

土壌の熱伝導率測定法の比較

望月秀俊*・坂口 巖*・井上光弘*

Comparison of the Methods Measuring of Soil Thermal Conductivity

Hidetoshi MOCHIZUKI*, Iwao SAKAGUCHI* and Mitsuhiro INOUE*

Arid Land Research Center, Tottori University, 1390 Hamasaka, Tottori 680-0001, Japan

Abstract

We measured thermal conductivity of Tottori dune sand and water using four methods, single heat probe (SPM), twin heat probe (TPM), dual heat probe (DPM), and Decagon probe (KDM). The measured values were compared. The thermal conductivity values measured with SPM and DPM are similar, and those with TPM and KDM are also similar. The thermal conductivity of water measured with KDM was as high as the value reported in literature, on the other hand the values obtained using SPM and DPM were higher than the reported data. As a result, KDM and TPM are recommended to measure soil thermal conductivity.

Key words : thermal conductivity, single heat probe method, twin heat probe method, dual heat probe method, Decagon probe method

1. はじめに

土壌の熱的特性、特に土壌の熱伝導率の測定には、これまで Single Heat Probe 法(de Vries and Peck, 1958 ; Taylor and Jackson, 1986 ; Shiozawa and Campbell, 1990 ; 中野ら, 1995)やTwin Heat Probe法(Kasubuchi, 1977 ; 粕淵, 1982), Dual Heat Probe 法 (Campbell *et al.*, 1991 ; Bristow *et al.*, 1994 a ; Bristow *et al.*, 1994 b ; Bristow *et al.*, 1995 ; Ren *et al.*, 1999 ; 登尾ら, 2002)など幾つかの方法が提案されているが、同一試料の熱伝導率を種々の方法で測定し、比較した研究は少ない。Bristow *et al.* (1994 b) は、風乾砂の熱特性を Single Heat Probe 法 (以下, SP 法) と Dual Heat Probe 法 (以下, DP 法) を用いて測定し、両手法で測定した熱伝導率がよく一致することを示した。また, DP法は、熱伝導率のみならず体積熱容量や熱拡散係数を同時に測定できるため、DP法がより優れた測定法であると結論づけた。登尾ら (2002) は、de Vries モデル (de Vries, 1963) を用いた予測値を基準として、広範囲の土壌水分量のもとで、壤砂土の体積熱容量と熱伝導率を SP 法と DP 法を用いて測定し、その差異を検討した。その結果、DP 法には3つの解析法があるが、どの解析法を用いても計算結果に大きな差

がないことを示した。また、SP法を用いると、低・中水分量域で加熱により増加した接触抵抗の影響を受けやすいため、熱伝導率が過小評価されることを示した。以上のような熱伝導率が未知の物質を用いて種々の方法による測定結果を比較した研究はあるものの、熱伝導率が既知の物質を用いて測定法の精度を検討した例は見当たらない。そこで、本研究では、SP法、Twin Heat Probe 法 (以下, TP 法)、DP法、最近市販された熱特性測定器 KD2 (Decagon 社製) を用いた Decagon Probe 法 (以下, KD 法) を採用し、これらの方法によって、鳥取砂丘砂の熱伝導率を測定し、比較した。また、熱伝導率が既知である水 (1% 寒天ゲル) の熱伝導率も測定し、測定法の精度を検討した。

2. 実 験

2.1 方 法

熱伝導率の測定法として広く用いられている SP 法、TP 法、DP 法と最近市販された測定器を用いた KD 法の4つの方法を用いて、表1の文献で示された方法で試料の熱伝導率を測定した。また、各測定は3回反復した。本研究で特記すべき事項は表1の備考の項に示した。DP法の解析には、最も簡便な一点法を採用した。

*鳥取大学乾燥地研究センター 〒680-0001 鳥取市浜坂 1390

キーワード : 熱伝導率, Single Heat Probe 法, Twin Heat Probe 法, Dual Heat Probe 法, Decagon Probe 法

2.2 試料と実験条件

矢野ら (1983) によってその物理性が明らかになっている鳥取砂丘砂を実験に供した。鳥取砂丘砂は事前に水分量を調整し、乾燥密度 $1.55 \pm 0.01 \text{ Mg m}^{-3}$ で、実験用アクリル円筒カラム (内径 46 mm, 高さ 65 mm) に充填した。試料の含水比は風乾, 0.01, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.15, 0.20 kg kg^{-1} である。また、熱伝導率が既知である 1% 寒天ゲル ($0.6072 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) も実験に供した。全ての実験は鳥取大学乾燥地研究センター内の 25°C に設定した恒温室で行った。

3. 結 果

4つの方法で測定した鳥取砂丘砂の熱伝導率を図1に示した。風乾から飽和までの全水分域で、SP法とDP法、TP法とKD法はそれぞれ近い測定値を示した。また、SP法とDP法は、TP法やKD法に較べて、高い測定値を示した。TP法とKD法の測定値は全水分域でよい一致を示したが、SP法の測定値は、含水比 $0.05\text{--}0.15 \text{ kg kg}^{-1}$ では、DP法の測定値よりも高い値を示した。

表2に4方法による1%寒天ゲルの熱伝導率の測定値と文献値を示した。測定値は、SP法 > DP法 > 文献値 > KD法の順であった。KD法の測定値が文献値に最も近い値を示した。TP法については、基準物質を1%寒天ゲルとしたため、測定値は存在しないので、表2には示していない。

4. 考 察

SP法とDP法の測定値が近い値を示したことは、

表-1 本研究で用いた土壌の熱伝導率測定法と文献

Table 1 Measuring Methods of Soil Thermal Conductivity, and References

測定法	文 献	備 考
Single Heat Probe 法 (SP 法)	Shiozawa and Campbell (1990)	加熱時間 : 59.5 秒 プローブ外径 : 1 mm プローブ長さ : 60 mm 解析法 : 非線形最小自乗法
Twin Heat Probe 法 (TP 法)	Kasubuchi (1977)	基準物質 : 1% 寒天ゲル (0.6072 W/mK) 加熱時間 : 59.5 秒 SP 法と同一プローブ使用
Dual Heat Probe 法 (DP 法)	Bristow <i>et al.</i> (1994 a)	加熱時間 : 8 秒 プローブ外径 : 1 mm プローブ長さ : 40 mm プローブ間隔 : 6 mm 解析法 : 一点法
Decagon Probe 法 (KD 法)	Decagon Devices, Inc., (2001)	市販品 測定時間 : 150 秒

Bristow *et al.* (1994 b) や登尾ら (2002) の結果を支持するものである。また、登尾ら (2002) は低・中水分域で SP 法が熱伝導率を過小評価するとしたが、本研究では中水分域といえる範囲 (含水比 $0.05\text{--}0.15 \text{ kg kg}^{-1}$) で、SP 法の測定値が DP 法の測定値を上回った。この結果は登尾ら (2002) と反対の傾向である。また、中水分域では、TP 法と KD 法の測定値と SP 法と DP 法の測定

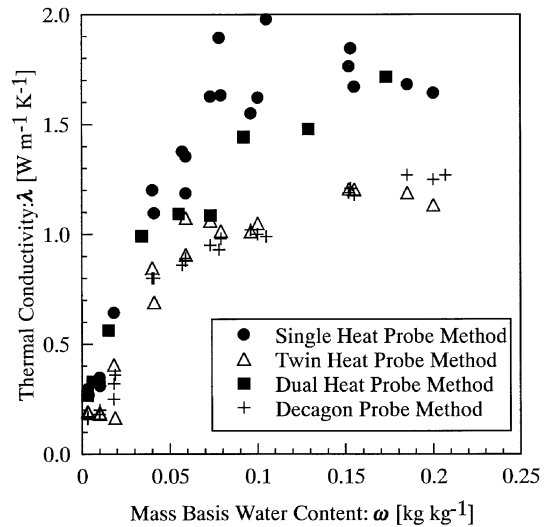


図-1 異なる方法による鳥取砂丘砂の熱伝導率
Fig. 1 Thermal Conductivity of Tottori Dune Sand Measured by Four Methods.

表-2 1%寒天ゲル（水）の熱伝導率の測定値と文献値
Table 2 Measured Thermal Conductivity of 1% Agar Gel (Water) and Standard Reference Data

測定法	1%寒天ゲル(水)の熱伝導率[Wm ⁻¹ K ⁻¹]
Single Heat Probe 法 (SP 法)	.6458
Dual Heat Probe 法 (DP 法)	.655
Decagon Probe 法 (KD 法)	.59
文献値 (日本化学会, 1993)	.6072

値の差が最も大きく、SP法とDP法ではこの水分域の熱伝導率を正確に測定することがより難しいことを示している。

表2に示したように、KD法の1%寒天ゲルの測定値が文献値と近い値を示したため、KD法の測定値は信頼性が高いと考えられる。また、KD法とTP法の測定値が全水分域において良い一致を示したことから、TP法についても熱伝導率を正確に測定できると考えられる。図1に示したように、SP法とDP法はTP法とKD法に較べて高い測定値を示したことから、SP法とDP法は熱伝導率を過大評価している可能性が示唆される。Kasubuchi (1977) は、SP法は試料の温度変化と理論式をフィッティングさせて熱伝導率を算出するが、理論式には考慮されていない、プローブ自体を伝った熱のリークが存在するため、熱伝導率を過大評価している。DP法についても同様に熱伝導率を過大評価していると考えられる。

これまでの結果を総合的に判断すると、土壌の熱伝導率の測定法としては、KD法とTP法が適していると考えられる。KD法は測定器が高価であるが、測定が正確かつ簡便である。また、TP法はデータロガーなどの装置が既に揃っている場合には、KD法よりも費用を抑えられるが、測定後の解析が必要である。

5. おわりに

土壌の熱伝導率を測定法としてよく知られるSP法、TP法、DP法と、最近市販された測定器を用いたKD法を用いて鳥取砂丘砂と1%寒天ゲルの熱伝導率を測定した。その結果、SP法とDP法は熱伝導率を高めに見積もり、TP法とKD法の測定値は熱伝導率の真の値に近い値を示す。このため、TP法とKD法が土壌の熱伝導率の測定法として適していると考えられる。

謝 辞

Single Heat Probe と KD2 は東京大学大学院農学生命科学研究科環境地水学研究室から借用して実験を行っ

た。ここに、記して深謝致します。

引用文献

- Bristow, K.L., Kluitenberg, G.J. and Horton, R. (1994 a): Measurement of Soil Thermal Properties with a Dual-Probe Heat-Pulse Technique. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **58** : 1288-1294.
- Bristow, K.L., White, R.D. and Kluitenberg, G.J. (1994 b): Comparison of Single and Dual Probes for Measuring Soil Thermal Properties with Transient Heating. *Aust. J. Soil Res.*, **32** : 447-464.
- Bristow, K.L., Bilskie, J.R., Kluitenberg, G.J. and Horton, R. (1995): Comparison of Techniques for Extracting Soil Thermal Properties from Dual-Probe Heat-Pulse Data. *Soil Sci.*, **160** (1) : 1-7.
- Campbell, G.S., Calissendorff, C. and Williams, J.H. (1991): Probe for Measuring Soil Specific Heat Using a Heat-Pulse Method. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **55** : 291-293.
- Kasubuchi, T. (1977) : Twin Transient-State Cylindrical-Probe Method for the Determination of the Thermal Conductivity of Soil. *Soil Sci.*, **124** (5) : 255-258.
- 粕淵辰昭 (1982) : 土壌の熱伝導に関する研究. *農技研報 B*, **33** : 1-54.
- 中野政詩・宮崎 毅・塩沢 昌・西村 拓 (1995) : 土壌物理環境測定法. pp. 195-210, 東京大学出版会, 東京.
- 日本化学会 (1993) : 化学便覧. p. II-68, 丸善, 東京.
- 登尾浩助・K.J. マクイネス・J.L. ハイルマン (2002) : 双子プローブ熱パルス法による土壌の熱的性質測定と比較. *土壌の物理性*, **90** : 3-9.
- Ren, T., Noborio, K., and Horton, R. (1999) : Measuring Soil Water Content, Electrical Conductivity, and Thermal Properties with a Thermo-Time Domain Reflectometry Probe. *Soil Sci. Soc. Am.*

J., **63** : 450-457.

Shiozawa, S. and Campbell, G.S. (1990) : Soil Thermal Conductivity. *Remote Sensing Reviews*, **5** (1) : 301-310.

Taylor, S.A. and Jackson, R.D. (1986) : Thermal Conductivity and Diffusivity. Ed. Klute, A., *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods* second edition, pp. 945-956, Madison.

de Vries, D.A. and Peck, A.J. (1958) : On the Cylindrical Probe Method of Measuring Thermal Con-

ductivity with Special References to Soils : 1. Extension of theory and discussion of Probe Characteristics. *Aust. J. Phys.*, **11** : 255-271.

de Vries, D.A. (1963) : *Thermal Properties of Soils*. Ed. van Wijk., W.R., *Physics of Plant Environment*, pp. 210-235.

矢野友久・井上光弘・小谷佳人 (1983) : 砂質土壌の土壌水分特性曲線とその温度依存性について. 鳥取大学砂丘研究所報告, **22** : 1-8.

受稿年月日 : 2002年1月10日

受理年月日 : 2003年4月7日