

植物の根による吸水を考慮した土壌水分現地日観測値の数値解析

Numerical Analysis of Daily Observed Field Soil Moisture Considering Water Uptake by Plant Roots

初井和朗*・神野健二**・安田裕***・Ronny Berndtsson****

By kazuro MOMII, Kenji JINNO, Hiroshi YASUDA and Ronny Berndtsson

Daily observed field soil moisture is analyzed by use of a finite difference model of Richard's equation including water uptake by plant roots. The hydraulic parameters, which specify the hydraulic properties of unsaturated soil, are optimally estimated through sensitivity analysis. The numerical results show that the effect of the root water uptake on the soil moisture movement is significant in the drying process.

Key words : soil moisture, field data, plant root uptake

1. はじめに

不飽和土壌中の水分移動に関しては、理論的アプローチから室内実験による検討に至るまで種々行われ、多くの成果が得られている。しかしながら、現地データの解析、特に、植生がある場合で、日単位で変化する地表付近における土壌水分の現地観測結果に基づいた解析は余り行われていないようである。本研究では、約2カ月間にわたり中性子水分計により日単位で観測された深さ10cm毎の土壌水分の観測値^{1)・2)・3)}に対して、植物の根による土壌水分の吸水を考慮した解析を行い、無降雨期間における土壌水分の減少過程に対する植物の根による吸水項の効果についての検討を行う。

2. 現地観測および観測結果の概要^{1)・2)・3)}

ここでの解析は、スウェーデンルンド市郊外において測定期間1976年4月23日から6月17日にかけて、ルンド大学水資源工学科が行った現地観測値^{1)・2)・3)}に基づいている。対象とした土壌は、主に砂質ロームとモレーン粘土(Moraine clay)で構成され、深度65cmにおける空隙率は45%、深度165cmにおいては32%である。土壌表面は植生により覆われている。土壌水分の観測は、図-1の上部に示す4つの観測地点No.1, 2, 3, 4において、測定期間中毎日、中性子水分計により行われ、深さ方向のサンプリング間隔は深度100cmまで10

* 正会員 農博 鳥取大学助教授 乾燥地研究センター
(〒680鳥取市浜坂1390)

*** 農修 ルンド工科大学研究員 水資源工学科
(Box 118 S-22100 Lund, Sweden)

** 正会員 工博 九州大学教授 工学部水工土木学科
(〒812福岡市東区箱崎6-10-1)

**** 工博 ルンド工科大学助教授 水資源工学科
(Box 118 S-22100 Lund, Sweden)

cm、深度100cmから240cmまでは20cmである。また風速、降雨、日射量等の気象観測データに基づいて、ペンマン法により蒸発散能が得られている。

図-1には、4つの観測地点で得られた土壌水分データを補間して作成した5月25日と5月31日の土壌水分の断面分布を示している。図-2には、深度10cmおよび20cmにおける土壌水分の経日変化、および降雨と蒸発散能を示している。5月25日の15.9mm/dayの降雨に伴い、各観測地点において土壌水分の上昇（浸透過程）が生じ、次いで6月3日から6月9日までの無降雨期間においては、蒸発散により土壌水分の減少（乾燥過程）が生じている。また、図-1に示すように、土壌水分の変化は、主に表層40cmまでで顕著であり、深度1m以下ではほぼ安定した土壌水分分布を保っている。ここでは表層における土壌水分の変化を対象に、浸透および乾燥過程について1次元不飽和浸透流解析による検討を加える。

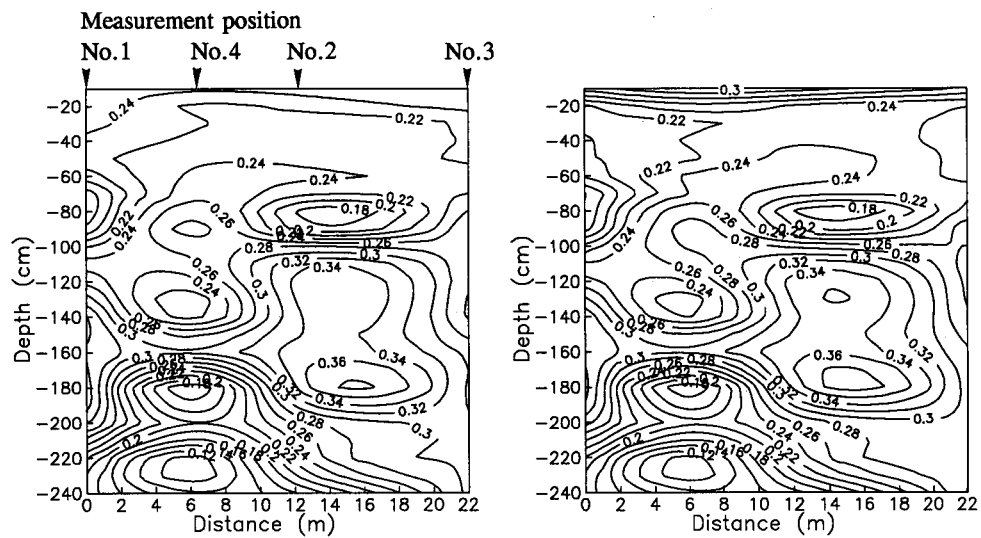


図-1 現地観測値に基づく断面2次元土壌水分分布（左図：5月25日降雨前、右図：5月31日降雨後）

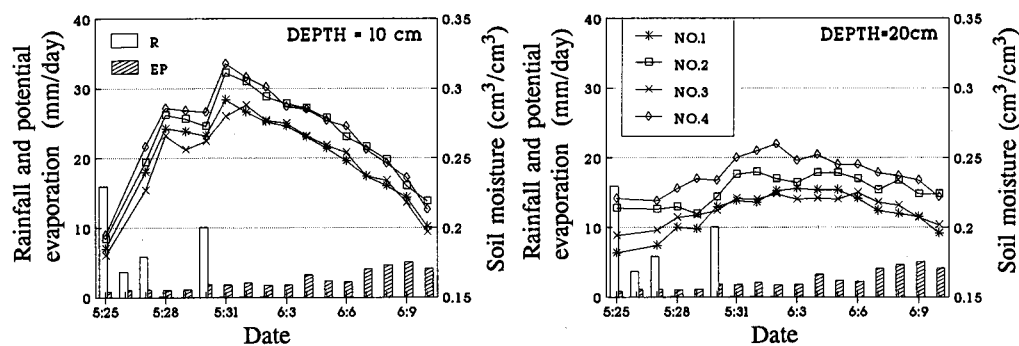


図-2 土壌水分の経日変化（R:降雨量、EP:蒸発散能）

3. 数値解析

3.1 基礎式

植物の根による吸水項をSink項として考慮している1次元不飽和流の基礎式は、次式で与えられる⁴⁾。

$$\partial \theta / \partial t = C \partial h / \partial t = \partial [k(\partial h / \partial y - 1)] / \partial y - S(h) \tag{1}$$

ここに、 θ ：体積含水率、 C ：比水分容量($d\theta/dh$)、 t ：時間、 h ：マトリックスサクション、 k ：不飽和透水係数、 y ：地表面から下向きを正とする位置座標、 $S(h)$ ：根による吸水項である。式(1)の数値解を求めるには、不飽和土壌の水理学的特性（ θ - h 関係、 k - h 関係）および吸水項 $S(h)$ を予め与える必要がある。吸水項につい

ては次節3.2で述べることにして、不飽和土壌の水理学特性を表す関係式には、van Genuchten⁶⁾により提示された次式を用いる。

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (a|h|)^n]^m \quad (2)$$

$$k(h) = k_s \{1 - (a|h|)^{n-1} [1 + (a|h|)^n]^m\}^2 / [1 + (a|h|)^n]^{m/2} \quad (3)$$

ここに、 θ_s :飽和体積含水率、 θ_r :残留体積含水率、 k_s :飽和透水係数、 a, n :対象とする土壌で異なるパラメーター、および $m=1-1/n$ である。

3.2 根による吸水項

式(1)の根による吸水項 $S(h)$ には、従来種々のモデルが提案され、室内実験や現地実験の結果に適用されている。Herkelrathら(1977)によるRoot Contact Model⁸⁾は、根と土壌との間のポテンシャル勾配と体積含水率の積に比例した吸水項であり、土壌物理学的に妥当なモデルであり、浸透ポテンシャルを考慮する場合に有効となろう。しかしながら、現地への適用に際しては、モデルに含まれる定数(たとえば単位体積土壌当たりの根の長さの分布関数、根の透過率)が既知であることが必要である。本現地観測では植物の根に関する情報が不足しており、本解析にRoot Contact Modelを適用することは困難のようである。

ここでは、モデル中に含まれる未定定数に対し汎用性のある規準値が示されているFeddesら(1978)⁷⁾によるSink項を、乾燥過程における土壌水分の移動の解析に適用する。FeddesらのSink項は次式で与えられる。

$$S(h) = \alpha(h) S_{max} \quad (4)$$

ここに、 $\alpha(h)$:土壌中のマトリックサクションに対応する吸い込み関数($0 < \alpha < 1$)、および S_{max} :根への最大吸水能である。Sink項では、厳密には、深度方向の根の空間分布を考慮することが必要であるが、ここでは、簡便さのため(対象とした現地における根に関する資料不足のため)、根の分布は一様分布と仮定して解析を行う。式(4)の吸い込み関数 $\alpha(h)$ は、次のように与えられている⁷⁾。

$$\begin{aligned} \alpha(h) &= h/h_1 & 0 > h > h_1 \\ \alpha(h) &= 1 & h_1 > h > h_2 \\ \alpha(h) &= (h_3 - h)/(h_3 - h_2) & h_2 > h > h_3 \\ \alpha(h) &= 0 & h_3 > h \end{aligned} \quad (5)$$

上式の定数 h_1, h_2, h_3 の値には、Feddesら(1978)によれば、-30cm~-50cmおよび-20000cmの値が与えられ、 h_2 の値は-500cmから-1000cmの範囲とされている。また、Markar and Mein(1987)⁴⁾は、この定数に対する数値を用いて、蒸散に伴う土壌水分の変化に対する室内実験結果を十分に説明できる数値解析結果を得ている。

いま、根の上部を L_{r1} 、根の下端の深さを L_{r2} とすると、ある時間における蒸散量 T は、次式で与えられる。

$$T = \int_{L_{r1}}^{L_{r2}} S(h) dz \quad (6)$$

次に、式(4)における S_{max} の値には、蒸散量 T が蒸散能 T_p に等しいとき $\alpha(h)$ が1に等しい⁴⁾ことより、式(6)の積分を行うと、 S_{max} は次式で与えられる。

$$S_{max} = T_p / (L_{r2} - L_{r1}) \quad (7)$$

3.3 差分法による数値計算

不飽和流の基礎式(1)を、ここでは次に示す陰形式の差分スキームにより数値計算する⁹⁾。

$$\begin{aligned} C_j^n (h_j^{n+1} - h_j^n) / \Delta t &= \{k_{j+1/2}^n [(h_{j+1}^{n+1} - h_j^{n+1}) / \Delta y - 1] \\ &\quad - k_{j-1/2}^n [(h_j^{n+1} - h_{j-1}^{n+1}) / \Delta y - 1] / \Delta y - S_j^n \end{aligned} \quad (8)$$

ここに、 j :格子点、 Δy :差分格子間隔、 n :時間ステップ、 Δt :差分時間間隔である。ここで、上部境界である地表面において、浸透過程の場合、降雨量を浸透フラックスとして与え、乾燥過程の場合、蒸発能の10%を蒸発フラックス、90%を根による吸い込みである蒸散量 T として割り当てている⁹⁾。蒸発散の配分にはさらに詳細なモデルが提案されている⁹⁾が、葉面積指数等の植生に関する観測資料が不足していることから、前述のようなきわめて簡便な割り当てを行った。下部境界では、 $y=40$ cm付近における土壌水分は、各観測地点に

おいてほぼ一定であることから、 $y=40\text{cm}$ において水分固定境界とした。本数値計算法の妥当性はProtopapas and Bras (1986)¹⁰⁾に示されているWarrick ら(1971)の実測値との比較検討により予め確認している⁸⁾。

3.4 不飽和土壌のパラメータの推定

式(8)の数値計算を行うには、式(2)、(3)に含まれる定数 θ_s 、 θ_r 、 k_s 、 a 、 n を予め与える必要がある。ここで対象とする上層の土壌では、実測の空隙率が0.45より $\theta_s=0.45$ 、および θ_r に関しては0.1と仮定して、残りの3つの未定定数 k_s 、 a 、 n を推定する。推定は、3つの未定定数の内1つを固定し、他の2つを変化させ、次に示す評価関数 J を最小 $J_{\min}$ にする場合の定数を求める¹⁾。

$$J = (1/N) \sum_{k=1}^N \left[\sum_{i=1}^M (\theta^{*,k} - \theta_i^k)^2 / \sum_{i=1}^M (\theta^{*,k})^2 \right] \quad (9)$$

ここに、 θ^* :土壌水分実測値、 θ :数値計算値、 i :観測位置 $y=10\text{cm}$ および 20cm に対応する差分格子点を表す添字、 k :観測日に対応する計算時間ステップを表す添字、 M :対象とした観測位置の総数、 N :対象とした観測総日数である。次いで、他の定数を固定し、同様の手続きを繰り返し、評価関数 J を最小 $J_{\min}$ にする場合の定数により、最適推定値を求める。

4. 雨水浸透過程の解析

ここでは、5月25日の土壌水分の実測値を初期値として与え、降雨が連続して生じ雨水の浸透過程とみなせる5月28日までの深さ $y=10\text{cm}$ 、 20cm の土壌水分の実測値を式(9)の θ^* に用い、式(2)、(3)の未定定数 k_s 、 a 、 n の推定を行う。図-3(a)には、観測地点No.1において、未定定数 n を1.75に固定し、未定定数 k_s 、 a を種々変化させた場合に得られる評価関数 J の応答を示している。 J の最小値は、 $k_s=0.12\text{cm/hr}$ 、 $a=0.04$ において得られている。次いで、 a を推定値0.04に固定して、再度 k_s と n を変化させ求めた J の最小値は、前述と同様に $k_s=0.12\text{cm/hr}$ 、 $n=1.75$ において得られた。従って、観測地点No.1のパラメータの最適推定値として、 $k_s=0.12\text{cm/hr}$ 、 $a=0.04$ 、 $n=1.75$ を採用する。図-3(b)には、観測地点No.4においてパラメータ a を固定した場合の k_s と n に対する評価関数 J の応答を示している。以上のようにして得られた各観測地点におけるパラメータの推定値を表-1に示している。各観測地点での最適推定値、特に飽和透水係数には、若干ではあるが相違みられ、今後、非一様性を考慮した2次元解析が必要とされよう。

図-4には、観測地点No.2において得られた最適推定値を用いて行った数値計算結果(5月28日)を示している。本数値解析により、ほぼよく浸透過程を再現している。

5. 乾燥過程の解析

ここでは、図-2に示したように、降水のない6月3日から6月9日までの7日間(乾燥過程)の $y=10\text{cm}$ 、 20cm における土壌水分の実測値を用いて定数 a 、 n の推定を行う。この場合の飽和透水係数 k_s には、前述の浸透過程で得られた各観測地点における最適推定値を用いる。吸水項を考慮する場合に必要な式(7)の根の長さに関しては、 $L_{r1}=1\text{cm}$ 、 $L_{r2}=20\text{cm}$ 、また式(5)の未定定数 h_1 、 h_2 には、 $h_1=-50\text{cm}$ 、 $h_2=-500\text{cm}^2$ を仮定した。

表-2には、乾燥過程に対して、 k_s を固定し、定数 a 、 n を種々変化させ、評価関数 J が最小となる場合の各観測地点でのパラメータの最適推定値を示している。

表-1 パラメータの推定値(浸透過程)

	n	a (cm^{-1})	k_s (cm/hr)	誤差 $J_{\min}$
No.1	1.75	0.04	0.12	0.044
No.2	1.75	0.03	0.075	0.053
No.3	1.75	0.05	0.19	0.045
No.4	1.75	0.04	0.08	0.052

表-2 パラメータの推定値(乾燥過程)

	n	a (cm^{-1})	k_s (cm/hr)	誤差 $J_{\min}$
No.1	2.25	0.08	0.12	0.047
No.2	3.2	0.08	0.075	0.060
No.3	2.4	0.1	0.19	0.050
No.4	3.25	0.08	0.08	0.062

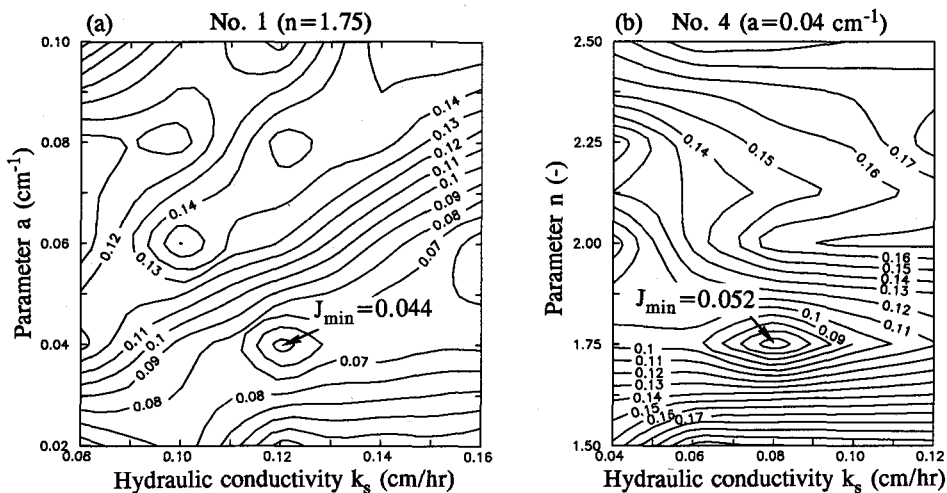


図-3 パラメータ k_s , a , n に対する評価関数の応答

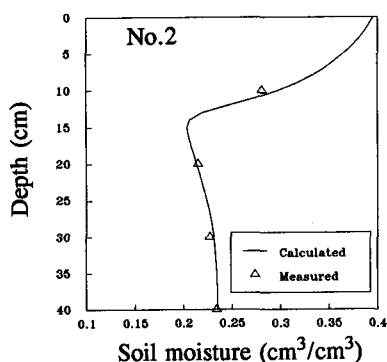
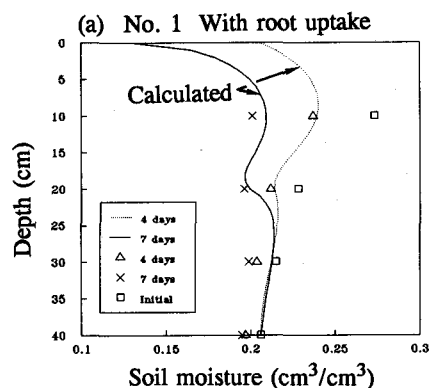


図-4 浸透過程の数値解と実測値(5月28日)の比較



(b) No. 1 Neglecting root uptake

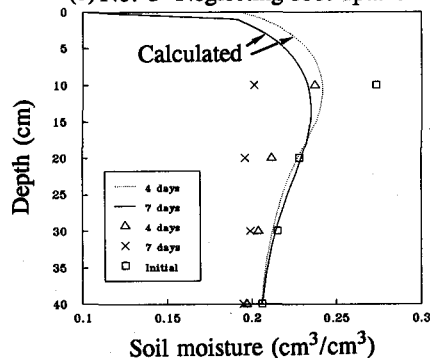


図-5 土壌水分分布

図-5(a) には、観測地点No.1に対して、乾燥過程の解析で得られた推定値を用いて再現した土壌水分分布を示している。図中のInitial (□記号) は、図-2における6月3日に相当している。数値解は、ほぼよく土壌水分分布の変化を再現している。図-5(b) には、比較のため、根による吸水を無視し、地表面における蒸発フラックスとして蒸発散能を与えて推定したパラメータを用い算定した土壌水分分布を示している。図より、根による吸水を無視した場合には、表層では過度の蒸発のため土壌水分の急激な減少が生じるが、深度10cm~20cmにおける土壌水分の減少は説明できないようである。

図-6(a) には、観測地点No.1において吸水項を考慮した場合の $y=10\text{cm}$, 20cm における土壌水分の経日変化の数値解を示している。実測値と計算値は、ほぼよく一致している。一方、図-6(b) には、比較のため、吸水項を無視した場合の数値解を示している。図-6(b) の場合、実測値と計算値には大きな差異があり、植生がある場合には、乾燥過程における土壌水分の減少に及ぼす吸水項の果たす役割は大きいといえる。従って、植生のある現地において土壌水分の観測を行う場合には、植生に関する資料収集を十分に考慮していく必要がある。

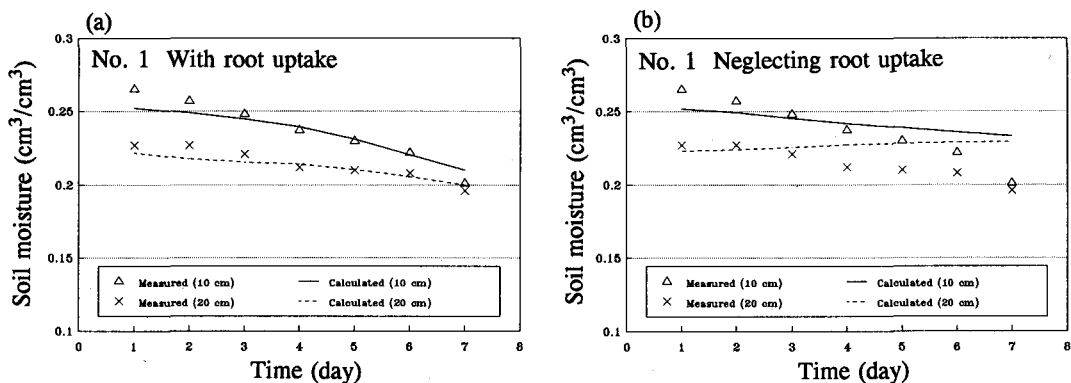


図-6 乾燥過程における数値解と実測値（左図：Sink項考慮、右図：Sink項無視）

6. おわりに

本研究では、まず、土壌表面から深さ40cmまで10cm毎に観測された土壌水分の日変化データを用いて、対象とする不飽和土壌の水理学的特性である水分特性曲線、不飽和透水係数および飽和透水係数の推定を行った。次に、降雨の無い蒸発散の顕著な場合に対して、植物の根による土壌水分の吸収を考慮した数値解析を行い、植生がある場合の乾燥過程においては、土壌水分の減少に及ぼす植物の根による吸水項の効果が大きいことを示した。

植物の根による吸水を考慮した不飽和浸透流解析においては、ここでは省略したが、本来、根の空間分布やモデル内に含まれている種々の未定定数（たとえば式(5)における h_1, h_2, h_3 等）を、予め推定、あるいは室内実験により決定することが必要である。今回の解析では、根の分布は、根領域において一様に分布すると仮定し、その他の吸水項に関わる未定定数は、従来用いられている定数を採用した。これらに関しては、さらに検討を要するものの、ここで適用した比較的簡便なモデルによっても、現地観測土壌水分分布の日変化をきわめてよく説明することができ、植生を考慮した現地データ解析に対しては十分有効なものとする。

参考文献

- 1) Dahlblom, P.: Mathematical modelling of soil water movement at Värpinge, Report no. 3114, Dep. of Water Resour. Eng., University of Lund, Sweden, 1987.
- 2) Jinno, K.: Parameter estimation of the equation of soil water content, Unpublished report, Dept. of Water Resour. Eng., University of Lund, Sweden, 1988.
- 3) Zhang, T. and Berndtsson, R.: Analysis of soil water dynamics in time and space by use of pattern recognition, Water Resour. Res., Vol. 27, pp.1623-1636, 1991.
- 4) Markar, M.S. and Russel, G. M.: Modeling of evapotranspiration from homogeneous soils, Water Resources Res., Vol. 23, No. 10, pp.2001-2007, 1987.
- 5) Van Genuchten, M.T.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil, Soil Sci. Soc. Am. J., 44, pp.892-898, 1980.
- 6) Herkelrath, W.N., Miller, E.E. and Gardner, W.R.: Water uptake by plants, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 41, pp. 1039-1043, 1977.
- 7) Feddes, R.A., Kowalik, P.J. and Zaradny, H.: Simulation of field water use and crop yield, PUDOC, Wageningen, 1978.
- 8) 羽井和朗：地下水数値計算法(11)2.2差分法と特性曲線法による物質輸送解析の応用, 地下水学会誌, 第33巻, 第3号, pp.177-184, 1991.
- 9) Campbell, G.S. (中野政詩・東山勇監訳): パソコンで学ぶ土の物理学, 鹿島出版会, pp.122-131, 1987.
- 10) Protopapas, A.L. and Bras, R.L.: A model of plant growth and its relation to moisture and solute transport in the soil, MIT report no.309, pp.119-152, 1986.