

## 石英含量が土の熱伝導に及ぼす影響

土 谷 富士夫

畜産環境科学科土地資源利用学講座

### 1. 目 的

土壌中の水分及び熱移動の研究は、農業の生産性を向上させるうえで不可欠な分野の一つであり、土壌水分の移動、熱の移動及び凍結深さの推定には極めて重要な課題の一つとなっている。土壌の比熱とともに、熱伝導率は熱的性質の重要因子のひとつである。しかし、土壌中での熱の移動は、固態、液態、及び気態のそれぞれが熱を輸送するため、極めて複雑な輸送様相になっている。

土の熱伝導率を実際に測定することなく、簡単な方法で推定できることが最も望ましいために、多くの研究者達の古くからの課題でもある。近年、Johansen が汎用性の熱伝導推定式を発表したが、わが国の土壌にも適用できるかは明らかではない。特に、凍結した土壌の熱伝導率にも適用されることから、極めて興味深い。固体土粒子の石英が他の鉱物より高い熱伝導率を持つため、その含量を考慮しなければならない。そこで、乾燥密度を一定としたときの、石英含量と水分量の違いによる熱伝導率の変化を非定常測定法で実測するとともに、測定値と Johansen 法により求めた推定値とを比較し、それらの変化が熱伝導率にどのような影響を与えるのかを検証することとする。

### 2. Johansen の熱伝導率の推定式

多くの研究者の式及びデータを基礎として、1975 年に Johansen は、凍結土壌と未凍結土壌に適用できる熱伝導式を展開した。飽和土の熱伝導率は、Kersten 数と呼ばれる線形化された次の比例係数  $K_e$  を用いた。

$$K_e = \frac{(k - k_{dry})}{(k_{sat} - k_{dry})} \quad (1)$$

ここに、 $k$  はある飽和度における土壌の熱伝導率 (W/mK)、 $k_{dry}$  は絶乾状態での熱伝導率、 $k_{sat}$  は飽和状態での熱伝導率である。

乾燥密度及び間隙率などの微小構造は、絶乾状態における熱伝導率を決定する主要因であり、土粒子の伝導率にほとんど影響を与えない。微小構造の重要性は以下に示す 2 つの異なる半実験式の展開に反映されており、一方は自然土に、他方は碎石物質に当てはまる。

$$k_{dry} = \frac{0.135 \gamma_d + 64.7}{2700 - 0.947 \gamma_d} \quad (2)$$

ここに、 $\gamma_d$  は乾燥密度 ( $\text{kg/m}^3$ )、試料の固体の単位重量は  $2700 (\text{kg/m}^3)$  を用いた。碎石物質は、同じ間隙率のもとでは絶乾自然土より高い熱伝導率を示すことを発見し、絶乾碎石の熱伝導率でもデータに適する次の実験式を見出した。

$$k_{\text{dry}} = 0.039 n^{-2.2} \quad (3)$$

これは、間隙率  $n$  のみの関数である。飽和土では、微小構造の変化は熱伝導率にほとんど影響がなく、成分及びそれぞれの容積片の熱伝導率をもとにした次式の幾何平均が適用される。飽和した未凍結土壌には、次式が与えられる。

$$k_{\text{sat}} = k_s^{(1-n)} k_w^n \quad (4)$$

ここに、 $k_s$  は土壌の固体熱伝導率、 $k_w$  は水の熱伝導率である。未凍結水量を含めると、

$$k_{\text{sat}} = k_s^{(1-n)} k_i^{(n-w_u)} k_w^{w_u} \quad (5)$$

で表され、ここに、 $k_i$  は氷の熱伝導率、 $W_u$  は未凍結水の容積 ( $\text{m}^3$ ) である。これに数値を入れると、次式になる。

$$k_{\text{sat}} = k_s^{(1-n)} 2.2^n 0.269^{w_u} \quad (6)$$

これは、 $k_i = 2.2$ 、 $k_w = 0.57$  を用いたものである。 $k_s$  を決定するには、全体の固体含有量中の石英含量が必要となる。これは、石英が他の鉱物に比べて、高い熱伝導率を示す性質を持つことによるもので、次の幾何平均で表現される。

$$k_s = k_q^q k_o^{(1-q)} \quad (7)$$

ここに、 $k_q$  は石英の熱伝導率、 $q$  は全体の固体含有量中の石英含量、 $k_o$  は他の鉱物の熱伝導率である。(7)式について Johansen は、 $k_q$  は 7.7、 $k_o$  は 2.0 を用いるとしているが、石英含量 20% 以下の粗粒土壌については、それらの土壌に起りえる鉱物構成を考慮し、 $k_o$  は 3.0 を用いることを提案している。不飽和土壌の熱伝導率について Johansen は、Kersten のデータをもとに、 $K_e$  と飽和度  $S_r$  との関係を得て、乾燥密度の影響は無視できるとした。これにより、粗粒土壌の未凍結土壌には次式が与えられる。

$$K_e \cong 0.7 \log(S_r) + 1.0 \quad (8)$$

ここで、 $S_r > 0.05$  である。細粒土壌の未凍結土壌には、

$$K_e \cong \log(S_r) + 1.0 \quad (9)$$

が与えられる。ここで、 $S_r > 0.1$  である。全てのタイプの凍結土壌においては、 $K_e$  が  $\pm 0.1$  より変化が小さい場合について次式になる。

$$K_e = S_r \quad (10)$$

これらから Johansen は、不飽和土の熱伝導率  $k$  は  $k_{\text{dry}}$ 、 $k_{\text{sat}}$ 、 $S_r$  により次式を用いて決定されるとした。

$$k = (k_{\text{sat}} - k_{\text{dry}}) K_e + k_{\text{dry}} \quad (11)$$

このように Johansen 法は、水分移動を計算に入れずに熱伝導率を絶乾と飽和の値の間に内挿する方法である。ここでは、石英以外の土壌鉱物の熱伝導率である  $k_o = 2.0$  の代わりに、火山灰の主要鉱物である火山ガラスの熱伝導率、1.36 を使用して推定値を求めた。

### 3. 熱伝導率と石英含量の測定

熱電対とともに細長い線状熱源を封入し、サーマルプローブを制作し、熱の発生とその温度変化を同時に測定する。プローブ法による非定常的方法の利点は、測定に時間を費やさないうこと、試料の温度変化を  $1^\circ\text{C}$  以内に抑えることにより、水蒸気拡散による水分移動の影響を最小にする。実際の測定においては、2本のプローブを用いて、一方に熱伝導率が既知である試料に、他方は熱伝導

率が未知である試料に使用する。いわゆる双子型プローブ法を使用し、両者の上昇温度の勾配を使用して求める。

石英含量の測定には、蛍石を内部標準とする X 線回折分析法を使用する。標準検量線の作製には純粋な単結晶の石英と蛍石を、また希釈剤としては、純粋なカオリナイトを使用し、得られた回折図からピークの面積の比（相対強度面積比）を求める。この検量線上から分析試料の相対強度面積比に相当する石英含量を求める。

実験試料は、(a) 畜大圃場の下層より採取した火山灰土、(b) 山口県豊浦より採取した標準砂、(c) 2 種類の土を混ぜた混合土を使用した。石英含量をそれぞれ 10%、20%、30% になるように調整する。標準試料の水は液態では熱による対流が生じてしまうため、そのままでは使用できないので濃度 1% の寒天をゲル状にして使用する。

#### 4. 実験結果と考察

未凍結土壌では、一般に、水分量の増加に伴って、熱伝導率の値が増加する傾向を示している。また、測定値間にバラツキはそれほど生じなかった。凍結土壌では、未凍結土壌と同様に、水分量の増加に伴って熱伝導率が増加する傾向が得られた。測定試料を凍結させる際に、短時間で急速凍結をしたために水分の凍結移動が抑えられ、測定値間にバラツキは生じなかった。また、凍結土壌では、氷の形成により熱伝導率が増加することが知られているが、測定値はこの傾向を明らかに示した。熱伝導率を比較すると、同じ含水比のもとで、石英含量が多い試料ほど熱伝導率が高くなっている。

石英含量と含水比の増加に伴う熱伝導率の変化について考察すると、未凍結火山灰土の熱伝導率の含水比に対する推定値は曲線で表され、含水比が 5% 前後及び 40% 以上のときを除いて、いずれも推定値より小さい値を示した。凍結土壌では、推定値は直線で表され、測定値は未凍結土壌の場合と比べると、かなり低い値を示している。

未凍結標準砂の熱伝導率は、測定値が推定値より大きい値を示している。また、各測定値間にバラツキが生じている。これは前述のように、試料内で水分移動が起ったためと考えられる。凍結土壌においては、同じようにバラツキがあるものの、推定値にかなり近似する傾向を示した。

各測定試料における推定値と測定値の相関関係を求めると、未凍結土壌では 20%~30%、凍結土壌では 30%~45.8% の土壌のときに、比較的良く一致する傾向を示した。これらから、土壌の石英含量が増加するにつれ、測定値は推定値と一致する傾向を示した。すなわち、Johansen の推定式は標準砂のように石英含量の多い土壌には有効であるが、火山灰土のように石英含量の少ない土壌、もしくは未凍結で高水分量の土壌には、必ずしも有効ではなかった。今後は、石英含量の少ない土壌や火山灰土に対応する新しい推定式が必要と思われる。なお、石英含量の測定に関して、同講座の近堂祐弘教授の多大なる助言と協力を得ましたことを深く感謝申し上げます。

#### 引用文献

- 1) Johansen, O. (1975) : Thermal conductivity of soils. Ph. D. Thesis, Trondheim, Norway.  
(CREEL Draft Translation 637, 1977)
- 2) Farouki, O.T. (1986) : Thermal properties of soils, Trans Tech Publication, pp. 112-116