

蒸発法における水分移動特性関数の評価

Evaluation of hydraulic property functions for the evaporation method

坂井 勝 取出 伸夫
Masaru Sakai Nobuo Toride

1. **はじめに** 蒸発法における水分移動特性の推定には、適切な水分移動特性関数の選択が不可欠である。しかし、van Genuchten (VG) モデル以外のモデルによるパラメータの推定と適用条件に関する報告は少ない。砂質土の低水分領域では VG モデルが不飽和透水係数を過小評価すること、団粒構造が発達した黒ボク土は、階段状の水分保持曲線を示すことが報告されている。そこで本研究では、鳥取砂丘砂と熊本の黒ボク土を用いて蒸発実験を行ない、砂丘砂に Fayer モデル (Fayer and Simmons 1995)、また黒ボク土に Durner モデル (Durner 1994) を用いてパラメータを推定し、水分移動特性関数の適用性と推定法に関して検討を行なった。

2. **水分移動特性関数** Fayer モデルは、低水分領域における土粒子への吸着による水分保持を考慮して VG モデルに含まれる残留体積含水率 θ_r を改良したものである。VG モデルでは低圧力領域で θ_r に漸近するのに対し、Fayer モデルでは圧力水頭 $h = -10^7$ cm で体積含水率 $\theta = 0$ となるように θ が減少する。Durner モデルは、団粒土を対象に 2 つの VG モデルを重ね合わせたものであり、階段状の水分保持曲線を表現することができる。どちらのモデルも、Mualem モデルに基づき不飽和透水係数を水分保持曲線と同じパラメータで表現する関数である (closed form)。

3. **蒸発法** 鳥取砂丘砂 (乾燥密度 $\rho_b = 1.62$ g cm⁻³) と熊本の黒ボク土 ($\rho_b = 0.48$ g cm⁻³) を、それぞれ内径 3.8 cm で高さ 8 cm、内径 7.8 cm で高さ 18.6 cm のアクリルカラムに充填し、毛管飽和した。飽和からの蒸発過程における各深さの圧力変化、蒸発量を測定した。このとき、小型ファンを用いて蒸発を促進した。得られた圧力変化 (砂丘砂は深さ 0.5, 5 cm、黒ボク土は 5.5, 15.5 cm の測定値)、積算蒸発量、実験終了時の平均体積含水率を逆解析の最適化の対象とした。砂丘砂には VG モデルと Fayer モデル、黒ボク土には VG モデルと Durner モデルを用いてパラメータを推定した。ここで、Durner モデルはパラメータが多いこと、また、蒸発法による推定範囲 ($h > -700$ cm) の影響が少ないことから、本研究では残留体積含水率 $\theta_r = 0$ 、また 2 つの VG 式に含まれるパラメータ n が等しいと仮定した。パラメータの初期値には、実測の水分保持曲線に適合した値を用いた。計算は、リチャーズ式に、下端にゼロフラックス、上端に実測した最大可能蒸発速度を境界条件として与えた。また、砂丘砂には、水蒸気移動を考慮した計算も行なった。

4. **結果 砂丘砂**: Fig. 1 に推定した水分保持曲線、不飽和透水係数を示す。Fig. 2 に圧力分布を示す。砂丘砂の蒸発過程では、表面付近の圧力のみが急激に低下した。VG モデルでは、試料下部の圧力も大きく低下し、実測値を再現できなかった。VG モデルでは $\theta_r (= 0.064)$ 以下の水分が動かず、低水分領域の不飽和透水係数を過小評価する。そのため逆解析では、蒸発速度を実現するために、水分保持曲線を過大評価する。一方 Fayer モデルは、実測の圧力変化をよく再現し (Fig. 2(a))、水分保持曲線の実測値もよく再現した (Fig. 1(a))。Fayer モデルでは、低水分領域の水分も動くため、 $h < -40$ cm で不飽和透水係数の低下が緩やかで、VG モデルの問題点が改善されている (Fig. 1(b))。Fayer モデルは、VG モデルとパラメータ数も同じであることから、砂質土

に対する適用圧力範囲の広い有用なモデルである。また、水蒸気移動を考慮に入れることで、表層の乾燥が表現され、水分保持曲線の実測値をより再現し (Fig. 1 (a)), 推定の精度が向上した。**黒ボク土**: 黒ボク土の蒸発過程では、172 時間後までは試料全体で圧力が低下し、その後試料上部の圧力が大きく低下した。また、蒸発速度は 0.5 cm day^{-1} で一定であり、減率乾燥は生じなかった。VG モデルは 208 時間後においても、試料全体で圧力が低下し、実測値を再現できない (Fig. 2 (b))。VG モデルは高水分領域の水分保持曲線の実測値をよく再現するが (Fig. 1 (a)), $\theta_r (= 0.46)$ 以下の水分は動かない。そのため、大きな蒸発速度を満たすために高水分 ($h > -100 \text{ cm}$) の不飽和透水係数を過大評価して、試料下部への乾燥を進行させる。一方、Durner モデルは実測値をよく再現した。一方、低圧力 ($h < -100 \text{ cm}$) の下層から上層への流れを適切に表現できる Durner モデルでは、圧力変化を良く再現している。低圧力領域においても水分量の高い黒ボク土に対しては、Durner モデルを水分移動特性関数に用いる必要がある。

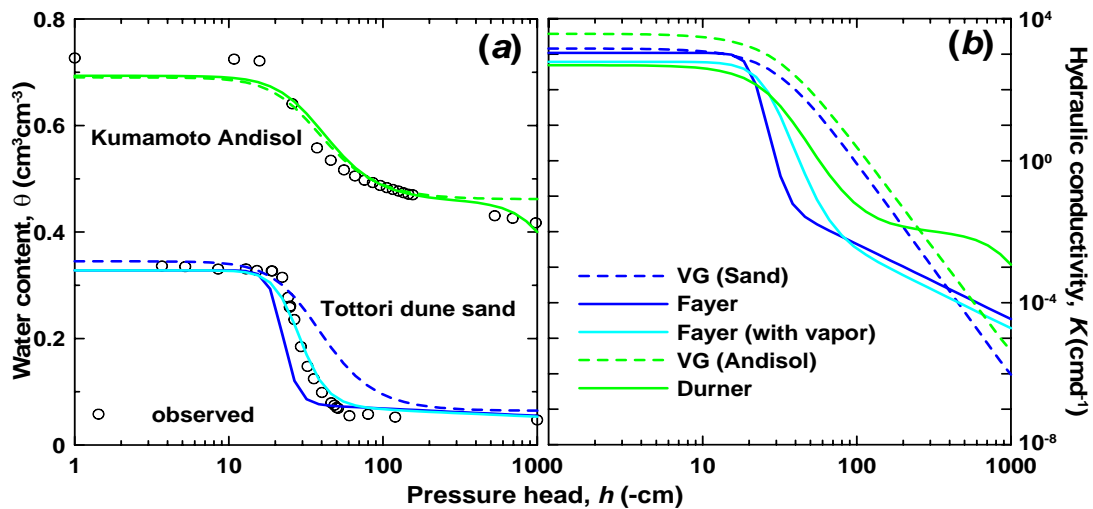


図 1 蒸発法で推定した (a) 水分保持曲線と (b) 不飽和透水係数。

Fig. 1 (a) Soil water retention curves and (b) unsaturated hydraulic conductivities estimated with the evaporation method.

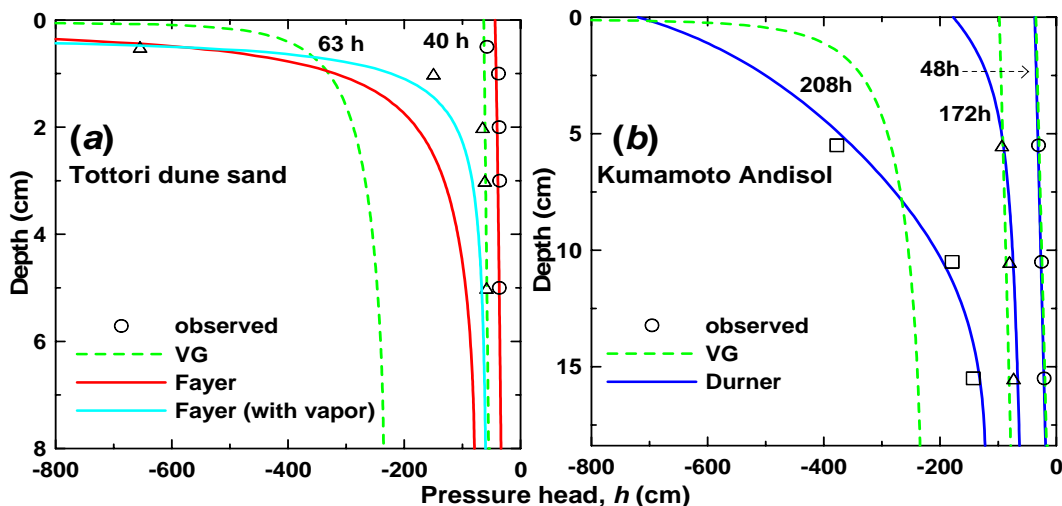


図 2 (a) 砂丘砂と (b) 黒ボク土の蒸発過程の圧力分布。

Fig. 2 Pressure head profiles for (a) dune sand and (b) Andisol in evaporation process.