

土の熱伝導率について

北野雅治* 仁平勝行**

目 次

- 1 緒 言
- 2 実験方法
 - (1) 実験概要
 - (2) 実験装置
 - (3) 実験操作および計算
- 3 実験結果
- 4 考 察
 - (1) 水分の影響
 - (2) 固相率の影響
 - (3) 粒度分布の影響
 - (4) 凍結の影響
- 5 熱伝導モデル
- 6 ま と め
- 参 考 文 献

1 緒 言

気象、農業、土木などの多くの分野で、土中の伝熱現象を取扱う場合、例えば、各種の熱収支問題、凍結凍上対策、地盤凍結工法などの解決に、土の熱伝導率が必要となる。熱伝導率は(1)式で定義される物理的性質である。

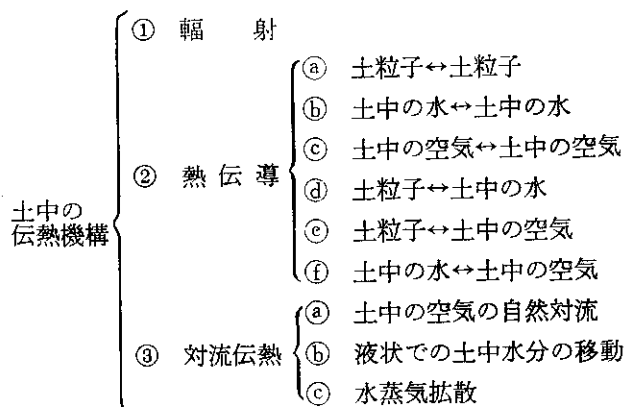
$$q = -K \frac{d\theta}{dx} \dots\dots\dots (1)$$

q ; 熱フラックス (cal/cm²・sec)

K ; 熱伝導率 (cal/cm・sec・°C)

$\frac{d\theta}{dx}$; 温度勾配 (°C/cm)

土は固相(土粒子)、液相(水)、気相(空気)の3相からなり、また、土粒子の大きさ、形状、性質も不均一なため、その伝熱機構は複雑であるが、土中では、主に次のような伝熱機構が起こる可能性がある。



しかしながら、土中では特殊な状態を除き、①の輻射の影響は無視できる。②の熱伝導は、分子の振動の運動エネルギーが伝わる現象であり、温度勾配に比例して行われる。土中では④～⑨の熱伝導が考えられるが、土粒子や水の熱伝導率に比して、空気(③)の熱伝導率は極端に小さい(0.02 cal/m・hr・°C)ため、③(⑤⑥⑦)の空気を通しての熱伝導は無視される。また、③の対流伝熱は物質の移動によって起こる熱(顕熱、潜熱)の輸送で、湿った土の場合は特別な場合を除いて、③-⑨水蒸気拡散にともなう凝縮潜熱の輸送だけが問題となる。しかし、凍上現象の場合は、③-⑪液状での土中水分の移動も、大きく関与してくると思われる²⁾。すなわち、一般に湿った土の伝熱機構としては、②-④⑥⑧の熱伝導と、③-⑨の水蒸気拡散が、主要な伝熱機構と考えてよい。

水蒸気拡散による伝熱も、温度勾配に比例することから、純粋な熱伝導に対する真の熱伝導率に、水蒸気拡散の影響を加えて、(2)式のように見掛けの熱伝導率が定義されている。

$$q = -\left(K + K_{vap}\right) \frac{d\theta}{dx} = -K_{apr} \frac{d\theta}{dx} \dots\dots (2)$$

q ; 熱フラックス (cal/cm²・sec)

K ; 純粋な熱伝導に対する真の熱伝導率
(cal/cm・sec・°C)

K_{vap} ; 水蒸気拡散の伝熱に及ぼす影響で拡散等価熱伝導率と定義されるもの (cal/cm・sec・°C)

K_{apr} ; $K + K_{vap}$ 見掛けの熱伝導率
(cal/cm・sec・°C)

*特殊土質開発研究室員 **同室主任研究員

水蒸気拡散の影響は、温度および温度勾配によって変化するとともに、含水率によっても変化する。しかし、土の温度が常温(約20°C)よりかなり高い場合や、地表面付近のように温度勾配が大きい場合のほかは、水蒸気拡散の影響は、純粋な熱伝導に比してきわめて小さく、純粋な熱伝導が土の伝熱のほとんどの部分を占め、真の熱伝導率を知ることが、土の伝熱特性を知るための重要な問題となる。湿った土において、水蒸気拡散の影響を完全に分離して、真の熱伝導率だけを測定することは、実際には不可能であるが、非定常プローブ法を用いれば、水蒸気拡散の影響をきわめて小さく押えた状態で、熱伝導率を測定できることが一般に認められている³⁾。

土の熱伝導率に関与する因子として、土の3相分布、土粒子の粒径や形状、構成土粒子の熱伝導率、温度など多くの因子が複雑に関係するので、土を3相混合物として、理論的に取扱った研究は少なく、実験データの集積も多くはないが、粕淵⁴⁾の定性的なモデルや、粕淵のモデルを修正した松本⁵⁾らのモデルが提案されている。これらのモデルは、最も大きな影響因子である含水率の熱伝導率への影響は説明されているが、固相率や構成土粒子の大きさの影響について詳しくは述べられていない。また、この分野の研究は、粒径2 mm以下の細粒土か砂質土に限られ、土木材料としてよく使われる粒径の大きな礫材についての研究は、まったくなされていない。

そこで、筆者らは細粒土、粗砂、礫を用いて、含水率、固相率、粒度分布が、熱伝導率に与える影響を非定常プローブ法を応用して明らかにし、これら3つの因子の影響が説明できる。熱伝導モデルの考案を試みた。また、凍上を起こさない粗粒土を凍結させて、凍結土の熱伝導率についても検討した。

2 実験方法

(1) 実験概要

物体の熱伝導率の測定は、定常状態で測定するか、非定常状態で測定するかで、定常法と非定常法に大別される。今回用いた方法は、後者に属する非定常プローブ法である。この方法は試料内に棒状熱源を挿入し、連続的に一定の熱量を放出させ、熱源に接する試料の温度の経時変化より熱伝導率を求める方法で、比較的簡単な装置や操作で短時間に測定でき、上昇温度も小さいので、水蒸気拡散の影響をきわめて小さくでき、純粋な熱伝導率の測定法として、一般に用いられている方法である⁴⁾。岡垣³⁾らの例では、土中間げきの水蒸気拡散に対する抵抗を考慮しない場合でも、水蒸気拡散の影響は、たかだか約1~4%(含水率3~20%)であったと報告されて

いる。

(2) 実験装置

装置の回路と棒状熱源の構造を、図-1, 2に示す。棒状熱源には、直径5 mm、長さ20 cmの銅棒に、抵抗温度係数の小さい⁶⁾ 絹巻マンガン線($\phi=0.1$ mm)を密巻きにし、熱源表面の温度測定用の熱電対を2個取付けて、テープで絶縁したものを用いた。熱源の加熱には直流定電圧電源を、電圧、電流を測定しながら用いた。温度測定は、銅-コンスタンタン($\phi=0.3$ mm)を用い、記録計は、多点マイクロボルト計を、スターターと連結して用いた。

(3) 実験操作および計算

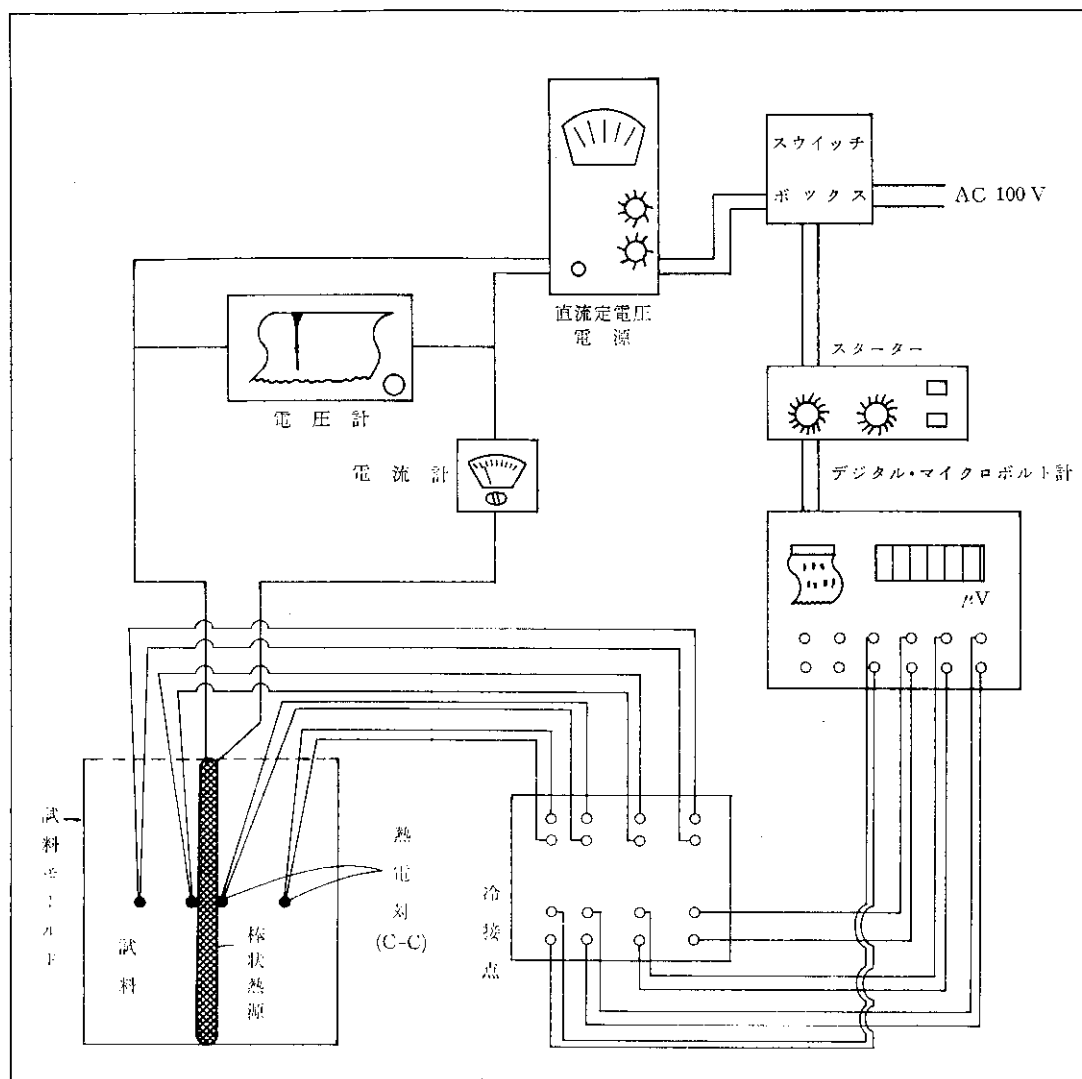
直径17 cm、高さ20 cmのモールドに、棒状熱源を入れて、試料を所定の乾燥密度、含水比に調整し、細粒土の場合は10層、粗粒土の場合は4層で均一につめた。試料の中央部の温度と棒状熱源の温度が同じであることを確認した後、棒状熱源に電圧を加えながら、10秒ごとに約20回棒状熱源の中央部の表面温度の経時変化を測定し、測定後、含水量測定試料を採取した。測定は実験室で行ったが、各回の試料の温度は $18\pm1^\circ\text{C}$ 、棒状熱源の上昇温度は 1.5°C 以内としたので、熱伝導率への試料温度の影響および水蒸気拡散による伝熱は無視できよう。

今回の実験では、礫材のような粗粒土の測定を目的のひとつにしたので、棒状熱源と試料との間の接触を良くするため、棒状熱源の太さを直径5.5 mmと太くした。したがって、理想的な線状熱源とみなすことはできないので、熱源の太さ、熱的性質や熱源と試料間の空げきや接触抵抗を考慮に入れた理論式⁷⁾を用いて、熱伝導率の計算を行った。以下に計算式を示す。

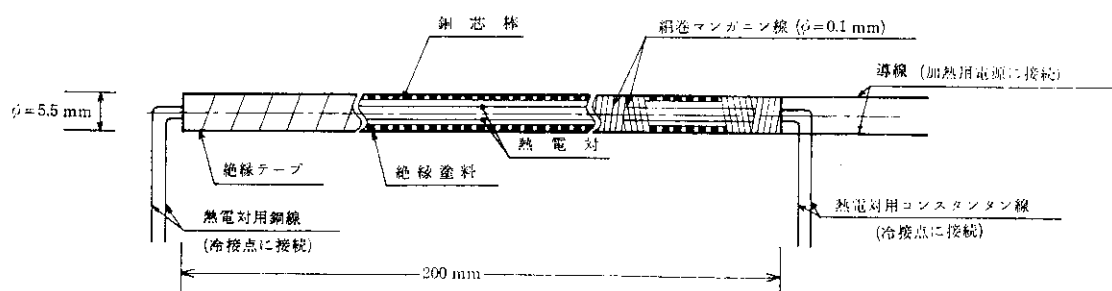
$$\theta_t - \theta_0 = A \log t + B + \frac{1}{t} \left(C \log t + D \right) \dots\dots (3)$$

$$A = \frac{Q}{4\pi K} \dots\dots\dots (4)$$

θ_0 は棒状熱源表面の初期温度、 θ_t は t 秒間加熱後の温度、 Q は棒状熱源に与えた一定熱量(cal/cm・sec)、 K は試料の熱伝導率(cal/cm・sec・°C)である。A, B, C, Dは係数で、試料の熱伝導率、熱源の太さ、熱的性質、熱源と試料間の空げきや接触抵抗によって決定される。測定した約20個の測定値 $\theta_t - \theta_0$ より最小自乗法を用いて、係数A, B, C, Dを求め、(4)式より試料の熱伝導率 K を求めた。各実験の(3)式への相関係数は、 $r=0.99$ 以上であった。熱量 Q は、電圧と棒状熱源の電気抵抗より求め、計算および作図は、Y.H.P 9825 A, 9872 A プロッターを用いて行った。



図—1 非定常プローブ法の測定回路



図—2 棒状熱源構造

3 実験結果

粘土、粗砂、礫 A、礫 B について、実験を行った。各供試体の比重、乾燥密度、固相率を表-1 に、粒度分布を図-3 に示す。粗砂、礫 A、礫 B は、40 mm 級の切込砂利を、フルイでふるって調整したものである。

土は土粒子、水、空気で構成され、それぞれが熱伝導率に影響を及ぼす。最も大きな影響を及ぼす因子である水分の影響として、細粒土の場合、熱伝導率 K と体積含水率 $M_v = \frac{V_w}{V}$ の間に、(5) 式のような直線関係が報告されている^{4), 5)}。

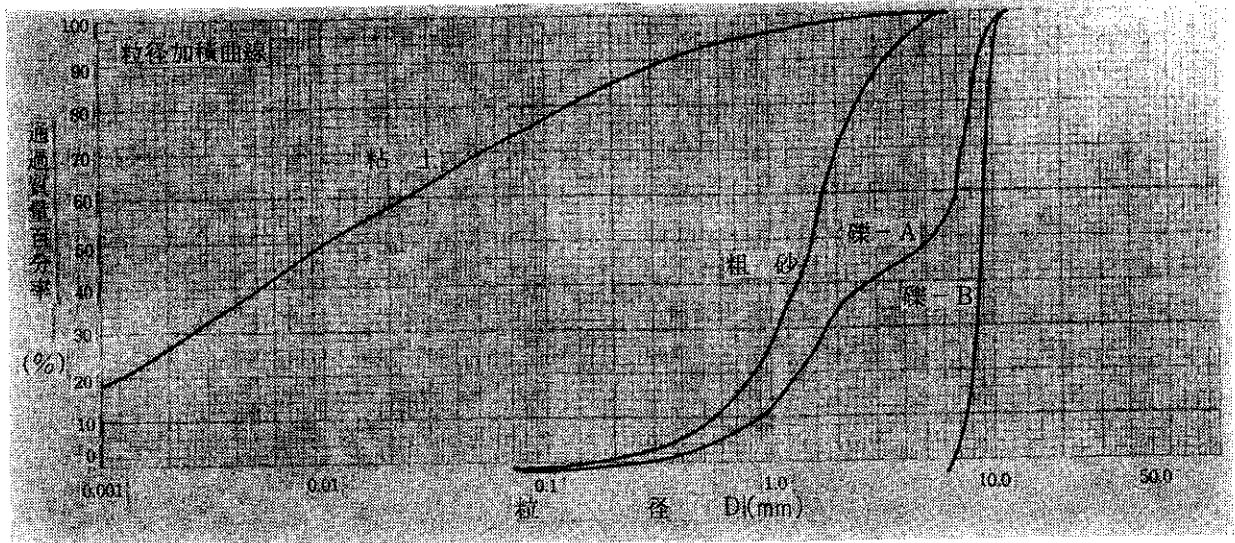
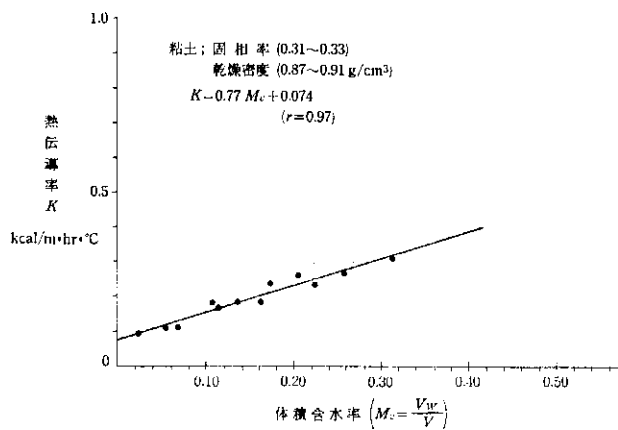


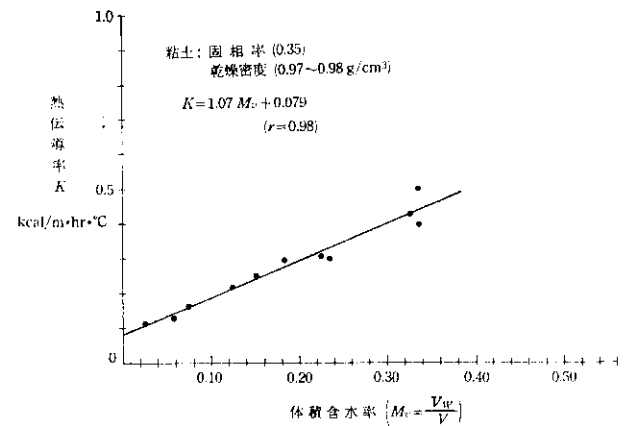
図-3 試料の粒径加積曲線

表-1 供試体の性質

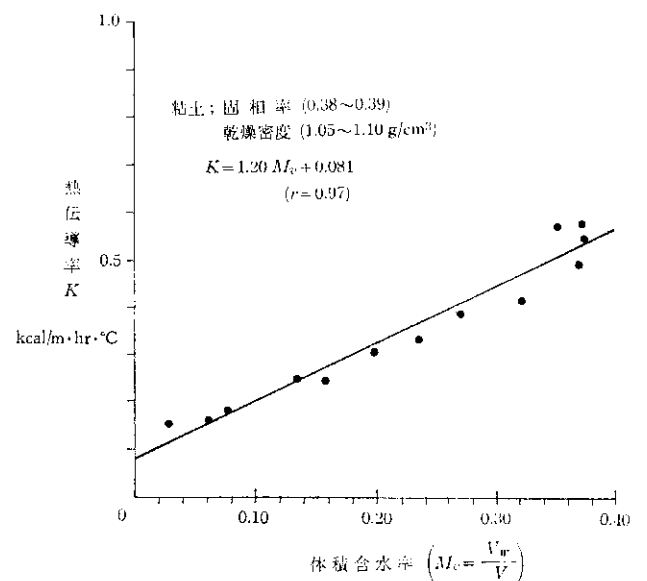
	比重	乾燥密度 (g/cm ³)	固相率 (%)	粒 度
粘土	2.795	0.87~0.91	31~33	$D_{60}=0.02$ mm $D_{10}=0.001$ 以下
	2.795	0.97~0.98	35	"
	2.795	1.05~1.10	38~39	"
粗砂	2.677	1.71~1.76	64~65	$D_{60}=1.5$ $D_{10}=0.44$ $U_c=3.4$
凍結粗砂	2.677	1.51~1.58	56~59	"
	2.677	1.64~1.72	61~64	"
礫A	2.677	1.63~1.79	61~67	$D_{60}=5.5$ $D_{10}=0.65$ $U_c=8.5$
礫B	2.677	1.59~1.64	59~61	$D_{60}=7.7$ $D_{10}=6.2$ $U_c=1.2$



(a) 固相率 $S=0.31\sim0.33$ の場合



(b) 固相率 $S=0.35$ の場合



(c) 固相率 $S=0.38\sim0.39$ の場合

図-4 粘土の熱伝導率と体積含水率の関係 ((a), (b), (c))

$$K = \frac{dK}{dM_v} \cdot M_v + K_0 \dots\dots\dots (5)$$

K_0 : 直線の切片で、水をまったく含まない時の熱伝導率

実験結果を(5)式で整理した結果、図-4(a), (b), (c) および図-5~7に示すように、細粒土(粘土)だけでなく、

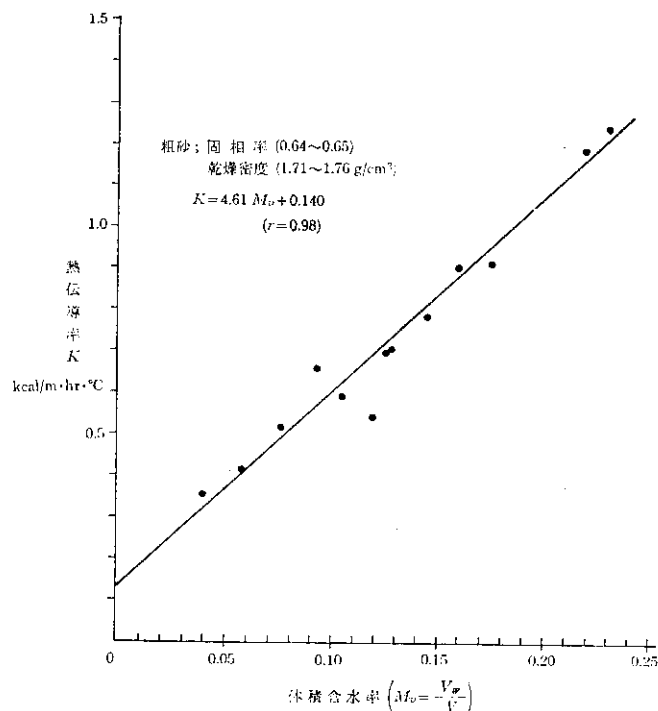


図-5 粗砂の熱伝導率と体積含水率の関係

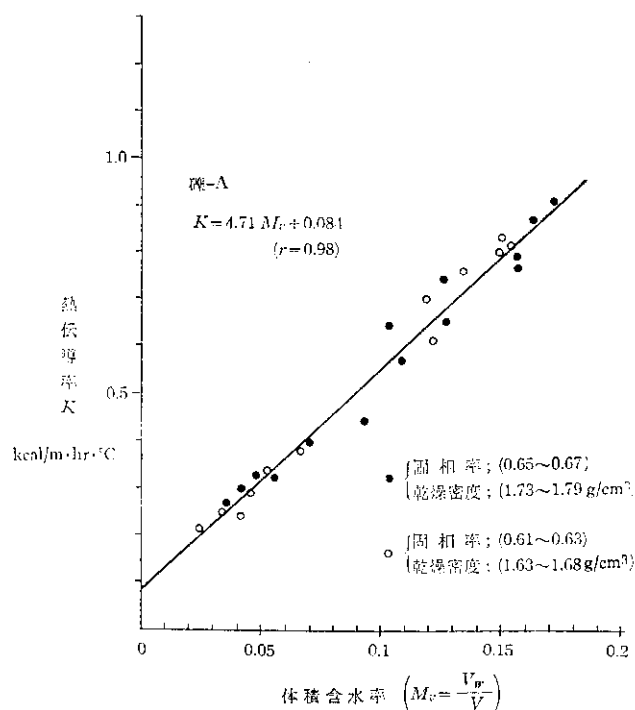


図-6 礫-A の熱伝導率と体積含水率の関係

粗砂や礫などの粗粒材についても、 K と M_v に直線関係が認められた。また、粗砂を -13°C で凍結させて行った実験でも、図-8に示すように、直線関係が認められた。 $\frac{dK}{dM_v}$ と K_0 について結果を表-2に整理し、水分、固相率、粒度分布や凍結の影響について考察を行った。

4 考 察

(1) 水分の影響

実験の結果、体積含水率が増すと熱伝導率は増大した。この熱伝導率の増大する現象は熱橋理論で説明できる。すなわち、土粒子が最初に水と接すると、土粒子表面は数分子層の水分子を強い力で吸着するが、さらに水分が増加すると、図-9に示すように土粒子接触部分のく

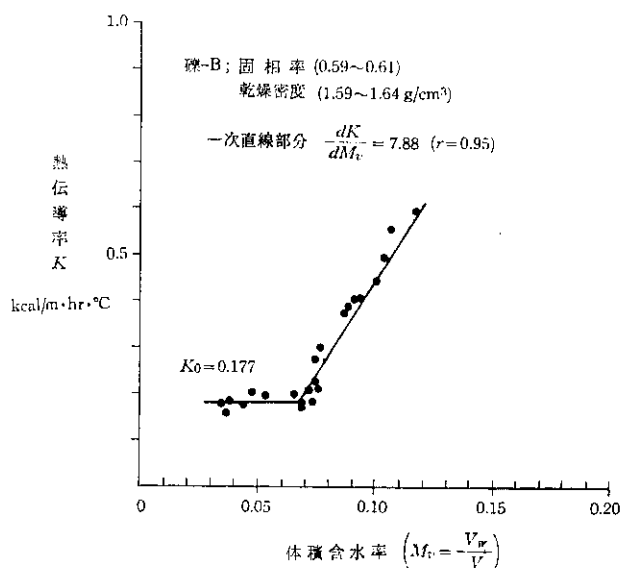


図-7 礫-B の熱伝導率と体積含水率の関係

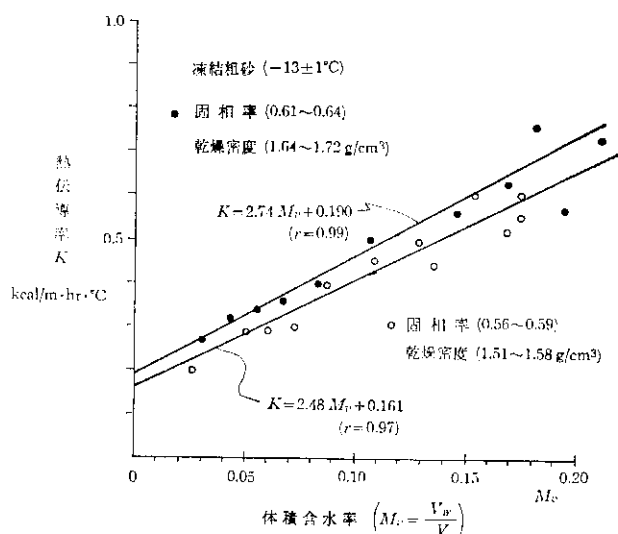


図-8 凍結粗砂の熱伝導率と体積含水率の関係

さび形のすき間に、メニスカスによってリング状に水が保持されるようになる^{8),9)}。土の熱伝導に対して、このリング状の水分は、土粒子と土粒子をつなぐ「熱橋」となり、土粒子—水—土粒子の熱の通り道を形成する。したがって、水分増加によって土の熱伝導率が増加する。体積含水率との直線関係については、熱伝導モデルで説明する。

(2) 固相率の影響

粘土について、図-4(a), (b), (c)に示したように、固相率が増加すると、水を含まない時の熱伝導係数 K_0 と直線の勾配 $\frac{dK}{dM_v}$ が大きくなる傾向が認められた。固相率の増加により、土粒子と土粒子の接触部の数が増えることや、間げきが小さくなり、水分の熱橋形成が容易になること、熱橋によって形成された土粒子—水—土粒子の熱の通り道で、熱伝導率が高い土粒子の部分が増え、1つの熱橋の効果が大きくなることが原因として考えられる。

(3) 粒度分布の影響

図-4~7からわかるように、土の構成土粒子の粒径が大きくなるにしたがって、勾配 $\frac{dK}{dM_v}$ が大きくなることが認められた。これは、構成土粒子が大きいと、土粒

子どうしの接触部の数が少なく、熱橋1個当たりに依存する固相の量が多くなり、熱橋の効果が大きくなることや、土の水分保持機能が、粒度分布によって異なることが原因と考えられる。詳細は熱伝導モデルで説明する。

また、粒径5~10 mmの大きな粒子のみで形成される礫Bでは、図-7に示すように低含水状態では水分の影響をほとんど受けず、ある体積含水率以上で、直線的に増加し始めることが認められた。これは、大粒径の粒子のみで構成されているので、間げきが一樣に大きく、水分が土粒子と土粒子をつなぐ有効な熱橋を形成するには、ある程度以上の含水を必要とするためと思われる。

(4) 凍結の影響

図-5と図-8の比較より、 K_0 には大きな変化は認められないが、凍結土では直線の勾配 $\frac{dK}{dM_v}$ が、かなり小さくなった。すなわち、氷の熱伝導率は水より2~3倍程度大きいにもかかわらず、含水率の影響が小さくなった。この原因は、土が凍結して氷晶を形成しようとする時、土粒子に保持されている水分に氷晶分離の力が働くが、実験に用いた粗砂は難凍上性の粗粒土のため、大きな水分移動は考えられず、土粒子接触部に比較的弱い力で、リング状に保持されている水分が、氷晶分離作用によって吸引されてしまい、凍結前には有効に働いていた熱橋が、細くなったり、切れたりする現象が起きたのではないかと推察される。固相率の影響は、凍結土の場合も、非凍結の場合と同じように現われる傾向がある。

また、東¹¹⁾や福田ら¹²⁾が、凍結した細粒土や砂質土の熱伝導率と含水比との関係について示した、 $K=ae^{bW}$ (a, b は係数、 W は含水比)の実験式が、難凍上性の粗砂についても、図-10のように成立するように思われる。

表-2 熱伝導率 K と体積含水率 M_v の
回帰直線の勾配と切片

試料	$\frac{dK}{dM_v}$	K_0	相関係数 r	固相率 S
粘土	0.77	0.074	0.97	0.31~0.33
	1.07	0.079	0.98	0.35
	1.20	0.081	0.97	0.38~0.39
粗砂	4.61	0.140	0.98	0.64~0.65
凍結粗砂	2.48	0.161	0.97	0.56~0.59
	2.74	0.190	0.99	0.61~0.64
礫-A	4.71	0.084	0.98	0.61~0.67
礫-B	7.88	0.177	0.95	0.59~0.61

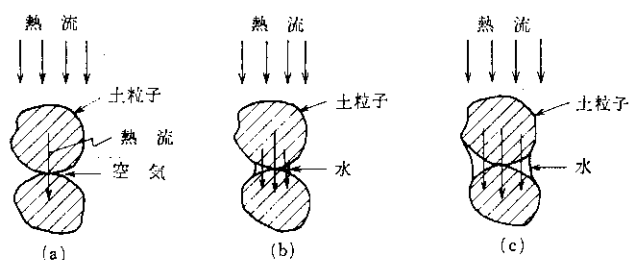


図-9 粗粒土の熱橋の形成

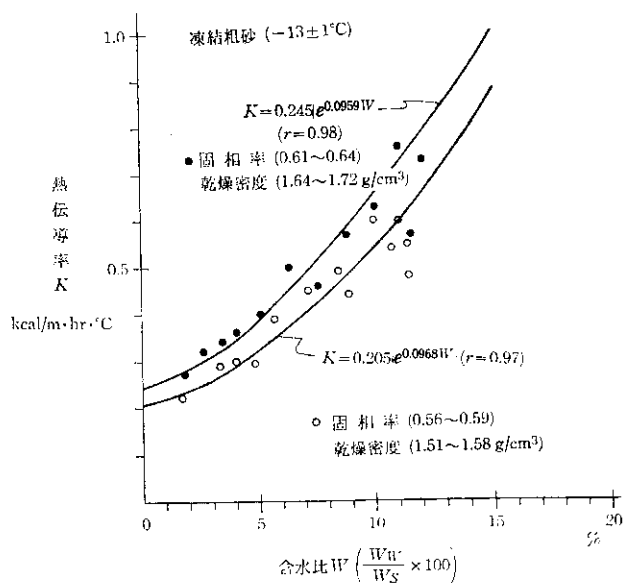


図-10 凍結粗砂の熱伝導率と含水比の関係

実用面から考えると、体積含水率より含水比のデータの方が得やすいので、含水比で整理した指数関数式の方が便利かと思われるが、低含水比の状態での実験しか行えなかった粗砂の場合、あえて指数関数を適合させる意味もないように思われる。また、熱伝導率と水分の関係を物理的に考察する場合には、体積含水率と直線関係にあることで整理した方が、理解しやすいと思う。

5 熱伝導モデル

今回の実験により、土の熱伝導率の特徴として次のことが明らかとなった。

- ① 土の熱伝導率 K と体積含水率 M_v が直線関係にある。
- ② 固相率の増加とともに、直線の勾配 $\frac{dK}{dM_v}$ が大きくなる。
- ③ 固相率の増加とともに、直線の切片 K_0 も大きくなる。
- ④ 構成土粒子の粒径が大きくなると、直線の勾配 $\frac{dK}{dM_v}$ が大きくなる。

筆者らは、①～④の特徴が説明できるような、熱伝導モデルの考察を試みた。

土の熱伝導は、ほとんどが土粒子と土中の水を通して行われると考えられる。そこで、図-11(a)のような実際の土粒子の接触状態を、図-11(b)のようにモデル化した。図-11(c)は断面図である。 S_0, S_1 は固相部分は、 P_0, P_1 は間げき部分（いずれも体積率）である。土が水分をまったく含まない状態の時は、 S_0 部分のみを通しての熱伝導であり、水分が加わり、 P_0 部分を満たすにしたがって、水分が土粒子と土粒子をつなぐ熱橋として働くようになり、土粒子—水—土粒子の直列型の熱伝導部分が加わり、 S_1 部分のうち水分でつながれた部分も、熱伝導

に参与できるようになる。間隙のうち、 P_0 部分は熱橋になり得る間隙であり、 P_1 部分は熱橋になり得ない間げき部分と考えた。以下①～④の特徴別に説明する。

① 土の熱伝導率と体積含水率の直線関係について

大きな粒径の土粒子だけで構成されている礫 B を除いて、土の体積含水率 M_v が増加するとともに、熱伝導率が直線的に増加することが判明した。また礫 B についてもある程度以上の含水率では、直線的な増加が認められた。

図-11の熱伝導モデルにおいて、水分の体積増分を dM_v とすると

$$dM_v = \{(r+dr)^2 - r^2\} \pi \cdot h_v \dots\dots\dots (6)$$

水分の増分 dM_v による土粒子—水—土粒子の直列熱伝導部分の体積増分を

$$dv = \{(r+dr)^2 - r^2\} \pi (h_s + h_v) \dots\dots\dots (7)$$

$$\therefore \frac{dv}{dM_v} = \frac{1}{h_v} (h_s + h_v) \dots\dots\dots (8)$$

土粒子—水—土粒子の直列熱伝導部分の増分 dv 部分の熱伝導率は、土全体の熱伝導率 K の増加率 $\frac{dK}{dv}$ に等しい。したがって、直列電気抵抗の計算と同様に、

$$\frac{1}{\frac{dK}{dv}} = \frac{\{(r+dr)^2 - r^2\} \pi h_s}{K_s} + \frac{\{(r+dr)^2 - r^2\} \pi h_v}{K_L}$$

$$\therefore \frac{dK}{dv} = \frac{h_s + h_v}{\frac{h_s}{K_s} + \frac{h_v}{K_L}} \dots\dots\dots (9)$$

K_s ; 土粒子の熱伝導率

K_L ; 水の熱伝導率

h_s, h_v ; 図-11(c) 参照

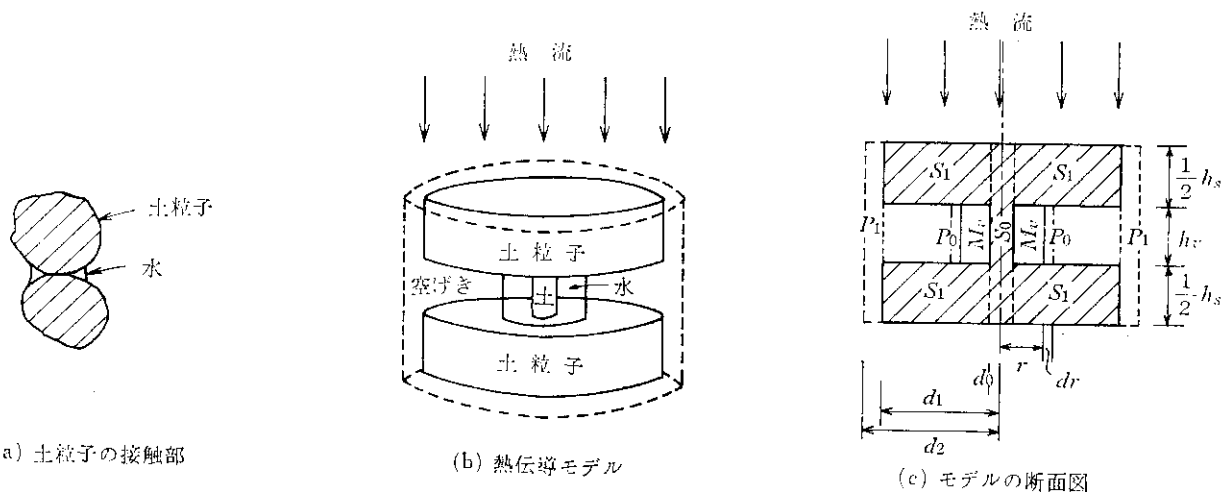


図-11 熱伝導機構のモデル化

水分増加による熱伝導率 K の増加率 $\frac{dK}{dM_v}$ は、(8)式と(9)式により

$$\frac{dK}{dM_v} = \frac{dK}{dv} \cdot \frac{dv}{dM_v} = \frac{\frac{h_s + h_v}{K_s} + \frac{1}{K_L}}{\frac{h_s}{K_s} + \frac{1}{K_L}} \cdot \frac{1}{h_v} (h_s + h_v)$$

$k = \frac{h_s}{h_v}$ とすると

$$\frac{dK}{dM_v} = \frac{(k+1)^2}{\frac{k}{K_s} + \frac{1}{K_L}} \dots\dots\dots (10)$$

(10)式より $k = \frac{h_s}{h_v}$ が一定の時、 $\frac{dK}{dM_v}$ が一定となり、熱伝導率 K と体積含水率 M_v の関係が直線となる。 $k = \frac{h_s}{h_v}$ は固相率や粒度分布に支配され、総括的に定められるものである。

② 固相率の増加とともに、 $\frac{dK}{dM_v}$ が大きくなることについて

このモデルにおいて、固相率 $S = S_0 + S_1$ が増加することはよって、図-12に示すことが起こる。すなわち、土粒子の厚さ h_s が P_0 部分の間げきの厚さ h_v に比して、相対的に厚くなり、 $k = \frac{h_s}{h_v}$ が大きくなり、(10)式より

明らかなように $\frac{dK}{dM_v}$ が大きくなると考えられる。

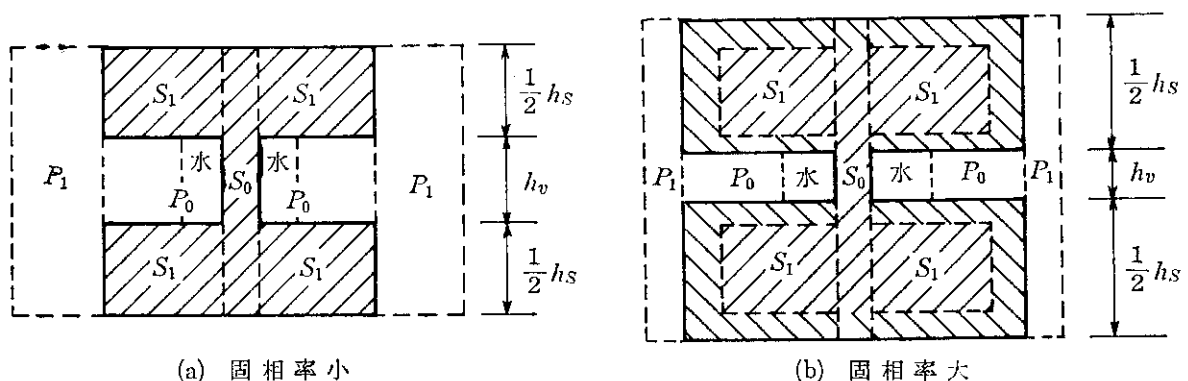
③ 固相率の増加とともに、 K_0 も大きくなることについて

図-12で明らかなように、固相率 S の増加とともに S_1 部分だけでなく、 S_0 部分も増加し、水分を含まない時の熱伝導率 K_0 も大きくなると考えられる。

④ 構成土粒子の粒径が大きくなると、 $\frac{dK}{dM_v}$ が大きくなることについて

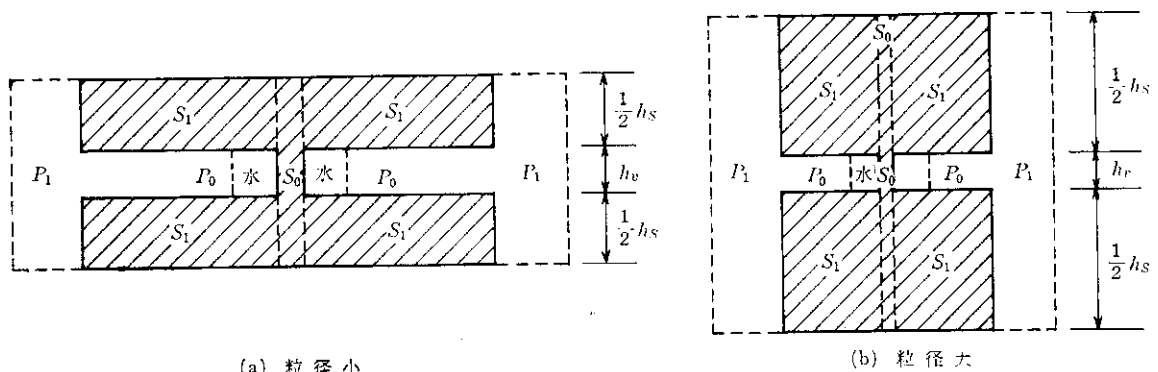
土粒子の粒度分布の影響については、このモデルでは図-13に示すように、粒径が大きくなると $k = \frac{h_s}{h_v}$ が大きくなり、 $\frac{dK}{dM_v}$ が大きくなると考えた。その原因は、粒径が大きいほど、土粒子と土粒子の接触部の数が少なく、1つの熱橋に依存する固相の量が多いことや、土が重力に抗して、間げきに水を保持しようとする保水機能が、土の粒度分布によって異なることが最も大きく影響していると思われる。

そこで、土の保水機能について簡単に述べる^{8),9)}。土中の水は、土粒子が水分を保持している力の大きさによって吸着水、毛管水、重力水に分類できる。吸着水とは、



(a), (b) どちらも、総体積は同じ。(b)の 部分が、固相率の増加分

図-12 固相率の影響



(a), (b)は同じ総体積と固相率

図-13 粒度の影響

分子間力や静電気力などの強い力によって、土粒子表面に吸着されている水の分子層であり、粘土のような細粒土は、土粒子表面の活性が大きいので、水分子吸着機能が強く、水の分子層が肥厚し吸着水量は多いが、粗粒土の場合は吸着機能は低く、吸着水量は少ない。毛管水とは小さく、かつ断面の変化に富む土の間げきに張るメニスカスの毛管力によって、吸着水の力より弱い、重力よりも強い力で、重力に抗してもちこたえられる水のことである。例えば、粗粒土の場合、図-9に示すようにリング状に保持されている部分が、ほぼ毛管水に相当する。粘土のような細粒土では、粒子間の間げきがせまく、肥厚した吸着水がそのまま間げきを満たすこともあり、重力に抗して保持しうる水分量のうち、毛管水の占める割合は小さい。重力水とは、重力の作用によって移動してしまう水分であり、粗粒土の場合、細粒土に比して重力水の占める割合が大きい。

粗粒土の保水機能について、土粒子の粒径の大きい場合と小さい場合を、定性的に図-14に示した。実験に用いた粗砂、礫A、礫Bの保水機能は、図-14に対応する。また粘土のような細粒土の場合を図-15に示した。

粗粒土の場合、土粒子と土粒子にはさまれて、重力に抗して保持される水分(吸着+毛管水)が、図-13の熱伝導モデルで示された熱橋となり得る部分 P_0 にほぼ対応すると考えられ、粒径が大きいほど量は少ない。その量

乾燥 ←		→ 飽和	
吸着水	毛管水	重力水	
重力に抗して保持しうる水分		重力によって移動してしまう水分	

(a) 粒径の大きい場合

乾燥 ←		→ 飽和	
吸着水	毛管水	重力水	
重力に抗して保持しうる水分		重力によって移動してしまう水分	

(b) 粒径の小さい場合

図-14 粗粒土の保水機能

乾燥 ←		→ 飽和	
吸	着	水	毛管水 重力水 ない場合もある
重力に抗して保持しうる水分			

図-15 細粒土の保水機能

は固相率、粒度分布によって決定されるものであろう。

粘土のような細粒土の場合は、吸着水膜の肥厚がかなり進んでしまうと、吸着水の一部が熱橋となり得ない P_1 部分に属することもあり、 P_0 と P_1 部分の明確な境界はとらえにくい、土粒子と土粒子にはさまれた P_0 部分は、粗粒土の場合より、多いと思われる。すなわち、土を構成する土粒子の粒径が大きいほど、モデル中の P_0 部分が少ないと考えられる。

以上、土粒子の接触部の数と、特に保水機能の点から図-13に示したことが説明できる。その他、粘土のような細粒土では吸着水膜の厚さが土粒子粒径に比して、粗粒土の場合より大きいため、総括的に $k = \frac{h_s}{h_v}$ が小さくなることや、図-13に示すように、粒径が大きいほど土粒子の表面積が小さくなること、また土粒子と土粒子の接触部の曲率などが複雑に関係して、土の粒度分布の影響が現われると考えられる。

S_0, S_1, P_0, P_1 については、次のような関係がある。

$$S_0 + S_1 = S \quad (\text{固相率}) \quad (11)$$

$$P_0 + P_1 = (1 - S) \quad (\text{間隙率}) \quad (12)$$

$$S_0 = \frac{K_0}{K_s} \quad (13)$$

(11), (12), (13)式より

$$k = \frac{h_s}{h_v} = \frac{S_1}{P_0} = \frac{S - \frac{K_0}{K_s}}{P_0} \quad (14)$$

土粒子自身の熱伝導率 K_s 、もしくは水分を含むことによって、熱橋となり得る P_0 部分が把握できれば、(10)式と(14)式よりこの熱伝導モデルは解ける。

K_s については1~10 kcal/m·hr·°Cで一様でなく、構成土粒子の鉱物組成などで異なり、熱伝導率が異なる多種の土粒子が混合している場合など、総括的な K_s を定めることは現在のところ困難である。

熱橋となり得る P_0 部分については、松本ら⁵⁾のモデルでは砂質土の場合、最適含水状態の時の体積含水率としている。このことは、砂の保水状態が、図-16¹³⁾のようになることに、熱橋理論を適応すれば理解できるのであ

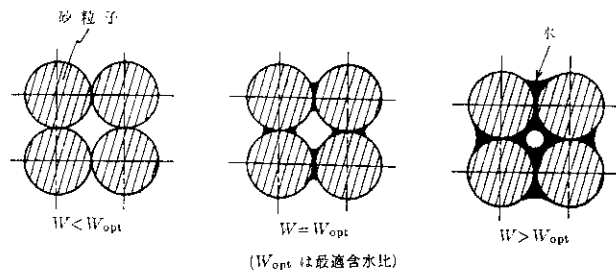


図-16 砂の保水状態

ろう。しかし、細粒土や粗砂、礫についての P_0 については判明していない。粗粒土の場合、吸着水膜もきわめて薄く、土粒子接触部分に、リング状に水分が保持されることを考えれば、熱橋理論に基づいたこのモデルで示した現象が実際に起こっていると推測できるが、定量的に適用してみる必要がある。また礫 B のように、大粒径の粒子のみで構成されている場合は、熱橋が形成されるまでに、ある程度の水分が必要であったが、このモデルでは説明できていない。粘土のような細粒土で、吸着水が肥厚した場合に、 P_0 部分と P_1 部分を明確に把握することも困難と思われる。また、モデルの定量的な適用のためには、図-11(c) に示したように、 d_0, d_1, d_2, h_s, h_v の関係についても検討する必要がある。以上のように、現在の段階では定量的な適用は不可能であるが、体積含水率、固相率、粒度分布の影響を定性的には説明できるモデルと思われる。

6 ま と め

土中の伝熱現象の把握で、最も重要な問題となる土の熱伝導率を、粘土、粗砂、礫について測定し、体積含水率、固相率、粒度分布や凍結が熱伝導率に及ぼす影響を調べ、さらに、土の熱伝導機構のモデル化を試みた。本研究の結論は次のとおりである。

(1) 細粒土だけでなく、粗砂や礫などの粗粒土についても、熱伝導率 K と体積含水率 M_v の関係は、一次直線で表わせた。しかし、大粒径の土粒子 (5~10 mm) のみで構成される礫では、低含水状態では水分の影響は受けず、ある体積含水率以上で直線的な関係がみられた。

(2) $K \sim M_v$ 直線の勾配 $\frac{dK}{dM_v}$ は、固相率が大きいほど大きくなる傾向がある。

(3) $K \sim M_v$ 直線の切片 K_0 は、固相率が大きいほど大きくなる傾向がある。

(4) 土を構成する土粒子の粒径が大きい方が、 $K \sim M_v$ 直線の勾配 $\frac{dK}{dM_v}$ は大きい。

(5) 凍結粗砂の実験より、 $K \sim M_v$ 直線の切片 K_0 の値は非凍結の場合と大きな差はないが、勾配 $\frac{dK}{dM_v}$ は、凍結した場合の方が、なり小さくなる傾向がある。

(6) 熱橋理論に基づき、図-11 に示すような土の熱伝導機構のモデルを考案し、 K と M_v の直線関係や、固相率や粒度分布の影響が定性的に説明できた。

今後はさらに、シルト質土、細砂や大粒径の礫について実験を行い、土の保水機能についても実験や考察を加え、定量的に適用できるモデルの考案が必要である。

この研究を進めるにあたって、装置の作成、実験にいたるまで、多大の協力を頂いた北海道工業大学学生、滝ヶ平直輝、牧野 直の両君に心から感謝する。

参 考 文 献

- 1) 粕淵辰昭； 土壌の熱伝導機構に関する諸問題，農業気象，Vol. 29, No. 3, p. 201~207, 1973 年 12 月.
- 2) 八幡敏雄； 土壌の物理，p. 116, 東京大学出版会.
- 3) 岡垣，斎藤； 湿った砂の熱伝導率，北海道大学工学部研究報告，No. 15, p. 113~129, 昭和 32 年 4 月.
- 4) 粕淵辰昭； 土壌の熱伝導率におよぼす水分の影響，日本土壌肥科学雑誌，Vol. 43, No. 12, p. 437~441, 1972 年.
- 5) 松本，大久保； 土の伝熱特性に関する実験的研究，土木学会論文報告集，No. 257, p. 53~p. 60, 1977 年 1 月.
- 6) 理科年表； 物理化学，p. 107.
- 7) 岡垣，斎藤； 不定常熱流による熱伝導率の迅速測定について，北海道大学工学部研究報告，No. 14, p. 83~p. 102, 昭和 31 年 4 月.
- 8) ヤン，ワーケンティン； 土質工学の基礎，山崎，山内監訳，p. 116~141.
- 9) 前出文献； 2), p. 35~70.
- 10) de Vries； Heat Transfer in Soil p. 11.
- 11) A. Higashi； On the thermal conductivity of soil, with special reference to that of frozen soil. Trans. Amer. Geophys. Union. 34, p. 737~748 (1953 年).
- 12) 福田，先川； 凍土の熱伝導率の測定，低温科学，物理篇，第 33 輯，p. 259~263.
- 13) Á. KÉZDI； Soil Physics. Selected Topics, p. 66.