

湿度センサーを用いた蒸発法の乾燥領域への応用

Extending measurement range of evaporation method using a humidity probe

伴 俊和¹・安江俊樹²・渡辺晋生¹・坂井 勝¹¹三重大学大学院生物資源学研究科・²三重大学生物資源学部

要旨(Abstract)

蒸発法の土中水圧測定には通常テンシオメータが用いられる。しかし、テンシオメータは湿潤な土にしか適用できず乾燥領域の不飽和透水係数の推定には不十分である。そこで、小型で直接土中に挿入できる湿度センサーを蒸発法に適用した。その結果、 -10^6 cm までの土中水圧を連続的に測定できた。また、乾燥領域の水蒸気移動も考慮した蒸発法の解析の必要性が示唆された。

テーマ：土壌物理研究の最前線 Trend in Soil Physics

キーワード：蒸発法, 不飽和透水係数, 湿度計, 低水分領域

Key words: Evaporation method, Unsaturated hydraulic conductivity, Hygrometer, Dry soil

1. はじめに

土中の水分・溶質移動を予測する上で、土の不飽和透水係数を知ることが重要である。不飽和透水係数を求める方法の一つに、蒸発実験で測定した土中水圧 h の変化の逆解析から不飽和水分移動特性関数のパラメータを推定する蒸発法がある。蒸発実験の h 測定には通常テンシオメータが用いられるが、テンシオメータは比較的湿潤な土にしか適用できない。一方、近年 ROTRONIC 社の HC2, WESCOR 社の PCT55, Azbil 社の FINEDEW など、比較的乾燥した h を測定できる湿度センサーが開発されている。特に HC2 は、外径 5 mm, 長さ 51 mm と測定部が小さく、テフロンフィルターと組み合わせて土中に直接挿入でき、比較的応答が速く安価である等の特徴を持つ静電容量式湿度センサーである。そこで本研究では、HC2 を蒸発法に応用し、乾燥領域まで考慮した不飽和透水係数を測定する際の留意点や湿度センサーの利用範囲を知ることが目的とした。

2. 試料と方法

岩手大学附属農場の休耕畑表層から採土した黒ボク土の 2 mm 篩通過分を試料とした。図 1a に吸引法, 加圧板法, WP4 水ポテンシャル計で測定した試料の水分保持曲線を示す。蒸発

実験では試料を内径 10 cm のアクリル円筒に 9 cm 高まで、乾燥密度 1.1 g cm^{-3} で均一になるよう充填し、水分飽和後、蒸発を開始した。表面から 1.1 cm 深に設置したテンシオメータと HC2, 4.3 cm 深に設置したテンシオメータと MPS2 水ポテンシャルセンサーを用いて、蒸発過程の h の変化を測定した。また、試料全体の重量変化を電子天秤でモニターし、蒸発速度を求めた。16 日間蒸発後、カラムを 1 cm 間隔で解体し、各深さの含水率 θ と h を炉乾法と WP4 で測定した。実験は 25°C の恒温室で行った。そして、測定した蒸発速度を境界条件に与え、蒸発実験を再現するように逆解析を行った。この際、テンシオメータの測定値に対し、あるいは全 h センサーの測定値とカラム解体時の h 分布に対し、不飽和透水係数関数 (dual van Genuchten- Mualem の式) のパラメータを推定したものを C1, C2, 水分保持曲線も同時に推定したものを C3 とした。数値解析には HYDRUS-1D を用いた。

3. 結果と考察

図 2a に蒸発実験で測定した試料からの積算蒸発量を示す。蒸発開始から 1.5 日目までは一定速度 (約 1.4 cm d^{-1}) で蒸発が進行し、その後は蒸発速度が低下した。図 2b に各センサー

で測定した h の経時変化を示す。図にはカラム解体時に測定した 1.0, 4.5 cm 深の h も併記した。蒸発により試料が乾燥するにつれ、各深さの h が低下した。テンシオメータは -500 cm 以下の h を測定できなかった。MPS2 は -450 cm 以下の h を測定できたが、 -5000 cm 以下では h を過大評価した。HC2 は試料が湿潤の間、常に -20000 cm 程度の h を出力したが、 -20000 cm 以下の乾燥領域では h を安定して測定でき、解体時に測定した h ともよく一致した。HC2 の応答速度と精度は蒸発実験に対しては十分に有効だったが、 -20000 cm 近傍の h の判定に課題が残った。

図 2b に h の経時変化への逆解析による適合曲線を、図 1 に推定された水分保持曲線と不飽和透水係数を示す。また、図 3 には実験終了時の θ と h 分布の実測値と推定値を示す。C1 については実測通りに蒸発速度を与えることができなかった (図 2a)。これは乾燥した表層への水分供給が再現できなかったためと考えられる。C1 はテンシオメータで測定した湿潤領域の h をよく再現したが、 -3000 cm 以下の h や実験終了時の θ 分布を過大評価した (図 2b, 3b)。C2 は C1 より乾燥領域の h の傾向を再現したが、湿潤領域の再現精度が悪く、1.1 cm 深の h も数オーダー過大評価した (図 2b)。C3 は 1.1 cm 深の -10^5 cm 以下の h をよく再現したが、4.3 cm 深の h を過小評価した。また、C3 は乾燥領域の水分移動を再現するため、 $h > -10$ cm, $h < -20000$ cm の透水係数や、 $h < -2500$ cm 以下の水分保持曲線を著しく大きく評価した (図 1a, b)。C2 と C3 は実験終了時の θ 分布をそれなりに再現した。 h 分布については、C2 は全層を過大に、C3 は乾燥した表層の h を比較的良好に表したがそれ以外を過小に評価した。いずれも乾燥領域の水分移動を正しく計算できていないと言える。今後は、乾燥領域で生じる水蒸気移動も考慮した解析が必要である。

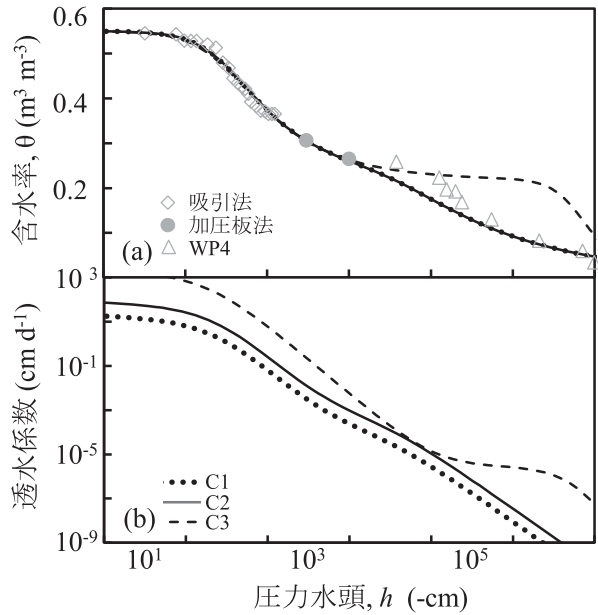


図1. (a)水分保持曲線と(b)不飽和透水係数

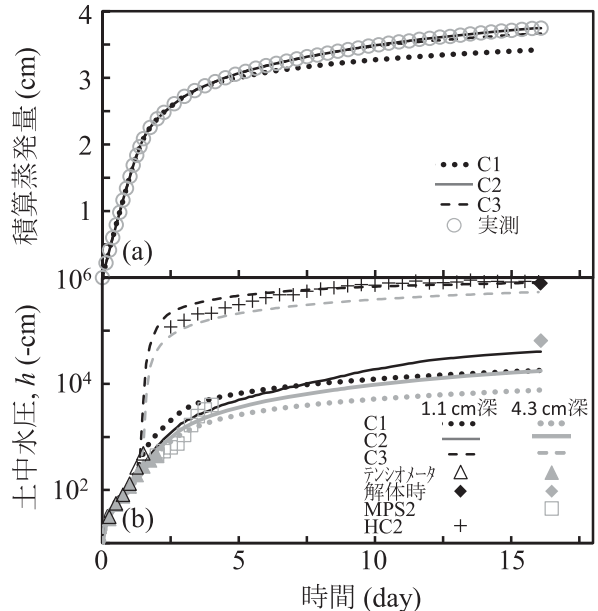


図2. (a)積算蒸発量と(b)土中水圧 h の経時変化

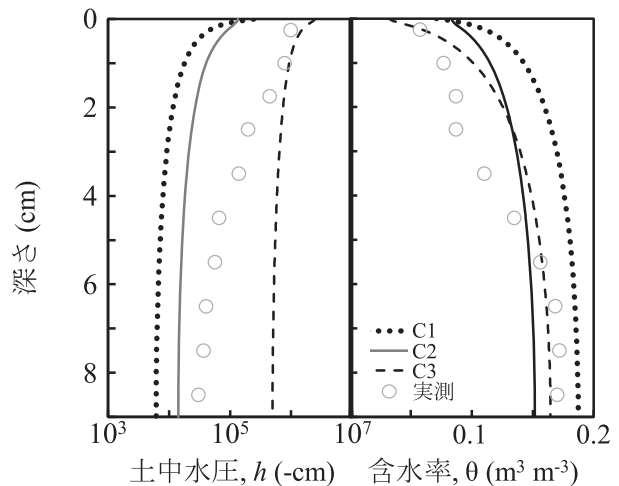


図3. 実験終了時の(a)土中水圧と(b)含水率分布