

多孔質体の熱伝導率および体積熱容量同時測定を利用した
マトリックポテンシャルセンサの開発

Matric potential sensor using simultaneous measurement of thermal conductivity and
volumetric heat capacity of a porous medium

○小島悠揮¹, 登尾浩助², 溝口勝³, 川原圭博⁴

Yuki Kojima, Kosuke Noborio, Masaru Mizoguchi, and Yoshihiro Kawahara

はじめに： 土壌の乾燥状態の定量評価にはマトリックポテンシャル(ψ_m)の測定が不可欠である。 ψ_m 測定センサの1つに多孔質体を用いた熱散逸センサ(HDS)がある。HDSは多孔質体に挿入したヒーターと温度計を内装したステンレスチューブからなり、単一プローブ法によって多孔質体の熱伝導率を測定し、それから ψ_m を推定する。HDSは温度依存性があるものの、ヒーターの制御と温度測定のみが必要でマイコンなどでも制御でき、低コストで営農へ導入できる可能性がある。このHDSは、双子熱プローブ(DPHP)法の適用により大きく改善できる。DPHP法は線熱源と一定距離離れた場所にある温度計からなり、多孔質体の体積熱容量(C)と熱伝導率(λ)を同時測定できる。そのため、 C と λ のより有利な熱特性を ψ_m 推定に採用できる利点がある。これによりHDSと同等な測定範囲、装置の簡易さ、低コストを維持しつつより高性能な ψ_m 推定ができると考えられる。また C の採用により温度依存性も軽減できる可能性がある。そこで本研究では、多孔質体とDPHP法を用いた ψ_m センサを開発し、その性能評価を行うことを目的とした。

センサの概要： DPHP ψ_m センサの構成図をFig. 1に示す。カオリンと骨炭末、活性炭素粉末を混合し、焼結させて多孔質体を作成した。多孔質体は混合比を変えて2種類(A, B)作成した。Aはカオリン、骨炭末、活性炭素をそれぞれ1:1:0、Bはそれぞれ4:2:1の質量比で混合し、マッフル炉内にて1150°Cで焼結させた。活性炭素と骨炭末は粒子径が異なるため、Aは均一な、Bはばらつきのある間隙径を持つと考えられる。焼結した多孔質体は直径28 mm、高さ40 mmの円筒状に整形し、中心に外径2.1 mmのステンレスチューブを2本、8 mm間隔で挿入した。チューブ内には片方にサーミスタ温度計を、もう一方にヒーター線を内装した。ヒーターの加熱によって生じる温度変化を解析することで、多孔質体の C と λ を同時に決定した。

実験方法： 多孔質体の C および λ と ψ_m の関係性を得るため、既存の ψ_m センサとの比較実験を行った。L350 mm×W130 mm×H60 mmの容器に黒ボク土を乾燥密度0.8 Mg m⁻³で充填し、開発したDPHP ψ_m センサと ψ_m センサMPS-6 (Decagon Devices, Inc.)を深さ3 cmに埋設した。DPHP ψ_m センサは多孔質体Aで作成したものとBで作成したものをそれぞれ2つずつ設置した(これ以降A1, A2, B1, B2とする)。土壌を飽和させた後、20°Cの恒温室内で43日間自然乾燥させた。4時間毎にMPS-6で ψ_m を、DPHP ψ_m センサで多孔質体の C と λ を測定した。またDPHP ψ_m センサの温度依存性評価実験を行った。DPHP ψ_m センサ、MPS-6、そしてHDSを空気、水、体積含水率0.30 m³ m⁻³の黒ボク土中に埋設し、恒温室内で温度を10°C, 20°C, 30°C, 40°C, 50°C, 60°Cと変化させた。各センサの測定を1時間毎に行った。

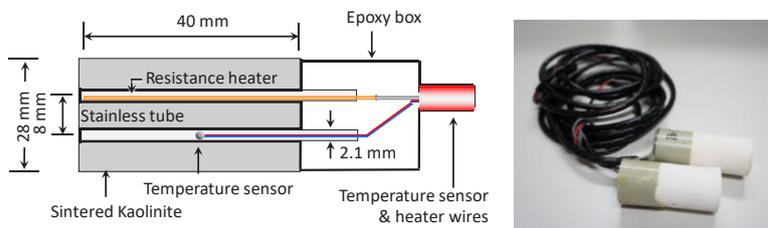


Fig. 1 Schematic and photo of the developed matric potential sensor.

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

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

3) 東京大学大学院農学生命科学研究科, Graduate School of Agriculture and Life Sciences, The University of Tokyo

4) 東京大学大学院情報理工学系研究科, Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

キーワード：マトリックポテンシャル, 双子プローブ熱パルス

結果と考察： Fig. 2 に C または λ と ψ_m との関係を示した。A1 と A2 でセンサの個体差が見られた一方、B1 と B2 では見られなかった。A1, A2 で -0.06 から -2.39 MPa, B1, B2 で -0.02 から -2.39 MPa の範囲の ψ_m で有効な C と λ の変化が見られた。 ψ_m の対数値と各熱特性の関係は、-0.2 MPa 付近で傾きが変わるため、2つの直線を用いて近似した。センサの推定精度の評価指標として二乗平均平方根誤差(RMSE)を計算すると、RMSE は C よりも λ から ψ_m を推定する際により小さくなった。よって λ を採用したほうが高精度で ψ_m を推定できる。多孔質体 A と B では、多孔質体 A の方が RMSE は小さかったが、個体差の問題から多孔質体 B の方が好ましい。 λ を採用した場合の各測定点の相対誤差の平均は A1 : 7%, A2 : 6%, B1 : 10%, B2 : 7% で、DHPH ψ_m センサでは 10% 程度の精度を持つと考えられる。これは既存のセンサと同程度の精度であった。

MPS-6 の出力値、HDS で測定した λ 、DHPH ψ_m センサで測定した C と λ の温度依存性を Fig. 3 に示した。MPS-6 の出力値は空気中で大きな負の温度依存性を示し、50°C の温度上昇に対して 39% 減少した。HDS の λ は、水中では 12%、土壌中では 83% 増加し、強い温度依存性を示した。これは、水移動に伴う熱輸送が原因と考えられる。DHPH ψ_m センサで測定した C はいずれも 7% 以下の小さな増加傾向を見せた。DHPH ψ_m センサで測定した λ は土壌中と水中でそれぞれ 10% と 32% 増加したが、HDS の温度依存性より小さかった。これはヒーターと温度計が一定距離離れている DPHP 法では水移動に伴う熱輸送の影響が緩和されるためと考えられる。以上のことより、DHPH ψ_m センサは既存のセンサ類よりも温度依存性が小さく、特に C の温度依存性が小さいことがわかった。これにより、地温変化が大きい場合には C を、そうでない場合はより精度の高い λ を ψ_m 推定の指標として用いることができ、DHPH ψ_m センサの有効性が示された。

おわりに： DPHP 法を用いた ψ_m センサを開発し、その性能を評価した。DHPH 法で測定した多孔質体の C と λ は 2 つの交差する 1 次式を用いることで ψ_m の対数値へと換算できた。 λ を用いたほうが C を用いる場合よりも推定精度が高く、10% 程度の精度を持つことがわかった。また、DHPH ψ_m センサは既往のセンサ類よりも小さい温度依存性を示し、特に C を用いた場合には水分量に関わらず温度依存性が小さかった。DHPH ψ_m センサは、測定対象地の状況に応じて C と λ を使い分けることで精度良い ψ_m 測定が可能な有用なセンサであった。

謝辞： 本研究は生研センター「革新的技術創造促進事業（異分野融合共同研究）」の支援を受けて行った。

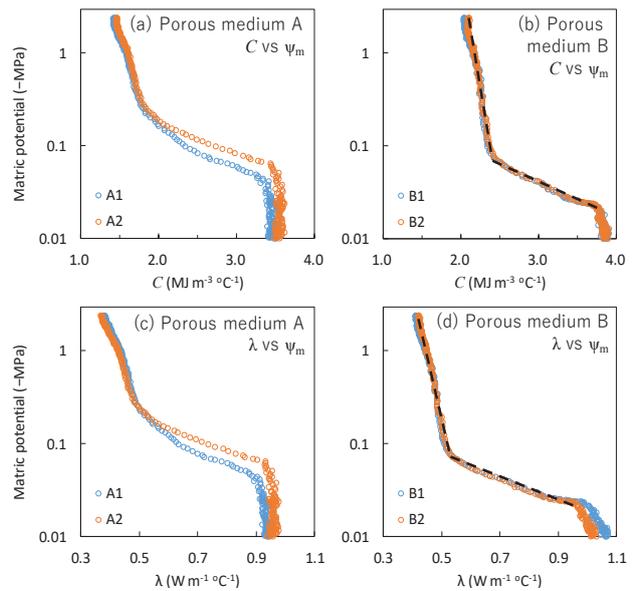


Fig. 2 Relationships between (a) matric potential (ψ_m) and volumetric heat capacity (C) for porous medium A, (b) ψ_m and C for porous medium B, (c) ψ_m and thermal conductivity (λ) for A, and (d) ψ_m and λ for B.

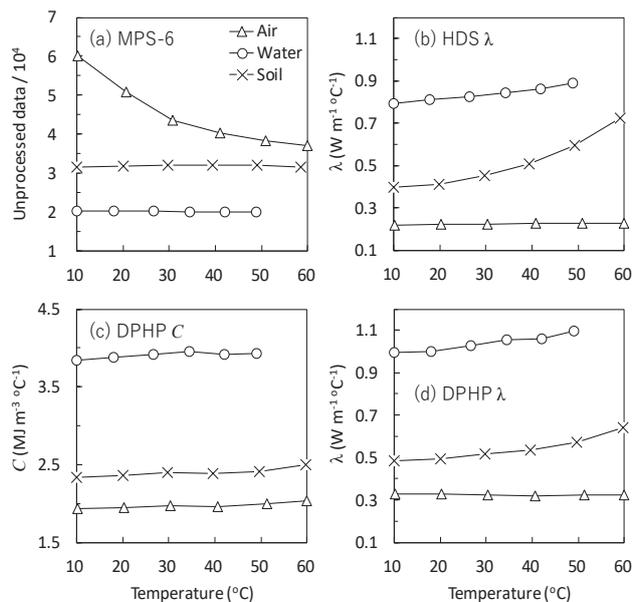


Fig. 3 Temperature dependence of (a) unprocessed data of MPS-6, (b) thermal conductivity λ measured with heat dissipation sensor, (c) volumetric heat capacity C , and (d) λ measured with the dual probe heat pulse (DHPH).