

J N C T J 8 4 0 0 2 0 0 0 - 0 1 7

点熱源法による緩衝材の熱物性値の測定
(埋め戻し材の物性測定と計測装置の改良)

(核燃料サイクル開発機構 研究委託内容報告書)

2 0 0 0 年 2 月

北海道大学大学院工学研究科

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2000

点熱源法による緩衝材の熱物性値の測定
(埋め戻し材の物性測定と計測装置の改良)

熊 田 俊 明*

要 旨

本報告は、本研究シリーズの第2年度(1997年度)に提案した点熱源熱物性値測定法の精度向上と、ベントナイトと珪砂の混合材(分散物質)の熱伝導率の測定を行い、水分含有ベントナイトおよび珪砂混合緩衝材の熱物性値の推算法を確立することを目的とする。緩衝材の熱物性値は、荷重によって決まる密度、水分含有率、珪砂の混合率などによって異なる。緩衝材は使用期間に、種々の温度や荷重および水分含有率の環境に置かれると考えられ、このような緩衝材の熱物性値を知ることが必要である。ベントナイトと珪砂の混合材を分散物質として、既存の分散物質の熱伝導率推算法と既存および本研究における測定値を比較することにより、より精度良い推算式を特定した。

既存の熱伝導率推算式では、Frickeの回転楕円体をランダムに分散した場合の推算式と熊田の考案した任意の形状の分散体を回転楕円体に換算する方法を用いれば、精度よく混合材の熱伝導率を推算できる。また、球状分散体に適用する推算式であるBruggemanの式によっても実用上十分な精度で珪砂混合緩衝材の熱伝導率を推算できる。

*本報告書は、熊田俊明が、核燃料サイクル開発機構の委託により実施した研究内容の結果である。

COMERCIAL PROPRIETARY

JNC TJ 8400-017

Feb.2000

Measurements of Thermal Properties of Buffer Materials
(Measurement of Physical Properties of Buffer Materials
and Improvement of Measuring Method)

Toshiaki Kumada

Abstract

The report concerns the improvement of the method measuring thermal conductivity of buffer materials using a thermistor probe and the measurement of thermal conductivity of compacted bentonites and mixtures of bentonite and silica sand using the proposed method measuring thermophysical properties. The method measuring thermal conductivity is improved in accuracy and the apparatus is improved so as to measure easily with more short time. The calculated values of the conventional correlations predicting thermal conductivity of bentonite and mixture were compared with the existing and present data of thermal conductivity of bentonites and mixtures. The correlation proposed by Sakashita and Kumada can predict the best fitted values with the data of the bentonites and Fricke and Bruggeman correlations are fitted with the data for the mixtures with practical accuracy.

目 次

1. 緒 言	1
2. 測定原理と数値計算モデル	2
2.1 測定原理	2
2.2 熱伝導モデル	3
2.3 3次元モデルとの比較	4
2.4 数値計算法	6
2.5 各部の寸法誤差による影響	7
2.6 主な改良点	9
(a)熱物性値の決定法	9
(b)熱伝導モデルと較正	10
3. 測定装置	11
3.1 測定回路	11
3.2. 試験部の構造と試料の作成	12
4. 熱伝導率の測定結果	13
5. 緩衝材の熱伝導率の推算法	16
5.1 ベントナイトの熱伝導率	16
5.2 各種相関式と測定値の比較	16
5.3 各種推算式	22
5.4 珪砂の形状と回転楕円による近似め	22
5.5 珪砂混合緩衝材の熱伝導率	23
6. 結言	37
記号	39
文献	40
付録	F 1
F 1 2次元数値解析プログラム	F 1
F 2 円柱座標(軸対称)系の離散化	F 15
F 3 JNC/PNCおよびKiyohashiの測定値と各種推算式の計算結果	F 18

1. 緒 言

高レベルガラス固化体を深地層に埋設する際に使用される緩衝材として、ベントナイトやベントナイトと珪砂の混合材の使用が考えられている。この緩衝材の物理・化学的特性の把握は、ベントナイトの閉じ込め機能を評価する上で重要である。とくに緩衝材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、温度分布に係る緩衝材の熱伝導率や水分移動およびオーバパックの腐食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。また、ベントナイトに珪砂を混合して使用する計画があり、この場合には、さらに混合材についてベントナイトと同様に、主として物理的性質を知る必要がある。

本研究シリーズの第2年度（1997年度）に提案した点熱源法⁽¹⁾では標準物質を2種類用いるが、本報告では、これを改め標準物質を1種類だけ用いる方法とした。また、2次元近似による数値計算法を3次元の精密数値解析により計算精度を確かめた。この方法によりベントナイトに混合する珪砂の重量割合を種々変えて熱伝導率を測定した。この測定値と既存の測定値と併せて、既存の混合物質（分散物質）の熱伝導率の推算式による計算値と比較することにより、精度良い推算式を特定した。

また、緩衝材の熱物性値の推算法では、緩衝材中の各成分割合を既知として、試料の密度と比熱を計算し、坂下らの推算法またはその簡便式によりベントナイトの熱伝導率を計算する。緩衝材に珪砂を混合した場合には、これをベントナイトと珪砂の分散物質として、Frickeの推算法⁽²⁾に熊田の実際の分散体を回転楕円体で近似する方法⁽³⁾を組み合わせた方法で推算する。また、珪砂の形状は球形から極端に離れていないことやベントナイトと珪砂の熱伝導率に大きな差がないことにより、Bruggemanの球状分散体の式⁽⁴⁾を用いても実用上十分な精度で推算できる。また、珪砂混合緩衝材の熱伝導率を、珪砂混合率、水分含有率およびベントナイト密度などをパラメータとして図示し、珪砂混合緩衝材の熱伝導率の特性を明らかにした。

2. 測定原理と数値計算モデル

2.1 測定原理

ここでは理想的な熱伝導モデルに基づいて測定原理を説明する。無限媒質中の球体の熱伝導率が十分大きい場合の温度上昇は次式(2-1)で与えられる。

$$T_m = (Q / 4\pi r_0 \lambda_x) \left\{ 1 - (2r_0^2 k^2 / \pi) \int_0^\infty \frac{\exp(-a_x u^2 / r_0^2)}{[r_0 u^2 - k r_0]^2 + (k r_0 u)^2} du \right\} \quad (2-1)$$

ここで、 $k=4\pi r_0^3 \rho_x c_x / M_x c_s$ である。球体の熱伝導率や半径の誤差の影響は、初期の温度上昇域ほど大きいから、これらの誤差が無視できる程度の時間が経過した温度上昇域で、熱物性値を決めればよい。式(2-1)はある程度時間が経てば、次式で近似できる。

$$T_m = (Q / 4\pi r_0 \lambda_x) \left[1 - r_0 / (\pi a_x t)^{1/2} - r_0^3 (2 - a_x) / \{ \pi^{1/2} (a_x t)^{3/2} \} + \dots \right] \quad (2-2)$$

発熱体の半径が十分小さく、式(2-2)の右辺の第3項を無視できれば、発熱体の物性値に依存しない次式を得る。

$$T_m = (Q / 4\pi r_0 \lambda_x) \left[1 - r_0 / (\pi a_x t)^{1/2} \right] \quad (2-3)$$

式(2-3)で、時間 t が充分経てば、次式の平衡温度を得る。

$$T_m = Q / (4\pi r_0 \lambda_x) \quad (2-4)$$

したがって、点熱源法ではリード線の影響がなければ、式(2-4)によって球状プローブの半径を知り、ステップ加熱による温度上昇を測定すれば、熱伝導を求めることができる。また、式(2-3)では、異なる時刻 t_1 、 t_2 における温度上昇を $T_m(t_1)$ 、 $T_m(t_2)$ とすれば、試料の熱伝導率と温度拡散率は次式で表わされる。

$$\lambda_x = (Q / 4\pi r_0 T_1) \left[1 - (T_1 - T_2) / \{ T_2 - T_1 (t_1 / t_2)^{1/2} \} \right] \quad (2-5)$$

$$a_x = \{ r_0^2 / \pi (T_1 - T_2)^2 \} (T_2 / t_1^{1/2} - T_1 / t_2^{1/2})^2 \quad (2-6)$$

比熱と密度の積は $\rho_x c_x = \lambda_x / a_x$ の関係から求められる。

実際のプローブ部を構成するサーミスタは球状でないことやガラス被覆がある上にリード線の影響がある。しかし、この場合も、十分時間が経ってからの温度測定値には試料の熱伝導率に対する情報が含まれており、初期の温度ほど温度拡散率の情報がより多く含まれている。式(2-3)から明らかかなように、発熱開始からの時間が遅れる程、右辺第2項のサーミスタ

温度への寄与が小さくなり、この時間帯での温度上昇による温度拡散率の決定精度は悪くなる。したがって、密度と比熱の積または温度伝導率の精度よい測定にはサーミスタの初期の温度を用いる必要がある。

2.2 熱伝導モデル

本測定法に点熱源として使用するサーミスタおよびプローブの各部の寸法をTable2-1に、構造をFig.2-1に示す。プローブは $0.3 \times 0.3 \times 0.15$ (mm)の直方体のサーミスタを保護し絶縁するため、サーミスタを包むように回転楕円体状のガラスにより被覆した構造である。リード線はサーミスタの両側面に対称に取り付けられている。このような構造では、前述の式(2-2)や(2-3)により、熱伝導率や比熱と密度の積を決定すれば大きな誤差を生じる。Fig.2-2に、サーミスタプローブの対称性から Fig.2-1に示す2分の1の2次元熱伝導モデルのメッシュの切り方を示す。温度勾配の大きいプローブ周辺の領域ではメッシュを細かく、計算範囲は試験部の寸法より十分大きくした。メッシュの切り方はリード線を含む上部を円筒座標とした。また、試料周辺の境界条件は断熱として、リード線の境界条件としてサーミスタから十分離れた点であり熱流束一定とした。計算は差分法により行った。境界条件は、プローブから試料境界までの距離が充分離れており、熱伝導率の計算に必要な時間範囲では影響がない。円柱座標の離散化の方法を付録 F-1に添付した。

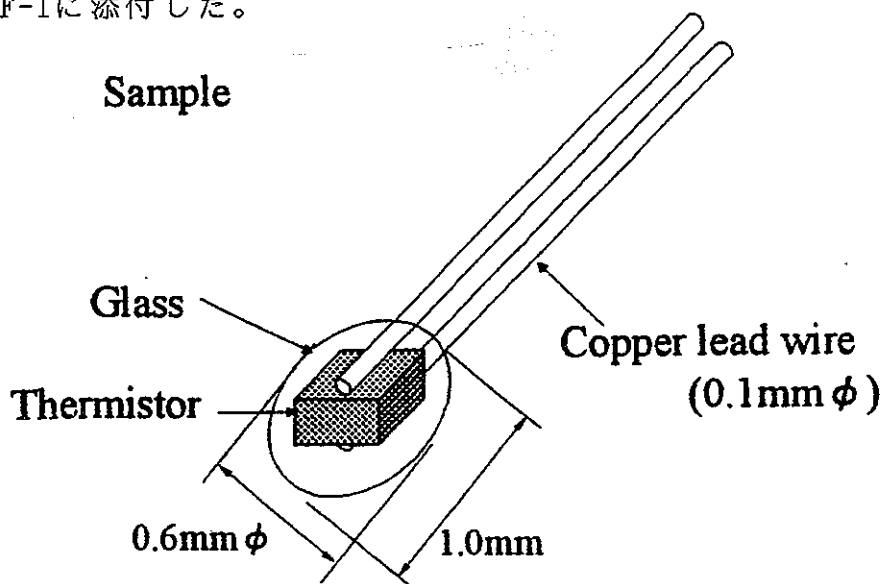


Fig.2-1 Structure of probe

Table 2-1 Dimension and physical properties of probe

	Length (mm)	Radius (mm ϕ)	Thermal conductivity (W/mK)	Density (Kg/m ³)	Heat capacity (KJ/K g K)
Thermistor	0.40	0.27	20.0	5000	0.25
Glass	1.00	0.51	1.0	2100	0.70
Lead wire	—	0.09	372.0	8880	0.39
Sample	Infinite	Infinite	—	A	B

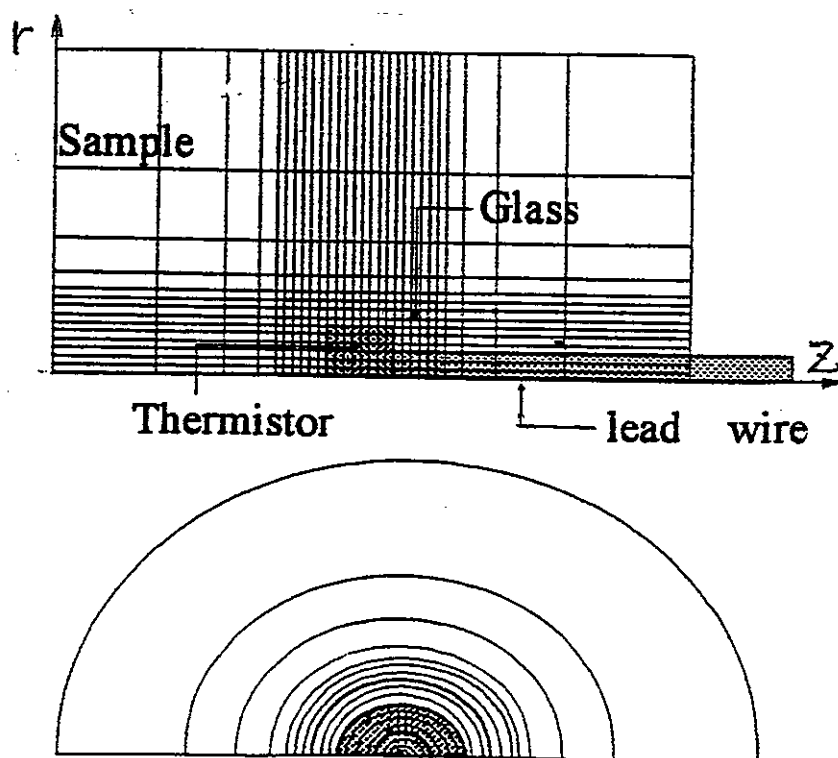


Fig.2-2 2-dimensional model

2.3 3次元モデルとの比較

Fig.2-3にプローブ部のより精密な円柱座標による3次元数値計算モデルを示す。Fig.2-4に水の熱伝導率を用いて、二つの数値計算モデルによる温度の時間変化の計算結果を示す。同図には、計算値の差を3次元モデルによる計算値を基準に%で示す。数値計算の極初期(0.2~0.5秒)を除いて温度の差は十分小さく、2次元モデルで試料温度を正確に計算できることを示している。

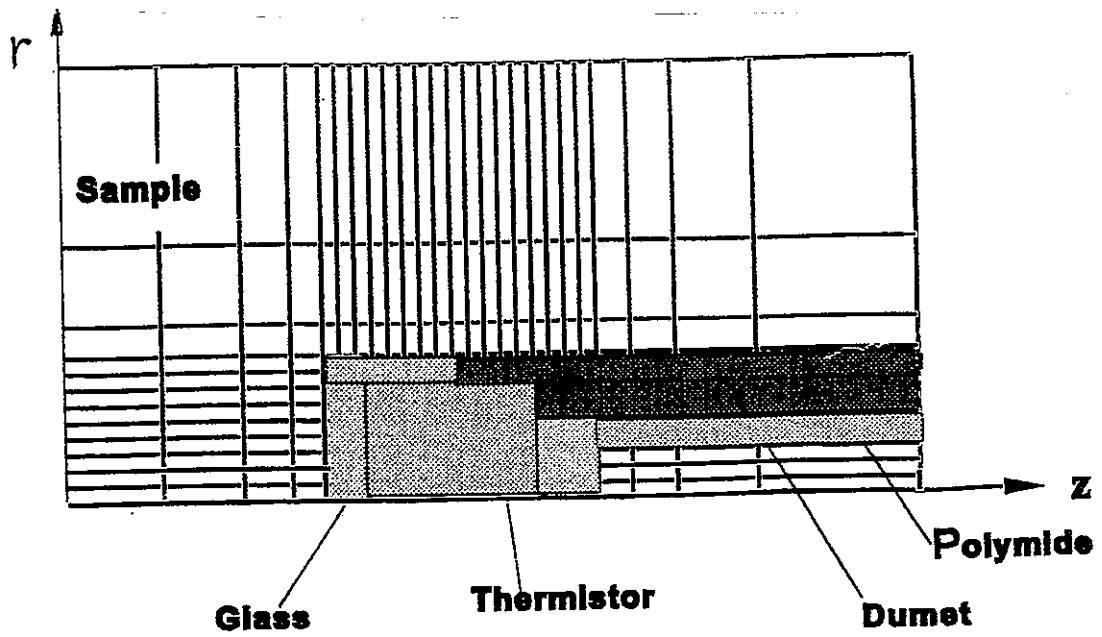


Fig.2-3 3-dimensional model

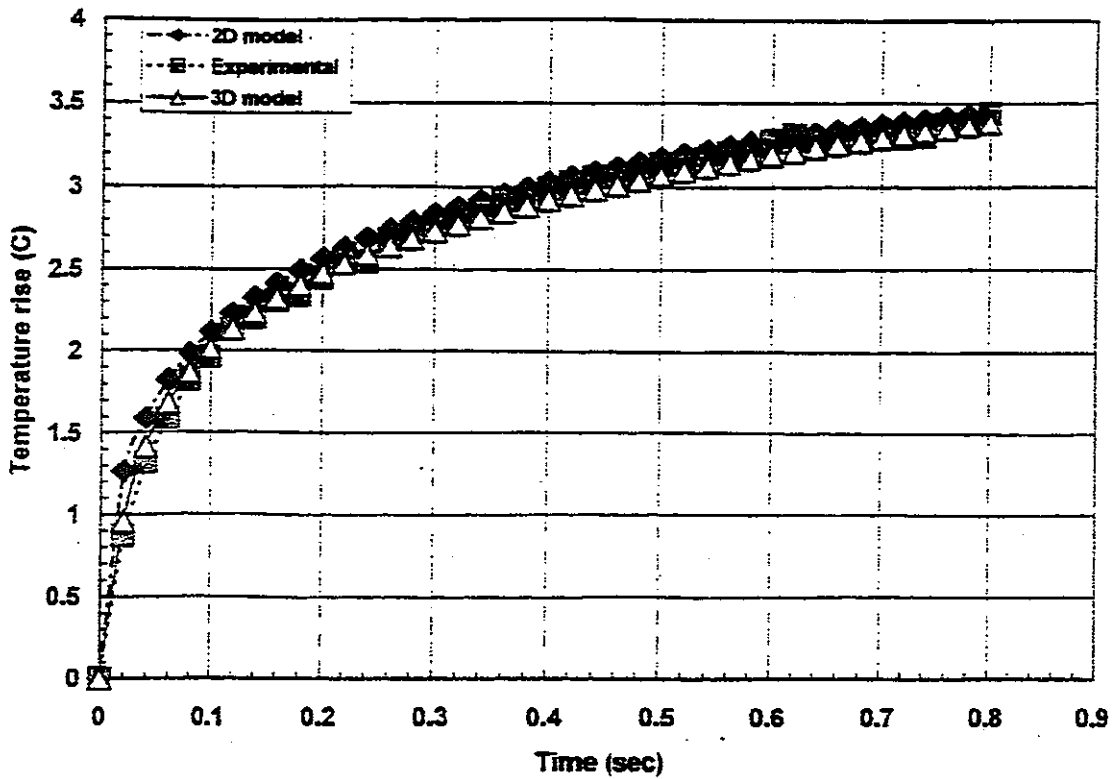


Fig.2-4 Comparison of temperature histories between 2 and 3 dimensional calculation of thermistor probe

2.4 数値計算法

数値計算のフローチャートをFig.2-5 に示す。また、2次元および3次元の数値計算プログラムを付録 F-2に添付した。

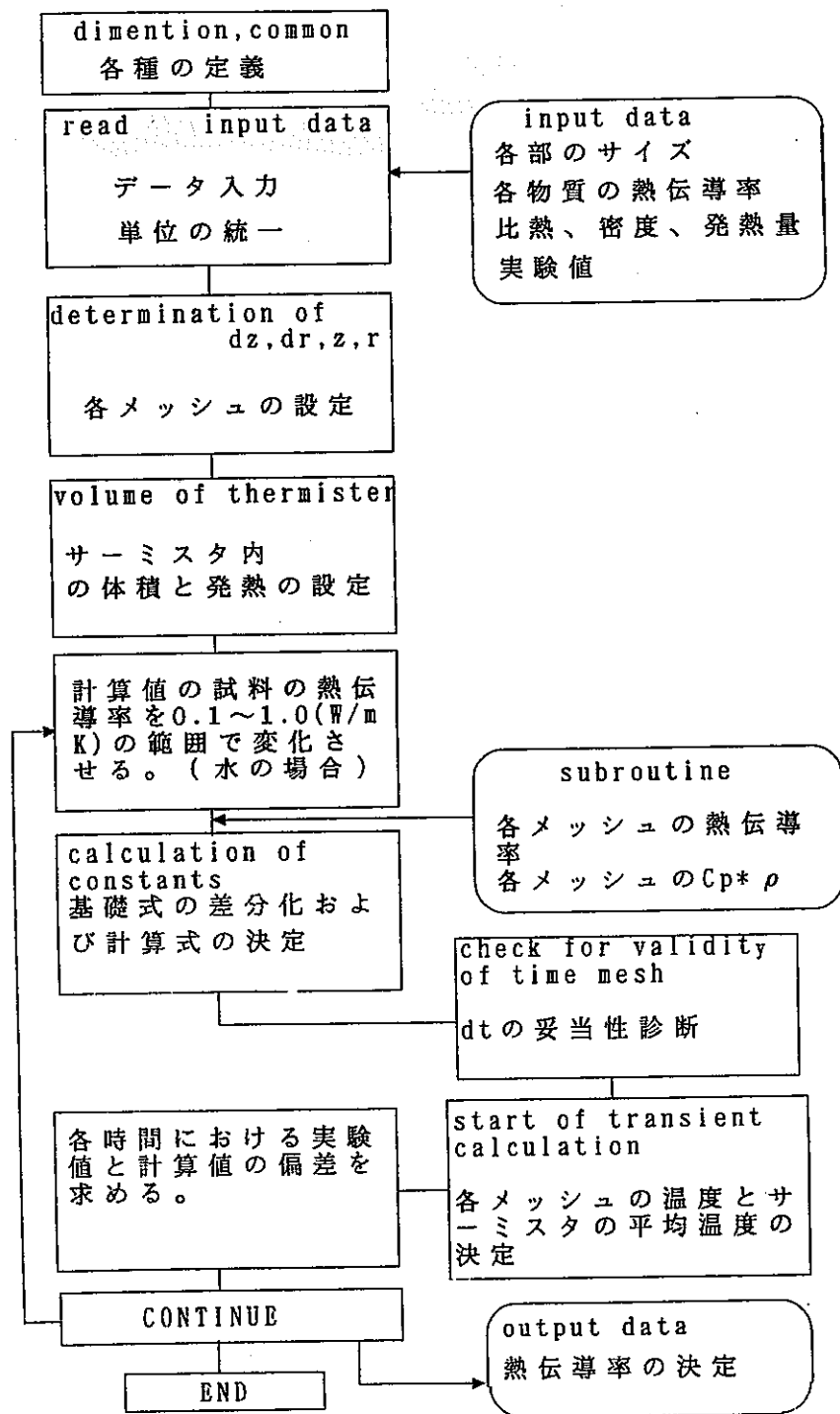


Fig.2-5 Flow chart for numerical calculation

2.5 各部の寸法誤差による影響

サーミスタの構造の中で、サーミスタやデュメット線の寸法は正確に与えられるが、ガラス被覆の寸法は正確に決められない。また、サーミスタ各部の熱物性値にはある程度の誤差があると考えられるべきである。そこで数値計算により各種誤差要因について検討する。前述の熱伝導モデルに、試料として熱物性値が正確に知られる水を用いて数値計算を行う。リード線では銅線の外径をパラメータとしてリード線の温度への影響を計算した。サーミスタやガラスの形状の影響は極初期の温度を除いて小さいので、ここではサーミスタやガラスの体積をパラメータとして誤差の影響を計算する。

(a) リード線の直径寸法（熱伝導率）誤差

リード線の誤差要因としては、リード線の直径の誤差や材料の加工硬化により熱伝導率が文献の値と異なることによる誤差が考えられる。Fig.2-6 にリード線が無い場合と各種直径のリード線を使った場合のサーミスタの平均温度の比較を示した。Fig.2-6 より明らかなように、リード線の直径の影響は大きいですが、本測定法で使用している外径0.1mm のデュメット線の場合には、仮に断面に10%の誤差があっても温度への影響は、平衡温度に

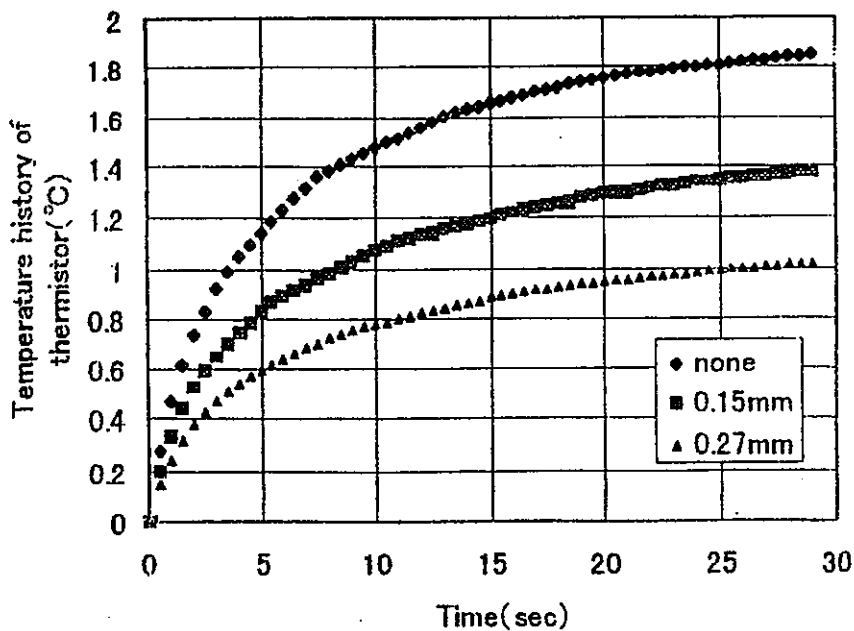


Fig.2-6 Effect of the diameter of lead wire on temperature histories

近い4秒後で約3%程度である。また、リード線の熱伝導率の誤差も断面の誤差と同様に考えてよく、熱伝導率の誤差が10%で温度誤差としては約3%程度となる。しかし、温度拡散率を精度良く決定するには、測定開始直後の影響がより大きく、より細いリード線を使用する必要がある。

(b) サーミスタの寸法誤差

Fig.2-7にサーミスタ中の数値はサーミスタの半径である。サーミスタの体積の誤差によるサーミスタ温度上昇への影響は極めて大きく、サーミスタ寸法または熱容量は精度よく定する必要がある。サーミスタの製作段階で寸法が計られており、サーミスタの重量の誤差は小さいが、加熱直後には、この誤差の影響が大きいと考えられ、測定温度と計算温度の初期値

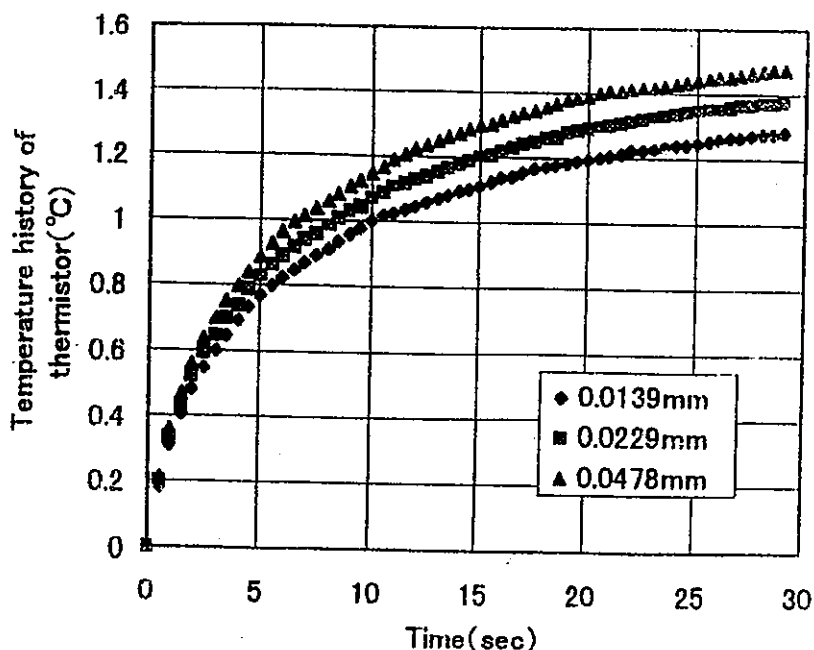


Fig.2-7 Effect of thermistor size on temperature histories

を十分に比較する必要がある。また、サーミスタの熱伝導率はガラスに比べて10倍以上く、かつサーミスタの寸法が小さいので熱伝導率率の誤差の影響は十分小さく無視できる。

(c) ガラス被覆の寸法誤差

Fig.2-8 にガラス被覆の体積を変えた場合のサーミスタの温度上昇を示す。サーミスタと同様にガラス被覆の体積の影響は大きい。ガラスの熱伝

導率が試料の水の熱伝導率よりも2倍ほど大きいため、ガラス被覆が厚くなればサーミスタの温度上昇が小さくなる。以上、リード線の熱伝導、サーミスタやガラス被覆の寸法のサーミスタ温度上昇への影響を計算したが、サーミスタやガラス被覆の寸法の影響が大きく、本測定法の精度を高めるためには、サーミスタとガラス被覆の寸法(熱容量)を正確に決定しなければならない。

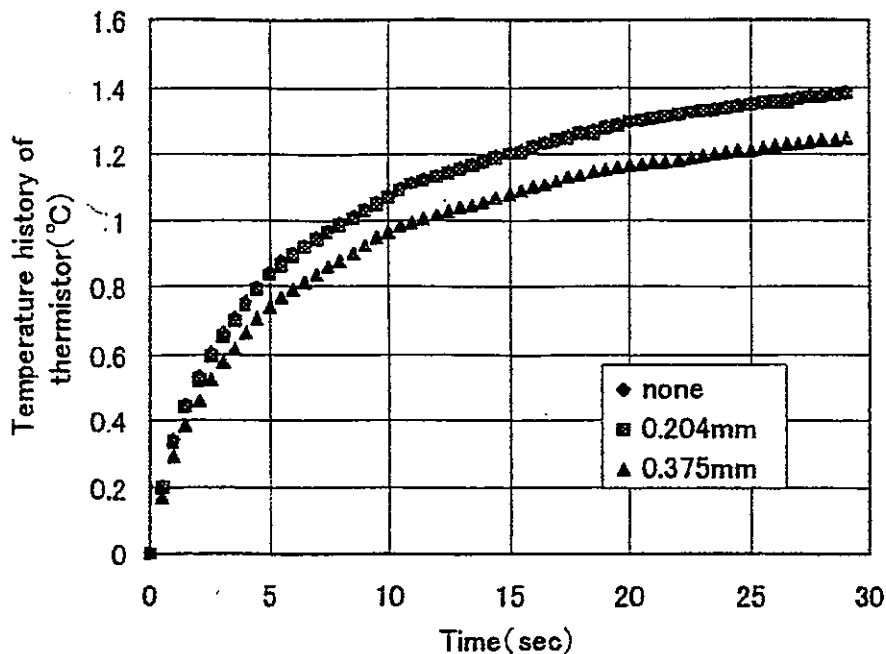


Fig.2-8 Effect of glass size on temperature histories

2-6 主な改良点

(a) 熱物性値の決定法

水やベントナイトなどの密度や比熱は既知か少なくとも概算値が計算できる場合が多い。このような場合は熱伝導率のみを決定すればよい。式(2-3)に示すように、測定時間がある程度を越えると測定温度への温度拡散率の影響が小さくなり、密度と比熱の積の値の精度が悪くても熱伝導率を精度良く決定できる。したがって、各時刻における温度の測定値と計算値が一致するように、計算に用いる熱伝導率の値を決めればよい。最初に、適当な熱伝導率を仮定し、計算した温度が測定温度より低ければ、計算に用いる熱伝導率をより小さい値に変更し、逆の場合にはより大きい値として再度計算して補正する方法を繰り返し、熱伝導率を決定した。熱伝導率は、

温度上昇が平衡に近くなった測定時間帯で、密度と比熱の積の正確な値がなくても精度良く求めることができる。この熱伝導率を用いて、測定開始から温度上昇率の比較的大きい時間帯の温度の計算値が測定値によく合うように密度と比熱の積を決定すればよい。また、密度と比熱の積は測定開始から1秒から5秒の範囲で比較的測定値のバラツキが大きい。

(b) 熱伝導モデルの較正

すでに述べたように測定法の誤差要因は無数にあり、それらの影響をできるだけ小さくするように、測定法を較正しなければならない。厳密に言えば誤差要因の数だけの標準物質により較正の必要があることになる。しかし、T.A.Balasubramaniamら⁽⁶⁾の方法のように、二つの標準物質を用いて未定係数を決定する方法では、二つの標準物質に近い熱物性値の試料ではある程度の精度で測定できるが、試料の熱伝導率が標準物質のそれから離れると大きな誤差を生じることになる。これに対して数値計算モデルを使う場合、熱伝導モデルが厳密に構成されていれば、原理的に較正の必要はない。しかし、前述のように大きな誤差とはならないが誤差要因が多く較正の必要は避けられない。標準物質として精度良く熱伝導率やその他の物性値が測定されている物質は数多くはなく、少ない、できれば人ついの標準物質によって測定法の較正を行うことが望ましい。ここでは水を標準物質として広範囲の熱物性値を持つ試料の測定を行うには、より精度良い熱伝導モデルが必要であり、サーミスタとガラス被覆の寸法(熱容量)を精度よく決定することが重要である。ここでは、熱物性値が正確に測定されている水を標準試料として、一定時間経った温度分布の測定値と計算値の差が最小になるサーミスタとガラスの直径(長さはTable2-1に示す値で固定した)を求めた。サーミスタ直径をパラメータとして測定値と計算値の差をFig.2-9に示す。計算には、ガラスの熱伝導率や密度と比熱の積に文献値を用いた。その結果は、カタログに与えられているサーミスタ寸法と本測定法により求めたガラス被覆の寸法(体積)はよく一致した。

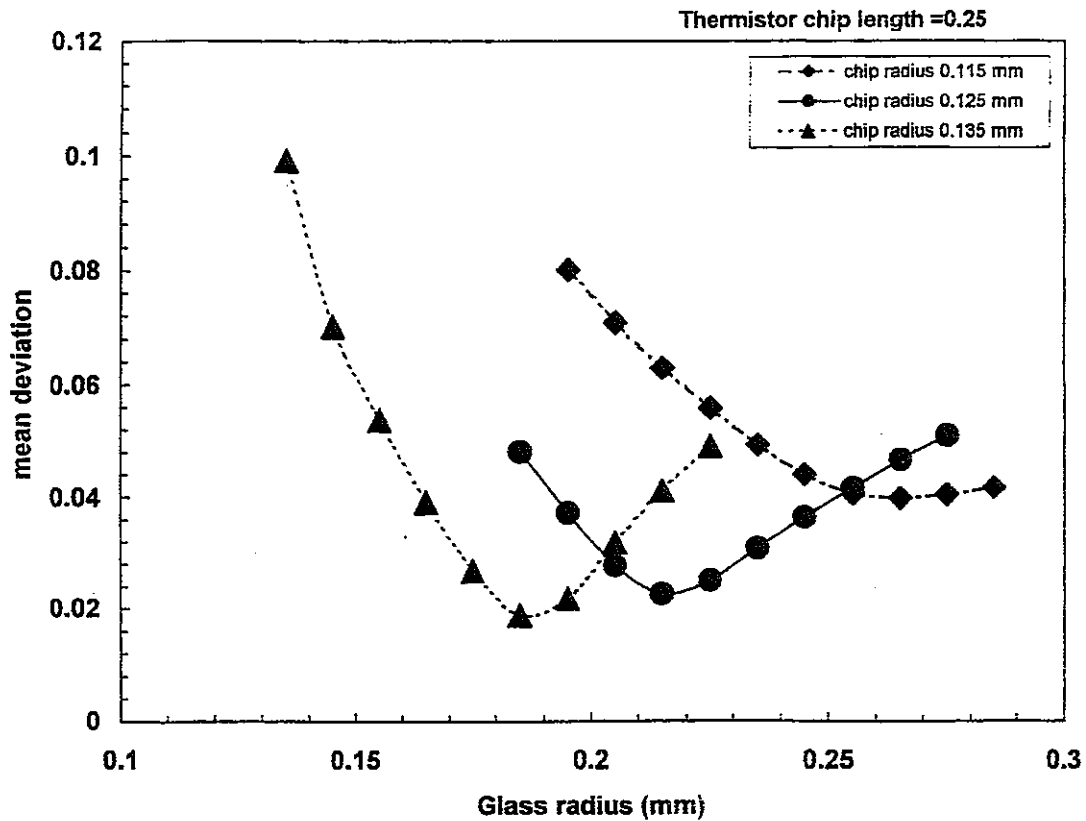


Fig.2-9 Determination of thermistor and Glass radii

3. 測定装置

測定装置および試料の作成法については、すでに報告書⁽¹⁾で詳しく述べているので、ここでは簡単に報告する。

3.1 測定回路

本測定法では、熱伝導モデルを数値解析してサーミスタの温度上昇を求め、発熱率の時間変化を測定し、計算機に読み込むので、発熱率の時間変化にはとくに制限はない。しかし、熱物性値の差による温度の違いがより鮮明に現れる発熱の仕方としては、パルスやステップ状変化のように、急激な変化を伴う場合の方が、熱物性値を精度良く決定できる。測定系は Fig.3-1示すように極めて簡単な回路であり、この回路でサーミスタの発熱をステップ状に変化させるには、可変抵抗とサーミスタの抵抗を等しく、サーミスタの温度変化が僅かであればほぼステップ状の発熱となる。

3.2 試験部の構造と試料の作成

Fig.3-2に測定部の構造を示す。一定の水分含有率のベントナイトと珪砂を一定重量比で混合し、外径20mm、厚さ10mmの円板を製作し、これをFig. 3-2 に示すようにプローブを挟んで、容器内に固定し試料とする。試料の挿入部は厚さ10mmの2枚の亚克力板をくり抜いた構造で、上下をさらに亚克力板で挟み、ボルトで締め付けている。ベントナイトの水分含有率を変えるには、まず外側の亚克力板を、ステンレススチールの焼結体の円板を埋め込んだ亚克力板と交換する。次に試験部を水中に一定期間浸し、その後取り出してデシケータ内で一定期間水分分布を均一化してから測に使用した。水分含有率は水中に浸した後の重量増加から算出した。なお、試験部の構造および試料の作成法は、佐藤ら⁽⁶⁾がベントナイト中の水分挙動を調べるのに用いた構造および方法と同じである。

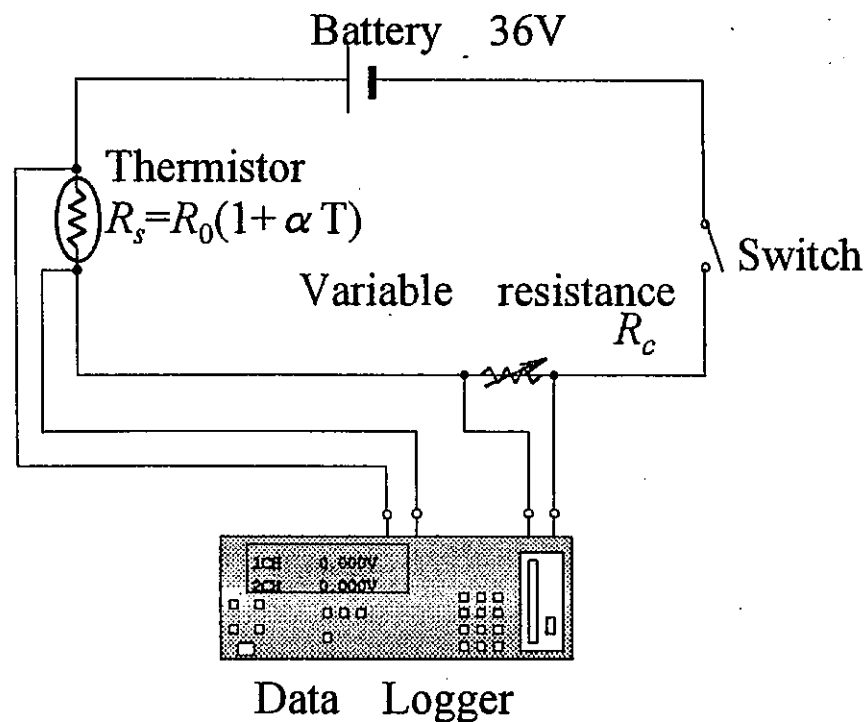


Fig.3-1 Circuit for measurement of thermal properties

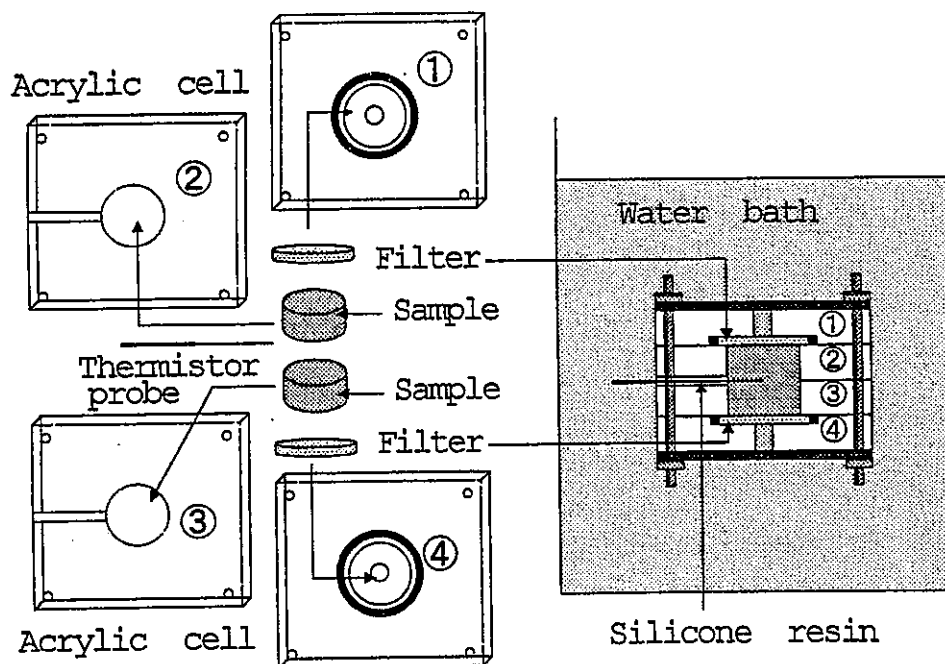


Fig.3-2 Test section

4. 熱伝導率の測定結果

4-1 測定値

Table 4-1, 4-2 に本研究によるベントナイトおよび珪砂混合緩衝材の熱伝導率の測定値および水分含有ベントナイトの各種相関式による推算値の一覧を示す。また、KiyohashiらやPNC/JNCの測定値と各種推算値を付録F-3の Table F-1⁽¹⁰⁾ からF-12⁽¹¹⁾ に示す。なお、PNC/JNCのデータは複数の文献から引用したものをまとめたTableである。

Table 4-1 Thermal Conductivity of Bentonite and Calculated Values of each Correlations

Sample number	ρ_d (g/cm ³)	n	Sr(%)	$\lambda_{b,e}$ (W/mK)	$\lambda_{b,p}$ (W/mK)	$\lambda_{bd,p}$ (W/mK)	$\lambda_{b,e}/\lambda_{b,p}$	$\lambda_{b,e}/\lambda_{bd,p}$
24	1.89	0.3	0	0.539	0.537	0.537	1.003	1.003
25	1.93	0.3	13.0	0.750	0.737	0.537	1.017	1.396
26	1.97	0.3	27.4	0.888	0.894	0.537	0.993	1.653
27	2.01	0.3	40.0	0.955	1.024	0.537	0.932	1.778
28	1.62	0.4	0	0.390	0.391	0.391	0.997	0.997
29	1.86	0.4	62.2	0.960	1.091	0.392	0.879	2.448
30	1.35	0.5	0	0.281	0.282	0.282	0.996	0.996

$\lambda_{b,e}$: Thermal conductivity of bentonite measured by C.Ould-lahoucine.

$\lambda_{b,p}$: Predicted thermal conductivity using Sakashita&Kumada correlation.

$\lambda_{bd,p}$: Predicted thermal conductivity using Sakashita&Kumada correlation for the case of dry bentonite .

Table 4-2 Measured Thermal Conductivity of mixtures and Calculated values
of each correlations.

Sample number	ρ_d (g/cm ³)	n	Sr(%)	Ps(%)	$\lambda_{m,e}$ (W/mK)	$\lambda_{b,p}$ (W/mK)	$\lambda_{bd,p}$ (W/mK)	$\lambda_{m,e}/\lambda_{b,p}$	$\lambda_{m,e}/\lambda_{bd,p}$
1	2.04	0.3	0	13.6	0.687	0.537	0.537	1.279	1.279
2	2.04	0.3	1.4	13.6	0.742	0.569	0.537	1.304	1.381
3	2.05	0.3	4.2	13.6	0.788	0.614	0.537	1.283	1.467
4	2.06	0.3	9.0	13.6	0.870	0.681	0.537	1.277	1.620
5	2.08	0.3	15.7	13.6	0.955	0.764	0.537	1.250	1.778
6	2.11	0.3	25.6	13.6	1.080	0.876	0.537	1.232	2.011
7	2.17	0.3	45.0	13.6	1.298	1.074	0.537	1.208	2.417
8	2.12	0.3	0	21.2	0.807	0.537	0.537	1.502	1.502
9	2.17	0.3	17.0	21.2	0.994	0.779	0.537	1.275	1.851
10	2.20	0.3	27.0	21.2	1.242	0.891	0.537	1.393	2.312
11	2.20	0.3	29.2	2.12	1.247	0.914	0.537	1.364	2.322
12	2.28	0.3	54.5	2.12	1.460	1.164	0.537	1.254	2.718
13	2.32	0.3	0	38.6	1.145	0.537	0.537	2.132	2.132
14	2.35	0.3	10.0	38.6	1.374	0.694	0.537	1.979	2.558
15	2.36	0.3	15.0	38.6	1.384	0.756	0.537	1.830	2.577
16	2.38	0.3	21.4	38.6	1.476	0.830	0.537	1.778	2.748
17	2.43	0.3	38.6	38.6	1.702	1.010	0.537	1.685	3.169
18	2.46	0.3	48.6	38.6	1.749	1.109	0.537	1.577	3.257
19	2.49	0.3	56.3	38.6	1.818	1.181	0.537	1.539	3.385
20	1.78	0.4	0	11.86	0.520	0.392	0.392	1.326	1.326
21	1.80	0.4	6.0	11.86	0.625	0.488	0.392	1.280	1.594
22	1.85	0.4	18.7	11.86	0.823	0.646	0.392	1.274	2.099
23	1.87	0.4	24.0	11.86	0.898	0.705	0.392	1.273	2.290

$\lambda_{m,e}$: Experimental thermal conductivity of mixture measured by C.Ould-lahoucine.

$\lambda_{b,p}$: Predicted thermal conductivity using Sakashita&Kumada correlation.

$\lambda_{bd,p}$: Predicted thermal conductivity using Sakashita&Kumada correlation for the case of dry bentonite.

5. 緩衝材の熱伝導率の推算法

著者は、すでに乾燥および水分含有のベントナイトの熱伝導率の推算法を提案している。その方法は、基本的にベントナイトに空隙が分散され、その空下に水が入ることによって空隙がせばまり熱伝導率が変化するとするもので、基本的な考え方は乾燥および水分含有ベントナイトを分散体として扱っている。ここでは、さらに乾燥および水分含有ベントナイトを母材として、さらに珪砂を分散体と見なして、熱伝導率の推算法について、既存の推算式と比較して測定値をより精度良く推算する式を特定する。

5-1 ベントナイトの熱伝導率

(a)各種推算式

ベントナイトの熱物性値については、すでに幾つかの測定例があり、それらの測定値に基づいて推算式が報告されている。Table 5-1 に各種推算式を示す。坂下・熊田の推算式は熱伝導モデルを構成して求められた唯一の式であり、他の式は母材と分散体の熱伝導率を適当に組み合わせて未定係数を測定値に合うように決めた半実験式である。著者らも、ベントナイトの粒子や充填状態を考えた熱伝導モデルと、種々の乾燥密度と水分含有率で測定されたベントナイトの熱伝導率に基づいて次の推算式を提案した。⁽⁷⁾

$$\lambda_s = \lambda_0 [1 + \{(9.75n - 0.706)S_r\} 0.285n + 0.731] \quad (5-1)$$

ここで、 λ_0 は乾燥ベントナイトの熱伝導率、 n は空隙率である。 λ_0 は次式で与えられる。

$$\lambda_0 = 0.0497 + 0.222(1-n) + 0.968(1-n)^2 \quad (5-2)$$

式(5-1)および(5-2)で水の熱伝導率が含まれていないのは、水の熱伝導率の温度による緩衝材の熱伝導率への影響が小さいためである。

5-2 各種相関式と測定値の比較

(a)ベントナイトの本測定値(Table 5-1)と各推算式との比較

Fig.5-1(a)~(d)には本年度の測定値と各相関式との比較を示す。比較に用いた測定値および計算結果は Table 4-1に示した。(a)の坂下-熊田の式が水分含有率が飽和に近いデータとの一致は幾分劣るものの、全体的に極めて良く一致している。他の推算式が測定値の変化の傾向が測定値とは異なるが、これは適切な物理モデルに基づいて相関式を求めていることによる。Karhの式(8)は比較的誤差の少ない推算値を

算する。Kiyohashi⁽¹⁰⁾の式では、熱伝導率の小さい領域で、大きすぎる値を推算する。

Table 5-1 Correlations Predicting Thermal Conductivity of Bentonite

	Correlation
Sakashita and Kumada ⁽⁷⁾	$\lambda_{b,e}/\lambda_0 = 1 + \{(9.750n - 0.706)S_r\}^{0.285n+0.731}$ $\lambda_0 = 0.0497 + 0.222(1-n) + 0.968(1-n)^3$
Kahr ⁽⁸⁾	$\lambda_{b,e} = -0.56 + 0.6\rho_m + 0.4\rho_m^3 \{w/(w+1)\}$
Knutsson ⁽⁹⁾	$\lambda_{b,e} = \lambda_0 + K_e(\lambda_1 - \lambda_0)$ $\lambda_0 = 0.034n^{-2.1}$ $\lambda_1 = 0.56n^2(1-n)$ $K_e = 1.0 + \log_{10} S_r$
Kiyohashi ⁽¹⁰⁾	$\lambda_{b,e} = (1/\phi_s)^{\phi_a/(\phi_a+\phi_w)} \{\lambda_s\phi_s + \lambda_w(1-\phi_s)\}^{\phi_s} \lambda_w^{\phi_w} \lambda_a^{\phi_a}$ $\lambda_s = 5.71 \left\{ \exp(-1.29 \times 10^{-3}T) \exp(-1.79 \times 10^{-4}\rho_d) \right\}^{0.5}$

ここで、 $\lambda_{b,e}$ ：ベントナイトの熱伝導率、 n ：空隙率、 S_r ：飽和度、 ρ_m ：平均密度(g/cm³)、 w ：含水比、 ϕ_a ：空気の体積率、 ϕ_s ：固相の体積率、 ϕ_w ：水の体積率、 λ_w ：水の熱伝導率、 λ_a ：空気の熱伝導、 T ：温度(°C)、 ρ_d ：乾燥密度(Kg/m³)である。

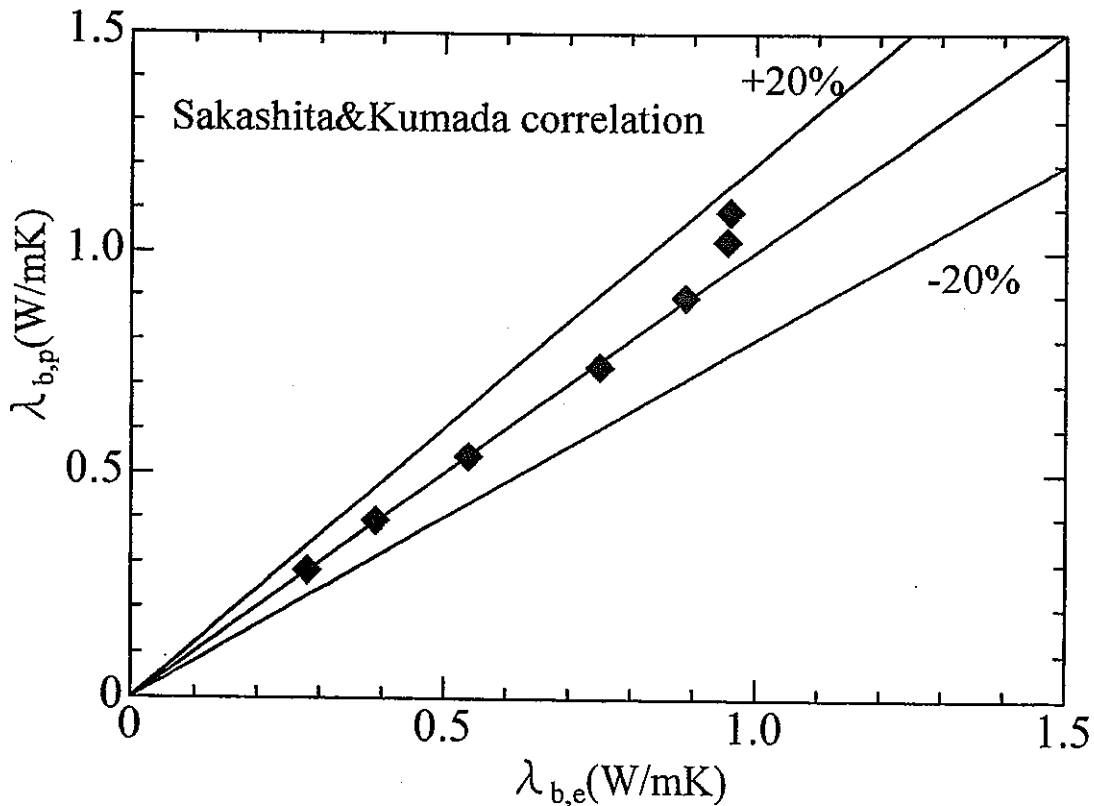


Fig.5-1(a) Sakashita-Kumada correlation

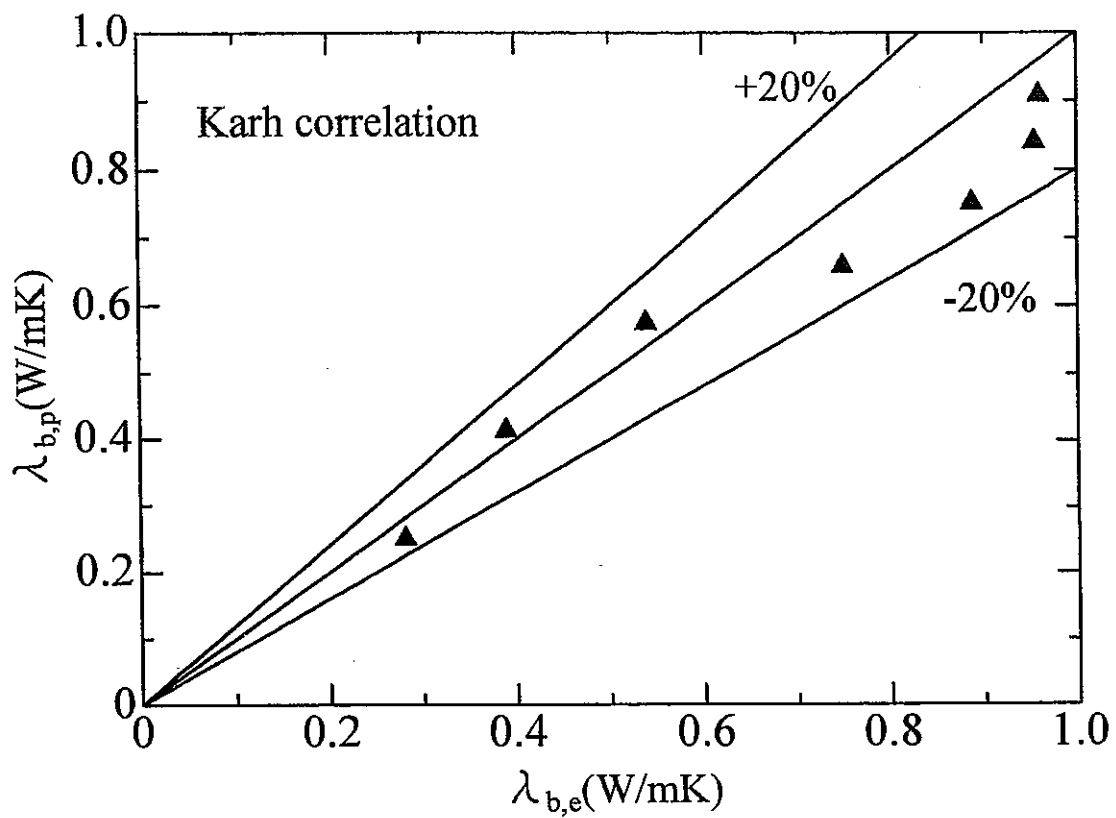


Fig.5-1(b) Karh correlation

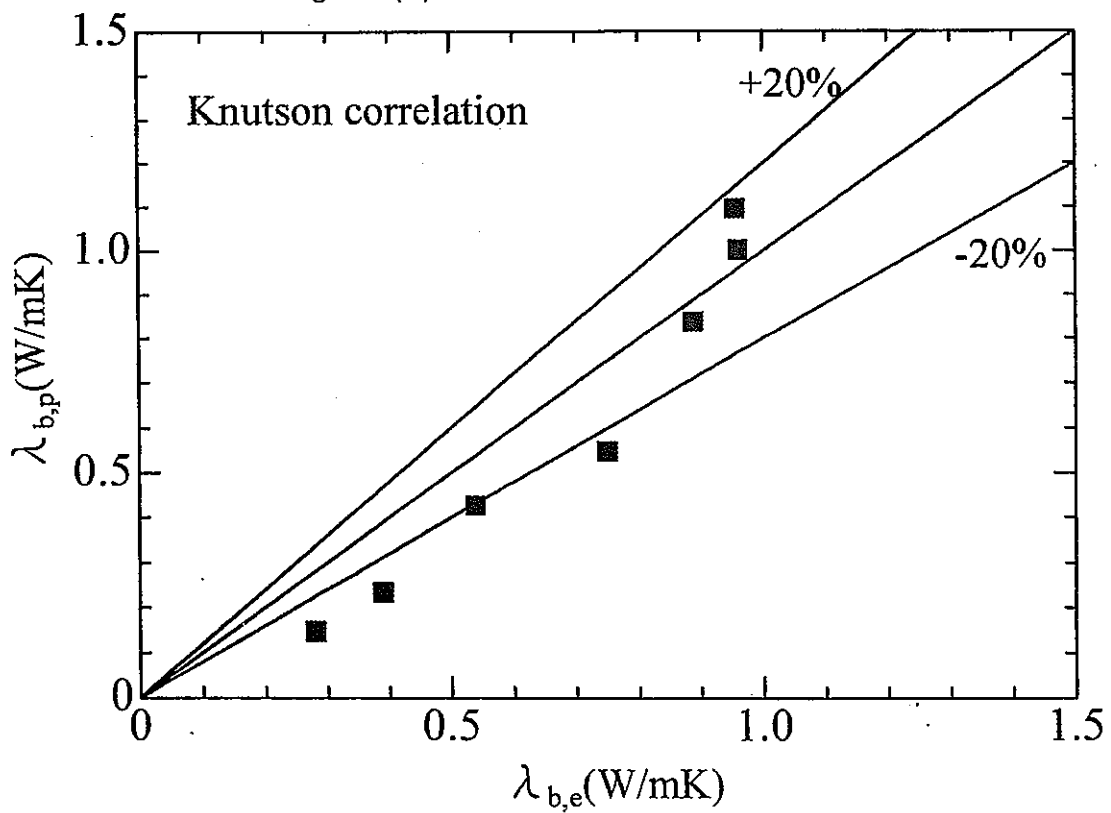


Fig.5-1(c) Knutsson correlation

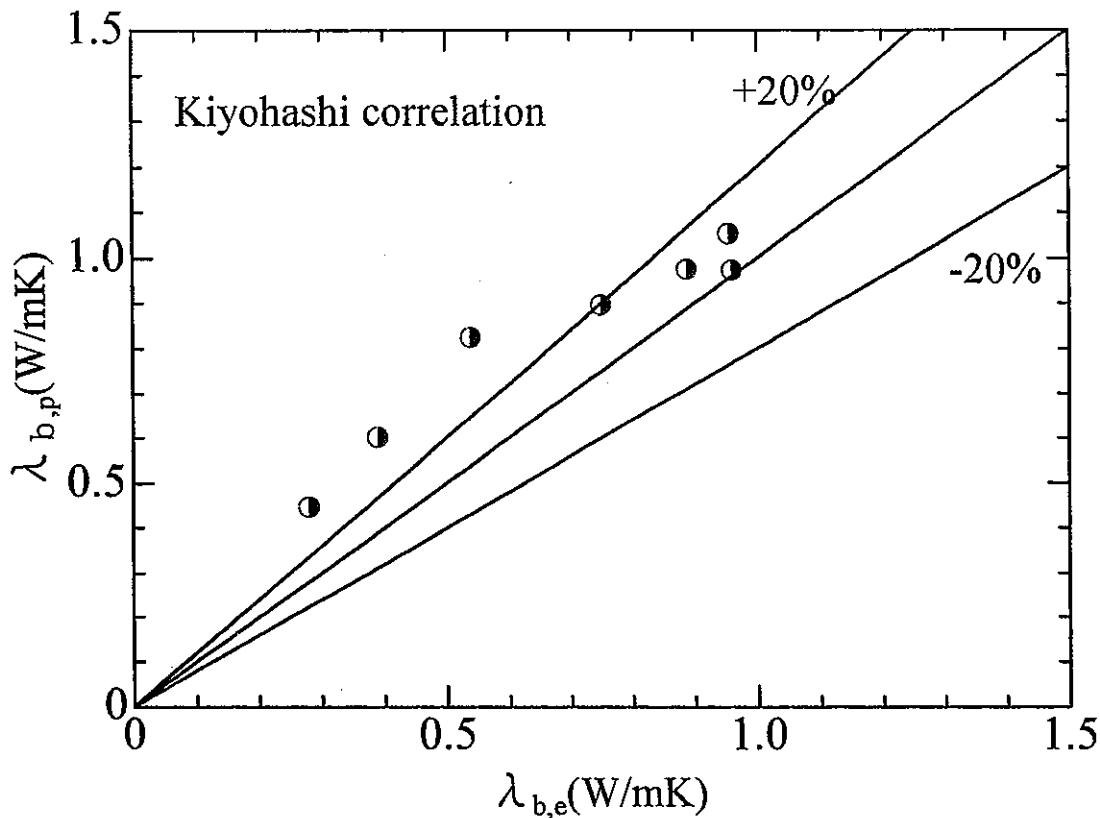


Fig.5-1(d) Kiyohashi correlation

(b)水分飽和度に対するベントナイトの熱伝導率の変化

パラメータとして、乾燥ベントナイトの密度 (n : 空隙率)、水分飽和度 (S_r , %) および珪砂体積率 (P_s , %) があり、これを平面上に表示するには、パラメータの一つをある範囲に限定し、さらに一つをパラメータとして、残りのパラメータを横軸に、縦に測定値 $\lambda_{b,e}$ を表示する必要がある。ここでは、空隙率 n を4つの領域に分けて、水の飽和度と横軸として、ベントナイトの熱伝導率 $\lambda_{b,e}$ をFig.5-2(a)~(d)に示す。比較に用いたベントナイトの推算式は Table 4-1 に示す通りである。また、本測定値以外の測定値は、文献(2)に用いた測定値と同じである。それぞれの推算式はある程度測定値に合うが、全体として坂下-熊田 の式が最も測定値によく一致している。Karh の式は空隙率の低い領域で小さめの値を推算し、空隙率の大きい領域では比較的精度良い値を推算するが、乾燥ベントナイトまたは水分含有率は低い領域で小さい値を推算する。Knutssonの相関式は水分飽和度の低い領域で測定値の2分1程度の値を推算する。また、Kiyohasyiの相関式は水分含有率が低い領域では大きめ、高い領域では小さめの値を推算する。

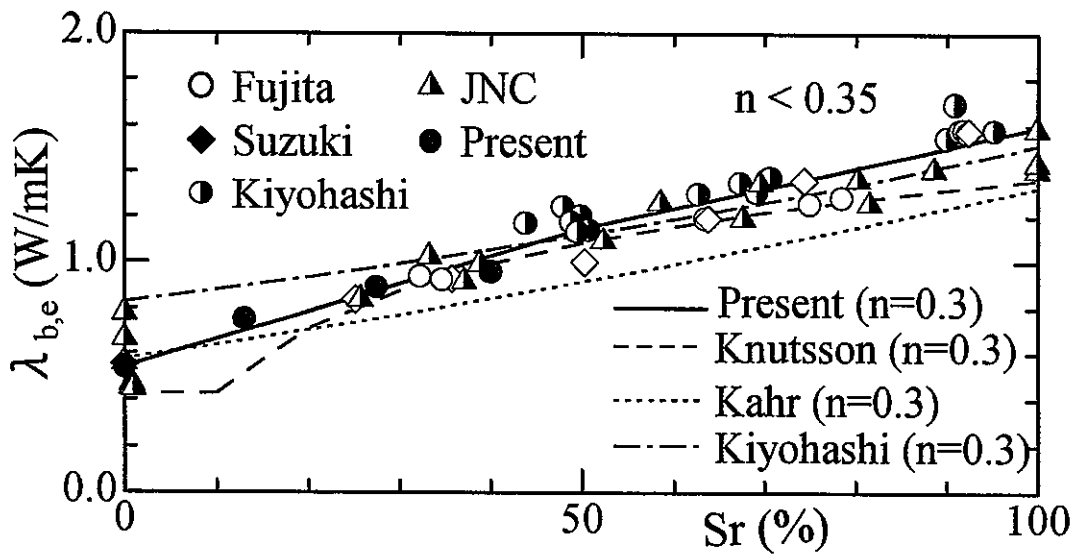


Fig.5-2(a) $n < 0.35$

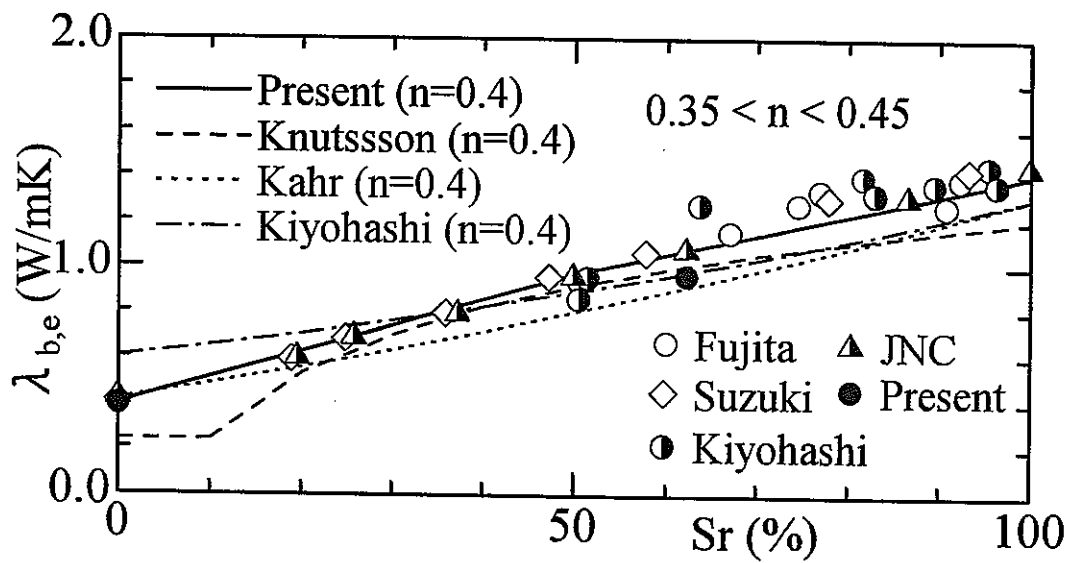


Fig.5-2(b) $0.35 < n < 0.45$

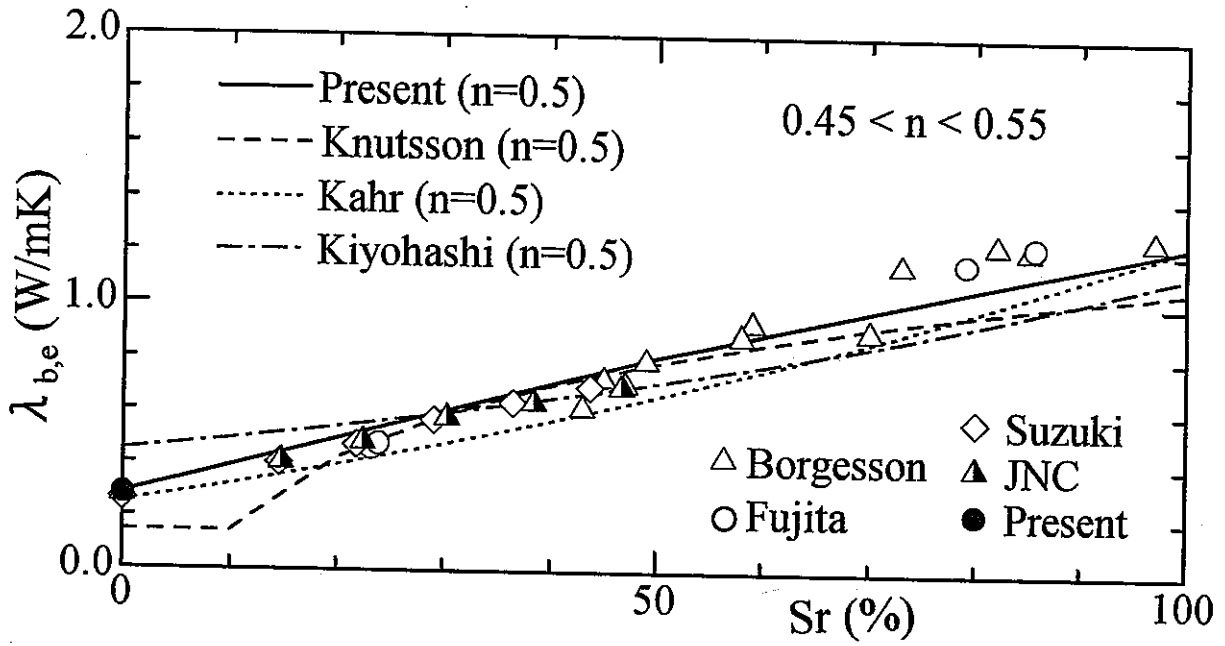


Fig.5-2(c) $0.45 < n < 0.55$

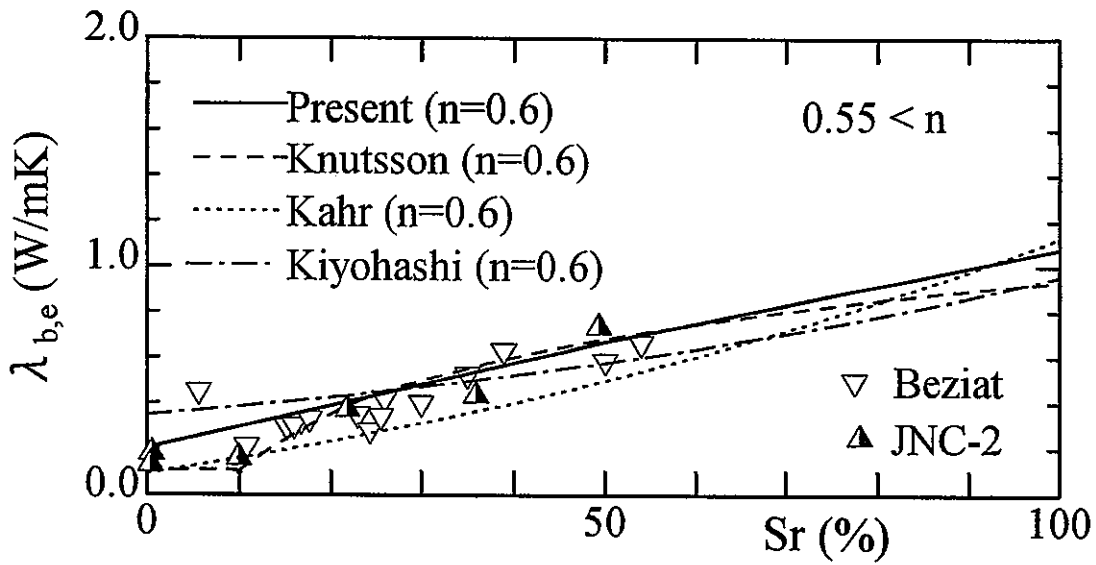


Fig.5-2(d) $0.55 < n$

5-3 各種推算式⁽⁴⁾

任意の形状の分散体をランダムに分散した場合の熱伝導率の推算式は、式(5-3)のように表されることが多い。

$$\text{基礎式: } \lambda_{c,b} = \lambda_b \{x + \kappa - xP_a(1-\kappa)\} / \{x + \kappa + P_a(1-\kappa)\} \quad (5-3)$$

ここで、 λ_b は連続媒質、本稿ではベントナイトの熱伝導率、 λ_c は推算値、 $\kappa = \lambda_c / \lambda_b$ 、 λ_b : 珪砂の熱伝導率、 x : 分散体の形状係数、 P_a : 分散体の体積率。

(1) Maxwellの式 : 式(5-3)において $x=2$ とする式 (5-4)

(2) Bruggemanの式 : $(\lambda_{c,b} / \lambda_b)^{1/3} (1-P_a) = \{\kappa - (\lambda_{c,b} / \lambda_b)\} / (\kappa - 1)$ (5-5)

(3) Frickeの式 : 式(5-3)の x に次式を用いる。

$$x = -\{(\kappa - 1) - \kappa \beta\} / \{(\kappa - 1) - \beta\} \quad (5-6)$$

$$\beta = (1/3)[2/\{1 + (\kappa - 1)M/2\} + 2/\{1 + (\kappa - 1)(1-M)\}](\kappa - 1)$$

$$\cos \theta = a/b, \quad M = [\{\theta - (1/2)\sin 2\theta\} / (\sin \theta)^3] \cos \theta$$

ここで、 a は回転軸方向半径、 b はそれに垂直な方向の半径である。

(4) Johnsonの式 : $(\lambda_c / \lambda_b)^{1/(x+1)} (1-P_a) = \{\kappa - (\lambda_c / \lambda_b)\} / (\kappa - 1)$ (5-7)

ここで、 x はFrickeの式における x と同じ値を用いる。

(5) Yamadaの式 : 式(5-3)の x に次式を用いる。

$$x = 2.0(a/K)^{n_1} (b/K)^{n_2} (c/K)^{n_3} \quad (5-8)$$

$$K = (a \cdot b \cdot c / P_a)^{1/3}, \quad n_1 = -1.4, \quad n_2 = 1.3, \quad n_3 = 1.$$

ここで、 a, b, c はそれぞれ直方体の辺長である。Maxwellの式は、球状分散体の希薄分散体積率の場合であり、Bruggemanの式は、Maxwellの式を高分散体積率まで適用できるように改良した式である。また、Frickeの式は、回転楕円体をランダムに分散した場合の式で、ランダムな分散を x, y, z 軸に分散体の3分の1の回転軸を揃えた場合の分散状態に置き換え、Maxwellの式に相当する解を求め、これらの効果を重ね合わせた式である。Johnsonの式は、Frickeの式をBruggemanと同様の方法で高分散体積率まで適用できるように改良した式である。Yamadaの式は、形状が直方体の分散体を1個、立方体状の電解質中に入れて、種々の向きについて導電率を測定したり、数値計算によって形状効果や熱伝導率比の分散物質の熱伝導率への影響を調べて求めた式である。

5-4 珪砂の形状の回転楕円による近似 Frickeの式は、回転楕円体の回転軸が、全体の熱流の方向と平衡または垂直に置かれた場合について、Maxwellの解析手法によ分散体が回転楕円体の場合の熱伝導率を求めたものである。回転楕円体がランダムに分散している状態を近似するため、楕円体の回転軸に平行な分散体が3分の1、残りは

それに垂直に分散しているとして求めた式である。したがって、Fig.5-1 に示すように、珪砂に適用する場合には珪砂を回転楕円体に近似する必要がある。

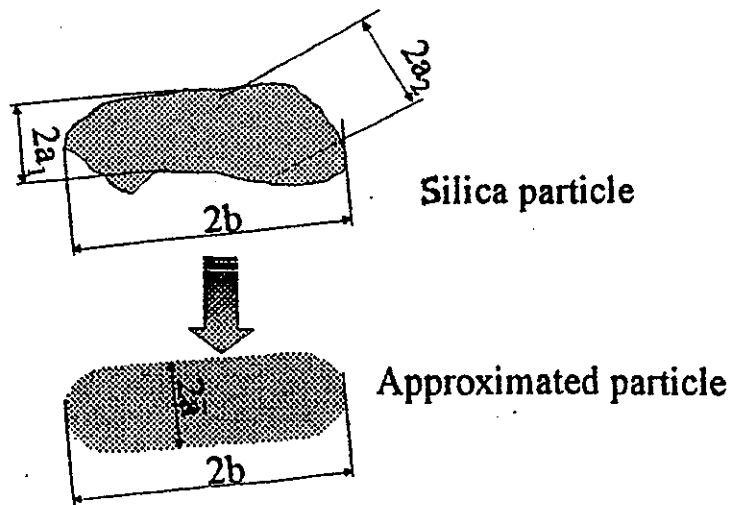


Fig.5-3 Ellipsoid of revolution simulating the shape of sand particles

5-5 珪砂混合緩衝材の熱伝導率

(a) 本測定値と各種推算式の比較

Table 5-1、5-2および5-3 に各種推算式の計算値を示す。ベントナイトの熱伝導率の推算には坂下・熊田の式(1)を用いた。珪砂の粒子の平均形状に基づいて、熊田の方法で等価な回転楕円体に置き換えて形状係数 x を求めている。FFig.5-4(a)~(e)に本測定値(Table 4-2)と各種推算式の比較を示す。珪砂の熱伝導率とベントナイトの熱伝導率の差が小さく、珪砂分散による熱伝導率の増加は、母材であるベントナイトのそれに比べて本実験の範囲では3倍を越えることはない。したがって、各推算式の値が測定値と著しく大きな差を生じることはないが、Fig.5-3(a)のMaxwellの式では分散体積率が高くなると当然のことながら、推算値測定値より小さくなっている。Fig.5-3(b)の体の効果Bruggemanの式は球状分散体の高分散体積率に適用する式であるが、分散体の効果を過大に見積もる傾向にあり、この場合はその効果と珪砂が球状でないことの効果が一致して、測定値によく一致する値を推算している。Fig.5-3(c)のFrickeの式では、珪砂の形状を熊田の方法で回転円盤($a/b=0.369$)で近似すれば、測定誤差の範囲で測定値と推算値はよく一致する。Fig.5-3(d)のJohnsonの式では、形状係数としてFrickeの式と同じ式を使い、Bruggeman式と同じ手法で熱伝導率を求めている。したがって、Johnsonの式では熱伝導率が大きい領域、すなわち分散体積率の大きい領域で、分散を過大に見積もることになる。Fig.5-3(d)では、熱伝導率の大きい領域、すなわち分散体積率の大きい領域で、推算値は測定値より大きくなっている。Yamadaの

推算式は、測定値に比べて大きな推算値を与え、とくに分散体積率が大きい領域で著しく大きな値を与える。

Table 5-1 Data by present measurement

Sample number	ρ_d (g/cm ³)	n	Sr(%)	Ps(%)	$\lambda_{m,e}$ (W/mK)	$\lambda_{b,p}$ (W/mK)	$\lambda_{bd,p}$ (W/mK)	$\lambda_{m,e}/\lambda_b$	$\lambda_{m,e}/\lambda_{bd,p}$
1	2.04	0.3	0	13.6	0.687	0.537	0.537	1.279	1.279
2	2.04	0.3	1.4	13.6	0.742	0.569	0.537	1.304	1.381
3	2.05	0.3	4.2	13.6	0.788	0.614	0.537	1.283	1.467
4	2.06	0.3	9.0	13.6	0.870	0.681	0.537	1.277	1.620
5	2.08	0.3	15.7	13.6	0.955	0.764	0.537	1.250	1.778
6	2.11	0.3	25.6	13.6	1.080	0.876	0.537	1.232	2.011
7	2.17	0.3	45.0	13.6	1.298	1.074	0.537	1.208	2.417
8	2.12	0.3	0	21.2	0.807	0.537	0.537	1.502	1.502
9	2.17	0.3	17.0	21.2	0.994	0.779	0.537	1.275	1.851
10	2.20	0.3	27.0	21.2	1.242	0.891	0.537	1.393	2.312
11	2.20	0.3	29.2	2.12	1.247	0.914	0.537	1.364	2.322
12	2.28	0.3	54.5	2.12	1.460	1.164	0.537	1.254	2.718
13	2.32	0.3	0	38.6	1.145	0.537	0.537	2.132	2.132
14	2.35	0.3	10.0	38.6	1.374	0.694	0.537	1.979	2.558
15	2.36	0.3	15.0	38.6	1.384	0.756	0.537	1.830	2.577
16	2.38	0.3	21.4	38.6	1.476	0.830	0.537	1.778	2.748
17	2.43	0.3	38.6	38.6	1.702	1.010	0.537	1.685	3.169
18	2.46	0.3	48.6	38.6	1.749	1.109	0.537	1.577	3.257
19	2.49	0.3	56.3	38.6	1.818	1.181	0.537	1.539	3.385
20	1.78	0.4	0	11.86	0.520	0.392	0.392	1.326	1.326
21	1.80	0.4	6.0	11.86	0.625	0.488	0.392	1.280	1.594
22	1.85	0.4	18.7	11.86	0.823	0.646	0.392	1.274	2.099
23	1.87	0.4	24.0	11.86	0.898	0.705	0.392	1.273	2.290

$\lambda_{m,e}$: Experimental thermal conductivity of mixture measured by C.Ould-lahoucine.

$\lambda_{b,p}$: Predicted thermal conductivity using Sakashita&Kumada correlation.

$\lambda_{bd,p}$: Predicted thermal conductivity using Sakashita&Kumada correlation for the case of dry bentonite.

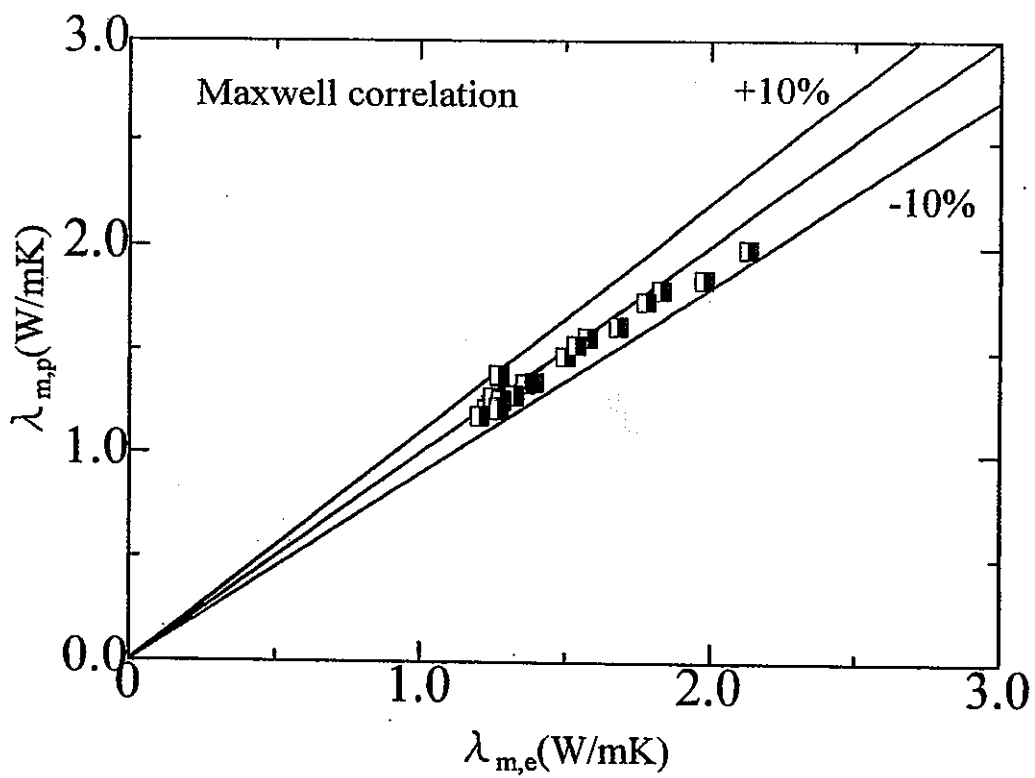


Fig.5-4(a) Maxwellの式

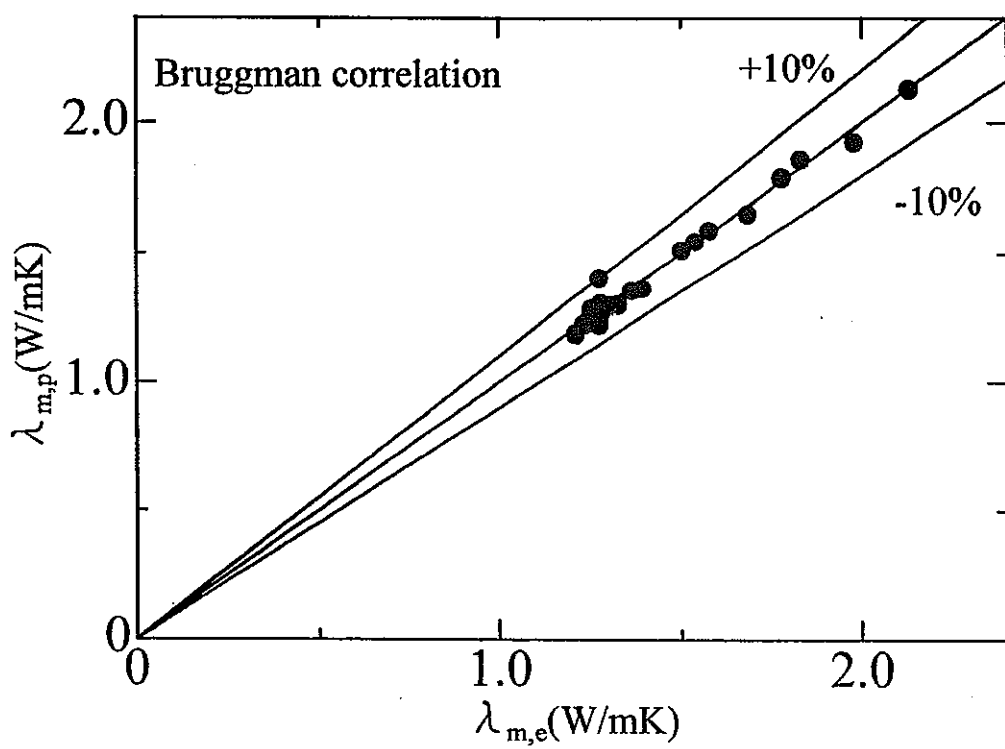


Fig.5-4(b) Bruggemanの式

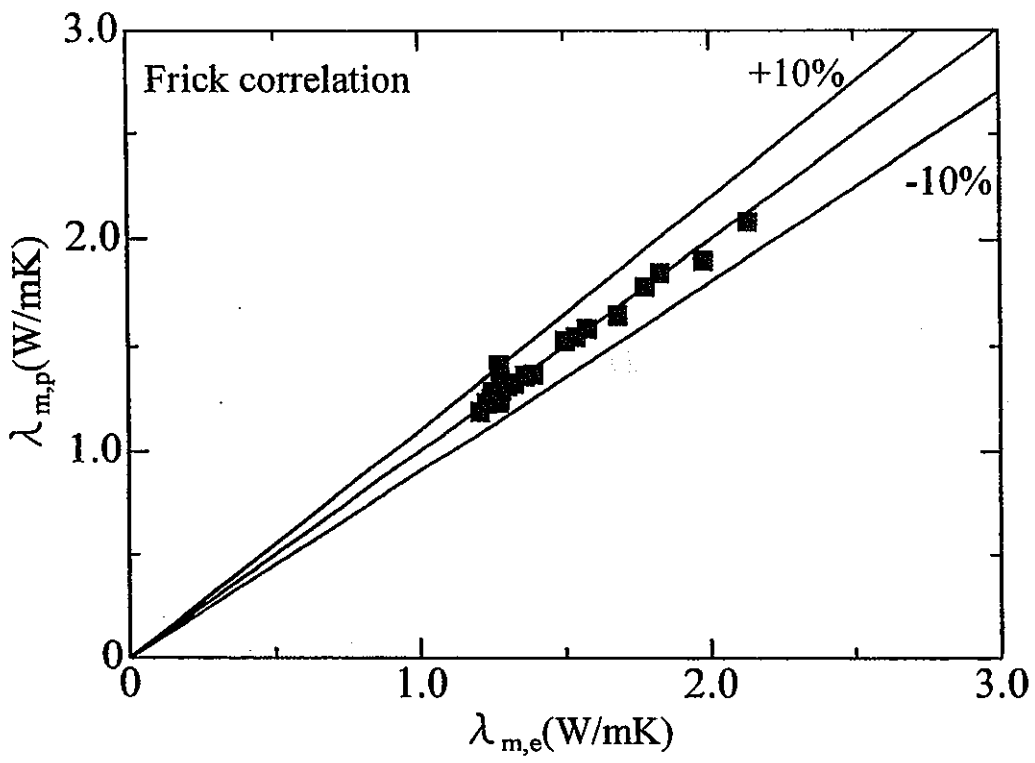


Fig.5-4(c) Fricke correlation

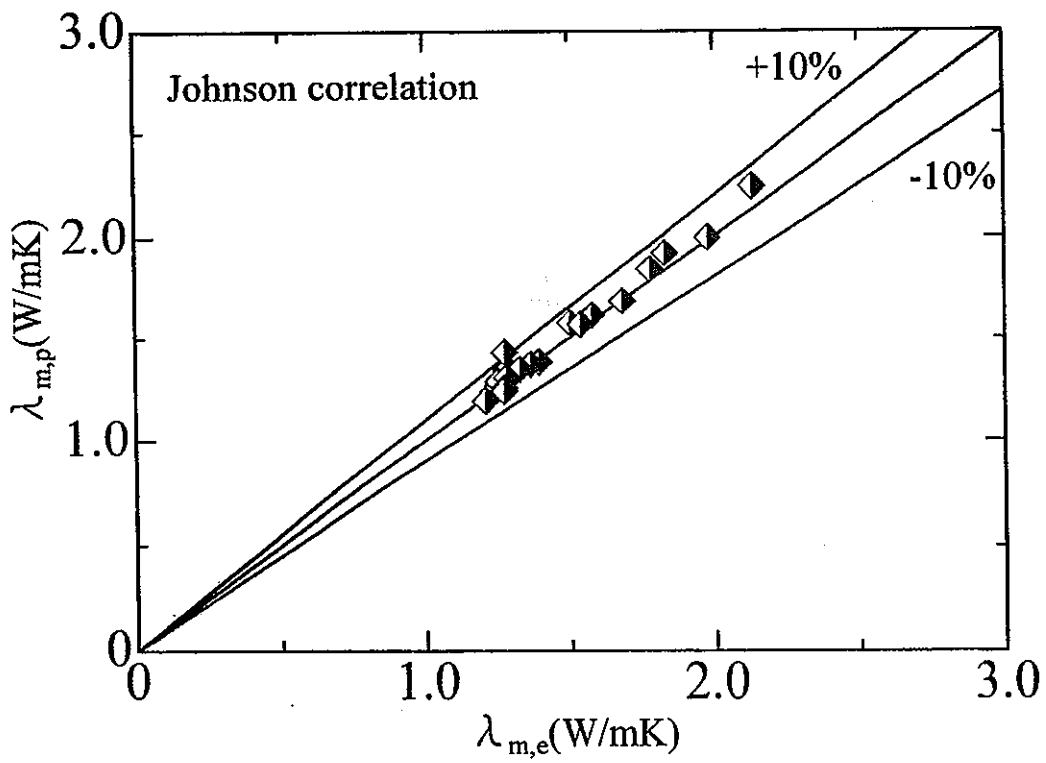


Fig.5-4(d) Johnson correlation

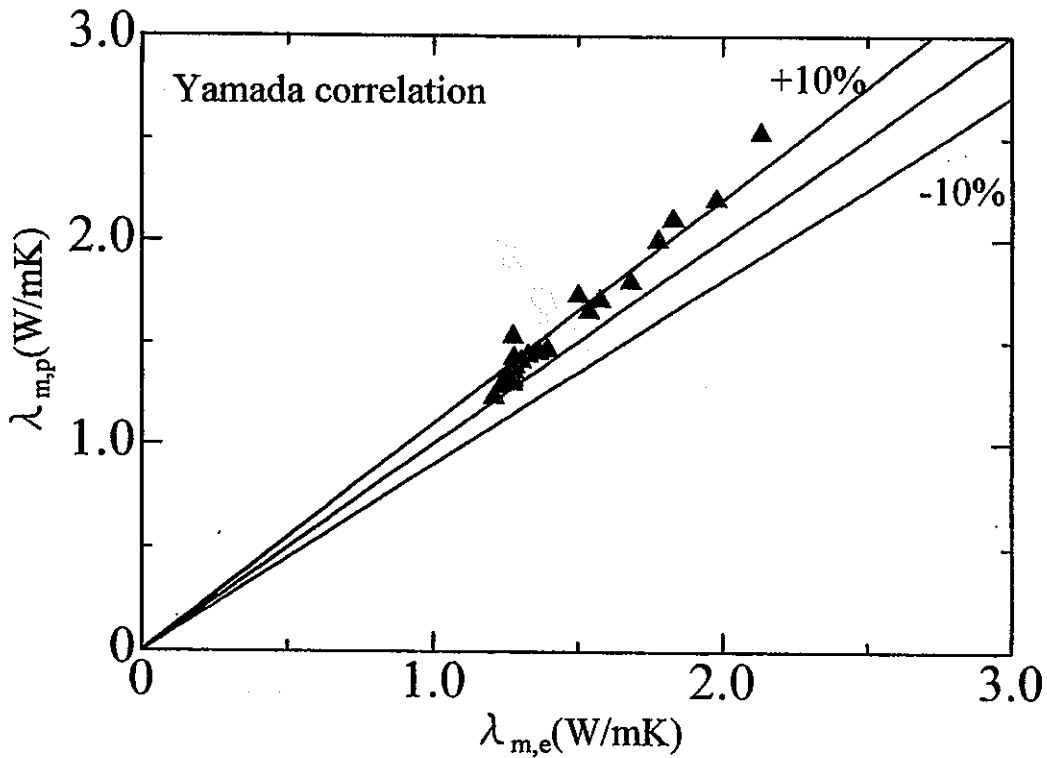


Fig.5-4(e) Yamada correlation

(b) 既存の測定値と推算式との比較

Fig.5-5(a)~(e)に既存の測定値と本測定値を合わせて各種推算式との比較を示す。測定値にばらつきがあり、かつ珪砂の分散体積率の高い領域の測定値は本測定のみであるが、この場合もBruggeman とFrickeの推算式が測定値に良く一致する推算値を与えている。低分散体積率の領域で、KiyohashiとPNCの測定値が推算値よりかなり大きくなっており、本測定値も幾分同じような傾向があるが、分散体積率と水分含有率の低い領域での測定法に起因する誤差かもしれない。

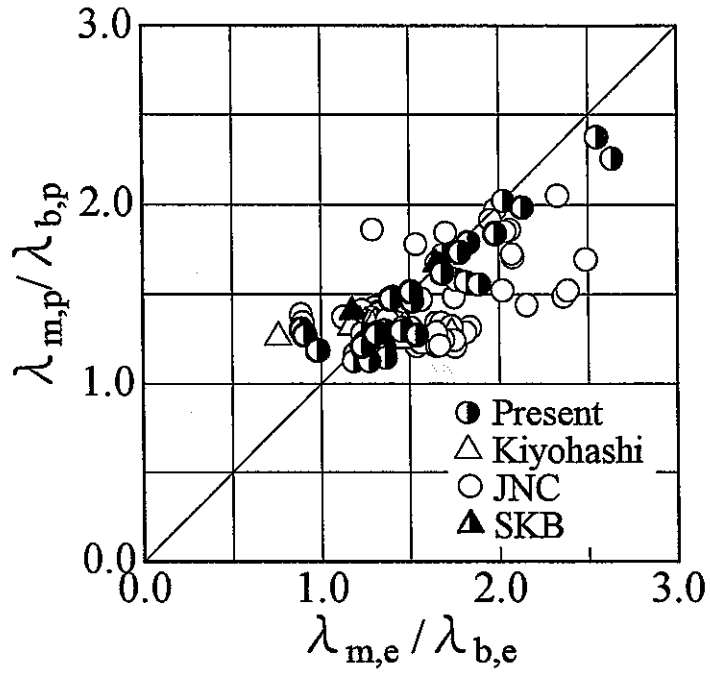


Fig.5-5(a) Maxwell correlation

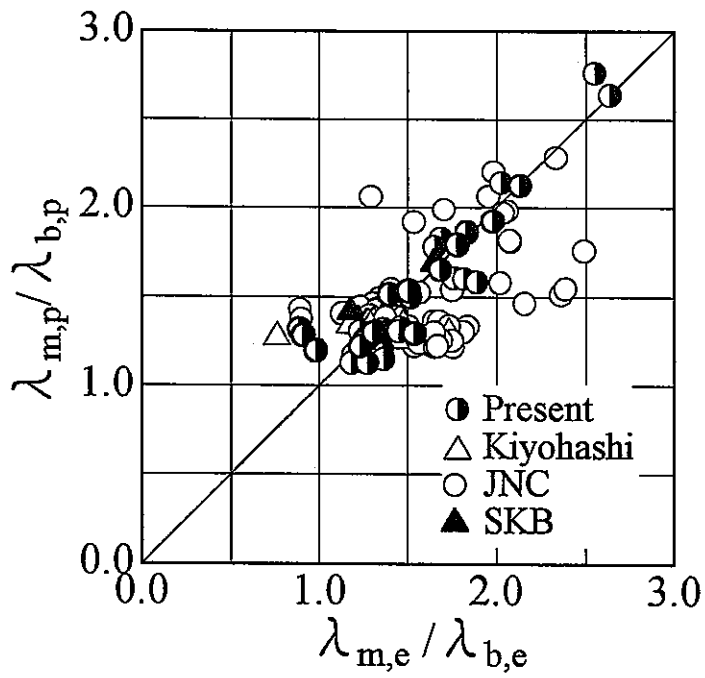


Fig.5-5(b) Bruggeman correlation

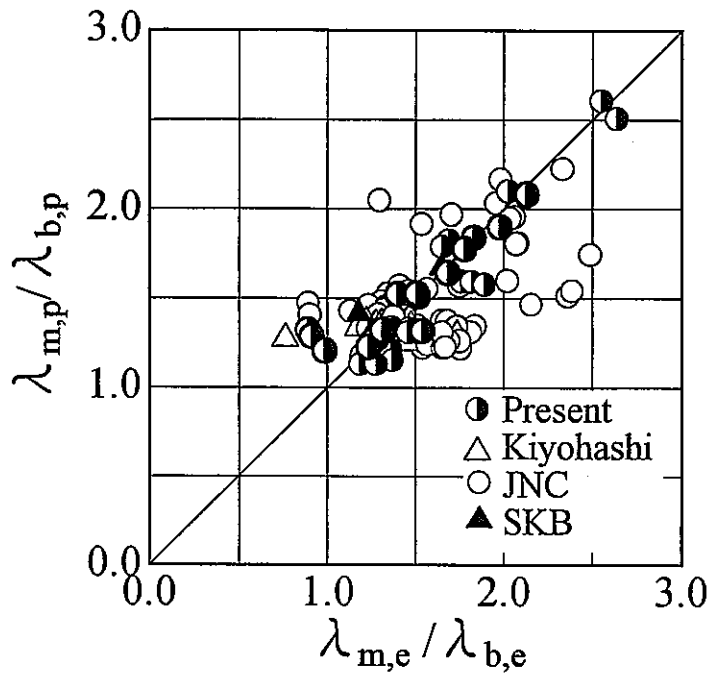


Fig.5-5(c) Fricke correlation

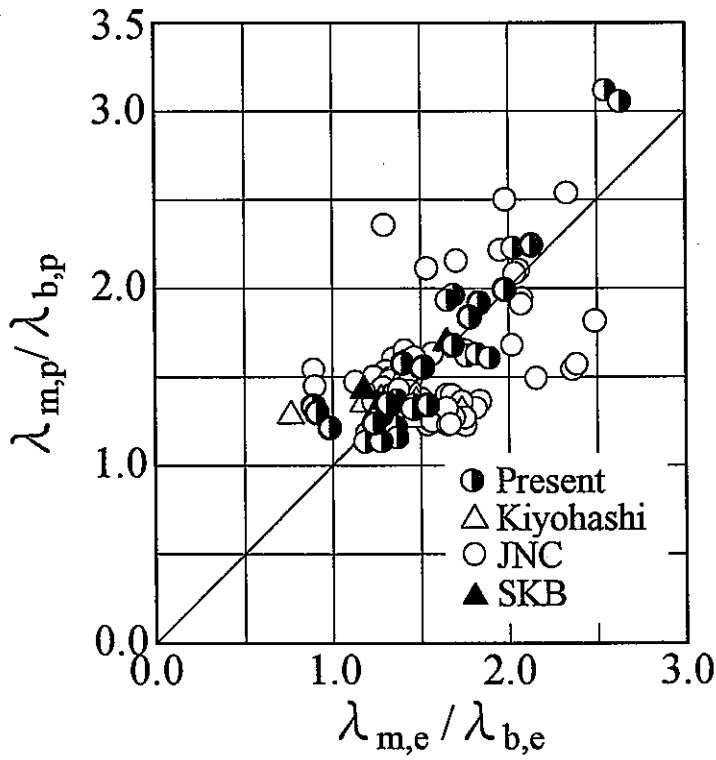


Fig.5-5(d) Johnson correlation

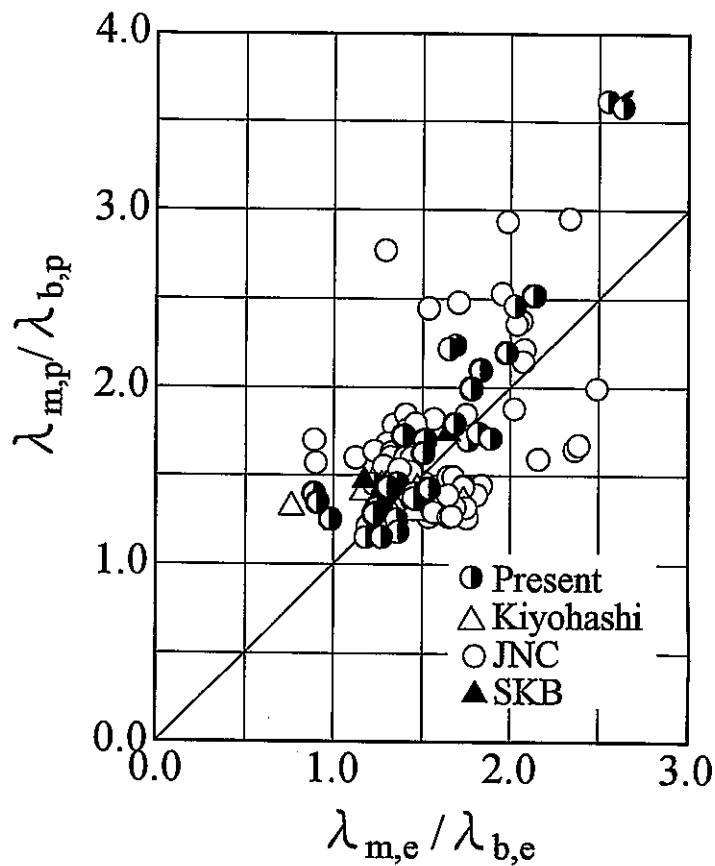


Fig.5-5(e) Yamada correlation

(c) 熱伝導率の特徴

(i) $\lambda_m - S_r$

Fig.5-6(a)~(c)に空隙率の一定範囲について珪砂体積率をパラメータとして水分飽和度に対して熱伝導率を示す。またFig.5-(d)には、(a)から(c)までの測定値をまとめて示す。各図とも水分飽和度 S_r や珪砂の体積率増加に対して熱伝導率は単調に増加している。また、著者とJNCのデータの傾向はほとんど一致している。Fig.5-(a)~(d)の図中に用いた記号は、以下の通りである。

Ps(%)	Present	Old	JNC	Kiyohashi
0~10%	●	×	×	×
10~20%	▲	×	▲	×
20~30%	■	■	×	■
30~40%	◆	◆	×	×
40~50%	×	▼	×	×

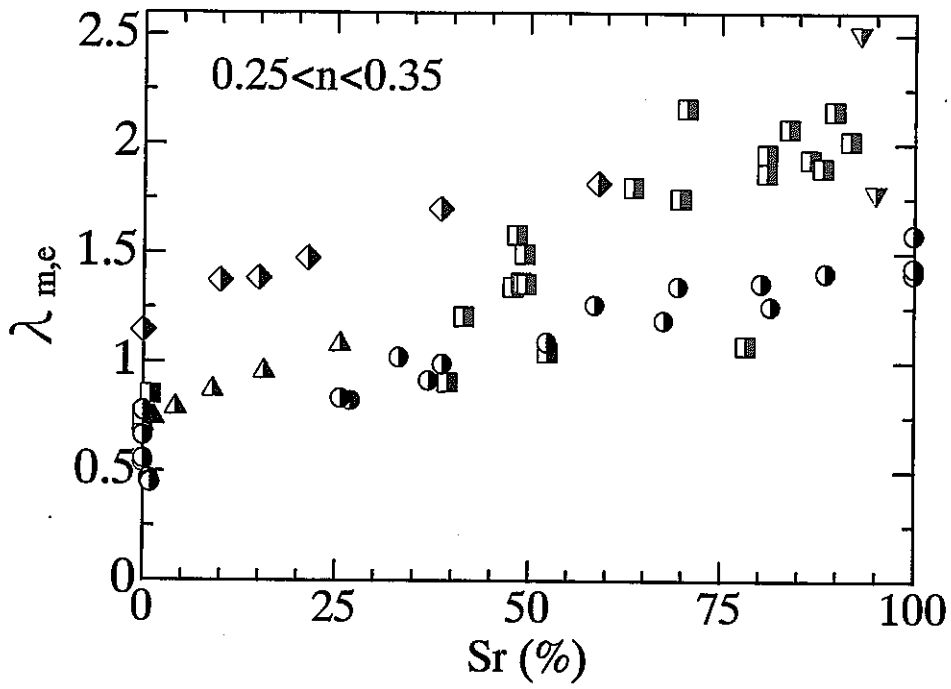


Fig.5-6(a) 0.25 < n < 0.35

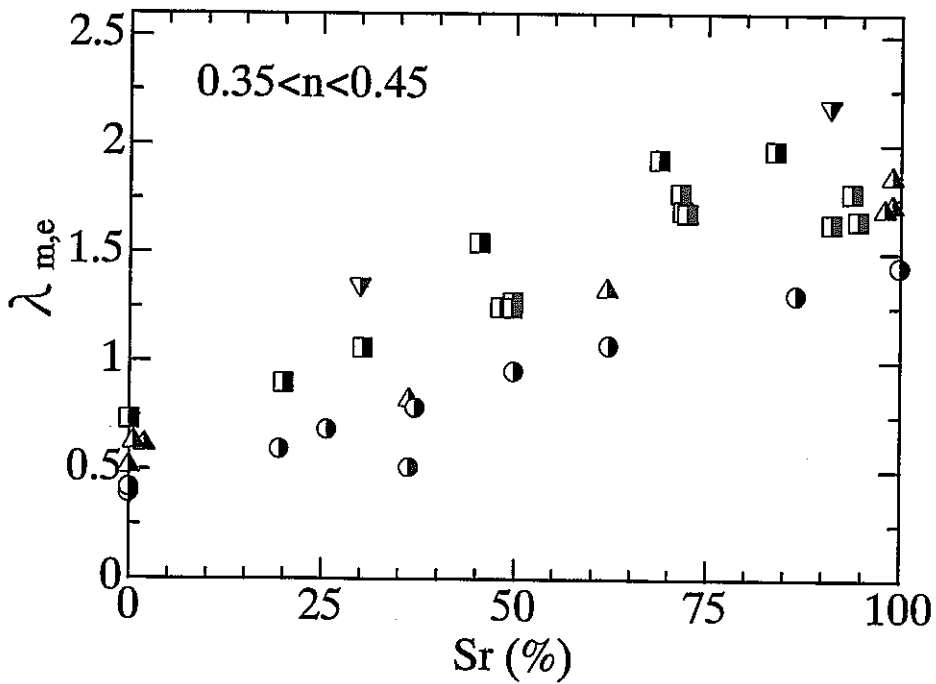


Fig.5-6(b) 0.35 < n < 0.45

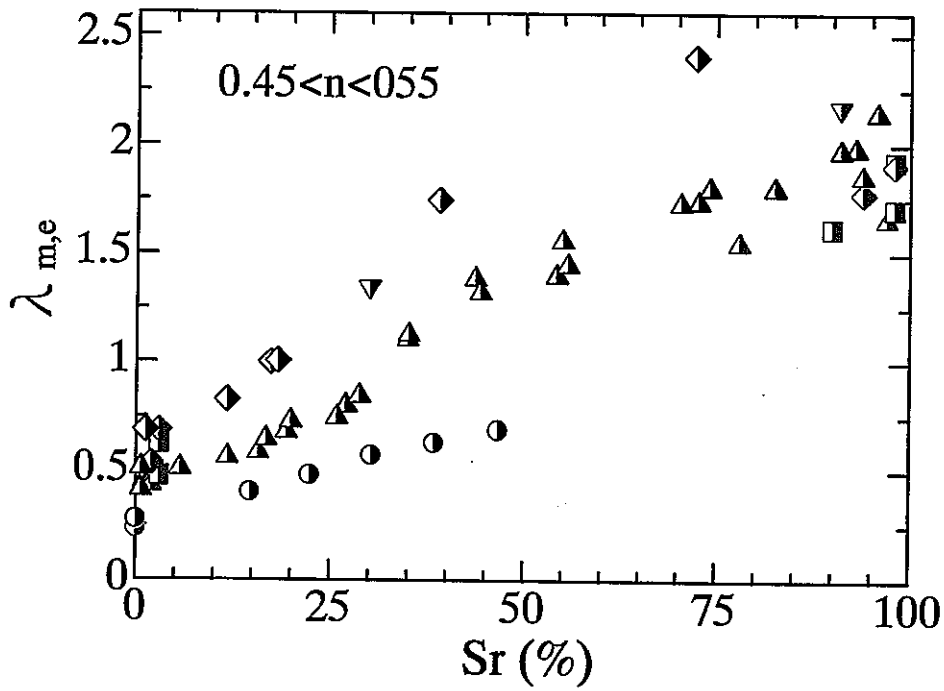


Fig.5-6(c) 0.45 < n

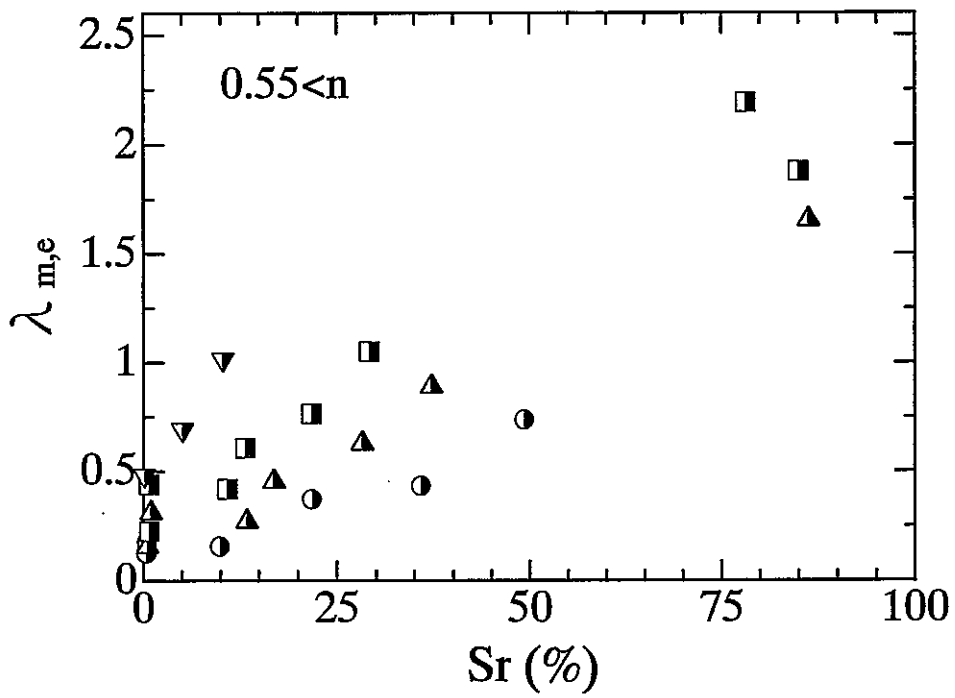


Fig.5-6(d)

(ii) $\lambda_m - P_s$

Fig.5-7(a)~(c)は珪砂体積率 P_s に対して水分飽和度をパラメータとして λ_m を示す。Fig.5-7(a)~(c)では、測定値が珪砂のある体積率の偏っているため、傾向はわかりにくい、基本的には前図と同様で、珪砂体積率が一定の場合には、水分が増加するにつれて熱伝導率は単調に増加している。またFig.5-7(d)には、(a)から(c)までの測定値をまとめて示す。Fig.5-(a)~(d)の図中に用いた記号は、以下の通りである。

Sr(%)	Present	Old	JNC	Kiyohashi
Dry	○	×	×	×
0~5%	●	●	●	×
5~10%	◐	×	×	×
10~20%	△	×	×	×
20~30%	▲	▲	×	×
30~40%	▲	×	▲	×
40~60%	□	×	□	□
60~80%	×	■	■	■
80~100%	×	■	■	■

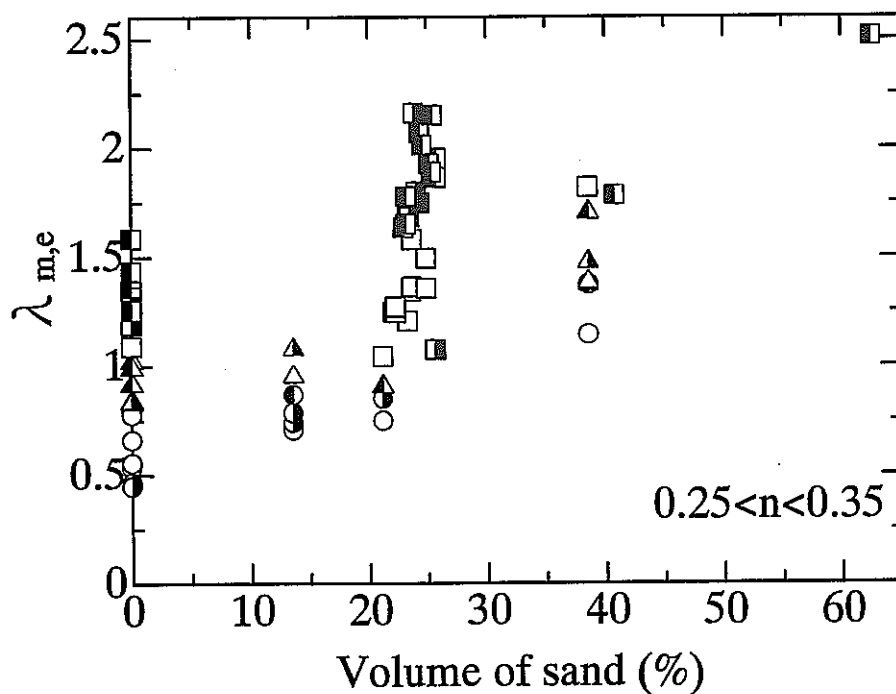


Fig.5-7(a) $0.25 < n < 0.35$

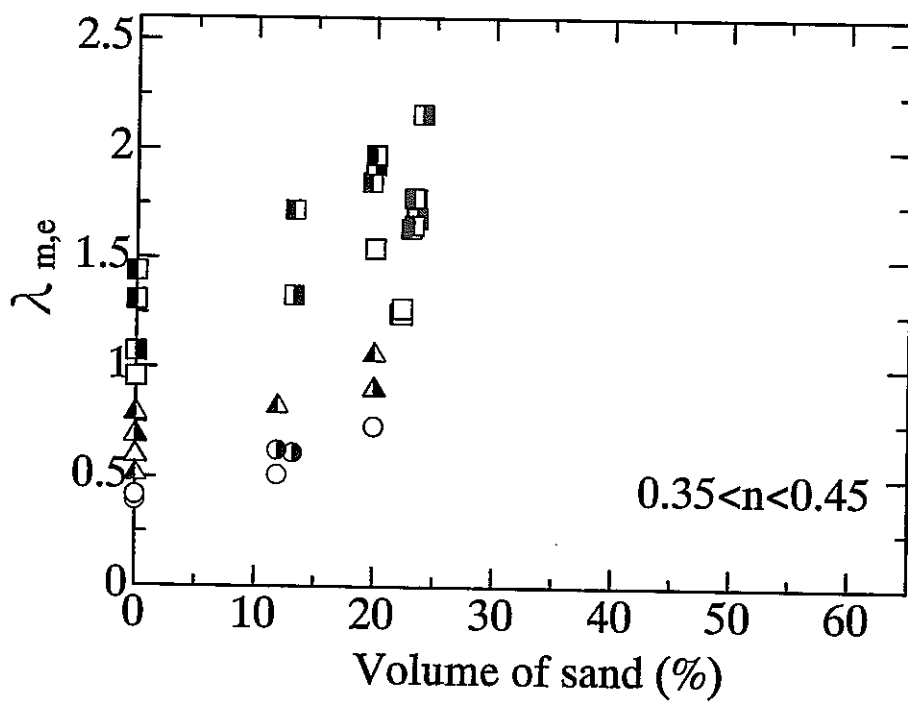


Fig.5-7(b) $0.35 < n < 0.45$

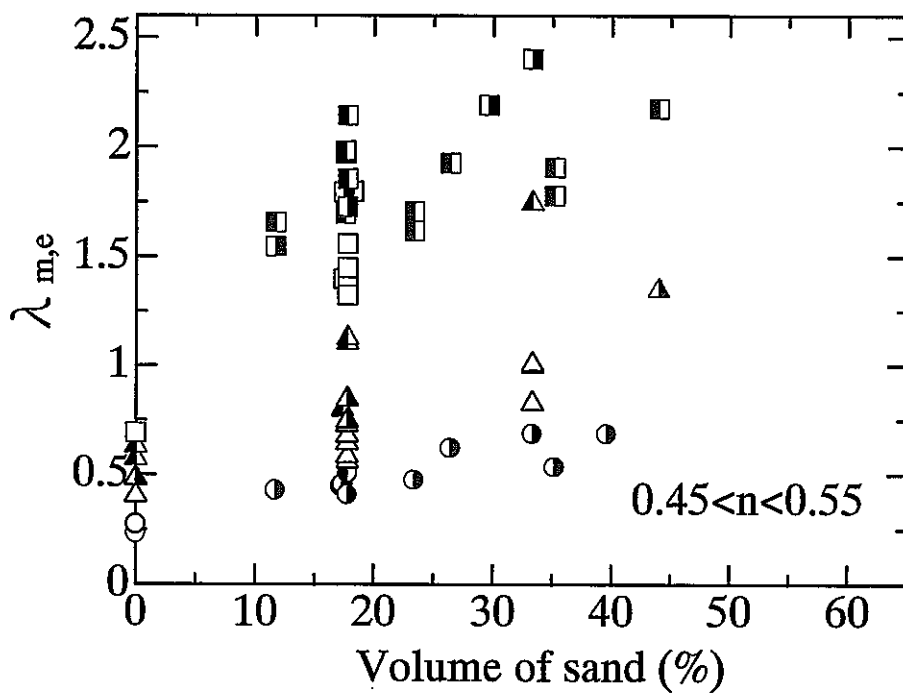


Fig.5-7(c) $0.45 < n < 0.55$

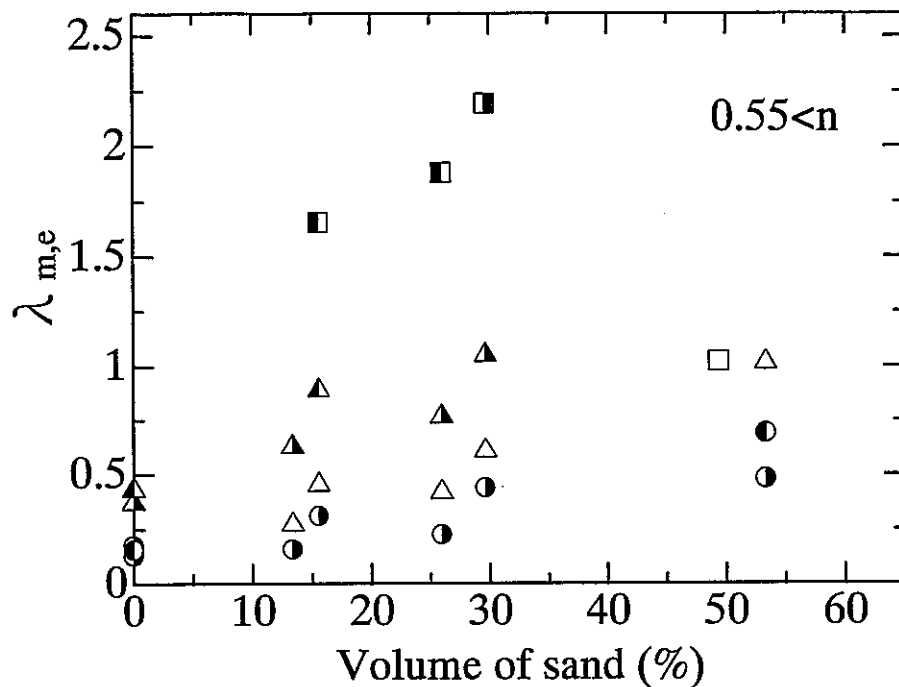


Fig.5-7(d) $n > 0.55$

(iii)乾燥珪砂混合材の熱伝導率

乾燥珪砂混合緩衝材を分散体と見なせるか、について検討しよう。JNCの研究で乾燥混合材の密度を一定とすれば、熱伝導率は珪砂の混合率に依存しないという結果が報告されている。この結果と乾燥珪砂混合材の熱伝導率も、ベントナイトに珪砂を分散したとして扱ってよいかを確かめる目的で、密度を一定として珪砂の混合率を変えてFrickeの式によって乾燥混合材の熱伝導率を推算し、測定結果と比較した。Fig.5-8に比較の結果を示す。珪砂の混合率が高く密度の大きい領域では、熱伝導率は珪砂の体積率によって大きく変化する。しかし、密度が1.6以下では珪砂混合率によって熱伝導率はほとんど変化しない。すなわち実際に利用される密度範囲では、JNCの測定結果の通り近似的に密度が一定であれば熱伝導率は珪砂の混合率を変えてもあまり変化しない。

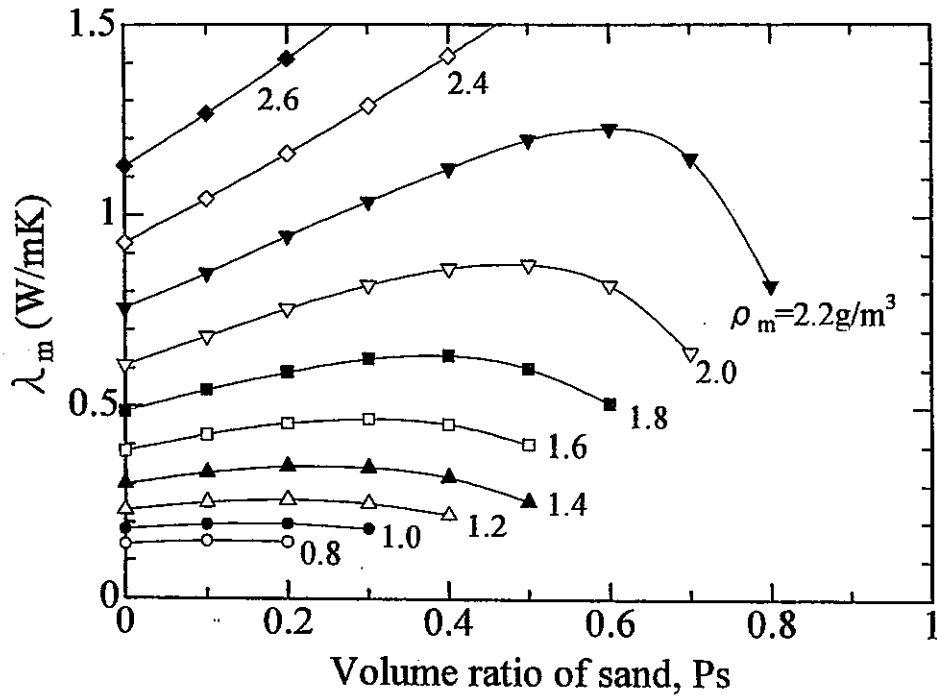


Fig.5-8 Thermal conductivity of dry bentonite

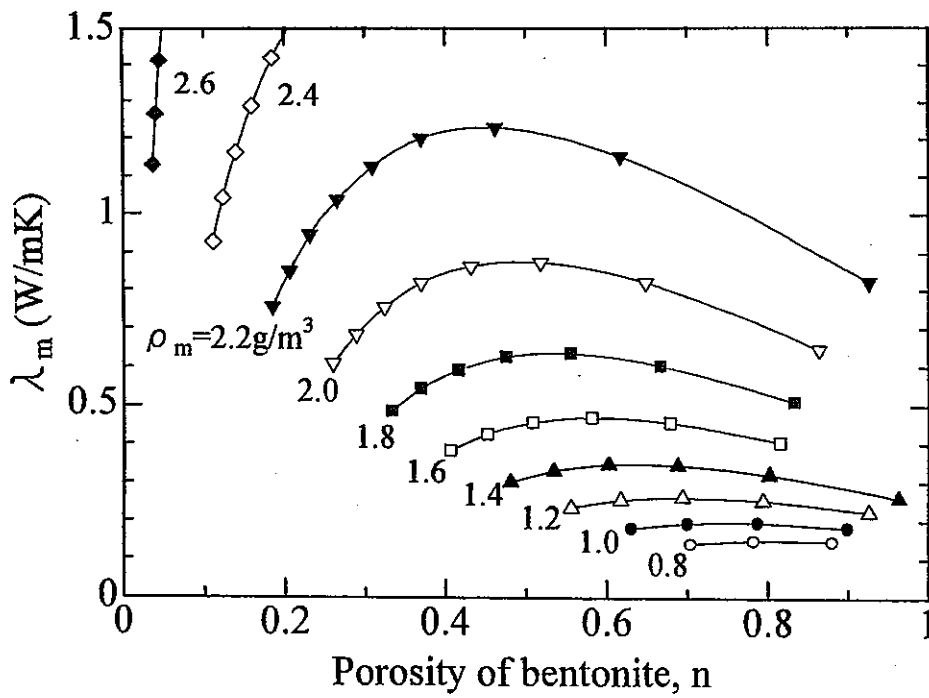


Fig.5-9 Thermal conductivity of dry bentonite

6. 結 言

6-1 測定法の改良点

医学の分野で生体の熱物性値の測定に利用されているサーミスタを点熱源とする測定法を改良して、プローブを含む温度場の正確な熱伝導モデルに基づいてサーミスタの温度を計算し、熱物性値を求める方法を考案し、簡単な回路で精度良く熱物性値を測定した。温度場を数値計算により求めるため、サーミスタ粒子の体積（形状）やガラス被覆の体積（形状）に影響されることなく、市販のサーミスタ素子を点熱源として熱物性値を測定することができる。また、発熱体の発熱率を正確にステップ状発熱とするための複雑な電気回路を必要としない。本測定法の特徴をまとめると以下のようである。

- (a)本測定法の測定誤差に、水を較正物質として使っているため、水の熱伝導率の測定誤差が含まれることは当然であるが、測定誤差は数%以内である。
- (b)試料の寸法は20mm程度であるが、測定時間は3秒から10秒である。したがって、外径が10mm程度の試料でも測定が可能である。また、サーミスタの絶縁に用いるガラス被覆を小さくすれば、測定時間をさらに短くすることができる。
- (c)試料が小さいため、1週間から2週間で水分含有率を変えることができるので、測定用プローブをセットした状態で水分含有率を変えて次々に測定できる。
- (d)温度上昇は1~3°C程度であり、測定時間が短いので測定中に水分移動の心配はない。

6-2 珪砂混合緩衝材の熱伝導率の特徴

ベントナイトおよびベントナイトと珪砂の混合緩衝材の熱伝導率を測定し、測定値を検討した結果以下の結論を得た。

- (a) ベントナイトの熱伝導率の計算では、坂下一熊田の推算式が最も精度良い計算値を与える。
- (b)一定の水分飽和度までは水分含有の効果は小さいとするJNCの最近の結果と違って、本実験では含水率の低い場合でも熱伝導率は水分量増加に対して単調に増加した。
- (c)珪砂混合緩衝材の熱伝導率の推算は、昨年度の報告通りFrickeの式とBruggemanの式により実用上十分な精度で推算できる。
- (d)乾燥珪砂混合緩衝材では、密度が1.6以下では、密度が一定であれば熱伝導率はほぼ一定というJNCの測定結果は、乾燥珪砂混合緩衝材を分散物質としてFrickeの式を適用して確かめられた。

なお、本測定値以外の測定値にはばらつきが大きく、以上の結論は主として本測定

結果に基づくもので、以上の結論をさらに確かなものとするためには、さらに測定を試みる必要がある。とくに珪砂混合緩衝材を分散物質として取り扱うことができることは、水分含有のベントナイトでは当然予想されることであった。さらに乾燥珪砂混合緩衝材でもある程度の精度で分散物質として熱伝導率を推算できることは、本および既存の測定結果による結論である。

記 号

- a_x : 温度拡散率
 c_s : サーミスタの比熱
 c_x : 試料の比熱
 M_s : サーミスタの質量
 n : 空隙率
 P_s : 珪砂混合率(体積%)
 Q : サーミスタの発熱率
 r_o : 熱源の実効半径
 R_s : サーミスタの電気抵抗
 R_o : サーミスタの基準温度における電気抵抗
 S_r : 水分飽和度
 T : 温度
 T_m : サーミスタ平均温度
 ρ_{db} : 乾燥密度
 ρ_M : 混合材密度
 $\lambda_{m,e}$: 珪砂混合緩衝材の熱伝導率測定値
 $\lambda_{b,e}$: ベントナイトの熱伝導率測定値
 $\lambda_{m,p}$: 珪砂混合緩衝材の熱伝導率計算値
 $\lambda_{b,p}$: ベントナイトの熱伝導率計算値

文 献

- 1.熊田俊明(1997),「点熱源法による緩衝材の熱物性値測定法の開発」、動燃研究報告書、PNC ZJ1600 97-004.
- 2.H.Fricke((1924)「A mathematical Treatment of the Electric Conductivity and Capacity of Disperse Systems」Phys.Rev.24,pp.575-587.
- 3.熊田俊明(1975),「分散物質の熱伝導率」、日本機械学会論文集,41巻,第344号,pp.1209-1218.
- 4.F.A.Johnson(1958),「The Thermal Conductivity of Aqueous Thoria suspensions」, A.E.R.E., R/R2578.
- 5.Carlaw and Jaeger(1900)「Heat Conduction in Solids」,pp.232.
- 6.T.A.Balasubramaniam and H.F.Bowman(1977),「Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Biomaterials:A Simultaneous Measurement Technique」transactions of the ASME,vol.99,pp.148-154.
- 7.坂下弘人、熊田俊明(1998),「ベントナイトの熱伝導率推算のための伝熱モデルの提案」、日本原子力学会誌、vol.40,No.3,pp.235-240.5.山田悦郎ほか2名(1979),「分散系混合物の有効熱伝導率に関する実験」、冷凍-第54巻 第626号、pp.973-982.
- 8.G.Karh(1982),M.Mueller-von Moos,「Mwaermeleitfaehigkeit von Bentonit MX80 und Montigel nach
- 9.S.Knutsson(1983),「On the Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of highly Compacted Bentonit」,SKB TR83-72.
- 10.H.Kiyohashi(1997),「Derivation of General Correlation Formula for Effective Thermal Conductivity of Compacted Bentonite by a Three Phased Model」,The Eighteenth Japan Symposium on Thermophysical Properties」,Nara.pp.249-253.
- 11.鈴木英明、谷口航(1992)、PNC TN841092-057,「緩衝材の熱物性試験 (I I)」.
- 12.山田悦郎他2名(1979),「分散系混合物の有効熱伝導率に関する実験」,Refrigeration,vol.54-626, pp.13-22.

F 1 2 次元数値解析プログラム

```

C conductivity-diffusivity. for
C Dumet lead wire is directly connected to the thermistor
C Implicit method is adopted.
C TDMA method and iteration are used for obtaining the solutions
C at each time step
C 00,02/29 by cherif
  DIMENSION DZ(100), Z(0:100), DR(100), R(0:100), AW(0:100, 100)
  1      , AE(0:100, 100), AS(0:100, 100), AN(0:100, 100), B(0:100, 100)
  2      , Q(0:100, 0:100), TX(0:100, 0:100), T(0:100, 0:100)
  3      , AM(100), BM(100), CM(100), FM(100), X(100), S(0:100, 0:100)
  4      , TP(0:100, 0:100)

  COMMON /KK/KB, KG, KS, KC, KA, KP
  COMMON /KKIJ/KI(0:100, 100), KJ(0:100, 100)
  COMMON /MN/MGT, MST, MSE, MGE, MBE, NCE, NCI, NSE, NGE, NBE, NPI
  COMMON /HCAP/H(0:100, 0:100), ROUB, ROUG, ROUS, ROUC, ROUA, ROUP
  1      , GB, CG, CS, CA, CC, CP

  REAL KB, KG, KS, KA, KC, KP, LBL, LG, LS, LP, LBR, KI, KJ, LGL, LGR
  1      , LCU, LTOTAL, TEXP(10000), TEXP1(20000), TPRED(10000), TCAL(10000)
  2      , TDEF(10000), DIVV, DIVV1(10000), DIV, DIVRM, TSAVE, VS, QS
  3      , RC, RA, RP, RS, RB, RG, KBLIM, dz0, dr0, Errlim, err, pai, KBX, KBXR

-----
C
C INPUT THE MEASURED TEMPERATURE DIFFERENCE OF THERMISTER
C
c The files for different experimental data for bentonite are called
c bent-03-s10.dat where 03 and 10 are the porosity and water content
c respectively. If these values are different we just change the name
c of the file according to the new porosity and water content values.
C
  open(21, file='bent-03-s10.dat', status='unknown')
C
c the number of the data to be read corresponds to the actual one
c taken during the experimntation. This number can be known from
c the excel files (raw data).
C
  read(21, *) (TEXP1(k), k=1, 6000)
  close(21)
  WRITE(6, *) 'IBASE= 1 OR 2 ? '
  READ(5, *) IBASE
C*****
C TEMPERATURE ITERATION CONVERGENCE CRITERION AT EACH TIME STEP
  ERRLIM=5.0E-2
C CONVERGENCE CRITERION FOR THEMAL CONDUCTIVITY
  KBLIM=0.01
C
c The limits of the interval of comparison between the experimental data and
c the calculated one are fixed according to the experimental curve obtained
c (temperature increase -vs-time). We just need to check when the steady state
c is reached.
C
  MSTART=50
  MEND=75
C*****
C The file name of the input data is bentonite-mixture.dat

```

```

C -----
C INPUT DATA
C -----
OPEN(9, FILE=' ')
OPEN(3, FILE=' bentonite. dat' )
READ(3, *) KG, KS, KC, KA, KP
READ(3, *) ROUB, ROUG, ROUS, ROUC, ROUA, ROUP
READ(3, *) CB, CG, CS, CC, CA, CP
READ(3, *) MGT, MST, MSE, MGE, MBE
READ(3, *) NCI, NCE, NSE, NPI, NGE, NBE
READ(3, *) DRO, DZO, E, DT
READ(3, *) NTLIM, NPRINT
READ(3, *) QS
con=1
C ----- TEMPORARY VALUE FOR 'KB' -----
C -----

```

c loop used for the selection of the experiemntal data to be used
c in the comparison with the calculated one. The number depends on the freque
ncy
c of the data logger and the number of data we want to compare.

```

DO 17 I=1, 75
K=I*40
TEXP(I)=TEXP1(k)
17 CONTINUE

```

212 KB=0.587

C DETERMINATION OF DZ, DR, Z, R

```

C LEFT SIDE OF BENTONITE
DO 10 J=1, MGT
DZ(J)=(E**(MGT-J))*DZO
Z(J)=DZO/(E-1.0)*(E**MGT-E**(MGT-J))
10 CONTINUE
C WITHIN GLASS
DO 11 J=MGT+1, MGE+1
DZ(J)=DZO
Z(J)=Z(MGT)+DZO*(J-MGT)
11 CONTINUE

```

```

C RIGHT SIDE OF BENTONITE
DO 12 J=MGE+2, MBE
DZ(J)=E**(J-(MGE+2))*DZO
Z(J)=DZO/(E-1.0)*(E**(J-(MGE+1))-1.0)+Z(MGT)+DZO*(MGE-MGT+1.0)
12 CONTINUE

```

```

C RADIUS OF GLASS
DO 13 I=1, NGE+1
DR(I)=DRO
R(I)=DR(I)*I
13 CONTINUE

```

```

C OUTER SIDE OF GLASS
DO 14 I=NGE+2, NBE
DR(I)=E**(I-(NGE+2))*DRO
R(I)=DRO/(E-1.0)*(E**(I-(NGE+1))-1.0)+R(NGE+1)

```

14 CONTINUE

C

C RADIUS

RC=DRO*(FLOAT(NCE)+0.5)
RA=DRO*(FLOAT(NCI)+0.5)
RS=DRO*(FLOAT(NSE)+0.5)
RG=DRO*(FLOAT(NGE)+0.5)
RP=DRO*(FLOAT(NPI)+0.5)
RB=R(NBE)

C LENGTH

LBL=Z(MGT)+DZO/2.0
LGL=DZO*(MST-MGT)
LS=DZO*(MSE-MST)
LGR=DZO*(MGE-MSE)
LG=DZO*(MGE-MGT)
LBR=Z(MBE)-LG-LBL
LCU=LGR+LBR
LTOTAL=LBL+LG+LBR

C PRINT OF INPUT AND SIZES OF SAMPLES

WRITE(9,209)
WRITE(9,201) KG, KS, KC, KA, KP
WRITE(9,202) ROUB, ROUG, ROUS, ROUC, ROUA, ROUP
WRITE(9,203) CB, CG, CS, CC, CA, CP
WRITE(9,204) MGT, MST, MSE, MGE, MBE, NCI, NCE, NSE, NPI, NGE, NBE
WRITE(9,205) DRO, DZO, E, DT
WRITE(9,206) NTLIM, NPRINT
WRITE(9,207) QS
WRITE(9,208) RA, RC, RS, RP, RG, RB
WRITE(9,210) LS, LG, LCU, LTOTAL
WRITE(9,211) LBL, LGL, LS, LGR, LBR, LCU, LTOTAL

C PRINT FORMAT

209 FORMAT(1H, '----- INPUT DATA -----' /1H,
1 15X, 'BENTONITE', 7X, 'GLASS', 11X, 'THERMISTER', 6X,
2 'COPPER', 11X, 'ALLOY WIRE', 6X, 'PLASTIC', /)
201 FORMAT(1H, 'CONDUCTIVITY', 4X, '???? W/mK'
1, 6X, F6.4, 'W/mK', 6X, F6.3, 'W/mK', 6X, F6.2, 'W/mK', 6X,
2, F6.2, 'W/mK')
202 FORMAT(1H, 'DENSITY', 8.2, 'kg/m^3', 2X, E8.2, 'kg/m^3',
1 2X, E8.2, 'kg/m^3', 2X, E8.2, 'kg/m^3', 2X, E8.2, 'kg/m^3', 2X
2 E8.2, 'kg/m^3')
203 FORMAT(1H, 'SPECIFIC HEAT', 3X, F7.2, 'J/kgK', 5X, F7.2, 'J/kgK'
1 5X, F7.2, 'J/kgK', 5X, F7.2, 'J/kgK', 5X, F7.2, 'J/kgK', 5X
2, F7.2, 'J/kgK' /)
204 FORMAT(1H, 'MESH NUMBERS' /1H, 'MGT=' , 12, 3X, 'MST=' , 12, 3X, 'MSE=' ,
1 12, 3X, 'MGE=' , 12, 3X, 'MBE=' , 12/1H, 'NCI=' , 12, 'NCE=' ,
2 12, 3X, 'NSE=' , 12, 3X, 'NPI=' , 12, 3X, 'NGE=' , 12, 3X, 'NBE=' , 12/)
205 FORMAT(1H, 'RADIAL MESH WIDTH (DR) =' , F6.4, 'mm' /
1 1H, 'AXIAL MESH WIDTH (DZO) =' , F6.4, 'mm' /
2 1H, 'MESH INCREASE RATIO (E) =' , F5.2 /
3 1H, 'TIME INTERVAL (DT) =' , E10.3, 'sec.' /)
206 FORMAT(1H, 'ITERATION NUMBER (NTLIM)=' , 17/
1 1H, 'PRINT INTERVAL (NPRINT) =' , 15/)
207 FORMAT(1H, 'HEAT GENERATION IN THERMISTER =' , E11.4, 'W/mm^3' /)
208 FORMAT(1H, 'RADII' /1H, 'ALLOY WIRE=' , F7.4, 'mm' /,
1 1H, 'COPPER SHEATH =' , F7.4, 'mm' /1H, 'THERMISTER =' ,
2 F7.4, 'mm' /1H, 'PLASTIC =' , F7.4, 'mm' /1H,
3 'GLASS =' , F7.4, 'mm' /1H, 'BENTONITE =' , F7.4, 'mm' /)


```

210 FORMAT(1H , 'LENGTH' /1H , ' THERMISTER =' , F7.4 , 'mm' /1H ,
1      , ' GLASS      =' , F7.4 , 'mm' /1H , ' DUMET WIRE =' , F7.4 , 'mm' /1H ,
2      , ' TOTAL      =' , F7.4 , 'mm' /)
211 FORMAT(1H , ' LBL      LGL      LS      LGR      LBR
1 LCU      LTOTAL' /1H , 7F10.4/
2 1H , '-----' /)

```

C CHANGE IN UNIT

```

PAI=3.141593
KA=KA*1.0E-3
KB=KB*1.0E-3
KG=KG*1.0E-3
KS=KS*1.0E-3
KC=KC*1.0E-3
KP=KP*1.0E-3
ROUB=ROUB*1.0E-9
ROUA=ROUA*1.0E-9
ROUG=ROUG*1.0E-9
ROUS=ROUS*1.0E-9
ROUC=ROUC*1.0E-9
ROUP=ROUP*1.0E-9

```

C-----
C VOLUME OF THERMISTER

```

C-----
VS=0.0
DO 15 I=1, NSE
DO 16 J=MST+1, MSE
VS=VS+2.0*R(I)*DR(I)*DZ(J)*PAI
16 CONTINUE
15 CONTINUE
DO 23 J=MST+1, MSE
VS=VS+DR(1)**2/4.0*DZ(J)*PAI
23 CONTINUE

```

C HEAT GENERATION RATE

```

QS=QS/VS
DO 24 I=0, NBE
DO 25 J=0, MBE
Q(I, J)=0.0
25 CONTINUE
24 CONTINUE
DO 26 I=0, NSE
DO 27 J=MST+1, MSE
Q(I, J)=QS
27 CONTINUE
26 CONTINUE

```

C-----
compt=1
777 continue
KBX=KB
CALL HCAPA
CALL KEFF

C-----
C CALCULATION OF COEFFICIENTS

C-----
DO 34 I=1, NBE-1
DO 35 J=1, MBE-1

```

AW(I, J)=2.0*KI(I, J)*(R(I)-DR(I)/2.0)/R(I)
1 / (DR(I)+DR(I+1))/DR(I)/H(I, J)
AE(I, J)=2.0*KI(I+1, J)*(R(I)+DR(I)/2.0)/R(I)
1 / (DR(I)+DR(I+1))/DR(I+1)/H(I, J)
AS(I, J)=2.0*KJ(I, J)/(DZ(J)+DZ(J+1))/DZ(J)/H(I, J)
AN(I, J)=2.0*KJ(I, J+1)/(DZ(J)+DZ(J+1))/DZ(J+1)/H(I, J)
B(I, J)=AW(I, J)+AE(I, J)+AS(I, J)+AN(I, J)
35 CONTINUE
34 CONTINUE
DO 36 J=1, MBE-1
AE(0, J)=4.0*KI(1, J)/DRO**2/H(0, J)
AS(0, J)=2.0*KJ(0, J)/(DZ(J)+DZ(J+1))/DZ(J)/H(0, J)
AN(0, J)=2.0*KJ(0, J+1)/(DZ(J)+DZ(J+1))/DZ(J+1)/H(0, J)
AW(0, J)=0.0
B(0, J)=AE(0, J)+AS(0, J)+AN(0, J)
36 CONTINUE

```

```

C-----
C INITIAL TEMPERATURE
TINI=0.0
DO 37 I=0, NBE
DO 38 J=0, MBE
S(I, J)=Q(I, J)/H(I, J)
T(I, J)=TINI
38 CONTINUE
37 CONTINUE

```

```

C=====
C START OF TRANSIENT CALCULATION
IX=0
DO 900 NT=1, NTLIM
TIME=DT*NT
DO 41 I=0, NBE
DO 42 J=0, MBE
TX(I, J)=T(I, J)
42 CONTINUE
41 CONTINUE

```

```

CC----- ITERATION STARTS -----
IRR=0
NM=MBE-1
125 CONTINUE
DO 123 I=0, NBE
DO 123 J=0, MBE

TP(I, J)=T(I, J)
123 CONTINUE
DO 121 I=0, NBE-1
DO 122 JM=1, NM
AM(JM)=AS(I, JM)*DT
BM(JM)=-(1.0+B(I, JM)*DT)
CM(JM)=AN(I, JM)*DT
FM(JM)=-(TX(I, JM)+DT*(AW(I, JM)*T(I-1, JM)+AE(I, JM)*T(I+1, JM)
1 +S(I, JM)))
122 CONTINUE
FM(1)=-AS(I, 1)*DT*T(I, 0)+FM(1)
FM(NM)=-AN(I, NM)*DT*T(I, NM+1)+FM(NM)
CALL TDMA(AM, BM, CM, FM, X, NM)

```

```

DO 126 J=1, NM
T(I, J)=X(J)
126 CONTINUE
121 CONTINUE
C BOUNDARY CONDITION
DO 45 I=0, NCE
J=MBE
C T(I, J)=(DZ(J)+DZ(J-1))/DZ(J-1)*T(I, J-1)-DZ(J)/DZ(J-1)*T(I, J-2)
T(I, J)=(DZ(J)+DZ(J-1))/DZ(J-1)*T(I, J-1)-DZ(J)/DZ(J-1)*T(I, J-2)
45 CONTINUE
C JUDGEMENT OF TEMPERATURE CONVERTGENCE
ERRMAX=0.0
DO 124 I=0, NBE
DO 124 J=0, MBE
IF(T(I, J).EQ.0.0) GO TO 124
ERR=ABS((T(I, J)-TP(I, J))/T(I, J))
IF(ERR.GT.ERRMAX) THEN
ERRMAX=ERR
IMAX=I
JMAX=J
ENDIF
124 CONTINUE
IF(IRR.GT.3000) THEN
WRITE(6,*) ' IRR EXCEEDS 3000'
GO TO 111
ENDIF
IRR=IRR+1
IF(ERRMAX.GT.ERRLIM) GO TO 125
CC
C PRINT THE RESULTS
JGP=MOD(NT, NPRINT)
IF(JGP.NE.0) THEN
GO TO 60
END IF

C AVERAGE TEMPERATURE OF THERMISTER
IX=IX+1
TSAVE=0.0
DO 47 I=1, NSE
DO 48 J=MST+1, MSE
TSAVE=TSAVE+T(I, J)*2.0*R(I)*DR(I)*DZ(J)*PAI
48 CONTINUE
47 CONTINUE
DO 55 J=MST+1, MSE
TSAVE=TSAVE+(T(0, J)*DR(1)**2/4.0)*DZ(J)*PAI
55 CONTINUE
TSAVE=TSAVE/VS
TPRED(IX)=tsave
C write(*,*) time, TPRED(IX), IX
C write(9,*) time, TPRED(IX), IX
CC write(*,*) time, Tsave, IX
C write(9,*) time, Tsave, IX

60 CONTINUE
900 CONTINUE
C*****

```

```

C -----
C JUDGEMENT OF CONVERGENCE OF THERMAL CONDUCTIVITY
C   DO 131 I=IBASE, MEND+1
C   DO 131 I=MSTART, MEND
C   TCAL(I)=0.0
C   TPred(Ibase)=0.
C   TCAL(I)=TPRED(I)-TPRED(IBASE)
C 131 TCAL(I)=TPRED(I)-TPRED(IBASE)
131 CONTINUE
C   DO 132 I=IBASE, MEND
C 132 TCAL(I)=TDEF(I+1)
C   TCAL(I)=0.0

DIV=0.0
DIVRM=0.0
DO 133 I=MSTART+1, MEND
DIVV1(I)=TEXP(I)-TCAL(I)
C   write(*,*) 'tcal(i)=', Tcal(I)
C   write(*,*) 'tcal(i)=', Tcal(I), ' Texp(i)=', texp(i)
DIVV=DIVV1(I)/TEXP(I)
DIV=DIV+DIVV
DIVRM=DIVRM+SQRT(DIVV**2.0)
133 CONTINUE
MET=MEND-MSTART+1
DIV=DIV/MET
ABSDIV=ABS(DIV)
C   DIVRM=DIVRM/(MEND-MSTART+1)
C   DIVRM=DIVRM/MET
C   write(*,*) 'absdiv=', absdiv
C   write(*,*) 'kblim=', kblim
C   IF (ABSDIV. GT. KBLIM) THEN
C   if (div.gt.0.) then
C   KB=KB*(1.0-absdiv)
C   endif
C   if (div.lt.0.) then
C   KB=KB*(1.0+absdiv)
C   endif
C   WRITE(6,*) 'KB=', KB, ' DIV=', DIV
C   WRITE(9,*) 'KB=', KB, ' DIV=', DIV
C   GOTO 777
C   ENDF
C   KBXR=ABS((KB-KBX)/KB)
C   IF (KBXR. LE. 0.0002) THEN
C   KB=KB*1000.0
C   WRITE(6,216) KB
C   WRITE(9,216) KB
C   GO TO 776
C   ENDF
C   write(*,*) 'kb=', kb
CC   GO TO 777
C   ENDF
C   KB=KB*1000.0
C   WRITE(6,215) KB, DIVRM
C   WRITE(9,215) KB, DIVRM

776 CONTINUE
C   DO 654 I=NBE, 0, -1

```

```

C 654 WRITE(9,651) (T(I,J), J=0, MBE)
C 651 FORMAT(12F6.3)
CC
111 CONTINUE
215 FORMAT(/1H , 'CAL. OF KB IS CONVERGENT' /1H , 5X, 'KB=' , F7.4, ' W/mK' )
216 FORMAT(1H , '1.0-KBX/KB. LE. 0.2%' /1H , 5X, 'KB=' , F7.4, ' W/mK' )
2000 STOP
END

```

```

C SUBROUTINE TDMA
SUBROUTINE TDMA(A, B, C, F, X, N)
DIMENSION A(40), B(40), C(40), F(40), X(40)
DO 1 I=1, N-1
AA=A(I+1)/B(I)
B(I+1)=B(I+1)-AA*C(I)
F(I+1)=F(I+1)-AA*F(I)
1 CONTINUE
F(N)=F(N)/B(N)
DO 2 I=N-1, 1, -1
F(I)=(F(I)-C(I)*F(I+1))/B(I)
2 CONTINUE
DO 3 I=1, N
X(I)=F(I)
3 CONTINUE
RETURN
END

```

```

C
=====

```

```

C SUBROUTINE HCAPA
C HEAT CAPACITY OF EACH MESH VOLUME
SUBROUTINE HCAPA
COMMON /HCAP/H(0:100, 0:100), ROUB, ROUG, ROUS, ROUC, ROUA, ROUP
1 COMMON , CB, CG, CS, CC, CA, CP
COMMON /MN/MGT, MST, MSE, MGE, MBE, NCE, NCI, NSE, NGE, NBE, NPI

```

```

C
C INTEGER MGT, MST, MSE, MGE, MBE, NCE, NSE, NGE, NBE
DO 61 I=0, NBE
DO 62 J=0, MBE
H(I, J)=ROUB*CB
62 CONTINUE
61 CONTINUE
DO 66 I=0, NGE
DO 67 J=MGT+1, MGE
H(I, J)=ROUG*CG
67 CONTINUE
66 CONTINUE
DO 168 I=NCE+1, NPI
DO 169 J=MGE+1, MBE
H(I, J)=ROUP*CP
169 CONTINUE
168 CONTINUE
DO 63 I=0, NSE
DO 64 J=MST+1, MSE
H(I, J)=ROUS*CS
64 CONTINUE
63 CONTINUE
DO 68 I=0, NCE
DO 69 J=MSE+1, MBE

```

```

H(I, J)=ROUG*CC
69 CONTINUE
68 CONTINUE
DO 58 I=0, NCI
DO 59 J=MSE+1, MBE
H(I, J)=ROUA*CA
59 CONTINUE
58 CONTINUE

```

```

RETURN
END

```

C

C EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITY AT EACH STAGGERD MESH POINT
SUBROUTINE KEFF

```

COMMON /KK/KB, KG, KS, KC, KA, KP
COMMON /KKIJ/KI (0:100, 100), KJ (0:100, 100)
COMMON /MN/MGT, MST, MSE, MGE, MBE, NCE, NCI, NSE, NGE, NBE, NPI
REAL KB, KG, KS, KC, KI, KJ, KA, KP
DO 72 I=1, NCI
DO 73 J=1, MGT
KI (I, J)=KB
73 CONTINUE
DO 74 J=MGT+1, MST
KI (I, J)=KG
74 CONTINUE
DO 75 J=MST+1, MSE
KI (I, J)=KS
75 continue
DO 77 J=MSE+1, MBE
KI (I, J)=KA
77 continue
72 CONTINUE

I=NCI+1
DO 78 J=1, MGT
KI (I, J)=KB
78 continue
DO 79 J=MGT+1, MST
KI (I, J)=KG
79 continue
DO 80 J=MST+1, MSE
KI (I, J)=KS
80 continue
DO 800 J=MSE+1, MBE
KI (I, J)=2.0*KG*KA/(KG+KA)
800 continue

DO 1 I=NCI+2, NCE

DO 278 J=1, MGT
KI (I, J)=KB
278 continue
DO 279 J=MGT+1, MST
KI (I, J)=KG
279 continue

```

```

DO 280 J=MST+1, MSE
KI (I, J)=KS
280 continue
DO 377 J=MSE+1, MBE
KI (I, J)=KC
377 continue
1 CONTINUE
I=NCE+1
DO 778 J=1, MGT
KI (I, J)=KB
778 continue
DO 779 J=MGT+1, MST
KI (I, J)=KG
779 continue
DO 1080 J=MST+1, MSE
KI (I, J)=KS
1080 continue
DO 1082 J=MSE+1, MGE
KI (I, J)=2. 0*KC*KG/(KC+KG)
1082 continue
DO 1083 J=MGE+1, MBE
KI (I, J)=2. 0*KC*KP/(KC+KP)
1083 continue
DO 172 I=NCE+2, NSE
DO 173 J=1, MGT
KI (I, J)=KB
173 CONTINUE
DO 174 J=MGT+1, MST
KI (I, J)=KG
174 CONTINUE
DO 175 J=MST+1, MSE
KI (I, J)=KS
175 continue
DO 374 J=MSE+1, MGE
KI (I, J)=KG
374 CONTINUE
DO 274 J=MGE+1, MBE
KI (I, J)=KP
274 CONTINUE

172 CONTINUE

I=NSE+1

DO 1173 J=1, MGT
KI (I, J)=KB
1173 CONTINUE
DO 1174 J=MGT+1, MST
KI (I, J)=KG
1174 CONTINUE
DO 92 J=MST+1, MSE
KI (I, J)=2. 0*KS*KG/(KS+KG)
92 continue
DO 2374 J=MSE+1, MGE
KI (I, J)=KG
2374 CONTINUE
DO 674 J=MGE+1, MBE

```

KI (I, J)=KP
674 CONTINUE

 DO 384 I=NSE+2, NPI
 DO 4173 J=1, MGT
 KI (I, J)=KB
4173 CONTINUE
 DO 474 J=MGT+1, MGE
 KI (I, J)=KG

474 CONTINUE
 DO 585 J=MGE+1, MBE
 KI (I, J)=KP
585 CONTINUE
384 CONTINUE

 I=NPI+1

 DO 5173 J=1, MGT
 KI (I, J)=KB
5173 CONTINUE
 DO 5474 J=MGT+1, MGE
 KI (I, J)=KG
5474 CONTINUE
 DO 7483 J=MGE+1, MBE
 KI (I, J)=2.0*KB*KP/(KB+KP)
7483 continue

 DO 1000 I=NPI+2, NGE

 DO 1273 J=1, MGT
 KI (I, J)=KB
1273 CONTINUE

 DO 4174 J=MGT+1, MGE
 KI (I, J)=KG
4174 CONTINUE

 DO 5185 J=MGE+1, MBE
 KI (I, J)=KB
5185 CONTINUE

1000 CONTINUE
 I=NGE+1

 DO 1673 J=1, MGT
 KI (I, J)=KB
1673 CONTINUE

 DO 1010 J=MGT+1, MGE
 KI (I, J)=2.0*KG*KB/(KG+KB)
1010 continue
 DO 5825 J=MGE+1, MBE
 KI (I, J)=KB
5825 continue

 DO 1022 I=NGE+2, NBE


```

DO 1023 J=1, MBE
KI (I, J)=KB
1023 continue
1022 CONTINUE
C
DO 1014 J=1, MGT
DO 1015 I=0, NBE
KJ(I, J)=KB
1015 continue
1014 CONTINUE
J=MGT+1
DO 1016 I=0, NGE
KJ(I, J)=2. 0*KB*KG/(KB+KG)
1016 continue
DO 1017 I=NGE+1, NBE
KJ(I, J)=KB
1017 continue
DO 1018 J=MGT+2, MST
DO 1019 I=0, NGE
KJ(I, J)=KG
1019 continue
DO 1110 I=NGE+1, NBE
KJ(I, J)=KB
1110 continue
1018 CONTINUE
J=MST+1
DO 1111 I=0, NSE
KJ(I, J)=2. 0*KS*KG/(KS+KG)
1111 continue
DO 1112 I=NSE+1, NGE
KJ(I, J)=KG
1112 continue
DO 1113 I=NGE+1, NBE
KJ(I, J)=KB
1113 continue
DO 1114 J=MST+2, MSE
DO 1115 I=0, NSE
KJ(I, J)=KS
1115 continue
DO 1116 I=NSE+1, NGE
KJ(I, J)=KG
1116 continue
DO 1117 I=NGE+1, NBE
KJ(I, J)=KB
1117 continue
1114 CONTINUE

J=MSE+1
DO 888 I=0, NCI
KJ(I, J)=2. 0*KS*KA/(KS+KA)
888 continue

DO 999 I=NCI+1, NCE
KJ(I, J)=2. 0*KS*KG/(KS+KG)
999 continue
DO 1128 I=NCE+1, NSE
KJ(I, J)=2. 0*KS*KG/(KS+KG)

```

```

1128 continue
    DO 1129 I=NSE+1, NGE
    KJ(I, J)=KG
1129 continue
    DO 1220 I=NGE+1, NBE
    KJ(I, J)=KB
1220 continue

    DO 1221 J=MSE+2, MGE

    DO 998 I=0, NCI
    KJ(I, J)=KA
998 continue

    DO 1222 I=NCI+1, NCE
    KJ(I, J)=KC
1222 continue
    DO 619 I=NCE+1, NGE
    KJ(I, J)=KG
619 continue
    DO 612 I=NGE+1, NBE
    KJ(I, J)=KB
612 continue
1221 CONTINUE
    J=MGE+1

    DO 1998 I=0, NCI
    KJ(I, J)=KA
1998 continue
    DO 4122 I=NCI+1, NCE
    KJ(I, J)=KC
4122 continue
    DO 1138 I=NCE+1, NPI
    KJ(I, J)=2.0*KP*KG/(KP+KG)
1138 continue
    DO 2118 I=NPI+1, NGE
    KJ(I, J)=2.0*KB*KG/(KB+KG)
2118 continue
    DO 1250 I=NGE+1, NBE
    KJ(I, J)=KB
1250 continue

    DO 134 J=MGE+2, MBE
    DO 9978 I=0, NCI
    KJ(I, J)=KA
9978 continue
    DO 1272 I=NCI+1, NCE
    KJ(I, J)=KC
1272 continue
    DO 422 I=NCE+1, NPI
    KJ(I, J)=KP
422 continue
    DO 136 I=NPI+1, NBE
    KJ(I, J)=KB
136 continue
134 CONTINUE

```

RETURN
END

F2 円柱座標（軸対称）系の離散化

Fig.F-1 に軸対称（ r 、 z ）系のメッシュを示す。半径方向と軸方向の図に破線で示す領域について熱収支を考える。

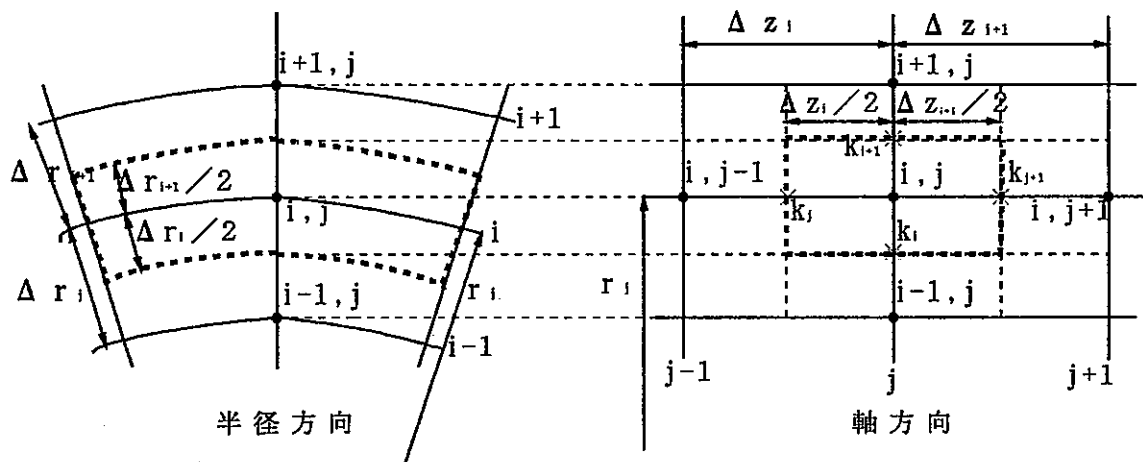


Fig.F-1 対称軸（ r 、 z ）系の離散化

r 方向の熱流は、

$$2\pi \left(r_i - \frac{\Delta r_i}{2} \right) \frac{1}{2} (\Delta z_j + \Delta z_{j+1}) k_i \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta r_i} - 2\pi \left(r_i + \frac{\Delta r_i}{2} \right) \frac{1}{2} (\Delta z_j + \Delta z_{j+1}) k_{i+1} \frac{T_i - T_{i+1}}{\Delta r_{i+1}} \quad (\text{F-1})$$

で表され、 z 方向の熱流は、

$$2\pi r_i \left(\frac{\Delta r_i}{2} + \frac{\Delta r_{i+1}}{2} \right) k_j \frac{T_{j+1} - T_j}{\Delta z_j} - 2\pi r_i \left(\frac{\Delta r_i}{2} + \frac{\Delta r_{i+1}}{2} \right) k_{j+1} \frac{T_j - T_{j+1}}{\Delta z_{j+1}} \quad (\text{F-2})$$

となる。また、発熱量は単位体積当たり Q とすれば、

$$2\pi r_i \left(\frac{\Delta r_i}{2} + \frac{\Delta r_{i+1}}{2} \right) \frac{1}{2} (\Delta z_j + \Delta z_{j+1}) Q_{ij} \quad (\text{F-3})$$

と表される。一方、単位時間当たりの温度変化による熱量は、

$$2\pi r_i \left(\frac{\Delta r_i}{2} + \frac{\Delta r_{i+1}}{2} \right) \frac{1}{2} (\Delta z_j + \Delta z_{j+1}) (\rho C_p)_{i,j} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_{i,j} \quad (\text{F-4})$$

であるから、式 (F-1) ~ (F-4) を用いて、次式のような熱収支の方程式が得られる。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} (\Delta z_j + \Delta z_{j+1}) \left[\frac{k_i}{\Delta r_i} \left(r_i - \frac{\Delta r_i}{2} \right) (T_{i,j} - T_{i,j-1}) - \frac{k_{i+1}}{\Delta r_{i+1}} \left[r_i + \frac{\Delta r_i}{2} \right] (T_{i,j} - T_{i+1,j}) \right] \\ & + \frac{r_i}{2} (\Delta r_i + \Delta r_{i+1}) \left[\frac{k_j}{\Delta z_j} (T_{i,j} - T_{i,j-1}) - \frac{k_{j+1}}{\Delta z_{j+1}} (T_{i,j} - T_{i,j+1}) \right] \\ & + \frac{r_i}{4} (\Delta r_i + \Delta r_{i+1}) (\Delta z_j + \Delta z_{j+1}) Q_{i,j} \\ & = \frac{r_i}{4} (\Delta r_i + \Delta r_{i+1}) (\Delta z_j + \Delta z_{j+1}) (\rho C_p)_{i,j} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_{i,j} \end{aligned} \quad (\text{F-5})$$

ここで、 a_{wi} 、 a_{ei} 、 a_{sj} 、 a_{nj} を

$$\begin{aligned} a_{wi} &= \frac{2}{r_i (\Delta r_i + \Delta r_{i+1})} \frac{k_i}{(\rho C_p)_{i,j}} \frac{1}{\Delta r_i} \left(r_i - \frac{\Delta r_i}{2} \right) \\ a_{ei} &= \frac{2}{r_i (\Delta r_i + \Delta r_{i+1})} \frac{k_{i+1}}{(\rho C_p)_{i,j}} \frac{1}{\Delta r_{i+1}} \left(r_i + \frac{\Delta r_i}{2} \right) \\ a_{sj} &= \frac{2}{(\Delta z_j + \Delta z_{j+1})} \frac{k_j}{(\rho C_p)_{i,j}} \frac{1}{\Delta z_j} \\ a_{nj} &= \frac{2}{(\Delta z_j + \Delta z_{j+1})} \frac{k_{j+1}}{(\rho C_p)_{i,j}} \frac{1}{\Delta z_{j+1}} \end{aligned} \quad (\text{F-6})$$

のように定義すると、1つのメッシュに対する熱収支の基礎熱方程式が得られる。

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_{i,j} &= a_{wi} T_{i,j-1} + a_{ei} T_{i,j+1} + a_{sj} T_{i,j-1} + a_{nj} T_{i,j+1} - (a_{wi} + a_{ei} + a_{sj} + a_{nj}) T_{i,j} \\ & \quad + \frac{Q_{i,j}}{(\rho C_p)_{i,j}} \end{aligned} \quad (\text{F-7})$$

時間微分項は漸近差分で次式のように差分化する。

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_{i,j} = \frac{T_{i,j}^{p+1} - T_{i,j}^p}{\Delta t} \quad (\text{F-8})$$

$$(a_{wi} + a_{ei} + a_{sj} + a_{nj}) = b_{i,j}$$

ここで、 p を時刻 t の値とすると $p+1$ は時刻 $t + \Delta t$ の値である。よって、式

(F-7) は次式のようになる。

$$T_{i,j}^{p+1} - T_{i,j}^p = \Delta t (a_w T_{i,j}^p + a_e T_{i+1,j}^p + a_s T_{i,j+1}^p + a_n T_{i,j-1}^p) - b_{i,j} \Delta t T_{i,j}^p + \frac{Q_{i,j}}{(\rho C_p)_{i,j}} \Delta t \quad (\text{F-9})$$

ここで、式 (F-9) の右辺の値として p 時刻の値を用いる。

$$T_{i,j}^{p+1} = \Delta t (a_w T_{i,j}^p + a_e T_{i+1,j}^p + a_s T_{i,j+1}^p + a_n T_{i,j-1}^p) + (1 - b_{i,j} \Delta t) T_{i,j}^p + \frac{Q_{i,j}}{(\rho C_p)_{i,j}} \Delta t \quad (\text{F-10})$$

よって、右辺が全て既知の値であるため、式 (F-10) により、 $T_{i,j}^{p+1}$ を求めることができる。ただし、数値計算の安定のためには、すべての i, j に対して、 $1 \geq b_{i,j} \Delta t$ が要求される。

$$a_w + a_e + a_s + a_n \leq 1 \quad (\text{F-11})$$

ここで、 $\Delta r_i = \Delta r_{i+1} = \Delta r$ 、 $\Delta z_j = \Delta z_{j+1} = \Delta z$ とすると、式 (4-11) は近似的に以下ようになる。

$$\frac{a \Delta t}{(\Delta r)^2} + \frac{a \Delta t}{(\Delta z)^2} \leq \frac{1}{2}$$

したがって、計算の条件は、

$$\Delta t \leq \frac{1}{2a \left(\frac{1}{\Delta r^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right)} \quad (\text{F-12})$$

となる。よって、数値計算値が安定するには非常に小さな時間刻みを必要とする。

F3 JNC/PNCおよびKiyohashiの測定値と各種推算式の計算結果

Table F-1 Measured and Calculated Thermal Conductivities
of Bentonite(JNC/PNC)

Sample number	n	Sr(%)	JNC	SAKASHITA	KIYOHASHI	KNUTSSON	KAHR
1	0.259	0.0	0.780	0.625	0.944	0.580	0.640
2	0.259	32.8	1.020	1.083	1.125	1.023	0.839
3	0.259	56.4	1.260	1.310	1.276	1.225	0.997
4	0.259	67.2	1.345	1.400	1.351	1.290	1.074
5	0.259	84.2	1.410	1.532	1.480	1.374	1.201
6	0.267	0.0	0.777	0.593	0.918	0.543	0.627
7	0.267	33.2	1.023	1.002	0.920	1.001	0.832
8	0.267	58.5	1.262	1.239	0.921	1.218	1.006
9	0.267	69.5	1.348	1.335	0.922	1.284	1.086
10	0.267	88.6	1.410	1.496	0.923	1.377	1.234
11	0.327	34.6	0.922	0.945	0.949	0.875	0.767
12	0.333	78.4	1.284	1.328	1.251	1.207	1.121
13	0.333	0.0	0.550	0.485	0.741	0.342	0.521
14	0.333	25.1	0.835	0.829	0.877	0.729	0.689
15	0.333	35.7	0.925	0.945	0.941	0.877	0.767
16	0.333	50.3	1.000	1.087	1.037	1.020	0.881
17	0.333	63.8	1.190	1.206	1.135	1.120	0.992
18	0.333	74.3	1.360	1.294	1.217	1.184	1.084
19	0.333	92.4	1.575	1.464	1.373	1.276	1.252
20	0.336	74.9	1.256	1.294	1.215	1.182	1.087
21	0.341	0.0	0.556	0.474	0.723	0.326	0.508
22	0.341	0.0	0.662	0.474	0.723	0.326	0.508
23	0.341	0.8	0.466	0.493	0.723	0.326	0.513
24	0.341	0.8	0.453	0.493	0.723	0.326	0.513
25	0.341	1.0	0.447	0.496	0.723	0.326	0.514
26	0.341	25.6	0.835	0.814	0.725	0.723	0.682
27	0.341	37.0	0.916	0.935	0.725	0.878	0.767
28	0.341	38.8	0.992	0.953	0.725	0.897	0.781
29	0.341	52.4	1.092	1.088	0.726	1.024	0.889
30	0.341	67.6	1.191	1.233	0.727	1.131	1.019
31	0.341	80.2	1.363	1.348	0.727	1.203	1.133
32	0.341	81.5	1.256	1.360	0.727	1.210	1.145
33	0.341	99.9	1.585	1.522	0.728	1.296	1.324
34	0.341	99.9	1.407	1.522	0.728	1.296	1.324
35	0.341	99.9	1.407	1.522	0.728	1.296	1.324
36	0.341	99.9	1.434	1.522	0.728	1.296	1.324
37	0.342	32.2	0.936	0.893	0.897	0.816	0.729
38	0.355	76.9	1.333	1.279	1.188	1.162	1.092
39	0.362	74.5	1.274	1.246	1.152	1.137	1.064
40	0.367	90.8	1.268	1.410	1.284	1.213	1.221

Continued

Sample number	n	Sr(%)	JNC	SAKASHITA	KIYOHASHI	KNUTSSON	KAHR
41	0.372	67.0	1.151	1.164	1.070	1.076	0.984
42	0.374	92.3	1.384	1.405	1.283	1.209	1.233
43	0.407	0.0	0.405	0.383	0.587	0.225	0.401
44	0.407	18.9	0.590	0.637	0.682	0.492	0.533
45	0.407	24.8	0.680	0.705	0.714	0.606	0.578
46	0.407	35.8	0.790	0.820	0.779	0.760	0.666
47	0.407	47.2	0.950	0.929	0.852	0.876	0.763
48	0.407	57.8	1.060	1.024	0.926	0.961	0.859
49	0.407	77.8	1.300	1.206	1.084	1.086	1.056
50	0.407	93.2	1.425	1.346	1.224	1.162	1.223
51	0.414	0.0	0.417	0.375	0.575	0.217	0.389
52	0.414	19.5	0.595	0.634	0.576	0.496	0.527
53	0.414	25.7	0.687	0.703	0.576	0.612	0.575
54	0.414	37.2	0.787	0.824	0.577	0.766	0.667
55	0.414	49.9	0.955	0.951	0.577	0.890	0.778
56	0.414	62.2	1.073	1.070	0.578	0.982	0.892
57	0.414	86.6	1.307	1.295	0.579	1.121	1.144
58	0.414	99.9	1.438	1.414	0.580	1.180	1.296
59	0.457	85.6	1.227	1.207	1.056	1.054	1.094
60	0.466	23.2	0.457	0.602	0.603	0.511	0.474
61	0.473	23.9	0.474	0.599	0.596	0.516	0.468
62	0.474	79.1	1.160	1.134	0.968	0.999	1.000
63	0.481	0.0	0.265	0.301	0.472	0.158	0.281
64	0.481	14.6	0.400	0.486	0.537	0.309	0.383
65	0.481	21.8	0.470	0.566	0.573	0.472	0.439
66	0.481	29.1	0.565	0.642	0.612	0.588	0.498
67	0.481	36.4	0.630	0.712	0.653	0.678	0.560
68	0.481	43.7	0.690	0.779	0.697	0.751	0.625
69	0.487	0.0	0.275	0.294	0.463	0.154	0.271
70	0.487	14.7	0.404	0.482	0.464	0.309	0.375
71	0.487	22.4	0.483	0.564	0.464	0.477	0.434
72	0.487	30.3	0.574	0.645	0.465	0.598	0.498
73	0.487	38.4	0.631	0.725	0.465	0.692	0.568
74	0.487	46.7	0.691	0.805	0.465	0.771	0.644
75	0.560	0.5	0.178	0.238	0.381	0.115	0.155
76	0.560	21.8	0.373	0.467	0.382	0.408	0.309
77	0.560	49.4	0.736	0.720	0.383	0.715	0.555
78	0.634	0.4	0.129	0.184	0.322	0.089	0.036
79	0.634	10.0	0.158	0.281	0.323	0.089	0.099
80	0.634	35.9	0.433	0.509	0.323	0.535	0.305

Continued

Sample number	$\rho_d(\text{g/cm}^3)$	n	Sr(%)	$\lambda_{b,e}(\text{W/mK})$	$\lambda_{b,p}(\text{W/mK})$	$\lambda_{bd,p}(\text{W/mK})$	$\lambda_{b,e}/\lambda_{b,p}$	$\lambda_{b,e}/\lambda_{bd,p}$
1	2.00	0.259	0.0	0.780	0.608	0.608	1.283	1.283
2	2.09	0.259	32.8	1.020	1.083	0.608	0.942	1.677
3	2.15	0.259	56.4	1.260	1.310	0.608	0.962	2.072
4	2.17	0.259	67.2	1.345	1.400	0.608	0.961	2.212
5	2.22	0.259	84.2	1.410	1.532	0.608	0.920	2.319
6	1.98	0.267	0.0	0.777	0.593	0.593	1.310	1.310
7	2.07	0.267	33.2	1.023	1.002	0.593	1.021	1.725
8	2.13	0.267	58.5	1.262	1.239	0.593	1.018	2.128
9	2.16	0.267	69.5	1.348	1.335	0.593	1.009	2.273
10	2.21	0.267	88.6	1.410	1.496	0.593	0.942	2.378
11	1.93	0.327	34.6	0.922	0.945	0.494	0.976	1.866
12	2.06	0.333	78.4	1.284	1.328	0.485	0.967	2.647
13	1.80	0.333	0.0	0.550	0.485	0.485	1.135	1.134
14	1.88	0.333	25.1	0.835	0.829	0.485	1.007	1.722
15	1.92	0.333	35.7	0.925	0.945	0.485	0.978	1.907
16	1.97	0.333	50.3	1.000	1.087	0.485	0.920	2.062
17	2.01	0.333	63.8	1.190	1.206	0.485	0.987	2.454
18	2.05	0.333	74.3	1.360	1.294	0.485	1.051	2.804
19	2.11	0.333	92.4	1.575	1.464	0.485	1.076	3.247
20	2.04	0.336	74.9	1.256	1.294	0.480	0.971	2.614
21	1.78	0.341	0.0	0.556	0.474	0.474	1.174	1.174
22	1.78	0.341	0.0	0.662	0.474	0.474	1.398	1.398
23	1.78	0.341	0.8	0.466	0.493	0.474	0.946	0.984
24	1.78	0.341	0.8	0.453	0.493	0.474	0.919	0.957
25	1.78	0.341	1.0	0.447	0.496	0.474	0.902	0.944
26	1.87	0.341	25.6	0.835	0.814	0.474	1.026	1.763
27	1.91	0.341	37.0	0.916	0.935	0.474	0.980	1.934
28	1.91	0.341	38.8	0.992	0.953	0.474	1.041	2.095
29	1.96	0.341	52.4	1.092	1.088	0.474	1.004	2.306
30	2.01	0.341	67.6	1.191	1.233	0.474	0.966	2.515
31	2.05	0.341	80.2	1.363	1.348	0.474	1.011	2.878
32	2.06	0.341	81.5	1.256	1.360	0.474	0.924	2.652
33	2.12	0.341	99.9	1.585	1.522	0.474	1.041	3.347
34	2.12	0.341	99.9	1.407	1.522	0.474	0.924	2.971
35	2.12	0.341	99.9	1.407	1.522	0.474	0.924	2.971
36	2.12	0.341	99.9	1.434	1.522	0.474	0.942	3.028
37	1.89	0.342	32.2	0.936	0.893	0.472	1.049	1.985
38	2.01	0.355	76.9	1.333	1.279	0.453	1.043	2.945
39	1.99	0.362	74.5	1.274	1.246	0.443	1.023	2.878
40	2.04	0.367	90.8	1.268	1.410	0.436	0.899	2.910

Continued

Sample number	$\rho_d(\text{g/cm}^3)$	n	Sr(%)	$\lambda_{b,e}(\text{W/mK})$	$\lambda_{b,p}(\text{W/mK})$	$\lambda_{bd,p}(\text{W/mK})$	$\lambda_{b,e}/\lambda_{b,p}$	$\lambda_{b,e}/\lambda_{bd,p}$
41	1.94	0.372	67.0	1.151	1.164	0.429	0.989	2.684
42	2.04	0.374	92.3	1.384	1.405	0.426	0.985	3.248
43	1.60	0.407	0.0	0.405	0.383	0.383	1.058	1.057
44	1.68	0.407	18.9	0.590	0.637	0.383	0.926	1.540
45	1.70	0.407	24.8	0.680	0.705	0.383	0.965	1.775
46	1.75	0.407	35.8	0.790	0.820	0.383	0.963	2.062
47	1.79	0.407	47.2	0.950	0.929	0.383	1.023	2.479
48	1.84	0.407	57.8	1.060	1.024	0.383	1.035	2.766
49	1.92	0.407	77.8	1.300	1.206	0.383	1.078	3.392
50	1.98	0.407	93.2	1.425	1.346	0.383	1.059	3.719
51	1.58	0.414	0.0	0.417	0.375	0.375	1.113	1.113
52	1.66	0.414	19.5	0.595	0.634	0.375	0.938	1.588
53	1.69	0.414	25.7	0.687	0.703	0.375	0.977	1.834
54	1.74	0.414	37.2	0.787	0.824	0.375	0.956	2.100
55	1.79	0.414	49.9	0.955	0.951	0.375	1.004	2.549
56	1.84	0.414	62.2	1.073	1.070	0.375	1.003	2.864
57	1.94	0.414	86.6	1.307	1.295	0.375	1.009	3.488
58	2.00	0.414	99.9	1.438	1.414	0.375	1.017	3.838
59	1.86	0.457	85.6	1.227	1.207	0.325	1.016	3.773
60	1.55	0.466	23.2	0.457	0.602	0.316	0.760	1.448
61	1.54	0.473	23.9	0.474	0.599	0.308	0.791	1.537
62	1.80	0.474	79.1	1.160	1.134	0.307	1.023	3.774
63	1.40	0.481	0.0	0.265	0.301	0.300	0.881	0.883
64	1.47	0.481	14.6	0.400	0.486	0.300	0.823	1.332
65	1.51	0.481	21.8	0.470	0.566	0.300	0.830	1.565
66	1.54	0.481	29.1	0.565	0.642	0.300	0.881	1.882
67	1.58	0.481	36.4	0.630	0.712	0.300	0.885	2.098
68	1.61	0.481	43.7	0.690	0.779	0.300	0.885	2.298
69	1.38	0.487	0.0	0.275	0.294	0.294	0.935	0.935
70	1.46	0.487	14.7	0.404	0.482	0.294	0.839	1.374
71	1.49	0.487	22.4	0.483	0.564	0.294	0.856	1.642
72	1.53	0.487	30.3	0.574	0.645	0.294	0.890	1.952
73	1.57	0.487	38.4	0.631	0.725	0.294	0.870	2.146
74	1.61	0.487	46.7	0.691	0.805	0.294	0.858	2.350
75	1.19	0.560	0.5	0.178	0.238	0.229	0.748	0.776
76	1.31	0.560	21.8	0.373	0.467	0.229	0.799	1.625
77	1.46	0.560	49.4	0.736	0.720	0.229	1.022	3.207
78	0.99	0.634	0.4	0.129	0.184	0.179	0.701	0.722
79	1.05	0.634	10.0	0.158	0.281	0.179	0.562	0.885
80	1.22	0.634	35.9	0.433	0.509	0.179	0.850	2.424

Table F-2 Measured and Calculated Thermal Conductivities
of Bentonite(Kiyohashi)

Sample number	n	Sr(%)	KIYOHASHI	KAHR	KNUTSSON	SAKASHITA	KIYOHASHI
1	0.279	50.7	1.141	0.926	1.135	1.206	1.179
2	0.284	49.5	1.132	0.935	1.114	1.182	1.159
3	0.286	48.8	1.175	0.909	1.103	1.170	1.148
4	0.286	70.6	1.374	1.082	1.251	1.357	1.303
5	0.286	69.1	1.309	1.067	1.242	1.345	1.292
6	0.292	67.3	1.351	1.048	1.219	1.315	1.264
7	0.292	92.3	1.570	1.260	1.347	1.520	1.467
8	0.294	91.9	1.583	1.247	1.341	1.512	1.457
9	0.298	90.9	1.694	1.234	1.330	1.494	1.438
10	0.323	49.9	1.204	0.887	1.036	1.102	1.058
11	0.328	47.9	1.243	0.867	1.009	1.074	1.032
12	0.334	43.8	1.170	0.827	0.961	1.024	0.990
13	0.337	90	1.547	1.231	1.258	1.431	1.342
14	0.342	95.2	1.579	1.265	1.273	1.485	1.378
15	0.343	91.5	1.580	1.254	1.255	1.445	1.344
16	0.345	62.7	1.301	0.969	1.092	1.175	1.098
17	0.347	63.5	1.191	0.986	1.094	1.178	1.100
18	0.351	63.7	1.270	0.977	1.089	1.172	1.092
19	0.379	83	1.317	1.140	1.156	1.300	1.187
20	0.381	82.9	1.323	1.128	1.152	1.297	1.183
21	0.386	81.6	1.395	1.117	1.138	1.276	1.160
22	0.403	51.5	0.948	0.809	0.918	0.975	0.890
23	0.405	50.5	0.935	0.788	0.907	0.962	0.878
24	0.408	50.5	0.853	0.790	0.903	0.957	0.872
25	0.43	96.3	1.362	1.233	1.141	1.320	1.209
26	0.431	95.4	1.443	1.220	1.136	1.313	1.197
27	0.442	89.5	1.362	1.143	1.094	1.258	1.120

Continued

Sample number	$\rho_d(\text{g/cm}^3)$	n	Sr(%)	$\lambda_{b,e}(\text{W/mK})$	$\lambda_{b,p}(\text{W/mK})$	$\lambda_{bd,p}(\text{W/mK})$	$\lambda_{b,e}/\lambda_{b,p}$	$\lambda_{b,e}/\lambda_{bd,p}$
1	2.09	0.279	50.7	1.141	1.206	0.573	0.946	1.993
2	2.07	0.284	49.5	1.132	1.182	0.564	0.958	2.008
3	2.07	0.286	48.8	1.175	1.170	0.561	1.004	2.096
4	2.13	0.286	70.6	1.374	1.357	0.561	1.013	2.451
5	2.13	0.286	69.1	1.309	1.345	0.561	0.973	2.335
6	2.11	0.292	67.3	1.351	1.315	0.550	1.028	2.455
7	2.18	0.292	92.3	1.570	1.520	0.550	1.033	2.852
8	2.18	0.294	91.9	1.583	1.512	0.547	1.047	2.894
9	2.17	0.298	90.9	1.694	1.494	0.540	1.134	3.134
10	1.99	0.323	49.9	1.204	1.102	0.500	1.092	2.405
11	1.97	0.328	47.9	1.243	1.074	0.493	1.157	2.523
12	1.94	0.334	43.8	1.170	1.024	0.484	1.143	2.421
13	2.09	0.337	90	1.547	1.431	0.479	1.081	3.229
14	2.10	0.342	95.2	1.579	1.485	0.472	1.064	3.349
15	2.09	0.343	91.5	1.580	1.445	0.470	1.094	3.360
16	1.98	0.345	62.7	1.301	1.175	0.467	1.108	2.785
17	1.98	0.347	63.5	1.191	1.178	0.464	1.011	2.565
18	1.98	0.351	63.7	1.270	1.172	0.458	1.084	2.771
19	1.99	0.379	83	1.317	1.300	0.419	1.013	3.141
20	1.99	0.381	82.9	1.323	1.297	0.417	1.020	3.175
21	1.97	0.386	81.6	1.395	1.276	0.410	1.094	3.403
22	1.82	0.403	51.5	0.948	0.975	0.388	0.972	2.441
23	1.81	0.405	50.5	0.935	0.962	0.386	0.972	2.425
24	1.80	0.408	50.5	0.853	0.957	0.382	0.891	2.234
25	1.95	0.43	96.3	1.362	1.320	0.356	1.032	3.831
26	1.95	0.431	95.4	1.443	1.313	0.354	1.099	4.073
27	1.90	0.442	89.5	1.362	1.258	0.342	1.082	3.984

Table F-3 Measured and Calculated Thermal Conductivities
of Mixture(JNC/PNC)

Sample number	$\rho_d(\text{cm}^3)$	n	Sr(%)	Ps(%)	$\lambda_{m,e}(\text{W/mK})$	$\lambda_{b,p}(\text{W/mK})$	$\lambda_{bd,p}(\text{W/mK})$	$\lambda_{m,e}/\lambda_{b,p}$	$\lambda_{m,e}/\lambda_{bd,p}$
1	1.571	0.425	0.0	20.0	0.731	0.362	0.362	2.021	2.021
2	1.571	0.425	20.0	20.0	0.900	0.625	0.362	1.441	2.488
3	1.571	0.425	30.4	20.0	1.060	0.737	0.362	1.439	2.930
4	1.571	0.425	45.4	20.0	1.543	0.890	0.362	1.734	4.265
5	1.571	0.425	68.7	20.0	1.928	1.114	0.362	1.731	5.329
6	1.571	0.425	83.8	20.0	1.972	1.252	0.362	1.575	5.451
7	1.422	0.479	82.6	18.2	1.797	1.148	0.302	1.565	5.945
8	1.370	0.498	72.7	17.7	1.734	1.027	0.284	1.688	6.114
9	1.360	0.502	93.0	17.6	1.981	1.198	0.280	1.653	7.080
10	1.360	0.502	91.1	17.6	1.971	1.182	0.280	1.668	7.044
11	1.360	0.502	91.1	17.6	1.971	1.182	0.280	1.668	7.044
12	1.359	0.502	0.7	17.8	0.411	0.292	0.280	1.408	1.470
13	1.359	0.502	0.7	17.8	0.511	0.292	0.280	1.751	1.828
14	1.359	0.502	5.7	17.8	0.509	0.359	0.280	1.417	1.820
15	1.359	0.502	11.8	17.8	0.562	0.431	0.280	1.304	2.010
16	1.359	0.502	15.8	17.8	0.585	0.475	0.280	1.233	2.092
17	1.359	0.502	16.8	17.8	0.646	0.486	0.280	1.331	2.310
18	1.359	0.502	19.4	17.8	0.680	0.513	0.280	1.325	2.432
19	1.359	0.502	20.0	17.8	0.729	0.519	0.280	1.405	2.607
20	1.359	0.502	25.9	17.8	0.746	0.580	0.280	1.286	2.668
21	1.359	0.502	28.8	17.8	0.845	0.609	0.280	1.388	3.022
22	1.359	0.502	35.0	17.8	1.105	0.670	0.280	1.649	3.952
23	1.359	0.502	35.1	17.8	1.126	0.671	0.280	1.678	4.027
24	1.359	0.502	43.7	17.8	1.385	0.754	0.280	1.837	4.953
25	1.359	0.502	44.3	17.8	1.321	0.760	0.280	1.738	4.725
26	1.359	0.502	55.0	17.8	1.558	0.860	0.280	1.812	5.572
27	1.359	0.502	55.7	17.8	1.447	0.866	0.280	1.670	5.175
28	1.359	0.502	70.4	17.8	1.728	1.000	0.280	1.729	6.180
29	1.359	0.502	93.9	17.8	1.854	1.205	0.280	1.538	6.631
30	1.359	0.502	95.8	17.8	2.144	1.222	0.280	1.755	7.668
31	1.349	0.506	54.3	17.5	1.397	0.847	0.276	1.649	5.060
32	1.349	0.506	74.2	17.5	1.797	1.027	0.276	1.750	6.509
33	1.349	0.506	54.3	17.5	1.397	0.847	0.276	1.649	5.060
34	1.349	0.506	54.3	17.5	1.397	0.847	0.276	1.649	5.060
35	1.343	0.508	1.2	33.3	0.688	0.295	0.274	2.333	2.511
36	1.343	0.508	11.8	33.3	0.827	0.423	0.274	1.954	3.018
37	1.343	0.508	17.4	33.3	0.999	0.485	0.274	2.061	3.646
38	1.343	0.508	18.3	33.3	1.006	0.494	0.274	2.036	3.671
39	1.343	0.508	39.0	33.3	1.745	0.701	0.274	2.490	6.368
40	1.343	0.508	72.3	33.3	2.403	1.007	0.274	2.387	8.769

Continued

Sample number	$\rho_d(\text{cm}^3)$	n	Sr(%)	Ps(%)	$\lambda_{m,e}(\text{W/mK})$	$\lambda_{b,p}(\text{W/mK})$	$\lambda_{bd,p}(\text{W/mK})$	$\lambda_{m,e}/\lambda_{b,p}$	$\lambda_{m,e}/\lambda_{bd,p}$
41	1.338	0.510	2.6	17.4	0.457	0.312	0.272	1.463	1.678
42	1.338	0.510	27.0	17.4	0.799	0.581	0.272	1.375	2.934
43	1.338	0.510	2.6	17.4	0.457	0.312	0.272	1.463	1.678
44	1.338	0.510	27.0	17.4	0.799	0.581	0.272	1.375	2.934
45	1.338	0.510	2.6	17.4	0.457	0.312	0.272	1.463	1.678
46	1.338	0.510	27.0	17.4	0.799	0.581	0.272	1.375	2.934
47	1.327	0.514	1.1	17.3	0.449	0.287	0.269	1.566	1.671
48	1.327	0.514	1.1	17.3	0.449	0.287	0.269	1.566	1.671
49	1.327	0.514	1.1	17.3	0.449	0.287	0.269	1.566	1.671
50	1.158	0.576	1.0	15.6	0.312	0.232	0.218	1.342	1.433
51	1.158	0.576	16.9	15.6	0.454	0.402	0.218	1.128	2.085
52	1.158	0.576	37.2	15.6	0.890	0.591	0.218	1.505	4.086
53	1.158	0.576	86.3	15.6	1.655	1.011	0.218	1.637	7.599
54	1.132	0.585	0.8	29.6	0.440	0.222	0.211	1.983	2.089
55	1.132	0.585	13.2	29.6	0.607	0.356	0.211	1.704	2.881
56	1.132	0.585	29.2	29.6	1.050	0.507	0.211	2.073	4.984
57	1.132	0.585	78.2	29.6	2.192	0.928	0.211	2.363	10.405
58	0.968	0.646	0.5	13.3	0.159	0.178	0.171	0.891	0.927
59	0.968	0.646	13.4	13.3	0.273	0.303	0.171	0.900	1.592
60	0.968	0.646	28.3	13.3	0.628	0.432	0.171	1.454	3.662
61	0.941	0.655	0.8	25.9	0.227	0.176	0.166	1.293	1.368
62	0.941	0.655	10.9	25.9	0.419	0.273	0.166	1.536	2.525
63	0.941	0.655	21.8	25.9	0.765	0.368	0.166	2.079	4.610
64	0.941	0.655	85.0	25.9	1.878	0.870	0.166	2.158	11.317
65	0.762	0.721	0.1	53.3	0.482	0.134	0.133	3.587	3.632
66	0.762	0.721	5.1	53.3	0.691	0.178	0.133	3.875	5.208
67	0.762	0.721	10.3	53.3	1.015	0.222	0.133	4.581	7.649
68	0.762	0.721	49.8	53.3	3.153	0.521	0.133	6.049	23.762

Continued

Sample number	$\rho_d(\text{cm}^3)$	n	Sr(%)	Ps(%)	KB	KE	KE/KB	KMX/KB	KY/KB	KFR/KB	KBR/KB	KJH/KB
1	1.571	0.425	0.0	20.0	0.362	0.731	2.021	1.519	1.878	1.599	1.577	1.678
2	1.571	0.425	20.0	20.0	0.625	0.900	1.441	1.407	1.599	1.447	1.434	1.479
3	1.571	0.425	30.4	20.0	0.737	1.060	1.439	1.368	1.519	1.398	1.389	1.421
4	1.571	0.425	45.4	20.0	0.890	1.543	1.734	1.322	1.432	1.342	1.336	1.357
5	1.571	0.425	68.7	20.0	1.114	1.928	1.731	1.265	1.336	1.277	1.273	1.285
6	1.571	0.425	83.8	20.0	1.252	1.972	1.575	1.235	1.289	1.244	1.241	1.249
7	1.422	0.479	82.6	18.2	1.148	1.797	1.565	1.233	1.292	1.243	1.239	1.249
8	1.370	0.498	72.7	17.7	1.027	1.734	1.688	1.250	1.322	1.263	1.258	1.271
9	1.360	0.502	93.0	17.6	1.198	1.981	1.653	1.215	1.266	1.223	1.219	1.228
10	1.360	0.502	91.1	17.6	1.182	1.971	1.668	1.218	1.271	1.227	1.223	1.232
11	1.360	0.502	91.1	17.6	1.182	1.971	1.668	1.218	1.271	1.227	1.223	1.232
12	1.359	0.502	0.7	17.8	0.292	0.411	1.408	1.483	1.845	1.569	1.539	1.649
13	1.359	0.502	0.7	17.8	0.292	0.511	1.750	1.483	1.845	1.569	1.539	1.649
14	1.359	0.502	5.7	17.8	0.359	0.509	1.417	1.453	1.758	1.525	1.499	1.587
15	1.359	0.502	11.8	17.8	0.431	0.562	1.304	1.424	1.680	1.483	1.461	1.531
16	1.359	0.502	15.8	17.8	0.475	0.585	1.233	1.408	1.638	1.460	1.440	1.501
17	1.359	0.502	16.8	17.8	0.486	0.646	1.330	1.403	1.628	1.454	1.435	1.494
18	1.359	0.502	19.4	17.8	0.513	0.680	1.325	1.393	1.604	1.441	1.423	1.477
19	1.359	0.502	20.0	17.8	0.519	0.729	1.405	1.391	1.599	1.438	1.420	1.474
20	1.359	0.502	25.9	17.8	0.580	0.746	1.286	1.371	1.552	1.410	1.395	1.440
21	1.359	0.502	28.8	17.8	0.609	0.845	1.388	1.361	1.531	1.398	1.384	1.425
22	1.359	0.502	35.0	17.8	0.670	1.105	1.649	1.342	1.491	1.374	1.361	1.396
23	1.359	0.502	35.1	17.8	0.671	1.126	1.678	1.342	1.491	1.373	1.361	1.396
24	1.359	0.502	43.7	17.8	0.754	1.385	1.837	1.318	1.443	1.344	1.333	1.361
25	1.359	0.502	44.3	17.8	0.760	1.321	1.737	1.316	1.440	1.342	1.331	1.359
26	1.359	0.502	55.0	17.8	0.860	1.558	1.812	1.290	1.391	1.310	1.302	1.323
27	1.359	0.502	55.7	17.8	0.866	1.447	1.670	1.289	1.388	1.308	1.300	1.321
28	1.359	0.502	70.4	17.8	1.000	1.728	1.729	1.257	1.334	1.271	1.266	1.280
29	1.359	0.502	93.9	17.8	1.206	1.854	1.538	1.216	1.267	1.224	1.221	1.229
30	1.359	0.502	95.8	17.8	1.222	2.144	1.755	1.213	1.262	1.221	1.218	1.226
31	1.349	0.506	54.3	17.5	0.847	1.397	1.649	1.288	1.389	1.308	1.300	1.321
32	1.349	0.506	74.2	17.5	1.027	1.797	1.750	1.247	1.318	1.260	1.254	1.268
33	1.349	0.506	54.3	17.5	0.847	1.397	1.649	1.288	1.389	1.308	1.300	1.321
34	1.349	0.506	54.3	17.5	0.847	1.397	1.649	1.288	1.389	1.308	1.300	1.321
35	1.343	0.508	1.2	33.3	0.295	0.688	2.334	2.051	2.952	2.225	2.284	2.538
36	1.343	0.508	11.8	33.3	0.423	0.827	1.954	1.915	2.529	2.032	2.063	2.216
37	1.343	0.508	17.4	33.3	0.485	0.999	2.061	1.858	2.377	1.956	1.980	2.102
38	1.343	0.508	18.3	33.3	0.494	1.006	2.037	1.850	2.356	1.946	1.968	2.086
39	1.343	0.508	39.0	33.3	0.701	1.745	2.490	1.692	1.994	1.746	1.755	1.815
40	1.343	0.508	72.3	33.3	1.007	2.403	2.387	1.518	1.671	1.543	1.545	1.570

Continued

Sample number	$\rho_d(\text{cm}^3)$	n	Sr(%)	Pd(%)	KB	KE	KE/KB	KMX/KB	KY/KB	KFR/KB	KBR/KB	KJH/KB
41	1.338	0.510	2.6	17.4	0.312	0.457	1.463	1.461	1.792	1.540	1.511	1.610
42	1.338	0.510	27.0	17.4	0.581	0.799	1.375	1.360	1.536	1.399	1.384	1.427
43	1.338	0.510	2.6	17.4	0.312	0.457	1.463	1.461	1.792	1.540	1.511	1.610
44	1.338	0.510	27.0	17.4	0.581	0.799	1.375	1.360	1.536	1.399	1.384	1.427
45	1.338	0.510	2.6	17.4	0.312	0.457	1.463	1.461	1.792	1.540	1.511	1.610
46	1.338	0.510	27.0	17.4	0.581	0.799	1.375	1.360	1.536	1.399	1.384	1.427
47	1.327	0.514	1.1	17.3	0.287	0.449	1.566	1.469	1.819	1.553	1.522	1.630
48	1.327	0.514	1.1	17.3	0.287	0.449	1.566	1.469	1.819	1.553	1.522	1.630
49	1.327	0.514	1.1	17.3	0.287	0.449	1.566	1.469	1.819	1.553	1.522	1.630
50	1.158	0.576	1.0	15.6	0.232	0.312	1.342	1.439	1.784	1.527	1.489	1.602
51	1.158	0.576	16.9	15.6	0.402	0.454	1.128	1.374	1.600	1.429	1.405	1.470
52	1.158	0.576	37.2	15.6	0.591	0.890	1.505	1.316	1.463	1.350	1.334	1.372
53	1.158	0.576	86.3	15.6	1.011	1.655	1.638	1.221	1.284	1.233	1.227	1.239
54	1.132	0.585	0.8	29.6	0.222	0.440	1.982	1.973	2.933	2.164	2.205	2.501
55	1.132	0.585	13.2	29.6	0.356	0.607	1.704	1.843	2.478	1.969	1.986	2.156
56	1.132	0.585	29.2	29.6	0.507	1.050	2.073	1.723	2.146	1.805	1.812	1.911
57	1.132	0.585	78.2	29.6	0.928	2.192	2.363	1.486	1.646	1.513	1.512	1.541
58	0.968	0.646	0.5	13.3	0.178	0.159	0.891	1.387	1.699	1.474	1.429	1.541
59	0.968	0.646	13.4	13.3	0.303	0.273	0.900	1.345	1.571	1.406	1.373	1.447
60	0.968	0.646	28.3	13.3	0.432	0.628	1.454	1.307	1.474	1.350	1.327	1.377
61	0.941	0.655	0.8	25.9	0.176	0.227	1.293	1.860	2.770	2.048	2.059	2.357
62	0.941	0.655	10.9	25.9	0.273	0.419	1.536	1.776	2.446	1.915	1.916	2.113
63	0.941	0.655	21.8	25.9	0.368	0.765	2.079	1.704	2.215	1.809	1.807	1.943
64	0.941	0.655	85.0	25.9	0.870	1.878	2.158	1.439	1.595	1.466	1.463	1.492
65	0.762	0.721	0.1	53.3	0.134	0.482	3.586	3.711	7.200	4.295	5.401	6.730
66	0.762	0.721	5.1	53.3	0.178	0.691	3.874	3.528	6.321	4.013	4.822	5.758
67	0.762	0.721	10.3	53.3	0.222	1.015	4.580	3.367	5.654	3.774	4.386	5.084
68	0.762	0.721	49.8	53.3	0.521	3.153	6.049	2.584	3.360	2.724	2.863	3.028

Table F-4 Measured and Calculated Thermal Conductivities
of Mixture(Kiyohashi)

Sample number	$\rho_d(\text{cm}^3)$	n	Sr(%)	Ps(%)	KB	KE	KE/KB	KMX/KB	KY/KB	KFR/KB	KBR/KB	KJH/KB
1	2.04	0.254	81.0	25.8	1.442	1.954	1.355	1.262	1.311	1.269	1.268	1.274
2	2.03	0.256	81.0	25.8	1.441	1.865	1.295	1.263	1.312	1.269	1.268	1.274
3	2.02	0.260	78.3	25.7	1.416	1.077	0.761	1.267	1.319	1.274	1.273	1.280
4	2.00	0.266	49.7	24.9	1.161	1.358	1.170	1.324	1.406	1.337	1.334	1.347
5	2.00	0.267	49.5	24.9	1.158	1.495	1.291	1.325	1.407	1.338	1.335	1.348
6	2.00	0.268	49.3	24.9	1.155	1.356	1.174	1.326	1.409	1.338	1.336	1.349
7	1.94	0.291	89.7	25.5	1.488	2.151	1.446	1.248	1.293	1.254	1.253	1.259
8	1.92	0.296	88.2	25.4	1.470	1.890	1.285	1.251	1.297	1.257	1.256	1.262
9	1.91	0.300	86.6	25.2	1.453	1.928	1.327	1.253	1.300	1.259	1.258	1.264
10	1.85	0.321	69.8	24.4	1.279	1.749	1.367	1.285	1.349	1.295	1.293	1.302
11	1.84	0.325	63.6	24.1	1.217	1.800	1.479	1.297	1.368	1.308	1.306	1.317
12	1.84	0.325	48.5	23.7	1.073	1.581	1.474	1.331	1.424	1.346	1.343	1.359
13	1.83	0.329	48.0	23.6	1.062	1.347	1.264	1.333	1.427	1.348	1.345	1.361
14	1.83	0.329	49.0	23.7	1.072	1.364	1.272	1.332	1.424	1.347	1.343	1.359
15	1.82	0.335	41.6	23.3	0.990	1.208	1.220	1.350	1.457	1.368	1.364	1.383
16	1.79	0.346	91.8	24.6	1.445	2.014	1.394	1.248	1.295	1.255	1.253	1.259
17	1.78	0.347	83.9	24.4	1.373	2.070	1.508	1.263	1.316	1.270	1.268	1.276
18	1.77	0.350	70.6	23.9	1.247	2.162	1.733	1.287	1.353	1.297	1.294	1.305
19	1.70	0.379	72.5	23.5	1.222	1.684	1.378	1.288	1.356	1.298	1.296	1.307
20	1.70	0.379	71.9	23.4	1.216	1.695	1.394	1.288	1.357	1.299	1.296	1.307
21	1.69	0.380	71.6	23.4	1.212	1.776	1.465	1.289	1.359	1.300	1.297	1.308
22	1.65	0.395	49.8	22.3	0.980	1.272	1.298	1.336	1.440	1.354	1.349	1.368
23	1.65	0.395	49.7	22.3	0.979	1.247	1.274	1.336	1.441	1.354	1.350	1.369
24	1.64	0.401	48.2	22.1	0.955	1.249	1.308	1.340	1.448	1.359	1.354	1.374
25	1.53	0.441	94.6	23.2	1.321	1.652	1.250	1.260	1.316	1.268	1.266	1.274
26	1.52	0.442	93.8	23.2	1.312	1.778	1.355	1.262	1.319	1.270	1.268	1.277
27	1.51	0.448	91.2	23.0	1.279	1.636	1.279	1.268	1.327	1.276	1.274	1.283

Continued

Sample number	$\rho_d(\text{cm}^3)$	n	Sr(%)	Ps(%)	$\lambda_{m,e}(\text{W/mK})$	$\lambda_{b,p}(\text{W/mK})$	$\lambda_{bd,p}(\text{W/mK})$	$\lambda_{m,e}/\lambda_{b,p}$	$\lambda_{m,e}/\lambda_{bd,p}$
1	2.037	0.254	81.0	25.8	1.954	1.442	0.617	1.355	3.166
2	2.031	0.256	81.0	25.8	1.865	1.441	0.614	1.295	3.040
3	2.020	0.260	78.3	25.7	1.077	1.416	0.606	0.761	1.777
4	2.004	0.266	49.7	24.9	1.358	1.161	0.595	1.170	2.281
5	2.001	0.267	49.5	24.9	1.495	1.158	0.594	1.291	2.518
6	1.998	0.268	49.3	24.9	1.356	1.155	0.592	1.174	2.291
7	1.936	0.291	89.7	25.5	2.151	1.488	0.552	1.446	3.896
8	1.922	0.296	88.2	25.4	1.890	1.470	0.544	1.285	3.476
9	1.911	0.300	86.6	25.2	1.928	1.453	0.537	1.327	3.589
10	1.854	0.321	69.8	24.4	1.749	1.279	0.503	1.367	3.474
11	1.843	0.325	63.6	24.1	1.800	1.217	0.497	1.479	3.620
12	1.843	0.325	48.5	23.7	1.581	1.073	0.497	1.474	3.179
13	1.832	0.329	48.0	23.6	1.343	1.062	0.491	1.264	2.735
14	1.832	0.329	49.0	23.7	1.364	1.072	0.491	1.272	2.777
15	1.815	0.335	41.6	23.3	1.208	0.990	0.482	1.220	2.506
16	1.785	0.346	91.8	24.6	2.014	1.445	0.466	1.394	4.325
17	1.783	0.347	83.9	24.4	2.070	1.373	0.464	1.508	4.459
18	1.775	0.350	70.6	23.9	2.162	1.247	0.460	1.733	4.702
19	1.695	0.379	72.5	23.5	1.684	1.222	0.419	1.378	4.015
20	1.695	0.379	71.9	23.4	1.695	1.216	0.419	1.394	4.042
21	1.693	0.380	71.6	23.4	1.776	1.212	0.418	1.465	4.248
22	1.652	0.395	49.8	22.3	1.272	0.980	0.398	1.298	3.193
23	1.652	0.395	49.7	22.3	1.247	0.979	0.398	1.274	3.130
24	1.635	0.401	48.2	22.1	1.249	0.955	0.391	1.308	3.197
25	1.526	0.441	94.6	23.2	1.652	1.321	0.343	1.250	4.818
26	1.523	0.442	93.8	23.2	1.778	1.312	0.342	1.355	5.203
27	1.507	0.448	91.2	23.0	1.636	1.279	0.335	1.279	4.883