

# 緩衝材・岩石の熱物性値の推算法に関する研究

(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
Σ	J1600 96-002	1996.4.25
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		

1996年3月

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、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

本資料について問合せは下記に願います。(注)

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

## 緩衝材・岩石の熱物性値の推算法に関する研究

熊田 俊明\*

### 要 旨

本研究の目的は、ベントナイトの熱伝導率を種々の条件で推算する式を導出することと、ベントナイトの熱伝導率の測定値が十分得られていないので、これを簡便に測定する点熱源法に関する基礎的検討を行うことである。

本報では、まず分散物質の熱伝導率の測定値と推算式について調査した。次いで、ベントナイトの荷重や含水率の変化による機械的構造の変化の特徴を把握した。これらの知見に基づいて、ベントナイトの伝熱機構をモデル化して、これを解析して推算式を導出した。ベントナイトの熱伝導率の簡便な測定法として、サーミスタを熱源および温度センサーとする点熱源法の原理と技術的可能性について検討した。

得られたベントナイトの推算式による計算値と既存の測定値を比較して、既存測定値と最もよく合う整理式と同等の精度で測定値を整理できた。また、サーミスタを点熱源とする熱伝導率測定法は、サーミスタの持つ熱容量を熱伝導率既知の試料により較正すれば、実用上十分な精度で測定できることが確かめられた。

---

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

COMERCIAL PROPRIETARY

PNC ZJ1600 96-002

MARCH. 1996

## Correlations Predicting Thermal Conductivity of Bentonites and Rocks

Toshiaki Kumada\*

### Abstract

The report concerns the derivation of the correlation predicting the thermal conductivity of bentonite and the discussion of the technical feasibility of a point source method measuring thermal conductivity of bentonite.

The first part of the report reviews the thermal conductivity of suspensions and their correlations. The second part describes the model of heat conduction in bentonite and the derivation of the correlations for the prediction of thermal conductivity of bentonite. The predicted values of the thermal conductivity by the present correlations were compared with the data from the various sources. The agreement was good and the model can be then used to predict the thermal conductivity of bentonite. The third part of the report discusses the point source method measuring the thermal conductivity of materials such as liquids and powders. The temperature histories numerically predicted from the thermal conduction model of the probe and its surrounding sample of dilute gelatin, were in good agreement with the measured values, if the heat capacity of the bead of the point source, which is used as a heater, is estimated correctly.

---

Work performed by T.Kumada under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

PNC Liaison: Radioactive Waste Management Project, Noriaki SASAKI

\* Nuclear Engineering, Department of Engineering, Hokkaidou University

## 目次

1. はじめに	1
2. 複合材料の熱伝導率	3
2.1 充填層	3
2.1.1 コンソリデイト	
2.1.2 アンコンソリデイト	
2.2 分散物質	4
2.2.1 Maxwellの式	
2.2.2 Frickeの式	
2.3 まとめ	6
3. ベントナイトの熱伝導率の推算	7
3.1 熱伝導モデル	7
3.2 分散体部分の空隙率 $P_d$	8
3.3 分散体部分の熱伝導率 $\lambda_{b, eff}$	8
3.3.1 分散物質の熱伝導率	
3.3.2 分散体およびボイド部分の飽和度の見積もり	
3.3.3 分散体部分の分散体自身の熱伝導率 $\lambda_d$	
3.4 ボイド部分の熱伝導率 $\lambda_{e, eff}$	10
3.5 ベントナイトの熱伝導率 $\lambda_{eff}$	10
3.6 測定値と推算値の比較	12
3.6.1 既存の測定値	
3.6.2 既存の推算式	
3.6.3 測定値と推算値の比較	
4. 新しい熱伝導率測定法	15

4.1	はじめに	15
4.2	測定原理	15
4.3	測定装置	16
4.4	測定結果	16
4.5	数値計算結果と測定値の比較	17
4.6	まとめ	17
5.	結語	18
6.	記号	20
7.	文献	21
8.	表一覧	22
表2-1	分散物質の推算式	23
表2-2	分散体および熱伝導率測定結果(文献7)	24
表2-3	球状の分散体	25
表2-4	球以外の分散体	26
表3-1-1	PNCによるデータ	27
表3-1-2	SKBによるデータ	27
表3-1-3(1)	Bezietによるデータ	28
表3-1-3(2)	Beziatによるデータ	
表3-1-3(3)	Beziatによるデータ	
9.	図一覧	31
図2-1	球状分散体	32
図2-2	分散体形状と回転楕円体	33

図2-3 球以外の分散体	34
図3-1 ベントナイトの構造モデル	35
図3-2 ベントナイトの熱伝導率推算用モデル	35
図3-3-1 分散体のモデル	36
図3-3-2 分散体の熱伝導率推算用モデル	36
図3-4 ボイド部分の熱伝導率推算用モデル	37
図3-5 本推算式と実験値の比較	38
図3-6 Kahrらの推算式と実験値の比較	38
図3-7 Beziatらの推算式と実験値の比較	39
図3-8 Knutssonの推算式と実験値の比較	39
図3-9 熱伝導率の飽和度による変化	40
図4-1 無限媒質中の点熱源	41
図4-2 測定回路	41
図4-3 プローブ部の詳細	42
図4-4 測定装置	42
図4-5 実験値と計算値の比較	43
図4-6 サーミスタの発熱率	44
図4-7 プローブ部とその近傍のモデル化	45

## 1. はじめに

ガラス固化体を深地層に埋設する際に緩衝材として利用されるベントナイトの物理化学的特性の把握は、放射性核種をどの程度の期間人工バリア内に閉じ込めておくことができるかを評価する上で重要である。とくにベントナイト中に水分が含まれる場合の放射性核種の移動に関する吸着、拡散、水分移動、温度分布に関係するベントナイトの熱伝導率や水分移動およびオーバパックの腐蝕に関する水分中の溶解物などを種々の条件下で詳細に調べる必要がある。ここでは、ベントナイトの熱物性の中の、主として熱伝導率の推算法を確立する目的で文献調査、伝熱モデルの提案および推算式を導出した。

複合材料は連続母材に種々の形状の別な材質が分散している分散物質、気体を連続材として繊維を分散した繊維状物質、流体を母材として粒子を充填した充填層に分けられる。これらの複合材料の熱伝導率の推算式は、実験データの整理式や熱伝導モデルから解析式を導く方法などによって求められている。整理式では整理式の導出に用いたデータに関するパラメータの範囲では、一定の精度を期待できるが、パラメータの範囲を越えて適用する場合に精度の保証が十分でない。このため、この整理式が混合した成分材料の割合が0とか1とした場合に適切な熱伝導率を与えるか、また、その他のパラメータの値において、適切な値を与えるかなどのチェックが必要である。このようなチェックによって適切でないと判断される場合には、整理に用いたデータのパラメータの範囲での利用に留めるべきである。一方、熱伝導モデルに基づいて導いた解析式を推算式とする場合には、解析式を導くためにモデルを実際の構造よりはるかに単純化している場合が多く、この単純化のために、先に述べた整理式と同様、適当なパラメータの値でチェックする必要がある。

本研究では、ベントナイトの種々の荷重、水分含有率および温度条件下での熱伝導率を推算する手法を確立することが主たる目的である。ベントナイトは荷重により変形し、水分を吸収させると多層構造の中に最初は1分子層、吸収量が増えるにつれて2分子層のように吸収するとともにベントナイトの粒子そのものは膨潤するという複雑な変化をする。このため、通常の複合材料のように複合材料を構成している各成分が単に幾何学的に混合していて変化しない場合と比べて、ベントナイトの熱伝導モデルの構築は、極



めて難しいばかりでなく複雑となる。

さて、ペントナイトが乾燥時においても荷重によって粒子が大きく変形する性質があり、変形しない容器に閉じ込めた状態で、水分を吸わせると膨潤して荷重を与えた状態となる。先の水分の吸収の仕方と考え合わせると、このような複雑な性質を持つペントナイトの熱伝導モデルをどのように構築すべきか不明の点が多い。

本研究では、まず、既存のペントナイトの熱伝導率測定値を整理し、熱伝導率の充填率や水分含有率による変化の特徴から、熱伝導モデルを改良しつつ、より測定値をうまく整理できる推算式を求めた。現在、報告されている既存の測定値が十分でないため、緩衝材として利用されるペントナイトのすべての利用条件で、推算式による値と十分比較ができないことが判明した。このため、より簡便に熱伝導率を測定する方法が必要と考え、サーミスターを利用した点熱源法を考案し、その原理的かつ技術的可能性を検討した。

## 2. 複合材料の熱伝導率

ここでは、連続媒質に粒子を分散または充填した複合材のみを考える。まず、粒子状の分散体で互いに接触する状態になれば、これを充填層といい、接触しない状態で分散していれば分散物質という。

### 2.1 充填層

流体を母材とする複合材で粒子や流体の形状や物理化学的性質に変化がない場合には、大別して次のように分類される。

- (1) 固体粒子が荷重や加熱によって接合している（コンソリデイト）。
- (2) 固体粒子が接合していない（アンコンソリデイト）。

#### 2.1.1 コンソリデイト

(1) の場合は、例えばウランペレットのように焼結が進んでいる場合は、僅かなポアが孤立した状態で存在しており、熱伝導率の性質としては気密性の岩石と同様に扱うことができる。球状の小さなポアで、温度が低く輻射伝熱を無視できる場合には、有名なLoebの推算式が知られている。

$$\lambda_0 = \lambda_s (1 - P_a) \quad (2-1)$$

この式は後に述べるようにMaxwellの理論によれば次式のように補正しなければならない。

$$\lambda_0 = \lambda_s \{1 - (3/2) P_a\} \quad (2-2)$$

緻密な岩石では $P_a = 0$ であるから、岩石そのものの熱伝導率となる。また、ポアの形状が球形からずれている場合には、その形状に応じて $P_a$ の前の係数が変わることになる。岩石ではその母材が緻密な場合が多いので複合材として扱う必要のない場合が多い。

#### 2.1.2 アンコンソリデイト

(2) の複合材で粒子が接合していない場合には、空隙部に流体の種類や気体か液体かあるいは気体と液体の混在しているかによって、さらに次のように分類される。

- (a) 粒子の隙間に気体が充満している。
- (b) 粒子の隙間に液体が充満している。
- (c) 粒子の隙間に気体と液体が一定量混在している。

(a)に相当する複合材は紛体や乾いた砂のようなもので、荷重がない状態では粒子が互

いに軽く接触している状態である。荷重があると粒子の接触面が変化するため、多くの推算式が提案されているが、推算値の精度は良くない。

(b)に相当する複合材は砂に海水が充満しているような場合に相当し、粒子と海水の熱伝導率の差が小さく、粒子の接点での伝熱量が支配的でない場合で、熱伝導率の推算を比較的正確に行うことができる。分散物質で分散体が充満した場合に相当する。

(c)の場合は(a)の場合に対して、液体例えば水が空隙に入った場合で、液体がどのように入るかによって、熱伝導率の値に大きな差を生じる。通常は粒子が液体に対して濡れやすいので、液体は粒子間の狭い空隙に侵入し、少量の液体で熱伝導率は大きく変化する。ベントナイトの場合には、粒子間の狭い空隙ではなく、吸収された水が粒子の層状構造の表面に分子層として付着し、これによって粒子が膨潤するため、水分含有率の熱伝導率への影響は一層複雑であり、この水の挙動と膨潤の効果をどのように考慮するかが課題となる。

## 2.2 分散物質

分散物質では、母材と分散体の熱伝導率の比 $\lambda_d/\lambda_c$ が1に比べて大きい場合と小さい場合がある。収集した測定値を表2-2~2-4に掲載した。分散物質の熱伝導率に影響する因子は、分散体の形状、熱伝導率比、分散体の体積率、分散体配列などである。実際の分散物質について、これらの因子をすべて考慮して熱伝導率の推算式を求めることは困難である。実際には、解析の難しさから球、円柱および直方体などの特定の配列について、次の二つの方法で推算式が求められている。

(a)低分散体積率の場合について、ラプラスの式（熱伝導の定常式）を解く。

(b)分散体を立方体中に1個配置し、この立方体に一定方向に熱流があるとして、各部の熱抵抗を直列や並列に接続して全体の熱抵抗を求める。表2-1 に主な推算式の一覧を示す。

### 2.2.1 Maxwellの式<sup>(1)</sup>

(a)の方法による推算式では球状分散体についての次のMaxwellの式がある。

$$\lambda_t/\lambda_c = \{2 + \kappa - 2 P_d (1 - \kappa)\} / \{2 + \kappa + P_d (1 - \kappa)\} \quad (2-3)$$

Maxwell の式は分散体が球形で、分散体積率が小さい場合に適用できる式である。

右辺の数値の2を1に置き換えれば、円柱に直交する熱流がある場合の解である。

この2をxと置いて次式を得る。

$$\lambda_t / \lambda_c = \{x + \kappa - x P_d (1 - \kappa)\} / \{x + \kappa + P_d (1 - \kappa)\} \quad (2-4)$$

この式はxの値によって種々の形状の分散体の低分散体積率の場合の推算式となる。xの値の意味を検討してみよう。式(2-4)でx=0とすれば次式を得る。

$$\lambda_t = 1 / \{P_d / \lambda_d + (1 - P_d) / \lambda_c\} \quad (2-5)$$

この式は連続媒質と分散体が層状となっていて、層に直角方向に熱流がある場合に相当する。また、x→∞とすれば次式を得る。

$$\lambda_t = \lambda_c (1 - P_d) + P_d \lambda_d \quad (2-6)$$

この式は連続媒質と分散体が熱流方向に層状または束状になっている場合の解である。

また、式(2-3) おいて、 $\lambda_d / \lambda_c \rightarrow 0$ とすれば、

$$\lambda_t / \lambda_c = (2 - P_d) / (2 + P_d) \quad (2-7)$$

$$P_d \rightarrow 0 \text{ では、} \quad \cong 1 - (3/2) P_d \quad (2-8)$$

と近似できる。ウラン燃料ペレットで十分焼結が進んでいる場合には、気泡の体積率が数%でしかも気泡は球形であるから、式(2-8)を利用すべきである。Loebの式では式(2-8)の $P_d$ の係数が1となっており、これは間違いである。また、 $\lambda_d / \lambda_c \rightarrow \infty$ のとき、 $P_d \rightarrow 0$ であれば、次式を得る。

$$\lambda_t / \lambda_c = (1 + 2 P_d) / (1 - P_d) \quad (2-9)$$

$$\cong 1 + 3 P_d \quad (2-10)$$

表2-2,3,4 に各種形状の分散体による分散物質の熱伝導率測定値を示す。また、図2-1にMaxwellとBruggmann<sup>(6)</sup>の式による計算値と測定値の比較を示す。

Maxwellの式は球状分散体を対象する式であるが、立方体のように角張った分散体でも低分散体積率では使用できる。しかし、分散体積率が大きくなって、分散体の熱伝導率への効果が大きくなると、計算値の測定値からのずれが大きくなる。分散体積率が大きい場合の推算式としてBruggmannの式が知られており、図2-2に示すように、広範囲の測定値がよく整理されている。

### 2.2.2 Frickeの式<sup>(2)</sup>

Frickeは、任意の回転楕円体がランダムに分散した場合の熱伝導率の推算式を導出した。Maxwellの式の導き方と同じ方法を回転楕円体に適用して、熱流と回転軸の異なる場合の二つの式を導き、これらを組み合わせて、表2-1に示す式を導いた。熊田は任意の形状の分散体にFrickeの式を適用するため、図2-2に示すような任意形状の分散体を回転楕円体に近似する方法を提案し、各種の測定値に適用した。この方法により各種の形状の分散体を回転楕円体に換算して、測定値とFrickeの式による推算値を図2-3に比較して示す。Hamilton<sup>(3)</sup>やChengら<sup>(5)</sup>の式は、その導出の過程で考え方に間違いがあり、測定値を精度よく整理できない。図2-3より明らかのように、熊田<sup>(7)</sup>による形状換算法に基づいてFrickeの式を用いれば、他の推算式よりよく測定値が整理できる。

### 2.3 まとめ

- (1) 分散物質では、分散体の形状が球形からずれるほど、ランダムに分散しなくなり正確な熱伝導率の推算が難しくなる。したがって、分散体の形状が針状とか膜状の場合には、分散状態を十分吟味しなければ、正確な推算はできない。
- (2) 球状または立方体のような形状でも、球状と考えて熱伝導率を推算してもかなりの精度で熱伝導率を推算できる。Maxwellの式では $0.5 < \lambda_o / \lambda_c < 2.0$ 、Frickeでは $0.3 < \lambda_o / \lambda_c < 3.0$ の範囲で、実用上十分な精度で推算できる。

### 3. ベントナイトの熱伝導率の推算

#### 3-1 熱伝導モデル

ベントナイトの構造は複雑であり、その特徴を十分に表すような構造モデルは現在まで得られていない。現在のところ、微視的観察や内部に含まれている水の挙動、物質の拡散挙動などから、基本的にはカード状の粘土粒子が層構造を成し複雑に組み合わせられ、各所に大きな空隙を含む構造を持っていると考えられている。例えば、ベントナイトに水が充填されると、粘土粒子の層間のマイクロな空隙に充填した水は層間水として強い拘束下に置かれ、大きな空隙に充填した水は自由水として振る舞うことが知られている。

このベントナイトの荷重や水分がある場合の伝熱機構をモデル化するために、図3-1のようなモデルに近似した。すなわち層間のマイクロな空隙の集合をアスペクト比の大きな直方体形状の空隙と考え、それらが均質な媒質中にランダムに配置されているとした。また多層構造間の大きな空隙は、媒質中のボイドとして扱った。図3-1の構造を持つベントナイトの熱伝導率を推算するため、図3-2のようにランダム構造を持つ空隙率 $P_d$ の分散体とボイド部分に分け、これらが熱流方向に並列に並んでいるものとした。なお、図3-2で分散体形状を楕円で示しているが、これは次節で示すように分散物質の熱伝導率推算式として、分散体形状を回転楕円体で近似するFrickeのモデルを適用するためである。ボイドを含めた全体積を $V$ 、分散体の体積を $V_b$ 、ボイドの体積を $V_e$ とすると、

$$n = \frac{V_b P_d + V_e}{V} = 1 + \frac{V_b}{V} (P_d - 1) \quad (3-1)$$

$$\text{より } \frac{V_b}{V} = \frac{1-n}{1-P_d}, \quad \frac{V_e}{V} = \frac{n-P_d}{1-P_d} \quad (3-2)$$

となる。したがって、分散体部分の実効熱伝導率を $\lambda_{b, \text{eff}}$ 、マクロなボイド部分の実効熱伝導率を $\lambda_{e, \text{eff}}$ とするとベントナイトの熱伝導率 $\lambda_{\text{eff}}$ は次式で与えられる。

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{1-n}{1-P_d} \lambda_{b, \text{eff}} + \frac{n-P_d}{1-P_d} \lambda_{e, \text{eff}} \quad (3-3)$$

$P_d$ 、 $\lambda_{b, \text{eff}}$ 、 $\lambda_{e, \text{eff}}$ が与えられると、式(3-3)により熱伝導率を推算できる。

### 3-2 分散体部分の空隙率 $P_d$

ベントナイトを圧密するとボイドの体積は減少することが知られている。また圧密状態によって多層体の層間距離も変化すると考えられる。鳥飼<sup>(13)</sup>の研究によれば、ベントナイトを圧密して行くと見かけの空隙率  $n$  が約0.3でベントナイト中に含まれる水はすべて層間水となることが示されている。これより、本モデルでは  $n=0.3$  でボイドは消滅するものとして、この値を  $P_{d\lim}$  と置いた。すなわち、

$$P_{d\lim} = n_{\lim} = 0.3 \quad (3-4)$$

$n < 0.3$  では、分散体の空隙率自体が減少するとして  $P_d = n$  とした。 $n > 0.3$  では、 $n$  が増加するとボイド体積が増大すると共に、多層体のミクロな空隙も増大すると考え、この効果は次式で表されると仮定した。

$$P_d = P_{d\lim} + C(n - P_{d\lim}) \quad (3-5)$$

ここで、 $C$  は推算式が実験データと一致するように定める未定定数である。

### 3-3 分散体部分の熱伝導率 $\lambda_{b, \text{eff}}$

3-3-1 分散物質の熱伝導率 分散物質の熱伝導率の推算式は多数報告されているが、2章で述べたようにFrickeの式<sup>(2)</sup>が任意の分散体形状の高体積率まで実測値とよい一致を示す<sup>(7)</sup>。Frickeのモデルは分散体形状を回転楕円体で近似するモデルであり、回転軸半径  $a$  がそれに直角な半径  $b$  より短い場合の実効熱伝導率は次式で与えられる。

$$\frac{\lambda_{b, \text{eff}}}{\lambda_{b,0}} = \frac{x + \kappa - xP_d(1-\kappa)}{x + \kappa + P_d(1-\kappa)} \quad (3-6)$$

ここで、 $\kappa = \lambda_d / \lambda_{b,0}$  で  $\lambda_{b,0}$  は媒質の熱伝導率、 $\lambda_d$  は分散体自身の熱伝導率である。また、

$$x = \frac{(\kappa-1) - \kappa\beta}{(\kappa-1) - \beta} \quad (3-7)$$

$$\beta = \frac{1}{3} \left\{ \frac{2}{1 + (\kappa-1)M/2} + \frac{1}{1 + (\kappa-1)(1-M)} \right\} (\kappa-1) \quad (3-8)$$

$$M = \left\{ \frac{\theta - (1/2)\sin 2\theta}{\sin^3 \theta} \right\} \cos \theta, \quad \cos \theta = \frac{a}{b} \quad (3-9)$$

で与えられる

3-3-2 分散体部分およびポイド部分の飽和度の見積もり 分散体部分とポイド部分の実効熱伝導率は各々に含まれる水の体積割合によって変化する。実測データでは見かけの空隙率  $n$  と、全空隙に対する水の体積割合（すなわち飽和度  $S_r$ ）が与えられるため、 $n$  と  $S_r$  より分散体部分およびポイド部分の飽和度を求める必要がある。水は、最初に分散体部分に入り、次いでポイドに入ると考えた。ポイドを含めた全体積を  $V$ 、空隙を含めたベントナイトの体積を  $V_d$ 、ポイドの体積を  $V_e$ 、水の体積を  $V_w$  とすると、 $V$ 、 $V_d$ 、 $V_e$  間には式(3-1)、(3-2)の関係がある。したがって、分散部分に水が充満したとき（すなわち  $V_w = V_b P_d$ ）の飽和度を  $S_{r1}$  とすると  $S_{r1}$  は次式で与えられる。

$$S_{r1} = \frac{V_b P_d}{V_b P_d + V_e} = \frac{P_d(1-n)}{n(1-P_d)} \quad (3-10)$$

したがって、分散体部分の飽和度を  $S_{rb}$  とすると、 $0 < S_r \leq S_{r1}$  のとき  $S_{rb}$  は次式で与えられる。

$$S_{rb} = \frac{V_w}{V_b P_d} = \frac{S_r}{S_{r1}} \quad (3-11)$$

また、 $S_{r1} < S_r \leq 1.0$  のとき、水はポイドに入ることになる。ポイド内の水の体積は  $V_w - V_b P_d$  であり、以下の関係が成り立つ。

$$S_r = S_{r1} + \frac{V_w - V_b P_d}{V_b P_d + V_e} \quad (3-12)$$

$$\text{より、 } V_w - V_b P_d = (S_r - S_{r1})(V_b P_d + V_e) \quad (3-13)$$

したがって、ポイド部分の飽和度を  $S_{re}$  とすると、 $S_{re}$  は次式で与えられる。

$$S_{re} = (S_r - S_{r1}) \left[ 1 + \frac{V_b P_d}{V_e} \right] = (S_r - S_{r1}) \left[ 1 + \frac{\frac{P_d(1-n)}{n(1-P_d)}}{\frac{1-P_d}{n-P_d}} \right] = (S_r - S_{r1}) \frac{n(1-P_d)}{n-P_d} \quad (3-14)$$

3-3-3 分散体部分の分散体自身の熱伝導率  $\lambda_d$



分散体自身の熱伝導率は、空気の熱伝導率を  $\lambda_a$ 、水の熱伝導率を  $\lambda_w$  とすると、

$$S_r=0: \lambda_d=\lambda_a \quad (3-15)$$

$$S_{r1} \leq S_r: \lambda_d=\lambda_w \quad (3-16)$$

また、 $0 < S_r < S_{r1}$  (または  $0 < S_{rb} < 1.0$ ) では以下のように熱伝導率を求めた。図3-3-1に示すように分散体の形状を直方体に近似し、水は周辺部から充満されると仮定した。直方体の高さを  $a$ 、幅を  $b$  とすると図3-3-2のように2つの部分に分割できる。各々の熱伝導率を  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  とすると、

$$\lambda_1=\lambda_w, \quad \lambda_2=\frac{a-H}{a\lambda_w} + \frac{H}{a\lambda_a} = \frac{\lambda_w(a-H)+\lambda_w H}{a\lambda_w\lambda_a} \quad (3-17)$$

したがって、分散体自身の熱伝導率は、

$$\lambda_d = \frac{b-L}{b}\lambda_1 + \frac{L}{b}\lambda_2 = \lambda_w + \frac{L}{b} \left[ \frac{\lambda_w\lambda_a}{H(\lambda_w-\lambda_a)/a+\lambda_a} - \lambda_w \right] \quad (3-18)$$

となる。また、分散体内の水の体積は  $V_w = ab - LH$  より、飽和度  $S_{rb} = 1 - (LH/ab)$  となる。したがって  $L/b = H/a$  より  $S_{rb} = 1 - (L/b)^{1/2}$  であるから、 $0 < S_{rb} < 1.0$  の場合の分散体自身の熱伝導率は最終的に次式となる。

$$\lambda_d = \lambda_w + \sqrt{1-S_{rb}} \left[ \frac{\lambda_w\lambda_a}{\sqrt{1-S_{rb}}(\lambda_w-\lambda_a)+\lambda_a} - \lambda_w \right] \quad (3-19)$$

#### 3-4 ボイド部分の熱伝導率 $\lambda_{e, eff}$

ボイド内では、空隙と水の部分は図3-4のように熱流に対し並列に並んでいるものと仮定した。ボイド中の空気と水の体積を各々  $V_{ea}$ 、 $V_{ew}$  とすると、ボイドの熱伝導率は次式で与えられる。

$$S_r \leq S_{r1}: \lambda_{e, eff} = \lambda_a \quad (3-20)$$

$$S_{r1} \leq S_r: \lambda_{e, eff} = \frac{V_{ew}}{V_e}\lambda_w + \frac{V_{ea}}{V_e}\lambda_a \quad (3-21)$$

また、上式中の体積率は次式で与えられる。

$$\frac{V_{ew}}{V_e} = (S_r - S_{r1}) \frac{n(1-P_d)}{n-P_d} \quad (3-22)$$

$$\frac{V_{ea}}{V_e} = 1 - (S_r - S_{r1}) \frac{n(1-P_d)}{n-P_d} \quad (3-23)$$

式(3-21), (3-22), (3-23)より,  $S_r > S_{r1}$ でのボイド部分の実効熱伝導率は次式となる。

$$\lambda_{e,eff} = (S_r - S_{r1}) \frac{n(1-P_d)}{n-P_d} (\lambda_w - \lambda_a) + \lambda_a \quad (3-24)$$

### 3-5 ベントナイトの熱伝導率 $\lambda_{eff}$ の推算式

(3-1)から(3-24)を用いてベントナイトの熱伝導率を推算式を得る。推算に必要な式をまとめると次のようになる。

$$\lambda_{eff} = \frac{1-n}{1-P_d} \lambda_{b,eff} + \frac{n-P_d}{1-P_d} \lambda_{e,eff} \quad (1)$$

$$P_d = n, \quad n \leq P_{d,lim} \quad (2)$$

$$P_d = P_{d,lim} + C(n - P_{d,lim}), \quad P_{d,lim} \leq n \quad (3)$$

$$\lambda_{b,eff} = \frac{x + \kappa - xP_d(1-\kappa)}{x + \kappa + P_d(1-\kappa)} \quad (4)$$

$$\kappa = \frac{\lambda_d}{\lambda_{b,0}} \quad (5)$$

$$x = \frac{(\kappa-1) - \kappa\beta}{(\kappa-1) - \beta} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{1}{3} \left\{ \frac{2}{1 + (\kappa-1)M/2} + \frac{1}{1 + (\kappa-1)(1-M)} \right\} (\kappa-1) \quad (7)$$

$$M = \left\{ \frac{\theta - (1/2)\sin 2\theta}{\sin^3 \theta} \right\} \cos \theta, \quad \cos \theta = \frac{a}{b} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \lambda_d &= \lambda_a, & S_{rb} &= 0 & (9) \\ &= \lambda_s + \sqrt{1 - S_{rb}} \left\{ \frac{\lambda_s \lambda_a}{\sqrt{1 - S_{rb}} (\lambda_s - \lambda_a) + \lambda_a} - \lambda_s \right\}, & 0 \leq S_{rb} \leq 1.0 \\ &= \lambda_s, & S_{rb} &= 1.0 \end{aligned}$$

$$S_{rb} = \frac{S_r}{S_{r1}} \quad (10)$$

$$S_{r1} = \frac{P_d(1-n)}{n(1-P_d)} \quad (11)$$

$$\lambda_{s,eff} = \lambda_a, \quad S_r \leq S_{r1} \quad (12)$$

$$= (S_r - S_{r1}) \frac{n(1-P_d)}{n-P_d} (\lambda_s - \lambda_a) + \lambda_a, \quad S_{r1} \leq S_r \leq 1.0$$

以上の式で、未定定数は  $P_{dlim}$ ,  $C$ ,  $a/b$ ,  $\lambda_{b,0}$  である。 $P_{dlim}$  は 3-2 で述べたように 0.3 と定めた。他の定数は、実験データより  $C=0.6$ ,  $a/b=1/50$ ,  $\lambda_{b,0}=2.0W/mK$  と定めた。また、水と空気の熱伝導率は、各々  $\lambda_w=0.6W/mK$ ,  $\lambda_a=0.025W/mK$  とした。

### 3-6 測定値と推算値の比較

3-6-1 既存の測定値<sup>(14)</sup>、<sup>(15)</sup>、<sup>(16)</sup> 推算値との比較に用いた実験データを表3-1に示す。いずれも熱伝導率の測定にはベントナイトブロック内に挿入した細線プローブによる非定常細線加熱法を用いている。PNCのデータは常温から80℃程度まで温度を変化させて測定しているが、常温のデータを用いた（ただし、PNCの結果によれば熱伝導率の温度依存性は非常に小さい）。なお、ベントナイトの真密度を2.7g/cm<sup>3</sup>とした。

3-6-2 既存の推算式 SKB Technical Reportでは既存の3種類の推算式と実験値を比較している。本報告では、これら3種類の推算式と測定値の比較も行った。各推算式を列挙すれば以下の通りである。

#### (1) Kahrら<sup>(17)</sup>による推算式

実験データに基づいて作成された経験式であり次式で表される。

$$\lambda_{eff} = -0.56 + 0.6\rho_s + 0.4\rho_s^2 \frac{w}{w+1} \quad (3-25)$$

ここで  $\rho_m$ ,  $w$  はベントナイトの平均密度と含水比であり、次式のように書き換えることができる。

$$\rho_s = (1-n)\rho_s + n\rho_w S_r, \quad w = \frac{\rho_w}{\rho_s} - 1 \quad (3-26)$$

(2) Beziatら<sup>(16)</sup>による推算式

Woodsideらによる多孔質の熱伝導推算式を応用したものであり次式で与えられる。

$$\lambda_{eff} = \lambda_s^{1/n} \lambda_w^{n \times S_r} \lambda_a^{n(1-S_r)} \quad (3-27)$$

$\lambda_s$  は固体部分の熱伝導率であり、実験データと推算式の比較より  $\lambda_s = 2.6 \text{ W/m}^2$  と与えている。

(3) Knutsson<sup>(16)</sup>による推算式

Johansenらによる土壌に対して提案された式をベントナイトに応用したもので、次式で与えられる。

$$\lambda_{eff} = \lambda_0 + K_e(\lambda_1 - \lambda_0) \quad (3-28)$$

ここで  $\lambda_0$ ,  $\lambda_1$  は、それぞれ  $S_r = 0$ ,  $S_r = 1.0$  のときの熱伝導率、 $K_e$  は  $S_r$  の影響を表す関数であり次の各式で与えられる。

$$\lambda_0 = 0.034n^{-2.1} \quad (3-29)$$

$$\lambda_1 = 0.56^n \cdot 2^{(1-n)} \quad (3-30)$$

$$K_e = 1 + \log_{10} S_r \quad (3-31)$$

3-6-3 測定値と推算値の比較 図3-5に、本推算式と表3-1の全実験データとの比較を示す。また、図3-6から3-8に既存の各推算式による結果を示す。本推算式による結果は、データは比較的よくまとまっているが熱伝導率の小さな領域で推算値が測定値よりもやや大きくなっている。他の推算式と比較するとKnutssonの推算式による結果とほぼ同程度の精度である。

熱伝導率の飽和度による変化を示すために、データを見かけの空隙率  $n$  の大きさによって4段階に分けて、図3-9に示す。図にはKnutssonの推算式の結果も示した。図より飽和度の大きな領域では本推算式がデータと良く一致しており、飽和度の小さな領域では

Knutssonらの推算式がデータと比較的よく一致している。ただし、Knutssonらの推算式は土壌に対する実験式の改良であるため、物理モデルに基づいて式を修正することはできない。本推算式のモデルは明快であり、飽和度の全領域にわたってデータと一致するように物理モデルを改良することが可能である。

## 4. 新しい熱伝導率測定法

### 4-1 はじめに

ベントナイトなどの熱伝導率の測定には、線状の加熱体（プローブ）が利用される。このプローブに熱電対を埋め込んで加熱体をステップ状に発熱させ、プローブの温度の時間変化から熱伝導率を求める方法が広く利用されている。プローブの太さや熱容量を無視できるとすれば、プローブの温度は次式で表わされる。

$$T = (-q / 4\pi\lambda) E_i(-r^2 / 4\kappa t) \quad (4-1)$$

ここで、 $E_i(-x) = \int_x^\infty (1/z) e^{-z} dz$  である。ステップ加熱から十分時間が経過後からの異なる時間  $t_1$ 、 $t_2$  における温度を  $T_1$ 、 $T_2$  とすれば、次式が成立する。

$$T_2 - T_1 = (Q / 4\pi\lambda) \ln t_2 / t_1 \quad (4-2)$$

時刻  $t_1$ 、 $t_2$  と温度  $T_1$ 、 $T_2$  を測定すれば、式(4-2)より熱伝導率  $\lambda$  を決定できる。

この測定法はベントナイトのような水分含有率や荷重を変えて測定する場合に、次のような点が問題となる。

- (1) 大きな試料を必要とするため、水分含有率を変化させるのに長時間を要する。
- (2) 試料に深い孔を設けてプローブを挿入するため、試料とプローブの間に熱抵抗を生じる。
- (3) 熱電対を挿入するためプローブが太くなり、線熱源と見なすには長時間を要する。
- (4) 熱電対の起電力とノイズの比を小さくするため、 $10^\circ\text{C}$  程度の温度上昇を必要とする。
- (5) 測定時間が長いことや温度上昇が大きいことから、測定中に水分移動の可能性があり、測定精度に影響する。

このような問題点を克服する方法として、点熱源法を提案し、その原理および技術的な可能性を検討した。

### 4-2 測定原理

図4-1 に示すように、無限媒質中に点熱源があつて、時刻  $t = 0$  においてステップ状に発熱し、十分時間が経ったときの温度は次式で与えられる。

$$T = Q / (4\pi\lambda a) \quad (4-3)$$

ここで、 $a$  は点熱源の半径で、十分小さく点熱源の温度は一様とする。式(4-3) から容

易に分かるように、点熱源の温度は十分時間が経つと一定となり、この一定温度を測定することにより、式(4-3)より熱伝導率を求めることができる。しかし、実際には点熱源を加熱するにはリード線が必要であり、リード線がついた場合の解析解は得られない。また、式(4-3)を利用するには、測定時間が長くなる。このため、点熱源には測定方法としての利点があるにもかかわらず今まで実用化されなかった。しかし、現在は複雑な構造についても、伝熱モデルを構成して数値解析が可能である。熱物性値測定分野でも、精密な伝熱モデルを構成できれば、数値計算によって温度を決定し、測定値と比較することで伝熱体系としては複雑で解析解が求められない場合でも、熱伝導率や温度拡散率を決定できる。点熱源では導線があったり、絶縁皮膜や補強のための材料が点熱源近傍にあっても伝熱モデルを精密に構成することで、従来は欠点とされていた点を克服して、測定法として実用的価値のある方法を確立することはできると考える。ここでは、サーミスタを発熱源とする点熱測定法について検討した。

#### 4-3 測定装置

点熱源法は、4-1 で述べた線状プローブ法の持つ欠点を克服する方法でなければならない。このため次のような条件が課せられる。

- (1) 試料の水分含有率を1ヶ月程度で変えるには、試料の直径を20mm以内とする。
- (2) プローブを試料に埋め込んだ状態で水分含有率や荷重を変化させるため、変形して壊れる材料は使用できない。
- (3) サーミスタの寸法が温度に強く影響するので、正確に決定するか、その影響を緩和する較正法を考案する必要がある。
- (4) 温度上昇を少なく、水分の拡散を防ぐために短時間での測定が求められる。このような点を克服できれば、点熱源法をベントナイトばかりでなく、液体などの熱伝導率の測定も、短時間対流を抑制することにより可能となる。

#### 4-4 測定

図4-2に測定回路を示す。このような直列回路では、サーミスタと可変抵抗の値をほぼ同じとすれば、サーミスタの温度による電気抵抗の変化が極端に大きくなる限り、発熱はほぼ一定となる。サーミスタは外径約0.5mmの市販のものを使い、これに

直径0.1mm で長さ約2 mmの白金線をリード線とし線として接続している。白金線部分の強度を保つため、サーミスタ球と銅線までをガラス被覆により固定している。

図4-3 にプローブを示す。図4-4 に実験温度測定系を示す。電源スイッチを入れると同時に温度、可変抵抗の両端の電圧をデータロガーに記録した。測定のための試料として、水に僅かのゼラチンを溶かした溶液を用いた。この溶液の熱伝導率や比熱は水と同じとしてよい。図4-5 と6 にサーミスタの発熱量と温度の測定値を示す。

#### 4-5 数値計算結果と測定値の比較

図4-3 のプローブを図4-7 に示すようにモデル化して、差分法により数値計算した。水に僅かのゼラチンを溶解したゲルの熱伝導率は水と同じ熱伝導率としてよいので、計算は水の熱物性値を用いた。図4-5 に温度の測定値と計算結果の比較を示す。計算値と測定値には若干の差はあるものの、比較的良く一致している。この温度測定値から熱伝導率を求めるには、幾つかの時刻での計算による温度が測定値に合うように計算に用いる熱物性値を求める方法に基づく。したがって、図4-5 の測定値と計算値が良く一致することが精度の善し悪しに関係する。

また、白金線の長さや太さ、ガラス被覆の厚さや大きさ、サーミスタの寸法や形状の温度への影響を確かめ、次の結論を得た。

- (1) 白金線の長さは、2 mm以上、直径が0.1 mm以下であれば、白金線の熱伝導による温度への影響は十分小さい。
- (2) ガラス被膜は一定の強度を持たせる程度に厚い場合には温度への影響が大きく、その形状や厚さを正確に評価しなければならない。
- (3) サーミスタの直径や形状は温度への影響が大きく、正確に決定してモデル化する必要がある。

以上の結果から、補強材としてガラスを使用しないこと、サーミスタの直径や形状を正確に決定することが困難なことから、最終的には熱伝導率既知の2種類の物質について、温度が良く一致するように数値計算モデルの改良を行う方法が検討されるべきと考えている。

#### 4.6 まとめ

新しく提案する点熱源法について、技術的可能性について検討した。測定例が十分で



ないことと、簡単な装置で測定法として実用上の精度で測定が可能か否かの検討であり、十分根拠のある結論は得られなかったが、出来合のサーミスタを用いて、これの熱伝導モデルを作成し加熱後の温度の数値計算を行い、測定値結果と比較して良く一致する結果を得た。今後の課題は次の通りである。

- (1) 既存のサーミスタプローブで問題となったガラス皮膜の無いプローブを作成し、測定を行う。
- (2) 数値計算モデルを改良し、試料の熱伝導率を導出する最適な計算手法を確立する。
- (3) 実際にベントナイトの試料に埋め込んで、水分や荷重を変化させて測定可能か否かを確かめる。

## 5. 結語

ベントナイトの熱伝導率の推算式を求めることを目的に、分散物質の熱伝導率の推算式や測定値を整理し、ベントナイトの層間の隙間を薄い直方体に近似する場合に応用した。ベントナイトの粒子は層状構造であり、乾いたベントナイトでは、層の隙間に気体分子が入り込んでいる。この場合、気体分子の平均自由行程に比べて、層間の間隔が十分小さく、層をよぎる方向への熱伝導は非常に小さいと考えられる。したがって、ベントナイトの粒子を取り出せば、層方向に大きい熱伝導率を持ち、それに垂直な方向では小さな熱伝導率となる。このような粒子がランダムに充填されているのが乾燥状態のベントナイトの幾何学的構造と考えられる。このベントナイトの粒子に水分が吸収される場合には、層間に入る水の分子は、最初は分子で1層、含水率が大きくなるにつれて、2分子層、3分子層となり、それとともに膨潤する。したがって、このようなベントナイトの構造を考慮して伝熱モデルを構成し、測定値を比較的良く整理できる推算式を得た。

球状サーミスタを点熱源および温度センサーとする新しい熱伝導率測定法は、従来研究されていないが、この理由は、従来は測定法として解析的に解ける場合を対象として熱物性値を決めるのが長い間の習慣であり、熱伝導モデルに基づいて数値計算により熱物性値を決める方法は最近一部に行われている程度である。

点熱源法は原理的に優れていることは、古くから理解されていたが、点熱源では電力供給のためのリード線の影響を考えると、解析的に熱伝導問題を解くのは難しく、いまま

で測定法として実用化されなかったと考えられる。本研究では、技術的に可能か否かについて、市販のサーミスタをモデル化してこれを数値計算により解いて、測定結果と比較し、よく一致する結果を得た。技術的には、電源である電池のスイッチを入れてからの電流が一定になるまでの時間遅れや、サーミスタの抵抗変化によって、サーミスタの出力一定の条件は厳密には満たされないが、この出力の変化とサーミスタの抵抗変化を入力として数値計算に考慮すれば、原理的には熱伝導率を決定する場合の誤差要因とはならないのが、数値計算を利用する大きな利点の一つである。さらに詳細に検討を必要とする点もあるが、これらの問題点を克服して十分実用的な測定法として確立することができると考えている。

## 6. 主な記号

- $a$  : 回転楕円体の回転軸半径、または点熱源半径
- $b$  : 回転楕円体の回転軸と直行する半径
- $n$  : ベントナイトの見かけの空隙率
- $P_d$  : 分散物質では分散体積率、ベントナイトでは分散体部分の空隙率
- $Q$  : 点熱源発熱量
- $S_r$  : 飽和度
- $S_{r1}$  : 分散体部分に水が充満したときのベントナイトの飽和度
- $S_{rb}$  : 分散体部分の飽和度
- $S_{re}$  : ボイド部分の飽和度
- $T$  : 温度
- $V$  : 体積
- $\lambda$  : 熱伝導率
- $\lambda_a$  : 空気の熱伝導率
- $\lambda_{b, eff}$  : 分散体部分の実効熱伝導率
- $\lambda_{b, 0}$  : 分散体部分の媒質の熱伝導率
- $\lambda_c$  : 連続媒質の熱伝導率
- $\lambda_d$  : 分散体部分の分散体自身の熱伝導率
- $\lambda_e$  : 分散物質の実効熱伝導率
- $\lambda_{eff}$  : ベントナイトの熱伝導率
- $\lambda_{e, eff}$  : ボイド部分の実効熱伝導率
- $\lambda_t$  : 分散物質の熱伝導率の推算値
- $\lambda_w$  : 水の熱伝導率

## 7. 文献

- (1) Maxwell, J. C., A Treatise on Electricity and Magnetism, (1946), Oxford Univ. Press, 435.
- (2) Fricke, H., Phys. Rev., 24(1924), 575.
- (3) Hamilton, R. L., and Gossen, O. K. J., I&EC Fundamentals, 1-3(1962), 187.
- (4) Johnson, F. A., A. E. R. E., R/R-2578, (1958), Harwell.
- (5) Cheng, S. C. and Vachon, R. I., Int. J. Heat mass Trans., 12(1969), 249.
- (6) Bruggeman, D. A. G., Annalen der physik, 24-5(1935).
- (7) 熊田、機論, 41-344(1975), 1209.
- (8) Onn, C. and Dallavalle, J. M., Chem. Engng. Progr. Symp., Ser. 9, 50-29(1954).
- (9) Sugawara, A., 応用物理, 30-1(1961), 17.
- (10) Stewart, G. N., J. physiol., 24(1899), 356.
- (11) Oker-Blom, M., Ark. Ges. Physiol., 79(1900), 510.
- (12) Giuliano, D. A. and Frederik, F. L., Int. Heat Transf. Conf., (1970), Cu3. 2.
- (13) 鳥飼、学位論文(北海道大学)、1996.
- (14) PNC TN1410 92-052, 1992.
- (15) SKB TR94-29, 1994.
- (16) Beziat, A., Dardaine, M. and Gabis, V., Clay and Clay minerals, 36-5(1988), 462.
- (17) Kahr, G. and Muller-von Moos, M., NAGRA Technischer Bericht, 82-06(1982).
- (18) Knutsson, S., SKB TR83-72, (1983).

8. 表一覧	2 2
表2-1 分散物質の推算式	2 3
表2-2 分散体および熱伝導率測定結果 (文献7)	2 4
表2-3 球状の分散体	2 5
表2-4 球以外の分散体	2 6
表3-1-1 PNCNによるデータ	2 7
表3-1-2 SKBによるデータ	
表3-1-3(1) Beziatによるデータ	2 8
表3-1-3(2) Beziatによるデータ	
表3-1-3(3) Beziatによるデータ	

表2-1 分散物質の推算式

提 案 者	適用対象	推 算 式
(1) Rayleigh-Maxwell <sup>(1)</sup>	球, 低分散 体積率	$\frac{\lambda_i}{\lambda_c} = \frac{2+\kappa-2P_d(1-\kappa)}{2+\kappa+P_d(1-\kappa)}$
(2) Bruggeman <sup>(2)</sup>	球, 高体積 率まで可	$\frac{\lambda_i}{\lambda_c} = \frac{\kappa - (\lambda_i/\lambda_c)}{\kappa - 1} \sqrt[3]{\frac{1}{\kappa}}$
(3) Hamilton ら <sup>(3)</sup>	任意形状	$\frac{\lambda_i}{\lambda_c} = \frac{(n-1)+\kappa-(n-1)P_d(1-\kappa)}{(n-1)+\kappa+P_d(1-\kappa)}, \quad \frac{\lambda_d}{\lambda_c} \geq 100, \quad \frac{\lambda_d}{\lambda_c} \leq 100 \text{ では形}$ <p>状効果がたさいとして球の場合の <math>n=3</math></p> $n = \frac{3.0}{\phi}, \quad \phi = \frac{\text{同体積の球の表面積}}{\text{分散体の表面積}}$
(4) Fricke <sup>(2)</sup>	回転だ円体	$\frac{\lambda_i}{\lambda_c} = \frac{x+\kappa-xP_d(1-\kappa)}{x+\kappa+P_d(1-\kappa)} \quad \text{ただし, } x = -\frac{(\kappa-1)-\kappa\beta}{(\kappa-1)-\beta},$ $\beta = \frac{1}{3} \left[ \frac{2}{1+(\kappa-1)M/2} + \frac{1}{1+(\kappa-1)(1-M)} \right] (\kappa-1)$ $a < b \quad M = \left[ \frac{\theta - (1/2) \sin 2\theta}{\sin^3 \theta} \right] \cos \theta, \quad \cos \theta = \frac{a}{b}$ $a > b \quad M = \frac{1}{\sin^2 \theta'} - \frac{1}{2} \frac{\cos^2 \theta'}{\sin^3 \theta'} \log \left( \frac{1 + \sin \theta'}{1 - \sin \theta'} \right), \quad \cos \theta' = \frac{b}{a}$
(5) Cheng ら <sup>(3)</sup>	任意形状 $P_d < 0.66$	$\frac{\lambda_i}{\lambda_c} = 1 / \left[ \frac{2}{\sqrt{AD}} \tan^{-1} \frac{B}{2} \sqrt{\frac{A}{D}} + 1 - B \right], \quad (\kappa < 1)$ $\frac{\lambda_i}{\lambda_c} = 1 / \left[ \ln \left( \frac{\sqrt{D} + (B/2)\sqrt{-A}}{\sqrt{D} - (B/2)\sqrt{-A}} \right) + 1 - B \right], \quad (\kappa > 1)$ <p>ただし, <math>A = C(\kappa-1)</math>, <math>B = \sqrt{3P_d/2}</math>, <math>C = -4\sqrt{2/(3P_d)}</math>,  <math>D = 1 + B(\kappa-1)</math></p>
(6) Johnson <sup>(4)</sup>	任意形状, 高分散体積 率まで可	$\left( \frac{\lambda_i}{\lambda_c} \right)^{1/(\kappa+1)} (1-P_d) = \frac{\kappa - (\lambda_i/\lambda_c)}{\kappa - 1}$

表 2-2 分散体および熱伝導率測定結果(文献 7)

分散体 kcal/mh°C	形状・寸法 mm	$\lambda_d / \lambda_c(a/b)\psi$	$P_d$	$\lambda_d / \lambda_c$	$\lambda_c / \lambda_c$	偏差 %
銅 332.0	円柱 0.175φ x 1.0	645.000 4.660 0.673	0.05 0.10 0.20 0.30 0.40	1.37 1.81 2.90 4.84 7.39	1.36 1.79 2.95 4.61 7.32	Fr = 11.4 Ha = 28.0 Jo = 108.0 Ch = 22.8
銅 332.0	円柱 0.175φ x 2.0	645.000 9.320 0.561	0.05 0.10 0.20 0.30 0.40	1.43 2.20 3.65 5.97 9.28	1.46 2.11 3.45 6.08 9.11	Fr = 25.2 Ha = 33.7 Jo = 353.5 Ch = 34.4
ヒューズ 40.9	円板 0.13φ x 1.0	80.000 0.556 0.874	0.08 0.22 0.36 0.42 0.50	1.29 1.92 3.06 3.90 5.06	1.30 2.00 3.01 3.86 4.98	Fr = 9.3 Ha = 8.4 Jo = 43.7 Ch = 12.2 Br = 12.1 Ma = 12.8
ビューズ 40.9	0.13φ x 1.0 (1.46 x 1.2 x 0.88)	80.000 0.546 0.848	0.069 0.138 0.276 0.360 0.413	1.18 1.49 2.51 3.62 4.48	1.20 1.47 2.52 3.60 4.42	Fr = 13.9 Ha = 12.8 Jo = 18.2 Ch = 12.5 Br = 2.5 Ma = 16.3
アルミニウム 231.0	直方体 0.085 x 1.5 x 1.0	445.000 0.089 3.357	0.052 0.103 0.164 0.207 0.413 0.250	1.42 2.09 2.77 3.35 4.40 5.97	1.43 1.93 2.76 3.35 4.25 6.05	Fr = 9.0 Ha = 8.0 Jo = 354.4 Ch = 28.7
海砂 0.0	偏平 0.61 x 0.70	0.000 0.368 -	0.10 0.20 0.30 0.40 0.50	0.853 0.695 0.550 0.390 0.297	0.852 0.697 0.540 0.391 0.291	Fr = 10.8 Jo = 3.3 Ch = 7.1 Br = 9.9 Ma = 16.5
ビニル 0.0	円板 1.13φ x 1.0	0.000 0.532 0.817	0.10 0.20 0.30 0.40 0.50	0.857 0.702 0.550 0.419 0.303	0.859 0.703 0.554 0.413 0.302	Fr = 11.6 Jo = 5.1 Ch = 4.9 Br = 5.7 Ma = 9.0
ビニル 0.0	薄板 0.075 x 0.75 x 1.0	0.000 0.104 0.386	0.047 0.100 0.176 0.226 0.287 0.330	0.875 0.790 0.621 0.546 0.489 0.450	0.898 0.770 0.621 0.569 0.482 0.420	Fr = 4.7 Jo = 16.0 Ch = 19.3

表 2-3 球状分散体

文献	媒質 $\lambda_c$ kcal/mh°C	分散体 $\lambda_d$ , 形状寸法 kcal/mh°C, mm	$\lambda_d / \lambda_c$	$P_d$	$\lambda_e / \lambda_c$	偏差 %
(3)	0.162	球 181.0 1.2φ	1.116	0.155 0.155 0.270 0.270 0.275	1.59 1.54 2.15 2.16 2.18	Br = 13.9 Ma = 3.0
(8)	0.503	球 1.0 -	1.98	0.046 0.192	1.11 1.14	Br = 0.7 Ma = 5.3
(4)	-	球 - 0.02 0.15φ	0.245	0.214 0.315 0.425 0.444	0.796 0.698 0.611 0.595	Br = 0.7 Ma = 2.0
(4)	-	球 - 0 ~0.074φ	~700.0	0.059 0.065 0.097 0.107 0.146 0.152 0.187 0.218 0.243 0.302	1.250 1.210 1.400 1.420 1.690 1.700 2.010 2.130 2.310 2.930	Br = 2.9 Ma = 10.3
(9)	0.342	円柱 0.0207 2.0 x 2.5φ	0.061	0.125 0.260 0.500	0.795 0.614 0.363	Br = 7.5 Ma = 12.9
(10)	-	球状 0 -	0.0	0.100 0.200 0.300 0.400 0.500 0.600	0.840 0.701 0.577 0.464 0.368 0.277	Br = 3.0 Ma = 8.4



表 2-4 球以外の分散体

文献	媒質 kcal/mh°C	分散体 $\lambda_d$ , 形状寸 法 kcal/mh°C, mm	$\lambda_d / \lambda_c(a/b)\psi$	$P_d$	$\lambda_d / \lambda_c$	偏差 %
(11)	-	円盤(犬の赤血球) 0.0	0.0 0.235 4.5	0.114 0.218 0.319 0.410 0.510 0.616	0.812 0.650 0.526 0.426 0.326 0.242	Fr = 0.7 Jo = 15.8 Ch = 10.9
(12)	317.0	円 柱 0.205 0.127φ x 1.574	1.008~1.546 10.9 0.557	0.224 0.228 0.416 0.440	10.92 12.33 10.92 27.40	Fr = 27.9 Ha = 59.5
	181.0	円 柱 0.205 0.127φ x 1.574	575~882 10.9 0.557	0.208 0.240 0.358 0.388	6.30 8.22 9.66 12.88	Jo = 365.7 Ch = 71.2
(3)	0.162	円 柱 80.0 1.0φ x 5.0	1.115 4.08 0.698	0.155	1.87	Fr = 11.4 Ha = 4.2 Jo = 80.5 Ch = 2.5
		円 柱 80.0 0.27φ x 2.7	1.115 8.17 0.529	0.155	2.17	Fr = 54.3 Ha = 6.5 Jo = 318.5 Ch = 2.5
		直方体 80.0 1.6 x 1.6 x 0.4	1.115 0.253 0.639	0.155	1.98	Fr = 4.3 Ha = 6.4 Jo = 15.8 Ch = 3.5
		円 版 0.036 7.2φ x 0.8	0.220 0.162 0.498	0.140 0.250 0.250	0.881 0.798 0.789	Fr = 6.8 Jo = 8.5 Ch = 3.6
		直方体 0.036 0.8 x 0.8	0.220 1.650 0.782	0.250	0.771	Fr = 1.8 Jo = 1.3 Ch = 1.9

表3-1-1 PNCによるデータ

動燃 PNC TN1410 92-052						
クニゲルV1 (Room temperature)						
試験体 番号	$\lambda$ (W/mK)	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	平均密度 (g/cm <sup>3</sup> )	飽和度 Sr(%)	ポイド比 e	Porosity n
1	0.457	1.44	1.548	23.2	0.871	0.466
2	0.474	1.46	1.573	23.9	0.897	0.473
2	0.537	1.46	1.573	23.9	0.897	0.473
3	1.227	1.47	1.861	85.6	0.841	0.457
4	1.16	1.42	1.795	79.1	0.901	0.474
5	1.151	1.7	1.949	67	0.591	0.372
6	1.274	1.72	1.99	74.5	0.568	0.362
7	1.333	1.74	2.013	76.9	0.550	0.355
8	1.268	1.71	2.043	90.8	0.579	0.367
9	1.384	1.71	2.055	92.3	0.597	0.374
11	0.936	1.78	1.89	32.2	0.519	0.342
12	0.922	1.82	1.933	34.6	0.485	0.327
13	1.256	1.77	2.022	74.9	0.507	0.336
14	1.284	20	1.8	2.061	78.4	0.499

表3-1-2 SKBによるデータ

SKB Technical report						
MX-80 Bentnite						
平均密度 (g/cm <sup>3</sup> )	Water ratio(%)	ポイド比 e	飽和度 Sr(%)	$\lambda$ (W/mK)	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	Porosity n
1.9	25.2	0.83	85	1.21	1.518	0.454
1.84	21.9	0.83	73	1.15	1.509	0.454
1.78	18.1	0.85	59	0.93	1.507	0.459
1.72	15.4	0.87	49	0.79	1.490	0.465
1.69	14.3	0.88	45	0.72	1.479	0.468
1.9	24	0.81	82	1.23	1.532	0.448
1.85	20.7	0.82	70	0.9	1.533	0.451
1.78	17.4	0.84	58	0.88	1.516	0.457
1.72	14.5	0.85	47	0.7	1.502	0.459
1.69	13.2	0.86	43	0.61	1.493	0.462
1.97	28.4	0.81	97	1.25	1.534	0.448

表3-1-3 Beziatらによるデータ(1)

Beziat, A. et al.						
Ca-smectite						
乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	Water ratio(%)	$\lambda$ (W/mK)	平均密度 (g/cm <sup>3</sup> )	飽和度 Sr(%)	ポイド比 e	porosity n
1.2	5	0.21	1.26	10.80	1.250	0.556
1.26	5	0.295	1.323	11.81	1.143	0.533
1.38	5	0.33	1.449	14.11	0.957	0.489
1.4	5	0.4	1.47	14.54	0.929	0.481
1.48	5	0.45	1.554	16.38	0.824	0.452
1.52	5	0.57	1.596	17.39	0.776	0.437
1.6	5	0.62	1.68	19.64	0.688	0.407
1.75	5	0.8	1.8375	24.87	0.543	0.352
1.9	5	0.9	1.995	32.06	0.421	0.296
2.1	5	1.11	2.205	47.25	0.286	0.222
1.12	12	0.35	1.2544	22.97	1.411	0.585
1.2	12	0.42	1.344	25.92	1.250	0.556
1.23	12	0.48	1.3776	27.11	1.195	0.544
1.3	12	0.485	1.456	30.09	1.077	0.519
1.32	12	0.52	1.4784	30.99	1.045	0.511
1.35	12	0.535	1.512	32.40	1.000	0.500
1.39	12	0.58	1.5568	34.38	0.942	0.485
1.41	12	0.6	1.5792	35.41	0.915	0.478
1.45	12	0.62	1.624	37.58	0.862	0.463
1.495	12	0.68	1.6744	40.20	0.806	0.446
1.5	12	0.7	1.68	40.50	0.800	0.444
1.59	12	0.78	1.7808	46.41	0.698	0.411
1.6	12	0.8	1.792	47.13	0.688	0.407
1.65	12	0.83	1.848	50.91	0.636	0.389
1.68	12	0.89	1.8816	53.36	0.607	0.378
1.73	12	1	1.9376	57.79	0.561	0.359
1.81	12	1.05	2.0272	65.89	0.492	0.330
1.81	12	1.1	2.0272	65.89	0.492	0.330
1.9	12	1.105	2.128	76.95	0.421	0.296
1.9	12	1.21	2.128	76.95	0.421	0.296
1.96	12	1.3	2.1952	85.82	0.378	0.274
1.99	12	1.295	2.2288	90.81	0.357	0.263
1.42	15	0.75	1.633	44.93	0.901	0.474
1.61	15	0.99	1.8515	59.82	0.677	0.404
1.74	15	1.1	2.001	73.41	0.552	0.356
1.8	15	1.2	2.07	81.00	0.500	0.333
1.86	15	1.29	2.139	89.68	0.452	0.311
1.9	15	1.4	2.185	96.19	0.421	0.296
0.9	18	0.28	1.062	24.30	2.000	0.667
0.93	18	0.34	1.0974	25.54	1.903	0.656
1.03	18	0.4	1.2154	29.97	1.621	0.619
1.13	18	0.525	1.3334	34.98	1.389	0.581
1.2	18	0.63	1.416	38.88	1.250	0.556
1.27	18	0.71	1.4986	43.16	1.126	0.530
1.33	18	0.76	1.5694	47.18	1.030	0.507
1.39	18	0.88	1.6402	51.57	0.942	0.485
1.42	18	0.965	1.6756	53.92	0.901	0.474
1.52	18	1.08	1.7936	62.60	0.776	0.437
1.6	18	1.22	1.888	70.69	0.688	0.407
1.76	18	1.3	2.0768	91.00	0.534	0.348
1.81	18	1.405	2.1358	98.84	0.492	0.330

表3-1-3 Beziatらによるデータ(2)

Beziat, A. et al.						
Na-smectite						
乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	Water ratio(%)	$\lambda$ (W/mK)	平均密度 (g/cm <sup>3</sup> )	飽和度 Sr(%)	ポイド比 e	porosity n
1.64	6	0.6	1.7384	25.06	0.646	0.393
1.775	6	0.73	1.8815	31.09	0.521	0.343
1.96	6	0.89	2.0776	42.91	0.378	0.274
1.46	8	0.45	1.5768	25.43	0.849	0.459
1.545	8	0.6	1.6686	28.89	0.748	0.428
1.66	8	0.71	1.7928	34.48	0.627	0.385
1.78	8	0.81	1.9224	41.79	0.517	0.341
1.885	8	0.98	2.0958	49.96	0.432	0.302
1.36	12	0.45	1.5232	32.88	0.985	0.496
1.43	12	0.595	1.6016	36.48	0.888	0.470
1.55	12	0.7	1.736	43.67	0.742	0.426
1.66	12	0.83	1.8592	51.72	0.627	0.385
1.765	12	0.95	1.9768	61.16	0.530	0.346
1.865	12	1.11	2.0888	72.37	0.448	0.309
1.34	17	0.785	1.5678	45.23	1.015	0.504
1.5	17	0.8	1.755	57.38	0.800	0.444
1.58	17	0.9	1.8486	64.75	0.709	0.415
1.62	17	0.99	1.8954	68.85	0.667	0.400
1.7	17	1.09	1.989	78.03	0.588	0.370
1.735	17	1.11	2.02995	82.52	0.556	0.357

表3-1-3 Beziatらによるデータ(3)

Beziat, A. et al.						
Palygorskite						
乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	Water ratio(%)	$\lambda$ (W/mK)	平均密度 (g/cm <sup>3</sup> )	飽和度 Sr(%)	ポイド比 e	porosity n
1.35	6	0.3	1.431	16.20	1.000	0.500
1.405	6	0.31	1.4893	17.58	0.922	0.480
1.485	6	0.38	1.5741	19.80	0.818	0.450
1.55	6	0.43	1.643	21.83	0.742	0.426
1.675	6	0.515	1.7755	26.47	0.612	0.380
1.395	8	0.335	1.5066	23.09	0.935	0.483
1.42	8	0.395	1.5336	23.96	0.901	0.474
1.5	8	0.455	1.62	27.00	0.800	0.444
1.56	8	0.505	1.6848	29.56	0.731	0.422
1.68	8	0.6	1.8144	35.58	0.607	0.378
0.395	12	0.45	0.4424	5.55	5.835	0.854
1.43	12	0.52	1.6016	36.48	0.888	0.470
1.5	12	0.6	1.68	40.50	0.800	0.444
1.6	12	0.7	1.792	47.13	0.688	0.407

表3-1-3 Beziatらによるデータ(4)

Beziat, A. et al.						
Illite						
乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	Water ratio(%)	$\lambda$ (W/mK)	平均密度 (g/cm <sup>3</sup> )	飽和度 Sr(%)	ポイド比 e	porosity n
1.115	8	0.295	1.2042	15.19	1.422	0.587
1.18	8	0.32	1.2744	16.77	1.288	0.563
1.22	8	0.36	1.3176	17.81	1.213	0.548
1.31	8	0.395	1.4148	20.36	1.061	0.515
1.42	8	0.475	1.5336	23.96	0.901	0.474
1.575	8	0.595	1.701	30.24	0.714	0.417
1.11	8.5	0.3	1.20435	16.02	1.432	0.589
1.175	8.5	0.33	1.274875	17.68	1.298	0.565
1.23	8.5	0.375	1.33455	19.20	1.195	0.544
1.32	8.5	0.43	1.4322	21.95	1.045	0.511
1.43	8.5	0.51	1.55155	25.84	0.888	0.470
1.23	12	0.415	1.3776	27.11	1.195	0.544
1.33	12	0.5	1.4896	31.45	1.030	0.507
1.44	12	0.6	1.6128	37.03	0.875	0.467
1.54	12	0.68	1.7248	43.01	0.753	0.430
1.15	25	0.585	1.4375	50.08	1.348	0.574
1.2	25	0.665	1.5	54.00	1.250	0.556
1.3	25	0.75	1.625	62.68	1.077	0.519
1.36	25	0.815	1.7	68.51	0.985	0.496
1.43	25	0.9	1.7875	76.00	0.888	0.470

9. 図一覧	31
図2-1 球状分散体	32
図2-2 分散体形状と回転楕円体	33
図2-3 球以外の分散体	34
図3-1 ベントナイトの構造モデル	35
図3-2 ベントナイトの熱伝導率推算用モデル	35
図3-3-1 分散体のモデル	36
図3-3-2 分散体の熱伝導率推算用モデル	36
図3-4 ボイド部分の熱伝導率推算用モデル b	37
図3-5 本推算式と実験値の比較	38
図3-6 Kahrらの推算式と実験値の比較	38
図3-7 Beziatらの推算式と実験値の比較	39
図3-8 Knutssonの推算式と実験値の比較	39
図3-9 熱伝導率の飽和度による変化 $\gamma/\epsilon$	40
図4-1 無限媒質中の点熱源	41
図4-2 測定回路	41
図4-3 プローブ部の詳細	42
図4-4 測定装置	42
図4-5 実験値と計算値の比較	43
図4-6 サーミスタの発熱率	44
図4-7 プローブ部とその近傍のモデル化	45

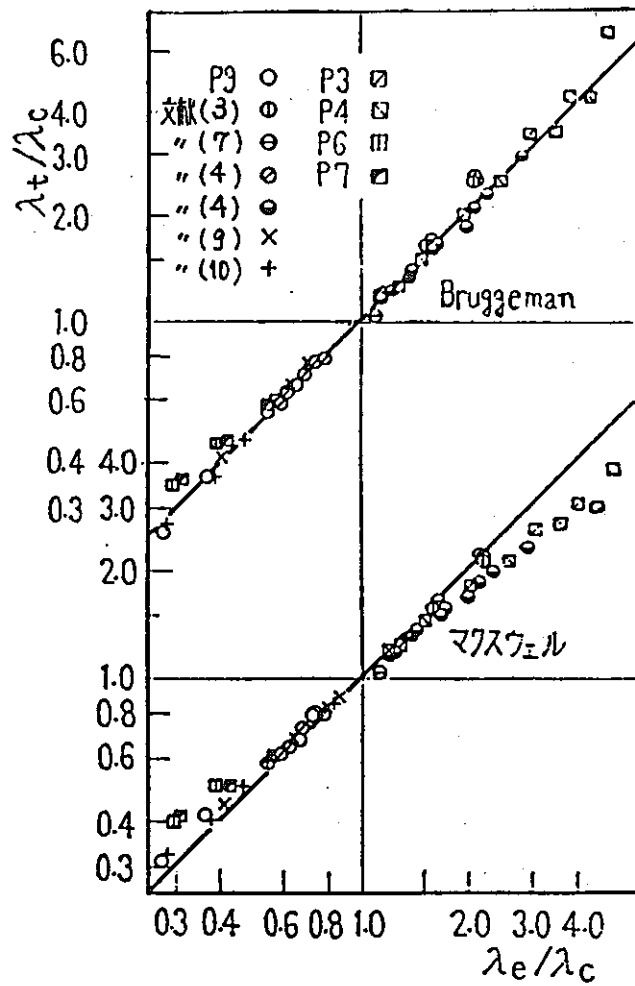


図2-1 球状分散体

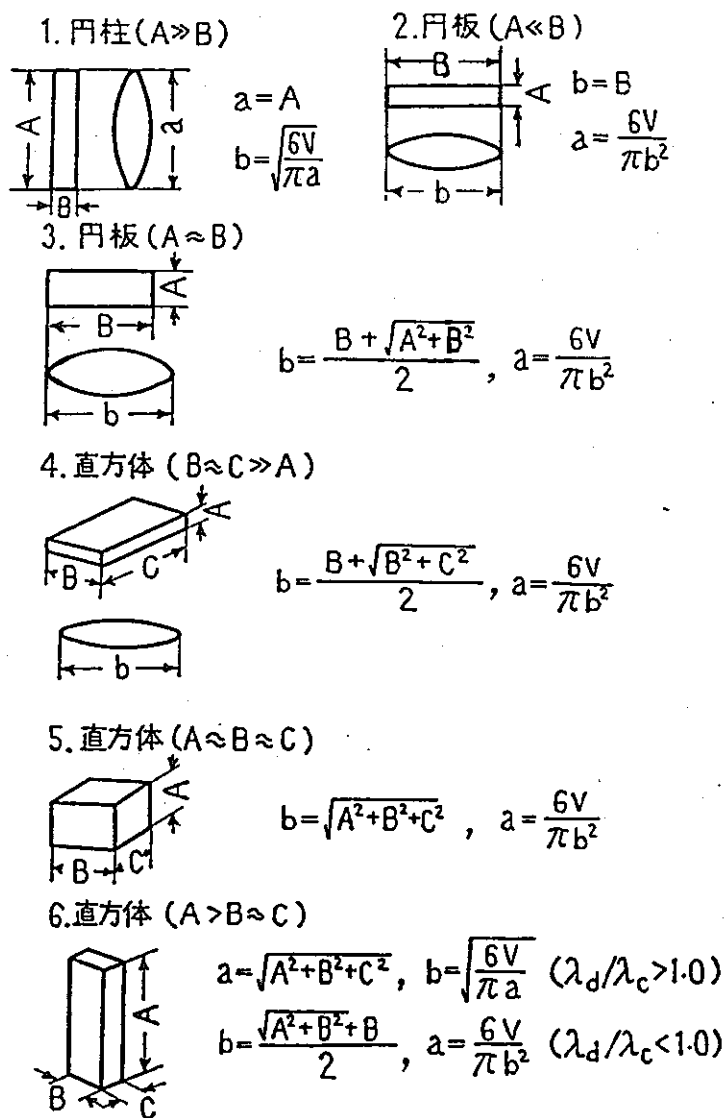


図2-2 分散体形状と回転楕円体



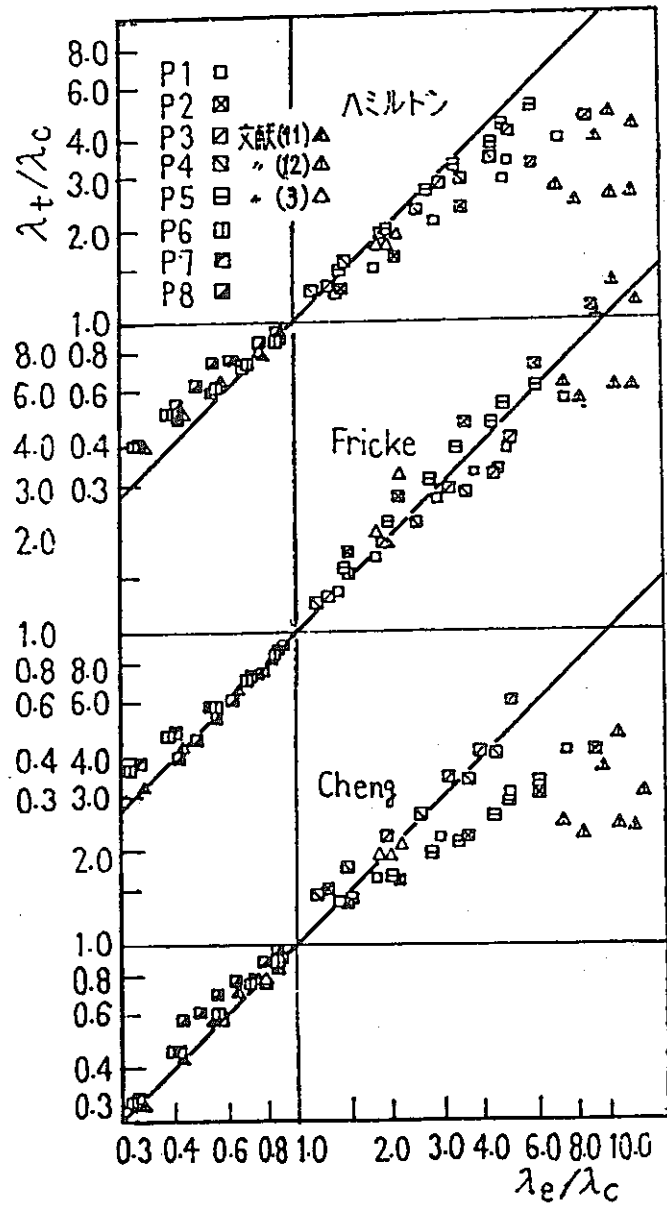


図2-3 球以外の分散体

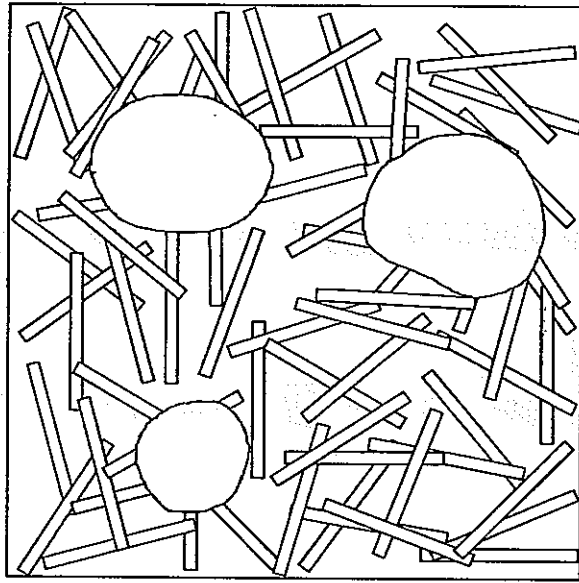


図3-1 ベントナイトの構造モデル

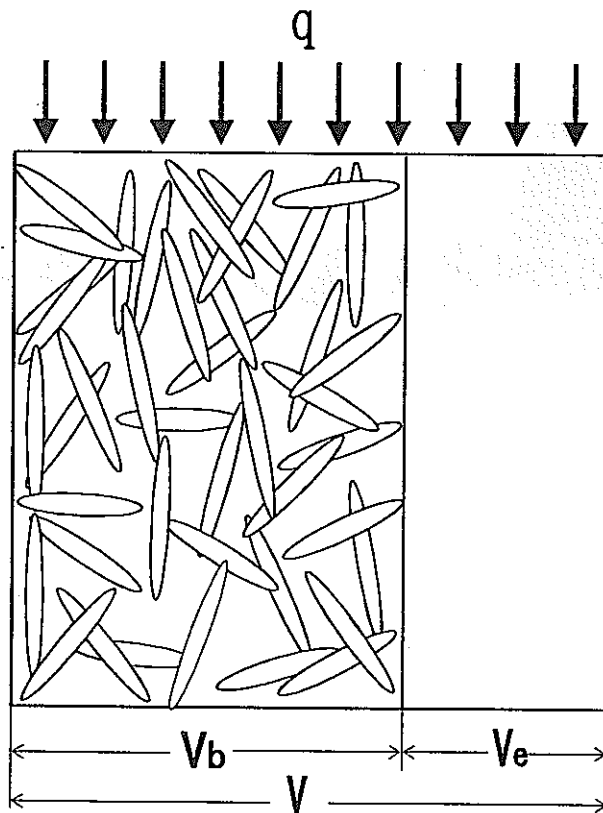


図3-2 ベントナイトの熱伝導率推算用モデル

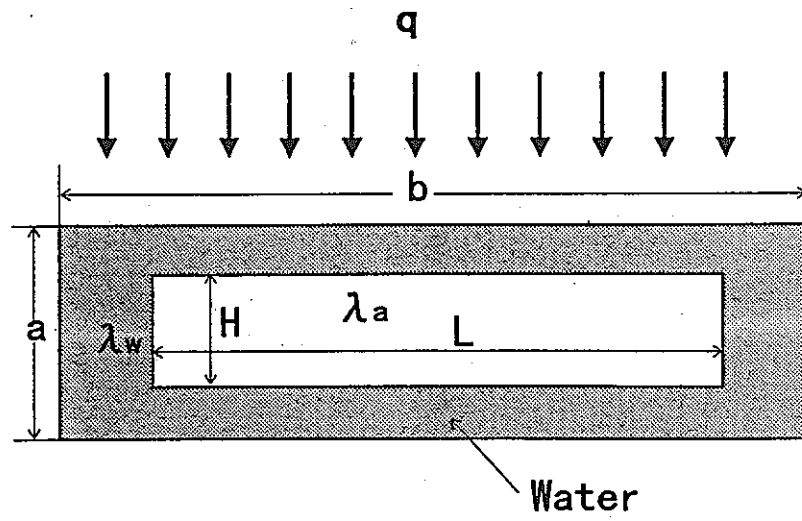


図3-3-1 分散体のモデル

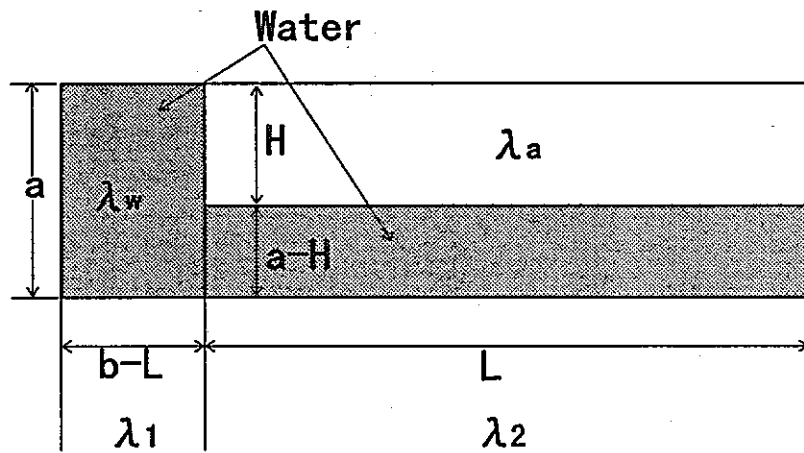


図3-3-2 分散体の熱伝導率推算用モデル

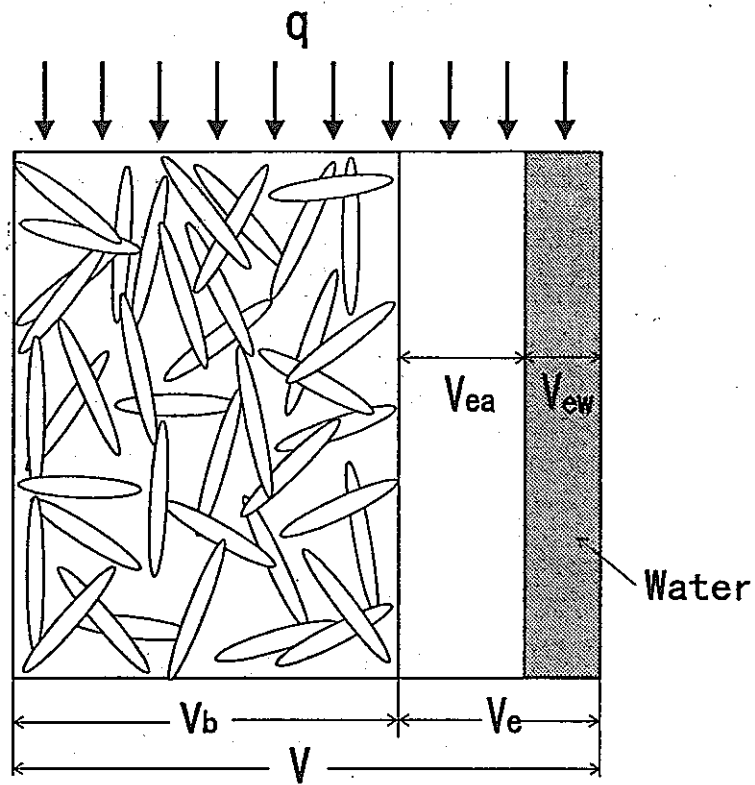


図3-4 ポイド部分の熱伝導率推算用モデル

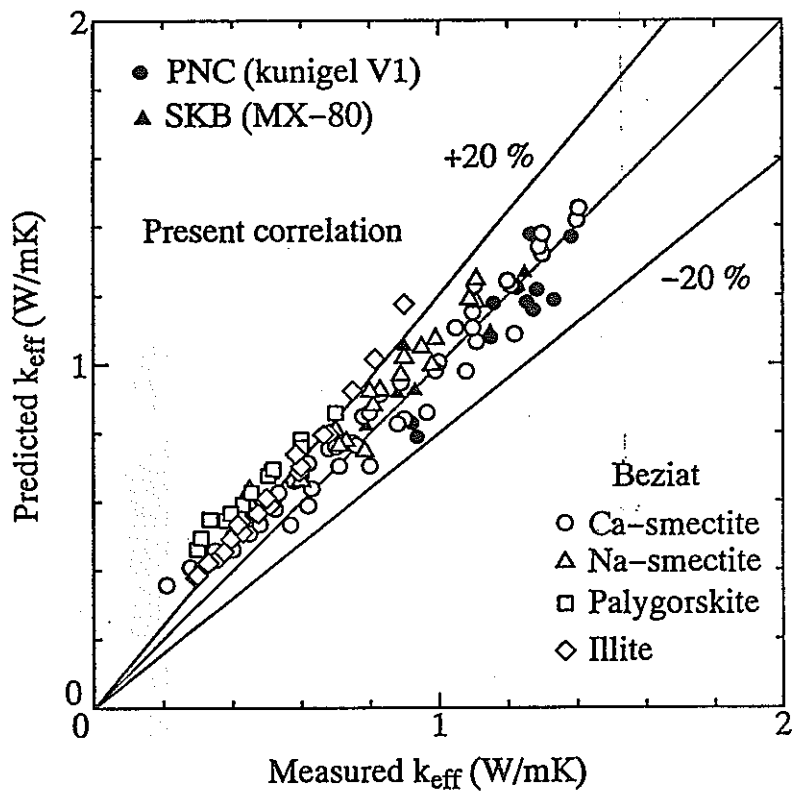


図3-5 本推算式と実験値の比較

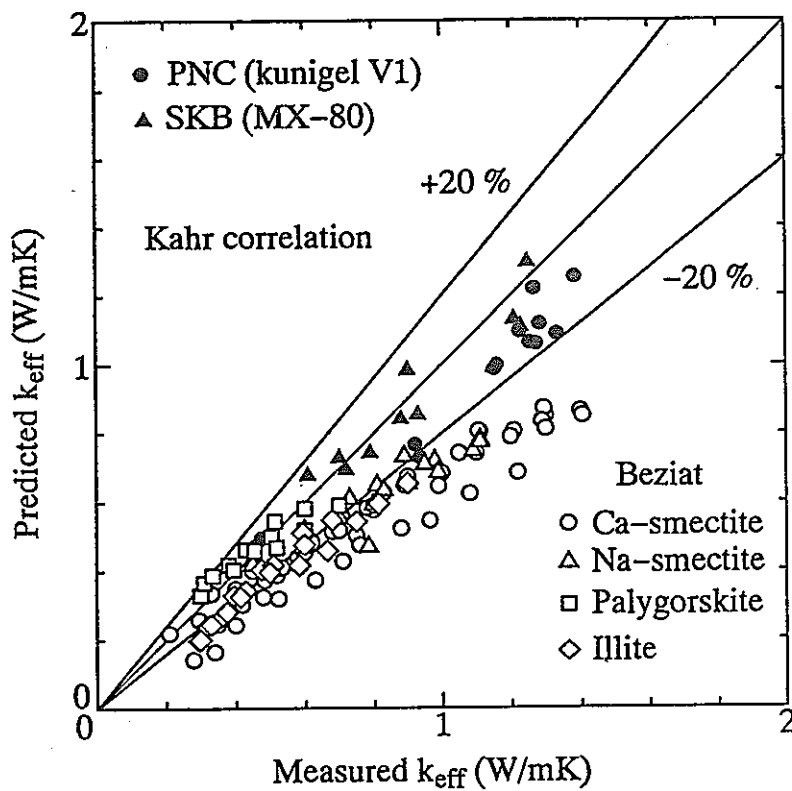


図3-6 Kahrらの推算式と実験値の比較

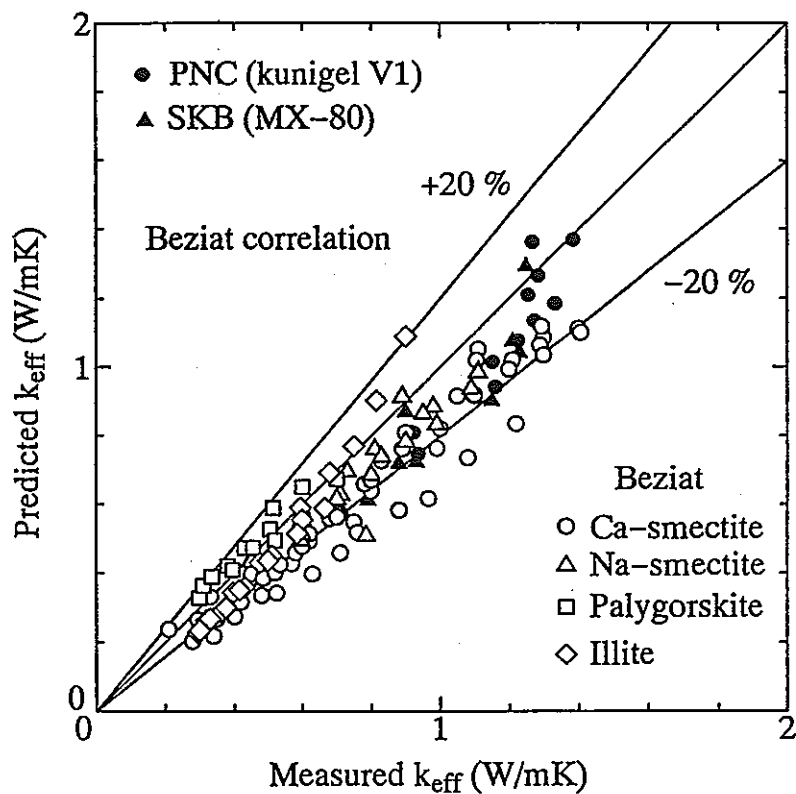


図3-7 Beziatらの推算式と実験値の比較

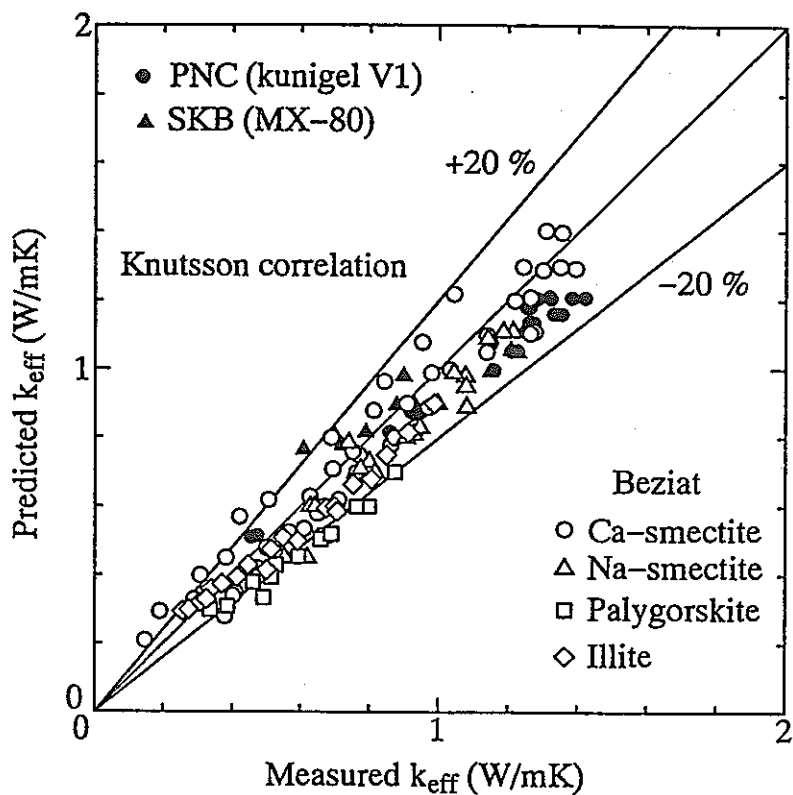


図3-8 Knutssonの推算式と実験値の比較

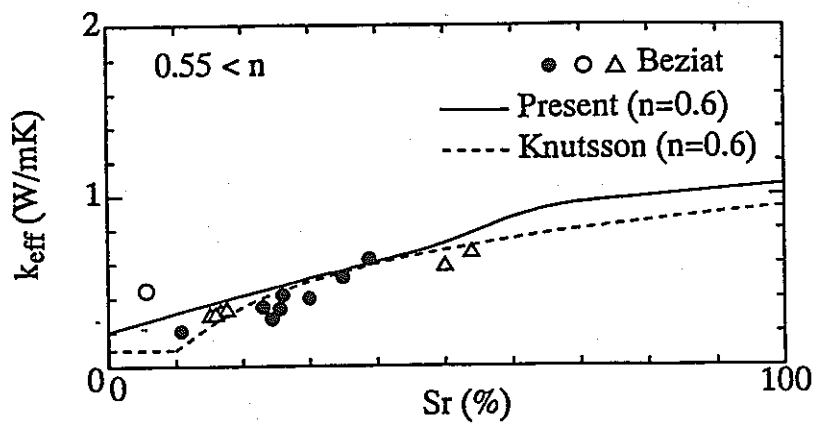
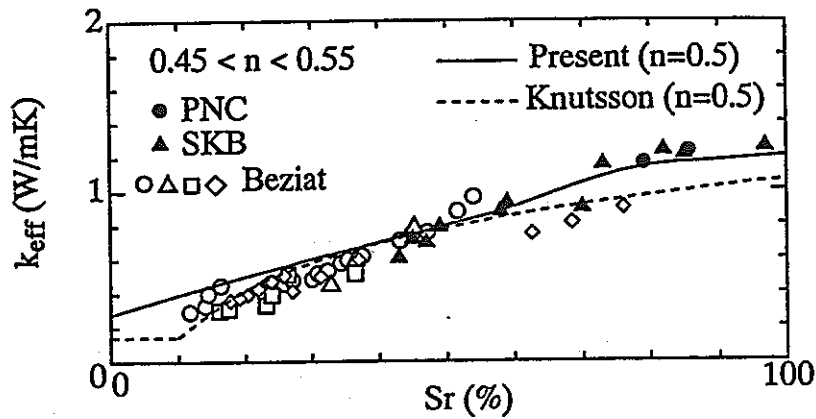
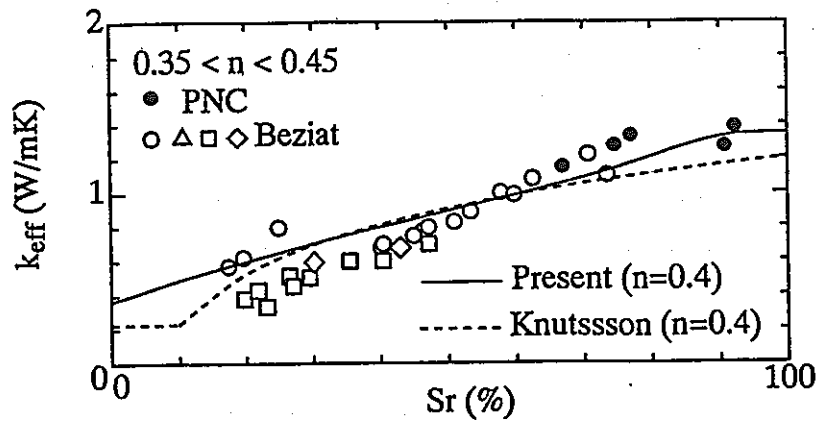
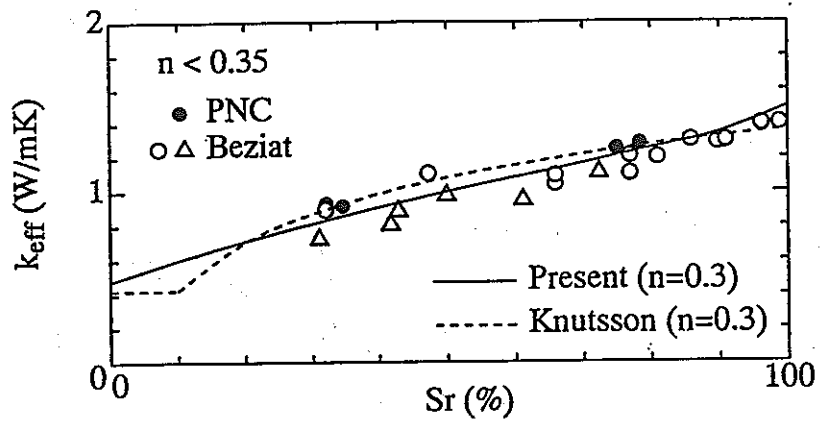


図3-9 熱伝導率の飽和度による変化

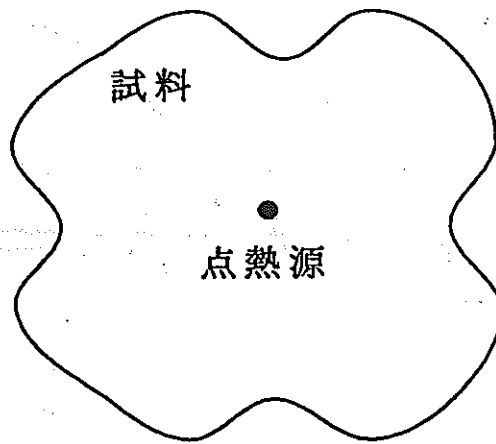


図4-1 無限媒質中の点熱源

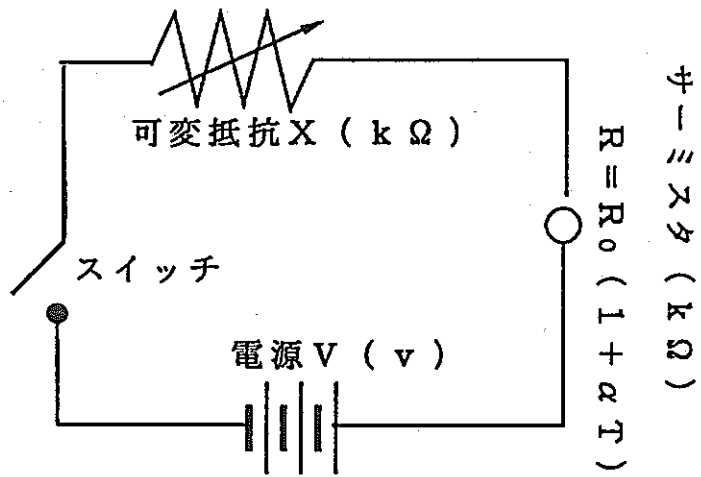


図4-2 測定回路



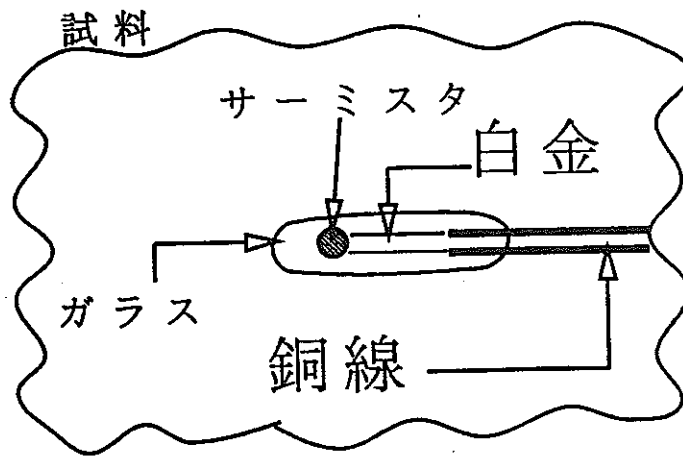


図4-3 プローブ部の詳細

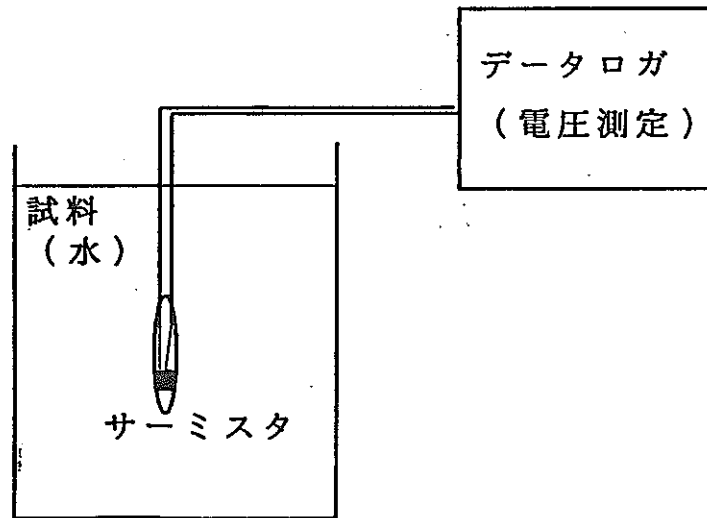


図4-4 測定装置

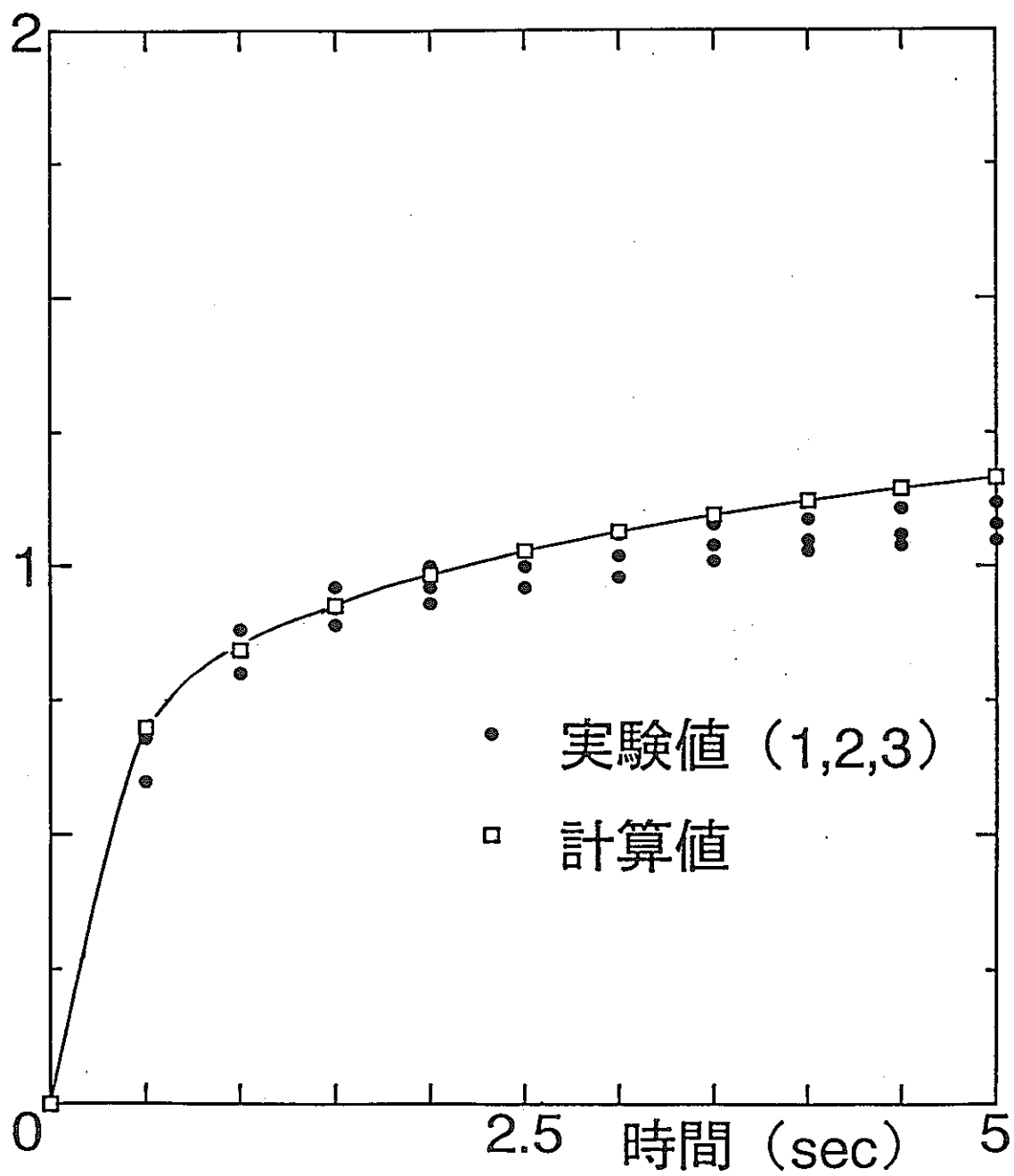


図4-5 実験値と計算値の比較

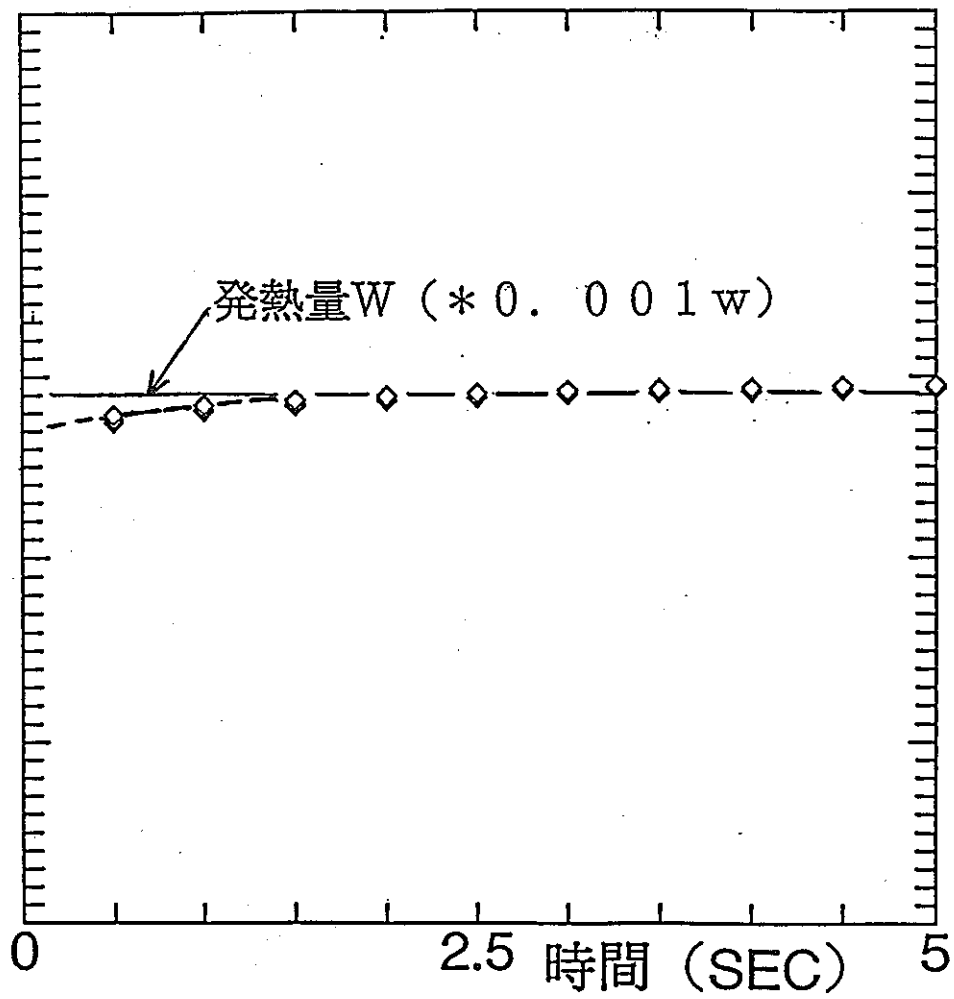


図4-6 サーミスタの発熱量

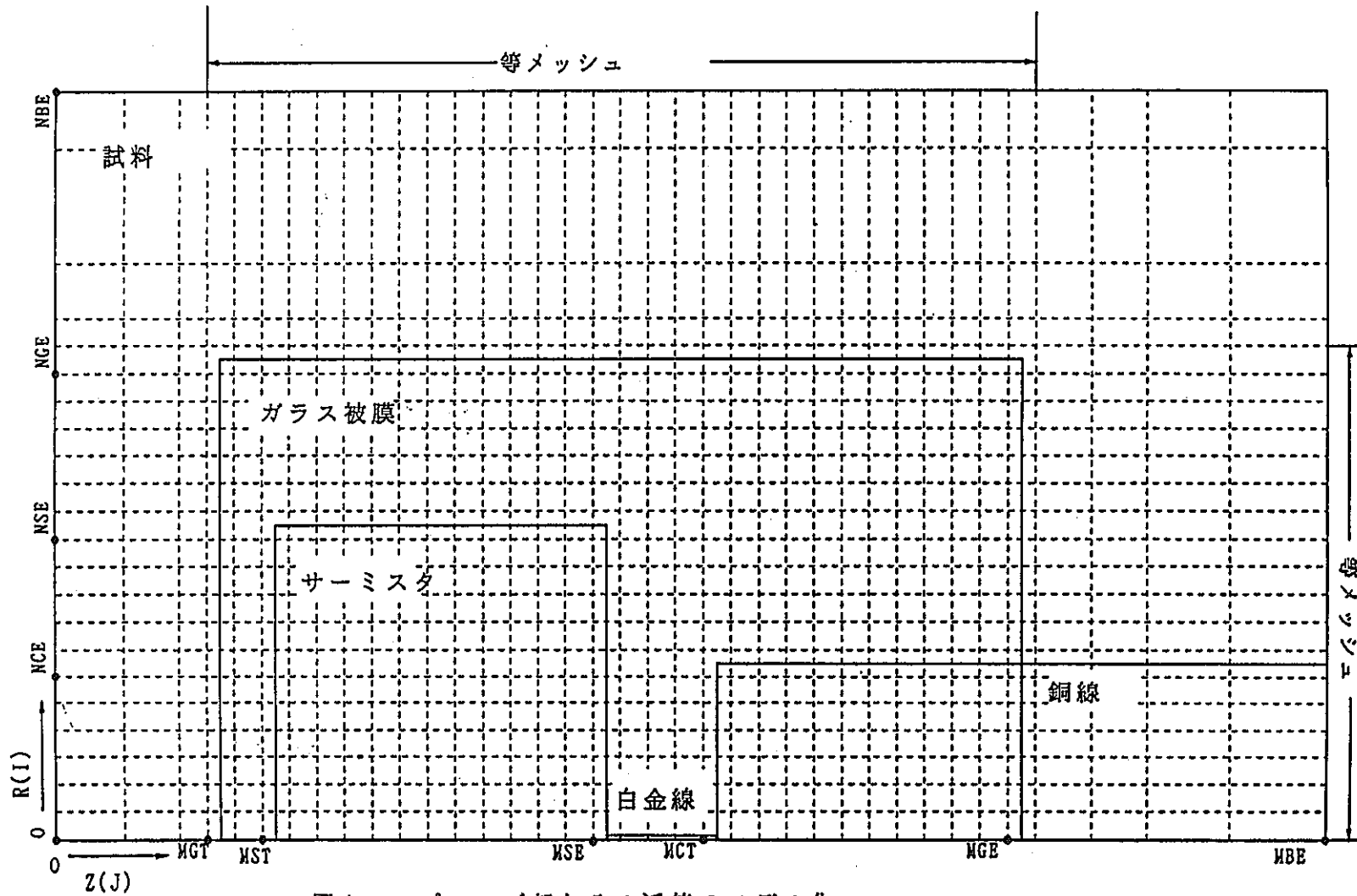


図4-7 プローブ部とその近傍のモデル化