

# 土の伝熱特性に関する実験的研究

## EXPERIMENTAL STUDY ON HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF SOILS

松本 順一郎\*・大久保 俊治\*\*  
By Junichiro MATSUMOTO and Toshiharu OHKUBO

### 1. 結 言

土の物理的性質の一つである熱的性質は多分野に関連しており、熱的性質の把握は基本的かつ重要な問題である。たとえば、土の凍上凍結現象、地盤凍結工法の計画<sup>1)</sup>、地下埋設物（蒸気温水パイプ、し尿処理施設の消化槽など）から土中への損失熱量の算定、土中微生物の活動や植物生育へおおよぼす影響<sup>2)</sup>などでしばしば問題となる。

一般に熱輸送は伝導、対流、輻射の三形態で行われるが、土中では特殊な場合を除き後二者は伝導に比べ無視できるほど少ないと判断される<sup>3)</sup>。したがって、熱の大部分は伝導によって輸送されると考えられ、基本的熱物性値として熱伝導率、体積熱容量、温度伝播率があげられる。ここで体積熱容量は土を構成する各相の密度、比熱、体積分率より近似的に算定でき<sup>4)</sup>、熱伝導率を知らば温度伝播率も算出できる。しかし、土の熱伝導率は多くの要因から構成されている。影響因子として、(1) 固相を構成する土粒子の熱伝導率、(2) 含水量、(3) 間隙率、(4) 乾燥密度、(5) 土粒子間隙の配列状態、(6) 土の粒度、構造、組成、(7) 温度などが考えられる。

従来、二相系混合材料の熱伝導率に関する研究は数多く、Maxwell<sup>5)</sup>、De. Vries<sup>6)</sup>、Tsao<sup>7)</sup>、国井<sup>8)</sup>、Cheng<sup>9)</sup>、などにより行われ、理論的熱伝導モデルが提案されている。しかし、三相系混合材料である土を対象とした研究は非常に少なく、定常円筒熱流法により熱伝導率を求めた Kersten<sup>10)</sup> の研究、温度勾配による水分移動と熱輸送に関する Woodside<sup>11)</sup> の研究、松本<sup>12)</sup>、粕淵<sup>13)</sup> などの非定常測定法<sup>14)</sup> を用いた研究などがあるにすぎない。したがって、理論的熱伝導モデルもほとんど提案されておらず、熱物性値の測定データも非常に不足している。

そこで、筆者らは白石川砂、青葉山ローム、人工混合

砂質ロームについて非定常測定法により熱伝導率の測定を行いその特性を検討した。

### 2. 実験装置および方法

熱伝導率の測定方法には定常法と非定常法があるが、土のような湿った物質の測定には非定常法が多く用いられている。本実験では広く用いられている非定常プローブ法でしばしば問題となる土とプローブとの接触の良否の影響を考え、線状熱源と土とを直接接触させる非定常線熱源法<sup>15)</sup> を用いて測定を行った。本法の原理を簡単に述べると、初期温度  $T_0$  (°C) の無限大で均質な試料中に直線的な線状熱源を考え、この熱源より一定熱量  $q$  (kcal/m·hr) を step 関数的に発生すると、加熱後の経過時間  $t$  (hr) において、熱源より距離  $r$  (m) 上の温度  $T$  (°C) は熱源を軸とする円柱座標をとれば経過時間  $t$  の十分大きな値に対して近似的に次式をうる<sup>3), 4), 14)</sup>。

$$T = T_0 + \frac{q}{4\pi K} \left( \ln \frac{4at}{r^2} - \gamma \right) \dots\dots\dots (1)$$

ここで

$K$ : 熱伝導率 (kcal/m·hr·°C)

$a$ : 温度伝播率 (m<sup>2</sup>/hr)

$\gamma$ : Euler 定数 = 0.5772

式 (1) より、時間  $t_1$  と  $t_2$  間の温度差  $\Delta T$  を求める

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \frac{q}{4\pi K} \ln \left( \frac{t_2}{t_1} \right) \dots\dots\dots (2)$$

$$\therefore K = \frac{q \ln(t_2/t_1)}{4\pi(T_2 - T_1)} \dots\dots\dots (3)$$

ここで

$T_1$ : 時間  $t_1$  での温度 (°C)

$T_2$ : " "  $t_2$  " " (°C)

測定上の便宜から測定箇所は熱源位置を選び、温度変化を片対数線図上に描き、直線部分の  $t_1$ ,  $t_2$  について、式 (3) を適用した。

\* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

\*\* 正会員 工修 東北大学助手 工学部土木工学科

(1) 実験装置

装置の主要回路を Fig. 1 に示す。線状熱源 (a-b 部) には抵抗温度係数  $2.0 \times 10^{-5} \Omega/\Omega^\circ\text{C}$  のマンガン線 ( $\phi 0.3 \text{ mm}$ ) を用い、線状熱源の加熱のために 6V の乾電池を用いた。c 点の温度上昇を知るため、銅-コンスタタン熱電対 ( $\phi 0.1 \text{ mm}$ ) をマンガン線に固定し試料箱外へ導いた。

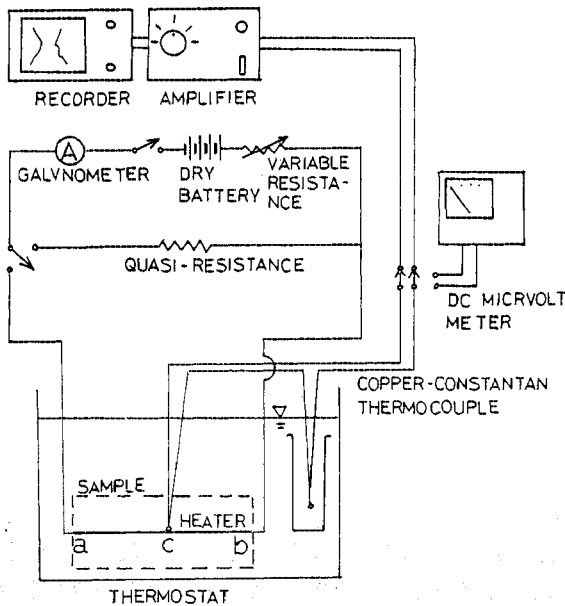


Fig. 1 Schematic circuit for thermal conductivity measurements

熱電対の熱起電力を直流増幅器により増幅しペン書きオシログラフに記録した。試料と恒温槽内の温度が均一であることを確認するため高感度直流電圧計を用いた。回路にはすべてシールド線を用い、各種装置、試料箱は完全にアースした。試料箱は加熱の影響範囲を考え  $140 \times 140 \times 200 \text{ mm}$  のゴムパッキン付鉄容器を用いた。

(2) 実験方法

試料は所定の乾燥密度、含水比に調整し試料箱に 3~4 層で均一になるように突き固めた。試料箱を恒温槽に入れ、温度が均一であることを高感度直流電圧計で確認した後に測定を行った。なお、測定開始前に適切な電流値を得るため、擬似抵抗に通電し可変抵抗器を調整した。測定は同一試料について 3~4 回行い、測定値が  $t$  分布するとし、95% 信頼区間内のデータの平均をもって試料の熱伝導率とした。すべての測定値は 95% 信頼区間内であった。熱伝導率測定後、JIS A 1203 により含水比を測定し、試料箱容積と重量より湿潤密度を求めた。

マンガン線状熱源より放出される熱量  $q$  は抵抗値

と電流値より算出し、経過時間と c 点の温度より式 (3) を用いて熱伝導率を算出した。

$$K = \frac{q \ln(t_2/t_1)}{4\pi(T_2 - T_1)} \dots\dots\dots (3)$$

ここで

- $K$ : 熱伝導率 (kcal/m-hr $^\circ\text{C}$ )
- $q$ : 放出熱量 (kcal/m-hr)
- $t$ : 経過時間 (hr)
- $T_1$ :  $t_1$  での熱源温度 ( $^\circ\text{C}$ )
- $T_2$ :  $t_2$  での熱源温度 ( $^\circ\text{C}$ )

測定した熱伝導率は温度  $T_m = \frac{1}{2}(T_1 + T_2)$  での熱伝導率とした。

測定時の直流増幅器の感度は  $50 \mu\text{V/cm}$ ,  $100 \mu\text{V/cm}$  を用い、ペン書きオシログラフのチャートスピードは  $50 \text{ mm/sec}$  で行った。また、マンガン線熱源に流した電流値は  $0.6 \sim 1.2 \text{ A}$  であった。

3. 実験結果および考察

比重試験 (JIS A 1202)、締固め試験 (JIS A 1210)、BET 法<sup>16)</sup>による比表面積測定の結果を Table 1 に、粒度試験 (JIS A 1204) の結果を Fig. 2 に示す。

Table 1

	Specific gravity	Optimum water content	Specific surface area
Sand-A	2.715	14.6%	3m <sup>2</sup> /g
Sand-C	2.715	13.5%	—
Sandy loam	2.711	18.6%	19m <sup>2</sup> /g
loam	2.708	29.1%	35m <sup>2</sup> /g

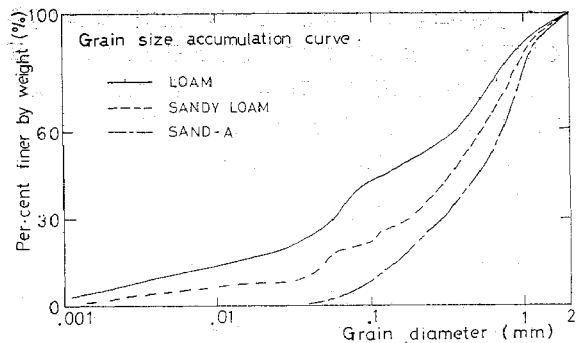


Fig. 2 Grain size accumulation curve

(1) 含水比と熱伝導率

乾燥密度一定で含水比と熱伝導率の関係を Fig. 3 に示す。Fig. 3 より、含水比および乾燥密度が増加するとともに熱伝導率も増加する傾向が認められる。高含水状態での熱伝導率は乾燥状態のそれに比べ 6~7 倍程度となり、水分が熱伝導率に大きく影響すると思われる。

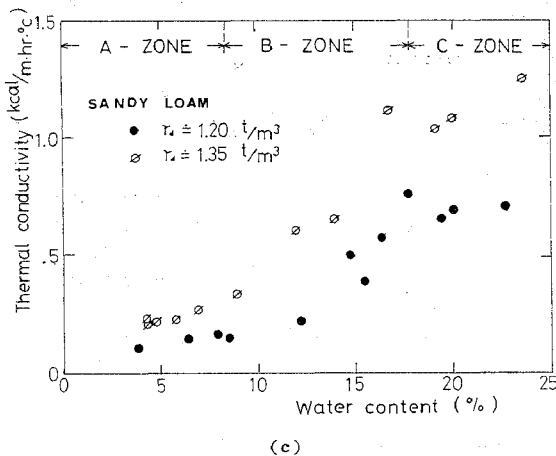
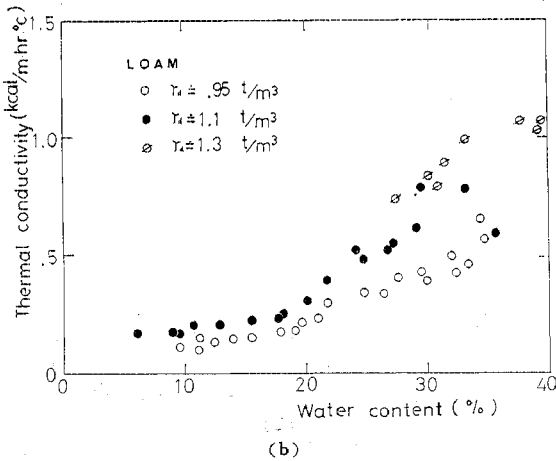
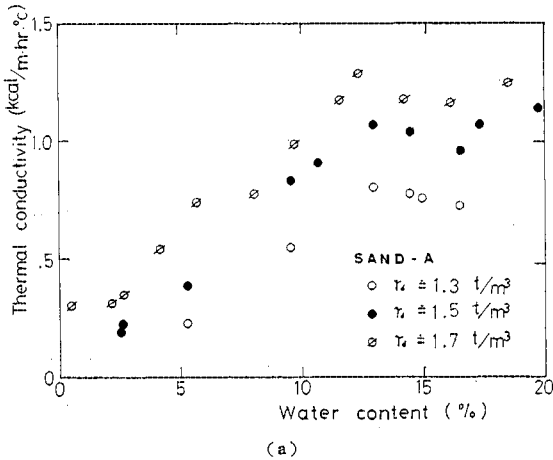


Fig. 3 Thermal conductivity VS water content

砂 A の場合、含水比  $w=13\sim 14\%$  以下で熱伝導率と含水比の関係はほぼ直線的であり、 $w > 13\sim 14\%$  では水分が増加してもその影響は少ないと認められる。一般に、粗粒土では含水分の多くは粒子と粒子との接触部にリング状に保水される<sup>17)</sup>。それゆえに、低含水状態

( $w < 13\sim 14\%$ ) で水分は土粒子間にリング状に保水され熱伝導を有効に行う熱橋の役をし、高含水状態 ( $w > 13\sim 14\%$ ) すなわち、熱伝導を有効にする熱橋が完成した後の状態では水分が増加しても熱伝導にさほど影響しないと考察される。砂 A の最適含水比  $w_{opt}$  は  $14.6\%$  であり、熱橋は最適含水比付近でもっとも有効に働くと思われる。

ロームの場合、低含水状態で水分の影響はほとんどなく、 $w > 20\%$  で水分の影響が顕著になる傾向が認められる。この低含水状態での現象は、ロームの比表面積が大きく、熱橋が有効に働くまでに多くの水分を必要とするために生じるものと考えられる。しかし、土粒子表面における保水のミクロな実態は大変複雑であり、土の保水機構が熱伝導率に大きな影響を与えていると思われる。ロームについても、最適含水比 ( $w_{opt}=29.1\%$ ) 以上で水分の熱伝導率におよぼす影響は少ない傾向が認められ、最適含水比付近で熱橋がもっとも有効に働くと推察される。

砂質ロームの場合、 $w < 8\sim 9\%$  (A 域) では水分が土粒子間をつなぐ有効な熱橋となっておらず水分の影響は小さく、 $w=8\sim 18\%$  の範囲 (B 域) では水分による熱橋が十分有効となり熱伝導率は水分の増加とともにほぼ直線的に増加し、 $w > 18\%$  (C 域) では水分の影響はほとんどないと思われる。砂質ロームについても、最適含水比 ( $w_{opt}=18.6\%$ ) 付近で熱伝導を行う熱橋がもっとも有効となり、最適含水比により B 域と C 域に区分されると思われる。

本実験結果では Vershinin<sup>18)</sup> の報告と若干異なり土の熱伝導率は水分の増加とともに A 域 (水分が有効な熱橋となる前の含水状態) から B 域 (水分が有効な熱橋となり、ほぼすべての熱橋が完成するまでの含水状態) そして C 域 (水分がもはや有効な熱橋とならない含水状態) と遷移し、その遷移の様子は土の物理的、化学的性質により異なると考えられる。砂 A では A 域がほとんど存在せず、ロームでは A 域が広く C 域が狭いことが認められる。

## (2) 見かけの保水膜厚と熱伝導率

見かけの保水膜厚と熱伝導率の関係を Fig. 4 に示す。ここで見かけの保水膜厚は土中の全含水体积を土粒子の全表面積で除したものと定義する。

砂 A の場合、見かけの保水膜厚が  $0.5\sim 1.0 \times 10^{-2} \mu$  以上で熱伝導率におよぼす水分の影響が顕著になり、ローム、砂質ロームの場合も見かけの保水膜厚がおよそ  $0.5 \times 10^{-2} \mu$  以上で水分の影響が顕著になると思われる。前述の A 域から B 域への遷移は見かけの保水膜厚がおよそ  $0.5 \times 10^{-2} \mu$  で起こると思われる。

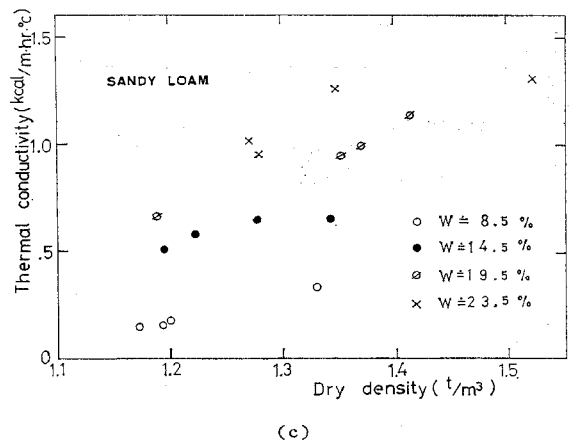
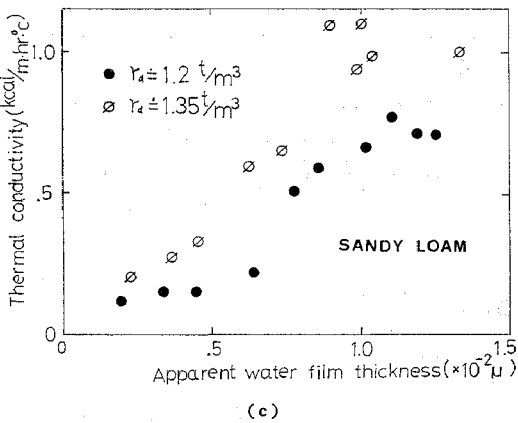
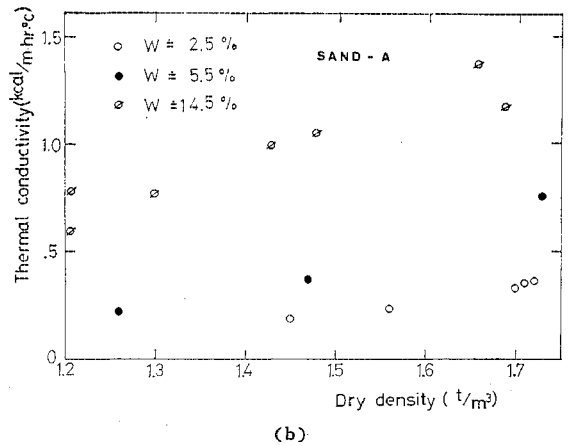
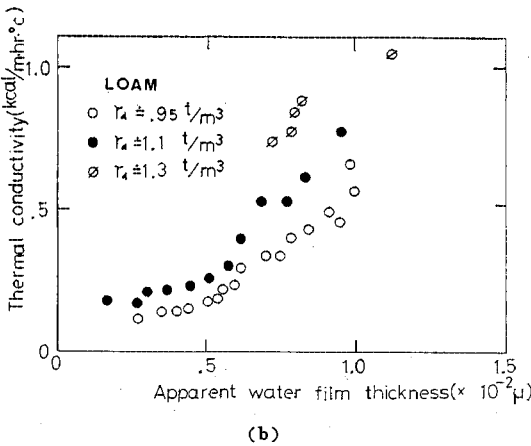
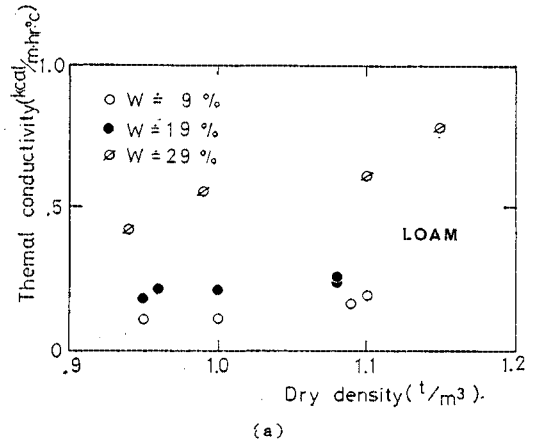
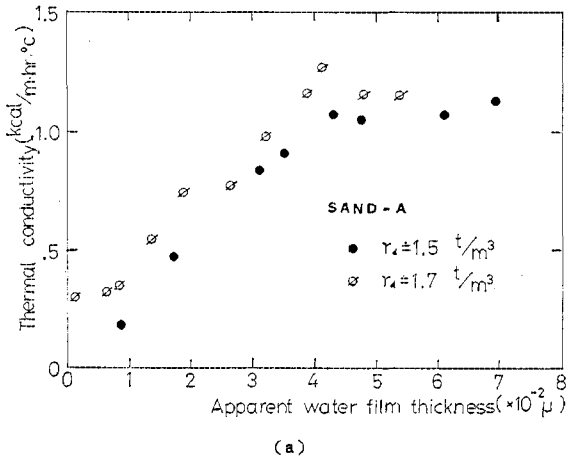


Fig. 4 Thermal conductivity VS Apparent water film thickness

Fig. 5 Thermal conductivity VS Dry density

(3) 乾燥密度と熱伝導率

乾燥密度と熱伝導率の関係を Fig. 5 に示す。乾燥密度の増加とともに熱伝導率はほぼ直線的に増加し、高含水状態で増加率が大きくなる傾向が認められる。しかし、熱伝導率におよぼす乾燥密度の影響は水分の影響に

比べ小さいと認められる。

ここで、多くの影響因子のうち含水比と乾燥密度に注目し、熱伝導率との関係を Fig. 6 に示す。Fig. 6 は砂 A、ローム、砂質ロームの実測値を示し、等熱伝導率線より工学的に必要な熱伝導率をある程度予測できると思われる。

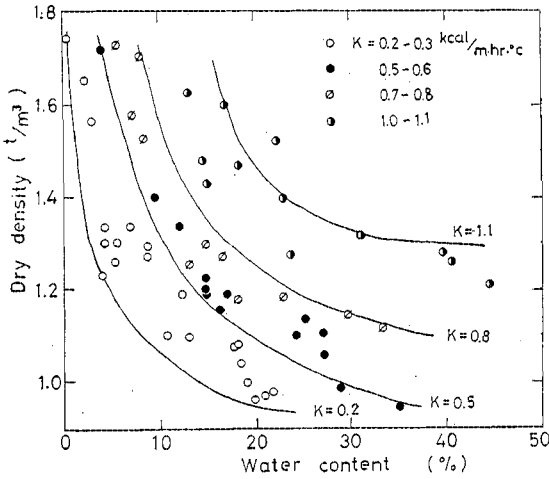


Fig. 6 Prediction of thermal conductivity

(4) 飽和度と熱伝導率

土は土粒子、水、空気の三相から成り、各相がそれぞれ熱伝導率に影響をおよぼすと考えられる。三相の相関を示す係数である飽和度と熱伝導率の関係を Fig. 7 に示す。Fig. 7 より、含水比、乾燥密度の二因子に代わり飽和度を考えると土の熱伝導率が把握できると推察される。土中の間隙を水分が充填するに従い、水分による熱橋の数は初めゆっくり増加し、熱橋の数の変化率は最大となり、その後ゆっくり減速しほとんど平衡に達すると考えられ、ロジスチックモデルを仮定する。

一般に、 $y=f(x)$  としてロジスチック曲線は次式で示される。

$$dy/dx = C(y_{max} - y)y \quad \dots\dots\dots (4)$$

式(4)を積分して

$$y = \frac{y_{max}}{1 + C_1 \exp(-C_2 x)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、

$y_{max}$  :  $y$  の極限最大値

$C_1, C_2$  : 定数

熱伝導率  $K$  を飽和度  $S_r$  のみと関数とし

$$K = \frac{K_{max}}{1 + C_1 \exp(-C_2 S_r)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式(6)を変形して式(7)となる。

$$\ln(K_{max}/K - 1) = a + b S_r \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、

$K_{max}$  : 極限の最大熱伝導率 (kcal/m-hr-°C)

$S_r$  : 飽和度 (%)

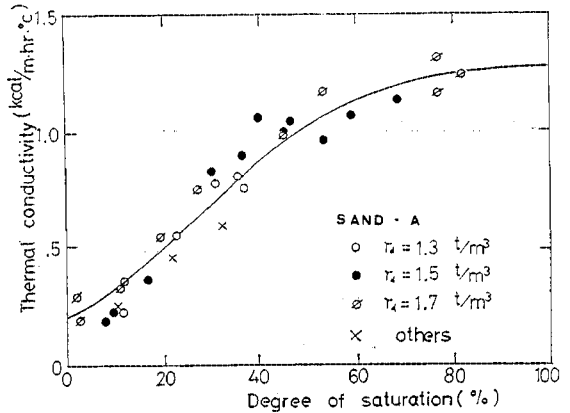
$a, b$  : 定数

$K_{max}$  は式(7)が直線となるように決定し、砂 A で 1.30 kcal/m-hr-°C、ロームで 1.10 kcal/m-hr-°C、砂質ロームで 1.35 kcal/m-hr-°C であった。求めた  $K_{max}$

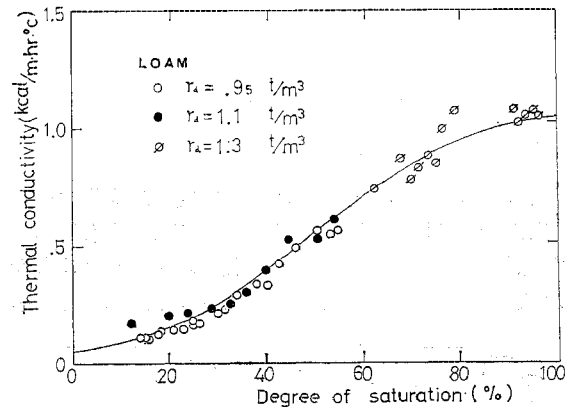
を式(7)に代入し最小自乗法を用いて定数  $a, b$  を決定した。Fig. 8 にロームの例を示す。

決定された回帰式を式(8)~(10)に示す。

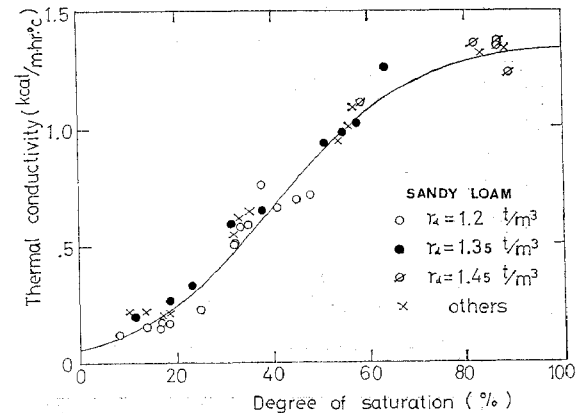
$$\text{砂 A : } K = \frac{1.30}{1 + 5.24 \exp(-0.0591 S_r)} \quad \dots\dots\dots (8)$$



(a)



(b)



(c)

Fig. 7: Thermal conductivity VS Degree of saturation

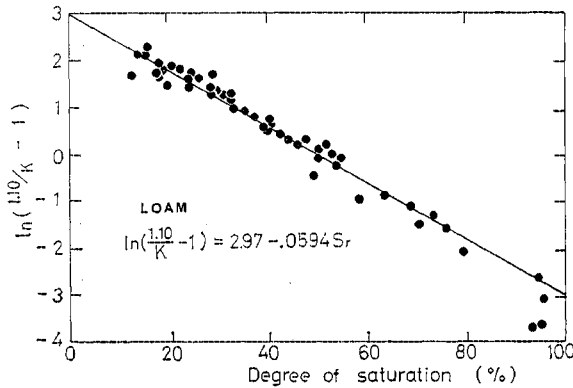


Fig. 8 Determination of  $a, b$

$$\square \text{ --- } \triangle : K = \frac{1.10}{1 + 19.5 \exp(-0.0594 S_r)} \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{砂質ローム} : K = \frac{1.35}{1 + 18.5 \exp(-0.0720 S_r)} \dots\dots\dots (10)$$

回帰式の相関比は砂で  $\eta=0.96$ , ロームで  $\eta=0.98$ , 砂質ロームで  $\eta=0.97$  であり, 熱伝導率が飽和度により予測可能であると思われる. しかし, 式(8)~(10)中の定数は土の性質により異なり今後さらに検討が必要であると思われる.

(5) 温度の影響

砂 A を粒径 0.42~0.84 mm に調整した砂 B について温度と熱伝導率の関係を Fig. 9 に示す. 熱伝導率は温度上昇とともにほぼ直線的に増加し, その増加率は含水状態により異なる傾向が認められる. 図中Ⅲの増加率

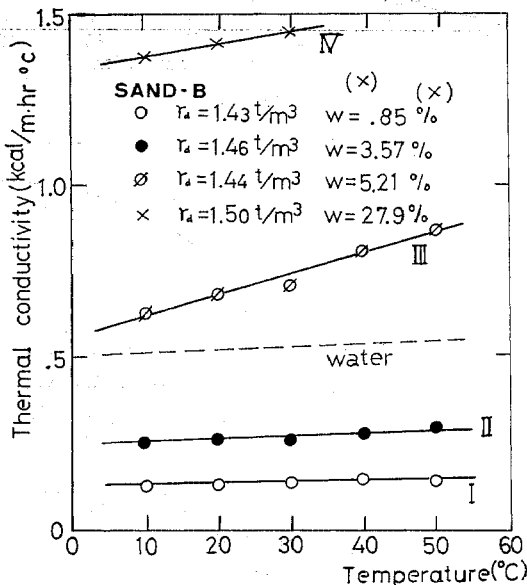


Fig. 9 Temperature dependence of thermal conductivity

が I, II, IV の増加率, 水の熱伝導率の増加率に比べ大きい傾向が認められる. この傾向はある含水状態(熱橋がもっとも有効な状態)で熱伝導がおもに土粒子に基因し, 土粒子自体の熱伝導率は温度上昇とともにかなり増加することが原因であると推察される.

4. 熱伝導モデル

(1) 理論

土中で熱伝導に関与するのは固相, 液相, 気相の三相であるが, 気相は固相, 液相に比べ熱伝導率が小さいため(空気: 0.02 kcal/m·hr·°C)実際に熱伝導を行うのは固相と液相であると考えられる.

砂Aの熱伝導率は水分の増加とともにほぼ直線的に増加し, 最適含水比以上では水分の影響はほとんどないという知見より, 粗粒土に対して Fig. 10 に示すモデルを考える. このモデルは粕淵の定性的モデル<sup>19)</sup>を若干修正したものである. 図中で  $S_1, S_2$  は固相部分,  $P_1, P_2$  は水分の増加により水に満たされる間隙部分を示す. 水分がない状態では  $S_1$  部分による熱伝導のみであり, 水分の増加により  $S_2$  部分と  $P_1$  部分が結合し熱伝導を行う. さらに水分が増すと  $P_2$  部分も熱伝導に関与するというモデルである.

ここで,  $S_1, S_2, P_1, P_2$  は式(11)~(13)を満足する.

$$S_1 + S_2 = S = V_s/V \dots\dots\dots (11)$$

$$P_1 + P_2 = P = V_w/V \dots\dots\dots (12)$$

$$S + P = 1 \dots\dots\dots (13)$$

ここで,

$S$ : 体積固相率

$P$ : 間隙率

土の体積含水率  $M_v (=V_w/V)$  により2つの場合に分けられる.

a)  $0 \leq M_v \leq P_1$  の場合

b)  $P_1 \leq M_v \leq P_1 + P_2$  の場合

a)  $0 \leq M_v \leq P_1$  の場合

$P_1$  部分のうち水により満たされた部分を  $y$  とし,  $y$  と結合し熱伝導を行う  $S_2$  部分を  $x$  とする. また,  $x+$

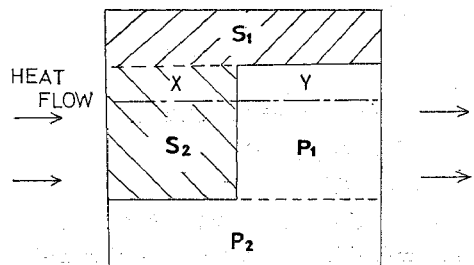


Fig. 10 Model

$y=v$  とする.

$$x = \frac{S_2}{P_1} y = \alpha y \quad \dots\dots\dots(14)$$

ここで,

$$\alpha = S_2/P_1 \quad \dots\dots\dots(15)$$

ある含水状態から水分が増加し、熱伝導に参加する微小体積  $dv$  を考える.

$$dv = dx + dy = (\alpha + 1) dy \quad \dots\dots\dots(16)$$

ここで  $dv, dx, dy$  は体積分率であり無次元量であり、 $dy$  が水分で飽和され、はじめて  $dv$  部分が熱伝導に参加する.

いま、熱流と電流との間に類比性があり、固液界面の熱抵抗はないと仮定し、 $dv$  部分の固相と液相が直列に熱伝導を行うとすると電気抵抗の直並列抵抗計算と全く同様な方法で  $dv$  部分の熱伝導率が算出できる.

$$K_{equ} = \frac{dx + dy}{dx/K_s + dy/K_L} \quad \dots\dots\dots(17)$$

ここで,

$K_{equ}$ :  $dv$  部分の換算熱伝導率

$K_s$ : 固相の熱伝導率

$K_L$ : 液相の熱伝導率

$K_{equ}$  は微小体積  $dv$  が熱伝導に関与することによる熱伝導率の増加分であり、 $dv$  の増加に伴う総括的な熱伝導率の変化率に等しいと考えられる.

$$K_{equ} = \frac{dK}{dv} = \frac{dK}{(1+\alpha)dy} \quad \dots\dots\dots(18)$$

式 (17), (18) より次式を得る.

$$\frac{dK}{dy} = (1+\alpha)K_{equ} = \frac{(1+\alpha)^2}{\alpha/K_s + 1/K_L} \quad \dots\dots\dots(19)$$

$y$  は体積含水率  $M_v$  に等しいので、式 (19) は次式となる.

$$\frac{dK}{dM_v} = \frac{(1+\alpha)^2}{\alpha/K_s + 1/K_L} \quad \dots\dots\dots(20)$$

水分がない状態 ( $M_v=0$ ) では  $S_1$  部分のみが熱伝導を行い、次式をうる.

$$S_1 = \frac{K_0}{K_s} \quad \dots\dots\dots(21)$$

ここで,

$K_0$ : 固相のみによる熱伝導率

b)  $P_1 \leq M_v \leq P_1 + P_2$  の場合

$P_1 \leq M_v \leq P_1 + P_2$  の状態で熱伝導率の増加率は液相の熱伝導率に等しい.

$$\frac{dK}{dM_v} = K_L \quad \dots\dots\dots(22)$$

以上の理論で  $S$  は乾燥密度と比重より算出でき、 $P_1$  を最適含水状態における体積含水率とすると  $P_2$  も算出できる.  $K_L$  は水の熱伝導率 (0.515 kcal/m-hr-°C) を用い、 $K_0$  は実測値より決定した.

(2) 適用例および考察

砂 A と砂 C (砂 A を粒径 74  $\mu$ ~2.0 mm に調整した試料) に適用を試みた.

熱伝導率と体積含水率との関係を Fig. 11, Fig. 12 に示す. 体積固相率  $S(V_s/V)$  を種々変えたにもかかわらず、顕著な差が認められなかったため、砂 A, 砂 C の全実測値を用いて検討を行った.  $S$  は全実測値の算術平均を用い、 $P_1$  は最適含水状態での体積含水率を用いた.  $dK/dM_v$  は  $0 \leq M_v \leq P_1$  の範囲に最小自乗法を用い決定した.  $S, P_1, P_2, dK/dM_v, K_0$  は既知であり Table 2 にまとめた. 未知量は  $K_s$  と  $S_1$  であり、式 (15), 式 (20), 式 (21) を用いて  $K_s$  を求めた.

a) 砂 A の場合

式 (20) より

$$3.75 = \frac{(1+\alpha)^2}{\alpha/K_s + 1/0.515} \quad \dots\dots\dots(23)$$

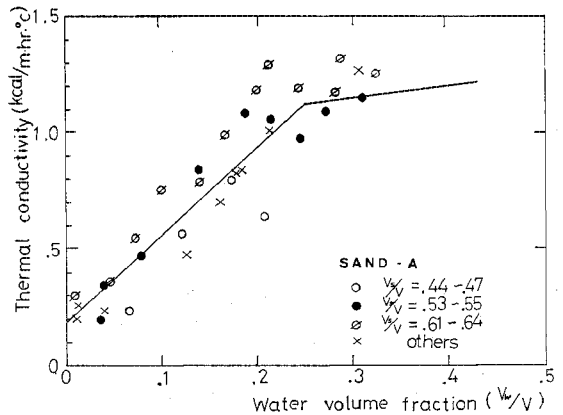


Fig. 11 Sand-A

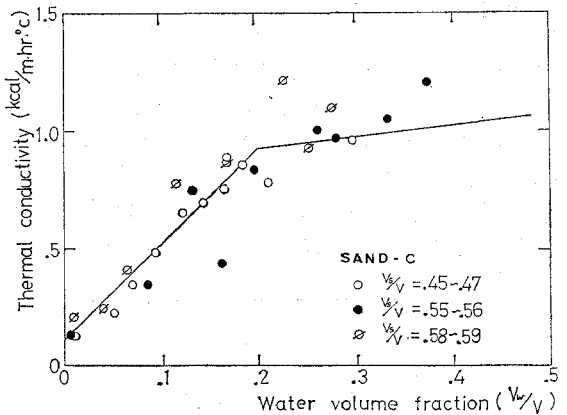


Fig. 12 Sand-C

Table 2

	$dK/dM_v$	$K_0$	$S$	$P_1$	$P_2$
Sand-A	3.75	0.18	0.57	0.25	0.18
Sand-C	4.08	0.10	0.52	0.20	0.18

式 (15), 式 (21) より

$$\alpha = \frac{0.57 - S_1}{0.25} \dots\dots\dots(24)$$

$$S_1 = 0.18/K_s \dots\dots\dots(25)$$

式 (23)~式 (25) より

$$K_s = 3.57(\text{kcal/m}\cdot\text{hr}\cdot^\circ\text{C}) \dots\dots\dots(26)$$

b) 砂 C の場合

同様にして

$$K_s = 2.65(\text{kcal/m}\cdot\text{hr}\cdot^\circ\text{C}) \dots\dots\dots(27)$$

以上の適用例について、土粒子の熱伝導率は 1~10 kcal/m·hr·°C であるので、推定された  $K_s$  は定量的にほぼ満足な値であると思われる。また、 $P_1, P_2, S$  は土の物理的性質より決められ、 $K_0, dK/dM_0$  が決定できれば現実的なモデルであると思われる。

今後さらに実験、研究を重ね、細粒土にも適用可能なモデルの考案が必要であると思われる。

## 5. 結 語

砂、ローム、砂質ロームについて非定常法により熱伝導率を測定し、次の結果を得た。

(1) 土の熱伝導率は含水比、乾燥密度が増すとともに増加し、高含水状態での熱伝導率は乾燥状態のそれに比べ 6~7 倍程度となり、水分が熱伝導に大きな影響を与える。

(2) 土の熱伝導率に及ぼす水分の影響は見かけの保水膜厚がおよそ  $0.5 \times 10^{-2} \mu$  以上の含水状態で顕著となり、最適含水比以上ではその影響はほとんどない。

(3) 含水比、乾燥密度の二因子の代わりに飽和度を考えることにより土の熱伝導率をある程度把握でき、砂 A, ローム, 砂質ロームについて熱伝導率の推定式を示した。

(4) 土の熱伝導率は温度上昇とともにほぼ直線的に増加し、高含水状態でその増加率は大きい。

(5) 粗粒土について定量的熱伝導モデルを提案した。

本研究を進めるにあたって、多大な協力を頂いた環境庁 谷津龍太郎氏 (当時、東北大学学生)、東北大学工学部

化学工学科荻野研究室各位に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 石山和雄：地盤凍結工法，理工図書，pp. 102~110, 1968.
- 2) 粕淵辰昭：土壤の熱伝導率におよぼす水分の影響，日本土壤肥料学雑誌，第 43 巻，12 号，pp. 437~441, 1972.
- 3) 斎藤 武・岡垣 理：湿った物質の伝熱特性，日本機械学会誌，第 62 巻，484 号，pp. 75~81, 昭和 34 年.
- 4) Woodside, W., Messer, J.H.: Thermal Conductivity of Porous Media I; Journal of Applied Physics, Vol. 32, No. 9, pp. 1688~1699, 1961.
- 5) Maxwell, J.C.: A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd edn., Vol. I and II, Vol. I, pp. 434~440, Dover New York, 1954.
- 6) De Vries, D.A.: Analysis of Porous Thermal Insulating Materials, Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 49, No. 11, p. 1936, 1957.
- 7) Tsao, G.T.: Thermal Conductivity of Two-phase Materials, Industrial and Engineering Chemistry Vol. 53, No. 5, pp. 395~397, 1961.
- 8) たとえば, Kunii, D., Smith, J.M.: Heat Transfer Characteristics of Porous Rocks, A.I. Che. E. Journal Vol. 6, No. 1, pp. 373~381, 1960.
- 9) Cheng, S.C., Vachon, R.I.: The Prediction of The Thermal Conductivity of Two and Three Phase Solid Heterogeneous Mixtures. Int. J. Heat Mass Transfer Vol. 12, pp. 249~264, 1969.
- 10) Woodside, W., Cliffe, J.B.: Heat and Moisture Transfer in Closed Systems of Two Granular Materials., Soil Science, Vol. 87, pp. 75~82, 1957.
- 11) Woodside, W., C.M.A. de Bruyn: Heat Transfer in a Moist Clay, Soil Science, Vol. 87, pp. 166~173, 1957.
- 12) 松本順一郎・長谷川信夫・阿久津忠：土の伝熱特性について，第 3 回土質工学研究発表会概要集，pp. 317~320, 昭和 43 年.
- 13) 粕淵辰昭：土壤の熱伝導機構について，農業土木学会誌，Vol. 42, No. 8, pp. 29~30, 1974.
- 14) Carslaw, H.S., Jeager, J.C.: Conduction of Heat in Solids, 2nd ed, Oxford at the Clarendon Press pp. 345~346, 1959.
- 15) 阿久津忠：消化槽の伝熱特性について，東北大学修士学位论文，昭和 42 年.
- 16) 川北公夫・種谷真一・小石真純：粉体工学 (基礎編)，槇書店，pp. 208~212, 1974.
- 17) 八幡敏雄：土壤の物理，東京大学出版会，p. 49, 1975.
- 18) Vershinin, P.V. et al.: Fundamentals of Agrophysics Israel Program for Scientific Translations, p. 374, 1966.
- 19) 前出文献 2)

(1976.6.16・受付)