HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	凍土の熱伝導率の測定
Author(s)	福田, 正己; 先川, 信一郎
Citation	低温科學. 物理篇, 33, 259-263
Issue Date	1976-03-30
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/18293
Type	bulletin (article)
File Information	33_p259-263.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

短　　報

Masami FUKUDA and Shin-ichiro SAKIKAWA 1975 Short Report: Thermal Conductivity of Frozen Soils. *Low Temperature Science, Ser., A, 33.*

凍土の熱伝導率の測定*

福田正己
(低温科学研究所)

先川信一郎
(低温科学研究所研究生)

(昭和50年10月受理)

凍土の熱的性質のうち，比熱，熱伝導率等は土の凍結—融解過程を考える上で，重要な物理量である。これらの熱的性質は，構成する土の種類，含水条件，温度条件によって変わる。筆者らは，苫小牧凍土観測室の試験水槽より採取した土について，含水条件の異なる場合の熱伝導率を測定した。測定法は，熱伝導率測定法のうちのいわゆる非定常法とくに周期加熱法である。凍土の熱伝導率の測定事例としては，Higashi[1]，Kerstem[2,3]，Penner[4]，片山ら[5]，Johansen[6] などが行なっている。これらの測定もすべて非定常法によっている。今回行なった周期加熱(冷却)法は，Higashi の事例に近い。すなわち，ほぼサインカーブ状に温度が周期変化する低温実験室に試験試料を入れて，表面から深さが異なる数点での温度変動を記録する。表面から深くなるにつれて，温度の変動幅は小さくなり，また周期変動の位相の遅れが生ずる。表面の温度が(1)式のように周期変化をすると，熱伝導の式としてよく知られているように，任意の深さでの温度変化は(2)の式として表わされる。

$$u_{x=0} = A_0 \sin(2\pi/T)\,t \tag{1}$$

A_0: 振幅

T: 周期

$$u = A_0 \exp(-X\sqrt{\pi/\kappa T})\cdot \sin\left[(2\pi/T)\,t - X\sqrt{\pi/\kappa T}\right] \tag{2}$$

κ: 温度拡散率

X: 深さ

深さが異なる点 X_1, X_2 での振幅 A_1, A_2 および周期の変動の位相の遅れ ε_1, ε_2 とを測定から得れば，次の(3), (4)式に従って温度拡散率 κ が求められる。

$$\kappa = \frac{\pi(X_1 - X_2)^2}{T(\ln A_1/A_2)^2} \tag{3}$$

$$\kappa = \frac{\pi(X_1 - X_2)^2}{T(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2} \tag{4}$$

* 北海道大学低温科学研究所業績　第1712号

以上の測定原理に基づいて，実験室において κ を得る。

熱伝導率 k は次の手順に従って求められた。まず，凍土の比熱 C_f を Kersten[2] の式(5)に従って算出する。

$$C_f=\frac{100\times C+w\times 1.0}{100+w} \tag{5}$$

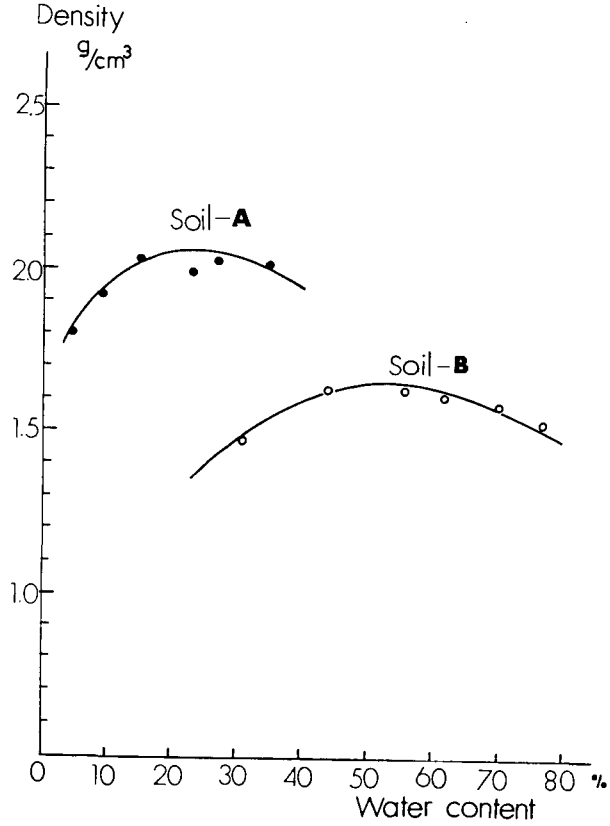
w： 重量含水比

C： 土粒子の比熱

ここで土粒子の比熱の値として，0.16～0.17 cal/g·°C をとっているが，これは鉱物粒子の比熱がほぼ 0°C で示す値であって，また 0°C 以下でもほとんど変らないとする Penner[4] の実験結果に基づいている。凍土の密度 ρ が得られれば，熱容量 Q は，ρ と w から式(6)として表される。

$$Q=\rho\left(0.17+\frac{0.5}{100}w\right) \tag{6}$$

ところで ρ と w は，凍土試料を作成するつきかため過程で，第1図に示される関係が得られている。これは凍土試料整形容器（マイターボックス）に所定の含水比の土をつきかためて入れ，

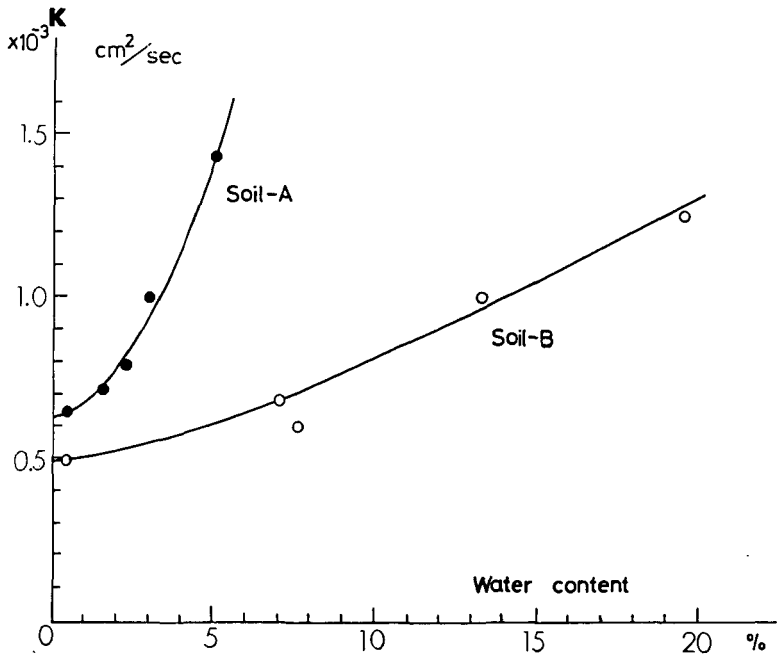


第1図 凍土の密度と含水比の関係

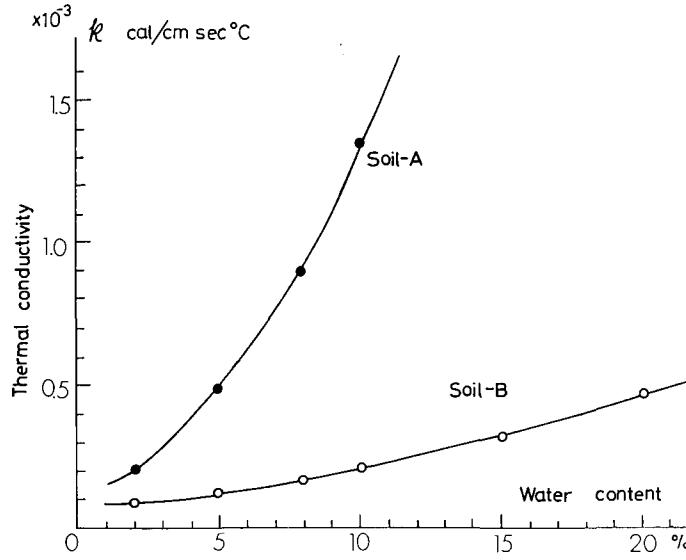
A： 砂質土　B： シルト

−30°C の低温室で急冷した円筒試料によって得られたものである。土を強くつきかためれば，空隙はある程度まで（最密充填に近くなる）減少し，密度は大きくなる。その空隙へ水が満されるにつれて密度はさらに増加する。すなわち含水比 w の増加につれて密度も大きくなる。しかし，ある段階まで空隙を水が満たすと，それ以上の水分の増加は土粒子実質部分の減少となって，結果としては密度は減少してくる。この $\rho-w$ 曲線をもちいて，所定の含水比 w のときの凍土の密度が得られるので，熱容量 Q を w だけで決めることができる。含水比 w を変えながら温度拡散率 κ を測定し，その含水比における熱容量 Q を (6) 式と第 1 図から算出すれば，熱伝導率 k は $k=Q\cdot\kappa$ として得ることができる。しかし，比熱の算出法に若干の問題が残されている。Penner[4] が指摘しているように，凍土内に不凍水が存在するため，比熱の値を補正する必要がある。すなわち，この不凍水は温度が低くなるにつれ，一部ずつ氷に変るので，そのときの発生潜熱を考慮に入れると，比熱の値は増大する。とくに粘土質の場合，−1°C〜−5°C の温度範囲では，不凍水分量が大きい（30% 前後）ので凍土の比熱は大きくなる。しかし，今回行なった測定試料は砂質土とシルトであるので，不凍水分が少ない（最大 10%）ことから，不凍水の存在による比熱の値の変化は少ないとして補正をしなかった。

周期変化法による温度拡散率測定は，次のような操作と手順に従って行なわれた。アクリル容器 (5×5×10 cm) に，所定の含水比の土試料をつきかためながら入れる。これを −30°C の低温室に 24 時間以上放置させて凍結させた。そのため，凍結過程での凍上はごくわずかしか生じない。側面と底面を断熱材でおおい，表面から 2 cm ごとの深さに直径 2 mm の穴をあけて，試料のほぼ中心位置に熱電対を埋め込んでおく。−20°〜0°C の温度範囲で振幅 10°C の



第 2 図　凍土の温度拡散率と含水比
A：砂質土　B：シルト



第3図 凍土の熱伝導率と含水比
A: 砂質土 B: シルト

周期変動の可能な低温室に設置する。初期温度 −10°C を 12 時間保ったのちに，6 時間 30 分の周期で変化させた。各深さ毎に温度変動を記録し，振幅の減少量とピークのずれの両方を読みとり，(3), (4) 式によって温度拡散率を求めた。順次含水比を変えて測定して熱容量を算出し，温度拡散率と含水比の関係（第 2 図），及び熱伝導率と含水比の関係（第 3 図）を得た。

凍土の熱伝導率は，土粒子，氷粒子および不凍水分の結合配列の状態に依存する[7]。今回もちいた試料の砂質土とシルトでは，不凍水の存在比が小さいので，不凍水による熱伝達は無視しうる。この場合には，片山ら[5]が指摘するように，熱流は土粒子と氷粒子の直列及び並列の結合によって伝達されると考えてよい。ただし，このモデルを適用するには，空隙率と粒子ごとの体積比が知られねばならない。今回の実験では，これらの諸量は測定されなかったので，熱伝達モデル（Woodside モデル[8]）への適用については検討しなかった。熱伝導率 k と含水比 w との関係について Higashi[1] が示した経験式（$k=a\,e^{bw}$, a, b; 定数）は，今回の実験結果とよい一致を示した。その結果を次に示す。

シルトの場合 $k=0.06\times10^{-3}\exp 10.30w$

砂質土の場合 $k=0.13\times10^{-3}\exp 23.40w$

この関係式は，凍土の熱伝導率が含水比の増加につれて，指数曲線的に増加することを示している。

今後の問題としては，不凍水の多く存在するような温度範囲（−1°〜−2°C 周辺）で比熱の実測を行なって，含水条件と温度条件を考慮した熱伝導率を得るようにしたい。

終りに本実験にあたって，御助言御教示下さった，低温科学研究所凍上学部門の皆様，工学部東晃教授に感謝いたします。なお，本研究は文部省の凍上研究に対する臨時事業費および

日本学術振興会日米科学協力計画「土の凍結融解に伴う水分の移動」(4R020) によって行なわれた。

文　　献

1) A. Higashi 1953 On the thermal conductivity of soil, with special reference to that of frozen soil. *Trans. Amer. Geophy. Union*, **34**, 737-748.
2) M. S. Kersten 1952 Thermal properties of soils. *Highway Res. Board, Special report*, **2**, 161-166.
3) M. S. Kersten 1963 Thermal properties of frozen ground. *In* Proc. 1st Intern. Conf. Permafrost, 301-305, N.S.F.
4) E. Penner 1970 Thermal conductivity of frozen soils. *Canad. Jour. of Earth Sci*, **7**, 982-987.
5) 片山功蔵・服部　賢・池田　孝・三井和彦 1969 湿った土壌の凍結前後における熱物性測定法. 冷凍, **44**, 12-19.
6) Ø. Johansen 1975 Thermal conductivity of soils. Report 403, Sixth International Congress, Fondation Francaise D'etudes Nordiques. 10 pp.
7) 粕淵辰昭 1973 土壌の熱伝導機構に関する諸問題. 農業気象, **29**, 45-51.
8) W. Woodside and J. H. Messmer 1961 Thermal conductivity of porous Media. I. *Jour. of Appl. Phys.*, **32**, 1688-1699.