

# 地盤内水分と化学物質の移動を考慮した根系生長モデルに関する数値解析的検討

九州大学 学○藤澤朱音 九州大学大学院 工学研究院 正 古川全太郎 正 笠間清伸

## 1. はじめに

現在、地球温暖化の影響を受け、世界規模で砂漠化が進んでいる。また、乾燥地における風食、水食などの様々な問題も起きている。最も有用な砂漠化対策の一つとして植林・植樹による緑化が挙げられる。しかし、健全に植物が生長するためには、対象地域の水分・化学物質保持特性などの地盤環境を把握し、植物の生長を考慮した適切な水管理、施肥を行う必要がある。著者らは、適切な施肥量、散水量を把握して、効果的に緑化を行うための方法を提案することを目的とし、植物の生長速度および水分・化学物質の吸収速度を考慮した地盤内化学物質移動のシミュレーターを開発した<sup>1)</sup>。本文では、二次元場における解析モデルの妥当性を検証した。

## 2. 解析概要

図1は今回行った二次元の解析イメージ図である。

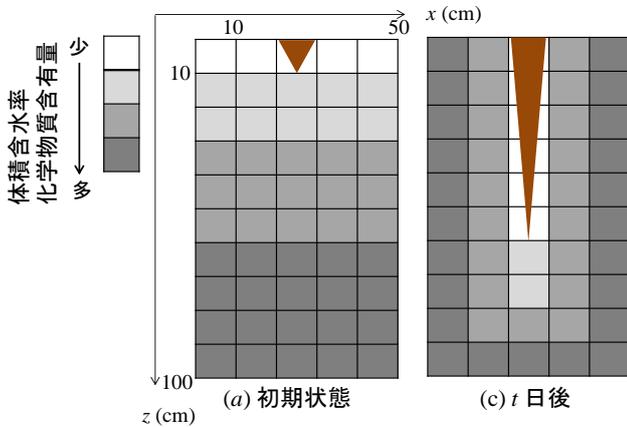


図-1 解析イメージ図

モデル化には移<sup>2)</sup> 用いた<sup>2)</sup>。

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_l}{\partial t} + V_x \frac{\partial C_l}{\partial x} + V_z \frac{\partial C_l}{\partial z} \\ = D \frac{\partial^2 C_l}{\partial x^2} + D \frac{\partial^2 C_l}{\partial z^2} - 2\pi r_0 q_{c0} L_{v2} / \theta \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 $C_l$ : 溶質濃度 ( $\text{mg}/\text{cm}^3$ )、 $V_x, V_z$ : 水平方向、または鉛直方向の間隙流速 ( $\text{cm}/\text{sec}$ )、 $D$ : 分散係数 ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )、 $r_0$ : 平均的な根の半径 ( $\text{cm}$ )、 $q_{c0}$ : 根の吸収フラックス ( $\text{mg}/\text{cm}^2 \text{sec}$ )、 $L_{v2}$ : 根長密度 ( $\text{cm}/\text{cm}^3$ )、 $\theta$ : 体積含水率 (%) である。

根による吸収は、仮想的な根の表面積に、吸収フラ

ックスを乗ずることで表現した。

根による栄養塩の吸収力  $K_p$  は、植物の種類、根の生理状態、土壤水分により異なる。ここで、溶質濃度が低い場合、根の吸収フラックス  $q_{c0}$  を以下のように近似することができる。ここに、 $K_p$ : 根の吸収力 ( $\text{cm}/\text{sec}$ ) である。

$$q_{c0} = K_p C_l \quad (2)$$

(2) 式を (1) 式に代入して

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_l}{\partial t} + V_x \frac{\partial C_l}{\partial x} + V_z \frac{\partial C_l}{\partial z} \\ = D \frac{\partial^2 C_l}{\partial x^2} + D \frac{\partial^2 C_l}{\partial z^2} - 2\pi r_0 K_p C_l L_{v2} / \theta \end{aligned} \quad (3)$$

今回は、(3) 式を陽解法により差分法<sup>4)</sup>を行って土中水分、化学物質分布とその経時変化を計算した。

非定常項  $\frac{\partial C_l}{\partial t}$  には前進差分 (陽解法)、移流項

$V_x \frac{\partial C_l}{\partial x} + V_z \frac{\partial C_l}{\partial z}$  には、後退差分 (風上差分) を用い

た。また、分散項  $D \frac{\partial^2 C_l}{\partial x^2} + D \frac{\partial^2 C_l}{\partial z^2}$ 、吸収項  $2\pi r_0 K_p C_l L_{v2} / \theta$  については中央差分を用いて離散化を行った。

(3) 式を離散化すると

$$\begin{aligned} \frac{C_{l(i)}^{(k+1)} - C_{l(i)}^{(k)}}{\Delta t} + V_x \frac{C_{l(i)}^{(k)} - C_{l(i-1)}^{(k)}}{\Delta x} + V_z \frac{C_{l(i)}^{(k)} - C_{l(i-1)}^{(k)}}{\Delta z} \\ = D \frac{C_{l(i+1)}^{(k)} - 2C_{l(i)}^{(k)} + C_{l(i-1)}^{(k)}}{\Delta x^2} \\ + D \frac{C_{l(i+1)}^{(k)} - 2C_{l(i)}^{(k)} + C_{l(i-1)}^{(k)}}{\Delta z^2} - \frac{\lambda}{\theta} C_{l(i+1)}^{(k)} \end{aligned} \quad (4)$$

(4)式を整理して(5) 式を得る。

$$\begin{aligned} C_{l(i)}^{(k+1)} = (1 - C_1 - 2C_2 - \lambda \Delta t) C_{l(i)}^{(k)} \\ + (C_1 + C_2) C_{l(i-1)}^{(k)} + C_2 C_{l(i+1)}^{(k)} \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 $\lambda = 2\pi r_0 K_p L_{v2}$ 、 $C_1 = V \Delta t / \Delta x + V \Delta t / \Delta z$ 、 $C_2 = D \Delta t / \Delta z^2 + D \Delta t / \Delta x^2$

(5) 式をエクセルを用いて解析を行った。根による吸収は、植物の成長速度を仮定して非定常として導入した。

### 3. 解析条件

今回二次元解析においては、表-1のような条件で解析を行った。この際、簡略化のため体積含水率 $\theta$ の初期値をすべて30%とした。

表-1. 二次元解析に用いた条件

Index	$D$	$V$	$\theta$	$k$
Unit	cm <sup>2</sup> /sec	cm/sec	%	cm/day
Saturated	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-5}$	0.6	1
Unsaturated	$1.0 \times 10^{-4}$	-	0.3	-

ここに、 $k$ : 飽和透水係数(cm/day)

ただし不飽和状態においては、体積含水率が非定常であり、それに伴い移流速度 $V$ も非定常となる<sup>5)</sup>。不飽和浸透・分散解析では、不飽和透水係数に Van Genuchten モデルを用い、ダルシー則を用いた<sup>6)</sup>。これらの条件の下、時間経過後の栄養塩濃度分布の応答変化をみることで、その特徴を考察した。また、根の伸長速度は時間に比例すると仮定して $x-z$ 方向の二次元解析を行った。 $\lambda$ は根の吸収量を表す。

今回の解析では、根系伸長の速度を30 cm/monthとし、解析範囲を1マス10 cm、 $x$ 方向5マス× $z$ 方向10マスの範囲とした。植物根が存在する範囲では、水分、塩分の吸収があるものとした。

解析におけるフロー図を図2に示す。

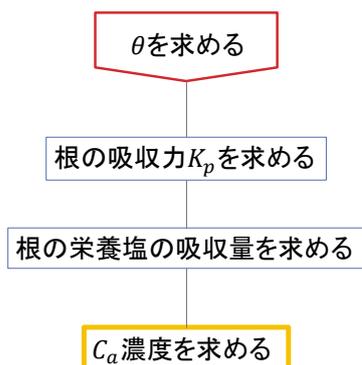


図-2 解析フロー図

### 4. 解析結果

本論文では、根の吸収と地盤内栄養塩濃度の応答から、その特徴を理解することを目的とした。

今回の解析では、以下のような結果が得られた。

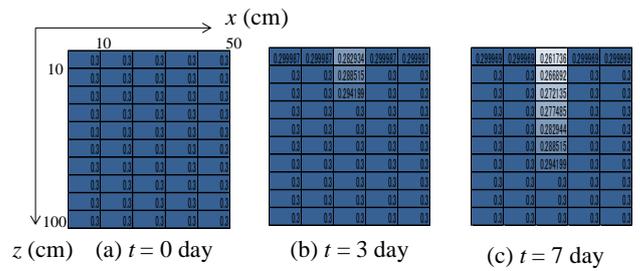


図-4. 含水率分布の時間変化

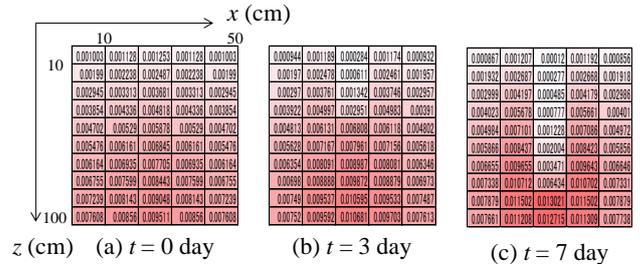


図-5. 栄養塩濃度の時間変化

図4は初期、3日目、7日目の体積含水率 $\theta$ の分布を示す。時間が経つにつれ、根近傍の含水率が減少していることが見てとれる。これは主に植物根による水の吸収が影響している。また、根による吸収と比較するとごく微小であるため図には表れなかったが、根の吸収によらない地盤内の水分の移動も起こっており数値の変化もみられる。

図5は初期、3日目、7日目の栄養塩濃度の様子を示す。体積含水率の変化と同様に、根が生長するにつれ、根が栄養塩を吸収し、土壌の栄養塩分布が変化することを示している。特に、根近傍では栄養塩の吸収量が大きくなっている。また、根先端付近では初期状態よりも栄養塩濃度が大きくなっている。ただし、図4から分かるように根先端の体積含水率の変化は見られないことから、先端付近に栄養塩が集積し、濃度だけではなく、栄養塩量が増加していることが分かる。

よって、この解析から、根の吸収が地盤内栄養塩濃度へ及ぼす影響は大きいと考えられる。

【参考文献】: 1) 直塚彦太郎, 地盤環境と栄養塩濃度を考慮した根系生長モデルに関する数値解析学的研究 2) 土壤物理学, ウィリアム・ジュリー・ホートン著, pp223-231 3) 中野政詩ら, 土の物質移動学, 東京大学出版, pp16-22, pp75-79, pp120-129 4) 神野健二ら, 粒子移動による移流分散方程式の数値解法の検討, 1978 5) 荒木英樹ら, 根研究学会, 根の研究の最前線, 耕地における作物根系の吸水と水輸送, 2002 6) 坂井勝ら, 水分保持曲線と不飽和透水係数の水分移動モデル, 2009