# ー次元の物質移動問題への大気-地表水-地下水連成数値解析手法の適用性の検証

1	はじめ	15

沿岸付近では、淡水と塩水が接する塩淡水境界が 形成されている。塩淡水境界が外部からの影響を受 け、バランスが崩れると地下水の塩水化が進行して しまう。近年の地球温暖化の影響による海水面の上 昇は、沿岸域の地下水を塩水化させてしまい、人間 生活に影響を及ぼしている。そのため海水と地下水 中で物質移動を扱える解析手法が必要である。

そこで、著者らは一次元の塩水の物質移動問題に 対する、大気-地表水-地下水連成数値解析手法 (ASGMF法)<sup>1)</sup>の適用性を検証した。

# 2. 解析手法

ASGMF 法は地表水と大気と地盤中の流体の流れ に加え、地盤中の飽和度を扱うことができる。さら に、地表水と地下水中の物質移動も取り扱うことが できる数値解析手法である。ASGMF 法では、地表 水と大気のガスの流れに以下の式(1)と(2)の質量保 存の式と Navier-Stokes の式を適応する。

 $\nabla \cdot \mathbf{V} = \mathbf{0} \tag{1}$ 

 $\partial V / \partial t + (V \cdot \nabla) V = -(1/\rho) \nabla p + (\mu/\rho) \nabla^2 V - g$  (2)

ここで V、 $\mu$ 、p、 $\rho$ は流体の速度ベクトル、粘性 係数、圧力、密度であり、t は時間、g は上向きを正 とした場合の重力加速度である。また、地表水中で は密度関数が  $S_{wi}$ となり、大気中では 0 となる。ま た、密度関数は式(3)を用いて移動させる。なお、密 度関数とは、大気と地表水より形成される表面シス テム中の全流体の体積に対する水の体積の比を示す。  $S_{wit+\Delta t} = S_{wi*}$  (3)

ここで  $\mathbf{R}_i$  は節点 i における位置ベクトル、 $\mathbf{V}_{i,t+\Delta t}$ は時間 t+ $\Delta t$  における流体の流速、 $\Delta t$  は時間増分とし、  $\mathbf{S}_{wi*}$ は位置ベクトル  $\mathbf{R}_i$ - $\mathbf{V}_{i,t+\Delta t}\Delta t$ の密度関数とする。 また、多孔質体中の流体の流れに対して式(4)に示す グローバル圧力 P という概念を用いる。

 $\nabla P = f_w \nabla p_w + f_g \nabla p_g$ (4)
ここで  $K_{rw}$  と  $K_{rg}$  をそれぞれ固有透過度に対する

名城大学	学生会員	○平嶋	智希
名城大学	学生会員	石川	雄大
名城大学	正会員	日比	義彦

水相の相対透過度とガスの相対透過度、 $\mu_w \ge \mu_g \epsilon \epsilon$ れぞれ水とガスの粘性係数とし、 $\lambda_w = K_{rw}/\mu_w$ 、  $\lambda_g = K_{rg}/\mu_g$ 、 $\lambda = \lambda_w + \lambda_g$ 、 $f_w = \lambda_w/\lambda$ 、 $f_g = \lambda_g/\lambda$ と定義する。多 孔質体中の水とガスの流れを求める式は Darcy の法 則と質量保存の法則により式(5)のように表される。  $\partial \Phi / \partial t = \nabla \cdot \lambda k_s [\nabla P + (f_w \rho_w + f_g \rho_g)g \nabla z]$  (5)

ここで  $k_s$  は固有透過度、 $\Phi$  は間隙率、 $\rho_w \ge \rho_g$  は それぞれ水とガスの密度である。さらに水の飽和度  $S_w$ の移動は式(6)の支配方程式によって表される。

$$\partial S_w / \partial t + V_{\text{soil}} \cdot \nabla S_w = \nabla \cdot (D_{\text{soil}} \nabla S_w)$$
 (6)

また、V<sub>soil</sub>、D<sub>soil</sub>は次のように表される。

 $V_{\text{soil}} = -[V_{\text{T}}(df_{\text{g}}/dS_{\text{w}}) - k_{\text{s}}(\rho_{\text{g}} - \rho_{\text{w}})g(d\lambda/dS_{\text{w}})]/\Phi$ (7)  $D_{\text{soil}} = [-\kappa k_{\text{s}}(d\rho_{\text{cgw}}/dS_{\text{w}})]/\Phi$ (8)

$$\kappa = k_{rg}k_{rw}/(\mu_g k_{rw} + \mu_w k_{rg}) \tag{9}$$

ここで $V_t$ は水とガスを含む合計流速、 $p_{cgw}$ は毛管 圧である。また、今回は水相中の物質移動に式(10) の移流分散方程式を用いている。

$$\partial C / \partial t + (V_w / \theta) \cdot \nabla C = \nabla \cdot D_{ii} \nabla C$$
<sup>(10)</sup>

ここでCは水相中の濃度、 $\theta$ は体積含水率であり、 D<sub>ij</sub>はiとj方向の分散係数である。iとjはx、yまたはz方向となる。

### 3. 実験方法

本実験で使用した一次元カラム実験装置を図1に 示す。カラムは内径 50mm、長さ 1556mm である。 今回は、間隙率が 0.345 になるようにカラム下端よ り 56mm から 1056mm の高さまで 50mm 毎に 0.8mm ガラスビーズ(粒度範囲: 0.71~0.99mm、密度 2.5g/cm<sup>3</sup>)を詰めた。土試料中の塩分濃度を計測する ため、土壌水分センサー(デカゴン社、EC-5、測定範 囲 0~100%、精度±3%)とデータロガー(デカゴン社、 Em5b、容量 49k)を使用した。土壌水分センサーはカ ラム下端より 256mm、456mm、656mm、856mm の 位置に設置した。塩分濃度の測定は土試料中では土 壌水分センサーの値を以下の式(11)に示す補正式に 代入し求めた。

4.

 $C = 37.037\theta - 22.630$ (11)ここで
θは
土壌
水分
センサーの
体積
含水率
である。 また、土試料より上の表面水中ではカラム下端よ り 1206mm、1306mm、1406mm の位置に塩分濃度計 (株式会社ケネック、測定範囲 3%)を設置し、塩分濃 度を測定した。

本実験は淡水と 2%塩水をそれぞれのマリオット タンクに貯留し、カラム下端からの水位が 1606mm になるようそれぞれのマリオットタンクを設置した。 カラム内の水位がカラム下端から1506mmになるよ うカラム下端から1506mmの位置の排水口から水を 排水した。はじめに淡水で満たし、カラム内の流れ を定常状態にした。その後 2%塩水をカラム内に注 入した。



$$\tau = \Phi \sqrt{\Phi^{2/3}}$$

ここで αL は縦方向分散長、dm は 0.8mm ガラスビ ーズの粒径、τ は屈曲度である。固有透過度は、以 前行った透水試験から得られた値を用いた。

#### 実験結果と解析結果の比較 5.

図3に土試料中での塩分濃度変化を示す。図3よ り土試料中では実験結果と解析結果の塩分濃度はほ ぼ一致していた。しかし、カラム下端より 85.6cm の 位置の土壌水分センサーの塩分濃度はセンサーの不 具合で上昇しなかった。また、土試料より上の表面 水中の塩分濃度の経時変化を図4に示す。土試料の 上の表面水中ではどのセンサーの高さでも実験結果 と解析結果が一致していなかった。これは表面水中 の流速が実験と解析で異なっていたことを示す。



#### まとめ 6.

今回、ASGMF 法の塩水化問題への適用性の検証 を行った結果、土試料中では適用可能であった。し かし、土試料より上の表面水中では流速が異なって いたことから正確な検証を行うことができなかった。

## 参考文献

1) Yoshihiko HIBI, Akira TOMIGASHI: A numerical simulation model for a coupled porous medium and surface fluid system with multiphase flow 地 下水学会誌、60巻第4号、pp409-434(2018)

(13)