

湖に遡上する高塩分水塊の制御に関する数値解析的研究

松江高専専攻科 生産・建設システム工学専攻 学生員 ○小畑めぐみ
 松江工業高等専門学校 環境・建設工学科 正会員 木村 一郎
 立命館大学 環境都市系 非会員 松崎 健
 松江工業高等専門学校 環境・建設工学科 正会員 寺本 敦子
 松江土建株式会社 非会員 団野 紘貴

1. はじめに

宍道湖は日本有数の汽水湖として知られている。宍道湖は大橋川を経由し中海へと繋がっている。よって、宍道湖の水質はこの大橋川、中海に大きく影響される。近年、水質悪化が問題とされているが、この水質問題を解決するには宍道湖・大橋川・中海の流動特性を理解する必要がある。従来の研究によると、中海に停留している高塩分貧酸素水塊がある条件のもとで大橋川を遡上し、宍道湖底部に塩水くさびとなって進入し、シジミなどに被害を及ぼすことなどが報告されており、早急な現象解明と対策が望まれる。本研究では、宍道湖・大橋川・中海系の水理模型を用いた実験と、三次元数値解析モデルによる数値シミュレーションにより、中海から宍道湖へ遡上する高塩分貧酸素水塊の挙動を把握する。

2. 水理模型実験の概要

アクリル板を用いて宍道湖～中海の地形を単純化した模型を作成し、中海から宍道湖に遡上してくる塩水挙動の再現をする。模型のスケールは3/1000とする。但し斐伊川、大橋川の川幅、中海の深さは現象の見易さを考慮して、相対的に大きなスケールとした。図1に実験装置の模式図を示す。各矩形領域は、左から、斐伊川（図のブロック①）、宍道湖（ブロック②）、大橋川（ブロック③）、中海（ブロック④）、境水道（ブロック⑤）、日本海（ブロック⑥）を想定したモデルとなっている。

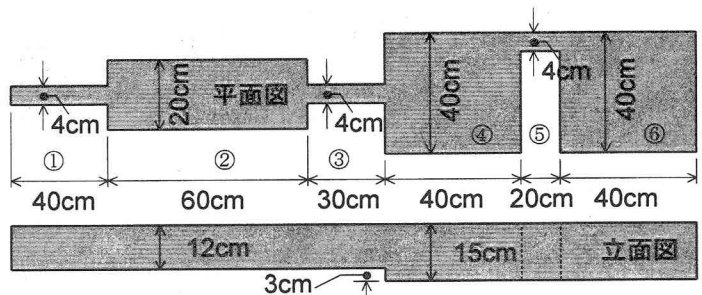


図1 実験装置

3. 数値シミュレーションモデルの構成

数値解析モデルは移動一般曲線座標系とし、Boussinesq 近似を用いた次の基礎式系を用いる。

[連続式]
$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial V^\alpha \sqrt{g}}{\partial \xi^\alpha} = 0 \quad (1)$$

[運動方程式]
$$\frac{\partial V^i}{\partial t} + \nabla_j [V^i (V^j - W^j)] + V^i \nabla_j W^j + V^j \nabla_j W^i = \frac{\rho}{\rho_s} G^i - \frac{1}{\rho_0} g^{ij} \nabla_j p + \nabla_j \left[-\overline{v^i v^j} \right] + 2\nu \nabla_j e^{ij} \quad (2)$$

[濃度輸送式]
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla_j [\rho (V^j - W^j)] + \rho \nabla_j W^j = \nabla_j \{ K_j g^{ij} \nabla_i \rho \} \quad (3)$$

ここに、 ξ^i : 計算空間の空間座標、 t : 時間、 V^i : 流速ベクトルの反変成分、 W^i : 格子移動速度ベクトルの反変成分、 $\overline{v^i v^j}$: 乱れ速度ベクトルの反変成分、 p : 圧力、 ν : 動粘性係数、 ρ : 流体の密度、 ρ_0 : 流体の基準密度、 g_{ij} , g^{ij} : 計量テンソルの共変及び反変成分、 g : 計量テンソルの共変成分から成る行列の行列式、 F^i : 重力ベクトルの反変成分をそれぞれ表す。また、 ∇_j は共変微分を表し、クリストッフェル記号を用いて表される。

計算法はスタガード格子上の有限体積法とし、時間積分は Adams-Bashforth とした。

乱流モデルとしては、後述のように渦動拡散係数を定数で与えるゼロ方程式モデルとした。

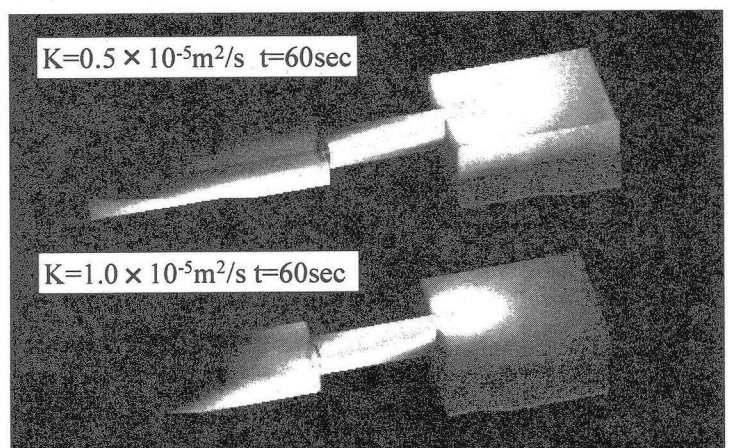


図2 濃度分布の比較 (t=60sec)

水理模型実験と比較するため、水深や塩分濃度等をそれぞれ実験と同一に設定して数値計算を進める。計算格子幅は x 方向 : 1cm, y 方向 : 1cm, z 方向 : 0.5cm の等幅に設定し、全格子数を $230 \times 40 \times 12 = 11400$ 格子(最深部の水深を 6cm とした場合)とする。

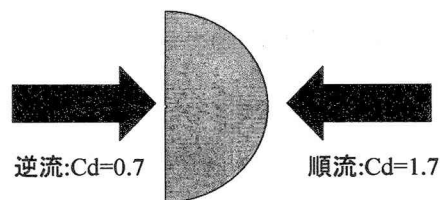


図3 小松らによる 1/4 球型流況制御ブロック

4. 計算結果の考察

(1) 流れ場の条件

実験装置において、ブロック①、⑤、⑥は締め切り、宍道湖・大橋川・中海に相当する3つのブロックを用いて実験を行った。初期条件として、ブロック③と④の間に仕切り板を入れた状態で、ブロック④に入浴剤で着色した塩水(3%)をいれ、ある瞬間に仕切り板を取り去って混合流を発生させた。これにより密度フロントはブロック③→ブロック②の方向に塩水くさびとなって進入し、宍道湖に相当するブロック②において安定な密度成層を形成する。

(2) 渦動拡散係数の同定

渦動拡散係数を同定するため、この値を種々に変化させて数値シミュレーションを実施し、塩水フロントの進行速度が実験結果と最も適合する係数の値を求めた。図2には渦動拡散係数が異なる場合の $t=60\text{sec}$ における塩分密度の分布を示す。このときの水深条件は、最深部の水深が 5cm となるよう設定した。この図より、渦動拡散係数が大きいとフロントの進行速度が低下することがわかる。本研究では実験結果との比較からの結果より渦動拡散係数 K を $0.5 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ と決定し、以下の数値計算を進める。

(3) 流況制御ブロックによる塩分遡上の制御効果の検討

湖に遡上する高塩分貧酸素水塊の影響を低減する方法の一つとして、海洋などで試みられているように湧昇流ブロックなどにより流れを制御し、鉛直方向の拡散を促進する方法が考えられる。本研究では、小松らによる 1/4 球型流況制御ブロックを用いた方法を検討する。

このブロックの特徴は順流方向と逆流方向で抵抗特性が大きく異なる点に特徴がある。小松らの実験によれば、図3に示すように、順流方向の抗力係数は $C_d=0.7$ 、逆流方向は $C_d=1.7$ となることが指摘されている。

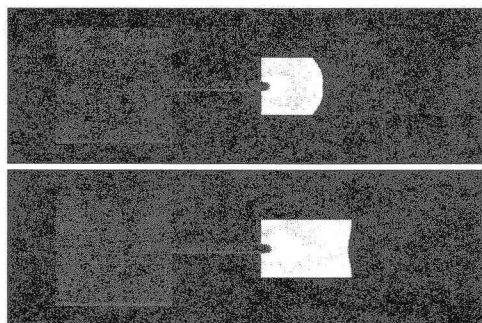


図5 ブロック無しの場合の濃度分布

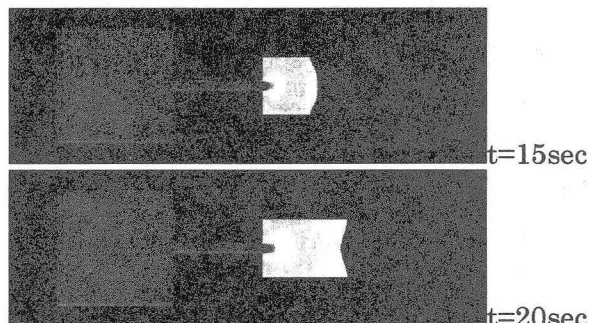


図6 ブロックを設置した場合の濃度分布

本研究で対象とする

流れ場においては、流速の大きい大橋川の中にブロックを設置することが最も効果的と考えられるが、河川法の関係で困難と思われる。したがって、宍道湖側に設置することを想定して検討を進める。検討するブロックのスケールは、水深の 1/5 程度を想定して直径 1cm とし、紙粘土をガラス球に巻きつけて製作した。検討したブロックの配置を図4に示す。

図5、6は、ブロック無しの場合とブロックを導入した場合の密度フロントの様子であり、 $t=15\text{sec}, 20\text{sec}$ の2つの時刻について示している。ブロックの導入により密度フロントの形が扁平に変化し、また進行速度が抑制されていることがわかる。密度フロントが宍道湖中央に到達する時間は、実験、計算ともにブロックの導入により約 10%低下した。また、 $t=100\text{sec}$ における宍道湖中央底面における塩分濃度について比較すると、ブロックの導入により約 4%の濃度低下が確認された。

以上より、流況制御ブロックは湖への塩水の進入速度の抑制と拡散に効果があることが確認された。今後は実スケールでのシミュレーションを行うとともに、ブロックの配置の方法等についても検討を進めたい。

参考文献

1) 九州大学工学部建設都市工学科環境流体力学研究室報告書「潮汐残差流の創造・制御による閉鎖性海域の水質改善に関する研究」1998。