

点熱源法によるベントナイトの熱物性値の測定

(動力炉・核燃料開発事業団 研究委託内容報告書)

技術資料		
開示区分	レポート No.	受領日
ㄗ	J1600 98-003	1998.7.3
この資料は技術管理室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です 動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室		

1998年2月

北海道大学工学部

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。ついては、輻射、転載、引用等を行わないよう、また第3者への開示または内容漏洩がないように管理して下さい。また、今回の開示目的以外の殊には使用しないようのい特に注意して下さい。

本資料についての問合せは下記に願います。注)

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松4-33

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所 技術開発推進部 技術管理室

限定資料

PNC ZJ1600 98-003

1998年2月

点熱源法によるベントナイトの熱物性値の測定

熊田俊明*

要旨

本報告は、前年度に開発した点熱源法の一部を改良し、高密度に圧縮したベントナイトの熱伝導率の測定に関する研究である。従来、ベントナイトの熱物性値は主として線熱源法で測定されてきたが、測定法にはそれぞれ固有の誤差要因があり、できれば他の信頼できる方法によって信頼性を実証することが望ましい。加えて、ベントナイトの実際の利用条件を考えると、圧密状態や水分含有率を変えて測定する必要があるため、多数の測定値を得るためには簡便な測定法が望ましい。

本研究では、すでに提案した点熱源法により圧密密度や水分含有率を変えて、ベントナイトの熱伝導率を測定し、線熱源法による測定結果と比較したものである。点熱源法による測定精度は、±3%程度である。

* 本報告書は、熊田俊明が動力炉・核燃料事業団の委託により実施した研究内容の結果である。

契約番号：PNC ZJ1600-003

事業団担当部課室および担当者：環境技術開発部地層処分開発室

谷口航

Measuremnt of Thermophysical Properties of Bentonite by
a Point Heat Source Method

Toshiaki Kumada*

Abstract

The report concerns the thermal conductivity of highly compacted bentonite by modifying partly the point heat source method, proposed by the author at 1997. Bentonites and mixtures of bentonite and sand has been suggested as buffer substance in the Japanese concept for the disposition of highly radioactive nuclear waste. The thermal conductivity of bentonite has been measured with a line heat source method. In general, each method measuring thermal properties of buffer substance has inherent error sources and its accuracy must be demonstrated with other reliable methods. In addition to this, many data of these substances are needed to predict the thermal behavior of stainless steel canisters in the repository, which contains a large amount of nuclear radioactive waste.

In this report the point heat source is used for measuring moist bentonite. The measured results are in good agreement with the data measured by line heat source methods.

目 次

1. はじめに	1
2. 点熱源法	2
2. 1 理想的ステップ点熱源	2
2. 2 ステップ加熱球状熱源	3
2. 3 測定プローブ	5
2. 4 測定回路	6
2. 5 測定体系	8
3. 測定方法と測定法の較正	10
3. 1 熱伝導モデル	10
3. 2 熱伝導率決定法	11
3. 3 測定法の較正	13
4. ベントナイトの熱伝導率測定	17
4. 1 試料の作成法	17
4. 2 測定結果	19
4. 3 既存の測定法による結果との比較	25
5. まとめ	26
6. 文献	27
7. 表一覧・図一覧	28

1. はじめに

高い珪ガラス固化体を地層処分する際に、緩衝材としてベントナイトまたはベントナイトと硼砂を混合した材料が使用される予定である。地層処分をした場合の固化体の温度や水分の移動などの計算には、これらの材料の圧密密度や水分含有率を変えた測定値が必要であり、さらに測定値に基づいて熱物性値を精度よく推算する式を求めることが最終目標である。従来、ベントナイトのような粉体や岩石などの熱伝導率の測定には線熱源法⁽¹⁾が利用され、長い間の改良によって信頼性の高い測定法として広く利用されている。しかし、この種の測定法では、測定法固有の誤差要因があり、測定値の信頼性を高めるには複数の測定者による測定が望ましく、かつ異なる方法による測定が望ましい。また、線熱源法では大きな試料(100mmφ×200mm)を必要とするため、プローブを挿入した状態で水分含有率を変えるのに、1年近くも要するなど測定点一点に対して1体の試料を必要とする。また、測定に長時間を要することや熱電対を温度センサーとするときには高い温度上昇を必要とするため測定中に水分移動を生じる可能性がある。

本研究は、以上のような線熱源法の欠点を改め、同等の精度でベントナイトの熱物性値を測定する方法として、平成8年度の受託研究によって行った点熱源法によりベントナイトの熱伝導率を測定したものである。この測定によって各種条件での熱物性値を測定し、既存の測定値を合わせて新しい信頼性の高い熱物性値の推算法を確立するのを最終目標とする研究シリーズの一部として行った研究である。ベントナイトの熱伝導率を圧密密度や水分含有率を変えて測定した結果は、既存の測定値と良く一致し、従来の線熱源法による測定結果が信頼性が高いことと本測定法の信頼性を保証する結果となった。本測定法による測定精度は±3%～5%±であり、この測定法によってさらに広範囲の条件で測定を行い、ベントナイトやベントナイトと硼砂の混合体の熱物性値を精度良く計算する推算式を求めたい。

2. 点熱源法

点熱源法による熱物性値測定法は原理的に優れているが、実際に利用されるようになったのは比較的最近である。この理由としては、点熱源の発熱にはリード線が必要であり、さらに、サーミスタ保護のためにガラス被膜がついており、この場合の厳密解が求められないことである。学の分野では生体組織の熱物性値を測定するため、組織に埋め込む小さなプローブを必要とした。この目的のために、リード線などの影響を無視して近似解を求め、熱伝導率を決定してきた。ここでは、理想的な点熱源測定原理や医学分野⁽²⁾での近似解に基づく測定法について概説する。

2. 1 理想的ステップ加熱点熱源

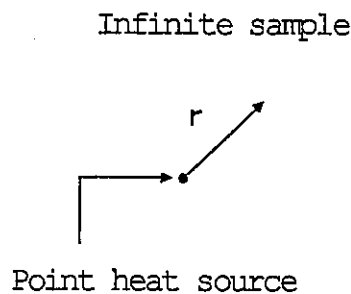


図 2-1 理想的点熱源

図 2-1 に示すように、一定温度の無限試料中で、無限に小さい理想的な点熱源をステップ加熱するときの試料の温度上昇 T_x は次式で与えられる。⁽⁴⁾

$$T_x = \frac{q}{4\pi\lambda_x r} \left[1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \left(\frac{r}{\sqrt{4\kappa_x t}} \right)^{2n+1}}{(2n+1)n!} \right] \quad (2-1)$$

ステップ点熱源からの位置 r 、加熱後の時間 t における温度を測定すれば、試料の熱

拡散率 $\kappa_x = \frac{\lambda_x}{\rho_x C_{px}}$ で、 $\rho_x C_{px}$ や発熱量 q は既知であるから、(2-1) 式より試料の熱伝導率 λ_x を決定できる。また、十分時間が経てば、(2-1) 式は次のように簡略化される。

$$T_x = \frac{q}{4\pi\lambda_x r} \quad (2-2)$$

したがって、点熱源からの距離 r における試料の温度を測定すれば λ_x は決まる。実際の点熱源は有限の大きさであり、電氣的絶縁や機械的強度を高めるための被膜があり、リード線の熱伝導率による影響があるため、(2-1)、(2-2) 式を用いて熱拡散率や熱伝導率を求めると大きな誤差を生じることになる。

2. 2ステップ加熱球状熱源⁽²⁾

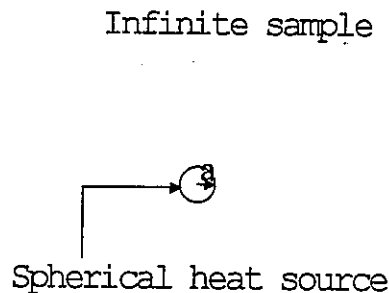


図 2-2 理想的球状熱源

サーミスタの熱伝導率が試料のそれに比べて十分大きいとして、一定の初期温度の無限試料中のサーミスタのステップ加熱したときの温度上昇 T は次式で与えられる。

$$T = \frac{q}{4\pi a \lambda_x} \left\{ 1 - \frac{2a^2 k^2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\kappa_x u^2 t/a^2}}{(au^2 - ka)^2 + (aku)^2} du \right\} \quad (2-3)$$

ここで、 $k = 3 \frac{\rho_x C_{p_x}}{\rho_s C_{p_s}}$ 、 a = 球の半径である。

(2-3) 式で時間 t が小さい場合の温度には熱源の熱物性値の影響があつて、試料の熱伝導率を正確に決定できない。したがつて、点熱源が有限の大きさの場合には、ある程度時間が経つてからの温度に基づいて熱伝導率を求めなければならない。時間 t がある程度大きいときには、(2-3) 式は次のように近似できる。

$$T = \frac{q}{4\pi a \lambda_x} \left\{ 1 - \frac{a}{(\pi \kappa_x t)^{1/2}} - \frac{a^3(2-k)}{2k\pi^{1/2}(\kappa_x t)^{3/2}} + \dots \right\} \quad (2-4)$$

点熱源の半径 a が十分に小さく (2-4) 式の右辺の第2項、第3項を無視できると、(2-4) 式、さらに簡略化され次式となる。

$$T = \frac{q}{4\pi a \lambda_x} \quad (2-5)$$

この場合は点熱源の半径が既知であれば、発熱率 q 、サーミスタの温度 T を測定することにより試料の熱伝導率 λ_x を決定できる。しかし、十分に長い時間に対して試料周辺の影響がない条件で測定するには大きな試料が必要である。また、実際にはリード線の影響が大きくなる可能性があり、本研究の目的の一つである小さな試料による測定という条件を満たさないことになる。

2.3 測定プローブ

図2-3に測定プローブの詳細図を示す。

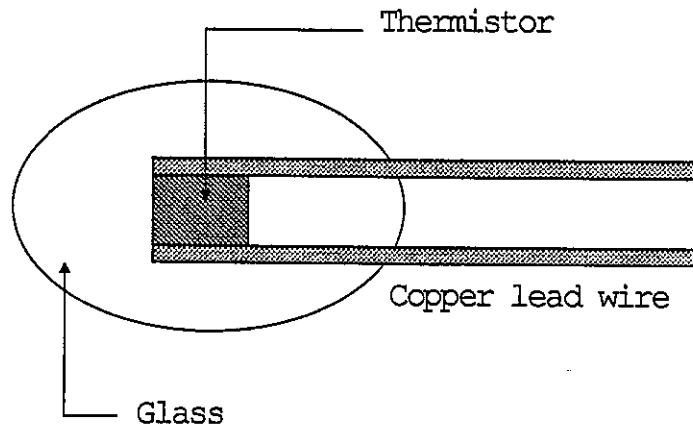


図2-3 測定プローブ

概略寸法は、サーミスタが $0.3 \times 0.3(\text{mm})$ の直方体で、ガラス被覆は長軸が 0.5 m 、短軸が 0.4 mm の回転楕円体である。リード線の太さは 0.1 mm である。しかし、サーミスタの正確な寸法は（実際には質量）は、マイクロメータなどでは測定できないので、後述するように水などの物性値が正確に知られている試料を用いて校正することになる。また、プローブを含む重文大きな試料の熱伝導モデルを解析するので、プローブの構造が球状などに比べて複雑でリード線があってもプローブが小さくリード線が細ければ、測定精度を十分高めることができる。

2.4 測定回路

本測定では、サーミスタの発熱率を逐一入力して数値解析によりサーミスタの温度上昇を求めるため、サーミスタの発熱の仕方は特に制限はない。しかし、サーミスタの発熱は緩慢に変化する場より、パルスやステップ状変化の方が熱物性値を精度よく決定できる。そこで、できるだけ簡単な回路でステップ状に近いサーミスタの発熱率となるように次のような回路を作成した。図2-4に測定回路を示す。

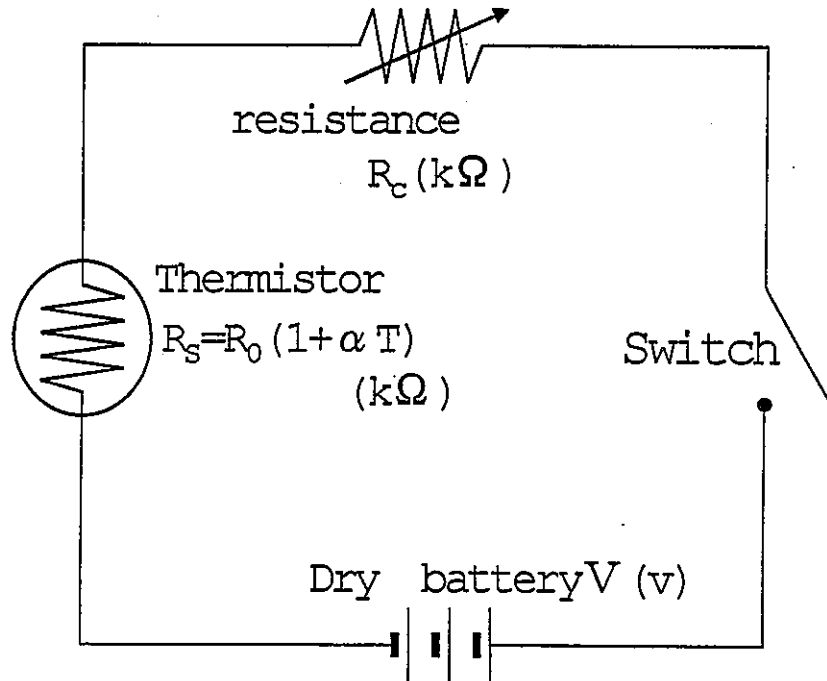


図2-4 測定回路

サーミスタ端子間の電圧を V_s 、抵抗を R_s とするとサーミスタの発熱率 W_s は、

$$W_s = \frac{V_s^2}{R_s} = C(const) \quad (2-6)$$

となり、電源電圧を V 、固定抵抗を R_c とすると

$$V_s = \frac{VR_0(1 + \alpha T)}{R_0(1 + \alpha T) + R_c} \quad (2-7)$$

となる。ここで、 $R_s = R_0(1 + \alpha T)$ である。

(2-7) 式を (2-6) 式に代入し、サーミスタの温度上昇が小さいとすると、 αT の値は微少であるので、固定抵抗 $R_c (k\Omega)$ は次式となる。

$$R_c = \left\{ \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_c}{C}} V - R_0 \right\} \alpha T + \sqrt{\frac{R_0}{C}} V - R_0 \quad (2-8)$$

ここで、発熱量一定の条件では、 αT の項が0であればよいから、サーミスタの発熱量率は、

$$W_s = \frac{V}{4R_0} = C(\text{const}) \quad (2-9)$$

となる。このときの固定抵抗は

$$R_c = \sqrt{\frac{R_0}{V^2/4R_0}} V - R_0 = R_0 \quad (2-10)$$

であればよい。

したがって、 $R_c = R_0$ ($k \Omega$) (サーミスタの初期抵抗) のとき、 αT が十分小さければ、この回路では、 αT の値に無関係にサーミスタの発熱量 W_s は電源電圧 V によって決まり一定となる。

2.5 測定体系

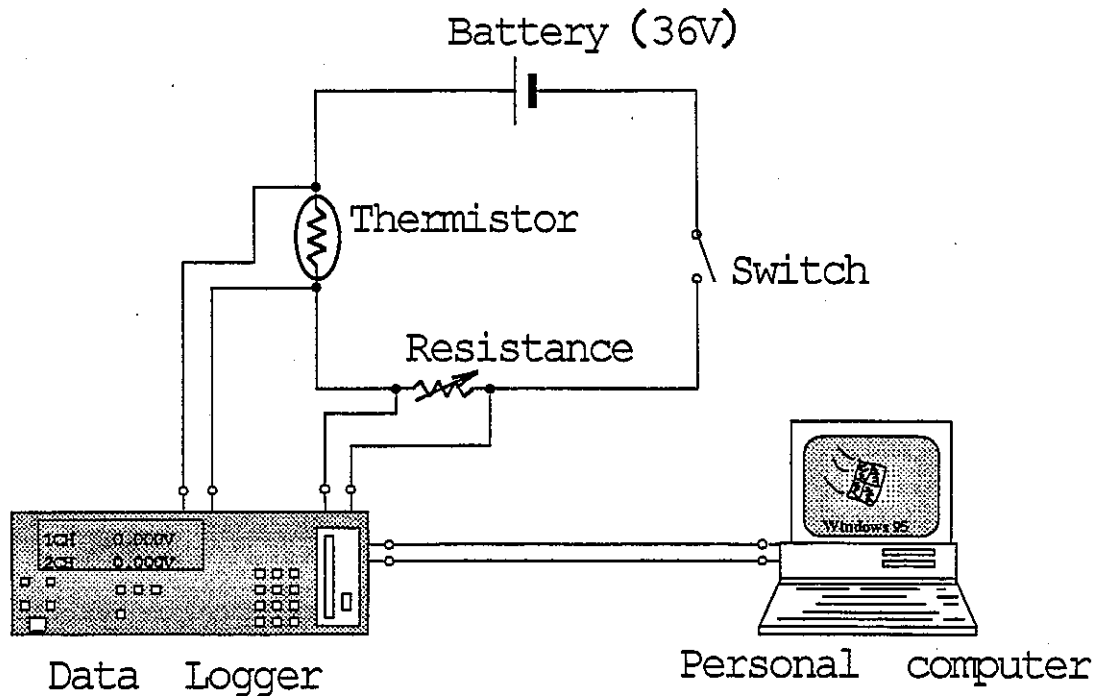


図2-5 測定系

図 2-5 に測定体系を示す。電源には 36V の電池を使用した。まず、サーミスタ端子と可変抵抗を直列につなぎ、サーミスタ端子の間と可変抵抗の電圧変化をデータロガにより記録した。このフロッピーのデータを図 2-6 に示すように、Microsoft 社のソフトである Excel を使って、可変抵抗の抵抗と電圧から、オームの法則を使ってサーミスタの電流を計算し、サーミスタの抵抗値と発熱率を求めた。また、サーミスタの電気抵抗-温度特性については、芝浦電子(株)社のサーミスタ特性式 (2-12) 式に従った。

(2-12) 式において、B は B 定数といわれ、電気抵抗-温度特性における任意の 2 温度間の温度に対する抵抗変化の大きさを表わす定数であり、次式の関係がある。

$$B = \frac{\ln R_1 - R_2}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \quad (2-11)$$

ここで、 R_1 : 絶対温度 T_1 (K) における抵抗値 (Ω)、 R_2 : 絶対温度 T_2 (K) における抵抗値 (Ω) である。

Example

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2	1	15.016	20.359	12.1255	21.84423	0.018596	
3	2	14.905	20.488	11.96008	22.19785	0.018575	Heating Value (W)
4	3	14.867	20.54	11.89939	22.32904	0.018575	of thermistor
5	4	14.843	20.576	11.87594	22.41593	0.018575	=B×C
6	5	14.828	20.602	11.8546	22.47463	0.018582	/(Resistance at
7	6	14.817	20.622	11.8321	22.51886	0.018586	0sec)
8	7	14.809	20.635	11.8101	22.55841	0.018591	
9	8	14.802	20.642	11.7886	22.59418	0.018595	
	
	
	

$$* \quad (1 / ((1 / B) (\ln(D) - \ln(R_0)) + (1 / T_0))) - 273 \quad (2-12)$$

図 2-6 Excelによるデータ管理

また、表 2-1 に今回本研究に使用した芝浦電子(株)社製⁽⁵⁾のサーミスタ PB7-43-S2 の抵抗-温度特性表を示す。今回の測定では、絶対温度で 270 K~290 Kの範囲であり、B=3345.636 を計算に使用した。

表 2-1 サーミスタの抵抗-温度特性表⁽⁵⁾

Temperature of thermistor(°C)	resistance of thermistor(k Ω)
-15	60.129
-10	47.344
-05	37.554
-00	(30.000)
+05	24.128
+10	19.531
+15	15.907
+20	13.033
+25	10.739

3. 測定方法と測定法の較正

3.1 熱伝導モデル

図 2-3 に示したように、プローブにはサーミスタのほかにサーミスタに電力供給のためのリード線、サーミスタやこのリード線を保護するためのガラス被膜が含まれる。このサーミスタを含む一定範囲の対称な 2 分の 1 を図 3-1 に示すように円柱座標系の熱伝導モデルにより模擬した。サーミスタおよびその近傍を細かいメッシュとして、それ以外の領域では粗いメッシュとした。サーミスタおよびガラス被膜の実際の形状はほぼ回転楕円形であり、これを円柱形状で近似した。この近似による誤差は、加熱後の極く初期の時間帯のみである。

ガラス被膜からサーミスタを完全な形で取り出すことが難しく、サーミスタの寸法(容積)を精密に測定することが困難である。このためガラスの容積も測定によって正確に求めることは難しい。そこで、熱伝導率の正確な値が知られており、その値がベントナイトの熱伝導率の範囲(およそ $0.5 < \lambda_x < 2.3$) をカバーする水と氷を用いて実測したサーミスタの温度と計算値が一致するように寸法を決定した。サーミスタの温度は電気抵抗の温度変化を利用して決定しているが、実際にはサーミスタ内の電流分布により決まる発熱分布があるため一様温度ではない。ここでは、サーミスタが十分小さく熱伝導率がガラスや試料より 20~30 倍大きいので、計算では図 3-1 に示すサーミスタ部の平均温度とした。

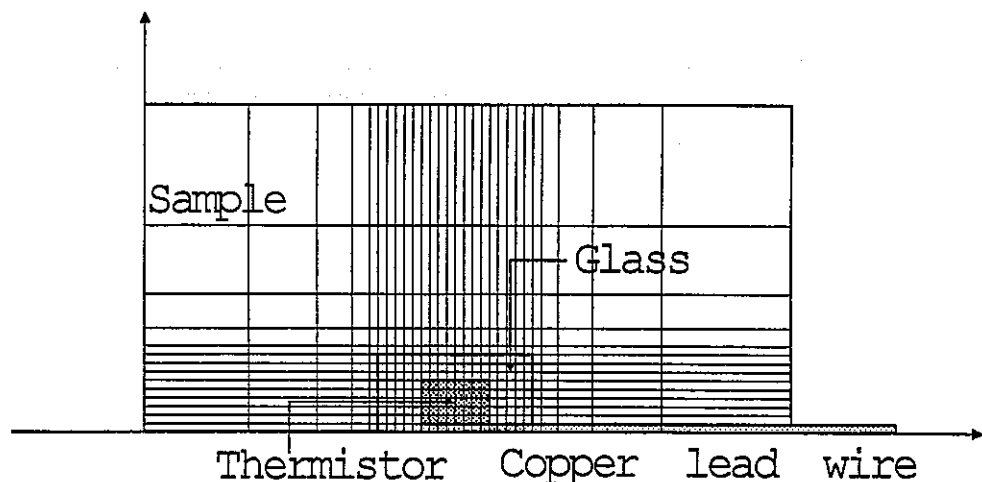


図3-1 熱伝導モデル

3.2 熱伝導率の決定法

3.2.1 入力データ

表 3-1 に、較正したプログラムに代入するプローブ各部の入力データを示す。なお、熱伝導モデルはサーミスタプローブを円筒座標系で近似している。ここでの入力データは、サーミスタと、ガラスの寸法以外は、全て文献値である。

表 3-1 入力データ

	length (mm)	radius (mm ϕ)	thermal conductivity (W/mK)	density (Kg/m ³)	heat capacity (KJ/KgK)
thermistor	0.30	0.30	20.0	5000	250
lead wire	—	0.01	71.0	21000	130
glass	1.00	0.80	1.5	2190	700
sample	infinite	infinite		**A	**B

表 3-1 に示されている試料の**A(密度)は、実験において測定終了後試料の質量とアクリル容器の体積から算出し、計算の際の入力データとする。また、試料の**B(比熱)は、文献からのベントナイトの乾燥時の比熱をもとに、含水比を考慮して算出し、入力データとした。また、計算機内では、試料の体積をほぼ無限大とした。

3.2.2 熱伝導率の算出

サーミスタの温度上昇の実測値を水と氷で較正した計算コードに入力する。図 3-2 に示すように、まず、あらかじめ予測できる範囲の試料の熱伝導率をいくつか代入して、温度を計算し、サーミスタの温度上昇と実測値との偏差が 0 になる点をその時間の試料の熱伝導率とした。計算は 0.5 秒毎に行なった。

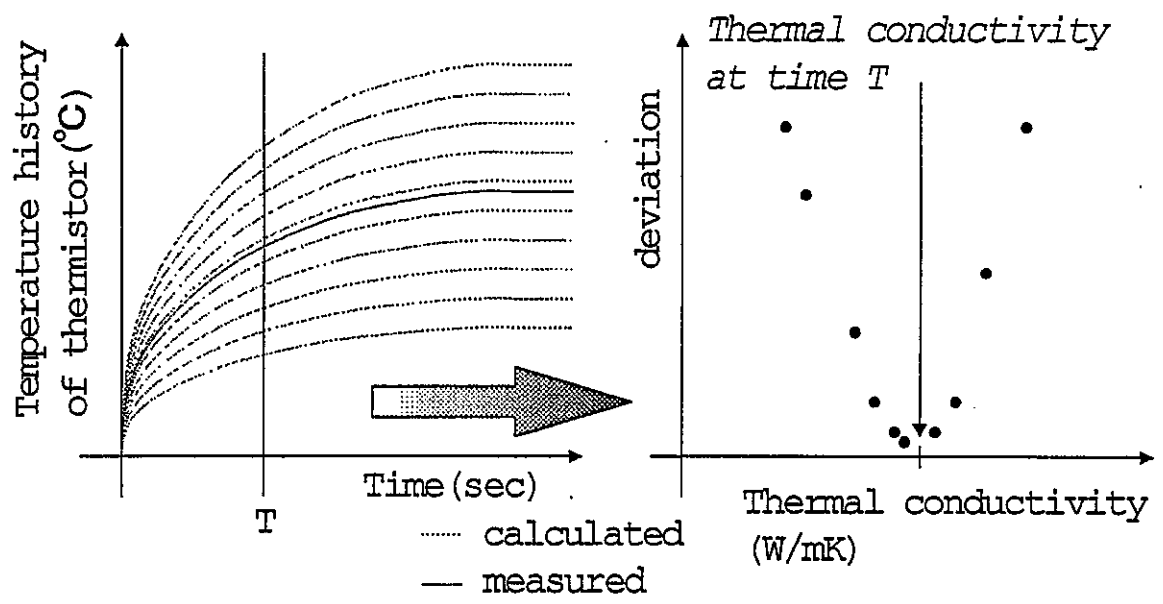


図3-2 熱伝導率の決定法

3.3 測定法の較正

3.1 で述べた熱伝導モデルを、熱伝導率が既知の水（自然対流を防ぐため1.0重量パーセントのゼラチンで凝固したもの）と氷で較正を行なった。なお、ゼラチン添加による水の熱伝導率の変化については、ゼラチン添加量を1.0%、2.0%、3.0%と変えて熱伝導率を測定したが、図3-2に示すように、ゼラチン添加量によって、水の中のサーミスタの温度上昇に差が無いことを確認した。

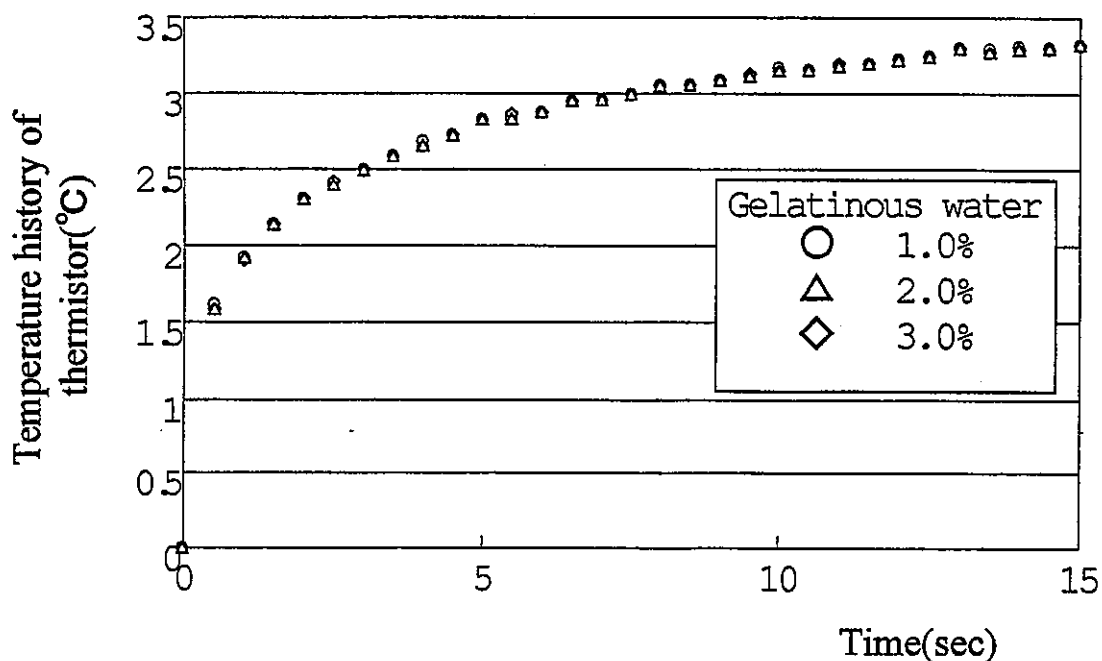


図3-3 水の温度測定結果

モデルの較正では、まず実験によって水と氷の中のサーミスタに電流を流し、その抵抗変化からサーミスタの温度上昇を測定した。その後3.1で説明した計算コードに、表3.2にある熱物性値のデータを入力し、水と氷の実測値に計算値が合うようにサーミスタとガラス被膜の寸法を決定した。図3-3、図3-4に、水と氷を用いたサーミスタの温度上昇の実験値と計算値との比較を示す。表3-3に、較正によって決定したサーミスタとガラス被膜の寸法と実際のプローブをマイクロメータで測定した値の比較を示す。

表 3-2 水と氷の熱物性値

	water	ice
thermal conductivity (W/mK)	0.585	2.200
density (Kg/m ³)	1.00	0.92
thermal capacity (KJ/KgK)	4.20	2.00
power (W)	0.015	0.009

表 3-3 プローブ部の寸法

glass	thermistor	
1.00 × 0.80 (mm φ)	0.30 × 0.30 (mm φ)	calculated
0.99 × 0.84 (mm φ)	—	measurement

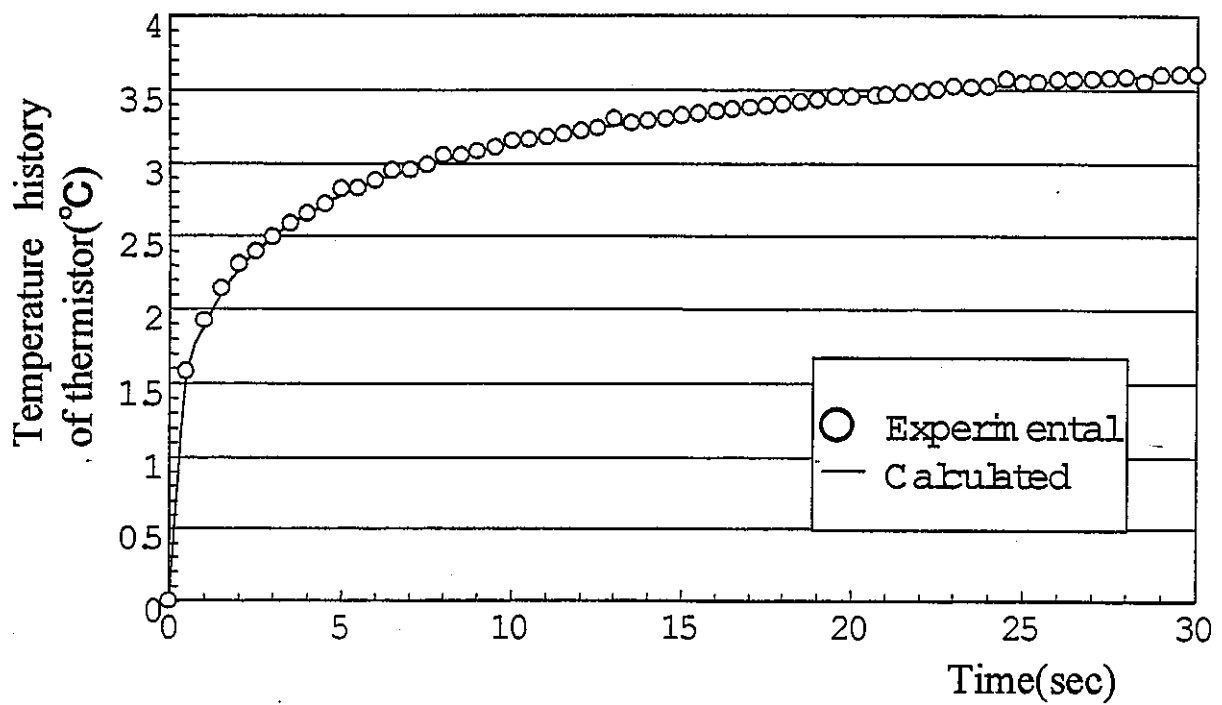


図3-4 水の温度変化の測定値と計算値の比較

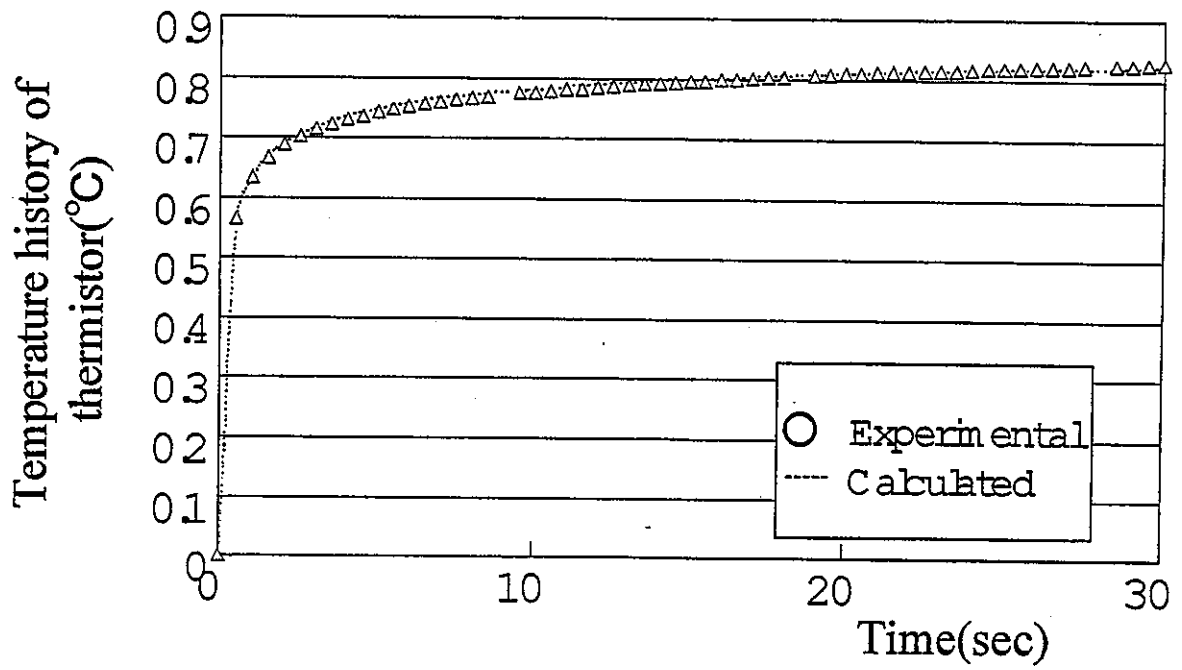


図3-5 氷の温度変化の測定値と計算値の比較

4. ベントナイトの熱伝導率の測定

4.1 試料の作成法

試料を膨潤（水を試料に含ませること）する方法を図 4-1 に示す。まず、一定の試料を、図 4-1 のアクリルセル②、③にそれぞれ πmm^3 ずつ圧密する。その後、サーミスタプローブをはさむように、膨潤用フィルターをつけたアクリルセル（中央に孔が空いている）①、④を重ねボルトで締める。なお、サーミスタプローブとアクリルセルとの間に水が侵入しないように、サーミスタプローブが挟まれるアクリルセル②、③の溝にはシリコン樹脂を埋めこんでいる。このようにして、試料に水を含ませるために、約 10 日ほどアクリル容器を水の中に沈めておく。

また、試料の平均密度は、測定が終了した後、試料を取り出し、質量を測定し算出する。その後、試料を乾燥機に約 1 日入れておき、質量を測定して乾燥密度を算出する。

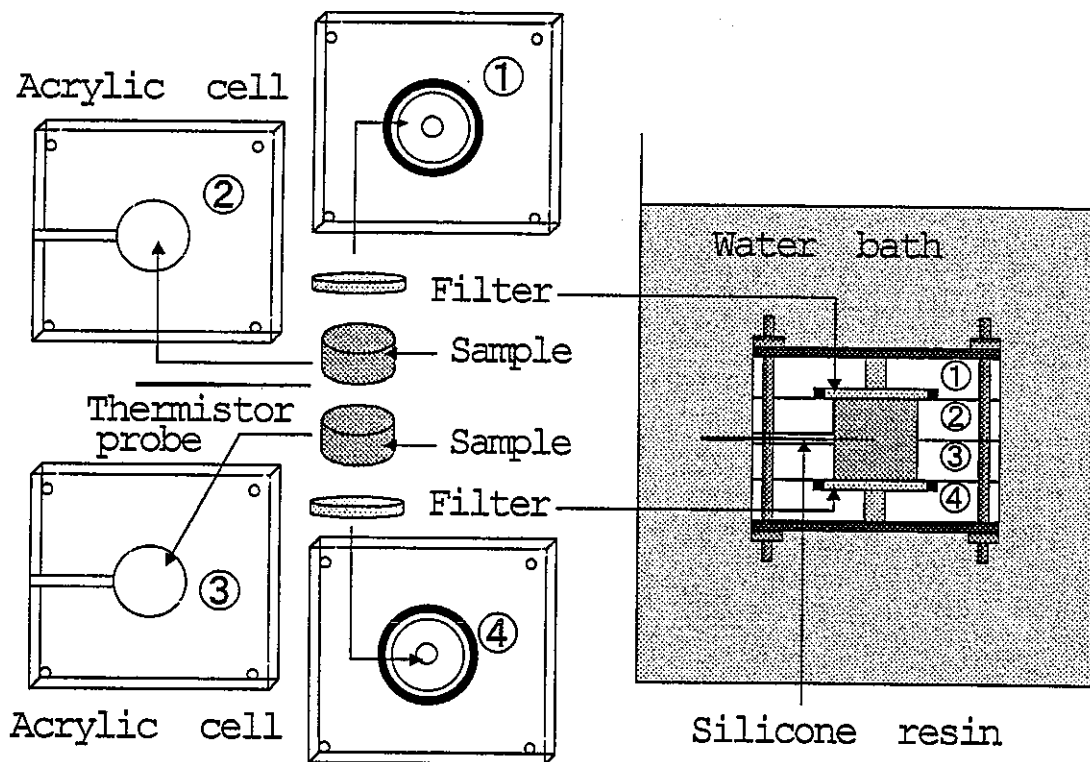


図4-1 膨潤方法

次に、図 4-5 にあるように、容器を密閉し測定中に外気の温度の影響を受けないように、周囲を断熱材及び断熱壁によって覆い保温機に入れ機内を一定の温度とした。

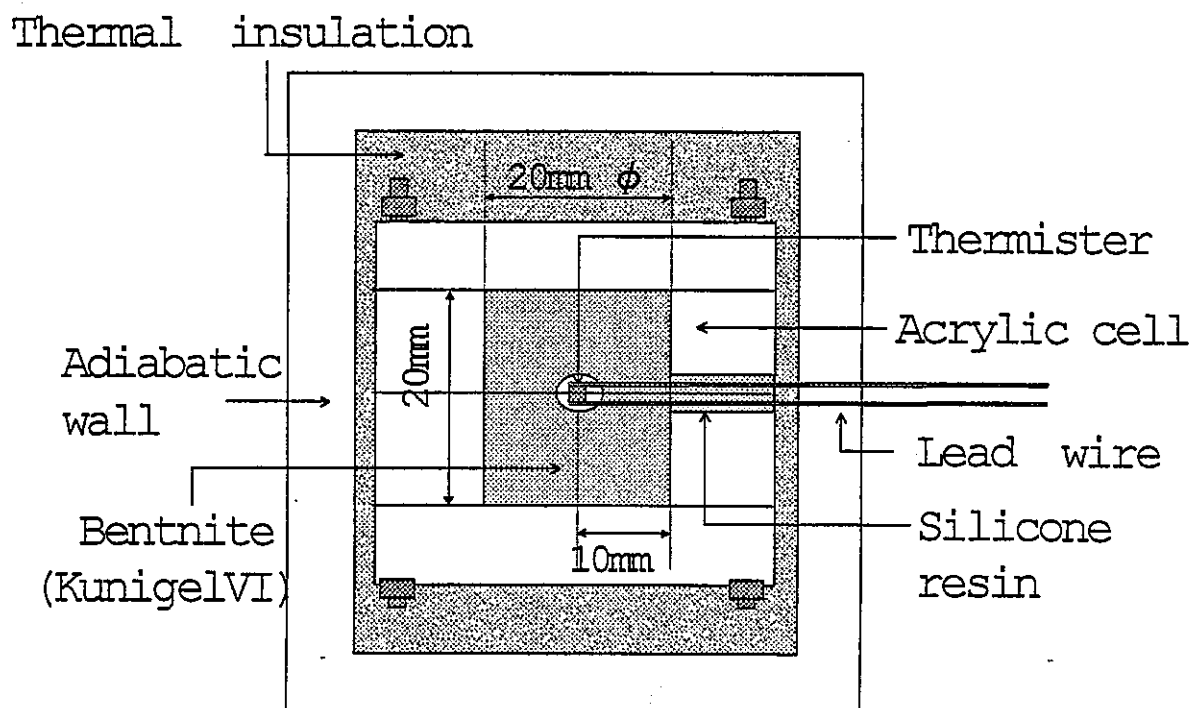


図4-2 測定部の詳細図

4.2 結果

本測定法において使用したベントナイトは、クニゲル VI で、表 4-1 に示すような水分含有率と密度の異なった試料を作成し測定した。

表 4-1 試料の物性値

sample number	temperature	dry density	saturation degree
#	(°C)	(g/cm ³)	(%)
1	20	1.41	22.3
2	20	1.41	24.3
3	20	1.41	25.5
4	20	1.41	28.0
5	20	1.60	22.1
6	20	1.60	23.8
7	20	1.60	24.8
8	20	1.73	50.1
9	20	1.73	91.9
10	20	1.79	20.5
11	20	1.79	22.4

図 4-1~図 4-4 に測定結果を示す。試料 8、9 においては、測定時間を 30 秒行い、残りの試料については 15 秒間測定した。図に示すように、熱伝導率は、測定開始数秒間は若干小さく、30 秒近くになって若干の大きくなっている。このことは、点熱源であるサーミスタとガラスの形状を円筒状で近似することによる影響と考えられる。また、測定開始 30 秒付近では、熱伝導率が少し高くなっているが、この原因としては、点熱源に電力を供給するリード線の熱伝導率により試料の無限媒質としての条件が満たされないためである。すなわち、実験装置では試料中にリード線が入っている長さは 10mm であり、外に出ている導線はフィン効果がある。これに対して、モデルで十分大きな計

算範囲であり、実験装置と異なる条件となっているためである。測定開始から5秒～25秒の間であれば試料の無限媒質の条件が満たされ、測定値が一定となっている。よって、試料の熱伝導率は10秒～15秒の間の平均値とした。それぞれの試料の熱伝導率を表4-2に示す。

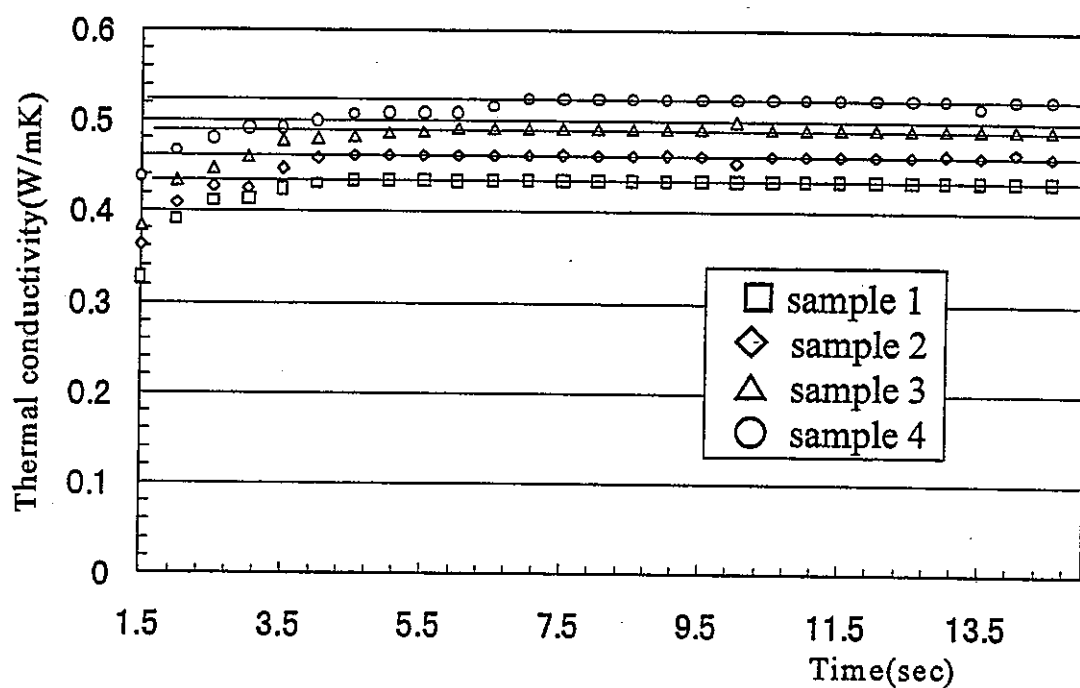


図4-3 ベントナイトの熱伝導率 (試料1～4)

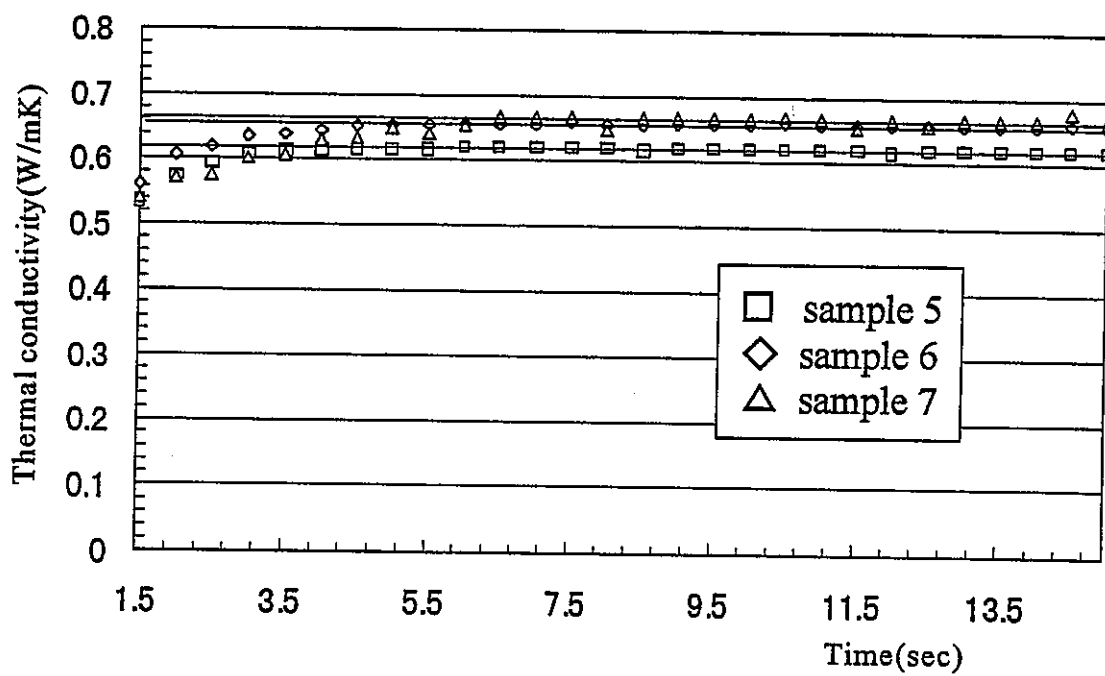


図4-4 ベントナイトの熱伝導率(試料5~7)

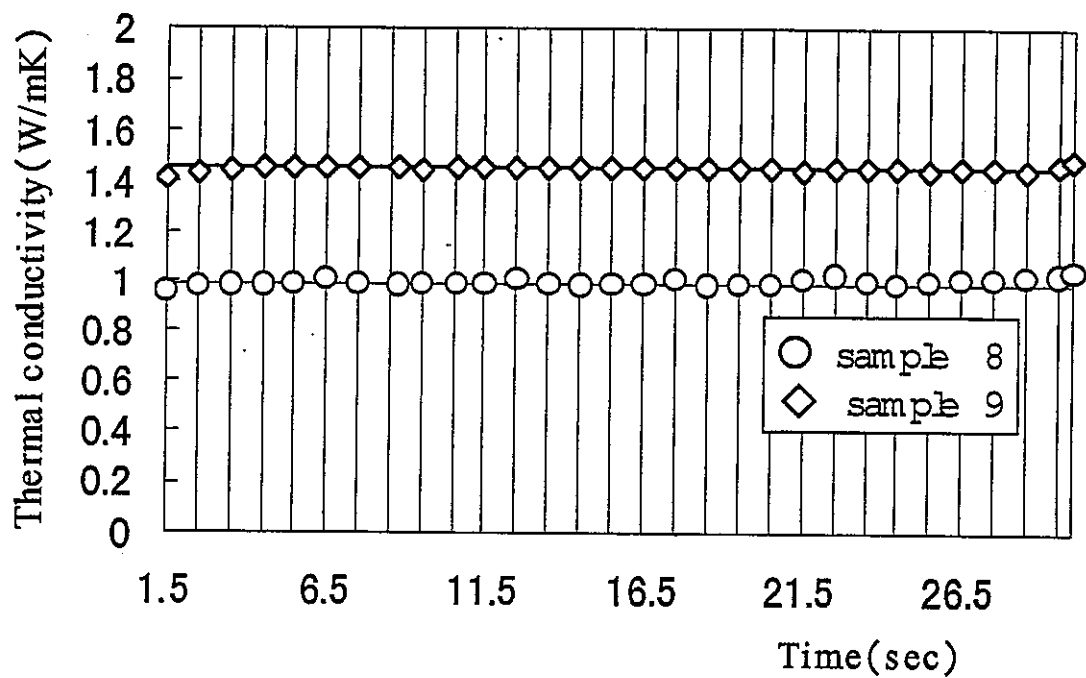


図 4-5 ベントナイトの熱伝導率 (試料 8, 9)

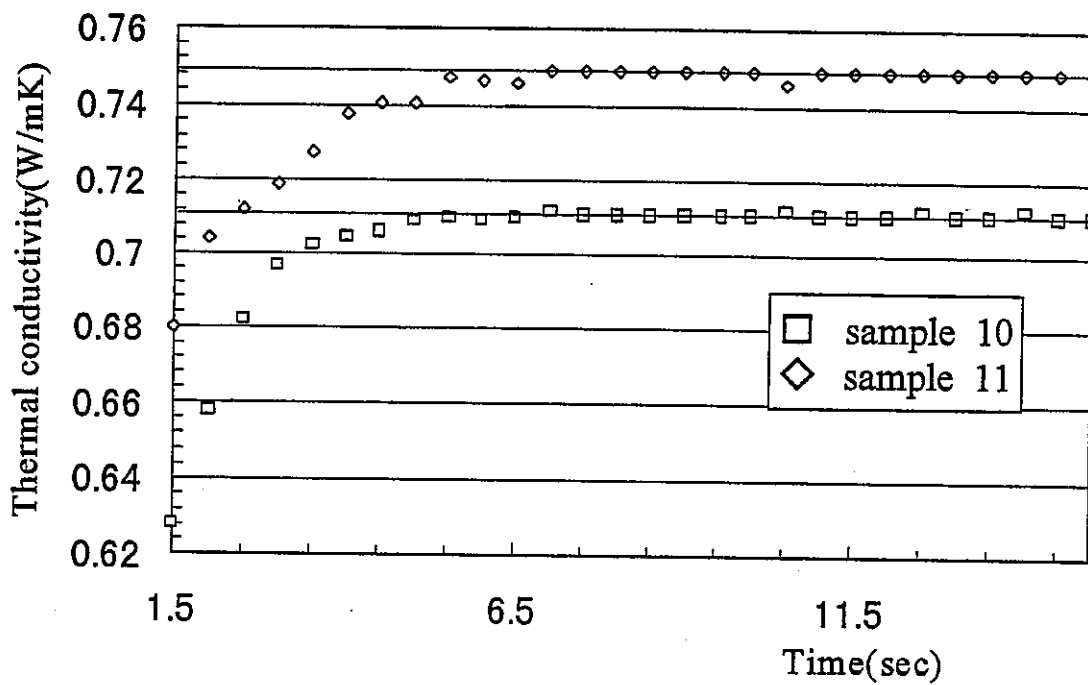


図4-6 ベントナイトの熱伝導率(試料10,11)

表4-2 ベントナイトの熱伝導率測定結果

sample number	thermal conductivity
#	(W/mK)
1	0.434
2	0.461
3	0.492
4	0.524
5	0.619
6	0.658
7	0.666
8	1.000
9	1.450
10	0.711
11	0.749

4. 3 線熱源法による測定値との比較

(1), (2)

図4-7 に線熱源法によって測定されたクニゲルVIの熱伝導率と本測定法によって測定された熱伝導率を比較して示す。図中の本測定値は、表4-1、表4-2に基づくものである。図4-7によると、本測定法による熱伝導率は、線熱源法によるもの比べて、数%低データもあるが極めて良く一致している。一般に測定誤差は、測定法に固有の誤差があり、この誤差は測定値を全体として小さくしたり大きくする傾向がある。また、記録の読み取り精度などの誤差はランダムとなる傾向にあり、測定値のばらつきの原因となる。このほか、試料の作成に伴い、試料に若干の差を生じるのを避けられない。この測定法による結果が極めて良く一致しているのは、両測定法による測定精度がきわめて高いと考えて良い。

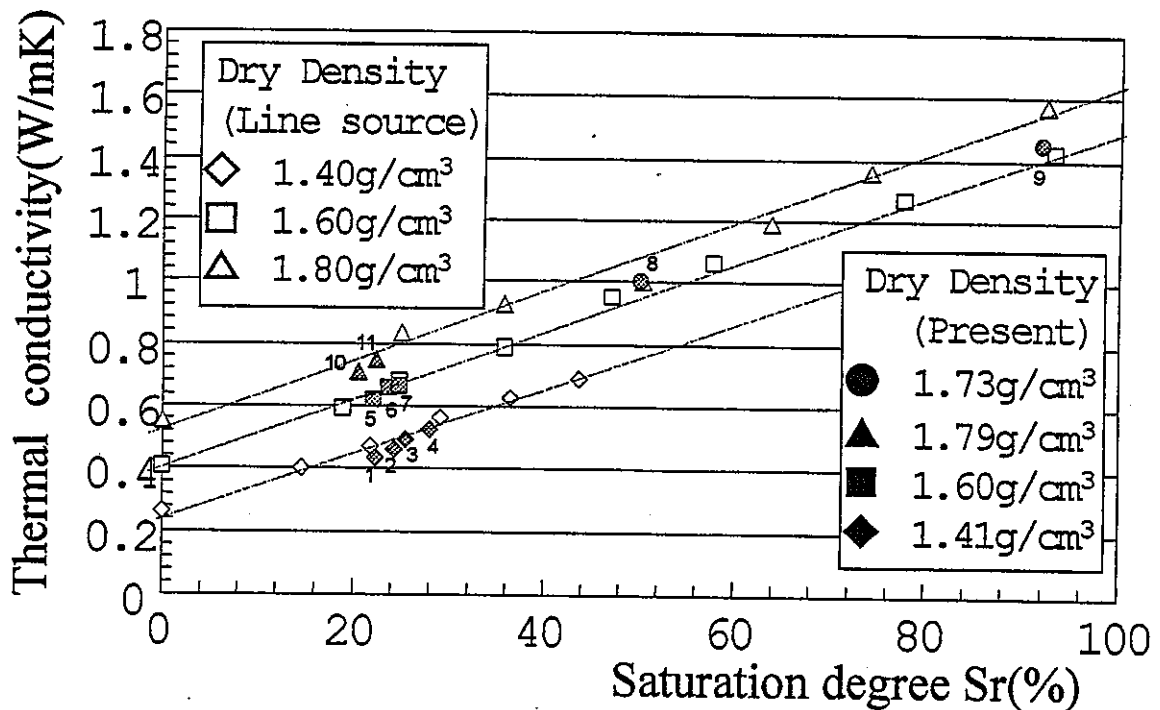


図4-7 線熱源法と点熱源法の測定値の比較

5. まとめ

サーミスタを点熱源とする本測定法の主な利点は小さな試料で測定できることにともない、プローブを試料に埋め込んだ状態で、水分含有率を1週間程度で変えて測定できることである。このほか、線熱源法と比較した特徴を表4-5に結果をまとめて示す。

4-3 線熱源法と点熱源法の特徴の比較

	line source (recent method)	point source (present)
1. size of sample	110 ϕ \times 120mm	13 ϕ \times 13mm
2. thermal resistance between a sample and a probe	large	negligible
3. time of measurement	5~10min	5~10sec
4. temperature rise	about 5°C	1~2°C
5. redistribution of damp	not negligible	negligible

また、クニゲル VI の熱伝導率は、幾世橋らの測定法と良く一致し、異なる測定法の測定値が良く一致したことで、これらの測定値の信頼性が高い。

6. 参考文献

- (1) Hiroshi kiyohashi , Katunori Banno : Effective Thermal Conductivity of Compact Bentonite as a Buffer Material for High Level Radioactive Waste :High Temperatures-High pressures
- (2) T.A.BALASUBRAMANIAM, H.F.BOWMAN : Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Biomaterials : A Simultaneous Measurement Technique, Journal of Biomechanical Engineering
- (3) Lnnart Borgesson , Anders Fredrikson , Lars-Erik Johannesson : Heat conductivity of buffer materials , TECHNICAL REPORT 94-29
- (4) H.S.CARSLAW , J.C.JAGER : CONDUCTION OF HEAT IN SOLIDS , OXFORD AT TECLARENDON PRESS
- (5) 芝浦電子(株) : 芝浦電子サーミスタ

7. 表一覧

表 2 - 1

表 3 - 1

表 3 - 2

表 3 - 3

表 4 - 1

表 4 - 2

表 4 - 3

図一覧

図 2 - 1 理想的点熱源

図 2 - 2 理想的球頭サーミスタの数値計算用抵抗

図 2 - 3 測定プローブ

図 2 - 4 測定回路

図 2 - 5 測定点

図 2 - 6 Excel によるデータ管理

図 3 - 1 熱伝導モデル

図 3 - 2 熱伝導率の決定法

図 3 - 3 水の温度測定結果

図 3 - 4 水の温度変化の測定値と計算値の比較

図 3 - 5 氷の温度変化の測定値と計算値の比較

図 4 - 1 膨潤方法

図 4 - 2 測定部の詳細図

図 4 - 3 ベントナイトの熱伝導率 (試料 1 4)

図 4 - 4 ベントナイトの熱伝導率 (試料 5 7)

図 4 - 5 ベントナイトの熱伝導率 (試料 8、9)

図 4 - 6 ベントナイトの熱伝導率 (試料 1 0、1 1)

図 4 - 7 線熱源法と点熱源法の測定値の比較