

サーマルプローブ法による農耕用土壌の熱伝導率測定

佐山惣吾(寒地技研)、緒方敏夫、本間専治、皆川秀紀、原口謙策、三浦健一(北工研)
酒井好夫(寒地技研)、長谷川寿保(飼料作物種子協会)

1. 緒言

サーマルプローブ法の測定原理は次の通りである。温度一様の試料中にサーマルプローブ(Fig.1)を挿入しておく。この熱源に一定の熱量Q(W)を連続的に加える。加熱過程で、時間t₁からt₂までの熱源中心点の温度上昇をΔT℃とすると、試料の熱伝導率λは次式から求められる¹⁾。

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi} \times \frac{\ln t_2 - \ln t_1}{\Delta T} \quad (1)$$

福田はこの方法により“非定常法による凍土の熱伝導率の測定”を行いその実用性を認めた²⁾。その後長野は5種の土壌を試料とし25℃～-30℃で“凍結・融解過程における熱伝導率の変化”を求めた³⁾。筆者らは本報において2種の土壌及びそれらの2種の粒度につき30℃～-30℃において熱伝導率に関し検討を行った。

1. 実験試料

土壌試料は札幌近郊の農地で採取した2種で、それらはA:黒土質およびB:粘土質である。試料を2.0mmおよび0.5mmでふるい4種の試料をえた。それらの物性をTable 1に示す。

Table 1 Properties of Soils

	A		B	
	-2.0mm	-0.5mm	-2.0mm	-0.5mm
Perticle Size	-2.0mm	-0.5mm	-2.0mm	-0.5mm
Volumetric Density (g/cm ³)	0.93	0.87	1.03	1.00
Void Rasio (%)	43.0	45.6	42.4	44.4

3. 実験方法

実験は恒温層(タバイ)を用い30℃～-30℃で行った。Fig.2に実験装置を示す。外径50mm、高さ150mmのポリエチレン製容器に土壌(風乾水分率約5%)を充填し、プローブを試料上部のほぼ中央に垂直に挿入した後、4本の容器にそれぞれ水分率が30%になるように水を注入後PEフィルムで上部を密閉した。10℃において約3日後に水分が土壌中に十分浸透したことを確認し、-30℃～30℃まで10℃間隔でΔTを測定した。

ヒーターは抵抗15Ωのコンスタンタン線であり、これに3.7W/mの電流を通电した。通电時間は90secであり、その間のΔTを記録した。測定終了時にΔT変化曲線より熱伝導率を計算した。次に水分率が40%となるように水を追加注入し、水分を十分に浸透させた後、今度は30℃～-30℃まで10℃間隔でΔTを測定した。なお測定温度は、A試料(-1.0mm)を充填した2本の容器(a)風乾、(b)30%水分に挿入したT熱電対により確認した。

4. 実験結果

Fig.3に水分率40%のΔT-ln tの関係の一例を示す。なお水分率M_vの定義は次式の通りである。

$$M_v = \frac{\text{水分量 (g)}}{\text{乾燥土壌重量 (g)}} \times 100 (\%) \quad (2)$$

この結果から見ると、多くの場合直線関係が得られなかった。この理由はQが大きすぎたためであろう。したがって、λの代わりに60 sec 後ΔTをFig.4 (a)、(b)に示した。これによると土壌A(黒土質)はB(粘土質)よりλは低く、また粒度面から見るとAの場合粒子の細かい方がλは高い傾向がある。また0℃を境とし、λが水(0.6 W/mK)と氷(2.2 W/mK)と変化するためΔTの変化が大きい、なおこれらの結果から水分率40%のλは0.44~0.66の範囲にあることが分かった。

5. 考察

A試料は暗色表層褐色低地土(主要鉱物は一次鉱物として石英・長石類)でB試料は暗色表層疑似グライ土(主要鉱物は一次鉱物として石英・長石類のほか、二次鉱物としてカオリン・イライト・モンモリロナイト類が見られる)である。それらのSEM写真(×1000)によるとB試料の方が空孔が多いようにみられる(構成粒子μオーダー)。すなわち水分は粒子内に浸透しやすいものと考えられる。

黒土質土壌の主要鉱物石英(水晶のλ:軸により5.4~9.3 W/mK)⁴⁾の値は非常に大きく、一方一般の土壌(湿)のλは0.64 W/mK、粘土のλは1.28 W/mKという値もある⁵⁾。これに従うと粘土の方がλは高く、したがってB試料の方が熱伝導率(λ)がA試料より高かったともと思われる。また、同時に水分の挙動も考えなければならない。粒度別に見るとA試料は細かい(-0.5mm)方がλは高い。これは粒子が細かい方が水分と馴染み易いからであろう。なおB試料は粒度によるλの差は小さかった。

λとM_vの間には一次の相関があることが一般に知られている。粕淵は“固相と液相がそれぞれ別々に熱伝導を行う、また水分変化による固相率(S_v)が変化しない”と仮定するとλは

$$\begin{aligned} \lambda &= a \cdot M_v + b \\ &= \lambda_l M_v + \lambda_s S_v \end{aligned} \quad (3)$$

ここでλ_s:固相特有の熱伝導率、λ_l:水の熱伝導率 0.6 W/mK となるはずであると述べた⁶⁾。しかしながらこれ迄の実験結果からはこのようにはならない、実際の勾配aは0.6より大きく20℃では一般に0.81~2.33である。また切片bも一般に0.12~0.44である^{3,6,7)}。この結果より土壌のλは、その構成鉱物粒子水分の作るコンプレックスの物性により決まるものと判断される。なお0℃近傍では不凍水分の影響も考えなければならない⁸⁾、またこれに基づいた伝熱のモデル式がある⁹⁾。

6. 結語

- (1) 2種の土壌試料A黒土質、B粘土質を用い、またそれらを-2.0mmと-0.5mmに粒度分けした計4試料を用い、-30℃~30℃まで10℃間隔で熱伝導率を測定した。土壌水分率は30%、40%、風乾約5%とした。なお今後20%の実験も行う。
- (2) 試料の物性の特徴は次の通りである。AはBより容積比重は小さい。粒度別にみると-0.5mmは-2.0mmより空隙率は高い。
- (3) 熱伝導率(λ)はAよりBが高く、また-2.0mmより-0.5mmの方が高い傾向がある。

- (4) 本実験以外に文献より計 18 種の土壌の熱伝導率 λ に関する解析を行い、それとの水分率 M_v との関係式 (3) は 20°C において一般的に勾配は $0.81 \sim 2.33$ 、切片は $0.12 \sim 0.44$ の範囲に大部分の土壌が当てはまることが分かった (Fig. 5)。
- (5) 土壌の水分率 (M_v) と熱伝導率 (λ) の関係は直線関係にあるが、それは土壌粒子と水分とが直列および並列に伝熱に関与し、また粒子の物性に決定されるものと考えられる。それらの要素は ① 鉱物質 ② 嵩密度 ③ 空隙率 ④ 粒度分布 ⑤ 細孔分布 ⑥ 親水性 などであろう。なお本実験は簡便型土壌水分計を開発することを目的として行われた。したがって対象とする土壌は主として農耕用の土壌に限った。あわせて凍土に対しても測定を試みたものである

参考文献

- 1) O.T.Farouki : Thermal Properties of soils, Trum Tech Publications (1976)
- 2) 福田正己 : 低温科学物理論、第 3 4 輯 (1976)
- 3) 長野克則 : 博士論文、北海道大学 (1995)
- 4) 理科年表物理
- 5) 省エネルギー建築、森下出版
- 6) 粕淵辰昭 : 日本土壌肥科学雑誌、43 巻、12 号、(1972) P.437
- 7) 永井、向井原、鈴木、坂田 : 農業動植物情報高精度分析診断技術の開発事業成績書 : バイオコミュニケーション技術研究組合 (1998) P.51
- 8) D.M.Anderson : Highway Research Recoad, 393 (1972) P.12

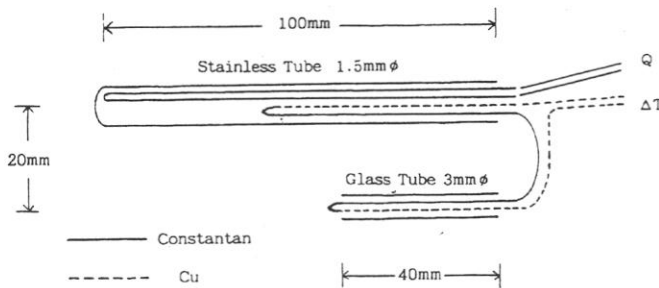


Fig.1 Heat Probe

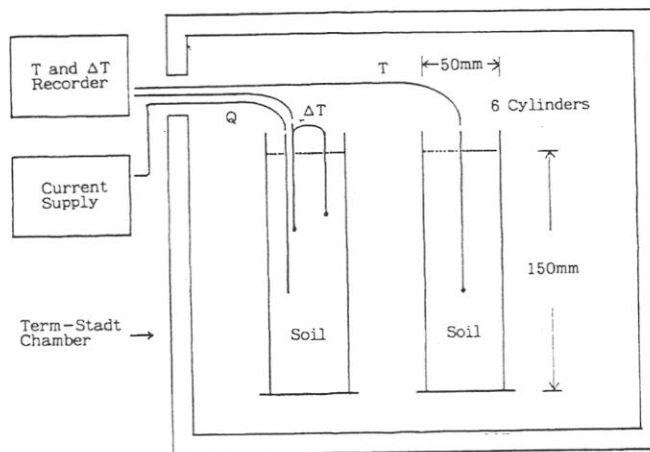


Fig.2 Experimental Apparatus

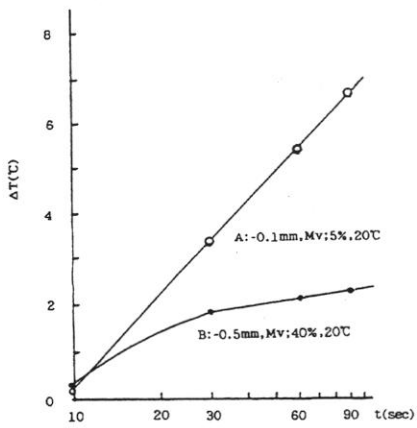


Fig.3 Examples of $\ln t - \Delta T$ Relation

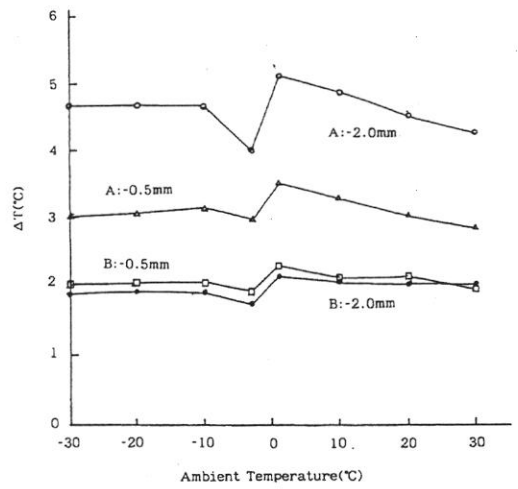


Fig.4(a) ΔT After 90sec (Mv:40%)

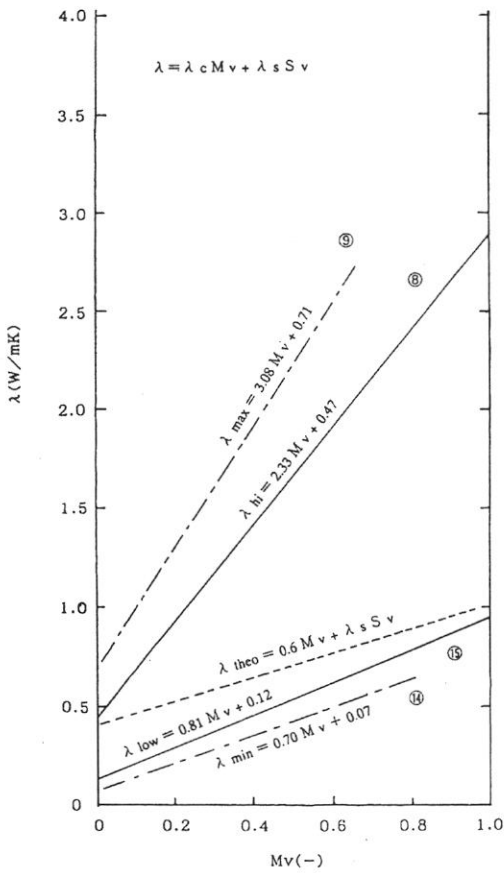


Fig.5 Relation between λ and Mv of Soil

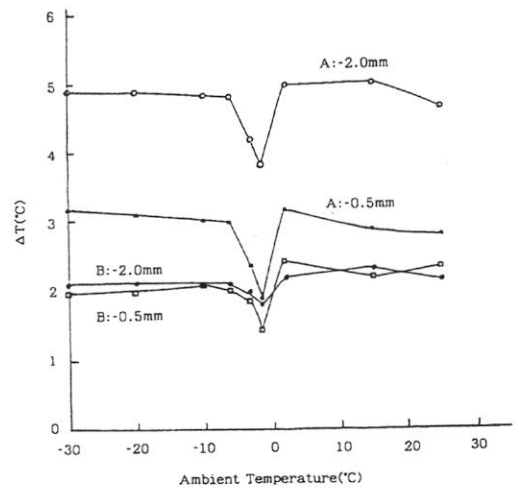


Fig.4(b) ΔT after 90sec (Mv:30%)