

— 報 告 —

掘削試料の非定常細線加熱法による熱伝導率測定の高精度化に向けた実験

多田井 修^{1*}, 林 為人², 谷川 亘², 廣瀬 丈洋², 坂口 真澄¹

掘削試料（コアおよびカッティングス）の熱伝導率の測定手法を確立するために、本研究ではインド産の砂岩とカオリン粉体試料を使用して、非定常細線加熱法（熱線法）に基づいたQTM（Quick Thermal conductivity Meter）による熱伝導率の測定を行なった。実験の結果、掘削によって採取される多くの岩石や堆積物の熱伝導率測定に必要な試料サイズは、熱線長が95 mmのボックス型プローブの場合には、長さ100 mm、幅40 mm、厚さ20 mm以上であることがわかった。よって、掘削試料を測定する場合、直径40 mm以上の半割コア試料が必要になる。また、ニードル型プローブを用いたカオリン粉体試料の実験では、圧密した試料の密度と熱伝導率の正の相関関係が認められ、断層粘土やカッティングスなどの少量の掘削試料でも容器内に詰めて圧密させるなどの工夫を施すことで、将来的に熱伝導率測定ができると思われる。

キーワード：掘削試料，熱伝導率測定，測定試料サイズ，含水率

2008年11月4日受領；2009年3月19日受理

1 株式会社マリン・ワーク・ジャパン

2 独立行政法人海洋研究開発機構高知コア研究所

代表執筆者：

多田井 修

株式会社マリン・ワーク・ジャパン OD 科学技術部高知海洋課

〒783-8502 高知県南国市物部乙200 海洋研究開発機構高知コア研究所内

+81-88-878-2213

tadaio@mwj.co.jp

著作権：独立行政法人海洋研究開発機構

– Report –

Technical note on thermal conductivity measurement for drilled core samples

Osamu Tadaï^{1*}, Weiren Lin², Wataru Tanikawa², Takehiro Hirose², Masumi Sakaguchi¹

To establish reliable methods for determining the thermal conductivity of drilled core and cuttings samples, we measured thermal conductivity for a series of sliced specimens of sandstone from India and compressed kaolin powder. The results showed that specimen size required for precise measurement is more than 100 mm in length, 40 mm in width, and 20 mm in thickness for most rocks and sediments collected from drilling in which a box-type probe is used. In addition, a positive correlation was recognized between the bulk density of compressed kaolin powder and its thermal conductivity value. We believe that it is possible to determine thermal conductivity of disaggregated geomaterials and cuttings recovered during drilling by using a needle-type probe and a small sample holder in which the cutting sample is placed and pressed to remove pore space.

Keywords : drilled core samples, thermal conductivity measurement, specimen size, volumetric water content

Received 4 November 2008 ; accepted 19 March 2009

1 Marine Works Japan LTD.

2 Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Corresponding author:

Osamu Tadaï

Marine Works Japan LTD.

200 Mononobe-Otsu, Nangoku, Kochi 783-8502, Japan

+81-88-878-2213

tadaio@mwj.co.jp

Copyright by Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

1. はじめに

岩石や堆積物の熱伝導率は、熱の伝わり易さを表すパラメーターであり、比熱、熱拡散率とともに、物質の基本的熱物性値である。この3つの熱物性値のうち、2つのみが独立したパラメーターで、どのパラメーターもほかの2つから計算することができる（熱伝導率 $[Wm^{-1}K^{-1}] = \text{密度} [kgm^{-3}] \times \text{比熱容量} [Jkg^{-1}K^{-1}] \times \text{熱拡散率} [m^2s^{-1}]$ ）。地球科学の分野では、様々な自然現象を理解するために、物質の中を伝導する熱の性質を知ることが不可欠である。例えば、断層帯物質ならびに母岩の熱伝導率は、地震発生に伴うエネルギーの解放の大きな部分を占める断層面の摩擦発熱を見積もる上で重要なパラメーターであると同時に、それを正確に見積もることは地震時の断層の滑り挙動を理解するために不可欠である（Lachenbruch, 1980；Kano et al., 2006；Tanaka et al., 2006）。また、地球内部の熱循環や、島弧・海洋地殻および大陸における熱流量を評価するためにも重要である（Sass et al., 1971；Pribnow and Sass, 1995；Pribnow et al., 2000；Goto et al., 2003）。

岩石や堆積物の熱伝導率を決定する手段としては、原位置のロギングデータ（弾性波速度、中性子密度）から推定することが可能であり（例えば、Hartmann et al., 2005）、掘削可能な深度であれば掘削コア試料を直接測定することがもっとも信頼性の高い方法である。これまで過去に深海底堆積物や掘削試料について、ニードルプローブを用いた熱線法（Von Herzen and Maxwell, 1959；Horai, 1981；Blum, 1997）や平板比較法（分割棒方式：Divided Bar；Pribnow et al., 2000）などによる熱伝導率測定が行なわれ、堆積構造による熱伝導率の異方性などが報告されている。しかし、掘削コア試料の熱伝導率測定は、得られる試料の寸法が必ずしも十分に大きくないことから、測定できない場合がある。また、2009年度から行われる予定の「ちきゅう」によるライザー掘削では一部の深度区間において、掘削コア試料を採取せず、カッティングスと呼ばれている掘削ビットの切削による碎屑物しか得られない。従って、カッティングスの熱伝導率を測定して、堆積物や岩石の熱伝導率を見積もる手段の構築も切望されている。

そこで、本研究では、科学掘削におけるコア試料の熱伝導率測定の実務的な測定手順や正確な測定に不可欠な諸条件を見極めるために、必要な試料サイズを見積もることと非定常細線加熱法を用いた碎屑物の熱伝導率測定法の確立を目的としている。既往研究としては、Sass et al. (1984) や Galson et al. (1987) がすでに類似した研究を行なっているが、我々は高知コア研究所に新規導入した迅速熱伝導率計（QTM-500）の最適測定条件を決定するための基礎

として行なった。一方、カッティングスへの適用を想定して、均質な粉体試料を段階的に圧密させ、試料密度と熱伝導率の関係を調べた。本研究で得られた知見はまだ不十分であるが、掘削試料の正確な熱伝導率測定に寄与するものと考えているのでここに報告したい。

2. 実験方法

2.1. 熱伝導率測定装置

固体物質の熱伝導率測定はいくつかの方法があるが、一般的に用いられているのは非定常細線加熱法（熱線法）である（日本規格協会, 2001；日本規格協会, 2007）。本研究で用いた熱伝導率測定装置（迅速熱伝導率計 QTM-500, 京都電子工業株式会社製）も、これを応用したものであり、試料表面あるいは内部において一次元（線状）の熱線を設置して、一定の熱量（電力）を加えたときの試料内部の温度上昇を測定して熱伝導率を算出する仕組みである。熱源が試料サイズに対して十分小さい時、試料の温度上昇と経過時間の関係は、時間軸を対数でとれば、両者の関係はほぼ直線的となる（Fig. 1）。この近似直線の勾配を用いて、以下の式（1）により、試料の熱伝導率が求められる。

$$\lambda = q \cdot \frac{\ln(t_2/t_1)}{4\pi(T_2 - T_1)} \quad \dots (1)$$

但し、

λ : 試料の熱伝導率 $[Wm^{-1}K^{-1}]$

q : 熱線の単位時間、単位長さあたりの発熱量 $[Wm^{-1}s^{-1}]$

t_1, t_2 : 測定時刻 $[s]$

T_1, T_2 : 時刻 t_1, t_2 での温度 $[^{\circ}C]$ 。

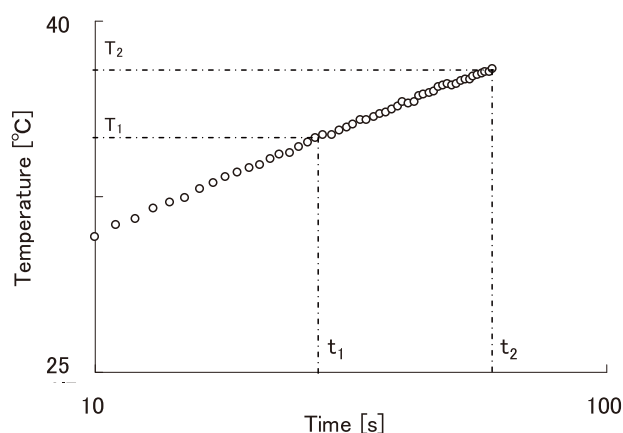


Fig. 1 Temperature converted from data-logger records versus time for a thermal conductivity measurement of sandstone from India.

図1 熱伝導率測定時の温度変化の実測例（横軸は測定時間の自然対数）

本研究で使用した熱伝導率計QTM-500 (Fig. 2a) は、熱伝導率が既知の標準試料 (シリコンゴム: $\lambda = 0.239 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, 石英: $\lambda = 1.414 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, ジルコニア: $\lambda = 3.38 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) で校正することにより、工業材料から食品に至る多種多様な試料について、短時間で熱伝導率を測定することができる。この熱伝導率計には、おもに塊状の試料を測定するためのボックス型プローブ (PD-11) と粉体等の試料を測定するためのニードル型プローブ (PD-N0) があり、前者は試料の平らな面に置いて測定し、後者は試料に挿入して測定する (Fig. 2b)。

ボックス型プローブを用いた測定は、平坦な面にプローブを当てて行われる。このプローブによる熱伝導率は、

$$\lambda = K \cdot R \cdot I^2 \cdot \frac{\ln(t_2/t_1)}{4\pi(T_2 - T_1)} - H \quad \dots (2)$$

但し、

- λ : 試料の熱伝導率 [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]
- K, H : プローブ定数
($0.2 < \lambda < 10 [\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$ のとき, $K=926 \times 10^{-4}$,
 $H=615 \times 10^{-4} [\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$)
($0.02 < \lambda < 0.2 [\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$ のとき, $K=830 \times 10^{-4}$,
 $H=294 \times 10^{-4} [\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$)
- R : 熱線の単位長さ当たりの電気抵抗 [Ωm^{-1}]
- I : 加熱電流 [A]
- t_1, t_2 : 測定時刻 [s]
- T_1, T_2 : 時刻 t_1, t_2 での温度 [$^{\circ}\text{C}$]

で、近似される。ボックス型プローブを用いた測定では、砂岩や粘土の熱伝導率が $1.4 \sim 3.7 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ (例えば, Schön, 1998) なので、熱伝導率計のプローブ定数 ($K=926 \times 10^{-4}$, $H=615 \times 10^{-4} \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) に基づいて測定結果が表示される。堆積物試料など水を含んだ試料を測定する場合は、薄膜フィルム (例えば, サランラップ) を試料とボックス型プローブの間に挟むことで絶縁状態にして測定する必要がある。測定時に試料の温度が 5°C 以上変化するように、測定装置の設定パラメーター加熱電流を $I^2=6.0 [\text{A}^2]$ に設定した。ボックス型プローブの測定時間は、約60秒であり、測定時刻 $t_1=30 \text{ s}$ と $t_2=60 \text{ s}$ の温度から熱伝導率が算出される。

一方、ニードル型プローブを用いた測定では、プローブを不定形の試料に挿入することで熱伝導率が測定できる。このプローブによる熱伝導率は、

$$\lambda = R \cdot I^2 \cdot \frac{\ln(t_2/t_1)}{4\pi(T_2 - T_1)} + H \quad \dots (3)$$

- λ : 試料の熱伝導率 [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]
- H : プローブ定数 [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]
(任意の測定条件におけるボックス試料の測定値と標準試料値の差)
- R : 熱線の単位長さ当たりの電気抵抗 [Ωm^{-1}]
- I : 加熱電流 [A]
- t_1, t_2 : 測定時刻 [s]
- T_1, T_2 : 時刻 t_1, t_2 での温度 [$^{\circ}\text{C}$]

で、近似される。ニードル型プローブの直径は 0.6 mm であり、中の熱線が細いため、加熱電流を大きくすると断線する可能性が高い。そこで、本研究では対象試料の測定時の温度変化を見ながら、加熱電流を $I^2=0.063 [\text{A}^2]$ (メーカー推奨値) から $0.625 [\text{A}^2]$ まで段階的に増加した。また、温度の測定時刻は、温度変化と時間の関係の直線性が比較的良好い、 $t_1=10 \text{ s}$ と $t_2=40 \text{ s}$ に設定した。

なお、「ちきゅう」搭載の熱伝導率測定装置はメーカーが異なるものの、熱伝導率の測定法は本研究で用いた装置と同様な原理に基づいており、ボックス型とニードル型の2種類のセンサプローブが備え付けられている。

2.2. 実験内容の概要

本研究では、精確な熱伝導率の値を得るための測定条件を決定するために、下記の4つの影響を調べるための測定を行なった。

- 実験1: ボックス型プローブ用試料の幅および厚さの影響
- 実験2: ニードル型プローブを使用する場合のプローブ挿入量
- 実験3: 堆積構造のある岩石試料の異方性特性・含水率の影響
- 実験4: 粉体試料の密度の及ぼす影響

ボックス型プローブを用いた熱伝導率測定用の実験1と3では、熱伝導率測定に必要なサイズと堆積構造が試料ブロックの方向と一致したという理由からインド産の砂岩を使用した。この砂岩は、インドの RAJASTAN 州, SIRONATH 村で採取されたもので、明褐色～灰褐色 (マンセル色系 5YR7/2～6/2) を呈し、弱い層理面が観察される。この砂岩の基本物性値を Table 1 に示す。この砂岩の乾燥密度、湿潤密度および間隙率は、それぞれ含水飽和状態と乾燥状態の質量、試料の体積を測定して求めた (日本規格協会, 1999; 林ほか, 2000)。また、層理面に直交する方向のP波とS波速度は、超音波パルス透過法で測定した。

砂岩の実験は、一つのブロックとそれを分割した試料

Table 1 Physical properties of the sandstone from India; sd. = standard deviation from three measurements

表 1 インド産の砂岩の物性値 (sd.: 3回測定標準偏差)

Physical property	average	sd.	Condition
Density	2.34	0.03	Dry
$[\times 10^3 \text{kgm}^{-3}]$	2.43	0.03	Wet
Porosity [%]	9.06	0.16	–
S-Wave Velocity	2.50	0.13	Dry
$[\text{kms}^{-1}]$	2.46	0.17	Wet
P-Wave Velocity	3.73	0.03	Dry
$[\text{kms}^{-1}]$	4.10	0.03	Wet

(a)



(b)

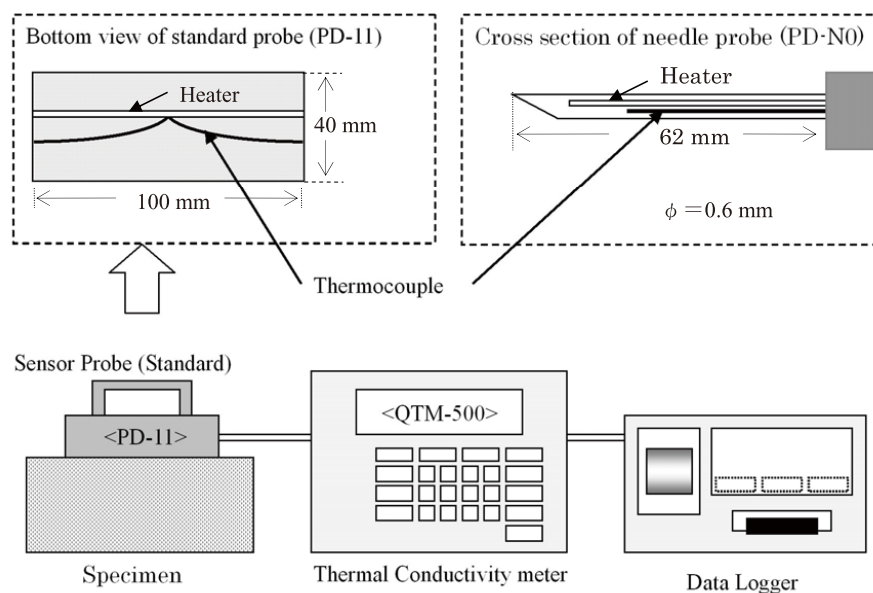


Fig. 2 (a) Measurement system for thermal conductivity (QTM-500 from Kyoto Electronics Manufacturing Co. Ltd.):
 ① Specimen, ② Sensor probe (PD-11), ③ Needle Probe (PD-N0), ④ Thermal conductivity meter, ⑤ Data logger.
 (b) Schematic TC measurement system and 2 types of probes: Bottom view of standard probe and cross section of needle probe. These sensors have a heater and K-type thermocouple.

図 2 (a) 熱伝導率測定装置 (QTM-500: 京都電子工業株式会社製)

① 測定用試料 ② ボックス型プローブ ③ ニードル型プローブ ④ 熱伝導率計 ⑤ データロガー

(b) 熱伝導率測定装置の概略とプローブの構造

ボックス型プローブを下から見た図, ニードル型プローブの断面図. 基本的構造は熱線とK熱電対からなる.

を用いて行なった。これらの試料の加工方法・手順は次の通りである (Fig. 3)。まず、堆積構造に対する熱伝導率の異方性を調べるために、試料IS-A (長さ119.3 mm, 幅122.6 mm, 厚さ39.5 mm) と試料IS-C (長さ119.3 mm, 幅122.6 mm, 厚さ60.0 mm) を切出した。熱伝導率異方性の測定終了後、試料IS-Aを中央から切断して、熱伝導率測定に必要な試料の幅を決めるための試料IS-W (長さ119.3 mm, 幅60.0 mm, 厚さ21.0 mm) と、厚さを決めるための試料IS-T (長さ119.3 mm, 幅62.0 mm, 厚さ39.5 mm) を成形した。また、IS-Wを作製するために切断したIS-W1, およびIS-Tを厚さ減らすために切り落としたもののうち、熱伝導率測定できる形状のものを5つ選んで、試料IS-T1~T5とした。

ニードル型プローブを用いた熱伝導率測定 (実験2) では、プローブ内の熱電対と熱線の位置関係が分からないので、シリコンゴム標準試料 ($\lambda = 0.239 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$; 長さ150.0 mm, 幅60.0 mm, 厚さ20.0 mm) を使用して、安定した測定結果が得られるプローブの挿入量を調べた。さらに、実験4では、粉体試料の密度と熱伝導率の関係をより単純に理解するために、カオリン (入来有限会社製) を使用した。

2.3. 試料の幅および厚さの影響 (実験1)

ボックス型プローブを用いた熱伝導率測定に必要な掘削

試料のサイズを決定するために、試料IS-Wと試料IS-Tについて、次の手順で熱伝導率測定を行なった。

- ① オープンにより110℃, 24時間乾燥させる。
- ② デシケータ内で5時間静置して室温まで冷却させる。
- ③ ボックス型プローブを用いて熱伝導率を測定する。
熱伝導率の測定は3回ずつ繰り返す。
- ④ 試料を切断してサイズ (幅, 厚さ) を変更する。
- ⑤ ①~④を繰り返す。

さらに、厚さを変化させた試料IS-W1, 試料IS-T1~T5について①~③を行う。Galson et al. (1987) やSass et al. (1984) によれば、含水状態の試料の熱伝導率測定の精度において水分の蒸発の影響を指摘しているのので、本研究ではこの影響を除去するために乾燥状態の試料を加工して、試料サイズと熱伝導率測定値との関係を調べた。

2.4. ニードル型プローブの挿入量 (実験2)

ニードル型プローブを用いた熱伝導率測定において、プローブの必要最小限の挿入量を求める必要がある。熱伝導率が既知のシリコンゴム標準試料 (長さ150 mm, 幅60 mm, 20 mm) に、予め直径=1 mmのニードルで深さ50 mmの孔を開ける。そこにニードル型プローブを段階的に挿入し、それぞれの挿入深さにおいて熱伝導率測定をした。なお、測定パラメーターの加熱電流は $I^2 = 0.25 \text{ [A}^2\text{]}$ の条件とした。

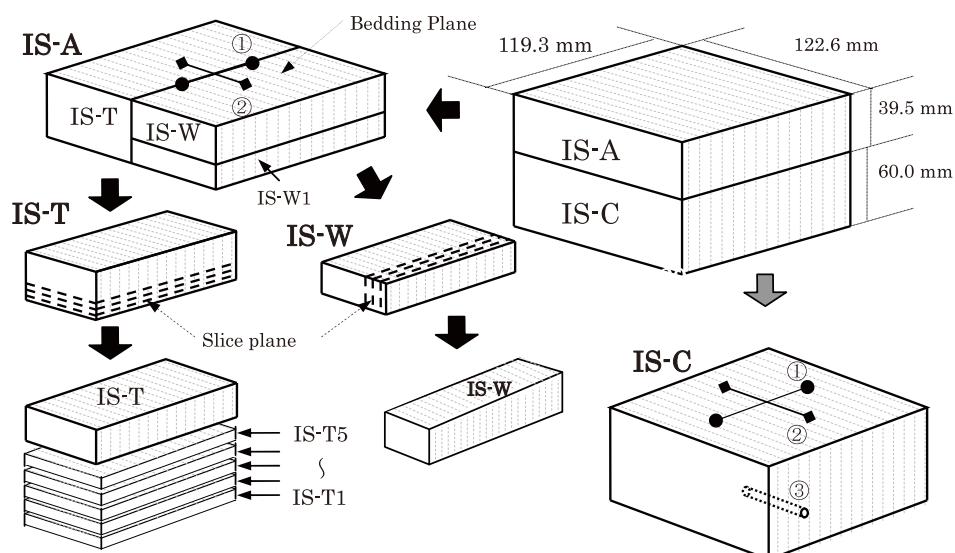


Fig. 3 Specimens for thermal conductivity measurements: Specimen IS-A is a thermal conductivity measurement for anisotropy and size effect, and Specimen IS-C is for anisotropy and volumetric water content effect. Thin dashed lines indicate the bedding plane. Bold dashed lines are the slice plane. Measurement Directions are ① Perpendicular, ② Parallel, and ③ Needle probe.

図3 熱伝導率測定用試料 試料IS-Aは測定に必要なサイズを評価するために、試料IS-Cは含水率の影響を調べるために準備した。破線は、層理面と試料の切断面を示す。熱伝導率測定の方法は、① Perpendicular, ② Parallel, ③ ニードルプローブである。

2.5. 試料の異方性および含水率の影響 (実験3)

熱伝導率の堆積構造による異方性および含水率の影響を評価するために、試料 IS-A と試料 IS-C を使用した。Fig. 3 の薄い破線が層理面の方向を示す。層理面と熱線が直交する方向にボックス型プローブを当てた熱伝導率測定を“Perpendicular”測定、層理面と平行の測定を“Parallel”測定と称す。さらに、ボックス型プローブとニードル型プローブの比較をするために、試料 IS-C の側面に $\phi = 1$ mm のドリルを使用して、深さ 35 mm の孔を開けた (Fig. 3)。

これらの試料を水に浸し、真空デシケータを用いて減圧しながら 60 時間静置して、湿潤させた。その後、これらの試料を水から取り出してすぐにサランラップに包み、ボックス型プローブを用いて Perpendicular 方向および Parallel 方向の熱伝導率を測定した。試料 IS-C では、さらにニードルプローブによる熱伝導率測定も追加した。

試料 IS-A については、110℃で24時間乾燥させ、デシケータで6時間冷却し、Perpendicular方向およびParallel方向の熱伝導率を測定した。

試料 IS-C については、110℃のオープンに入れ、質量を約 5~10 g ずつ減量させた。取り出してからすぐサランラップに包み、室温に戻すとともに試料内の含有水分の均一化を図るために12時間以上静置した。そして、ボックス型プローブによる2方向での測定とニードル型プローブによる測定後、サランラップを剥いで秤量した。これらの作業を水分が蒸発しなくなるまで繰り返した。

2.6. 粉体試料の密度の影響 (実験4)

ボックス型プローブは比較的大きな体積（長さ100 mm，幅40 mm，厚さ20mm以上）を持つ試料が必要である。しかし、例えば断層帯内部は、約数cmの幅で岩相が変化する場合が多く、それぞれの岩相の熱伝導率を正確に測定するのは難しい。また、カッティングスのように攪乱された試料しか得られない場合もある。こうしたケースでは、小さな体積でも測定が可能なニードル型プローブが有効である。カッティングスのような試料の場合、粉体試料を容器に詰めて、ニードルプローブを挿入すれば、熱伝導率測定が可能である。そこで、この実験では、テフロン製の円筒形試料ホルダ（内径=18 mm，深さ=62 mm：Fig. 4 a）に65℃で40時間以上乾燥させたカオリンを詰め込み、秤量後に、ニードルプローブを50 mm挿入して熱伝導率を測定した。その後、粉体試料の密度を高めるために、テフロンホルダの内径と同じ直径18 mmの真鍮ピストンを介してプレス機を用いて、テフロンホルダ内のカオリンを圧密した。プレスする際は、圧密した試料の高さ方向における密度の不均一分布を避けるために、試料の圧密は数回に分け、同じ圧力で圧密させた。但し、プレスの圧力値が2MPa 以上になるとテフロンホルダが著しく膨張したので、耐圧金具 (Fig. 4b) で補強して実験を継続した。

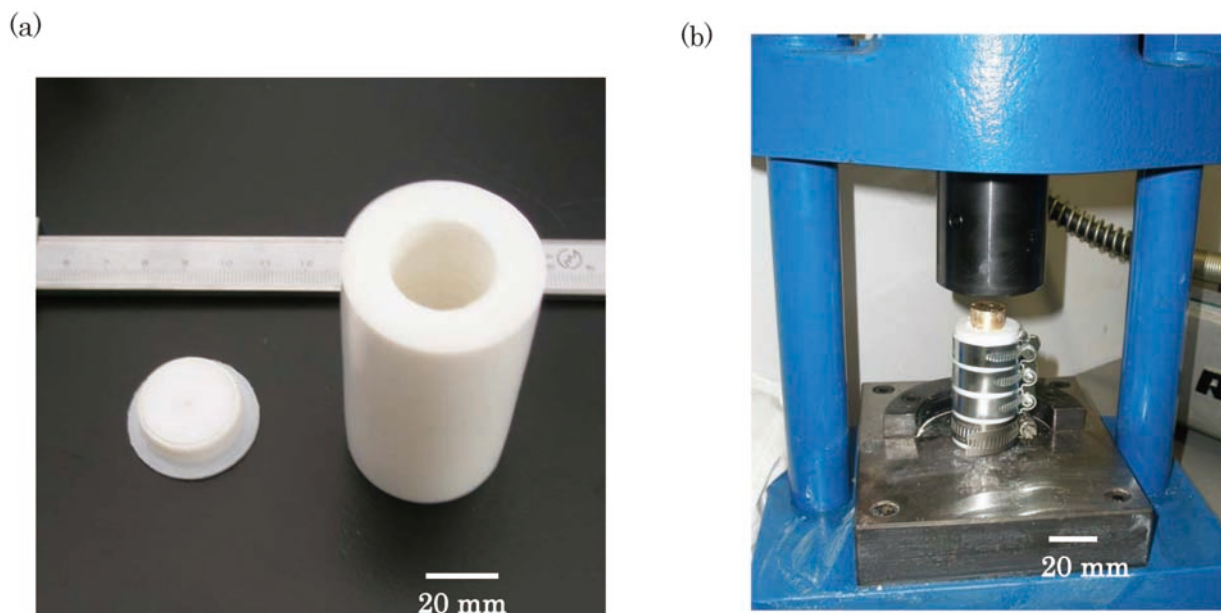


Fig. 4 Compression experiment on kaolin powder:
(a) Teflon holder and stopper. Scale bar is 20 mm.
(b) Compressor and pressure-resistant steel belts.

図4 カオリンの圧密実験
(a) テフロン製ホルダ（内径=18 mm，深さ=62 mm），蓋
(b) プレス機と耐圧金具

3. 実験結果および考察

3.1. ボックス型プローブ測定に必要な試料サイズ

測定試料 (IS-W) の幅と熱伝導率の結果をTable 2およびFig. 5に示す。試料幅が40 mmより広い場合、熱伝導率の測定値は3.6~3.8 Wm⁻¹K⁻¹で安定している (Fig. 5)。一方、試料の幅が40 mmより狭くなると熱伝導率の測定値が低くなる。試料とプローブが接触している面とテーブル以外は、熱伝導率の低い空気 (0.024 Wm⁻¹K⁻¹, Pribnow et al., 1996) に接しているので、試料境界で熱伝導が小さくなり、試料内部の温度が過剰に上昇したと考えられる。

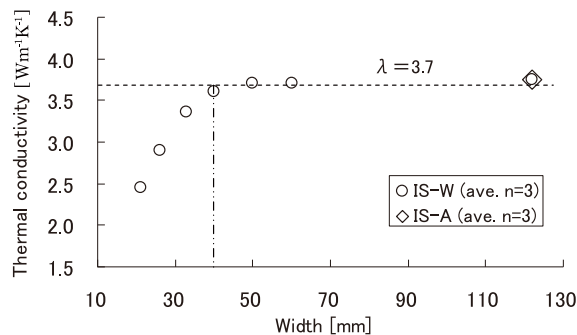


Fig. 5 Variation of TC measurement values with width of specimens. The dashed line shows a thermal conductivity value of 3.7 Wm⁻¹K⁻¹.

図5 測定用試料の幅に対する熱伝導率測定値の変化
点線は、熱伝導率 3.7 Wm⁻¹K⁻¹を示す。

従って、熱伝導率が3.5 Wm⁻¹K⁻¹程度の試料の測定には、試料の幅は40 mm以上必要ということが言える。既存の文献 (例えば, Schön, 1998) から今回の実験で使用した熱伝導率3.5 Wm⁻¹K⁻¹が天然の岩石試料の中で比較的高い値に相当するので、ボックス型プローブによる掘削試料 (厚さ=約20 mm) の熱伝導率測定は、ほとんどの場合40mmの試料幅で十分であることがわかった。

測定試料 (幅=62 mm) の厚さを変えた場合の熱伝導率の測定結果の一覧をTable 3およびFig. 6に示す。試料厚が20 mmより厚い場合、熱伝導率の測定値は3.6~3.8 Wm⁻¹K⁻¹

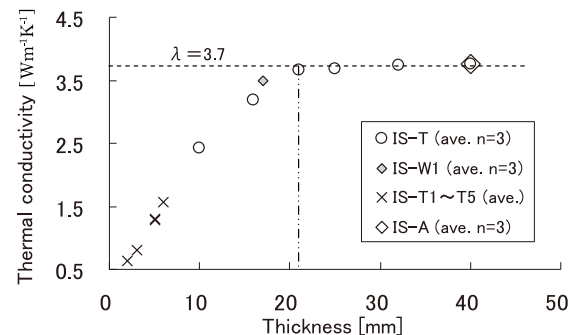


Fig. 6 Variation of TC measurement values with thickness of specimens. The dashed line shows a thermal conductivity value of 3.7 Wm⁻¹K⁻¹.

図6 測定用試料の厚さに対する熱伝導率測定値の変化
点線は、熱伝導率 3.7 Wm⁻¹K⁻¹を示す。

Table 2 Results of thermal conductivity measurement values with width of specimen; sd. = standard deviation from three measurements

表 2 測定用試料の幅に対する熱伝導率測定の結果 (sd.: 3回測定の標準偏差)

Sample	Run Number	Width (mm)	Weight (g)	measured Thermal Conductivity (Wm ⁻¹ K ⁻¹)				
				1st	2nd	3rd	average	sd.
IS-W	TS0023	60	349.6	3.698	3.722	3.678	3.70	0.02
	TS0033	50	295.4	3.735	3.644	3.727	3.70	0.05
	TS0044	40	236.4	3.595	3.608	3.613	3.61	0.01
	TS0051	33	191.7	3.415	3.300	3.367	3.36	0.06
	TS0056	26	154.6	2.880	2.882	2.926	2.90	0.03
	TS0061	21	123.9	2.463	2.454	2.454	2.46	0.01
IS-A	TS0017	122	1339.2	3.760	3.778	3.731	3.76	0.02

Table 3 Results of thermal conductivity measurement values with thickness of specimen; sd. = standard deviation from three measurements

表 3 測定用試料の厚さに対する熱伝導率測定の結果 (sd.: 3回測定の標準偏差)

Specimen	Run Number	Thickness (mm)	Weight (g)	measured Thermal Conductivity (Wm ⁻¹ K ⁻¹)				
				1st	2nd	3rd	average	sd.
IS-T	TS0022	40	681.3	3.784	3.747	3.766	3.77	0.02
	TS0032	32	546.9	3.714	3.734	3.744	3.73	0.02
	TS0043	25	434.7	3.686	3.695	3.651	3.68	0.02
	TS0050	21	356.2	3.681	3.645	3.689	3.67	0.02
	TS0055	16	242.8	3.151	3.244	3.168	3.19	0.05
	TS0060	10	179.1	2.418	2.454	2.417	2.43	0.02
IS-W1	TS0024			3.400	3.517	3.574	3.50	0.09
	TS0034	17	270.9	3.494	3.520	3.592	3.54	0.05
	TS0042			3.487	3.607	3.555	3.55	0.06
IS-T1	TS0035	6	110.2	1.587	1.562	1.554	1.57	0.02
IS-T2	TS0036	5	88.0	1.286	1.283	1.286	1.28	0.00
IS-T3	TS0068	3	54.5	0.812	0.809	0.809	0.81	0.00
IS-T4	TS0069	5	89.3	1.304	1.301	1.310	1.31	0.00
IS-T5	TS0067	2	39.9	0.611	0.639	0.632	0.63	0.01
IS-A	TS0017	40	1339.2	3.760	3.778	3.731	3.76	0.02

で安定し、試料厚が20 mmより薄い場合、熱伝導率測定値が低くなる。これは、試料の幅の影響同様、試料境界で熱が伝導し難くなり、測定に影響を与えたと考えられる。Fig. 7は、試料IS-T（厚さ=40 mm）と試料IS-T5（厚さ=2 mm）について熱伝導率測定したときのKタイプ熱電対の起電力（温度に比例対応）の時間変化を対比したものである。熱伝導率の低い空気の影響を見るために、試料両端を高さ10 mmのスペーサーに置くことで、試料底面の83 % 以上が空気と接するようにした。試料IS-Tの起電力変化が直線であるのに対し、試料IS-T5の起電力は、測定後半に変化率が上昇している。これが、最も厚みの薄い試料IS-T5の熱伝導率測定値が過少評価されている原因である。従って、熱伝導率が $3.5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 程度の試料（幅=62 mm）の測定には、試料の厚さは20 mm以上必要ということが言える。

ボックス型プローブを用いた試料の幅と厚さの実験の結果を総合すると、ほとんどの岩石試料の熱伝導率測定に必要な試料サイズは、長さ100 mm、幅が40 mm、厚さが20 mmとなる。掘削コア試料の場合は、直径40 mm以上の半割コア試料に100 mm 以上の測定可能な平面が存在することが正し

い熱伝導率測定の必要条件であることがわかった。

3.2. ニードル型プローブの挿入量

標準試料シリコンゴムのニードル型プローブの挿入量と熱伝導率の関係をTable 4 および Fig. 8に示す。プローブの挿入量が30 mmより深い場合、熱伝導率の値は $0.24 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ となり、シリコンゴム標準試料の値 $0.239 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ とほぼ一致した。一方、挿入量が30 mm以下の場合には挿入量の減少に対して熱伝導率が低くなった。ニードル型プローブの挿入量が30 mmより大きく、熱源の供給時間が40秒と短い場合は、熱電対を中心とした微小空間における温度勾配の対称性が保持されているためと考えられる。

従って、熱伝導率が $0.239 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ のように低い場合には、プローブの挿入量は30 mm以上あれば安定した測定値が得られるということが言えよう。熱伝導率をもっと大きいと予想される天然の岩石や破碎試料の場合については、プローブの挿入量や必要な試料のサイズ（直径）などについても実験的に調査する必要があると考えているが、今後の課題としたい。

Table 4 Results of thermal conductivity measurement values with penetrated length of needle probe; sd. = standard deviation from three measurements

表 4 ニードルプローブの挿入量と熱伝導率測定の結果 (sd.: 3回測定の標準偏差)

Sample	Run Number	inserted Length (mm)	measured Thermal Conductivity ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)				
			1st	2nd	3rd	average	sd.
Silicon rubber $\lambda=0.239[\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$	TN0070	50	0.2384	0.2394	0.2403	0.239	0.001
	TN0071	45	0.2398	0.2388	0.2413	0.240	0.001
	TN0072	40	0.2351	0.2428	0.2407	0.240	0.004
	TN0073	35	0.2411	0.2400	0.2427	0.241	0.001
	TN0078	34	0.2366	0.2400	0.2369	0.238	0.002
	TN0077	32	0.2358	0.2328	0.2326	0.234	0.002
	TN0074	30	0.2310	0.2306	0.2312	0.231	0.000
	TN0079	29	0.2248	0.2223	0.2244	0.224	0.001
	TN0075	27	0.2204	0.2076	0.2072	0.212	0.008
	TN0076	25	0.1839	0.1820	0.1801	0.182	0.002

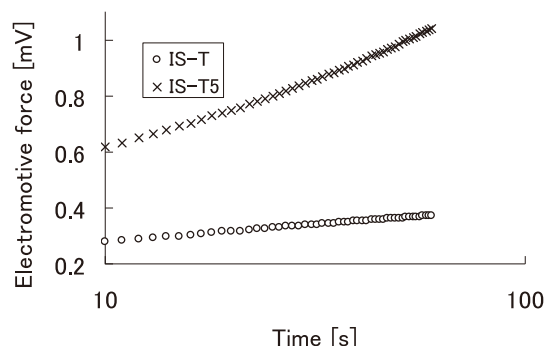


Fig. 7 Comparison of data logger records between IS-T and IS-T5.

図7 試料IS-Tと試料IS-T5の測定時のK熱電対起電力の対比

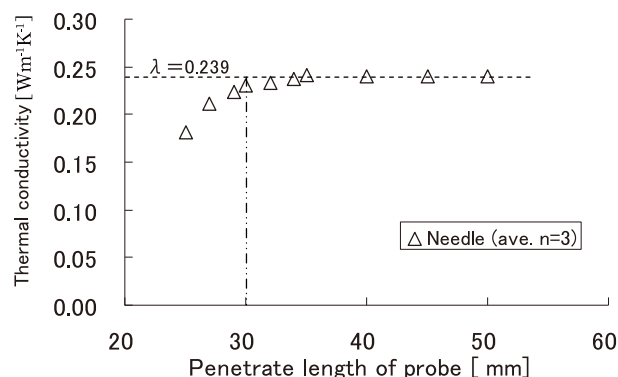


Fig. 8 Variation of TC measurement values with penetrated length of needle probe. The dashed line shows a thermal conductivity value of $0.239 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$.

図8 ニードル型プローブの挿入量と熱伝導率測定値
点線は、熱伝導率 $0.239 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ を示す。

3.3. 含水率の影響

水で飽和させた試料 IS-A および IS-C の水分を蒸発させた時の熱伝導率と体積含水率との関係を Table 5 および Fig.9 に示す。体積含水率は、試料中に含まれる間隙水の体積が試料の全体積に対して占める割合を示し、水分量を対象としたものである。Fig. 9 の (a) と (b) は、測定方向が異なる場合の結果であり、次節で述べる。間隙率に変化しない条件下では、試料の含水率が高くなるにつれ熱伝導率も高くなる傾向が明確に認められた (Fig. 9)。乾燥状態における熱伝導率が $3.6 \sim 3.7 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ であるのに対して、湿潤状態の熱伝導率 $4.6 \sim 4.8 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ と約 $1.1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 高い値を示す。今回の実験では、乾燥状態と湿潤状態の熱伝導率で約 28% の違いが認められた。これは、空気より熱伝導率の高い水が、インド産の砂岩の空隙を充填したと考えることで説明することができる。この結果は、掘削試料が採取される前の状態では含水飽和状態であると考えられるので、掘削試料の熱伝導率測定を行う場合は試料中に含まれる水分の飛散を防がなければならない。

3.4. 熱伝導率の異方性について

同じ体積含水率で測定した試料 IS-A および試料 IS-C では、ボックス型プローブの熱線が層理面と直交 (Perpendicular) ならびに平行 (Parallel) 方向で、熱伝導

率の異方性が認められた (Table 5 と Fig. 9)。乾燥状態における試料 IS-A および試料 IS-C の Perpendicular 方向の熱伝導率が $3.7 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 、であるのに対して、Parallel 方向の熱伝導率は $3.6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ と $0.1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 低い値を示す (Table 5)。さらに、湿潤状態においても、Perpendicular 方向の熱伝導率の値が $4.7 \sim 4.8 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ であるのに対して、Parallel 方向の値は、 $4.5 \sim 4.6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ と低い値を示す (Table 5)。全体積含水率条件における Perpendicular 方向と Parallel 方向の熱伝導率の比を求めると、1.02-1.07 の範囲にあり、平均は 1.04 であった。すなわち、本研究に用いた堆積構造のある砂岩においては層理面方向と垂直方向の熱伝導率の異方性が認められ、熱伝導率の違いは約 4% 程度であった。これらの結果は、Pribnow et al. (2000) で報告されている値より小さいが、堆積構造による粒子や空隙の配列の方向が熱伝導率の測定結果に影響を与えることを示す。従って、掘削試料などの地質試料の熱伝導率測定では要求される精度にもよるが、岩石試料の構造異方性に注意する必要がある。

3.5. ニードル型プローブとボックス型プローブの比較

ニードル型プローブによる試料 IS-C の熱伝導率測定 (Table 6) は、プローブの方向と層理面が平行であるので、ボックス型プローブの Parallel 方向の熱伝導率測定結果と

Table 5 Results of TC measurement values with volumetric water content and anisotropy of Indian sandstone; sd. = standard deviation from three measurements

表 5 インド産砂岩の含水率と堆積構造の異方性と熱伝導率測定 (sd.: 3 回測定の標準偏差)

Sample	Run Number	Weight (g)	Water Content (%)	measured Thermal Conductivity (Wm ⁻¹ K ⁻¹)				
				1st	2nd	3rd	average	sd.
<Perpendicular>								
IS-C	TS0013	2116.1	7.41	4.820	4.707	4.702	4.74	0.067
	TS0014	2105.0	6.14	4.640	4.853	4.688	4.73	0.112
	TS0019	2113.4	7.10	4.881	4.846	4.748	4.82	0.069
	TS0025	2104.4	6.08	4.597	4.671	4.692	4.65	0.050
	TS0029	2097.1	5.25	4.689	4.749	4.601	4.68	0.074
	TS0039	2083.5	3.70	4.860	4.753	4.810	4.81	0.054
	TS0047	2068.5	2.00	4.442	4.440	4.385	4.42	0.032
	TS0052	2059.7	1.00	4.301	4.183	4.126	4.20	0.089
	TS0058	2053.3	0.27	3.788	3.784	3.774	3.78	0.007
	TS0065	2050.9	0.00	3.773	3.676	3.715	3.72	0.049
IS-A	TS0005	1350.3	1.89	4.333	4.294	4.159	4.26	0.091
	TS0011	1387.1	8.18	4.852	4.819	4.719	4.80	0.069
	TS0017	1339.3	0.02	3.760	3.778	3.731	3.76	0.023
<parallel>								
IS-C	TS0012	2116.1	7.41	4.460	4.510	4.560	4.51	0.050
	TS0015	2105.0	6.14	4.597	4.587	4.698	4.63	0.062
	TS0020	2113.4	7.10	4.676	4.539	4.567	4.59	0.072
	TS0026	2104.4	6.08	4.658	4.503	4.391	4.52	0.134
	TS0030	2097.1	5.25	4.627	4.569	4.492	4.56	0.068
	TS0040	2083.5	3.70	4.591	4.572	4.471	4.54	0.065
	TS0048	2068.5	2.00	4.321	4.273	4.204	4.27	0.059
	TS0053	2059.7	1.00	3.876	3.928	3.967	3.92	0.045
	TS0059	2053.3	0.27	3.668	3.619	3.605	3.63	0.033
	TS0064	2050.9	0.00	3.644	3.567	3.536	3.58	0.056
IS-A	TS0006	1350.3	1.89	4.140	4.119	4.148	4.14	0.015
	TS0010	1387.1	8.18	4.470	4.771	4.722	4.65	0.161
	TS0018	1339.3	0.02	3.600	3.586	3.607	3.60	0.011

対比した (Fig.10). どちらも含水率の変化に対する熱伝導率の変化は同じ傾向を示すが, ニードル型プローブによる熱伝導率は低い値を示している. ボックス型プローブによる熱伝導率 (Fig. 10, □印) とニードル型プローブによる熱伝導率 (Fig. 10, △印) の差は, 平均で $1.1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ である. また, ニードル型プローブによる測定値とボックス型プローブの測定値との比は0.68-0.83の範囲に分布しており, 平均的には0.73であった.

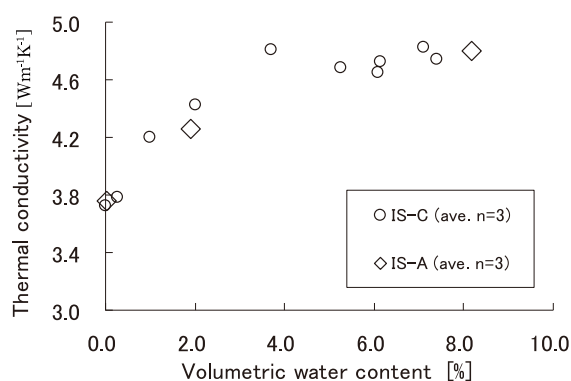
ニードル型プローブによる熱伝導率が低い理由として, 試料IS-Cの場合硬い岩石試料に細くて深い孔を加工できなかったために, プローブの挿入量 35 mmが十分でないことと, ドリル ($\phi = 1 \text{ mm}$) で開けた孔に挿入した直径0.6 mmのニードル型プローブと試料との密着が十分でないことが挙げられる. Pribnow et al. (1996) は, 空気熱伝導率を $0.024 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, 水の熱伝導率を $0.61 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ として, 熱伝導率に与える空気の影響が大きいことを指摘して

Table 6 Results of TC measurement values of Indian sandstone with needle probe; sd. = standard deviation from three measurements

表 6 ニードルプローブによるインド産砂岩の熱伝導率測定結果 (sd.: 3回測定の標準偏差)

Sample	Run Number	Weight (g)	Water Content (%)	Thermal Conductivity ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)				
				1st	2nd	3rd	average	sd.
IS-C	TN0021	2113.4	7.10	3.226	3.306	3.201	3.24	0.055
	TN0027	2104.4	6.08	3.246	3.360	3.387	3.33	0.075
	TN0031	2097.1	5.25	3.838	3.887	3.590	3.77	0.159
	TN0041	2083.5	3.70	3.351	3.352	3.291	3.33	0.035
	TN0049	2068.5	2.00	3.129	2.904	2.832	2.96	0.155
	TN0054	2059.7	1.00	2.951	3.096	2.980	3.01	0.077
	TN0057	2053.3	0.27	2.680	2.599	2.652	2.64	0.041
	TN0066	2050.9	0.00	2.364	2.504	2.411	2.43	0.071

(a) Perpendicular



(b) Parallel

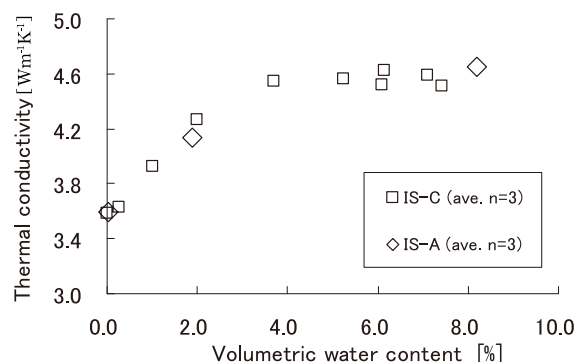


Fig. 9 Plots of TC measurement values with volumetric water content: (a) Perpendicular measurement, (b) Parallel measurement.

図9 インド産砂岩の含水率と熱伝導率測定値 (a)堆積構造と垂直, (b) 堆積構造と平行

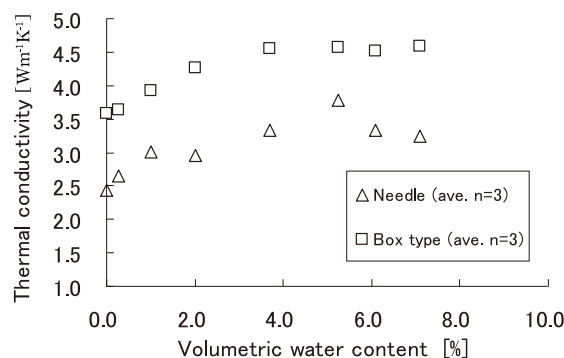


Fig. 10 Comparison of measurement values between needle probe and standard probe.

図10 ニードル型プローブとボックス型プローブの熱伝導率測定値の対比

いる。プローブと試料の間に隙間のないシリコンゴム標準試料の熱伝導率測定の場合、ニードル型プローブとボックス型プローブの測定値は、どちらも $0.24 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ と一致した。従って、ニードル型プローブを用いて熱伝導率を測定する場合、プローブと試料の隙間を極力少なくすることが重要であり、熱伝導率の高いグリースを用いて隙間を充填することで、プローブによる測定値の差は小さくなると考えられる。

Sass et al. (1971) や Pribnow and Sass (1995) は、同じ空隙率であれば、岩石試料と粉碎後に圧密成形した試料の熱伝導率測定の結果が一致することを示している。従って、硬い岩石および圧密粉体試料に対してプローブの挿入方法を工夫できれば、ニードル型プローブによる測定が有効であると期待できる。

3.6. カオリン密度と熱伝導率との関係

カオリン試料の見かけ密度とニードル型プローブを用いて測定（加熱電流条件： $I^2=0.25 \text{ [A}^2\text{]}$ ）した熱伝導率の関係（△）をFig. 11に示す（Table 7）。テフロンホルダの剛性不足のため、プレス機を用いた加圧による試料調整は、カオリン試料の密度 $2.0 \times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$ までであった。本研究で測定で

きた密度の範囲においては、熱伝導率がカオリン試料の密度と正の相関関係にあることが分かる。Pribnow et al. (1996) は、乾燥試料の熱伝導率が空隙および鉱物のそれぞれの占める割合に依存するとして、次式のモデルを活用した。

$$\lambda_{\text{dry}} = \lambda_{\text{air}}^{\phi} \cdot \lambda_{\text{mineral}}^{(1-\phi)} \quad \dots (4)$$

ここでは、 λ_{dry} は乾燥試料の熱伝導率で、 ϕ は空隙率、 λ_{air} は空気（ $0.024 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, Pribnow et al., 1996）の熱伝導率、 λ_{mineral} は鉱物の熱伝導率である。まず、純粋カオリナイトの熱伝導率 $2.60 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ （Schön, 1998）を λ_{mineral} としてプロットすれば、Fig.11の実線になる。実験に用いたカオリン試料は純粋カオリナイトと異なるために、モデルによる熱伝導率値は、高い密度領域では実測値を過小評価している。次に、実測データを（4）式による最小自乗回帰の結果を点線で示した。その結果、次の経験式が得られた。

$$\lambda_{\text{dry}} = 0.024^{\phi} \cdot 3.53^{(1-\phi)} \quad \dots (5)$$

ここでは、空隙率 ϕ は、圧密成形試料のバルク密度と粒子

Table 7 Results of TC measurement values of kaolin powder with the needle probe; sd. = standard deviation from three measurements

表 7 ニードル型プローブによるカオリンの熱伝導率測定結果（sd：3回測定の標準偏差）

Sample Condition	Weight (g)	density (g/cm ³)	Thermal Conductivity (Wm ⁻¹ K ⁻¹)					sd.	remarks
			1st	2nd	3rd	average			
Brick ($\phi = 15\text{mm}$)	9.3	0.83	0.139	0.138	0.139	0.14	0.00	0	
Brick ($\phi = 15\text{mm}$)	10.8	0.96	0.227	0.224	0.235	0.23	0.01	0-1MPa	
Teflon ($\phi = 18\text{mm}$)	22.7	1.46	0.639	0.643	0.632	0.64	0.01	1MPa	
Teflon ($\phi = 18\text{mm}$)	25.9	1.67	0.795	0.660	0.600	0.68	0.10	2MPa	
Teflon ($\phi = 18\text{mm}$)	28.1	1.81	0.931	0.918	0.923	0.92	0.01	3MPa	
Teflon ($\phi = 18\text{mm}$)	30.3	1.95	1.082	1.023	1.023	1.04	0.03	4MPa	
Teflon ($\phi = 18\text{mm}$)	32.0	2.06	1.122	1.078	1.036	1.08	0.04	5MPa	

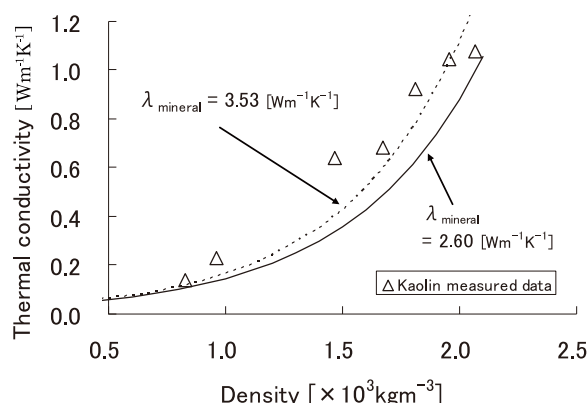


Fig. 11 Variation of TC measurement values with kaolin density and curves of the two- phase model (Pribnow et al., 1996).

図 11 カオリン密度と熱伝導率測定値の関係。曲線はPribnow et al. (1996)の二相モデルに基づいて近似した曲線を示す。

密度 ($2.59 \times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$) から, $\phi = 1 - \rho_{\text{bulk}} / \rho_{\text{grain}}$ で算出される. Fig.11から, 実測したカオリン試料の熱伝導率と密度との関係は既往のモデルと整合することが確認された.

カオリン試料の熱伝導率の値が $0.2 \sim 1.1 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ と低い値を示すのは, 試料が乾燥試料であり, かつ加圧したカオリン試料の空隙が多いためと考えられる. 今後, 試料容器を耐圧製の材質で作製し, 同様の実験を行う予定である. ただし, 圧密とともに熱伝導率が高くなることが予想されるので, 加熱電流 I^2 を $0.625 \text{ [A}^2\text{]}$ 以上に設定し, 熱伝導率を測定する必要がある. また, 断層帯物質や堆積岩は水を含んでいることが多いので, 熱伝導率は比較的高いことが予想される. このような場合, カオリンの熱伝導率測定の場合よりも高い加熱電流にする必要があると予想される.

4. まとめ

掘削コアならびにカッティングス試料の熱伝導率の測定手法を確立するために, 非定常細線加熱法 (熱線法) による熱伝導率の基礎的な実験を行なった. 特に, 岩石試料の測定に必要な手法, 異方性特性, 含水率の影響を調べるとともに, カッティングスを想定した粉体試料の測定を試みた. その結果, 熱伝導率の測定に必要な最小限の試料サイズは熱伝導率に依存するものの, ほとんどの掘削試料では, ボックス型プローブを用いた場合, 熱線から距離が 20 mm 程度必要であることがわかった. ニードル型プローブの場合, 比較的低い熱伝導率を示すシリコンゴムにおいては, プローブの挿入量は 30 mm 以上であり, 熱伝導率の高い試料ではさらに挿入する必要がある. 今回は熱伝導率計 QTM-500 の表示結果を基に考察しているが, 熱伝導率が過少評価される小さい試料においてもデータロガーの記録では直線性の良い部分が存在するので, 試料境界の影響を受けない測定時間を設定することにより, 熱伝導率測定に必要な試料サイズを小さくすることが期待できる.

堆積岩の熱伝導率異方性が認められ, 本研究で用いたインド産の砂岩では, 層理面方向の測定と垂直方向の測定で測定値に約 4% の差があることがわかった. 一方, 岩石試料を徐々に乾燥させて測定した熱伝導率に対する空気の影響は非常に大きく, 掘削試料の測定においては試料の含水率が変化しないように細心の注意を払わなければならないことを再確認した.

ニードル型プローブによるインド産の砂岩の熱伝導率測定の結果がボックス型プローブの測定結果が大きく異なるのは, ニードルプローブと試料の隙間に存在する空気の原因である. この隙間を充填するために, 今後, 熱伝導率の高いグリースを使用してニードルプローブによる熱伝導率測定を行ない, その効果を検討したい.

謝 辞

本実験の実施にあたり, 海洋研究開発機構高知コア研究所 菊田宏之氏, 服部道成氏には, 実験室の温度環境の管理に関して尽力していただいた. 株式会社マリン・ワーク・ジャパン平野聡博士には, 構造地質学的な知見から多くのコメントをいただいた. 京都電子工業株式会社の田中厚氏と高井光幸氏には熱伝導率計の構造に関する情報を提供していただいた. ここに記して感謝の意を表する.

参考文献

- Blackwell, D. D. and Steele, J. L. (1989), Thermal conductivity of sedimentary rocks: Measurement and significance, in "Thermal History of Sedimentary Basins," Eds. N. D. Naeser and T. H. McCulloh, Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, London, Paris, Tokyo, 13-36.
- Blum, P. (1997), Physical Properties Handbook: A Guide to the Shipboard Measurement of Physical Properties of Deep-sea Cores, *ODP Tech. Note*, 26.
- Goto, S., Kinoshita, M., Schultz, A. and Von Herzen, R. P. (2003), Estimate of heat flux and its temporal variation at the TAG hydrothermal mound, Mid-Atlantic Ridge 26°N , *J. Geophys. Res.*, 108, NO. B9, 2434, doi:10.1029/2001JB000703.
- Galson, D. P., Wilson, N. P. Schari, U. and Rybach, L. (1987), A comparison of divided-bar and QTM methods of measuring thermal conductivity, *Geothermics*, 16, 215-226.
- Hartmann, A., Rath, V. and Clauser, C. (2005), Thermal conductivity from core and well log data, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 42, 1042-1055.
- Horai, K. (1981), Thermal conductivity of sediments and igneous rocks recovered during deep sea drilling project Leg 60, *Init. Repts. DSDP*, 60, 807-834.
- Kano, Y., Mori, J., Fujio, R., Ito, H., Yanagidani, T., Nakao, S., and Ma, K. F. (2006), Heat signature on the Chelungpu fault associated with the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L14306, doi:10.1029/2006GL026733.
- Lachenbruch, A. (1980), Frictional heating, fluid pressure, and the resistance to fault motion, *J. Geophys. Res.*, 85, 6097-6112.
- 日本規格協会編 (1999), A1110, 粗骨材の密度及び吸水率試験方法, JISハンドブック 土木, 182-183.
- 日本規格協会編 (2001), R 2616, 耐火断熱れんがの熱伝導率の試験方法, JISハンドブック 耐火物, 799-806.

- 日本規格協会編 (2007), R 2251-2, 耐火物の熱伝導率の試験方法-第2部:熱線法(平行法), JISハンドブック 耐火物, 267-280.
- Pribnow, D. F. C., Davis, E. E. and Fisher, A. T. (2000), Borehole heat flow along the eastern flank of Juan de Fuca Ridge, including effects of anisotropy and temperature dependence of sediment thermal conductivity, *J. Geophys. Res.*, 105, 13,449-13,456.
- Pribnow, D. F. C. and Sass, J.H. (1995), Determination of thermal conductivity for deep boreholes, *J. Geophys. Res.*, 100, 9981-9994.
- Pribnow, D. F. C., Williams, C. F., Sass, J.H. and Keating, R. (1996), Thermal conductivity of water-saturated rocks from the KTB pilot hole at temperatures of 25 to 300 °C, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 391-394.
- 林為人・西田薫・杉田信隆・高橋学 (2000), 岩石の有効間隙率における試料の飽和および乾燥法, *地盤工学会誌*, 48, 11, 28-31.
- Sass, J.H., Lachenbruch, A. H. and Munroe, R. J. (1971), Thermal conductivity of rocks from measurements on fragments and its application to heat-flow Determination, *J. Geophys. Res.*, 76, 3391-3401.
- Sass, J.H., Stone, C. and Munroe, R.J. (1984), Thermal conductivity determinations on solid rock-a comparison between a steady-state divided bar apparatus and a commercial transient line-source device, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 20, 145-153.
- Schön, J. H. (1998), Ch. 8 Thermal properties of rocks, in Physical properties of rocks, Second Ed. - Handbook of geophysical exploration, Seismic exploration, Vol. 18, Pergamon, Netherlands, 323-378.
- Tanaka, H., Chen, W. M., Wang, C. Y., Ma, K. F., Urata, N., Mori, J. and Ando, M. (2006), Frictional heat from faulting of the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L16316, doi:10.1029/2006GL026673.
- Von Herzen, R. P. and Maxwell, A. E. (1959), The measurement of thermal conductivity of deep-sea sediments by a needle probe methods. *J. Geophys. Res.*, 64, 1557-1563.