

蒸発法による黒ボク土の不飽和水分移動特性の推定

Inverse estimation of the evaporation method for unsaturated hydraulic properties for Andisols

○ 星野隆文* Rudiyanto* 坂井勝** 取出伸夫*

Takafumi Hoshino, Rudiyanto, Masaru Sakai, and Nobuo Toride

はじめに 土中の水分移動の予測には、水分保持曲線と不飽和透水係数の不飽和水分移動特性の評価が必要である。我が国に広く分布する火山灰土の黒ボク土は、発達した団粒構造のため、階段状の水分保持曲線を持つ。団粒土の不飽和水分移動特性には Durner モデル(Durner, 1994)が提案されているが、特に不飽和透水係数の推定に関する研究例は少ない。そこで本研究では、黒ボク土の蒸発過程の土中水圧力変化から水分移動特性を逆解析により推定する蒸発法により、Durner モデルのパラメータの推定手法を検討した。そして、推定結果に基づき異なる黒ボク土の不飽和水分移動特性について比較検討した。

試料と方法 [蒸発法] 試料には、茨城、熊本、三重、長野の黒ボク土を用いた。それぞれの試料の水分保持曲線は、吸引法、加圧板法、水ポテンシャル(WP)法により測定した。蒸発実験は、内径 4cm、高さ 16cm のアクリルカラムに試料を充填し、蒸留水で毛管飽和した。下端フラックスをゼロとして、カラム上端からの蒸発過程の土中水圧力と蒸発速度を測定した。

[逆解析] Durner モデルの水分保持曲線と不飽和透水係数は次式で与えられる。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = w_1 \left[1 + (\alpha_1 h)^{n_1} \right]^{-m_1} + w_2 \left[1 + (\alpha_2 h)^{n_2} \right]^{-m_2}$$

$$K(S_e) = K_s (w_1 S_{e1} + w_2 S_{e2})^\ell$$

$$\times \frac{\left(w_1 \alpha \left[1 - (1 - S_{e1}^{1/m_1})^{m_1} \right] + w_2 \alpha_2 \left[1 - (1 - S_{e2}^{1/m_2})^{m_2} \right] \right)^2}{(w_1 \alpha + w_2 \alpha_2)^2}$$

9 個のパラメータを持つ Durner モデルは、水分保持曲線と不飽和透水係数に対して自由度が高い反面、逆解析によりすべてのパラメータを同時に推定することは困難である。そこで、まず残留体積含水率 θ_r はゼロと仮定し、また飽和体積含水率 θ_s は、蒸発実験の初期含水率とした。その上で、水分保持曲線に関する残りの 5 個のパラメータ、 $\alpha_1, n_1, w_2, \alpha_2, n_2$ を水分保持曲線の実測値に対して非線形最小二乗法により決定した。図 1 は、茨城、熊本黒ボク土の水分保持曲線の実測値と Durner モデルの適合曲線である。

蒸発過程の土中水圧力の変化に対する逆解析に対しては、水分保持曲線より求めたパラメータ値を初期値として、飽和透水係数 K_s と間隙結合係数 ℓ を加えたパラメータを推定した。逆解析は、 K_s と ℓ 、水分保持曲線の 1 段目を表すパラメータである α_1, n_1, w_2 、さらに 2 段目を表す α_2, n_2 、について、推定パラメータを最大 7 個まで段階的増やししながら比較検討し、最適な推定結果を選択した。また、 ℓ の初期値は、正と負の値を与え、結果を比較した。逆解析には、不飽和水分移動汎用プログラム HYDRUS-1D を使い、上端の境界条件は実測した蒸発速度、下端の境界条件はゼロフラックスとした。

結果と考察 図 1 には、茨城、熊本黒ボク土の逆解析により修正した水分保持曲線を併記した。どちらの土も、水分保持曲線の 1 段目の体積含水率が 3 ~ 5% 程度増加すると、蒸発過程の土中水圧力変化をよく再現できた。図 2 は、熊本黒ボク土の蒸発過程圧力変化に対する適合結果で

*三重大学大学院生物資源学研究科 Graduate school of Bioresources, Mie Univ., **Dept. of Environmental Sciences, Univ. of California, Riverside, 蒸発法, 黒ボク土, 不飽和水分移動特性, Durner モデル

ある。表 1 は、4 種類の黒ボク土 Durner モデルのパラメータの推定値である。また、図 3 は不飽和透水係数の推定結果である。4 種類の黒ボク土の不飽和透水係数は、団粒構造を反映した 2 段の階段状の水分保持曲線に対応した形状を示した。ただし、 l は黒ボク土により大きく異なる。

広い土中水圧力範囲に対して精度の高い水分保持曲線が得られれば、逆解析における適切

な初期値を与えることができる。このとき、不飽和透水係数は、 K_s と l 以外のパラメータを推定に加えても変化は小さい。これは、黒ボク土に対する Mualem の不飽和透水係数推定モデルの妥当性を示す。ただし、水分保持曲線の 1 段目の水分量は、蒸発過程の圧力変化に大きな影響を与えるため、加圧板での測定精度も考慮した逆解析結果の比較検討が必要である。

表 1 4 種類の黒ボク土の乾燥密度と蒸発法による Durner モデルのパラメータの推定結果
Table 1 Bulk densities and the Durner model parameters based on the evaporation method for four Andisols.

	$\rho_b(\text{gcm}^{-3})$	θ_r	θ_s	$\alpha_1(\text{cm}^{-1})$	n_1	w_2	$\alpha_2(\text{cm}^{-1})$	n_2	$K_s(\text{cmd}^{-1})$	l
Ibaraki	0.48	0	0.762	0.0527	3.47	0.715	1.49×10^{-3}	1.34	89	3.67
Kumamoto	0.48	0	0.776	0.0575	2.35	0.624	1.35×10^{-4}	1.50	379	0.0156
Mie	0.75	0	0.640	0.110	2.83	0.488	5.20×10^{-4}	1.29	1674	1.43
Nagano	0.77	0	0.669	0.0113	2.68	0.607	5.58×10^{-4}	1.27	23	2.34

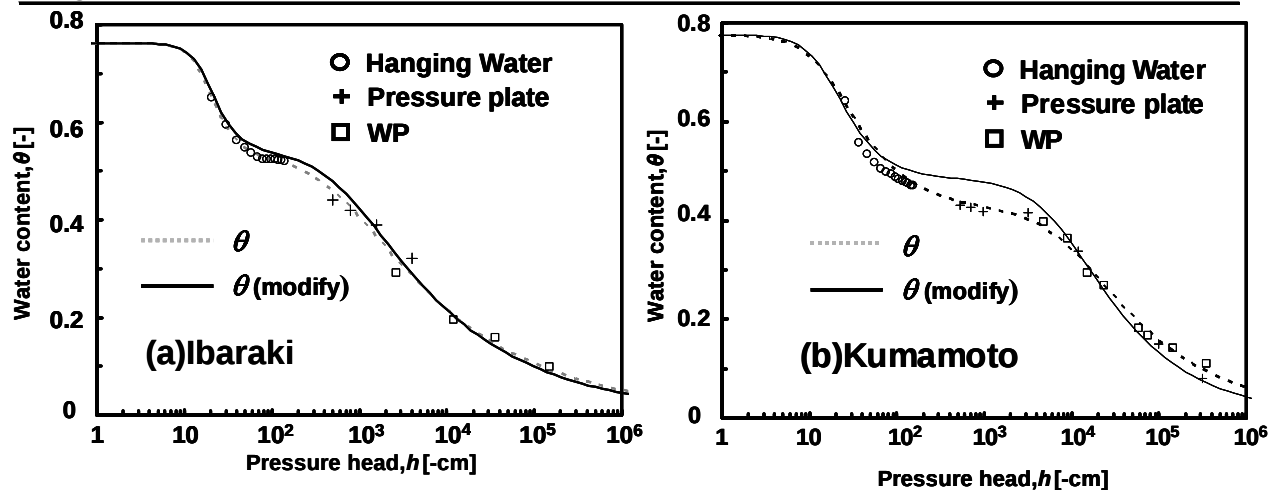


図 1 水分保持曲線 (a)茨城, (b)熊本黒ボク土
Fig.1 Soil water retention curves for (a)Ibaraki, (b)Kumamoto Andisols.

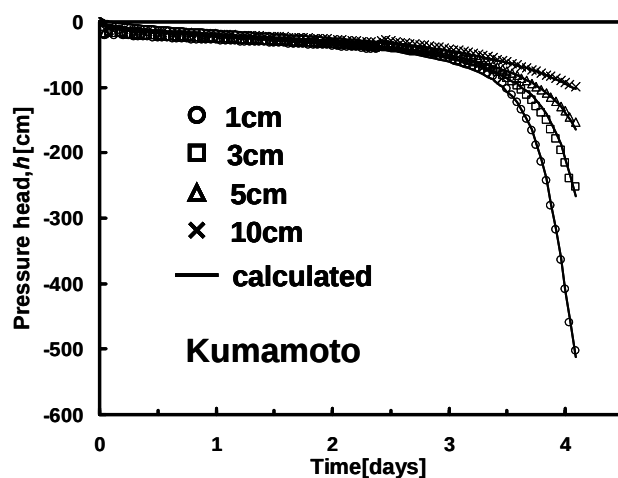


図 2 熊本黒ボク土の蒸発過程における土中水圧力変化
Fig.2 Pressure heads changes during the evaporation process.

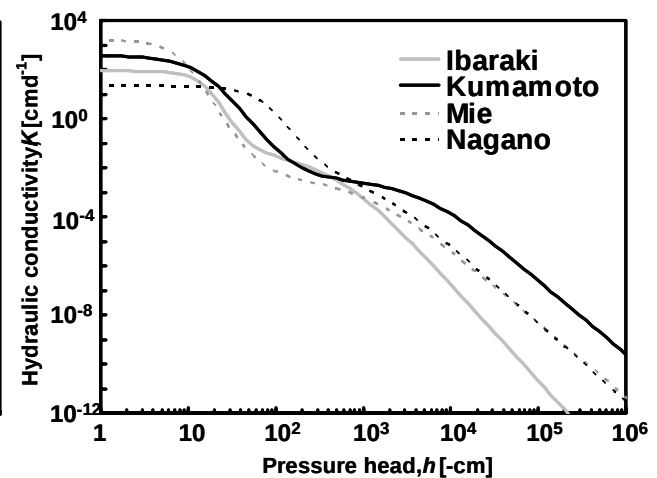


図 3 推定した黒ボク土の不飽和透水係数
Fig. 3 Unsaturated hydraulic conductivities based on the evaporation method.

参考文献: Durner, *Water Res. Res.* 30: 211-223, 1994.