

土壌熱伝導率の測定と推定式の適用

諸泉利嗣* 佐藤裕一** 佐藤幸一** 佐々木長市***

Measurement of thermal conductivity in soils and application of de Vries model

Toshitsugu MOROIZUMI*, Yuichi SATO**, Koichi SATO** and Choichi SASAKI***

(Received November 28, 2003)

Thermal conductivity of soil samples were measured using a twin transient-state cylindrical-probe method. The system of measurement consists of DC power supply, data logger, personal computer, 100cc soil sample, reference material sample, and two heat probes. The typical results were as follows: (1) Thermal conductivity of soils increased according to an increase of soil water content. (2) The thermal conductivity of Toyoura sand was larger than one of Kuroboku soil. (3) The thermal conductivity estimated by de Vries model had good agreement with the measured value.

Key words: Thermal conductivity, Twin transient-state cylindrical-probe method, de Vries model, Volumetric water content

1 はじめに

土壌の温度環境は、土中の水や空気の移動、土中で生じる化学反応、微生物による有機物の分解、種子の発芽や生長など、土中で進行する物理的、化学的、生物学的諸変化のすべてに影響を与える。この土の温度環境を推定するためには、土壌の熱伝導率を知ることが極めて重要となる。

土壌の熱伝導率測定法には、定常法と非定常法がある。定常法は、一定の温度勾配を長時間試料に与えるのもで、土壌の場合、水や水蒸気、空気の移動を引き起こすため、正確な測定値が得られない。そのため土壌の熱伝導率測定には、わずかな熱量を短時間試料に与えるだけで測定できる非定常法が用いられる。非定常法には、単一プローブ法、双子型プローブ法、双曲熱パルス法などがあるが、いずれの方法も、無限大の試料中に入れた線熱源から一定時間に一定の発熱があるとき、線熱源の周囲の熱伝導率が大きい場合は線熱源自身の温度上昇が小さく、逆に周囲の熱伝導率が小さい場合には線熱源の温度上昇が大きいことを利用している（ファイトテクノロジー研

究会, 2002)。

本報告では、熱伝導率の測定法として双子型プローブ法を採用して3種類の土壌の熱伝導率を測定し、データ解析の方法、体積含水率と熱伝導率の関係を示した。さらに、熱伝導率の推定式として de Vries モデルを用いて、実験結果の妥当性とこの推定式の適合性について検討した。

2 測定原理と推定式

2.1 測定原理

熱伝導率は双子型プローブ法（粕淵, 1982）によって測定した。この方法は、2本のヒートプローブを用いて、熱伝導率が既知である試料と未知である試料との温度変化の比から熱伝導率を求めるものである。

温度 T_0 の物質中にある線熱源から単位時間、単位長さ当たりの一定の発熱がある場合の線熱源自身の温度は次式で表される。

$$T - T_0 = \frac{q}{4\pi\lambda} \{d + \ln(t + t_0)\} \quad (1)$$

ここで、 T : 時間 t における線熱源の温度、 λ : 固体の熱伝導率、 d : 定数、 t_0 : 補正項である。

*岡山大学環境理工学部, **北里大学獣医畜産学部
***弘前大学農学生命科学部

発熱停止後の温度変化は、同様に次式で表される。

$$T - T_0 = \frac{q}{4\pi\lambda} \{d + \ln(t + t_0)\} - \frac{q}{4\pi\lambda} \{d + \ln(t - t_1 + t_0)\} \quad (2)$$

ここで、 t_1 : 発熱停止時間である。

次に、熱伝導率の異なる2つの物質が同じ温度にあるとき、両者の中にある線熱源に同時に同量の熱が発生すると、両者の温度変化の比は熱伝導率の逆比になる。

$$\frac{T_a - T_{a0}}{T_b - T_{b0}} = \frac{\lambda_b}{\lambda_a}$$

$$\therefore \lambda_a = \lambda_b \frac{T_b - T_{b0}}{T_a - T_{a0}} \quad (3)$$

ここで、 a, b はそれぞれ熱伝導率が未知および既知の物質を表し、 0 は $t=0$ の時を示す。式(3)により、温度変化の比から簡単に熱伝導率が求められる。

実際の測定では、温度上昇および降下の両者を測定し、得られた結果を平均して試料の熱伝導率とする。また、基準物質としては1%寒天ゲルを用い、水の熱伝導率 ($0.6 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$, 20°C) を適用する。

2.2 熱伝導率の推定式

土壌の見かけの熱伝導率の推定には、比較的良好な熱伝導の実験結果に適合するといわれている de Vries モデル (1963) を用いた。

$$\lambda = \frac{f_w \lambda_w + k_s f_s \lambda_s + k_a f_a \lambda_a}{f_w + k_s f_s + k_a f_a} \quad (4)$$

ここに、 λ_i は土壌の構成物質の熱伝導率の平均値、 f_i は構成物質の体積分率で、それぞれ、 w =水、 a =空気、 s =土粒子を表す。ファクター k_i は土壌構成物質 i 内部の平均温度勾配の連続体中における温度勾配に対する比である。

$$k_i = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \left[1 + \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_0} - 1 \right) g_{ij} \right]^{-1} \quad (5)$$

ここに、 g_{ij} は構成物質 i の j 軸に対する形状係数である (Kimballら, 1976)。連続体は $k_i=1$ で、連続体の熱伝導率 λ_0 は乾燥空気では空気のもの、湿潤土壌では水のもの仮定している (登尾ら, 2002)。

3 実験方法

双子型プローブ法の測定システムは、直流定電圧電源、データロガー、パソコン、100cc 土壌試料、基準物質 (約

1%の寒天ゲル)、ヒートプローブからなる。直流定電圧電源を用いてヒートプローブに熱を供給する。ヒートプローブは、外径 1.0mm, 内径 0.5mm, 長さ 50mm のステンレスパイプの中に、ヒーターとしてエナメル被覆のコンスタンタン線と温度計として銅・コンスタンタン線熱電対を挿入し、パラフィンで固めたものを使用した。

実験手順は以下の通りである。

- ①土壌試料の水分量を調整する。
- ②100cc サンプラーに乾燥密度がほぼ等しくなるように水分調整した土壌試料を充填する。
- ③土壌試料と寒天ゲル (基準物質) のほぼ中央にそれぞれプローブを鉛直に挿入する。
- ④温度測定開始から 15 秒後に 10V の電源電圧を与え、150 秒間通電する。通電停止後の温度変化を 150 秒間測定する。温度はデータロガーを用いて 3 秒間隔で測定する。
- ⑤絶乾状態から飽和状態まで①~④の手順を繰り返す。

土壌試料には、黒ボク土 (上層土, 下層土)、豊浦砂を用いた。実験は室温 $20 \sim 25^\circ\text{C}$ の恒温室で行った。

4 結果と考察

4.1 熱伝導率の計算例

双子型プローブ法の測定結果の一例として、飽和黒ボク土 (上層) における土壌試料と基準物質の温度変化の関係を Fig.1 に示す。式(3)に必要な両プローブの温度変化の比は、横軸に $T_a - T_{a0}$ 、縦軸に $T_b - T_{b0}$ をとって描かれる直線の傾きで表すことができる。この例の場合、最小二乗法によって直線の傾きを求めたところ、温度上昇

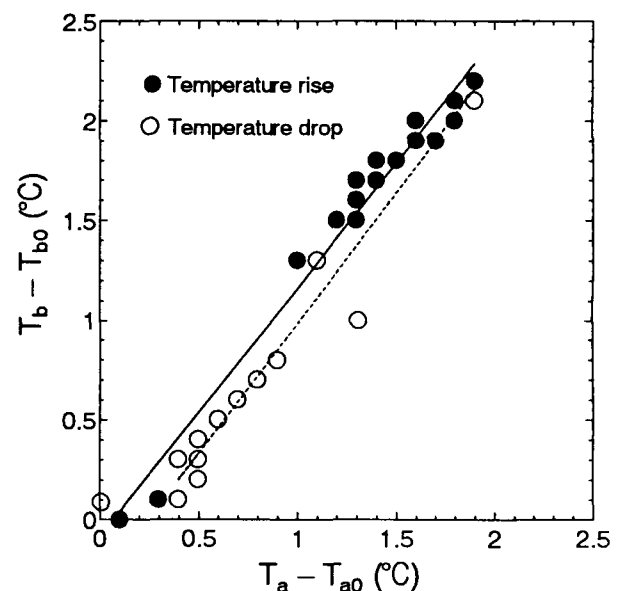


Fig.1 Relationship between $T_a - T_{a0}$ and $T_b - T_{b0}$. This relationship is used to obtain the ratio of temperature changes in equation (3).

過程では 0.943, 降下過程では 1.259 となり, 両者の平均は 1.101 となった. したがって, 熱伝導率は, 寒天ゲルの熱伝導率 $0.6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ を用いて式(3)より 0.661 となる.

4.2 各土壌の熱伝導率

体積含水率の変化に伴う黒ボク土 (上層土, 下層土) の熱伝導率を Fig.2 に, 豊浦砂の熱伝導率を Fig.3 にそれぞれ示す. 各土壌とも体積含水率の増加に伴い熱伝導率は増加した.

黒ボク土 (上層) と黒ボク土 (下層) の熱伝導率は, 体積含水率 $0.2 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$ 程度まではほぼ同じ値であったが, 体積含水率 $0.2 \sim 0.4 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$ の範囲では上層の熱伝導率が下層の熱伝導率よりも平均で $0.185 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 大きくなった. 飽和体積含水率では, 上層が $0.661 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, 下層が $0.645 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ となり, どちらの熱伝導率もほぼ同じであった. 中間の水分領域で熱伝導率に違いがみられたのは, 土性, 乾燥密度 (間隙率) などが異なったためであると考えられる.

豊浦砂の熱伝導率は, 既報 (中村ら, 1998) と同様の傾向となり, 本実験の妥当性を確認することができた. 豊浦砂の熱伝導率は, 黒ボク土に比べると 2.5~4.5 倍程度大きくなった. これは有機物の熱伝導率が小さい (例えば, 土壤物理学会, 2002) ことから, 黒ボク土のような有機物を多く含む土壌の熱伝導率は, 砂土に比べると小さな値となるためである.

4.3 推定式の適用

双子型プローブ法と de Vries モデルによる熱伝導率を比較したのが Fig.4 (黒ボク土) と Fig.5 (豊浦砂) である. 黒ボク土の場合は中間の水分領域で推定値が実測値よりも若干大きくなっているが, 全体的に de Vries モデルによる推定値は極めて良い近似となっている. 豊浦砂の場合も飽和水分量に対する値が, 推定値が実測値よりも $0.4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 程度過小評価されているが, 他の値は非常に良い近似となっている.

5 おわりに

本報告では, 双子型プローブ法を用いて 3 種類の土壌の熱伝導率の測定を行い, データ解析の方法, 体積含水率と熱伝導率の関係を示した. さらに, 熱伝導率の推定式として de Vries モデルを用いて, 実験結果の妥当性とこの推定式の適合性について検討した.

主な結果を要約すると以下ようになる.

- (1) 各土壌の熱伝導率は, 体積含水率の増加に伴い大きくなった.
- (2) 熱伝導率の大きさは, 黒ボク土 (下層) < 黒ボク土 (上層) < 豊浦砂の順であった. これは, 有機物の含有によると考えられた.
- (3) de Vries モデルによる推定値は実測値と良く適合した.

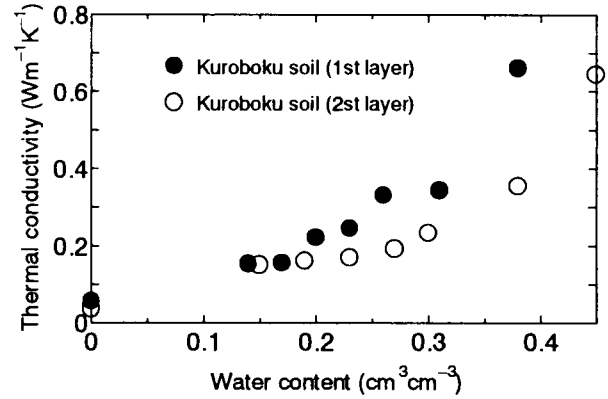


Fig.2 Thermal conductivity of Kuroboku soils as a function of volumetric soil water content.

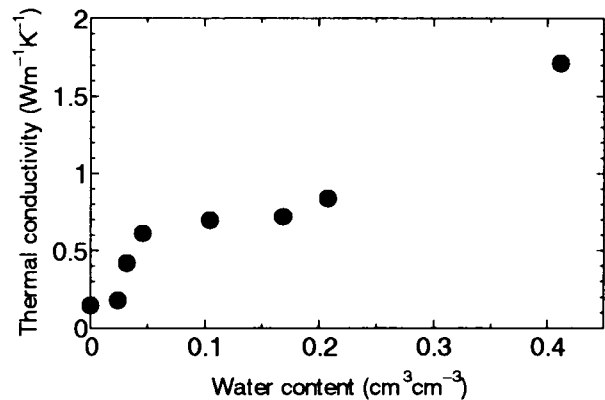


Fig.3 Thermal conductivity of Toyoura sand as a function of volumetric soil water content.

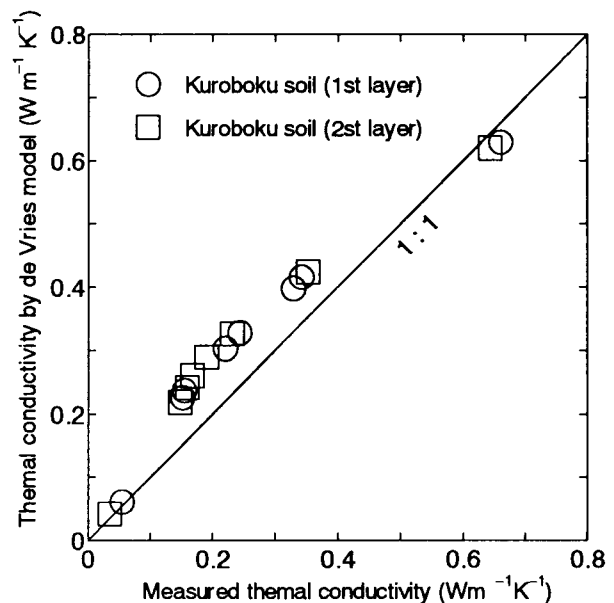


Fig.4 Comparison of the measured and the estimated thermal conductivities of Kuroboku soils. The estimated thermal conductivities were calculated using de Vries model.

このことから、実験は妥当であったと考えられ、また、実験の妥当性と de Vries モデルの有用性が確認された。

謝辞：本研究を進めるにあたり、北里大学獣医畜産学部畜産土木工学科飼料農地造成学研究室の平成7年度専攻生（松土通成君、宮城泰明君）の協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- de Vries, D. A. (1963) : Thermal properties of soils, In: van Wijk, W. R., ed, "Physics of the Plant Environment", North-Holland, Amsterdam.
- 土壤物理学会編 (2002) : 新編 土壤物理用語事典, 養賢堂, p.72-73.
- 粕淵辰昭 (1982) : 土壤の熱伝導に関する研究, 農業技術研究所報告 B 第 33 号, pp.10-12.
- Kimball, B.A., R.D. Jackson, R.J. Reginato, F.S.Nakamaya, and S.B. Idso (1976) : Comparison of field-measured and calculated soil-heat fluxes, Soil Sci.Soc.Am.J., 40, pp.18-25.
- 中村公人・(1998) : 成層土壤中熱・水分同時移動の数値解析, 農業土木学会論文集 198, pp.115-125.
- 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壤の熱的性質測定の比較, 土壤の物理性 90, pp.3-9.
- ファイトテクノロジー研究会 (2002) : ファイテク How to みる・きく・はかる-植物環境計測-, 養賢堂, p.114-115.

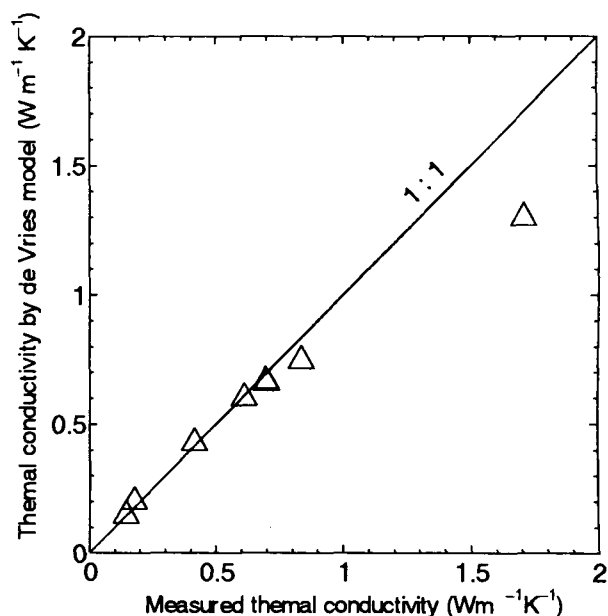


Fig.5 Comparison of the measured and the estimated thermal conductivities of Toyoura sand. The estimated thermal conductivities were calculated using de Vries model.