

異なる土性と水分量の土壌へのPVCシリンダー法の適用による体積熱容量の測定 Measuring Volumetric Heat Capacity of Different Soil Textures and Moisture Contents with the PVC Cylinder Method

磯貝好輝¹・佐藤直人²・登尾浩助²

¹ 明治大学大学院農学研究科・² 明治大学農学部

要旨(Abstract)

複数の水分条件の豊浦砂および灰色低地土の体積熱容量をPVCシリンダー法で測定し、dual-probe heat-pulse (DHP)法およびモデル式による結果と比較した。豊浦砂においてはモデルとよく一致したが、灰色低地土においては過大評価された。風乾条件の2種類の土壌の比較から、土壌の熱伝導率がPVCに対して小さいと体積熱容量が過大評価されることが示唆された。

キーワード：熱的性質, シリンダー法, DPHP法

Keywords: thermal properties, cylinder method, dual-probe heat-pulse method

1. はじめに

登尾ら(2005)は、熱拡散係数を簡易に推定する方法としてシリンダー法を提案した。Noborio et al. (2019)は、シリンダー法を改良し、シリンダーに流入する熱フラックスと土壌中心温度の変化から体積熱容量を得る理論を発表した。磯貝ら(2023)はAlシリンダー内外の温度から熱フラックスを計算したが、アルミニウムの急速な温度変化を正しく測定できなかった。そこで、磯貝ら(2024)は熱伝導率が小さいポリ塩化ビニル(PVC)管を用いて風乾の豊浦砂の体積熱容量を測定し、DHP法による結果とよく一致することを示した。しかし、異なる土性や体積含水率での測定精度は未検証である。本研究ではそれらの条件を変えて実験を行い、PVCシリンダー法が適用可能な土壌の物理性について考察した。

2. 理論

土壌が充填された、長さ L [m]、内径 r [m]、厚さ d [m]のシリンダーについて考える。恒温水槽に沈めたときにシリンダー壁面から流入する熱フラックス q_{in} [$W m^{-2}$]は、シリンダーの外側/内側の温度 T_{out}/T_{in} [$^{\circ}C$]とシリンダーの

熱伝導率 $\lambda_{cylinder}$ [$W m^{-1} ^{\circ}C^{-1}$]を利用して以下の式(1)で表される(磯貝ら, 2023)。

$$q_{in} = \lambda_{cylinder} \frac{T_{out} - T_{in}}{d} \quad (1)$$

土壌の中心温度が ΔT_c [$^{\circ}C$]変化して水温と一致した時刻 t_{max} [s]までに土壌カラムに加えられる熱量の総量について、以下の等式(2)が成り立つ(Noborio et al., 2019)。

$$\int_0^{t_{max}} 2\pi r L \cdot q_{in} dt = C_v \cdot \pi r^2 L \cdot \Delta T_c \quad (2)$$

ここで、 C_v は体積熱容量 [$J m^{-3} ^{\circ}C^{-1}$]であり、式(2)から C_v が得られる。

3. 材料および方法

供試土壌には豊浦砂と灰色低地土を用いた。豊浦砂の体積含水率 θ [$m^3 m^{-3}$]は、風乾, 0.1,

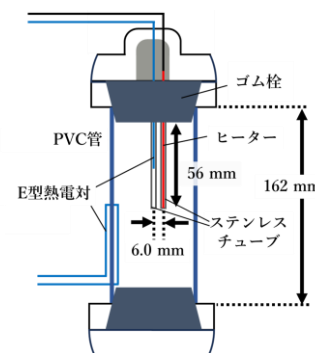


Fig. 1 実験装置の模式図。

0.2, 0.3 程度の 4 条件, 灰色低地土は風乾と 0.3 程度の 2 条件とした。Fig. 1 に示す装置に土壌を充填し, PVC シリンダー法と DPHP 法の双方で体積熱容量を測定した。また, 以下のモデル式(3) (Campbell, 1985) と結果を比較した。

$$C_v = c_s \rho_d + c_w \rho_w \theta \quad (3)$$

固相の比熱 (c_s) はカロリメトリ法で測定し, 豊浦砂は $0.784 \text{ J g}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 灰色低地土は $0.817 \text{ J g}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ を用いた。

4. 結果および考察

豊浦砂において, PVC シリンダー法で得た体積熱容量は DPHP 法よりも過大評価される傾向にあったが, モデルとはすべての体積含水率でよく一致した (Fig. 2 a)。一方, 灰色低地土においては, いずれの体積含水率でもモデルと比較して過大評価され, DPHP 法と比較しても過大評価された (Fig. 2 b)。

風乾の灰色低地土は風乾の豊浦砂と比較して, 実験開始直後のシリンダー内側の温度の上昇が速かった (Fig. 3)。DPHP 法により得られた熱伝導率は, 灰色低地土が $0.16 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 豊浦砂が $0.26 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ であったのに対し, PVC の熱伝導率は $0.16 \sim 0.17 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (Van Krevelen et al., 2009) であるので, 灰色低地土の方が, シリンダーから流入した熱が土壌との境界付近に滞りやすかったと考えられる。また, 磯貝ら (2023) の AI シリンダーを用いた実験では, 急激な温度変化が熱フラックスの過大評価の要因であった。以上より, 土壌の熱伝導率が PVC のそれに対して小さいと, 体積熱容量の過大評価につながると考えられる。

湿潤条件の灰色低地土では団粒状の構造が多く見られた。また, 圧密するとプローブを挿入できないほど固くなるので, 低い乾燥密度 (0.79 g cm^{-3}) で充填した。そのため, 他の条件と比較して大きな間隙が存在していた。空気の体積熱容量は非常に小さく, 通常無視される

(Campbell, 1985) が, 間隙中への蒸発潜熱で熱が奪われた可能性がある。その分, 土壌の温度上昇により多くの熱を必要としたことが過大評価の原因の一つであると考えられる。

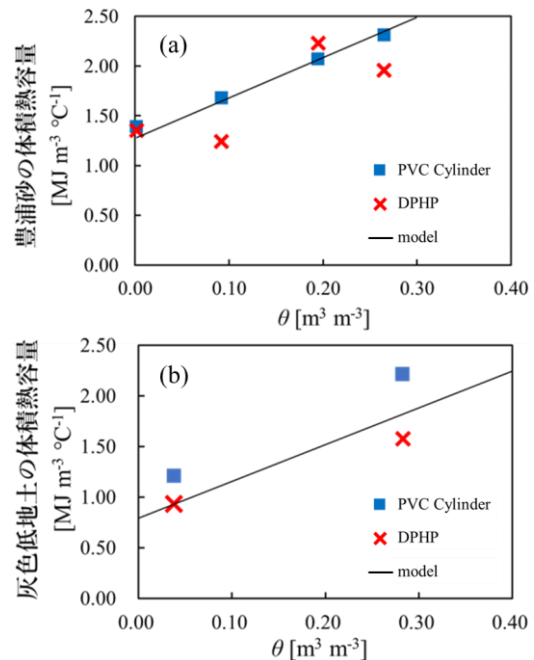


Fig. 2 シリンダー法, DPHP 法およびモデルにより得られた, 各体積含水率 θ [$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$] の体積熱容量 [$\text{MJ m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$]. (a)は豊浦砂, (b)は灰色低地土。

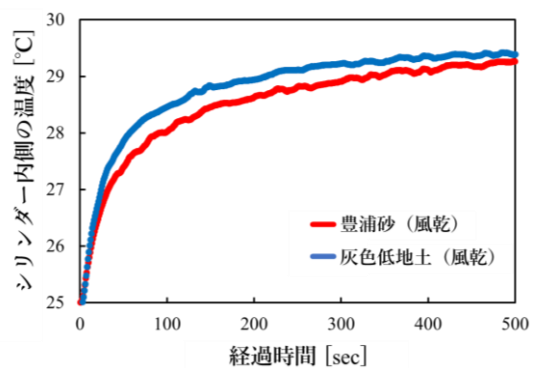


Fig. 3 風乾条件の豊浦砂および灰色低地土におけるシリンダー内側の温度変化 [$^\circ\text{C}$].

参考文献等

- ・ Campbell, G. S. (1985), Soil physics with BASIC. Transport models for soil-plant systems, p. 31. Elsevier Science Publ. Co., New York.
- ・ 磯貝ら (2023), 土壌の熱的性質測定法であるシリンダー法と DPHP 法の比較, 2023 年度土壌物理学大会講演要旨集, pp. 92-93
- ・ 磯貝ら (2024), ポリ塩化ビニル管を用いた体積熱容量の推定, 2024 年度 (第 73 回) 農業農村工学会大会講演会講演要旨集, pp. 835-836
- ・ 登尾ら (2005), シリンダーに充填した土壌の熱拡散係数を簡易に推定する方法, J. Jpn. Soc. Soil Phys., No. 101, pp. 5-10
- ・ Noborio et al. (2019), A new method for determining thermal properties using cylindrical soil column and heat flux plate. ASA/CSSA/SSSA annual meeting abstract.
- ・ Van Krevelen et al. (2009), Properties of Polymers: Their Correlation with Chemical Structure; Their Numerical Estimation and Prediction from Additive Group Contributions, p. 648