

## 土壤の熱物性に関する研究

佐々木章・福田 浩・相場眞也

### A Study on Thermophysical Properties of a Soil

Akira SASAKI, Hiroshi FUKUDA, Shinya AIBA

(昭和58年10月31日受理)

In this paper, effect of water content on thermophysical properties of a damp soil was investigated. The comparison method by steady heat flow was adopted to measure the thermal conductivity. The measurements of the thermal diffusivity were made by the Laplace transformation method, that is by recording variations of temperature at several (at least three) points in the soil. Data were obtained at water content ratios (percent pore volume filled with water) from 0 to 90% and at temperatures from 20° to 40°C.

The effective thermal conductivity was obtained as a function of water content with the temperature as parameter. It was observed that the effective thermal diffusivity reached a maximum value in the vicinity at about 20% saturation and was constant in the range over 40%.

#### 記 号

a :	温度伝導率,	$m^2/S$
A, B :	積分定数	
c :	比熱,	$kJ/kgK$
d :	粒径,	$\mu m$
G :	比重	
S :	ラプラスパラメータ	
T :	温度,	$^{\circ}C$
y :	加熱面からの距離,	$mm$
$\lambda$ :	熱伝導率,	$W/mK$
$\rho$ :	体積密度,	$kg/m^3$
$\theta$ :	温度差,	$^{\circ}C$
$\phi$ :	含水率,	%
$\tau$ :	時間,	$min$
$\epsilon$ :	空隙率,	%

#### 添 字

e :	有効
g :	気体
p :	局所
s :	固体
w :	液体

#### 1. 緒 言

植物の生育と関連する土壤の熱的性質に関する研究は、我国の場合、比較的気候が温和であることからそれほど活発に行なわれていない<sup>1)</sup>。しかしながら、近時人工的に土壤の温度や水分をコントロールし、植物の生育を行なう場合がきわめて多くなっていることは、今更述べるまでもない。土壤の熱物性の研究は、土壤水やガスの移動、土壤溶液中の溶質の拡散や土壤の中に生息する微生物の活動などに密接に関連するため重要な課題となってきた。さらに、地中埋設物からの熱損失、地熱エネルギーの有効利用などの諸問題と関連して伝熱工学上その必要性が高まってきている。

一般に、土壤は水分を含有した状態にあり、固体、液体、気体の三相より構成される。このような状態の土壤に温度勾配を与えると、高温域から低温域への熱移動と同時に物質移動が起きるため、熱物性の測定には、従来、非定常法が多く用いられており<sup>1), 6)~8)</sup>、定常法により測定された結果はあまり見受けられない<sup>4)</sup>。

以上のような背景から、本研究では、先ず砂を取り上げ、広範囲に含水率を変化させ、有効熱伝導率及び温度伝導率を測定し、主として含水率による影響を調べた。

2. 測定原理

熱伝導率は、フーリエの法則に基づく定常比較法<sup>2)</sup>、温度伝導率は、飯田ら<sup>3)</sup>によって報告されている以下に示すようなラプラス変換法により測定した。

図1に示されるような一様厚さ  $l$  の無限平板における熱伝導方程式のラプラス変換後の一般解は、(1)式で示される。ただし、初期温度差  $\theta(y, \tau_0) = 0$  とする。

$$\bar{\theta} = Ae^{\sqrt{s/a}y} + Be^{-\sqrt{s/a}y} \quad (1)$$

ここで、ラプラス積分  $\bar{\theta}_i$  は、試料の温度応答  $\theta_i$  より次式で求める。

$$\bar{\theta}_i = \int_0^\infty \theta_i(\tau) e^{-s\tau} d\tau \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2)$$

(2)式より、各位置に対する  $\bar{\theta}_i$  を求め、(1)式に代入することによって

$$\bar{\theta}_i \left( \frac{Y_2}{Y_3} - \frac{Y_3}{Y_2} \right) + \bar{\theta}_2 \left( \frac{Y_3}{Y_1} - \frac{Y_1}{Y_3} \right) + \bar{\theta}_3 \left( \frac{Y_1}{Y_2} - \frac{Y_2}{Y_1} \right) = 0 \quad (3)$$

となる。ただし  $Y_i = e^{\sqrt{s/a}y_i} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (4)$

であり、パラメータ  $s$  は、 $8 \leq sr_{\max} \leq 12$  の条件を満足するように選んだ<sup>3)</sup>。

熱容量は、上記の方法で得られた熱伝導率と温度伝導率より次式によって求めた。

$$cp = \lambda/a \quad (5)$$

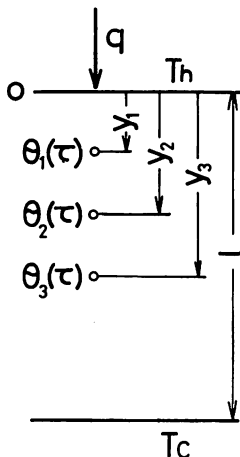


図1 座標系

3. 実験装置と方法

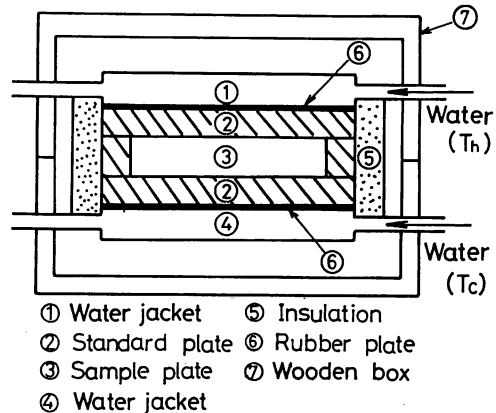
実験装置の概略を図2に示す。標準板として、厚さ5mmのアクリル板を使用した。試料<sup>③</sup>は、内寸法240×240mm、深さ40mmのアクリル製容器<sup>②</sup>に充填した後、上下両ジャケット<sup>①④</sup>間に厚さ1mmのゴム板<sup>⑥</sup>を介して設置した。なお、水分の散逸を防ぐため容器上蓋部分をビニールテープでまいて密閉してある。側面からの熱損失を少なくするため周囲を断熱材<sup>⑤</sup>で囲んである。試料内の温度測定は、直径0.5mm銅-コンスタンタン熱電対を容器中中央熱流方向に5mm間隔で設置して行なった。

実験は、初期条件を満足するため、上下両ジャケットに最初低温水を流し内部温度が一様になったのを確認した後、上側ジャケットに定温に保たれた高温水を流すことより開始した。本実験では、層内温度が一様になるには約4時間、その後温度分布が定常になるまでは約4時間要した。

実験終了後、高温側から約5mm間隔で砂をすくい取り天秤で秤量し層内の含水率分布を求めるとともに、熱電対の正確な位置をハイトゲージで測定した。

本実験での含水率は、空隙に対する水分の割合とし、0, 6.1, 12.4, 25.2, 53.3, 90.0%に変化させ、測定温度は、20, 30, 40°Cとした。試料上下面の温度差は、約3°Cとなるように調節した。本実験の測定誤差は、熱伝導率で±4%<sup>5)</sup>、温度伝導率で±6%<sup>3)</sup>以内である。

実験に使用した砂は、男鹿半島北部で採取したもので、粒子の比重はGs=2.57、かさ密度はρ=1.33g/cm<sup>3</sup>である。粒度分布を図3に示す。図より明らかなように、粒径は150~300μmに集中している。砂



① Water jacket ⑤ Insulation  
② Standard plate ⑥ Rubber plate  
③ Sample plate ⑦ Wooden box  
④ Water jacket

図2 実験装置

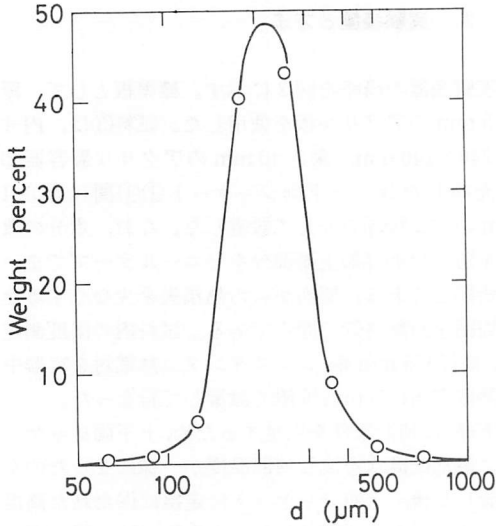


図3 粒度分布

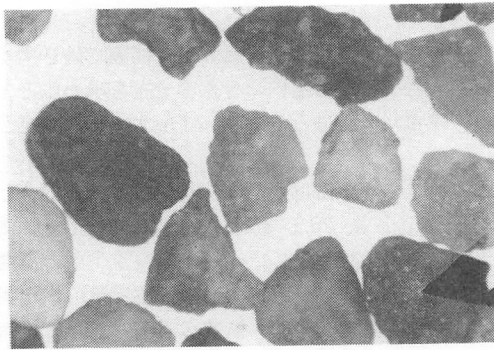


図4 砂の顕微鏡写真

粒子の顕微鏡写真の例を図4に示す。粒子形状、表面の状態などは、各粒子によってかなり異なっていることがわかる。

#### 4. 実験結果と考察

図5は、平均温度40°Cにおける定常状態時の水分分布を示したものである。横軸は、加熱面からの距離を表わす。局所含水率 $\phi_p$ は、場所によって異なり低温例に近づく程漸減する傾向を示し、層内では連続した水分分布を形成していることがわかる。また、その増加の度合は含水率 $\phi$ の増加とともに小さくなり、 $\phi = 25.2\%$ で最小となるが、それ以後再び大きくなっていることがわかる。これは、含水率によって層内での水分と砂粒子との結合状態が変化するためと考えられる。

次に、図5と同一条件での砂層内温度分布を図6

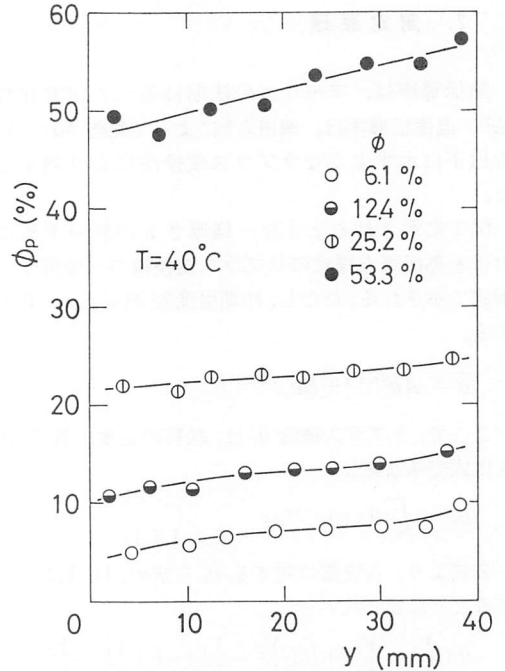


図5 含水率分布

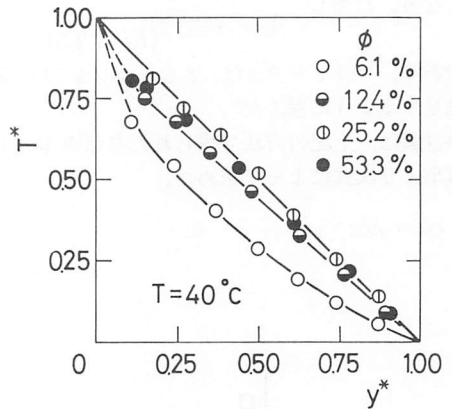


図6 温度分布

に示す。定常状態における温度分布は、同一温度のもとにおいても、含水率によって当然変化することが考えられる。図において、含水率の最も低い $\phi = 6.1\%$ では、高温側に温度が大きくわん曲するとともに、加熱面近傍で局部乾燥のため温度勾配が大きくなっていることがわかる。このような傾向は、含水率の増加とともに小さくなり、 $\phi = 25.2\%$ では直線的な温度分布を示す。

これは、 $\phi = 6.1\%$ 近傍の含水率で有効熱伝導率が大きく変化するため、場所による局所含水率の違いが大きく影響したものと考えられる。

図7に、砂の有効熱伝導率と含水率との関係を温度をパラメータとして、従来の結果とともに示す。図中、斎藤ら<sup>6)</sup>、木村<sup>7)</sup>の結果は非定常法、山川ら<sup>4)</sup>の結果は定常法により得られたものである。飯田ら<sup>8)</sup>の結果を本実験と同一条件として参考のため示したのが破線である。本実験結果は、従来の結果とほぼ同様の傾向を示し、有効熱伝導率は $\phi = 0 \sim 30\%$ で含水率の増加とともに急激に増大し、それ以後ゆるやかに増加しつづけるのがわかる。また、有効熱伝導率は温度の上昇とともに、全体的に増大し、 $\phi = 30\%$ 近傍で増加の割合がやや顕著になっているが、その傾向は温度によってほとんど変化しないことがわかる。本実験結果は、川砂を測定した斎藤らの結果に比較して約10%程度小さくなっているが、これは、砂の成分に若干の相違があるためと考えられる。

次に、含水率による影響の割合が著しい $\phi = 6.1\%$ における局所有効熱伝導率の温度による変化を図8に示す。図から明らかなように、場所によって局所有効熱伝導率が異なっていることがわかる。 $T = 20^\circ\text{C}$ では場所によってそれほど変化しないが、温度上昇とともにその差異が顕著となり、 $T = 40^\circ\text{C}$ では、 $y = 0 \sim 9.5 \text{ mm}$ に比べ $y = 29.6 \sim 40 \text{ mm}$ で約4倍の値となっている。局所有効熱伝導率の温度による変化をみてみると、加熱面に近い $y = 0 \sim 9.5 \text{ mm}$ では温度上昇とともに局部乾燥が進行するため局所有効熱伝導率は単調に減少する傾向を示すが、冷却面に近い $y = 29.6 \sim 40 \text{ mm}$ では逆に水分の増加のため急増しているのがわかる。また、 $y = 9.5 \sim 19.8 \text{ mm}$ では温度 $30^\circ\text{C}$ より減少しはじめているが、これは、温度上昇によって水分移動が活発になり乾燥が深さ方向に進行していることを示すものである。

次に、局所含水率の影響をより明瞭にするため、 $T = 40^\circ\text{C}$ の場合の局所有効熱伝導率と含水率の関係を図9に示す。 $\phi = 6.1\%$ においてみられた局所有効熱伝導率の場所による相違は、含水率でよく整理されることがわかる。また、試料層の有効熱伝導率を表わす $y = 0 \sim 40 \text{ mm}$ の結果と良く一致していることがわかる。

図10は、有効温度伝導率の含水率による変化を示したものである。ただし、試料上下面と中心部の温度応答より、 $s\tau_{\text{max}} = 12$ ,  $\tau_{\text{max}} = 30 \text{ min}$ として求めた結果である。有効温度伝導率は、含水率の増加とともに最初急激に増大し、 $\phi = 20\%$ 近傍で最大値を示し、 $\phi > 40\%$ でほぼ一定値を示すことがわかる。

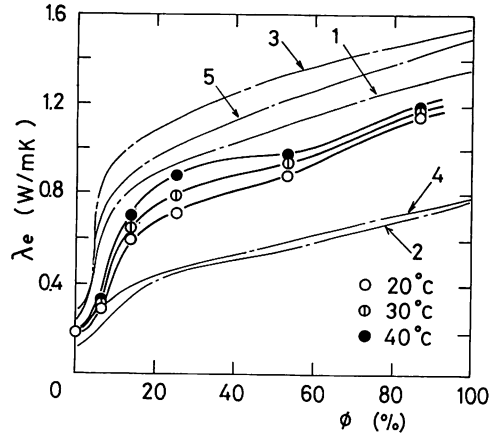


図7 有効熱伝導率の含水率による変化

1. 斎藤ら<sup>6)</sup>、砂、 $d < 1.7 \text{ mm}$ ,  $\epsilon = 42\%$ ,  $T = 18^\circ\text{C}$ 。山川ら<sup>4)</sup>：2. ガラスビーズ、 $d = 0.14 \sim 0.29 \text{ mm}$ ,  $\epsilon = 39\%$ ,  $T = 7^\circ\text{C}$ ；3. 大理石粒子、 $d = 0.21 \sim 0.39 \text{ mm}$ ,  $\epsilon = 39\%$ ,  $T = 40^\circ\text{C}$ 。木村<sup>7)</sup>：ガラスビーズ、 $d = 0.25 \sim 0.39 \text{ mm}$ ,  $\epsilon = 51 \sim 53\%$ ,  $T = 14^\circ\text{C}$ ；5. 石英砂、 $d = 1.0 \sim 2.0 \text{ mm}$ ,  $\epsilon = 50\%$ ,  $T = 14^\circ\text{C}$ 。6. 飯田ら<sup>8)</sup>、けい砂。

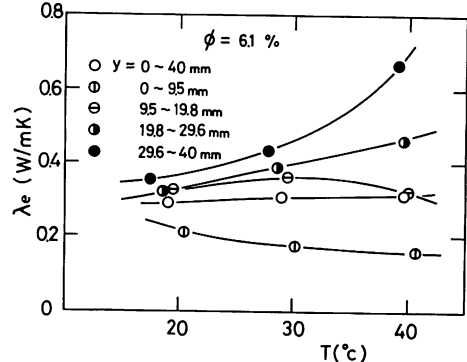


図8 局所有効熱伝導率の温度による変化

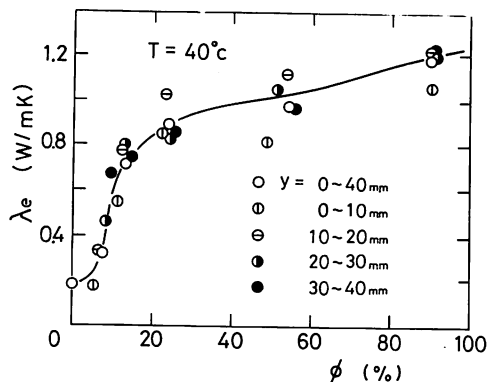


図9 局所有効熱伝導率の含水率による変化

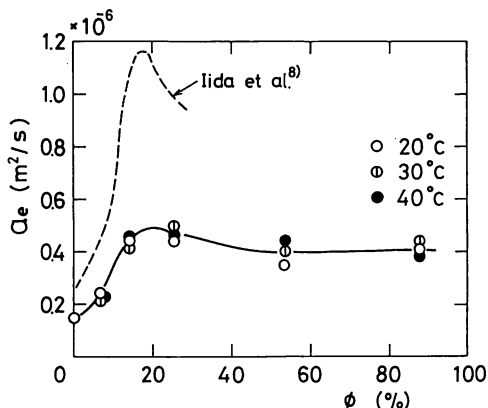


図10 有効温度伝導率の含水率による変化

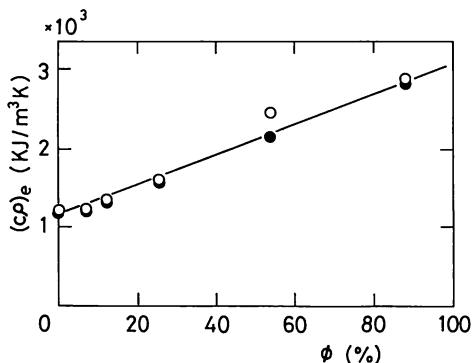


図11 熱容量と含水率の関係

また、温度による変化は、ほとんど認められなかった。飯田ら<sup>8)</sup>の結果は、定性的には本実験値とほぼ同様の傾向を示すが、結果は  $\phi = 20\%$  付近で本実験結果に比較してかなり大きくなっている。

温度  $20^\circ\text{C}$  における有効熱伝導率と有効温度伝導率より得られた熱容量と含水率の関係を図 11 に示す。この結果、含水率の増加とともに熱容量は直線的に増大していることがわかる。一般に砂の熱容量は、次式で示される。

$$(c\rho)_e = c_s\rho_s + c_w\rho_w + c_g\rho_g \quad (5)$$

(5)式において、気体部分の比熱、密度は他に比較して小さく無視することができるため、固体部分である砂の体積密度が一定であるならば、含水した砂の熱容量は、含水率と比例関係となる。図には、(5)式において砂粒子の比熱を  $c_s = 0.84 \text{ kJ/kgK}^{1)}$  として求めた結果 (●印) も示してあるが、本実験結果と良く一致していることがわかる。

### 5. 結 言

湿った砂の熱物性に及ぼす水分の影響を調べるため、含水率を広範囲に変えて有効熱伝導率、有効温度伝導率を測定した結果、次のことが得られた。

- (1) 含水率による有効熱伝導率への影響は、 $\phi = 30\%$  以下で顕著である。
- (2) 有効温度伝導率は、 $\phi = 20\%$  近傍で最大値を示し、 $\phi > 40\%$  ではほぼ一定である。また、本実験範囲内では、温度による影響はほとんど認められない。

### 参 考 文 献

- 1) 粕淵, SPCPG, 35, 29 (1977).
- 2) JIS A 1412.
- 3) 飯田, 重田, 第 15 回日本伝熱シンポジウム, 475 (1978).
- 4) 山川ほか 3 名, 化学工学, 36, 1342 (1972).
- 5) 抜山, 熱, 養賢堂 (1969).
- 6) 斎藤, 岡垣, 機械学会誌, 62, 741 (1959).
- 7) 木村, 化学工学, 23, 502 (1959).
- 8) 飯田ほか 3 名, 第 1 回日本熱物性シンポジウム, 5 (1980).