地盤環境-植物生長予測モデルの 土壌水分特性に関する基礎的検討

古川全太郎¹・笠間清伸²・藤澤朱音³

¹正会員 九州大学助教 大学院工学研究院社会基盤部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

E-mail: z.furukawa@civil.kyushu-u.ac.jp

²正会員 九州大学准教授 大学院工学研究院社会基盤部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

E-mail: kasama@civil.kyushu-u.ac.jp

³正会員 大分県庁 (〒870-0501 大分市大手町 3 丁目 1 番 1 号)

植物根の生長を活かし、重金属汚染地盤や塩害土壌の地盤環境を改善する「ファイトレメディエーション」の効果を効率的に発揮できる地盤環境を把握するため、著者らは地盤内の水分、及び土中水に溶存する化学物質の移動及び植物の生長を解析する「地盤環境-根系生長予測モデル」を開発した。

本論文では、様々な土壌水分特性を有する二次元解析場において、単一根が存在する場合の地盤内の有効飽和度 S_e 及び化学物質濃度 C の経時的な変化を、水分移動の基礎式及び移流・分散方程式を差分的に解き、モデルの有用性を検討した。その結果、保水性が低く、飽和透水係数 k_{sat} が比較的大きい土質の方が、水分・化学物質共に減少量が大きいことが明らかになった。また、保水性が大きい土壌の方が根の吸水量と化学物質の濃度低減量が小さくなることが示された。

Key Words: *advection-dispersion, finite-difference methods, soil water characteristics curve (SWCC), growth of plant*

1. はじめに

乾燥地における砂漠化や、地盤の重金属汚染等の地盤環境問題が顕在化し、2008年時点で世界全土の約23%が「劣化した地盤」に分類されている¹⁾。このような「劣化した地盤」を修復する一手法として期待されているのが、「ファイトレメディエーション」である。ファイトレメディエーションとは、植物根の生長過程において、水分吸収と共に間隙水に含まれる、または土粒子に吸着している汚染物質を吸収し、植物体内に固定し、汚染地盤や汚染された地下水から汚染物質を除去する方法を指す。ファイトレメディエーションは、従来の客土工法、掘削除去、薬品除去、遮水等と比較して低コストであり、持続可能な地盤環境修復手法として期待されている²⁾。

しかしながら、ファイトレメディエーションの効果は植物の個体差、気象条件、有害物質の濃度、地盤の保水性及び化学物質保持特性に依存するため、効果が不安定であり、実用化には至っていないのが現状である³⁾⁴⁾。

不飽和地盤内の水溶性汚染物質の移流・分散挙動の長期的な予測手法は、我が国では西垣ら⁵⁾、野村ら⁶⁾、海外では Grove ら⁷⁾によって提案されており、汚染物質の

流出を抑制するために有効な手法が解析的に明らかにされているが、植物根の生長の影響を考慮した解析手法は、未だに確立されていない。

植物の生理的特徴を考慮した根の生長解析については、Lungrey⁸⁾に始まり、萬ら⁹⁾や Guillaume ら¹⁰⁾によって様々な根茎形成モデルが提案されているが、汚染物質の吸収に関する研究は、実験的検討を主としており¹¹⁾、解析に関する事例が少ないのが現状である。

著者らは、ファイトレメディエーションの効果を十分に発揮できる地盤環境を事前に把握し、地盤内の水分、及び土中水に溶存する化学物質の移動、及び植物の生長を解析的に予測する「地盤環境-根系生長予測モデル(以下、本モデル)」を開発し、主に根の生長速度に対する地盤内の水分・化学物質の時空間的移動に関する検討を行ってきた^{12)~15)}。

本モデルは、根による吸収項を考慮した地盤内の水分移動の基礎式と移流・分散方程式により、根が存在する地盤の水分・化学物質の移動を時空間的に予測するものである。本モデルは、汚染物質の浄化予測を可能にするほか、耐塩性植物によるナトリウム、カルシウム等の塩類を多量に含む塩害土壌の浄化効果の予測にも貢献でき

ると考えている。

本論文では、様々な土壌水分特性を有する二次元解析場において、単一根が存在する場合の、不飽和地盤内の体積含水率及び化学物質濃度の経時的な変化を定量的に算出し、本モデルの有用性を検討した結果を示す。

なお、ファイトレメディエーションは、植物や根圏周辺の微生物の汚染物質除去機構により5種に細分される²⁾が、本論文ではその一種である「ファイトエキストラクション(植物根が土壌中の汚染物質を吸収し、植物体内に蓄積すること)」を単に「ファイトレメディエーション」と呼称する。

2. 地盤環境-植物生長予測モデルの解析概要

1. に示したように、地盤環境-植物生長予測モデルの有用性を検証するために、本論文では二次元解析場における単一根が存在する場合の不飽和浸透流解析と、移流・分散解析を行い、根の水分・化学物質吸収に伴う地盤内の水分と水溶性物質の時空間的変動を分析した。

(1) 不飽和地盤の水分移動の基礎式

根の水分吸収を考慮した二次元場における不飽和地盤内の水分移動は、以下の式(1)で表される¹⁶⁾。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ k_x(\theta) \frac{\partial \psi_m(\theta)}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ k_z(\theta) \frac{\partial \psi_m(\theta)}{\partial z} \right\} + \frac{\partial k_z(\theta)}{\partial z} - Y(\theta) \quad (1)$$

ここに、 θ : 体積含水率(%), $\psi_m(\theta)$: 土のマトリックポテンシャル(cm), $k_x(\theta) = k_z(\theta)$: 不飽和透水係数(cm/s), $Y(\theta)$: 根系による単位時間・単位体積(二次元の場合は面積)あたりの水分吸収量($\text{cm}^3/\text{cm}^3 \cdot \text{s}$ または $\text{cm}^2/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)である。

また、土の水分特性を表す体積含水率 θ とマトリックポテンシャル $\psi_m(\theta)$ の関係は、式(2)の Van Genuchten (1980)¹⁷⁾を用いた。

$$S_e = \left\{ 1 + \alpha \psi_m(\theta)^n \right\}^{-m} \quad (2)$$

ここに、 S_e : 有効飽和度, α, n, m : 実測値のフィッティングにより求まる係数。なお、有効飽和度 S_e の定義は、以下の式(3)の通りである。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

ここに、 θ : 現在の体積含水率(%), θ_r : 残留体積含水率(%), θ_s : 飽和体積含水率(%)。

不飽和状態の透水係数は、有効飽和度に依存する。こ

れを Van Genuchten (1980)¹⁷⁾により、次に示す式(4)で計算した。

$$k_x(\theta) = k_z(\theta) = k_{sat} \left\{ 1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right) \right\}^2 \quad (4)$$

ここに、 k_{sat} : 土の飽和透水係数(cm/s)。

式(1)の根による水分吸収項 $Y(\theta)$ は、式(5)に従う¹⁶⁾。

$$Y(\theta) = \frac{\psi_{r1} - \psi_m(\theta)}{r_{ab}(\theta_s / \theta) / L_{v2} + R} \quad (5)$$

ここに、 $\psi_m(\theta)$: 根の近傍の水ポテンシャル(cm), ψ_{r1} : 根の中の水ポテンシャル(cm), r_{ab} : 吸水根の単位長さ当たりの透過抵抗(day/cm), L_{v2} : 根長密度(cm/cm^3 または cm/cm^2), R : 吸水根が土壌から受ける通導抵抗(day/cm²)。なお、後に詳説するが、根長密度 L_{v2} は、土の単位体積(奥行を考慮しない場合は単位面積)あたりに存在している根の長さである。

式(5)は、根による水分吸収量は、根が有するマトリックポテンシャル $\psi_m(\theta)$ と、根に接している土が有するマトリックポテンシャル ψ_{r1} の大小と、土壌に対する根の存在量 L_{v2} 、根と土壌の水分の透過抵抗 r_{ab} によって主に決まることを表している。

(2) 不飽和地盤の移流・分散方程式

地盤内の化学物質濃度を求めるための、根の溶質吸収を考慮した二次元場における不飽和地盤の移流・分散は、以下の式(6)で表される¹⁶⁾。

$$\frac{\partial C_i(\theta)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x(\theta) C_i(\theta) \frac{\partial \psi_m(\theta)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z(\theta) C_i(\theta) \frac{\partial \psi_m(\theta)}{\partial z} \right) + \frac{\partial k_z(\theta) C_i(\theta)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(\theta) \frac{\partial C_i(\theta)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D(\theta) \frac{\partial C_i(\theta)}{\partial z} \right) - \frac{Y_q(\theta)}{\theta} \quad (6)$$

ここに、 $C(\theta)$: 化学物質濃度(g/cm^3), $D(\theta)$: 分散係数(cm^2/s), $Y_q(\theta)$: 根の溶質吸収量(g/cm^3)。

不飽和状態の分散係数も、Van Genuchten の提案式により、以下の式(7)のように計算した¹⁶⁾。

$$D(\theta) = \frac{k_{sat} S_e^{0.5} \left\{ 1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right) \right\}^2}{\alpha(n-1)(\theta_s - \theta_r) S_e^{\frac{1}{m}} \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)} \quad (7)$$

根の溶質吸収量 $Y_q(\theta)$ は、間隙水中の化学物質濃度 $C(\theta)$ と、根の半径、根の溶質吸収速度、及び根長密度によって表される。しかし、化学物質濃度がある閾値を超えると、物質吸収速度はある一定の値に収束することが知られている¹⁸⁾。本解析では、根の化学物質吸収効果を

十分に発揮させる環境を想定した。従って、根が吸収するのに十分な溶質濃度が与えられていない(根の物質吸収速度が最大吸収速度を下回る)状況を想定し、 $Y_p(\theta)$ を式(8)を用いて求めた¹⁶⁾。

$$Y_p(\theta) = 2\pi K_p C(\theta) L_{v2} \quad (8)$$

ここに、 r : 根の半径(cm), K_p : 根の吸収速度(cm/s).
次に、式(1)と、式(6)で表される二次元場における移流・分散方程式を連立させ、差分法し、陽解法により解き、任意の時間・格子における体積含水率 θ と、化学物質濃度 $C(\theta)$ を求めた。

3. 差分法の導出方法

2.の章末で記したように、根が存在する場合の不飽和地盤内の体積含水率 θ と化学物質濃度 $C(\theta)$ を差分法により求め、 Δt 後の θ と $C(\theta)$ の空間分布の変化を予測した。

本解析では、陽解法¹⁷⁾により差分法を導出した。幅を m 分割、深さを n 分割した解析場の体積含水率 θ の陽解法による差分法は、式(9)の通りである。

$$\begin{aligned} \theta_{(i,j)}^{(t+\Delta t)} = & \Delta t \times \left\{ \frac{k_x \psi_m(\theta_{(i+1,j)}^{(t)}) - 2k_x \psi_m(\theta_{(i,j)}^{(t)}) + k_x \psi_m(\theta_{(i-1,j)}^{(t)})}{\Delta x^2} \right\} \\ & + \Delta t \times \left\{ \frac{k_z \psi_m(\theta_{(i,j+1)}^{(t)}) - 2k_z \psi_m(\theta_{(i,j)}^{(t)}) + k_z \psi_m(\theta_{(i,j-1)}^{(t)})}{\Delta z^2} \right\} \\ & + \Delta t \times \left\{ \frac{k_z(\theta_{(i,j+1)}^{(t)}) - k_z(\theta_{(i,j)}^{(t)}) - Y_{(i,j)}^{(t)} \Delta t}{\Delta z} \right\} + \theta_{(i,j)}^{(t)} \end{aligned} \quad (9)$$

ここに、 Δt : 任意の時間間隔, $\Delta x, \Delta z$: 任意の解析格子の幅または高さ, θ の上付きの添え字(t)は任意の時間, 下付きの添え字(i, j)は求めたい θ の位置($i=1, 2, 3, \dots, m, j=1, 2, 3, \dots, n$)を表している。なお、 k_x, k_z, ψ_m はそれぞれ θ の関数であるが、式(9)においてはその積を取る場合、まとめて一つの θ の関数で表している。

式(9)により体積含水率 θ の時空間的变化により算出された θ を用いて、 $C(\theta)$ の差分法を式(10)により計算した。

$$\begin{aligned} C(\theta_{(i,j)}^{(t+\Delta t)}) = & \Delta t \times \left\{ \frac{DC(\theta_{(i+1,j)}^{(t)}) - 2DC(\theta_{(i,j)}^{(t)}) + DC(\theta_{(i-1,j)}^{(t)})}{\Delta x^2} \right\} \\ & - \Delta t \times \left\{ \frac{k_x \psi_m C(\theta_{(i+1,j)}^{(t)}) - 2k_x \psi_m C(\theta_{(i,j)}^{(t)}) + k_x \psi_m C(\theta_{(i-1,j)}^{(t)})}{\Delta x^2} \right\} \\ & + \Delta t \times \left\{ \frac{DC(\theta_{(i,j+1)}^{(t)}) - 2DC(\theta_{(i,j)}^{(t)}) + DC(\theta_{(i,j-1)}^{(t)})}{\Delta z^2} \right\} \\ & - \Delta t \times \left\{ \frac{k_z \psi_m C(\theta_{(i,j+1)}^{(t)}) - 2k_z \psi_m C(\theta_{(i,j)}^{(t)}) + k_z \psi_m C(\theta_{(i,j-1)}^{(t)})}{\Delta z^2} \right\} \\ & + \Delta t \times \left\{ \frac{k_z C(\theta_{(i,j+1)}^{(t)}) - k_z C(\theta_{(i,j)}^{(t)})}{\Delta z} \right\} - \frac{\Delta t}{\Delta z} \frac{2\pi r \Delta L_{v2}^{(t)}(\theta_{(i,j)})}{(\theta_{(i,j+1)}^{(t)} - \theta_{(i,j)}^{(t)})} + C(\theta_{(i,j)}^{(t)}) \end{aligned} \quad (10)$$

ここに、 $\Delta L_{v2}^{(t)}(\theta_{(i,j)})$: 場所(i, j)における根長密度の Δt ご

との経時変化(根の生長を表す。4.(3)で詳説する。).

なお、他の式(10)で用いられている記号の使用法は、式(9)と同様である。 k_x, k_z, D, C, ψ_m はそれぞれ θ の関数であるが、式(9)においてはその積を取る場合、まとめて一つの θ の関数で表している。

式(9)及び(10)を用いて、各解析格子の体積含水率及び化学物質濃度を計算した。4.より、土壌と根の解析条件を示す。

4. 解析条件

(1) 解析場の境界条件

図-1に解析場の概念図を示す。解析場は、幅 50 cm, 深さ 100 cmの均質な水分特性を有する土壌を想定した。解析格子は $\Delta x = \Delta z = 10$ cmと設定し、10 cm×10 cmの区間は θ と $C(\theta)$ は均一であるとした。また、解析場より外の地盤は想定せず、解析場外の θ および $C(\theta)$ の値は全て0に固定した。なお、解析場において根の伸長や水分移動による応力・変位は発生しないことを仮定した。

(2) 土壌条件

1.で示したように、解析に必要な土壌条件は、不飽和土の水分特性(θ - $\psi_m(\theta)$ 関係)、飽和透水係数 k_{sat} 、初期の有効飽和度分布 $S_{e0}(z)$ 、及び化学物質分布 $C_0(z)$ である。

不飽和地盤の水分特性は、遠心法による保水性試験¹⁷⁾により求めた。図-2のプロットが実測値である。保水性試験及び解析は、異なる水分特性を有する2種の土質材料を対象とした。Decomposed Granite Soilは、九州地方をはじめ、主に西日本に広く分布するマサ土であり、主に砂質土で構成されている。Cultivated Field Soilは、九州のある畑地から採取した土壌であり、Decomposed Granite Soilに比べ粘土分含有量が高く、保水性も高い土壌である。保水性を表す指標として、有効水分量(Available Moisture, AM)があるが²⁰⁾、これは水分特性曲線の、マトリックポテンシャル軸に対する面積の値であり、有効水分量AMが高い程保水性が高い。有効水分量は、以下の式(11)で表される。

$$AM = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \{V_w(i) + V_w(i+1)\} \times \{pF(i+1) - pF(i)\} \quad (11)$$

ここに、AM: 有効水分量(%), i : 測定点の番号, $pF(i)$: i 番目のpF値($pF(1)=1.8, pF(n)=4.2$), ($pF = \log_{10} H$), H : マトリックポテンシャル(cm), $V_w(i)$: i 番目の体積含水率(%).

これら二種の土質を、現場乾燥密度と同等の乾燥密度において保水性試験を行った。得られた実測値を図-2のプロットに示す。なお、保水性試験は、一般的な植物が生育できる限界のマトリックポテンシャルとされている。

表-1 解析に用いた土質の水分特性パラメーター

土質の種類	飽和 透水係数	有効 水分量	Van Genuchten (1980)				初期相対 飽和度分布
	k_{sat}	AM	θ_s	θ_r	α	n	$S_{e0}(z) = 0.0031z + 0.0687$
	cm/day	%	-	-	-	-	初期化学物質 濃度分布 (mg/l)
Decomposed granite soil	91.584	95.364	45.515	12.74	9.9998	1.2955	$C_0(z) = 0.5z + 5$
Cultivated field soil	22.810	122.139	60.185	22.82	9.9996	1.4906	

図-1 二次元解析場の概念図

図-2 2種の土質の水分特性曲線

る永久萎れ点 ($pF = 4.2 = 1617 \text{ kPa}$)²⁰⁾ 付近までデータを得た。保水性試験により得られたデータを、Van Genuchten (1980)¹⁵⁾ によりフィッティング²¹⁾して得られたパラメーターを解析に使用した。図-2の実線及び点線がフィッティング曲線である。なお、フィッティング曲線から飽和体積含水率 θ_s と、残留体積含水率 θ_r を求めた。

土壌の飽和透水係数 k_{sat} は、上記と同様の土に対して、定水位透水試験 (JIS A 1218)²¹⁾により求めた。解析に使用した、フィッティングにより得られたパラメータを表-1に示す。

表-2 根の生長条件

Parameter	Unit	Value
$z = 0$ の地上部半径	r_0	cm
根の末端の半径	r_e	cm
根の吸収速度	K_p	cm/day
根長密度	L_{v2}	cm/cm ²
根の初期長さ	L_0	cm
根の成長速度	V_R	cm/day
根の水ポテンシャル	Ψ_{r1}	cm
透過抵抗	r_{ab}	day/cm
通導抵抗	R	day/cm ²

(a) 初期有効飽和度と化学物質濃度 (b) 根の半径と根長密度

図-3 初期地盤環境の深さ別分布と根の初期分布

初期の体積含水率 θ の分布に関しては、地下水が解析場よりも深くに存在していることを仮定して、解析領域を全て不飽和状態とし、深くなるにつれて体積含水率 θ が線形的に大きくなると仮定した。また、異なる二種の土質で水分の変動を評価する場合、乾燥密度によって変動する体積含水率 θ ではなく、有効飽和度 S_e で評価しなければならない。従って、式 (3)の有効飽和度 S_e の分布

を、2種の土質で同じにした。

初期の化学物質濃度 $C(z)$ に関しては、既往の土壌中の重金属濃度分布の調査結果²⁰⁾を参考に、深くなるにつれて線形的に濃度が傾き 0.5 (mg/l) / m で高くなる状況を想定した。初期有効飽和度と化学物質濃度の分布は、表-1または図-3 (a) の分布の通りである。なお、それぞれの初期値は、水平方向には変化がないものとした。

(3) 植生条件

植物根は解析場の上部中央 ($x=20\sim30 \text{ cm}, z=0 \text{ cm}$) から伸長し、伸長しているエリアからは水分・溶質の吸収がある、すなわち、式 (9) と式 (10) の右辺第 6 項である Y_p/θ の差分で根の吸収項を考慮するものとした。

表-2に、一般的な植生実験から得られた結果を基に設定した、解析に用いた植物生育に関するパラメータを示す。

式 (5) の根の水分吸収量を計算する際に用いる根の吸収速度 K_p 、透過抵抗 r_{ab} 、通導抵抗 R 、根の水ポテンシャル Ψ_r は、植物の種類や状態によって決まる数値である。

根の吸収速度 K_p は、水溶性の物質であれば 10^3 cm/day のオーダーを取ることが経験的に知られているため¹⁴⁾、 10^3 cm/day を採用した。透過抵抗 r_{ab} と通導抵抗 R は、それぞれ $10^8\sim10^{13} \text{ cm/day}$ 、 $10^8\sim10^{13} \text{ cm/day}$ のオーダーを取ることが知られているため¹⁶⁾²⁴⁾、 10^{13} のオーダーを採用した。

根の生長は、根の半径 r と、根長 L_p の時間に伴う増大により定義した。式 (8) の根長密度 L_2 は、地盤が深くなるにつれて指数関数的に減少していくことが知られている²⁵⁾。従って、根長密度 L_2 は指数関数モデルを用いた。

根の半径と根長密度の初期深さ別分布を図-3 (b) に示す。根の半径 r は、地上部半径と末端半径の値を固定し、根の伸長に伴って地上部と末端の間の半径が変化するようなモデルとした。根の成長速度は、一般的な植物根 (主根) の生長速度²⁶⁾や Lungrey の解析例⁹⁾を参考にして、 1.0 cm/day とした。なお、根の成長速度や根長密度をパラメトリックに変化させた場合の、土壌水分・化学物質に対する影響に関する検討は、参考文献^{12)~15)}を参照されたい。

5. 土壌水分特性と根の溶質吸収量

本解析は、水分特性の違いを比較するのに十分な解析期間である、 $t=0 \text{ day}$ から 4 day まで、 $\Delta t=1 \text{ day}$ とした場合の結果を示す。計算間隔 Δt に関しては、既往の研究¹⁹⁾において、理論解と $\pm 10\%$ 以内の精度を確保できることが確認されたため、 $\Delta t=1 \text{ day}$ を設定した。

図-4、図-5に根の存在域周辺 ($x=10\sim40 \text{ cm}, z=0\sim40 \text{ cm}$) での有効飽和度 S_e の経時変化を示す。図-4が Decomposed

granite soil で、図-5が Cultivation field soil である。図の各格子内には、0日目、1日目、2日目、4日目の有効飽和度の数値を記している。数値は、格子の中央の位置の値を示している。図-4、図-5より、4日後には根が存在する格子の有効飽和度 S_e が4日後には減少し、根の吸水による水分減少を確認することができた。なお、経過時間によっては微小な増加を示す格子もあるが、この増加は前述した精度に起因するものだと考えられる。また、根から少し離れた $x=10\sim20 \text{ cm}, x=30\sim40 \text{ cm}, z=30\sim40 \text{ cm}$ の格子は、根の吸水による影響と比較して、重力水の流下の影響が大きく、有効飽和度 S_e が増加することが明らかとなった。

また、図-4と図-5を比較すると、保水性の高い Cultivation field soil の方が有効飽和度の減少量が小さいことが改めて確認できる。これに付随して、根が存在する領域の有効飽和度 S_e の減少量も小さくなっていることがわかる。式 (5) にもあるように、根の水分吸収量はマトリックポテンシャル $\Psi_m(\theta)$ の大小により決まる。保水性の高い土と低い土において、同程度の有効飽和度 S_e でマトリックポテンシャル $\Psi_m(\theta)$ の値を比較すると、保水性が高い土質の方がマトリックポテンシャル $\Psi_m(\theta)$ が高いため、式 (5) によると根の水分吸収速度が低下する。従って、図-5からもわかる通り、Cultivated field soil は、根が存在する格子でも有効飽和度の減少量が少ない結果となった。

図-6、図-7には間隙水中の任意の化学物質濃度 C の経時変化を示す。図-6が Decomposed granite soil で、図-7が Cultivation field soil である。図-6より、一般的な植物の生長パラメータを基にした条件では、Decomposed granite soil のような保水性が比較的低い土壌の場合、根が存在する格子において2日後には化学物質は消失し、1日につき 1 cm 伸長している格子 ($x=10\sim40 \text{ cm}, z=0\sim40 \text{ cm}$) における濃度 C の減少も見受けられた。また、図-6と図-7を比較すると、Cultivation field soil よりも Decomposed granite soil の方が濃度 C の減少量が大きいがわかる。これも、前述した通り、土壌の有効水分量 AM が大きいと根の水分吸収量は小さくなり、その結果溶質吸収量も小さくなったと考えられる。

なお、根が存在する格子より外の格子に関して、有効飽和度 S_e も溶質濃度 C もほとんど変化がないことから、 $t=4 \text{ day}$ では、単一根のファイトレメディエーションの効果が発揮されるのは根の周り半径 10 cm 以内であることが推察される。

次に、土壌の水分特性による溶質の吸収量の違いを明らかにするために、表-1に示す2種の土質において、 $t=4 \text{ day}$ における根近傍の格子の、水分量と化学物質量の減少率を求めた。図-8にそれぞれの土質の水分減少率と

図-4 有効飽和度 S_e の経時変化 (Decomposed granite soil)

図-5 有効飽和度 S_e の経時変化 (Cultivation field soil)

図-6 化学物質濃度 C の経時変化 (Decomposed granite soil)

図-7 化学物質濃度 C の経時変化 (Cultivation field soil)

化学物質減少率を示している。また、水分減少率に関しては、根の吸収量による減少率と浸透による水分の減少率を分割して示している。図-8からもわかる通り、飽和透水係数 k_{sat} が比較的大きい Decomposed granite soil の方が、水分・化学物質共に減少量が大きいことがわかる。加えて、水分減少に寄与している根の吸水量に関しては、Decomposed granite soil では減少率約 25%のうち 11%, Cultivation field soil に関しては 0.22%のうち 0.0013%であった。従って、保水性の大きい土壌の方が根の吸水量が小さくなることが明らかになった。これは、式 (5) からわかる通り、保水性を表す有効水分量 AM の高い土壌では透水も遅く、同じ有効飽和度においても $\Psi_m(\theta)$ が大きくなるため、根の水分吸収 $Y(\theta)$ も小さくなることが示唆された。すなわち、根の水分・化学物質吸収率を高めるには透水性を高めることが必要であるが、透水性のよい地盤の場合、汚染物質の移流・分散速度が根の吸水速度よりも高くなることが懸念される。従って、土の保水性・透水性に応じた植物の選定することが、ファイトレメディエーションの効果を担保するために重要であることが示唆された。

6. 結論

本論文では、ファイトレメディエーションの効果を十分に、効率的に発揮できる地盤環境を把握するために開発した「地盤環境-根系生長予測モデル」の性能を検証するため、様々な土壌水分特性を有する二次元解析場において、単一根が存在する場合の地盤内の有効飽和度及び化学物質濃度の経時的な変化を、水分移動の基礎式及び移流・分散方程式を差分的に解き、水分特性の違いが根の吸水及び溶質吸収に及ぼす影響について考察した。

その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 水分減少に寄与している根の吸水量に関しては、経過時間 $t=4$ day において、Decomposed granite soil では水分減少率約 25%のうち 11%, Cultivation field soil に関しては 0.22%のうち 0.0013%であり、保水性の低い土壌の方が根の水分吸収速度が高まることが示唆された。
- 2) 保水性を表す有効水分量 AM の高い土壌の方が根の水分・溶質吸水量が小さくなることが明らかになった。保水性の高い土壌では、同じ有効飽和度に関して $\Psi_m(\theta)$ が大きくなるため、根の水分吸収 $Y(\theta)$ も小さくなったことによると考えられる。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費 JP16K18151 “汚染物質動態と植物根の生長を考慮した環境配慮型地盤浄化シミュレーターの開発”の助成を受けたものです。ここに感謝の意を表します。

図-8 各土質の根近傍における4日後の水分減少率及び化学物質減少率(根の生長を考慮)

参考文献

- 1) Bai ZG, Dent DL, Olsson L and Schaepman ME 2008: Global assessment of land degradation and improvement 1: identification by remote sensing, Report 2008/01, ISRIC – World Soil Information, Wageningen, pp.2, 36-37, 2008.
- 2) 吉田光毅, 秋吉美穂, 藤原靖: ファイトレメディエーションの現状と課題, 大成建設技術センター報, pp. 06-1 - 06-4, 2005.
- 3) 早川孝彦, 栗原宏幸: 重金属汚染に対するファイトレメディエーション技術の実用化に向けて, Journal of Environmental Biotechnology, Vol.2, No.2, pp. 103-115, 2002.
- 4) 王効挙, 李法雲, 岡崎正規, 杉崎三男: ファイトレメディエーションによる汚染土壌修復, 埼玉県環境科学国際センター報 第3号, pp. 114-123, 2003.
- 5) 西垣誠, 菱谷智幸, 橋本学, 河野伊一郎: 飽和・不飽和領域における物質移動を伴う密度依存地下水流の数値解析手法に関する研究, 土木学会論文集 No.511, III-30, pp. 135-144, 1995.
- 6) 野村瞬, 河井克之, 角井駿祐, 橋伸也, 金澤伸一, 飯塚敦: 飽和/不飽和地盤内における水溶性物質移動モデルの構築, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 67, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 14), I_231-I_240, 2011.
- 7) Grove D.B., Stollenwerk K.G.: Modeling of Rate-Controlled Sorption of Hexavalent Chromium, Water Resources Research, Vol. 21, No.11, pp. 1703-1709, 1985.
- 8) Lungley, D.R.: The growth of root systems – A numerical computer simulation model, Plant Soil (38) 145-159, 1973.
- 9) 萬和明, 藤園順哉, 立川康人, 椎葉充晴: 地表面水文過程に基づいた作物生長モデルの構築, 京都大学防災研究所年報, No.53B, pp. 507-513, 2010.
- 10) Guillaume, L., Loic, P., Xavier, D.: A modeling approach to determine the importance of dynamic regulation of plant hydraulic conductivities on the water uptake dynamics in the soil-plant-atmosphere system, Ecological Modelling, No. 290, pp. 65-75, 2014.
- 11) 土路生修三, 横塚享, 村上純也, 佐々木静郎, 門倉

- 伸行, 涌井史郎, 菅野裕一, 森永茂生, 飯島健太郎: 模擬汚染土壌を用いた植物体への重金属吸収と生育反応に関する実験, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集, pp. 395-396, 2011.
- 12) 古川全太郎, 笠間清伸, 藤澤朱音, 八尋裕一: 地盤環境-植物生長モデルにおける根系の生長に関する基礎的検討 その (1) 根の半径について, 土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集, pp. 47-48, 2016.
- 13) 藤澤朱音, 古川全太郎, 笠間清伸, 八尋裕一: 地盤環境-植物生長モデルにおける根系の生長に関する基礎的検討 その (2) 根長密度について, 土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集, pp. 49-50, 2016.
- 14) Fujisawa, A., Zentaro, F., Kasama, K.: A Numerical Study for Root Growth Considering Advection-Diffusion-Absorption of Solution in the Ground, Proc. of the 8th Asian Joint Symposium on Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (JS-TAINAN2016), pp. 29 - 32, 2016.
- 15) 直塚彦太郎, 古川全太郎, 笠間清伸: 植物根の生長速度を考慮した地盤内化学物質移動モデルの開発, 土木学会西部支部平成 26 年度講演概要集, 453 - 454, 2015.
- 16) 中野政詩: 土の物質移動学, 東京大学出版会, pp. 17, 77- 79, 124-126, 2002.
- 17) Van Genuchten, M.Th. : A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Sci.Soc. Am.J., 44,892-898, 1980.
- 18) 神野健二, 靱井和朗, 藤野和徳, 中川啓, 細川土佐男, 江種伸之, 広城吉成: 地下水中の物質輸送解析, pp. 51 - 57, 九州大学出版会, 2001.
- 19) (公社) 地盤工学会: 不飽和地盤の挙動と評価, (株) 丸善, pp. 58, 2005.
- 20) 久馬一剛, 庄子貞雄, 飯塚昭三, 服部勉, 和田光史, 加藤芳朗, 和田秀徳, 大羽裕, 岡島秀夫, 高井康雄: 新土壌学, pp. 73-76, 113-114, 朝倉書店, 1984.
- 21) Seki, K.: SWRC fit - a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure, Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 4, 407-437, 2007.
- 22) 山守 英朋, 朝日 教智, 堀部俊男: 土質標本を利用した名古屋市内土壌中の重金属等調査結果, 名古屋市環境科学調査センター年報第 3 号, 53-59, 2014.
- 23) (公社) 地盤工学会: 土質試験 基本と手引き, 丸善, pp. 91- 102, 2015.
- 24) 石田朋靖: 根群域における水の行動, SPCPG Apr. pp. 2-13, 1982.
- 25) 福嶋 陽: 植物の根に関する諸問題 (12) -根系の発育モデル-, 農業および園芸 Vol. 69, No.7, pp. 829-833, 1994.
- 26) Eavis, B.W. : Soil physical conditions affecting seedling root growth. I. Mechanical impedance, aeration and moisture availability as influenced by bulk density and moisture levels in a sandy loam soil, Plant and Soil, Vol. 36, pp. 613-622, 1972.

(2017.6.23 受付)

A FUNDAMENTAL ANALYSIS ON ADVECTION-DISPERSION MODEL CONSIDERING GROWTH OF PLANT UNDER SEVERAL SWCC CONDITIONS

Zentaro FURUKAWA, Kiyonobu KASAMA and Akane FUJISAWA

We developed “Geo-environment and root growth prediction model” to forecast time-space changing of soil water and chemical environment under existence of plant root in ground. The developed model will be contributed to optimize geo-environment for phytoremediation. Phytoremediation is purification of ground contaminated by toxic heavy metals using absorption of plants. However, it depends on water holding capacity of soil, holding capacity of chemical substance of soil, growth of plant and climate conditions. This model can clarify relationships between transfer of soil water and water soluble substance in unsaturated-ground and absorption of them by root uptake. This two-dimensional analysis consisted of equation of water movement and advection-diffusion equation considering absorption of soil water and water soluble substance by root with finite-difference method. This paper shows effectiveness of the developed model by calculating several SWCC conditions of soils. In addition, contribution degrees of remediation by single root uptake was clarified. The conclusions are as follows; 1) Absorption of water and water soluble substance were depended on matrix potential of soils. The higher water retention capacity the soil had, the lower root uptake occurred under same effective saturation degree. 2) In case available moisture of soil was lower, contribution of root uptake was higher.