

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 Comparison of soil thermal properties measurement methods, cylinder method and DPHP method

磯貝好輝¹・佐藤直人¹・登尾浩助¹

¹ 明治大学農学部

要旨(Abstract)

シリンダー法と dual-probe heat-pulse (DPHP)法を用いて同一土壌の熱的性質を測定し、結果を比較した。いずれの熱的性質においてもシリンダー法の方が DPHP 法よりも約 10 倍から 100 倍大きな値を示す傾向が見られた。熱電対の温度測定時のノイズを減らすことと、温度の測定間隔を小さくすることを両立させることが、シリンダー法の課題であ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

DPHP 法は、一方を熱源、もう一方を温度計とした 2 本のプローブを用いて土壌の熱的性質を測定する方法である。Noborio ら(2019)は、土壌を充填したアルミニウム (Al) シリンダーを恒温水槽に沈め、流入する熱フラックスと中心温度の変化からすべての熱的性質を測定する方法を発表した。本研究では熱フラックス測定に E 型熱電対を用い、2 つの測定法の結果を比較した。

2. 理論

(1) シリンダー法

土壌が充填された単位高さの Al シリンダーを考える。水温 T_w [°C] の恒温水槽に沈めたときに流入する熱フラックスを q_{in} [W/m²] としたとき、最高温度変化 ΔT_m [°C] になる時刻 t_m [s] までに土壌カラムに加えられる熱量 H [J] は、一方に体積熱容量 C_v [J/°C/m³] を用いて以下の 2 通りで表される。

$$H = \int_0^{t_m} 2\pi r q_{in} dt$$

$$H = C_v \cdot \pi r^2 \cdot \Delta T_c$$

この 2 式から H を消去することで、体積熱容量 C_v [J/°C/m³] が求められる。

また、熱拡散係数 κ [m²/s] と時刻 t [s] における土壌カラムの中心温度 $T_c(t)$ [°C] について、以下の関係式がわかっている (登尾ら, 2005)。

$$\frac{\kappa t}{r^2} = 1.68 \exp \{-1.94[-2 \ln(T_r(t))]\}^{3.53}$$

ここで、 $T_r(t)$ は相対温度である。この関係式を用いて熱拡散定数 κ [m²/s] を求められる。

熱伝導率 λ [W/m/°C] は、 $\lambda = C_v \kappa$ の関係から求められる。

(2) DPHP 法

熱源から q [W/m] の熱を t_0 [s] 出力したときの、距離 r_0 [m] 離れたプローブにおける時刻 t [s] での温度変化を考える。最高温度変化を ΔT_m [°C]、その時の時刻を t_m [s] とすると、熱拡散係数 κ [m²/s] および体積熱容量 C_v [J/°C/m³] は以下の式で表される (Bristow ら, 1994)。

$$\kappa = \frac{r^2}{4} \left(\frac{1}{t_m - t_0} - \frac{1}{t_m} \right) / \ln \left(\frac{t_m}{t_m - t_0} \right)$$

$$C_v = \frac{q}{4\pi\kappa\Delta T_m} \left[Ei \left(\frac{-r^2}{4\kappa(t_m - t_0)} \right) - Ei \left(\frac{-r^2}{4\kappa t_m} \right) \right]$$

熱伝導率 λ [W/m/°C] は、 $\lambda = C_v \kappa$ より、以下の式で表される (登尾ら, 2002)。

$$\lambda = \frac{q}{4\pi\Delta T_m} \left[Ei \left(\frac{-\ln[t_m/(t_m - t_0)]}{t_0/t_m} \right) - Ei \left(\frac{-\ln[t_m/(t_m - t_0)]}{t_0/(t_m - t_0)} \right) \right]$$

3. 材料および方法

図1に示す装置に豊浦砂を充填し、シリンダー法と DPHP 法の双方で熱的性質の測定を行った。体積含水率 θ [m^3/m^3] は、0, 0.1, 0.2, 0.3 程度に調整してそれぞれ実験を行った。

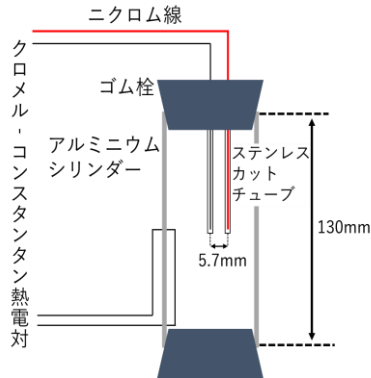


図1: 実験装置の概略図。中心のプロープの温度計は2つの方法で共用する。もう一方のプロープは DPHP 法の熱源とする。Al シリンダーの外内外に付けた熱電対は、シリンダー法での $q_{in}[\text{W}/\text{m}]$ の測定に利用する。

4. 結果および考察

シリンダー法および DPHP 法で測定した各体積含水率 θ [m^3/m^3] の熱拡散係数 κ [m^2/s], 熱伝導率 λ [$\text{W}/\text{m}/\text{C}$], 体積熱容量 C_v [$\text{J}/\text{C}/\text{m}^3$] を図2に示す。 κ は $\theta=0.2$ はほぼ同じ値を示したが、 $\theta=0, 0.1, 0.3$ ではシリンダー法が DPHP 法の10倍近く大きい値を示した。 C_v は $\theta=0.2$ のときは約100倍、 $\theta=0, 0.1, 0.3$ では約10倍近く大きい値を示した。 λ は $\lambda = C_v \kappa$ により求めたため、 C_v と κ に連動してシリンダー法が100倍程度大きな値を示した。

図3に $\theta=0$ でシリンダー法による測定を行った際の流入熱フラックス $q_{in}[\text{W}/\text{m}]$ の経時変化を示す。この図から q_{in} が波打って変化したことがわかる。 $\theta=0.1, 0.2, 0.3$ でも q_{in} が波打って変化した。これは熱電対での温度測定時のノイズが原因だと考えられる。本研究で用いたデータロガー(CR1000, Campbell Scientific)にはノイズを軽減する機能があるが、それを使用するには測定間隔を長くする必要がある。一方で、正確な熱的性質を測定するには、測定開

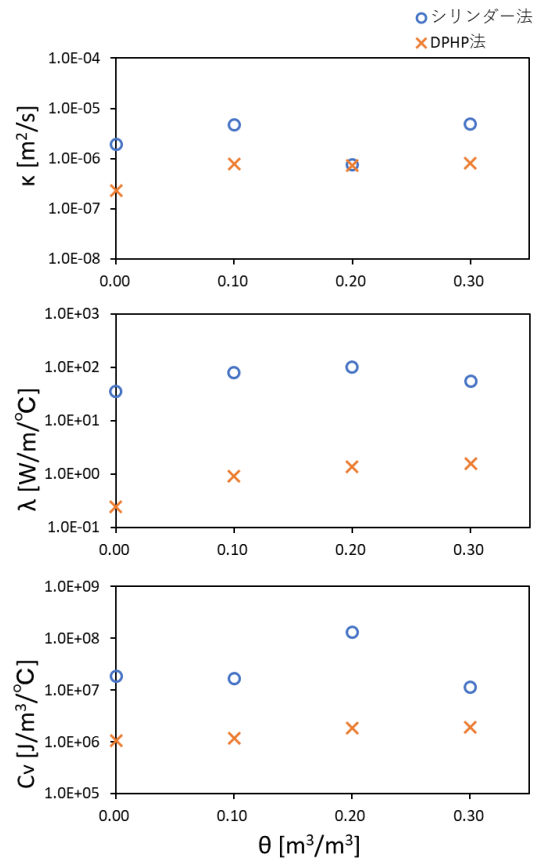


図2: シリンダー法と DPHP 法による、各体積含水率 θ [m^3/m^3] の熱拡散係数 κ [m^2/s], 熱伝導率 λ [$\text{W}/\text{m}/\text{C}$], 体積熱容量 C_v [$\text{J}/\text{C}/\text{m}^3$] の測定結果

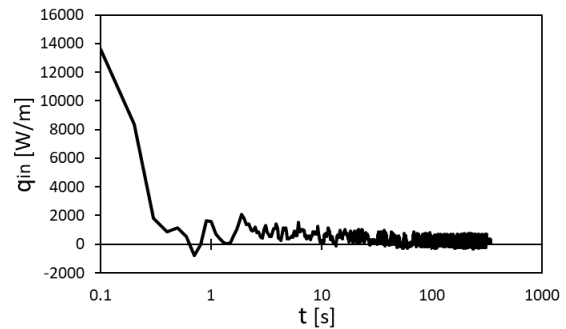


図3: $\theta=0$ での、シリンダー法における熱フラックス q_{in} [W/m] の時間変化

始直後の大きな熱フラックスを可能な限り短い間隔で測定する必要がある。これらの両立がシリンダー法の課題であると考えられる。

参考文献等

- Bristow et al (1994), Comparison of Single and Dual Probes for Measuring Soil Thermal Properties with Transient Heating, Aust. J. Soil Res., 1994, 32, 447-64
- Noborio et al (2002), 双子プローブ熱パルス法による土壌の熱的性質測定の比較, J. Jpn. Soc. Soil Phys., No. 90, p. 3-9
- Noborio et al (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, p. 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.