

## 双子プローブ熱パルス法を用いた土壌水分量およびマトリックポテンシャルの 同位置測定法の開発

### Development of a Dual Probe Heat Pulse Sensor to Measure Soil Matric Potential and Water Content Simultaneously

○川島知之<sup>1</sup>, 小島悠揮<sup>2</sup>, 登尾浩助<sup>3</sup>, 神谷浩二<sup>2</sup>

Tomoyuki Kawashima, Yuki Kojima, Kosuke Noborio, and Koji Kamiya

**はじめに:** 土壌中では降雨や浸透, 蒸発等により常に土中水の移動が発生する. こうした水移動は地下水涵養や溶解した化学物質の移動等に関係するため, その把握は重要課題である. 土壌中の水分移動には, 土壌の水理特性, すなわちマトリックポテンシャル ( $\psi_m$ ) と体積含水率 ( $\theta$ ) が関係し, これらを知ることが不可欠である.  $\psi_m$  や  $\theta$  を原位置で測定する方法は実用化され広く使われているが, 同位置での測定を行う際に幾つかの問題が生じてしまう. 例えばセンサ同士の干渉や, 測定範囲の相違など挙げられる. また複数センサを購入する必要がある, コスト面での困難も生じる. 以上のことから  $\theta$  と  $\psi_m$  を同一箇所で同時に測定できるセンサの開発が求められる.

Kojima et al. (2017) は図 1(a)に示した多孔質体と双子プローブ熱パルス (DPHP) 法を用いた  $\psi_m$  センサを開発した. DPHP 法はヒーターと温度計を内装した一対のステンレスチューブを土壌に挿入し, 加熱による地温変化を測定, 解析することによって土壌の熱伝導率 ( $\lambda$ ) と体積熱容量 ( $C$ ) を同時に決定する. Kojima et al. (2017)は, この DPHP 法の原理をカオリナイトで作成した多孔質体中に適用し, 既知の多孔質体の熱特性と  $\psi_m$  の関係性から土壌の  $\psi_m$  を推定した. 低い作成コストや小さい温度依存性など, 開発されたセンサの有益性が示されたが, このセンサにはデザインの改良により  $\theta$  も同時に測定できる可能性がある. よって本研究では多孔質体と  $\theta$  と  $\psi_m$  を同時に測定できる DPHP 法を用いたセンサを開発することを目的とした.

**実験方法:** 改良したセンサの概略図を図 1(b)に示した. 多孔質体に挿入したプローブを多孔質体外に突出させ, その箇所にもヒーター線と温度計を内装した. これにより多孔質体に加えて, 土壌にも DPHP 法を適用でき, 多孔質体および土壌の熱特性を測定できる. つまり開発したセンサ (以降 DPHP  $\psi_m$ - $\theta$  センサ) は多孔質体中と土壌中の 2 か所で  $C$  と  $\lambda$  を測定できる. DPHP  $\psi_m$ - $\theta$  センサから測定される多孔質体中の  $C$  と  $\lambda$  は  $\psi_m$  の推定に, 土壌中の  $C$  は体積含水率  $\theta$  の推定に使用する. DPHP  $\psi_m$ - $\theta$  センサによって得られる熱特性と  $\psi_m$  又は  $\theta$  の関係性を求めるため, 既存のセンサを用いて校正兼性能評価実験を行った.  $\theta$  センサに 5TE (MATER Group Inc.)を,  $\psi_m$  センサに MPS-6 (MATER Group Inc.)とテンシオメータ ML-2400AEL (株式会社モル) を使用した. 20°C の恒温室内にて黒ボク土を乾燥密度 0.84 Mg m<sup>-3</sup> で内径 46 mm, 深さ 9 cm の円柱状容器に充填し, それぞれのセンサを 4.5 cm の深さに設置した. DPHP  $\psi_m$ - $\theta$  センサは No.2 から No.6 の 5 本を用いた.

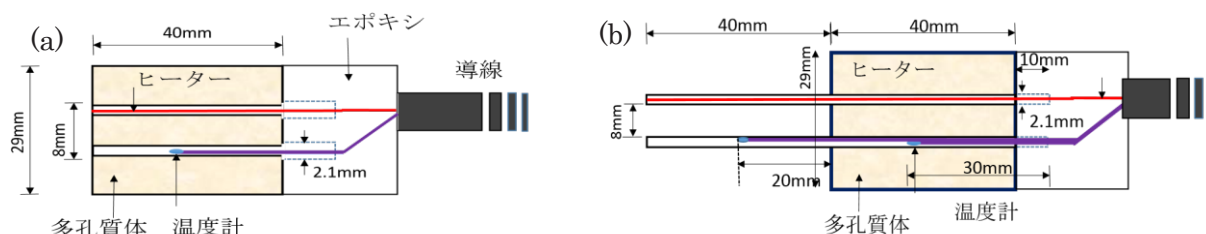


図 1 双子プローブ熱パルス法を用いたマトリックポテンシャルセンサ (a) と改良したセンサ (b) の概略図

1)岐阜大学自然科学技術研究科, Graduate School of Natural Science and Technology, Gifu University

2)岐阜大学工学部, Faculty of Engineering, Gifu University

3)明治大学農学部, School of Agriculture, Meiji University

キーワード: マトリックポテンシャル, 土壌水分量, 双子プローブ熱パルス

黒ボク土を飽和状態から自然乾燥させ、その間の水理特性の変化を各センサで測定した。測定は、 $\theta$  変化に対する DPHP  $\psi_m$ - $\theta$  センサの応答が極めて小さくなるまで (732 時間) 継続した。

**結果と考察：**既存のセンサにより得られた  $\psi_m$  と DPHP  $\psi_m$ - $\theta$  センサによって得られた多孔質体中の  $C$  と  $\lambda$  の関係性を求めた。 $\psi_m$  に対する  $C$  と  $\lambda$  の応答は 3 つの傾向に分けられた (図 2)。本研究ではすべての傾向に対応できる Durner (1994) が提案した水分特性曲線モデルを用いて関係性を表した。

Durner モデルにより既知となった関係性から推定される  $\psi_m$  の精度を、既存のセンサの測定値  $\psi_{m0}$  と比較するため、1:1 の直線と共に図 3 に示した。 $\lambda$  から  $\psi_m$  を推定する場合は  $C$  から推定する場合よりも、1:1 直線に沿って測定値と推定値の値が増加しているため、推定精度が良いことがわかる。平均絶対誤差率によって  $\psi_m$  の推定精度を算出すると  $C$  から推定した場合でも 15% 程度であり、十分な精度を持っていた。 $\lambda$  から推定した  $\psi_m$  では精度が凡そ 10% 程度で高精度であった。また  $\lambda$  から  $\psi_m$  を推定する場合、 $C$  から推定するよりも推定可能範囲が広がった。これらのことから、 $\lambda$  の測定値から  $\psi_m$  を推定する方法が最適であると考えられるが、多孔質体の  $\lambda$  の測定値は強い温度依存性を示す。その一方で  $C$  の変化は温度依存性が極めて小さいため、Kojima et al. (2017) は  $\psi_m$  の推定にはセンサを使用する箇所の温度変化の大小に応じて  $\lambda$  と  $C$  を使い分けることが望ましいと結論付けた。本研究の結果からも同様のことが言える。

土壌の  $C$  と  $\theta$  の関係性を表す理論式 (de Vries, 1963) に基づいて DPHP  $\psi_m$ - $\theta$  センサで測定された  $C$  から  $\theta$  を求めた。推定された  $\theta$  と 5TE によって測定された  $\theta_0$  との関係性を 1:1 の直線と共に図 3(c) に示した。またセンサの精度を平均絶対誤差率に基づいて算出した。その結果、精度は 3%~11% 程度となり比較的高い精度を示した。 $\theta$  の推定は  $C$  で十分な推定精度が得られたが、図 3(c) より中水分領域以降の推定精度が他の水分領域に比べて低かった。これは多孔質体中の急激な水分変化が、土壌中の熱特性測定精度に影響を及ぼしていると考えられ、多孔質体の水分量が土壌の熱特性測定に与える影響を今後定量評価する必要がある。

**おわりに：**開発した DPHP  $\psi_m$ - $\theta$  センサによる  $\psi_m$ 、 $\theta$  の同位置測定は、それぞれ十分な精度で推定可能であった。今後は多孔質体の水分量が土壌の熱特性測定に与える影響の評価と、野外での長期観測によって実用性を評価することが必要である。

【引用】 Kojima et al., 2017, Agri. Info. Res. 26(4):77-85.; de Vries, 1963, Thermal Properties of Soils. 【謝辞】 JSPS 科研費 JP17H06251 の助成を受けた。

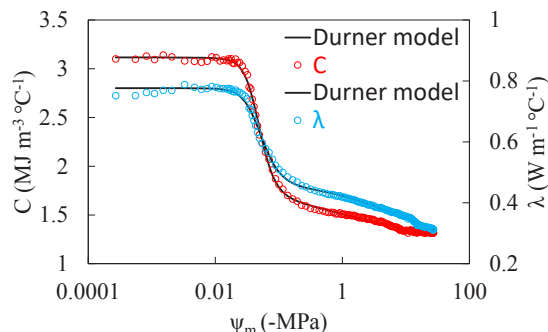


図 2  $\psi_m$  と  $C$  および  $\psi_m$  と  $\lambda$  の関係。実線は Durner モデルによる Fitting 結果。

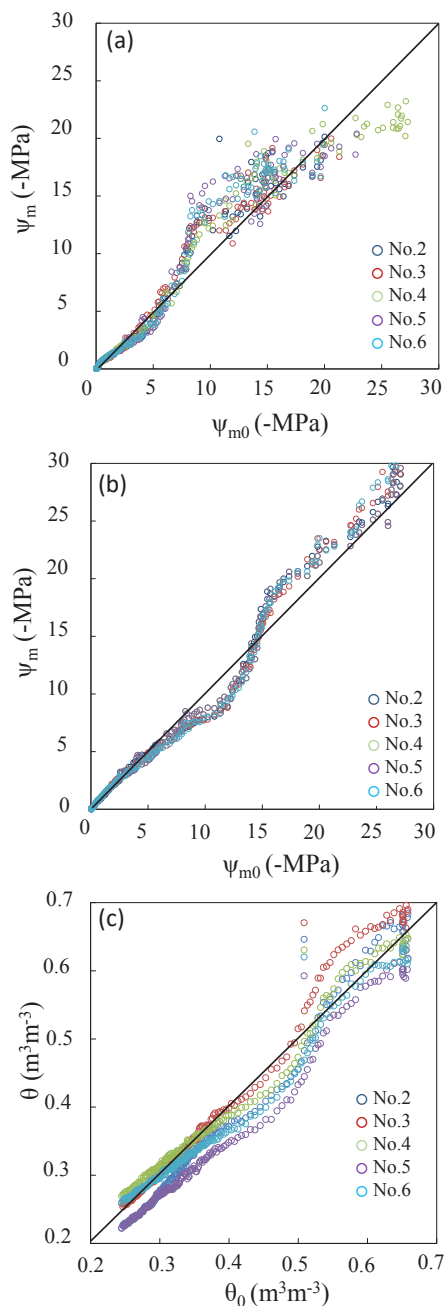


図 3  $C$  から推定した  $\psi_m$  と  $\psi_{m0}$  の関係性 (a),  $\lambda$  から推定した  $\psi_m$  と  $\psi_{m0}$  の関係性 (b),  $C$  から推定した  $\theta$  と  $\theta_0$  の関係性 (c)。