

3 種の水ポテンシャルセンサーを用いた黒ボク土の蒸発実験 Evaluation of soil water potential sensors during evaporation experiment

土居奈央・○渡辺晋生・坂井 勝・取出伸夫
Nao DOI, Kunio WATANABE, Masaru SAKAI, Nobuo TORIDE

はじめに 土壌圏の物質循環を考える際、土中の水ポテンシャルを知ることが重要である。現場やカラム実験では、水ポテンシャルのその場測定に、通常テンシオメータが使われる。しかし、テンシオメータは比較的湿潤領域の水ポテンシャルしか測定できず、土の乾燥や凍結時には使用できない。一方、土中に埋設した小さな多孔質体の水分量変化や熱的性質の変化から平衡する周囲の土の水ポテンシャルを推定するセンサーや、鏡面冷却露点式のセンサーが近年普及しつつある。これらのセンサーを併用すれば、飽和から風乾土まで、広領域の水ポテンシャルを測定できる可能性がある。しかしながら、これらのセンサーの特性や留意点を相互に評価した例はない。そこで本研究では、これらのセンサーを同一高に配置した一次元土カラムの蒸発実験を行い、測定される水ポテンシャルを比較検討した。

試料と方法 Decagon 社の MPS2、Campbell 社の 229L、Azbil 社の FINEDEW を検討対象のセンサーとした。以下それぞれ DPS、CPS、APS と呼ぶ。媒体の水分量は比誘電率や熱拡散係数から推定できる。媒体の水分保持曲線が既知であれば、この水分量から水ポテンシャルが得られる。DPS は、周囲の土と平衡させた直径 3 cm×厚さ 0.3 cm の多孔質盤の比誘電率を FDR 測定し、センサー内部の検量式により変換した水ポテンシャルを出力する。CPS は土と平衡させた直径 1.5 cm×長さ 3 cm の多孔質円筒の中心を 30 秒間加熱し、加熱前後の円筒中心の温度差を、個別に作成した検量式を用いて水ポテンシャルに換算する。これらのセンサーの応答速度は多孔質体と周囲の土の平衡に、精度は誘電率や温度の測定精度と検量式に依存する。APS は、直径 1.2 cm×長さ 1.4 cm のセンサー頭部に小型の鏡面冷却式露点計を持つ。センサー頭部は液状水は通さないが水蒸気を透過するフィルターで覆われている。そこで、測定した露点と周囲の地温から相対湿度を求め水ポテンシャルに換算する。APS の精度は地温の測定精度やフィルターの目詰、試料の溶質濃度に依存する。

これら 3 種のポテンシャルセンサーと径 0.65 cm×長さ 1 cm のテンシオメータ、熱電対を内径 10 cm のアクリル円筒の同一高に設置した。アクリル円筒の 9 あるいは 6 cm 高まで、十勝黒ボク土を乾燥密度 0.95 g cm^{-3} になるように詰めた。

各センサー中央部は表面から 4.5 および 2.5 cm 深とした。試料の水分保持曲線を図 1 に実線で示す。マリオット管を用いて下端から水位を徐々に上昇し、試料表面まで飽和した。その後、下端を閉じ、試料表面に定速ファンで送風する条件としない条件で水分を蒸発した。この際、試料全体の重量変化を秤でモニターし、蒸発量を求めた。実験は 25°C の恒温室で行った。水蒸気移動を考慮した一次元的水分・熱移動式を実験条件にあわせて計算し、測定結果と比較した。数値計算には HYDRUS-1D を用いた。

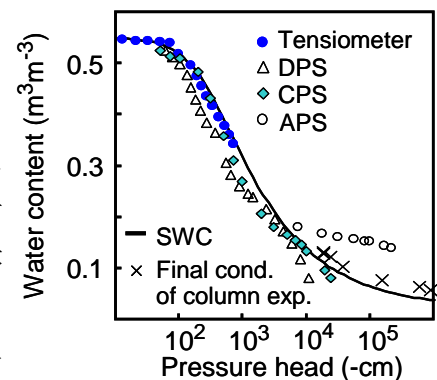


図1 試料の水分保持曲線
Fig.1 Soil water retention curve

結果と考察 試料からの積算蒸発量を図2に実線で示す。ファンを用いた条件では、最初時間に比例（約 1 cm d^{-1} ）して蒸発が進行し、6 cm 高では2日目以降、9 cm 高では3日目以降、蒸発速度が低下した。ファンを用いない条件では、一定速度（約 0.16 cm d^{-1} ）で蒸発が進行し、14 dで2.3 cmの水分が蒸発した。図3のプロットは、6 cm 高の試料に対しファンを用いた条件で13日間蒸発した後、試料を解体して求めた水ポテンシャルと水分分布である。13日間で、表層の土が飽和（ $0.55 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ）から風乾近くまで乾燥したことが、下層に向けて緩やかなポテンシャルおよび水分勾配が形成されたことがわかる。図4aは同条件において、2.5 cm 深で測定した地温変化である。地温は、急激な蒸発に応じて初期に 4°C 程低下し、蒸発速度の低下にともない室温まで回復した。図2, 3, 4には数値計算の結果を破線で示した。他の実験条件についても、計算は実測値をよく再現した。ここで、図4aの地温と同時に各センサーで測定した水ポテンシャルの変化を示す（図4b）。乾燥にともない、2.5 cm 深の水ポテンシャルは5日で $-10,000 \text{ cm}$ 、10日で $-100,000 \text{ cm}$ 程まで低下した。テンシオメータは飽和から乾燥初期の水ポテンシャルを速やかに測定できたが、 -800 cm で測定不能となった。DPSは飽和から乾燥初期の水ポテンシャルを速やかに測定できたが、 -800 cm で測定不能となった。DPSは飽和から -50 cm までは測定できず、 -50 から -200 cm は水ポテンシャルを過大評価した。同様の傾向がCPSについても見られた。土の乾燥に多孔質体の乾燥が追いついていない可能性がある。その後、DPSは $-10,000 \text{ cm}$ まで、CPSについては $-20,000 \text{ cm}$ まで水ポテンシャルを比較的よく測定できた。しかし、DPSについてはCampbell社のロガーでは -400 cm 以下の測定が継続できず、CPSについては、測定値の変動がDPSに比べて大きく、また検量線の作成の仕方により値も大きく異なった。一方、APSについては $-10,000 \text{ cm}$ 以上の水ポテンシャルは測定できなかった。 $-10,000 \sim -25,000 \text{ cm}$ では測定値が不安定で、且つ水ポテンシャルを過小評価したが、それ以下の低水分領域の水ポテンシャルを精度良く測定できた。図1に、実験中の重量変化から求めた試料全体の平均含水率と各センサーで測定した2.5 cm 深の水ポテンシャルの関係をプロットで示した。今回用いた黒ボク土については、乾燥過程における水分の鉛直分布が $-10,000 \text{ cm}$ 程度までは比較的直線的であり（図3b）、APS以外の測定値と平均水分率の関係は、水分保持曲線とよく一致した。

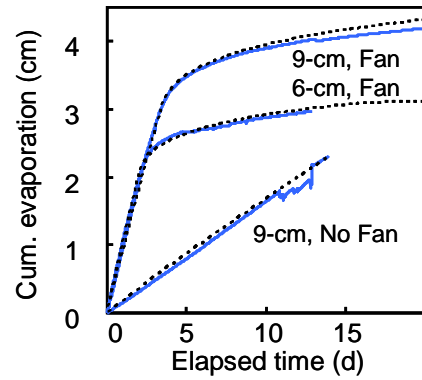


図2 積算蒸発量
Fig.2 Cumulative evaporation

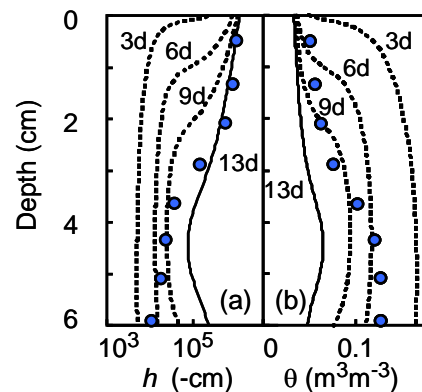


図3 水ポテンシャルhと水分θの分布
Fig.3 Profiles of water potential head, h and water content θ

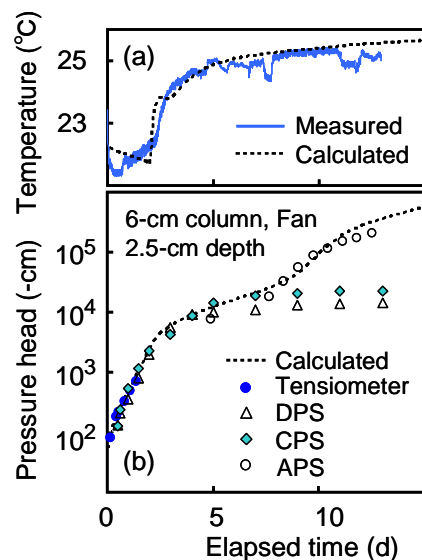


図4 温度と各種センサーで測定した水ポテンシャルの時間変化
Fig.4 Change in temperature and water potential measured by different sensors.