口周辺を対象とした現地調査および非静水圧三次元湖流・水質解析を行い、姉川から琵琶湖に流入する雪解け期の河川水の挙動について考察した。対象流域の概要を図1に示す。



図1 対象流域（高時川）の概要

2. 調査・解析の概要および方法

(1) 現地調査¹⁾

ピーク流量 140m³/s（野寺橋地点：2002年3月27日）の融雪出水を対象に、流向・流速、水温、濁度を観測した。なお、観測当日（3月28日）の日平均流量は71m³/sであった。

(2) 数値解析モデル²⁾

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。

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

$$\frac{\partial (\bar{\rho} u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} u_i u_j - \lambda_{ij})}{\partial x_j} = \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho F_j \frac{\partial x_3}{\partial x_i} + f \rho \left(-\frac{\partial x_1}{\partial x_i} + u_1 \frac{\partial x_2}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

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

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

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、 β はスカラー量（水温、濁度）、 μ は水の粘性係数、 $K = k/\rho_0$ で k は分子拡散係数、 ρ_0 は水の標準密度、 P は圧力、 ρ 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、 ω , ϕ はそれぞれ地球自転の角速度 (7.27×10^{-5} rad/s), 対象水域の緯度で、コリオリパラメータ f は 8.39×10^{-5} 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 λ_{ij} および式 (3) の SGS フラックス χ_j は以下に示す Mixed Scaling Formation Model で表す。

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

このうち、モデル定数 C_μ は次式で定める。

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

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

$$\Psi_{ij} = \overline{\overline{\rho u_i u_j}} - \overline{\overline{\rho u_i} u_j} \quad (8)$$

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

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

また、 \bar{S}_{ij} , 空間平均操作をした格子フィルター幅 $\bar{\Delta}$, 修正密度レナード項 L^m_{ij} を以下に示す。

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (10)$$

$$\bar{\Delta} = \sqrt{\overline{\delta x_H \delta x_V}} \quad (11)$$

$$L^m_{ij} = \overline{\overline{\rho u_i u_j}} + \overline{\overline{\rho u_i} u_j} \quad (12)$$

ここで、 δx_H , δx_V はそれぞれ水平・鉛直格子サイズであり、テストフィルター幅は次式のとおりである。

$$\bar{\Delta}^T = 2\sqrt{\overline{\delta x_H \delta x_V}} \quad (13)$$

キーワード 雪解け、融雪出水、琵琶湖、姉川、三次元流動・水質解析

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

一方、SGS フラックス χ_j は以下のとおりである。

$$\chi_j = -\frac{C_\mu}{\rho T} \Delta^{-4/3} \frac{\partial \beta}{\partial x_j} + P_j \quad (14)$$

$$P_j = \beta u_j - \beta u_j \quad (15)$$

$$\frac{1}{T} = \frac{\rho}{C_\mu} \frac{(N_j - \Theta_j) B_x}{\Gamma B_x^2} \quad (16)$$

$$B_x = \frac{\partial \beta}{\partial x_j} \quad (17)$$

$$N_j = \beta u_j - \beta u_j \quad (18)$$

$$\Theta_j = \beta u_j - \beta u_j \quad (19)$$

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 (20) とした。

$$\rho(kg/m^3) = 1,000 \times (C_0 + C_1 - C_2 T^2 + C_3 T^3) + \sigma_w C \quad (20)$$

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 (°C), σ_w は浮遊砂の密度 (=1,650kg/m³), C は濁度 (度) である。

(3) 解析条件

湖内水質の初期条件は滋賀県による定期観測結果、流入河川 (姉川) の境界条件は野寺橋地点の流量・水質自動観測結果、気象条件は 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、琵琶湖モデル (格子幅：水平方向 500m, 鉛直方向 2m) による解析結果を境界条件として姉川河口部モデル (10km 四方, 格子幅：水平方向 100m, 鉛直方向 2m) の流動・水質解析を行った。

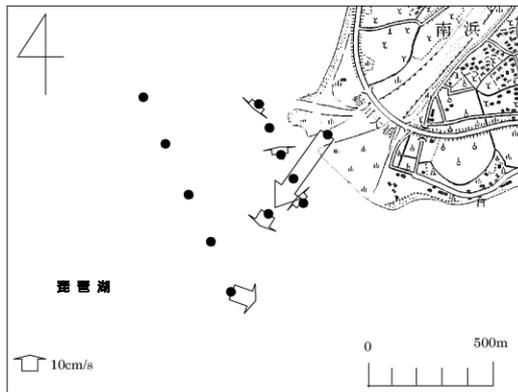


図2 流向・流速調査結果 (水深 0.5m, 2002/3/28)

3. 結果および考察

流向・流速調査結果 (図2) をみると、河口から南西に 400m 程度までは河川水の流れが確認できたが、その流れの勢いは濁水の境界付近にとどまり、約 800m の地点では南東向きの湖流が支配的であった。

融雪出水による濁水塊の範囲については、図3 のとおり河口付近では目視でも濁水と湖水表層の境界が明瞭に判別でき、河口から 600m 程度離れた地点ではいずれも 2~4 度であった。表層部の濁水の挙動は、全体的には湖流に沿って南東方向もしくは東南東に拡がっており、鉛直分布の調査結果をみても水深 10m 以深の濁水塊の範囲も表層の範囲と一致し、限られた範囲にとどまっていた (図4)。なお、2004 年 2 月および 3 月に実施した現地調査でも同様の流況が確認されている。

三次元流動・水質モデルによる数値解析でも同様に、濁水塊の範囲は河口付近から東南東方向へ 3~4km にわたって拡がり、その周辺では拡散して湖水と一樣になる結果となった (図5)。

これら現地調査および数値解析の結果から、雪解け水は琵琶湖に流入しても河川水と湖水の密度差が小さく混合しやすいため、湖流の影響を受けながら徐々に拡散すると推察され、湖底に沿って深層部に向かう密度流が発生する可能性は低いと考えられる。

参考文献

- 1) 柳生光彦, 木戸研太郎, 原稔明: 姉川河口における雪解け水の流入挙動調査, ダム技術, No.219, 2004.12.
- 2) 山敷庸亮, 松井三郎, 瀬津家久, 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3 雪解け濁水塊の流入状況 (2002/3/28)

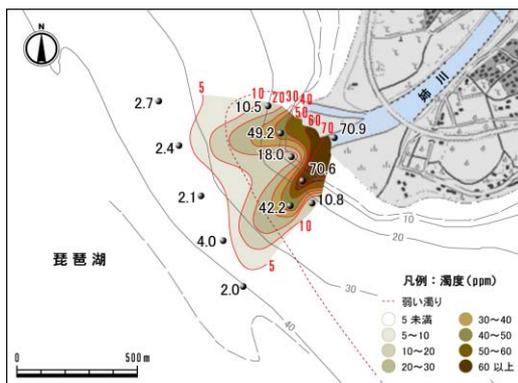


図4 濁度分布調査結果 (水深 0.5m, 2002/3/28)

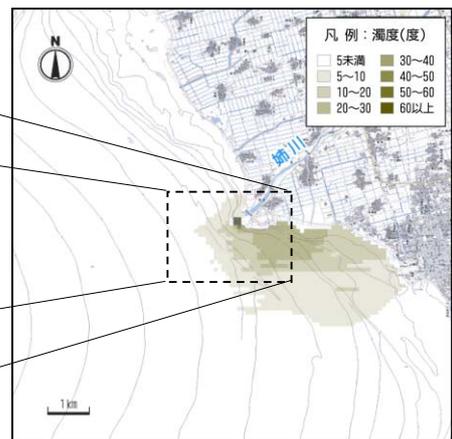


図5 濁度解析結果 (水深 0.5m, 2002/3/28)