

土壌中の礫が DPHP センサの計測に与える影響の解明 ～含水状態が異なる土壌での解析事例～

Effect of gravel on DPHP sensor measurements of soil thermal properties -A case study of analysis in soils with different moisture conditions-

鈴木拓実¹・小島悠揮²・神谷浩二²

¹岐阜大学大学院自然科学技術研究科・²岐阜大学工学部

要旨(Abstract)

土壌と礫の熱特性の違いが DPHP センサ計測に与える影響を数値解析的に評価した。センサ検針間の中央に礫が存在すると仮定し、2種類の土壌について体積含水率を変化させながら FlexPDE による 3次元熱伝導解析を行った。その結果、特に乾燥状態では礫の存在によって温度上昇量、温度上昇速度が増加した。また、熱特性の推定については礫と土壌の熱拡散係数の差が小さいほど推定誤差が小さくなることが明らかとなった。

キーワード：礫, DPHP, 体積熱容量, 熱伝導率

Key words: gravel, DPHP, volumetric heat capacity, thermal conductivity

1.はじめに

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, センサ検針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。また, 土壌熱特性は含水状態にも依存するため, 礫がセンサ計測に与える影響は土壌の含水率によっても変化すると考えられる。そこで本研究では, 体積熱容量, 熱拡散係数および熱伝導率の原位置計測に関して, 土壌と礫の熱特性の違いがセンサ計測に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 FlexPDE (PDE

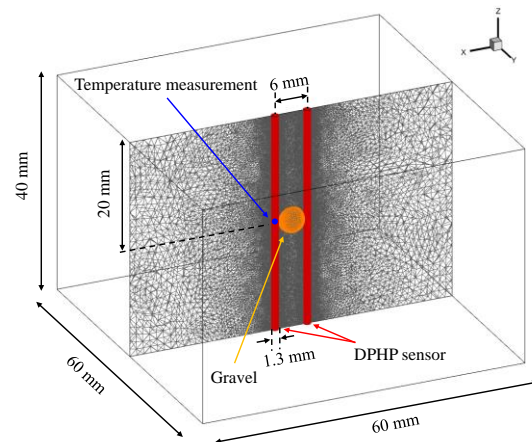


図1 解析領域

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の検針を中心間距離6 mmで配置した(図1)。片側の検針に70 W m⁻¹で8秒間の発熱を与え, もう一方の検針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 C (J m⁻³ °C⁻¹), 熱拡散係数 κ (m² s⁻¹), 熱伝導率 λ (W m⁻¹ °C⁻¹)を算出した。

表1 解析に用いたパラメータ

θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	岐阜土壌			高山土壌			Gravel	Probe
	0.1	0.3	0.6	0.1	0.4	0.8		
λ ($\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)	0.66	1.08	1.51	0.20	0.54	0.96	1.80	14.9
C ($\text{MJ m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)	1.56	2.39	3.64	1.07	2.27	3.99	2.40	2.84
κ ($\times 10^{-7} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	4.22	4.53	4.14	1.82	2.37	2.41	7.50	52.5

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

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

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

ここで q は線熱量 (J m^{-1}), r は検針間隔 (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。

土壌の熱特性は Asano et al. (2023) より決定した。岐阜大学実験圃場土 (以下, 岐阜土壌) と岐阜大学流域圏科学研究センター高山試験地土壌 (以下, 高山土壌) について乾燥状態 ($\theta=0.1$), 平均的な含水状態 ($\theta=0.3, 0.4$) および飽和状態 ($\theta=0.6, 0.8$) の体積熱容量と熱伝導率を用いた。礫および検針の熱特性はそれぞれ VDI 4640 (2010), Knight et al. (2012) より決定した (表1)。直径 4.7 mm の礫が検針間の中央に存在すると仮定し, 土壌の種類, 体積含水率を変えて解析を行い, その結果を比較した。

3. 結果と考察

出力された温度変化を図2に示す。どちらの土壌でも礫の有無によって温度上昇量, 温度上昇速度が大きくなり, 特に乾燥状態ではその傾向が顕著であった。岐阜土壌では $\theta=0.1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ の時について, 最大温度上昇量はおよそ 0.3°C 増加し, 最大温度到達時間は 4.9 秒早くなっている。高山土壌でも乾燥状態では, 最大温度変化は 0.8°C 増加, 最大温度到達時間は 21.4 秒早くなっている。これは乾燥状態では, 土壌の体積熱容量が小さいため, 温度上昇がしやすいことに加え, 土壌よりも礫の熱伝導率が高いことによって, 礫内部を伝わる熱量が増加したためであると考えられる。

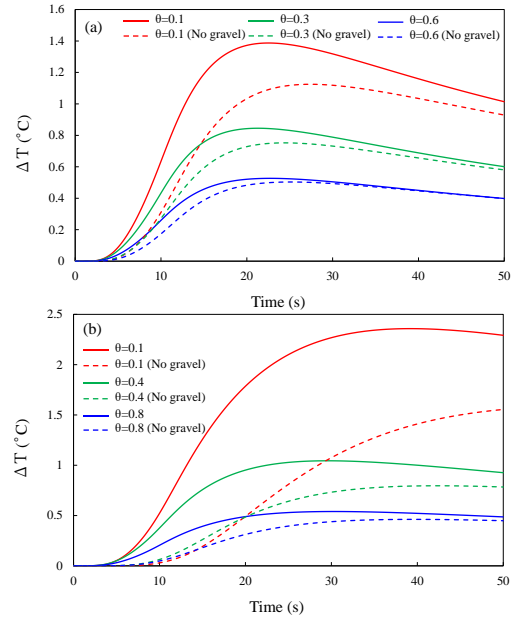


図2 温度変化 (a)岐阜土壌, (b)高山土壌

表2 推定される熱特性

θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	岐阜土壌			高山土壌		
	0.1	0.3	0.6	0.1	0.4	0.8
λ ($\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)	0.66	1.16	1.71	0.20	0.62	1.17
C ($\text{MJ m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)	1.31	2.16	3.46	0.77	1.74	3.37
κ ($\times 10^{-7} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	5.02	5.40	4.97	2.58	3.57	3.48

温度変化から推定される熱特性 (表2) と入力された土壌パラメータ (表1) を比較すると, どの含水率においても, 岐阜土壌のほうが高山土壌よりも熱特性の推定精度が高いことが分かった。これは岐阜土壌が高山土壌よりも熱拡散係数が礫のものに近いこと, 温度上昇量と流入する熱量の割合が礫と土壌で差が小さいためであると考えられる。

4. おわりに

土壌と礫の熱特性の違いが DPHP センサの計測に与える影響を数値解析的に評価した。特に乾燥状態では, 礫の存在によって検温地点の温度上昇量, 温度上昇速度が大きくなることが明らかとなった。また, 土壌と礫の熱拡散係数の差が小さいほど, 熱特性計測に与える影響は小さいことが明らかとなった。

【謝辞】 越山科学技術財団の支援を受けた。

【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; Chung, S. O., and R. Horton. 1987. Water Resources Research. 23(12):2175-2186; Knight et al. 2012. Vadose Zone J. 11(2); VDI. 2010.