

## 不飽和土壌カラム中の陽イオンの輸送解析

九州産業大学工学部 学生会員 松尾 哲弘

九州産業大学工学部 正会員 細川土佐男

" " 岩満 公正

九州大学大学院 正会員 和田信一郎

## 1. はじめに

乾燥地においては、河口に近い感潮河川の近傍領域で地下水面が比較的浅い場合、地表面からの蒸発に伴い土中水中の交換性陽イオンが、不飽和層中を脱着・吸着の化学反応しながら地表面まで運ばれて、地表面の交換性陽イオンの濃度が高くなり、農作物に害をもたらすことがある。著者らは、これまで地表面の蒸発に伴う不飽和土壌カラム内の交換性陽イオン( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ )の輸送の室内実験を行い上昇移動特性などについて検討を行ってきた。本研究では、この実験に基づいて不飽和土壌中の陽イオンの化学反応過程を考量した移流分散の輸送解析を行い、解析手法の妥当性や陽イオンの鉛直方向の濃度変化などについて考察を加えるものである。

## 2. 基礎式

表-1 基礎式

数値解析に用いる基礎式を、表-1に示す。ここで、表記の簡便さのため、添字  $i=1,2,3,4$  はそれぞれ  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  イオンを表している。式(1)、(2)は、水移動の方程式、式(3)~(5)は物質輸送方程式、式(6)~(12)は、化学反応式である。ここに、 $h$ : 圧力水頭、 $c_w$ : 比水分容量、 $k$ : 不飽和透水係数、 $v$ : 断面平均流速、 $[C_i]$ : 土中水の  $i$  イオンの濃度、 $\theta$ : 水分率、 $S_i$ :  $i$  イオンの化学反応項、 $D$ : 分散係数、 $K_{(i=1)/(i=2,3,4)}$ : 選択係数、 $X_{i=1\sim4}$ :  $i$  イオンの当量分率、式中の( ): 陽イオンの活動度、 $I$ : イオン強度、 $G_i$ : 活動度係数、 $A$ : 温度に依存した定数、 $\rho_b$ : 土の乾燥密度である。なお、上付きバーは固相に吸着している陽イオンの濃度及び化学反応項を示す。

$$\begin{aligned}
 c_w \frac{\partial h}{\partial t} &= -\frac{\partial v}{\partial y} \quad (1) & v &= -k \left( \frac{\partial h}{\partial y} - 1 \right) \quad (2) & \frac{\partial [\theta[C_i]]}{\partial t} + \frac{\partial [\theta v[C_i]]}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \frac{\partial [\theta[C_i]]}{\partial y} \right\} &= \theta S_i \quad (3) \\
 \frac{\partial [\theta[C_i]]}{\partial t} &= \theta S_i \quad (4) & \bar{S}_i &= -S_i \quad (5) & K_{\text{Ca/Na}} &= \frac{X_{\text{Ca}}(\text{Na}^+)^2}{X_{\text{Na}}^2(\text{Ca}^{2+})} \quad (6) \\
 K_{\text{Ca/K}} &= \frac{X_{\text{Ca}}(\text{K}^+)^2}{X_{\text{K}}^2(\text{Ca}^{2+})} \quad (7) & K_{\text{Ca/Mg}} &= \frac{X_{\text{Ca}}(\text{Mg}^{2+})}{X_{\text{Mg}}(\text{Ca}^{2+})} \quad (8) & I &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 C_i Z_i^2 \quad (9) \\
 \log_{10} G_i &= -AZ_i^2 \left( \frac{\sqrt{I}}{1+\sqrt{I}} - 0.3I \right) \quad (10) & \frac{[C_i]}{[C_i]} &= \text{CEC} \frac{\rho_b}{\theta} \frac{X_i}{2} \quad (11) & \sum_{i=1}^4 x_i &= 1 \quad (12)
 \end{aligned}$$

表-2 計算条件

## 3. 室内実験と数値計算の概要

実験は、地下水面から上に内径 5cm、高さ 5cm のカラムを 2 段、2cm のカラムを 15 段、1cm のカラムを 10 段積み重ねた 50cm の円筒の中に、天日乾燥させた後 2.0mm 以下に砕いた畑の土を入れて蓋をし、7 日間毛管により上昇させたあと蓋を取り蒸発による実験を開始した。蒸発強度は、地表面の水分率を変化させた円筒カラムからの蒸発量、水のみ円筒カラムからの蒸発量を測定し、まず水面からの蒸発量と地表面からの蒸発量との関係を求め、つぎに地表面の水分率と蒸発強度の関係を求めた。なお、地下水の陽イオンの濃度は、 $\text{Ca}^{2+}$ : 5mmol/l、 $\text{Mg}^{2+}$ : 2mmol/l、 $\text{K}^+$ : 4mmol/l、 $\text{Na}^+$ : 20mmol/l に設定した。

数値計算は、式(1)、(2)を陰解法の差分式、式(3)を特性曲線法により行い、未知の非線形パラメータである化学反応項の最適な推定値を Levenberg-Marquardt 法により求めている。式(1)、(2)の計算に必要な不飽和パラメータは、土柱法の実験を行いバンゲヌッテンの

| パラメータ       | 値                  | 単位                          |
|-------------|--------------------|-----------------------------|
| 分散定数        | $\alpha_L$         | 0.074 cm                    |
| 飽和水分率       | $\theta_s$         | 0.48                        |
| 残留水分率       | $\theta_r$         | 0.025                       |
| 乾燥密度        | $\rho_b$           | 1.296 g/cm <sup>3</sup>     |
| 差分格子間隔      | $\Delta y$         | 0.5 cm                      |
| バンゲヌッテンの定数  | $\alpha$           | 0.047 1/cm                  |
|             | $m$                | 0.566                       |
|             | $n$                | 2.304                       |
| 飽和透水係数      | $k_s$              | 3.650*10 <sup>-4</sup> cm/s |
| 選択係数        | $K_{\text{Ca/Mg}}$ | 1.2149 -                    |
|             | $K_{\text{Ca/Na}}$ | 2.7809 mol/l                |
|             | $K_{\text{Ca/K}}$  | 0.0112 mol/l                |
| 陽イオン交換容量CEC | 7.1                | meq/100g                    |

キーワード 陽イオン, 不飽和土壌, 陽イオン交換反応, 室内実験, 数値解析

連絡先 〒813-8503 福岡市東区松香台 2-3-1 九州産業大学工学部土木工学科 TEL092-673-5687

理論式より算定した。なお、計算に用いた物理的及び化学的計算条件を表-2に示している。

#### 4. 結果と考察

図-1、2に実験開始後21日目と42日目の鉛直水分分布の実測値と計算値を示している。数値解は実測値をよく再現していると言える。41日目の鉛直水分分布は21日目とほとんど同じ大きさの形状を示している。このことから、土壌カラム内の鉛直方向の流速分布は21日目以降一定になっている。

実験開始後21日目の土中水の各陽イオンの鉛直濃度分布の数値解と実測値を図-3、4に示し、固相上に吸着した各陽イオンの鉛直濃度分布の数値解を図-5に示している。また、41日目のこれらの結果を図-6～8に示している。土中水の各イオンの濃度分布の数値解は、実測値を概ね再現している。土中水の  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  の濃度は、地下水中の濃度より地表面に向かって増加して

いる。特に地表面では水分が蒸発してイオンが残留するため、この近傍の濃度は急激に高くなっている。 $\text{K}^{+}$  の濃度は、地下水面から地表面に向かって一旦減少した後、徐々に増加し地表面付近では急に増加している。 $\text{Na}^{+}$  の濃度は、地下水面の直上で最も高く、地表面に向かって減少の度合いを大きくしながら低下し、地表面付近では蒸発により高くなっている。土中水の  $\text{Ca}^{2+}$  と  $\text{Mg}^{2+}$  の濃度は、地下水におけるこれらの濃度比2.5をほぼ保ちながら地下水面から地表面に向かって高くなっている。固相上の濃度の総和を図-5、8に+の記号で示している。この値はあらかじめ与えた  $\text{CEC}=7.1\text{meq}/100\text{g}$  とよく一致している。従って、式(12)を満足する計算結果であると言える。

#### 5. おわりに

本研究では、不飽和土壌中を地表面の蒸発によって上昇移動する交換性陽イオンの鉛直濃度分布の実測値と数値解が概ね一致し、各イオンの鉛直濃度分布形状が分った。

#### 【参考文献】

(1)岩満公正他3名：地表面の蒸発による塩類輸送の円筒カラム実験，平成10年土木学会西部支部研究概要集，224

－225，1998.

(2)舩井和朗・神野健二・塩崎功・和田信一郎：化学反応を考慮した地下水における物質輸送解析・数値モデル開発と室内実験への適用，地下水学会誌，38(2)，113－123，1996.

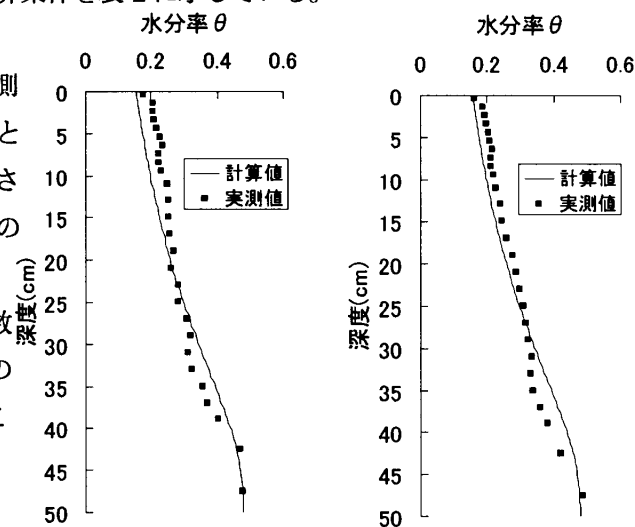


図-1 21日目の鉛直水分分布

図-2 42日目の鉛直水分分布

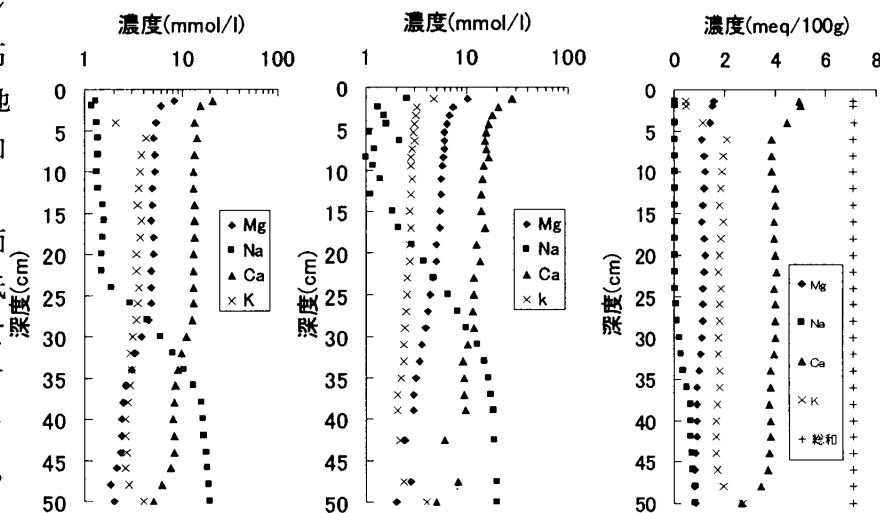


図-3 土中水中の濃度分布  
の数値解(21日目)

図-4 土中水中の濃度分布  
の実測値(21日目)

図-5 固相上の濃度分布  
の数値解(21日目)

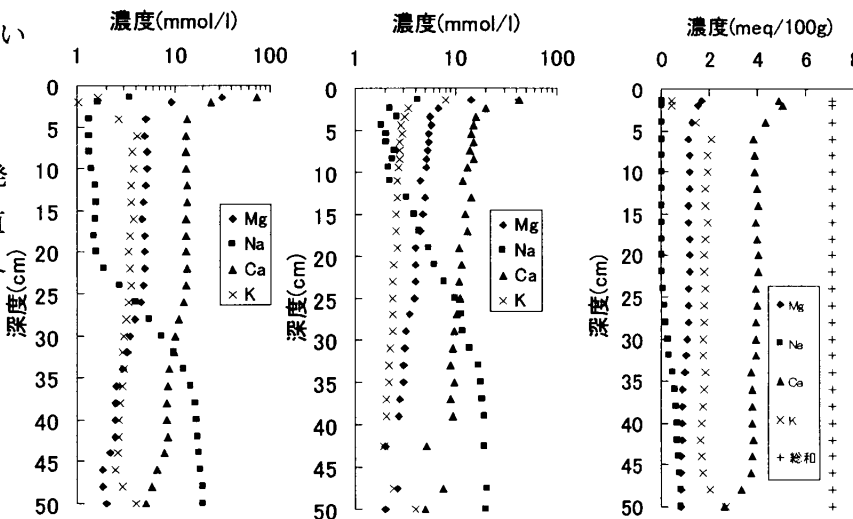


図-6 土中水中の濃度分布  
の数値解(42日目)

図-7 土中水中濃度分布  
の実測値(42日目)

図-8 固相上の濃度分布  
の数値解(42日目)