

地表面の蒸発に伴う鉛直 1 次元土壌中の塩類輸送解析

九州産業大学工学部	学生員	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

インドなどの乾燥地においては、河口に近い干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地下水中の塩類が不飽和層中を陽イオン交換反応をしながら地表面まで運ばれて地表面の塩類の濃度が高くなり、農作物に害をもたらすことがある。そこで本研究は、著者らがこれまで行った塩類輸送の鉛直 1 次元カラム実験に基づいて陽イオン交換反応を考慮した塩類輸送の数値計算を行い、数値解析法の妥当性と塩類の輸送特性について考察したものである。

2. 基礎式

2.1 水移動の方程式

水が不飽和層中を移動する場合の圧力水頭についての基礎式は、鉛直下向きに y 座標をとると次式で示される。

$$c_w \frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial v}{\partial y} \tag{1} \qquad v = -k \left(\frac{\partial h}{\partial y} - 1 \right) \tag{2}$$

ここに、h:圧力水頭、 c_w :比水分容量、k:不飽和透水係数、v:y 方向の断面平均流速である。

2.2 物質輸送方程式

化学反応を考慮した 1 次元移流分散方程式は、塩類の各陽イオン($Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, Na^+$)に対して次のように表せる。

$$\frac{\partial \theta [C_i]}{\partial t} + \frac{\partial \{\theta [C_i]\}}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \frac{\partial \theta [C_i]}{\partial y} \right\} = \alpha S_i \tag{3}$$

ここに、 $[C_i]$:化学種の濃度(mmol/l)、 θ :水分率、 S_i :複数の化学種間での化学反応に基づく化学反応項、 v' :実流速、 D :水理学的分散係数で $D = \alpha_L v'$ により表される。なお、塩素イオンの場合は、右辺の化学反応項を除いた式で表される。

一方、陽イオン交換反応により変化する固相上濃度の保存式および吸・脱着に基づく化学反応項の関係式は、次式で表される。なお、上付きバーは、吸着サイトの陽イオン濃度、化学反応項を表す。

$$\frac{\partial \theta [C_i]}{\partial t} = \theta \bar{S}_i \tag{4} \qquad \bar{S}_i = -S_i \tag{5}$$

2.3 化学反応式

陽イオン交換反応に対して、化学平衡が成立するとき、次に示す質量作用の法則である吸着平衡式が成立する。

$$K_{Ca/Na} = \frac{X_{Ca} (Na^+)^2}{X_{Na}^2 (Ca^{2+})} \tag{6} \qquad K_{Ca/K} = \frac{X_{Ca} (K^+)^2}{X_K^2 (Ca^{2+})} \tag{7}$$

$$K_{Ca/Mg} = \frac{X_{Ca} (Mg^{2+})}{X_{Mg} (Ca^{2+})} \tag{8}$$

ここに、 $K_{Ca/Na}, K_{Ca/K}, K_{Ca/Mg}$: Na^+, K^+, Mg^{2+} イオンに対する Ca^{2+} イオンの選択係数、 $X_{i=1-4}$:吸着サイトのイオンの当量分率、式中の() :陽イオンの活動度である。活動度は、[] で示す濃度に活動度係数を乗じることによって算定される。この活動度係数は、式(9)で算定されるイオン強度を Davies の式(10)に代入すれば求められる。

$$I = \frac{1}{2} \sum_i C_i Z_i^2 \tag{9} \qquad \log_{10} G_i = -AZ_i^2 \left(\frac{\sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} - 0.3I \right) \tag{10}$$

ここに、 I :イオン強度、 G_i :活動度係数、 C_i :各イオン $i=1\sim 4$ の濃度 (mol/l)、 Z_i :各イオン $i=1\sim 4$ の電荷、 A : 温度に依存した定数である。また、当量分率と吸着サイトの陽イオン濃度とは、陽イオン交換容量 CEC を用いて、2 価のイオンに対しては式(9)の第1式、1 価のイオンに対しては式(9)の第2式の関係満足することになる。さらに、固相表面上の陽イオン交換容量 CEC は、吸着サイトに交換吸着している陽イオンの総数に等しいことにより、式(12)が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} [\bar{C}_i] &= CEC \frac{\rho_b X_i}{\theta} \frac{1}{2} \\ [\bar{C}_i] &= CEC \frac{\rho_b X_i}{\theta} \end{aligned} \right\} \quad (11) \quad \sum_{i=1}^4 x_i = 1 \quad (12)$$

ここに、 ρ_b :乾燥密度である。

3. 計算条件と物理および化学的パラメータ

最初の1週間は毛管上昇のみによる計算を行い、8日目からは地表面の蒸発を加えた計算を行った。不飽和パラメータは、土柱実験結果を基にバゲヌッテンの理論式より算定した。表-1に数値計算に用いた物理および化学的パラメータを示している。なお、数値計算は、式(1),(2)を陰解法の差分法、式(3)を特性曲線法により行った。

4. 結果と考察

図-1に水分率の鉛直分布の実測値と数値解を示す。両結果の分布の傾向は概ね一致し、毛管作用と地表の水の蒸発により地下水面から水が上昇移動している状態が再現されていると考えられる。図-2に Cl^{-} イオンの鉛直分布の実測値と数値解を示す。 Cl^{-} イオンは分子拡散と毛管作用と地表の水の蒸発により引きこまれる移流によって、地下水面から地表に向かって上昇移動している。図-3, 4に陽イオンの鉛直濃度分布を示す。 Na^{+} イオンは、土粒子に吸着しながら上昇移動し、分散により減少する分布を示している。これに対して Ca^{2+} イオンは、 Na^{+} イオンとの交換離脱により水中に溶出するため、地下水中の濃度よりも高くなりながら上昇移動している。この離脱は、全層にわたって進行しながら上昇移動するため、地下水面の近くの濃度増加は小さくなっている。 Mg^{2+} イオンの分布は、 Ca^{2+} イオンとほとんど同じ形状になっている。 K^{+} イオンの数値解の分布は、 K^{+} イオンが土粒子に吸着しながら上昇移動するため、 Na^{+} イオンと似通った分布形状を示している。しかし、実測値の分布形状は地表に向かって増加しながら上昇している。各イオンとも蒸発が進むと地表近くで濃度が高くなっている。

4. おわりに

本研究で地表面の水の蒸発によって上昇移動する塩類は、それぞれ異なった移動特性を示すことが分った。今後、地表の濃度が極端に高くなるまで計算を進めて化学的条件などを検討する予定である。

【参考文献】 初井和朗・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。

表-1 物理および化学的パラメータ

パラメータ	値	単位	
分散定数	α_L	2.5	1/cm
飽和水分率	θ_s	0.48	
残留水分率	θ_r	0.025	
乾燥密度	ρ_b	1.296	g/cm ³
差分格子間隔	Δy	0.5	cm
バゲヌッテンの定数	α	0.047	
	m	0.566	
	n	2.304	
飽和透水係数	k_s	3.650×10^{-4}	cm/s
選択係数	$K_{Ca/Mg}$	1.2149	-
	$K_{Ca/Na}$	2.7809	mol/l
	$K_{Ca/K}$	0.0112	mol/l
陽イオン交換容量	CEC	71.0	meq/1000g

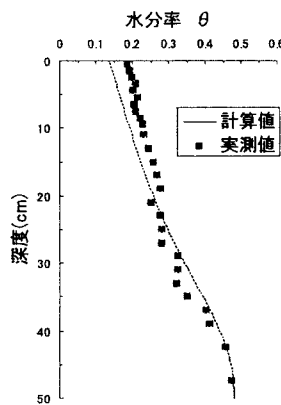


図-1 10日目の鉛直水分分布

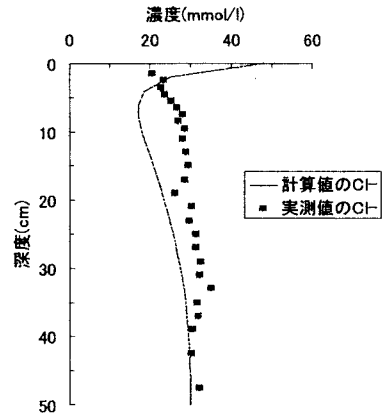


図-2 塩素イオンの鉛直濃度分布 (21日目)

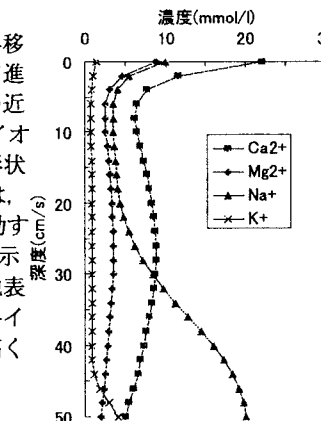


図-3 陽イオンの鉛直濃度分布の数値解(21日目)

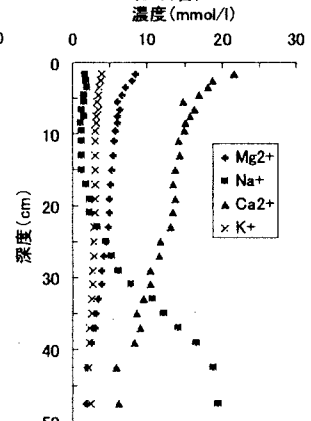


図-4 陽イオンの鉛直濃度分布の実測値(21日目)