

土壌中の礫が DPHP センサによる熱特性計測に与える影響 Effect of gravel on DPHP sensor measurements of soil thermal properties

○鈴木拓実¹, 小島悠揮², 神谷浩二²

Takumi SUZUKI, Yuki KOJIMA, Kohji KAMIYA.

1) 研究の背景と目的

土壌の熱特性を原位置で把握することは土中の熱輸送解析において重要である。さらに、土壌の熱特性は乾燥密度や含水率など、他の物理的性質の推定にも有用である（例えば、Lu et al., 2016）。Dual Probe Heat pulse (DPHP) センサ(Campbell et al., 1991; Bristow et al., 1994)は土壌の体積熱容量, 熱拡散係数, 熱伝導率を原位置で計測する技術として広く用いられている。DPHP センサはセンサプローブの一つが発熱し, 他方のプローブで温度変化を計測する。発熱量と温度変化から土壌の熱特性を求めることができる。

DPHP センサによる熱特性計測は土壌を均質なものと仮定しており, センサプローブに礫などの土壌とは異なる熱特性を有する物質が近接する場合, 熱特性の測定に影響する可能性がある。そこで本研究では, DPHP センサによる体積熱容量, 熱拡散係数および熱伝導率の計測に礫の存在が与える影響を数値解析的に評価することを目的とした。

2) 実験方法

偏微分方程式ソルバー Flex PDE (PDE solutions, Spokane Valley, WA, USA)を用いてフーリエ則に基づく3次元熱伝導解析を行った。土壌領域(縦60 mm×横60 mm×高さ40 mm)に長さ40 mm, 直径1.3 mmのプローブを間隔6 mmで配置した(図1)。発熱プロ

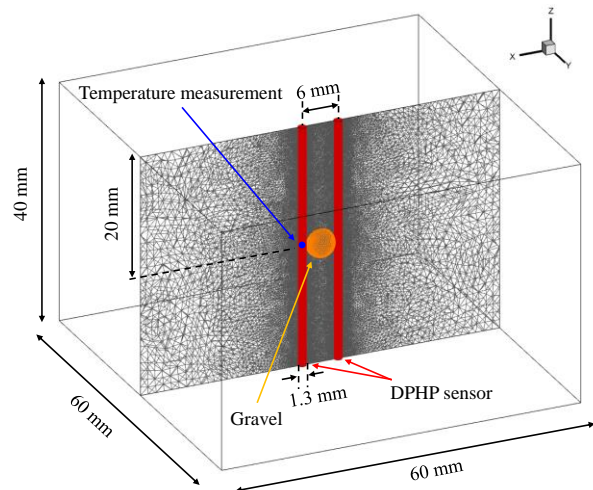


図1 解析領域

ーブから 70 W m^{-1} で8秒間の発熱を与え, 検温プローブの中央における温度を出力した。なお, 解析領域の上下面は断熱境界条件を与えた。出力された温度変化と Campbell et al. (1991) および Bristow et al. (1994) の解析解(式(1)から式(3))から体積熱容量 $\rho_c (\text{J m}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$, 熱拡散係数 $\kappa (\text{m}^2 \text{ s}^{-1})$, 熱伝導率 $\lambda (\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$ を算出した。

$$\rho_c = \frac{q}{e\pi r^2 \Delta T_m} \quad (1)$$

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

$$\lambda = \kappa \rho_c \quad (3)$$

ここで q は単位長さ当たりの発熱量 (J m^{-1}), r はプローブ間隔 (m), ΔT_m は最大温度変化 ($^\circ\text{C}$), t_m と t_0 はそれぞれ最大温度到達時間, 発熱時間 (s) である。

¹ 岐阜大学大学院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

キーワード: DPHP, 礫, 体積熱容量, 熱伝導率

表 1 解析に用いたパラメータ

	Soil	Gravel	Probe
Thermal conductivity ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	0.54	1.80	14.9
Heat capacity ($\times 10^6 \text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$)	2.27	2.40	2.84
Thermal diffusion coefficient ($\times 10^{-7} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	2.37	7.50	52.5

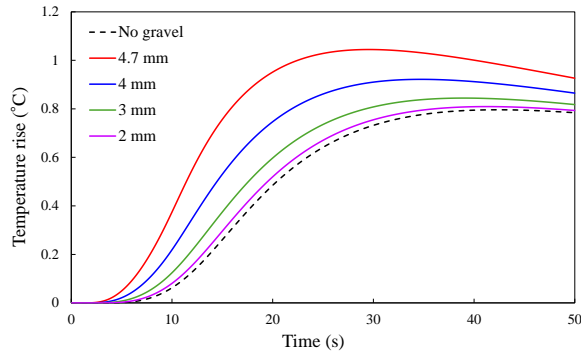


図 2 温度変化

Asano et al. (2023) および VDI 4640 (2010) より土壌および礫の体積熱容量と熱伝導率を決定した. 検温プローブの体積熱容量には Knight et al. (2012) より, ステンレスとエポキシ樹脂の平均化した体積熱容量, 熱伝導率はステンレスのものをを用いた (表 1). 礫がプローブ間の中央部に存在する場合を想定し, 礫の直径が 4.7 mm, 4.0 mm, 3.0 mm, 2.0 mm の場合について熱輸送解析を行い, その時の熱特性計測に及ぼす影響を評価した.

3) 結果と考察

検温プローブの温度変化を図 2 に示す. 礫が大きいかほど温度上昇量も大きくなり, 最高温度は礫が 4.7 mm の時には礫がない時と比較して, 0.25°C 増加した. 最高温度到達時間も礫が大きいかほど早かった. これは礫の熱伝導率と体積熱容量が土壌に比べて大きく, 礫内部で大きな熱輸送が生じた (図 3) ことで, 検温地点に向かう熱量が増加し, また熱の輸送速度も増加したためであると考えられる. 温度上昇量が増加し, 最大温度到達時間が減少したことで, 推定される体積熱容量は小さ

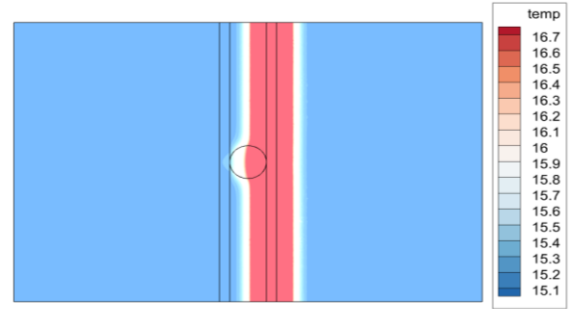


図 3 断面の温度分布

表 2 温度変化から得られた熱伝導率, 体積熱容量, 熱拡散係数

Diameter of gravel	No gravel	4.7 mm	4 mm	3 mm	2 mm
Thermal conductivity ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	0.54	0.62	0.59	0.56	0.55
Heat capacity ($\times 10^6 \text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$)	2.29	1.74	1.98	2.16	2.25
Thermal diffusion coefficient ($\times 10^{-7} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	2.37	3.57	2.97	2.59	2.43

く, 熱拡散係数は大きくなること明らかとなった (表 2). 礫がない時と直径 4.7 mm の礫が存在する時を比較すると, 体積熱容量は約 24% 小さく, 熱拡散係数は約 51% 大きく推定された. 熱伝導率は体積熱容量と熱拡散係数の積で表される. 体積熱容量の減少割合より, 熱拡散係数の増加割合が大きいため, 礫があると僅かに増加し, 最大で 15% 増加した.

4) 結論

DPHP センサによる土壌熱特性測定の際にプローブの間に存在する礫の影響を数値解析的に評価した. 礫の直径が大きいかほど検温プローブの温度上昇量は大きくなり, これに伴って体積熱容量は過小評価されることが明らかとなった. 一方で熱伝導率に関してはその影響が小さいことが明らかとなった.

【引用文献】 Asano et al. 2023. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1165 012045; Bristow et al. 1994. Soil Sci. Soc. Am. J.58:1288-1294; Campbell et al. 1991. Soil Sci. Soc. Am. J.55:291-293; Knight et al. 2012. Vadose Zone J. 11(2); VDI. 2010.

【謝辞】 越山科学技術振興財団の助成を受けた.