

灌水・蒸発条件に着目した根を含む重金属汚染土壌の物質移動に関する数値解析

九州大学大学院 学生会員 ○古賀 泰史 九州大学大学院 正会員 古川全太郎
東京工業大学 国際会員 笠間 清伸

1 はじめに

土壌汚染に対する工法として、植物が土壌内から水分・養分を吸収する際に、汚染物質を吸収し体内に固定化する「ファイトレメディエーション」が期待されている。本工法は、低コスト・低環境負荷というメリットがある反面、気象条件や地盤条件に浄化効果が左右され、安定した浄化効果を得られないこと、従来の封じ込め・固化と比較して大幅な時間を要すること等のデメリットがある。この工法を効率的・効果的に行うためには、様々な土壌内環境での植生の応答を事前に把握・予測した上、対象土壌に適切な植生及び植栽方法を提案する必要がある。そこで、著者らは植生が存在する場合の水分・重金属の移動を考慮した「土壌内環境予測プログラム」を開発し、根の吸収を考慮した数値解析を行った。本文では、蒸発強度、灌水強度の2つの気象に関する指標においてパラメトリックスタディを行い、土壌内汚染物質濃度に与える影響を調べた。

2. 解析概要・条件

解析モデルは、森元らによる植生を用いた六価クロム汚染土壌浄化実験¹⁾を参考に、図1に示す幅15cm、長さ50cmの長方形とした。植生を地表面ABにおける点Aに配置し、本研究は、植生をコマツナ、汚染物質を Cr^{6+} と想定した。解析手法は、有限差分法による飽和・不飽和浸透流解析および移流・分散解析とした。圧力水頭に関する境界条件として、地表面ABを蒸発を含む降雨浸透境界、モデル下端CDを浸出面境界とした。側面ADとBCは不透水性境界、汚染物質濃度に関する全境界はすべて、不透過性境界とした。

以下の不飽和土壌の水分移動式(式(1))と移流分散方程式(式(2))の二つの式をベースとし、式(1)には根系による水分吸収項 (Herkelrath et al. (1977)²⁾)、式(2)には根系による物質吸収項と根系による水分吸収によって生じる濃縮項を導入した。

$$(C_w + \alpha_0 S) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \right) - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s} \right)^b \rho (\psi_r - \psi) L_{v2} \quad (1)$$

ここに、 C_w は水分容量 (cm^{-1})³⁾、 α_0 は不飽和領域で0、飽和領域で1、 S は比貯留係数 0.0001 (1/cm) ⁴⁾、 ψ は圧力水頭 (cm)、 k_x 、 k_z は不飽和透水係数 (cm/s)³⁾、 ψ_r は根の近傍の水ポテンシャル (cm)、 b は補正パラメータ ($b=1$)²⁾、 θ は体積含水率 (cm^3/cm^3)、 θ_s は飽和体積含水率 (cm^3/cm^3)、 θ_r は残留体積含水率 (cm^3/cm^3)、 L_{v2} は根長密度 (cm/cm^3)、 ρ は根の透過係数 (cm/s)²⁾を表す。

$$\begin{aligned} R \frac{\partial C_l}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k C_l \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k C_l \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (k C_l) \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C_l}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial C_l}{\partial z} \right) - r K_p C_l L_{v2} \beta + \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s} \right)^b \rho (\psi_r - \psi) L_{v2} C_l \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 R は遅延係数 ($R=1$)、 C_l は汚染物質濃度 (g/cm^3)、 D ⁵⁾は分散係数 (cm^2/h)、 r は根の半径 (cm)、 K_p は養分吸収速度 (cm/s)、 β は汚染物質の吸収しづらさについての補正パラメータを表す。不飽和状態における

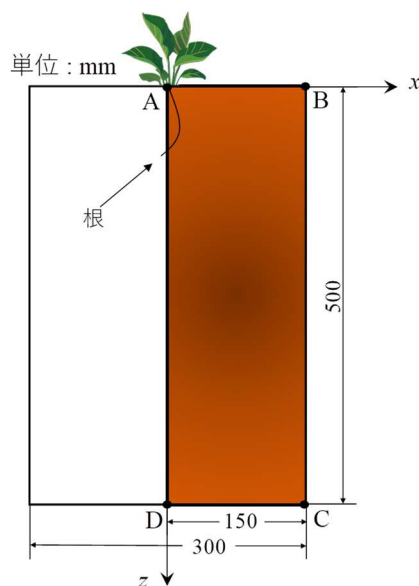


図1 二次元解析モデル

表 1 土壌・植生パラメーター

Parameter	unit	value
飽和体積含水率	θ_s	%
残留体積含水率	θ_r	%
根の初期長さ	L	cm
初期根長密度	L_{v2}	cm/cm ³
吸水根の透過抵抗	ρ	s/cm
根の半径	r	cm
汚染物質吸収速度	βK_p	cm/hour
根の中の水ポテンシャル	ψ_r	cm
		ψ -1000

表 2 灌水条件・蒸発条件

	灌水強度 R_e (cm/hour)	蒸発強度 w (cm/hour)	備考
case1	6.65×10^{-3}	4.5×10^{-6}	(基準)
case2	3.32×10^{-3}	4.5×10^{-6}	(R_e 0.5倍)
case3	1.33×10^{-2}	4.5×10^{-6}	(R_e 2倍)
case4	6.65×10^{-3}	2.25×10^{-6}	(w 0.5倍)
case5	6.65×10^{-3}	9.0×10^{-6}	(w 2倍)

不飽和透水係数、分散係数、水分特性曲線に関する式は、Van Genuchten (1980) 式⁶⁾を用いて算出した。

土壌・植生パラメーターは表 1 の値を用いており、森元らの実験で用いられたまさ土の保水性試験結果、コマツナの実験データを参考にした。また、森元らの実験データを参考に、解析領域内の初期圧力水頭を-33000cm、初期 Cr^{6+} 濃度を $2.74 \times 10^{-4} \text{g/cm}^3$ と設定した。表 2 に示す灌水強度 R_e と蒸発強度 w の 5 つの case を設定し数値解析を行った。

3. 解析結果

図 2、図 3 に case1 から case3 の 15 日後の圧力水頭分布、 Cr^{6+} 濃度分布を示す。灌水強度が大きいほど領域上部の圧力水頭が大きく、水の浸透速度も大きいことがわかる。灌水による領域内水分の増加による Cr^{6+} の濃度の減少も顕著にみられた。また、case1 における根が存在するエリアでの Cr^{6+} 濃度は初期濃度より 0.865%、case3 では 1.30%減少した。このことから、根近傍の水分量が多いほど給水量は増加し、水溶性の Cr^{6+} も同時に吸収できると考える。図 4 に全 5case の深さ毎の平均をとった鉛直 Cr^{6+} 濃度分布を示す。case2、case3 と比べ、case4、case5 における濃度分布は case1 と差異はなかった。この結果から、領域内の Cr^{6+} 濃度変化は蒸発よりも灌水が大きく影響することが示唆された。

4. まとめ

本検討における成果を以下に示す。

- 1) 灌水強度を 2 倍にすると根による汚染物質吸収量は 1.5 倍となる。
- 2) 領域内の Cr^{6+} 濃度変化は蒸発よりも灌水による影響を受け、 R_e を 2 倍にした際の深さ 10cm までの平均 Cr^{6+} 濃度は 0.45%減少した。

【参考文献】

- 1) 森元友紀・古川全太郎・笠間清伸・八尋裕一, 2019, コマツナを用いた六価クロム汚染土壌浄化に関する二次元型植生実験, 土木学会西部支部, pp447-448
- 2) 萩井和朗・野坂治朗・矢野友久, 1992, 植物の根による吸水モデルに関する比較検討, 水文・水資源学会誌, Vol.5, No.3
- 3) 中野政詩, 1991, 土の物質移動学, 東京大学出版会, pp16-18
- 4) 西垣誠, 1990, 地下水数値計算法(3) 1-2. 有限要素法による不飽和浸透流解析, 地下水学会誌, 第 32 巻第 3 号, pp163-171
- 5) 竹下祐二・八木一雄・森井俊広・井上光弘, 2002, 原位置透水試験による砂質土地盤の不飽和浸透特性の測定法, 地下水学会誌, 44-1, pp21-33
- 6) Van Genuchten, M.Th., 1980, A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Sci.Soc. Am.J., 44, pp892-898,

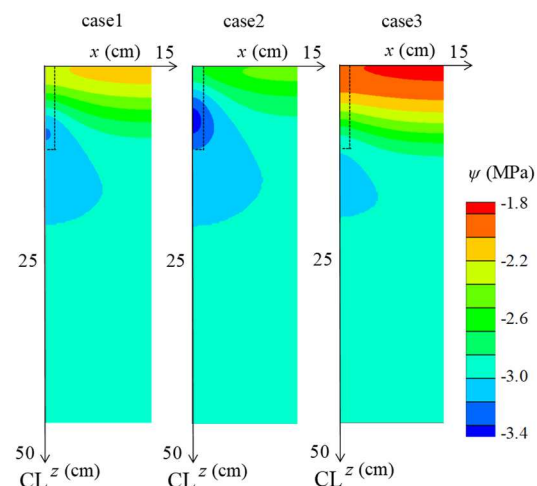
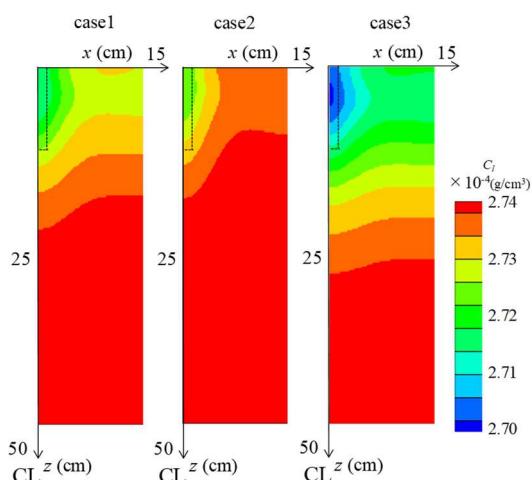
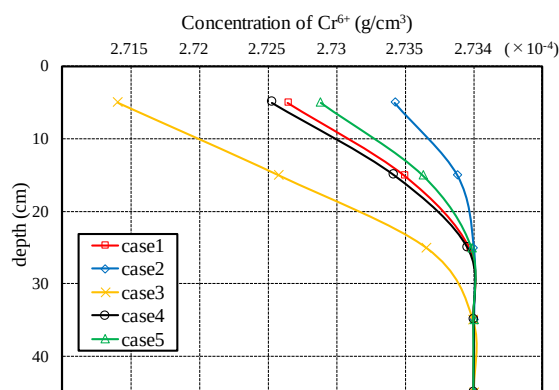


図 2 15 日後の圧力水頭分布 (case1-case3)

図 3 15 日後の Cr^{6+} 濃度分布 (case1-case3)図 4 各 case の鉛直 Cr^{6+} 濃度分布