

中海の内部密度界面の挙動とその解析

日本建設コンサルタント 正会員 ○岡村誠司
 広島大学大学院 フェロー会員 福岡捷二

広島大学大学院 学生会員 山本絢子
 国土交通省出雲河川事務所 正会員 今岡俊和

1. 序論

中海、大橋川、宍道湖は、日本で最大規模の連結系汽水湖を形成している（図-1）。中海は外海に直接連結しており、宍道湖は大橋川を通じて中海と連結している。そのため、宍道湖の塩分は、中海の塩水が大橋川を経由して流入することにより供給される。水域の管理上、中海から宍道湖へ流入する塩分量や、流入する塩水の水質を定量的に見積もり、予測できる数値解析モデルを構築することが重要である。また、強い西風が吹くと中海の密度界面が傾斜し、塩分濃度が高く貧酸素化した中海下層水が大橋川へ流入することから、本研究では第一段階として、水面に作用する風のせん断力により生じる内部密度界面の傾斜を計算できる数値解析モデルの構築を目的とする。

2. 現地観測概要

本研究では、中海湖心観測所において1時間間隔で測定されている風向・風速データと、2003/8/29に行った現地観測のデータを用いた。観測では図-2に示す観測ラインに沿って船で航行し、地点A～地点Mで多項目水質計（STD）を水面から湖底まで垂下し、水温と塩分の鉛直分布を測定した。同時に、曳航式ドップラー流向・流速計（ADCP）を用いて観測ライン断面の流向・流速分布を測定した。これらの測定を2時間ごとに6回（計12時間）行い、流動・水質の時間変化を観測した。

3. σ 座標系における基礎方程式

中海の湖内流動は水面、密度界面、湖底面に沿った流れになっており、水面と密度界面位置は時間と共に変動する。本解析モデルでは、そのような流れを適切に計算するため、水面や密度界面と共に移動する σ 座標系を用いる。以下に、鉛直二次元における基礎式を示す。順に、連続式(4.1)、運動方程式(4.2)、塩分の移流拡散方程式(4.3)である。

$$\frac{\partial u}{\partial \xi} + \sigma_x \frac{\partial u}{\partial \sigma} + \frac{\partial w}{\partial \sigma} = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial \xi} + \sigma_x \frac{\partial(uu)}{\partial \sigma} + \frac{\partial(u(w-w_g))}{\partial \sigma} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial \xi} + \sigma_x \frac{\partial p}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial \xi} + \sigma_x \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial \sigma} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial \sigma} \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial \xi} + \sigma_x \frac{\partial(uC)}{\partial \sigma} + \frac{\partial((w-w_g)C)}{\partial \sigma} = K_h \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\partial C}{\partial \xi} + \sigma_x \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right) + \sigma_x \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{\partial C}{\partial \xi} + \sigma_x \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right) \right\} + K_v \frac{\partial^2 C}{\partial \sigma^2} \quad (4.3)$$

ただし $\sigma_x = -\tan \phi_x$, ϕ_x : x 軸に対する ξ 軸の仰角, K : 拡散係数である。せん断力 τ_{ij} はスマゴリンスキーモデルを用いて次式で表される。

$$\tau_{ij} = 2(\nu + \nu_e) S_{ij} \quad \nu_e = (C_s \Delta)^2 (2S_{ij} S_{ij})^{1/2}$$

ここに C_s : モデル定数, Δ : グリッドスケール, S_{ij} : ひずみ速度テンソルである。水位と界面位置はそれぞれ湖底から水面まで、湖底から界面位置まで積分した連続式により計算する。

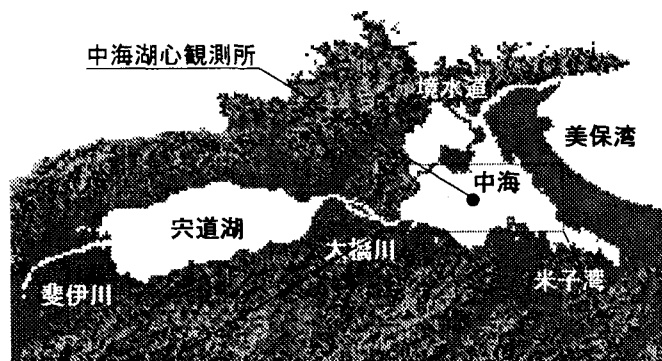


図-1 中海周辺の地形と中海湖心観測所位置

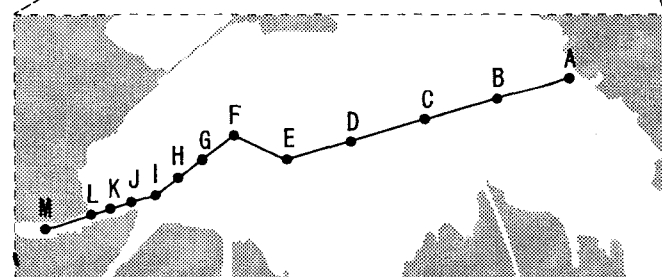


図-2 現地観測地点

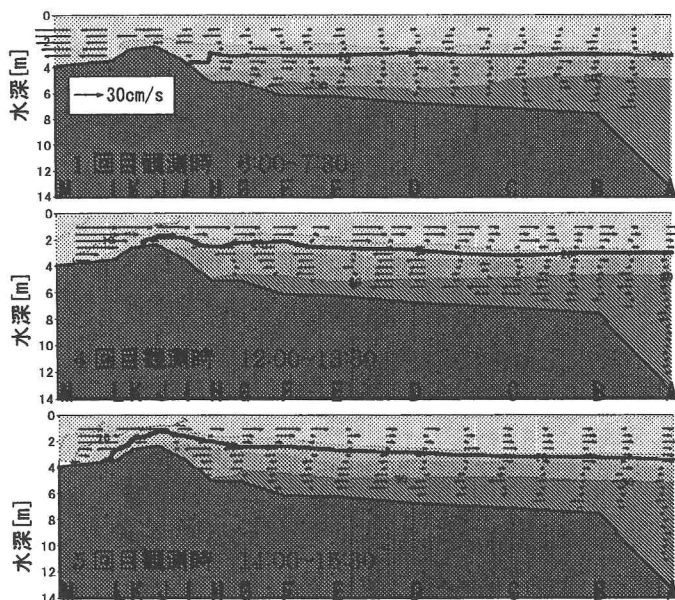


図-3 現地観測における流速と塩分の断面分布(2003/8/29)

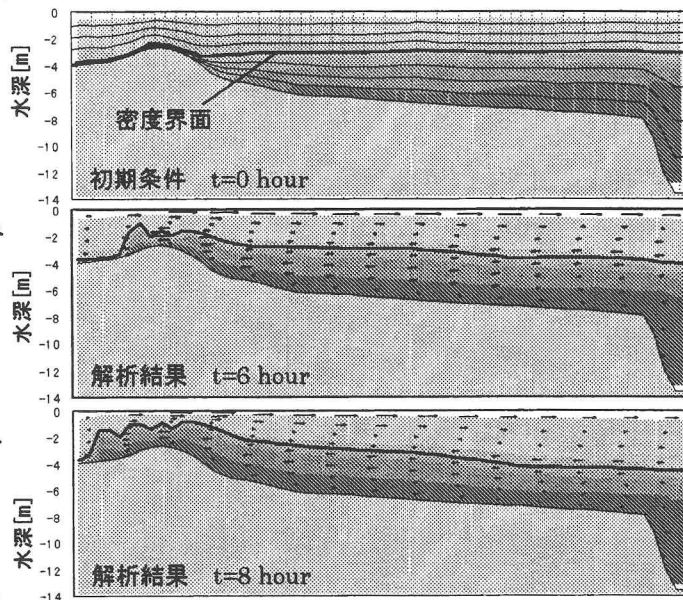


図-4 解析結果

また、簡単のため圧力は静水圧を仮定し、鉛直流速は連続式より求める。水面と界面における鉛直流速は、運動学的境界条件で与える。風により水面に作用するせん断力は、中海湖心風速を用いて次式で求める。

$$\tau = \frac{1}{2} \rho_a C_f U_a U_{ax} \quad (4.4)$$

ここに、 ρ_a ：空気密度、 U_a ：中海湖心風速、 U_{ax} ：風速の長軸方向成分である。本モデルでは、抵抗係数 C_f を 2.0×10^{-3} で与えている。また、湖底面より受けるせん断力は対数分布測より与える。密度界面が湖底と接する状態は計算できないため、下層の厚さが非常に薄い状態で密度界面位置を固定し(湖底上 0.2m)、その場所での下層内の流速を 0 とする。

4. 現地観測結果と解析結果

現地観測の 1, 4, 5 回目観測時の結果を図-3 に示す。観測期間中の中海湖心風速を図-5 に示す。1 回目観測時では、風の弱い状態が続いていたため密度界面はほぼ水平であり、湖内の流速は小さく流向も定まっていない。そこで、この状態を初期場とし、観測期間中の湖心風速を与えることにより、流動と密度界面の挙動を計算した。その解析結果を図-4 に示す。ただし、密度界面は上層と下層の間である塩分濃度 20psu の位置とした。8m/s 以上の強い西風が吹く 4 回目観測時には、上層で東向きの吹送流が生じており、下層では逆向きの補償流れが生じている。それとともに密度界面が傾斜し、大橋川付近では密度界面位置がマウンドより高くなっている。解析結果においても、東向きの吹送流が水面付近で生じており、下層では逆向きの流れが生じている。しかし、観測結果では上層全体が東向きの流れとなっているのに対して、解析結果では水面付近のみ東向きの流れとなっている。その原因として、乱流拡散が小さいために水平方向の流速が鉛直方向に輸送されていないことが考えられる。観測結果、解析結果ともに 5 回目観測時には、中海下層がマウンドを越えている。

3. 結論

中海から大橋川へ流入する塩分量や、流入する塩水の水質を定量的に見積もる数値解析モデルの必要性から、本研究ではその第一段階として、風による水面せん断力が引き起こす中海の内部密度界面の傾斜と中海下層水がマウンドを越える様子を検討できるモデルを構築した。今後、中海から大橋川へ流入する塩分量を見積もることのできる数値解析モデルを構築する必要がある。