

## 15. 表面水と地下水を統合した塩水化解析

○守村 融（八千代エンジニアリング株式会社）・

井川尚之（同）・富樫 聡（同）・日比義彦（名城大学）

### 1. はじめに

愛知県伊勢湾や三河湾などの防潮堤および高潮堤では、堤防背面に養殖場が分布し、鰻またはシジミなどの養殖が行われている。しかし、耐震強化によって対策工を施行した場合、背後の地下水および表面水の水収支が変化し、堤防背面の水環境に影響を及ぼす可能性がある。このような場合には、地下水と表面水における塩分濃度変化を一連の問題として扱う必要がある。しかしながら、既往の解析手法では、表面水と地下水の塩分濃度変化を同時に扱うことができない。

本研究では、表面水と地下水の塩分濃度変化を同時に扱うことができる大気-表面水-多孔質体連成数値解析手法(以下、ASG法)<sup>1,2)</sup>を用いて、既往研究<sup>3)</sup>における被圧帯水層の塩水くさび室内実験を再現し、ASG法の塩水化問題への適用の可能性を検討した。

### 2. 塩水化問題への大気-表面水-多孔質体連成数値解析手法(ASG法)の適用性

ASG法では、地表水および大気の流れに Navier-Stokes の式と質量保存の法則より導いた以下の式(1)と式(2)を適用する。

$$(\Delta t/\rho_0) \nabla \cdot (\nabla P_{t+\Delta t} + \rho \mathbf{g}) = \nabla \cdot \mathbf{V}^* \quad (1)$$

$$\mathbf{V}_{t+\Delta t} - (\mu/\rho_0) \Delta t \nabla^2 \mathbf{V}_{t+\Delta t} = \mathbf{V}^* - (\Delta t/\rho_0) (\nabla p_{t+\Delta t} + (\rho/\rho_0) \mathbf{g}) \quad (2)$$

ここで、 $t$  は時間、 $\Delta t$  は時間増分であり、 $\mathbf{V}_t$  と  $\mathbf{V}_{t+\Delta t}$  はそれぞれ時間  $t$  と時間  $t+\Delta t$  の流体の流速である。また、 $P$  は流体の圧力、 $\mathbf{g}$  は上向きを正とした場合の重力加速度ベクトル、 $\mu$  と  $\rho$  はそれぞれ流体の粘性係数と密度であり、 $\rho_0$  は流体の基準密度である。さらに、 $\mathbf{V}^*$  は位置ベクトル  $\mathbf{R}_i - \mathbf{V}_i \Delta t$  の時間  $t$  の流速ベクトルとし、 $\mathbf{R}_i$  は節点  $i$  の位置ベクトルとする。

多孔質体中の流体の流れに関して、以下の式(3)に示すグローバル圧力  $P$  という概念を用いる。

$$\nabla P = f_w \nabla p_w + f_g \nabla p_g \quad (3)$$

ここで、 $K_{rw}$  と  $K_{rg}$  をそれぞれ固有透過度に対する水相の相対透過度とガス相の相対透過度、 $\mu_w$  と  $\mu_g$  をそれぞれ水とガスの粘性係数とし、 $\lambda_w = K_{rw}/\mu_w$ 、 $\lambda_g = K_{rg}/\mu_g$  と  $\lambda = \lambda_w + \lambda_g$  とすると  $f_w$  と  $f_g$  は以下の式(4)のようになる。

$$f_w = \lambda_w/\lambda \quad (4a)$$

$$f_g = \lambda_g/\lambda \quad (4b)$$

多孔質体中の水とガスの流れの支配方程式は、Darcy の法則と質量保存の法則を用いると以下の式(5)のように表すことができる。

$$\partial \Phi / \partial t = \nabla \cdot \lambda k_s [\nabla P + (f_w \rho_w + f_g \rho_g) \mathbf{g} \nabla z] \quad (5)$$

ここで、 $k_s$  は固有透過度、 $\Phi$  は間隙率、 $\rho_g$  と  $\rho_w$  はそれぞれガスと水の密度である。

ASG法では、表面水の式(1)と地盤中の式(5)より各領域の  $P$  を同時に求める。 $P$  を求めた後に、地盤中の  $p_g$  と  $p_w$  が  $P$  より以下の式(6)により求められる。

$$p_w = P - f_g p_{cgw} + \int_{S_w} p_{cgw} (df_g/dS_w) dS_w \quad (6a)$$

$$p_g = P/f_g - (f_w/f_g) p_w + (\int_{S_w} p_{cgw} (df_g/dS_w) dS_w) / f_g \quad (6b)$$

ここで、 $S_w$  は水の飽和度、 $p_{cgw}$  はガスと水の毛管圧である。 $P$  を求めた後に、表面水と大気システム内の流体の流速を式(1)で求める。地盤内の流速は式(6)から求められた  $p_g$  と  $p_w$  から地盤中の水の流速  $\mathbf{V}_w$

とガスの流速  $V_g$  を以下の式(7)で求める。

$$V_w = -\lambda_w k_s [\nabla p_w + \rho_w g \nabla z] \quad (7a)$$

$$V_g = -\lambda_g k_s [\nabla p_g + \rho_g g \nabla z] \quad (7b)$$

表面水と地盤中の水相内の化学物質の物質移動を解析する際に、移流分散方程式の移流項に用いる流速は、表面水の場合に式(2)の流速を用い、地盤中の水相内については上記の式(7a)を用いることになる。ここで、塩水などの密度流を考慮する場合には、式(1)と式(2)および式(5)と式(7a)の重力項が重要となる。

なお、ASG 法は浸透流解析と移流分散方程式を用いた密度流問題を取り扱うこれまでの解析手法と異なり、地盤内の水相だけの塩分の濃度変化のみを扱うのではなく、同時に表面水中の塩分の濃度変化を扱うことができる。したがって、海岸線付近の地下水内の塩分濃度変化と海水の塩分濃度の変化を同時に取り扱うことが可能である。

### 3. 計算条件

本解析では、既往研究で用いられた被圧帯水層を模擬した水槽をモデル化した。

図-1 にモデル化した水槽を示す。水槽は左右の貯水槽部と被圧帯水層部からなり、左側貯水槽部は幅 5cm、高さ 53cm、被圧帯水層部は幅 100cm、高さ 50cm、右側貯水槽部は幅 5cm、高さ 54.9cm とした。左右の貯水槽部の高さは、実験条件の湛水深を模擬している。水槽の左側は海側、右側は陸側を想定した。表-1 に被圧帯水層部に用いる土の物理特性を示す。既往研究における室内実験では、相馬砂を用いており、本研究ではその物理特性を用いた。

表-2 に流体の物理特性を示す。流体の物理特性においても既往研究で用いられた物理特性を用いた。解析領域は、節点数 23,241 と要素 22,885 で分割した。

境界条件は、被圧帯水層部の上下端を不透水境界として設定した。また、貯水槽部のモデル境界は流速が 0 となる壁境界として設定した(図-1 参照)。貯水槽部の境界上部 1cm は左右ともに減圧させ、鉛直方向の流速を 0 とし、水平方向に排水するように設定した。注水条件は、左側においては海水、右側においては、淡水を貯水槽部底

表-1 土の物理特性

固有透過度	4.38E-10m <sup>2</sup>
間隙率	0.36

表-2 流体の物理特性

水の密度	1.000 t/m <sup>3</sup>
塩水密度	1.025 t/m <sup>3</sup>
粘性係数	9.32E-07 kPa S
縦分散係数	2.21E-04 m
横分散係数	2.21E-05 m
塩水の拡散係数	1.00E-09 m <sup>2</sup> /s
屈曲度	1.000

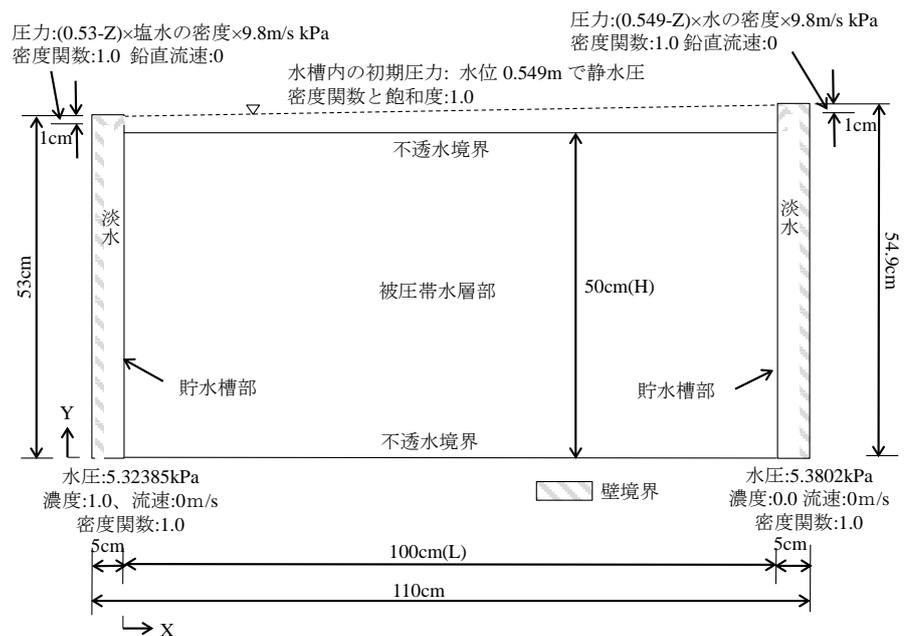


図-1 解析モデルと境界条件

面から圧力一定で注水するよう設定した。初期条件は水槽内が淡水で満たされていると仮定し、初期圧力を水位 54.9cm で静水圧、密度関数と飽和度は 1.0 に設定した。計算開始後、塩水と淡水の流れが定常状態となった時点で計算終了とした。

#### 4. 計算結果

図-2 に解析結果より得られた定常状態における塩分濃度分布を示す。図中には、20%間隔で等濃度線を併記している。海側の被圧帯水層の左端から陸側 0.50m 程度にかけ、塩水と淡水の境界面（以下、塩淡境界面）が形成されていることが確認できた。この塩淡境界面の位置は、既往研究における実験結果とおおよそ同位置に形成していることを確認した。また、海側へ向かうにつれ、塩水と淡水の混合域（以下、塩淡混合域）の幅が大きくなる傾向が確認でき、既往研究の解析結果とほぼ一致している。既往研究では、海側の淡水の流速が大きくなることにより、分散係数が大きくなることに起因していると考えられており、本研究においても、同様の要因と考えられる。

図-3 に X 方向と Y 方向の合成流速分布図を示す。図中には別途作成した流速ベクトル図から読み取った淡水と塩水の流動方向を示している。淡水領域と比較し、塩水領域の流速が 1 オーダー小

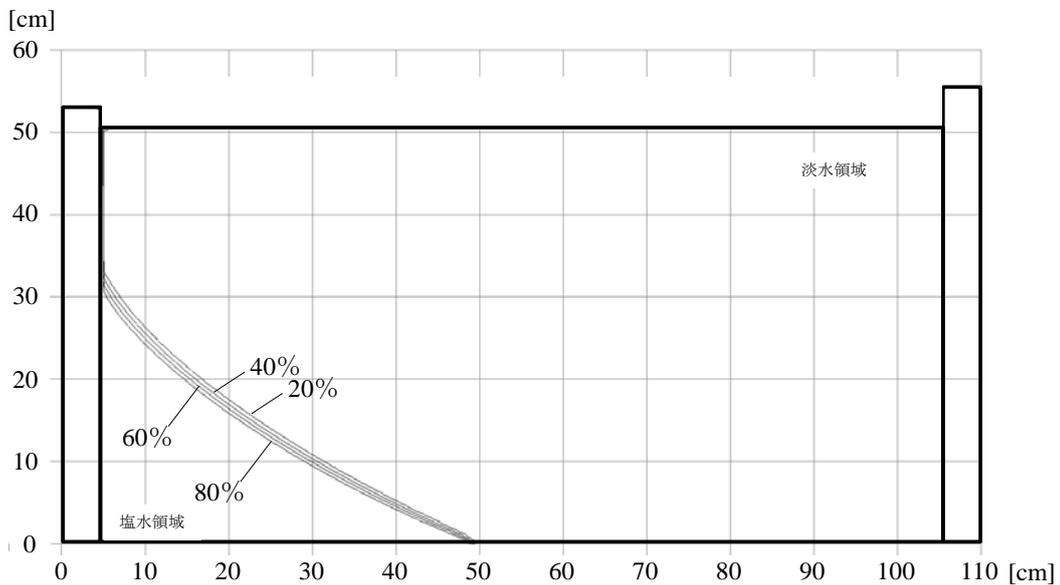


図-2 定常状態における塩分濃度分布

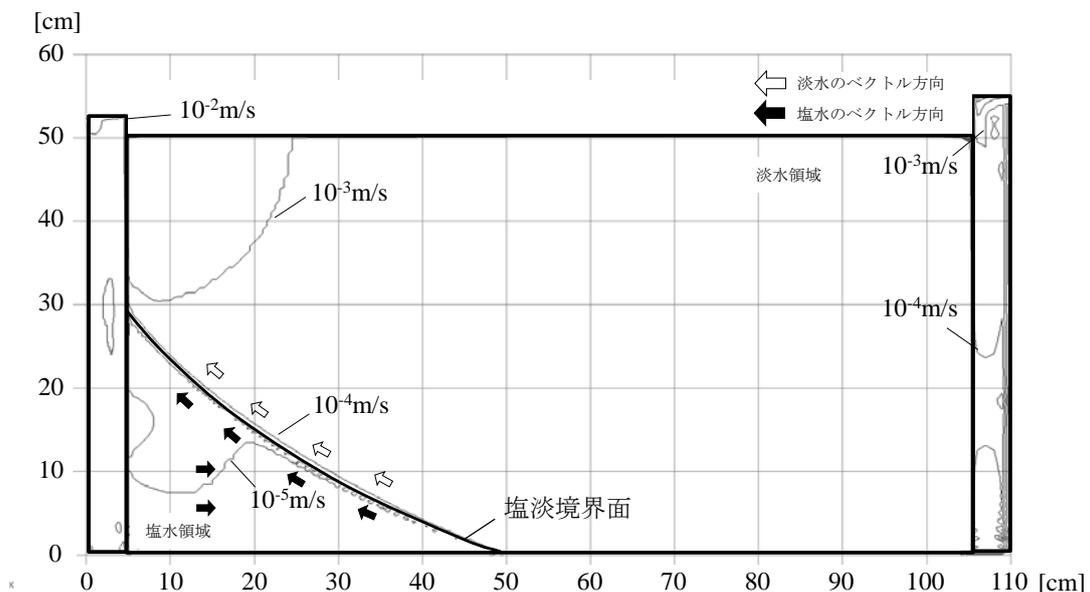


図-3 合成流速分布図

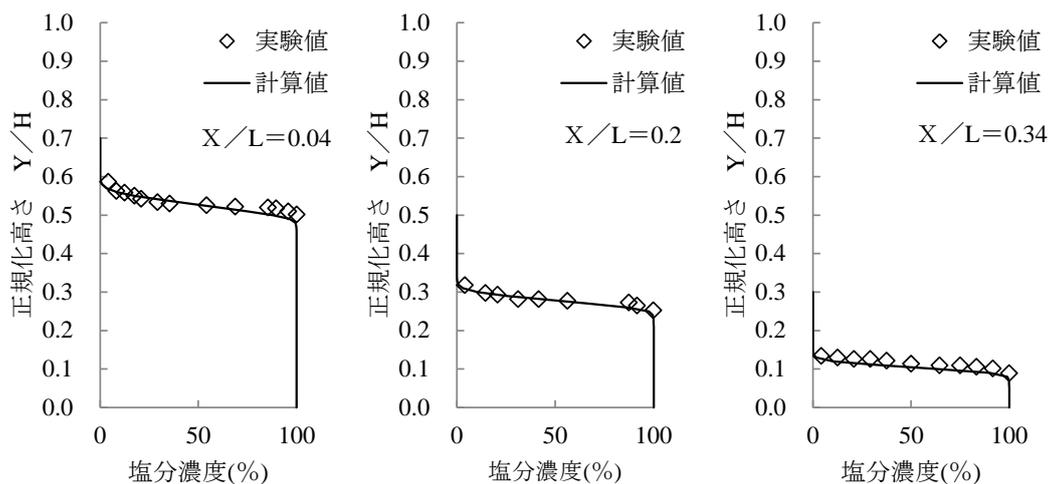


図-4 既往研究における実験値と本研究における計算値を比較した塩分濃度分布

さくることがわかる。淡水領域においては、陸側から塩淡水界面に沿う流れが生じており、陸側から海側へ向かって流速が大きくなっていることが確認できる。一方、塩水領域においては、塩淡水界面付近で流れ方向が変化し、淡水の流れ方向と同様の流れ方向となることが確認できる。これより、塩淡水界面付近における塩水の流動場は、淡水領域の流動場の影響を大きく受けることがわかった。塩水と淡水の流れ方向の傾向は既往の研究の解析結果とほぼ同様の傾向を示しており、塩水流動をよく再現できていることが確認できた。また、貯水槽部と被圧帯水層部の流速を比較すると、貯水槽部の流速が非常に大きいことがわかる。このことから、貯水槽内の水の流動（表面流）も再現できているものと推察される。

図-4 に既往研究における実験値と本研究における計算値を比較した塩分濃度分布を示す。グラフの軸は、被圧帯水層部の下端からの高さ(Y)と水槽高さ(H)で正規化した。計算値と実験値は乖離が小さく、よく一致していることが確認できた。

## 5. まとめ

本研究では、既往研究における実験結果を用いて、ASG法の塩水化問題への適用の可能性を検討した。検討結果より、ASG法の塩水化問題への適応は可能であることが確認できた。本研究は定常状態における検証であったため、今後の展望としては、水理模型実験等を実施し、ASG法を用いて、非定常状態における塩分濃度の変化を検証する。

## 参考文献

- 1) 日比義彦, 富樫聡: 多孔質体内の流れの飽和度型支配方程式を用いた堤体の越流数値解析, 混相流, 第29巻, 4号, pp.326-334, 2015.
- 2) Hibi, Y., Tomigashi, A. and Hirose, M: Evaluation of a numerical simulation model for a system coupling atmospheric gas, surface water and unsaturated or saturated porous medium, Vol.183, pp.121-134, 2015.
- 3) 神野健二: 地下水中の物質輸送数値解析, 九州大学出版, pp.77-99, 2001.