



非定常細線加熱法による混合物質の熱伝導率測定

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2014-03-04 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 戸倉, 郁夫, 斎藤, 図, 岸浪, 紘機, 竹川, 佳樹 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/778

非定常細線加熱法による混合物質の熱伝導率測定

戸倉郁夫・斉藤 図・岸浪紘機・竹川佳樹*

Application of the Transient Hot-Wire Method on Thermal Conductivity Measurement of Solid-Liquid Mixtures

Ikkuo TOKURA, Hakaru SAITO, Koki KISHINAMI and Yoshiki TAKEKAWA*

Abstract

The applicability of the transient hot-wire method to solid-liquid mixtures has been tested by experiments and by numerical analyses. The thermal conductivities were measured for mixtures of glass beads and ethyl alcohol. The measured thermal conductivities were compared with the data obtained by the standard steady flat-plate method. The thermal conductivity of the mixture obtained by the hot-wire method was found to deviate from those obtained by the steady flat-plate method with the increase in diameter of solid particles. A simple two-dimensional model of the mixtures has also been numerically analyzed in order to explain the measured results. In the numerical calculations of the wire temperature, the thermal conductivity is found to depend greatly on the void ratio of the mixture within the thermal penetration depth. In the mixture of large particle size, the local void ratio near the wire is different from that of the entire mixture. Accordingly, the use of the hot-wire method should be limited to solid-liquid mixtures of small particle size.

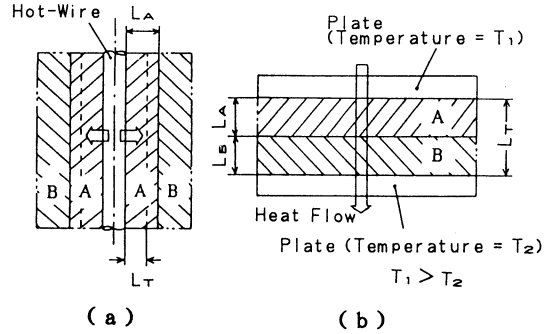
1. はじめに

近年、種々の物質の熱伝導率測定に、レーザーフラッシュ法あるいは細線加熱法等の非定常法が多く使用されるようになってきた。なかでも、非定常細線加熱法は簡便で精度がよい方法として、液体の熱伝導率の測定に広く用いられている¹⁻⁴⁾。この方法の利点には、1)試験部の構造が簡単である、2)測定時間が短い、3)自然対流の発生を検知できる、4)放射熱伝達の影響を少なくできる、等が挙げられる。

細線加熱法による熱伝導率測定は、純粋液体あるいは一相の混合液体について理論的⁵⁾、実験的⁶⁾に検討されており、すでに確立された方法であるといえる。したがって、この方法を一相の物質だけでなく多相の混合物質の熱伝導率測定に適用できれば、その工学的意義は極めて大であると思われる。しかしながら、多相混合物質の熱伝導率を非定常法で測定する場合には、検討しなければならない問題点がある。図1は、2種の物質AおよびBから構成される試料の熱伝導

* 日本電気ソフトウェア株式会社 (前産業機械工学専攻)

率を、細線加熱法（非定常法）と平板比較法（定常法）によって測定する状態を示したものである。細線加熱法では熱浸透厚さ L_T 内部に存在する物質の熱伝導率を測定するために、もし $L_T < L_A$ であれば、物質 B には無関係に物質 A の熱伝導率が測定される（図 1(a)）。これに対して、平板比較法では熱浸透距離が試料の厚さ（ $L_A + L_B$ ）に等しく（図 1(b)）、物質 A と B の影響が含まれた熱伝導率が測定されることになる。つまり、この極端な例からわか



図—1 多成分物質の熱伝導率測定：
(a)非定常細線加熱法，
(b)定常平板比較法

るように、混合物質を構成する各成分の分布の仕方によっては、非定常法と定常法による熱伝導率の測定結果が一致しない事態が生じる。したがって、細線加熱法を混合物質に適用するためには、成分物質の空間分布が熱伝導率の測定値におよぼす影響を明らかにしなければならない。

本研究では、非定常細線加熱法を多相混合物質に適用することを目的として、種々の粒子直径を有する固・液混合物質の熱伝導率を測定し、固体粒子径による測定値の変化を実験的に明らかにするとともに、その原因について解析的な検討を行なった。また、同じ試料について、定常平板比較法による熱伝導測定実験も行ない、両者の測定値を比較することにより、細線加熱法の混合物質にたいする適用限界を明らかにしようとするものである。

2. 非定常細線加熱法の理論

無限の広がりをもつ均質な流体中に、半径 r_0 で無限に長い線条熱源がある場合を考える。この細線は単位長さ当たりの発熱量を q W/m（一定）とする。また、流体の温度変化はわずかであり、物性値はその温度変化内で一定であると仮定する。Healy ら⁵⁾の理論によると、細線の温度上昇 ΔT は、次式によって与えられる。

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi\lambda} \left[\ln \left(\frac{4\alpha\tau}{r_0^2} \right) - \gamma + \frac{r_0^2}{2\alpha\tau} - \frac{k-1}{k} \frac{r_0^2}{2\alpha\tau} \left\{ \ln \left(\frac{4\alpha\tau}{r_0^2} \right) - \gamma \right\} \dots \right] \quad (1)$$

ここで、 k は流体と細線の熱容量比、 r は半径方向の距離、 α は流体の温度伝導率、 λ は流体の熱伝導率、 τ は時間、 γ はオイラー数である。この式より、もし $r_0^2/(4\alpha\tau) \ll 1$ が成立すれば、流体の熱伝導率を表わす式として、次式が導出される。

$$\lambda = \frac{q}{4\pi} \bigg/ \frac{d\Delta T}{d(\ln \tau)} \quad (2)$$

この式より、熱伝導率 λ は、細線の発熱量 q と細線の温度上昇速度 $d\Delta T/d(\ln \tau)$ によって決定されることがわかる。すなわち、細線加熱法による熱伝導率の測定値は、 q が一定の場合は、温度変化割合 $d\Delta T/d(\ln \tau)$ に反比例することがわかる。

3. 固・液混合物質の熱伝導率測定実験

細線加熱法が混合物質に適用できるかを調べるために、約40～850 μm の大きさを持つガラス玉とエチルアルコール混合物質の熱伝導率を測定した。混合物質のモデルとして球状粒子の充填物を選んだのは、粒子の形状が単純であり、測定結果を解析的に検討しやすいと考えたからである。用いたガラス玉の直径は、表1に示してある。実験では、一つの試料につき4回測定を繰り返し、結果の再現性を確認した。また、測定は、二つの方法、非定常細線加熱法および定常平板比較法を用いて行なった。

表-1 ガラス玉の直径

Sample No.	D_p mm
1	0.701～0.990
2	0.495～0.700
3	0.200～0.295
4	0.150～0.190
5	0.043～0.060
6	～0.042

3.1 非定常細線加熱法による測定

図2は、細線加熱法に使用した測定部（セル）を示したものであり、円筒容器の中心部に細線を設置した構造となっている。細線には、7.5 μm のポリエステルを被覆した直径40 μm の白金線を使用した。白金線の両端は、シリコンゴムを塗布した直径5mmの銅電極棒に接続されている。容器は外形42.7mm、内径36.7mm、長さ250mmのステンレス管であり、この中に試料（混合物質）が充填される。試料の熱伝導率は、白金線を通電加熱した際の白金線の発熱量と温度変化を測定することにより、式(2)を用いて算出される。白金線の両端部分は、熱容量の大きい銅電極に接続されているために、この部分の温度上昇が中央部分に比べて少なくなる。この効果を除去するために、2個のセルを使用し、それぞれには長さの異なる白金線（94および196mm）を設置した。実験装置の構成は、参考文献7)に示したものと同一であり、詳細は省略する。この実験の測定精度は $\pm 2.3\%$ と推算される。

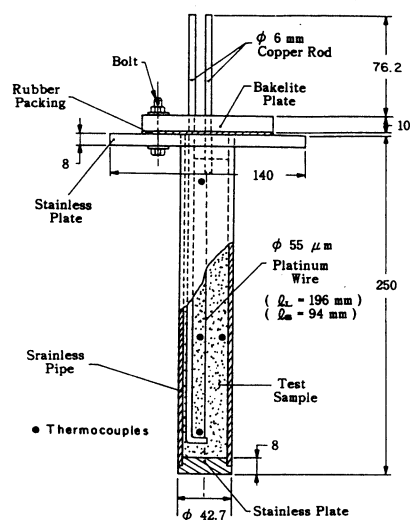


図-2 細線加熱法の試験部（セル）

図3は、細線加熱法によって得られた、混合物質（ガラス玉+エチルアルコール）の熱伝導率とガラス玉直径の関係を示したものである。この実験では、混合物質の空隙率 ϵ はどの試料（No.1～No.6）についてもほぼ一定であり、 $\epsilon \approx 0.35$ であった。この図より、測定値は、試料の空隙率および固体、液体の熱伝導率比が同じであっても、粒子の直径のとともに増加する傾向を示して

いる。したがって、細線加熱法による混合物質の熱伝導率の値は、固体粒子径によって変化することがわかる。これは、以下で考察するように、細線加熱法では細線の極く近傍の試料の空隙率が、細線の温度変化に大きな影響をおよぼすからである。

3.2 定常平板比較法による測定

図4は、平板比較法による熱伝導率測定の実験部を示したものである。試料は、大きさが130×130mmの2枚の水平に置かれた平行平板間に充填される。上の平板は、試料を通過する熱量を求めるための標準板であり、厚さが3mm、熱伝導率が0.263 W/(mK)のベークライト板である。下の平板は、厚さ5mmの銅板である。試料中に自然対流が発生しないように、上方加熱、下部冷却を行っており、試料の上下面の温度は、上部のヒータおよび試験部下部を流れる冷却液によって一定に保たれる。上部のヒータで発生した熱は、標準板および試料を通過し、冷却液によって運び去られる。また、測定部からの熱損失を最小にするために、試料の平均温度は室温と一致するように調節した。なお、標準試料としてエチルアルコールおよび蒸留水を用い、熱損失を見積もった。この装置による試料の熱伝導率 λ_m は、次式によって算出される。

$$\lambda_m \frac{\theta_2 - \theta_3}{l_m} = \lambda_B \frac{\theta_1 - \theta_2}{l_B} \quad (3)$$

ここで、 l_B ：ベークライト板の厚さ（= 3 mm），

λ_B ：ベークライト板の熱伝導率

l_m ：試料の厚さ（≒ 6 mm），

λ_m ：試料の熱伝導率

θ_1 ：試料および標準板の温度（図4参照）

図5は、平板比較法によって得られた固・液混合物質の熱伝導率を示している。試料の空隙率が0.35から0.43まで分布しているため、測定値に若干のバラツキが見られる。しかしながら、熱伝導率の値は、試料を構成する固体粒子の直径に依存せず、ほぼ一定となっていることがわかる。この結果は、前掲の細線加熱法による測定値の傾向と異なっており、固体粒子直径の大きさによって両者の測定法で得られた熱伝導率の値が異なることを示している。なお、図5には、比較のた

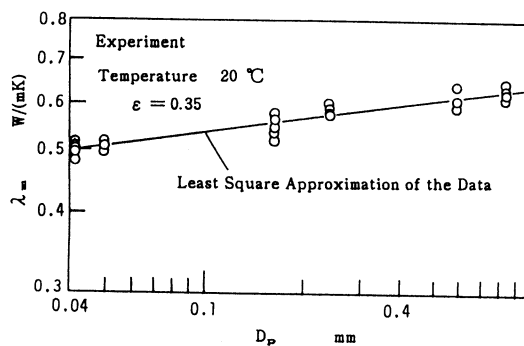


図-3 ガラス玉とエチルアルコール混合物質の熱伝導率（非定常細線加熱法）

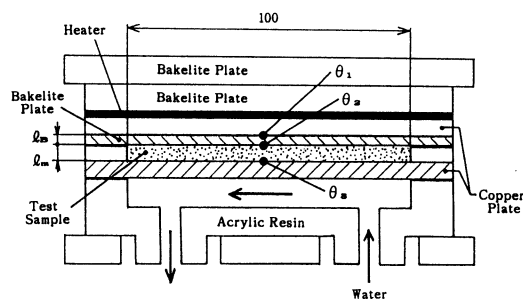


図-4 平板比較法の試験部

めに、混合物質の推算式の一つである Bruggeman の式⁸⁾より計算された熱伝導率の値を斜線の領域で示している。本実測値と Bruggeman の式による計算値はおよそ一致していることがわかる。

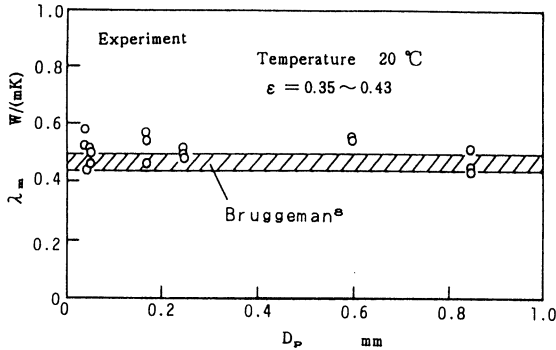


図-5 ガラス玉とエチルアルコール混合物質の熱伝導率 (定常平板比較法)

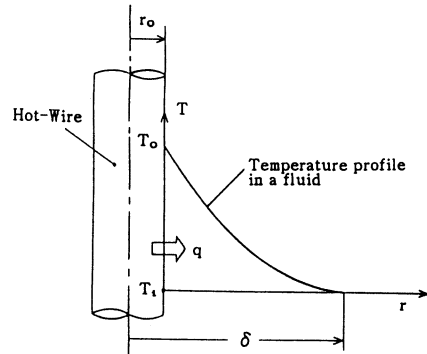


図-6 細線加熱法の物理モデル

4. 実験結果の検討

細線加熱法と平板比較法による混合物質の熱伝導率の違いを説明するために、以下の考察を行なう。

4.1 細線まわりの熱浸透厚さ

細線加熱法における試料中の熱浸透距離 δ を、図 6 に示される物理モデルを用い、積分法によって計算する。細線 (半径 r_0) および試料の初期温度 T_i である。時間 τ がゼロの瞬間から、細線が一定の熱量 q を発生するものとする。簡単のため、試料の物性値は一定と仮定する。試料の温度は、 $r > \delta$ の領域では初期温度 T_i のままであり、 $r_0 < r < \delta$ の部分では半径距離 r の二次式で表わされると仮定する。この温度分布は、次の境界条件を満足しなければならない。

$$r = r_0, \text{ all } z: \quad q = -2\pi r_0 \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=r_0} \quad (4)$$

$$r = \delta, \text{ all } z: \quad T = T_i, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (5)$$

この条件を満足するように係数を決定すると、温度分布はつぎようになる。

$$T - T_i = \frac{q}{4\pi r_0 \lambda (\delta - r_0)} (\delta - r)^2 \quad (6)$$

ここで、熱浸透距離 δ は、時間のみの関数である。試料の内部エネルギーの増加は、細線の表面

から試料に伝達された熱量に等しくなければならない。

$$\frac{d}{d\tau} \left[\int_{r_0}^{\delta} \rho r T dr \right] = -r_0 \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=r_0} \quad (7)$$

温度分布式(7)を上式に代入し、初期条件： $\tau=0$ で $\delta=r_0$ 、を用いて積分すると次式が得られる。

$$(\delta - r_0)^2 [(\delta - r_0) + 4r_0] = 24 \alpha r_0 \tau \quad (8)$$

ここで、 α は試料の温度伝導率である。 $(\delta - r_0) \gg 4r_0$ の条件が成立する場合には、式(8)は次のようになる。

$$\delta \doteq (24 \alpha r_0 \tau)^{1/3} + r_0 \quad (9)$$

図7は、三種類の物質について、熱浸厚さ $(\delta - r_0)$ を式(8)より計算した結果を示したものである。ここで、 $\alpha = 2.56 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ は、ガラス玉とエチルアルコール混合物の温度伝導率の近似値である。この図より、熱浸透厚さは、細線の加熱開始から5秒経過した時点で、1mm以下であることがわかる。この距離は、試料の大きさに比較してかなり小さなものである。したがって、細線加熱法では、この小さな距離の中にある物質の物性が、細線の温度上昇、さらには熱伝導率の値を決定することになる。

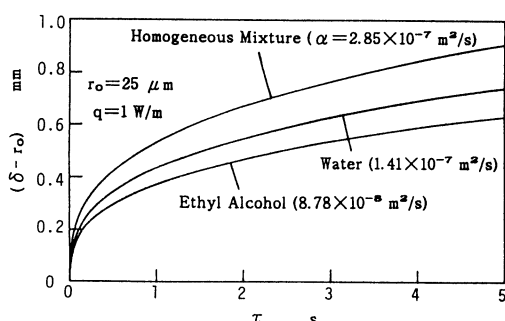


図-7 細線加熱法における試料中の熱浸透厚さ

4.2 細線加熱法における混合物質の不均一さの影響

混合物質の熱伝導率測定に細線加熱法を適用するためには、熱浸透厚さ内にある混合物質の不均一さが、熱伝導率の測定値に与える影響を明らかにしなければならない。この不均一さの影響は、混合物質を構成する固体粒子の直径が大きくなるほど、また、固体と液体の熱伝導率の値が異なるほど、顕著になるものと予測される。

以下では、固体粒子の大きさが熱伝導率に与える影響を検討するために、図8に示される解析モデルを用いて細線の温度変化を計算する。解析を簡単にするために、混合物質をリング状（断面が直径 D_p の円形）の固体が立方格子配列したものと液体から成る系と考え、二次元的に取り扱う。この系では、温度は円周方向に一定である。さらに、熱移動は熱伝導のみによとし、細線の単位体積当たりの発熱量は一定で

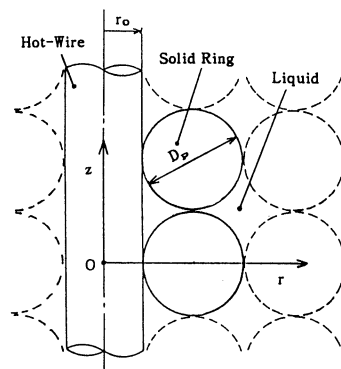


図-8 混合物質の解析モデル

あり、細線内部では半径および周方向に温度が一樣であると仮定する。細線の温度変化は、次の

方程式で表わされる。

$$c_o \rho_o \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_o \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{2}{r_o} \left(\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial r} \right)_{r=r_o} + q^* \quad (10)$$

ここで、 c_o , ρ_o , r_o は細線の比熱、密度、半径であり、 λ_o は細線の熱伝導率、 q^* は細線の単位体積当たりの発熱量である。

$$\text{初期条件：} \quad \tau < 0 : \quad T = T_i \quad (11)$$

$$\text{境界条件：} \quad z = 0, \quad \text{all } r : \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

$$z = D_p/2, \quad \text{all } r : \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (13)$$

混合物質の温度変化 T_m は、以下の方程式で記述される。

$$c_m \rho_m \frac{\partial T_m}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_m r \frac{\partial T_m}{\partial r} \right) \quad (14)$$

ここで、添字 m は混合物質の値を表わす。

$$\text{初期条件：} \quad \tau < 0 : \quad T_m = T_i \quad (15)$$

$$\text{境界条件：} \quad z = 0, \quad \text{all } r : \quad \frac{\partial T_m}{\partial z} = 0 \quad (16)$$

$$z = D_p/2, \quad \text{all } r : \quad \frac{\partial T_m}{\partial z} = 0 \quad (17)$$

$$r = r_o, \quad \text{all } z : \quad q = -2\pi r_o \lambda_m \left(\frac{\partial T_m}{\partial r} \right)_{r=r_o} \quad (18)$$

これらの方程式は、通常の陽的な差分法を用いた数値計算によって解くことができる。半径および軸方向のきざみ幅を $\Delta r = \Delta z = 20 \mu\text{m}$ とした場合には、計算の安定条件を満たすために時間のきざみ幅として $\Delta \tau = 5 \times 10^{-6} \text{s}$ 以下の値が必要であった。各格子点における熱伝導率の値は、局所的な空隙率を用いて Bruggeman の推算式⁸⁾より算出した。図9に、熱伝導率が 0.54 W/(mK) 、 $c_p = 1.9 \times 10^6 \text{ J/(m}^3\text{K)}$ の均質な物質にたいする解析解と数値解の比較を示してある。この図より、両者は極めて良く一致しており、本数値計算法が妥当なものであることがわかる。

ガラスリングとエチルアルコール混合物質にたいする、細線（白金線）温度変化の計算結果を、図10に示してある。この場合、ガラス（固体）の熱伝導率（ 0.75 W/mK ）が、液体の値（ 0.168 W/mK ）よりも大きい。図中の破線は、空隙率一定（ $\epsilon = 0.2146$ ）の均質な物質にたいする細線の温度変化を示している。この空隙率は、図8に示した混合物質全体の空隙率に等しい。式(3)より、もしも他の条件が一定であれば、混合物質の熱伝導率の値は温度上昇速度 $d\Delta T/d(\ln \tau)$ によって決定される。図10より、時間が 0.2 から 2 s の期間内で $d\Delta T/d(\ln \tau)$ の値を算出すると、表2のようになる。この結果より、固体リングの直径 D_p が増加すると、 $d\Delta T/d(\ln \tau)$ の値は減

少することがわかる。これは、式(3)より、混合物質の熱伝導率が固体の直径とともに増加することを意味しており、前掲の実験結果(図3)と一致する傾向である。細線加熱法において、混合物質の熱伝導率が固体の直径 D_p とともに増加する理由は、つぎのように説明される。

図11は、細線表面からの距離 $(r-r_0)$ とその距離内の空隙率 ϵ の関係を示したものである。空隙率は、 $(r-r_0)$ の増加とともに急激に減少し、増減を繰り返しながら一定値0.2146に漸近することがわかる。細線加熱法は、熱浸透厚さ内部に位置する物体の熱伝導率を測定する非定常測定法である。熱浸透厚さは図7に示したごとく、時間の経過とともに増加する。したがって、図7および11より、細線加熱法においては、測定に關与する物体の厚さは時間とともに増大し、それとともに、測定に關与する物体の空隙率も時間的に変化することになる。

図10の $D_p = 800 \mu\text{m}$ の場合の細線の温度変化を、図12に誇張して示してある。熱浸透厚さ、すなわち $(r-r_0)$ は、時間の経過とともに増加する。加熱開始初期では、熱浸透厚さ $(r-r_0)$ 内の混合物質の空隙率は、図11の領域Aで表されるように、混合物質全体の空隙率

表-2 $d\Delta T/d(\ln \tau)$ の計算値

D_p μm	$d\Delta T/d(\ln \tau)$
$\epsilon = \text{const.}(0.2146)$	0.146
120	0.139
400	0.138
800	0.128

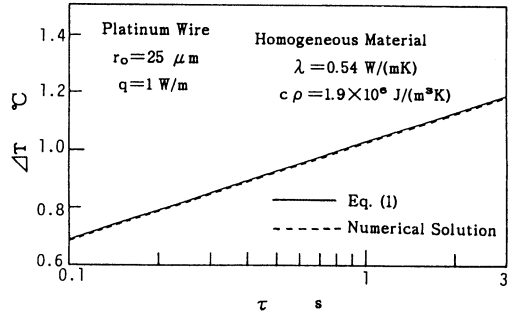
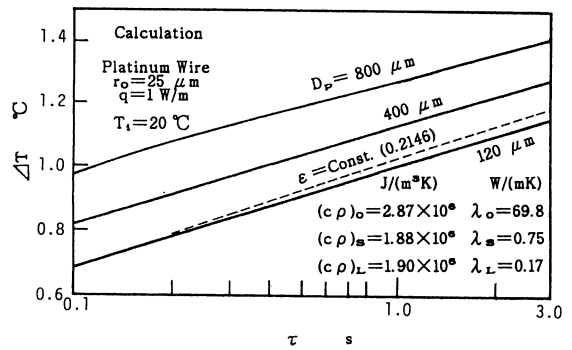
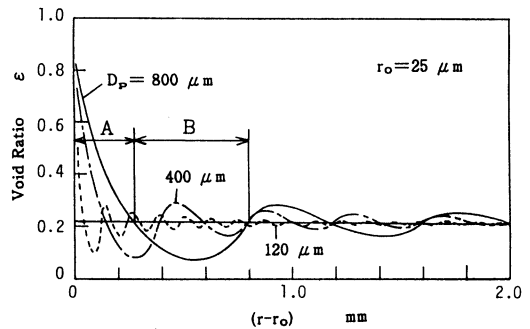


図-9 細線の温度変化(解析解と数値解の比較)

図-10 細線温度変化の計算結果
(ガラスリングとエチルアルコール混合物質)図-11 熱浸透厚さ $(r-r_0)$ 内部の試料の空隙率

($\epsilon = 0.2146$) に比較してかなり大きな値を示す。一般に、固体の熱伝導率 (λ_s) が液体の値 (λ_l) よりも大きい場合には、混合物質の熱伝導率は空隙率が大きい程、小さな値になる。それゆえ、加熱開始初期の細線の温度

は、図12の領域 A で示されるように変化し、この部分の $d\Delta T/d(\ln \tau)$ の値は大きな値を示す。時間が経過するとともに、熱浸透厚さ内の混合物質の空隙率は減少し、図11の領域 B で表わされる値をとる。この領域では、空隙率が混合物質全体の値 (0.2146) よりも小さいために熱伝導率の値も大きくなり、 $d\Delta T/d(\ln \tau)$ の値は図12の領域 B で示されるように、 $\epsilon=0.2146$ の場合よりは小さくなることがわかる。したがって、固体の直径が大きい場合には、この領域の小さな $d\Delta T/d(\ln \tau)$ の値を測定する可能性がある。この理由により、ガラス玉とエチルアルコール混合物質の場合、細線加熱法による熱伝導率の測定値は、固体の直径が大きいほど、熱伝導率の値を大きく見積もることになる。

以上の考察は、混合物質中の固体の熱伝導率の値 (λ_s) が液体の値 (λ_L) よりも大きな場合についてであった。図13は、ポリカーボネート ($\lambda_s=0.193 \text{ W/(mK)}$) と水 ($\lambda_L=0.6 \text{ W/(mK)}$) の混合物質にたいする細線の温度変化の計算値を示したものである。この場合には、 $\lambda_s < \lambda_L$ である。この図より、ポリカーボネートの直径 D_p が増加するとともに、 $d\Delta T/d(\ln \tau)$ の値は増加することがわかる。このことは、 D_p の増加とともに、熱伝導率の値は減少することを意味している。したがって、細線の温度変化の数値計算結果より、固体の直径が熱伝導率の測定値に与える影響は、 $\lambda_s < \lambda_L$ であるか $\lambda_s > \lambda_L$ であるかによって反対となることがわかった。

上述の数値解析の定量的な結果を、そのまま実際の固体・液体、あるいは固体・気体混合物質に適用することはできない。なぜなら、実際の混合物質中の固体粒子の形状、および配列のしかたは、図8で仮定した解析モデルとは異なると考えられるからである。しかしながら、細線加熱法は熱浸透厚さ内部の試料の熱伝導率の値を測定する方法である。固体粒子は、細線内部に浸入することができないために、細線表面近傍では内部と異なる配列を持つ。したがって、そこでの空隙率は、図11の領域 A および B で表わされる分布に近いものになるであろう。それゆえ、以

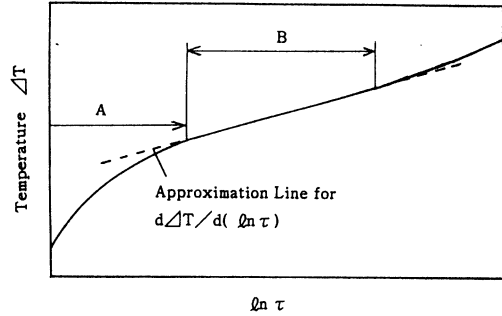


図-12 細線温度変化の説明図
(図10の $D_p=800 \mu\text{m}$ の場合)

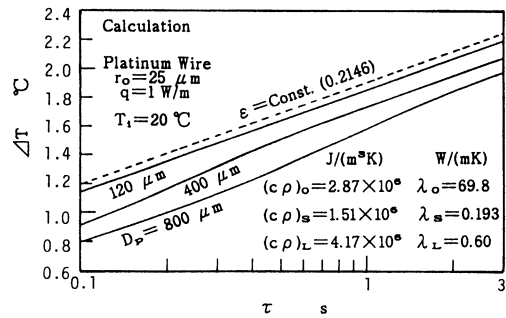


図-13 細線温度変化の計算結果
(水とポリカーボネートリング混合物質)

上の考察結果は、実際の混合物質にたいしても、定性的に適用できると考える。

4.3 細線加熱法の適用限界

混合物質（ガラス玉＋エチルアルコール）の熱伝導率の測定結果を、図14に示してある。図中の△印の値は、非定常細線加熱法による測定値であり、○印は定常平板比較法による値である。

また、2本の一点鎖線は、平板比較法によって得られた測定値の上限と下限を示している。両者の測定法による結果は、ガラス玉の直径が $250\mu\text{m}$ 程度までは、ほぼ一致していると見なすことができる

が、それ以上直径が大きくなると、細線加熱法による測定値が、平板比較法の上

限値よりも大きくなるのがわかる。したがって、固体と液体の熱伝導率比が約4程度の場合、細線加熱法は、固体粒子の直径が約 $250\mu\text{m}$ 程度の大きさまでの固・液混合物質に適用可能であるといえる。

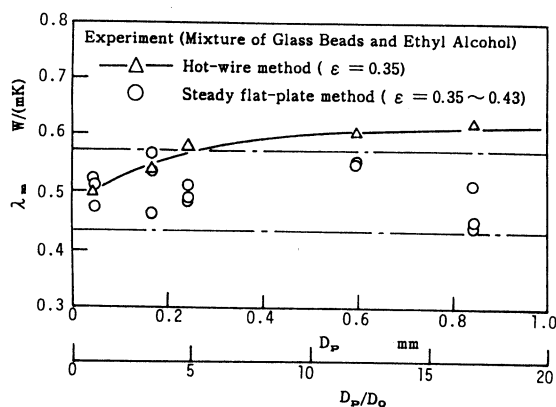


図-14 ガラス玉とエチルアルコール混合物質の熱伝導率（細線加熱法と平板比較法の比較）

5. おわりに

非定常細線加熱法を、固・液混合物質の熱伝導率測定に適用できるか否かについて、実験的、解析的に検討を行なった。本研究で得られた結果は、以下のように要約できる。

- (1) 細線加熱法による固・液混合物質の熱伝導率の測定値は、試料全体の空隙率が同一であっても、固体粒子の大きさによって異なる値を示す。これは、測定に参与する混合物質の空隙率が、熱浸透厚さの増加とともに変化することに起因する。この測定結果は、熱伝導率の値が固体粒子の直径に依らず一定値を示す平板比較法の場合とは一致しない。
- (2) 細線加熱法では、固体の熱伝導率 (λ_s) が液体の値 (λ_L) よりも大きい場合、混合物質の熱伝導率は、粒子の直径の増加とともに高めの値に測定される。反対に、 $\lambda_s < \lambda_L$ の場合には、粒子直径の増加とともに低めの値に測定される。
- (3) 平板比較法による測定値と比較した結果、細線加熱法は、固体粒子の直径が小さな固・液混合物質に適用可能であることがわかった。

最後に、本研究を遂行するに当たり、実験に協力いただいた、当時本学学生の林健次郎、増井

利嗣の両氏にたいし、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Sugawara, M. : Proc. 1st Asian Thermophysical Properties Conference, Beijing, China, April 21–24, 409(1986)
- 2) de Castro, C. A. N., Calad, J. C. G., Wakeham, W. A. and Dix, M. : J. Phys. E. Sci. Instrum. 9 1073(1976)
- 3) Kestin, J. and Wakeham, W. A. : Physica 92A 102(1978)
- 4) Nagasaka, Y. and Nagashima, A. : Rev. Sci. Instrum. 52 229(1981)
- 5) Healy, J. J., de Groot, J. J. and Kestin, J. : Physica 75 392(1976)
- 6) 長坂雄次, 長島 昭 : 日本機化学会論文集 (B編) 47 1323(1981)
- 7) Tokura, I., Saito, K., Altenkirch, R. A., and Evans, D. D. : Proc. The Combustion Institute, Illinois, Argonne, USA., May 11–12, 249(1987)
- 8) Power, A. E. : Knolls Atomic power Report KAPL 2145, General Electric Company, (1961)
- 9) Saito, H., Kishinami, K., Tokura, I. and Takekawa, Y. : Proc. 2nd Asian Thermophysical Properties Conference, Sapporo, Japan, September 20–22, 81(1989)