

初心者のための熱物性測定

(2) 熱伝導率・熱拡散率(そのII)

神本正行*, 金成克彦*, 高橋洋一**

[そのI (熱測定 8(3) 115-122)の内容]

1. はじめに
2. 熱伝導とその測定法の概観
3. 金属についての測定
 金属の熱伝導機構・定常縦熱流法と定常径熱流法・改良オングストローム法・アルムコ鉄の測定例
4. セラミックスとガラスについての測定
 セラミックスとガラスの熱伝導機構・レーザーフラッシュ法・ステップ加熱法・温度走査法
 (図・表・文献および式の番号は前号につづく)

5. 耐火煉瓦(れんが)等についての測定

5.1 耐火れんが等の熱伝導の特徴

前節までに述べた金属やセラミックスと異なり、れんがや岩石などは一般に多孔性であり、しかも成分組成・粒度や気孔分布などが場所的に必ずしも均一ではない。しかし、このような材料の熱的性質は省エネルギーなどの関連から工業的に次第に重要視されるようになり、その特性に適合した測定法の開発が重要な課題となっている。このような試料では、微量試料を用いての精度の高い測定法は必ずしも適当ではなく、出来得れば実際に使用する寸法形状のまま、多少の精度の低下は犠牲にしても簡便に行ない得る測定法がより目的にかなった方法である、と言える。

このような方法として、JISにはR 2616「耐火断熱れんがの熱流法による熱伝導率の試験方法」およびR 2618「耐火断熱れんがの熱線法による熱伝導率の試験方法」が定められている。ここではこれらの方法を中

心に紹介する。

5.2 非定常熱線法による測定²¹⁾

この方法は非定常法の一つであり、その原理は、試料中におかれた金属抵抗線に通電し、発生するジュール熱が周囲の試料に熱伝導により伝えられるとき、熱線(もしくはそのすぐ近傍)の温度上昇速度が試料の熱伝導率により異なることを利用したもので、初期には液体の熱伝導率測定法として用いられた。

いま、測定試料が無限の大きさを持つものと仮定し、その中央に無限長さの直線状の発熱線(試料の大きさに対して断面積は無視できるものとする)を置いたとする。発熱線の単位時間・単位長さあたりの発熱量を Q ($\text{kcal m}^{-1} \text{h}^{-1}$)とし、これが熱線に直交する2次元の面内に拡散するものとする、試料内の熱線からの距離 r の点における温度変化は、次の(14)式であらわされる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \quad (14)$$

ここに、 θ は温度上昇、 t は時間、 α は熱拡散率である。(14)式を、 $t=0$ ではすべての位置で $\theta=0$; $t>0$ では $Q=-2\pi rk \cdot \partial \theta / \partial r$ (ただし $r=\infty$ では常に $\theta=0$)、の条件下で解けば、次式を得る。

$$\theta = \frac{Q}{4\pi k} \left\{ -E_i \left(-\frac{r^2}{4\alpha t} \right) \right\} \quad (15)$$

$$-E_i(-x) = \int_x^\infty \frac{1}{x'} \exp(-x') dx'$$

$$= -C - \ln x + \frac{x}{1 \cdot 1!} - \frac{x^2}{2 \cdot 2!} + \dots \quad (16)$$

ここに $C=0.5772 \dots$ である。ここで、 $(r^2/4\alpha t)$ の値が十分小さい場合には、(16)式の高次の項が無視できるので、(15)式は近似的に次のようになる。

$$\theta = \frac{Q}{4\pi k} \left(\ln \frac{4\alpha t}{r^2} - C \right) \quad (17)$$

そこで、図15に示すように、熱線に接する一定位置での温度上昇 θ を $\ln t$ に対してプロットすれば、その勾配として $Q/4\pi k$ が得られ、 Q が既知であるので熱伝導率 k の値を求めることができる。

れんがや耐火材などの固体について測定する場合に

* 電子技術総合研究所：茨城県新治郡桜村梅園1-1-4 〒305

Masayuki Kamimoto, Katsuhiko Kanari; Electro-technical Laboratory, Sakura-mura, Ni-ihari-gun, Ibaraki 305, Japan.

** 東大工学部附属原子力工学研究施設：茨城県那珂郡東海村白方白根 〒319-11

Yoichi Takahashi; Nuclear Engineering Research Laboratory, University of Tokyo, Tokai-mura, Ibaraki 319-11, Japan.

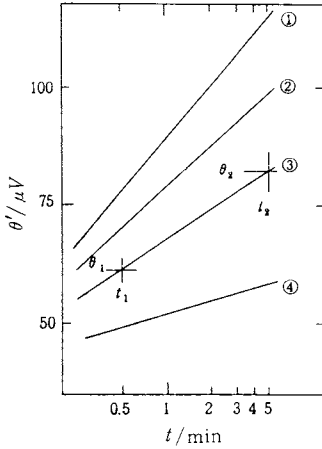


図 15 熱電対起電力で示した熱線の温度上昇 θ' と時間 t との関係²¹⁾

- ①耐火断熱れんが, ②ポリエステル樹脂
- ③高アルミナれんが, ④マグネシアれんが

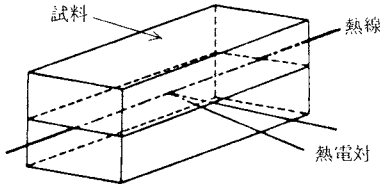


図 16 熱線法における熱線と熱電対の配置

は, 図 16 に示すように, 十分な大きさの 2 枚の試料の接合面の中央に熱線(直径 0.3 mm 程度のコンスタンタン線。高温測定には同直径の Pt-13% Rh 線などが用いられる)をセットする。熱電対は熱線に接するか, もしくはその近傍におかれる。高温での測定には, 加熱炉を用いて試料全体を昇温させる。測定装置の概要を図 17 に示す。

先に示した図 15 には, いくつかのれんが等の測定結

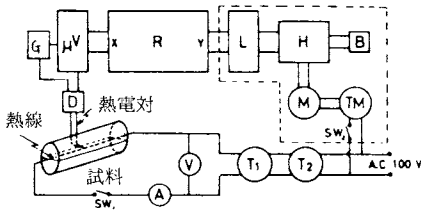


図 17 非定常熱線法の測定装置の概要²¹⁾

- A: 電流計, V: 電圧計, T₁, T₂: 変圧器, D: 冷接点,
- G: mV 発生器, μ V: 微小電圧計, R: X-Y 記録計,
- L: 対数変換器, H: ヘリカル電位差計, B: 直流電源,
- M: シンクロモーター, TM: 測定開始時間設定用タイマー, SW₁, SW₂: スイッチ

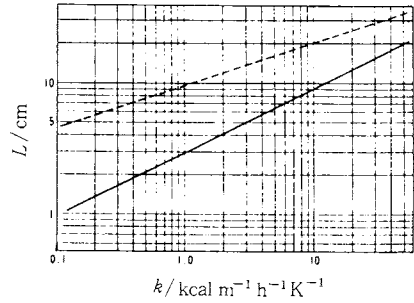


図 18 測定用試料に必要な最小寸法 L と熱伝導率との関係²¹⁾

- : 径方向の長さ(直径または辺の長さ)
- : 軸方向の長さ

果が示してある²¹⁾。図中に見られるように, 時間 t_1 , t_2 での温度上昇を θ_1 , θ_2 とすれば, k は次式で求められる。

$$k/\text{kcal m}^{-1} \text{h}^{-1} \text{K}^{-1} = 0.1576 \frac{I^2 R}{\theta_2 - \theta_1} \log \frac{t_2}{t_1} \quad (18)$$

ただし, I は熱線に通じた電流, R は抵抗値である。この式は簡便ではあるが, その使用に際しては $\theta - \log t$ 間の直線性を確認しなければならないのは勿論である。

この方法での測定の誤差をできるだけ小さくするためには, 前提となっている理想条件にできるだけ近づけるように努力する必要がある。たとえば必要とする試料の大きさはその熱伝導率の大きさに依存する(図 18)²¹⁾ ので, k が $1 \text{ kcal m}^{-1} \text{h}^{-1} \text{K}^{-1}$ 以下の低熱伝導性のものであれば, $30 \times 30 \times 100 \text{ mm}^3$ で十分であるが, $5 \text{ kcal m}^{-1} \text{h}^{-1} \text{K}^{-1}$ 程度のものであれば, $70 \times 70 \times 180 \text{ mm}^3$ 程度のものが望ましい(JIS-R 2618 では, $40 \times 80 \times 114 \text{ mm}^3$ 以上と規定している)。このような注意を払えば, この方法は簡便法であるにもかかわらず, $\pm 3\%$ 程度の誤差内で測定できることがたしかめられている。

6. 断熱材についての測定

6.1 断熱材の熱伝導の特徴

断熱材の特徴は気孔率が一般に大きい, ということであり, 構造を作る固体と空隙内の気体の二成分系として熱伝導を考えねばならない。一般に二成分系材料の熱伝導率は, 構成成分の組成・形状と分布の状態に大きく影響される。もっとも単純な仮定として熱伝導率に加成性が成立する場合(各成分を並列につないだことに相当)と熱抵抗に加成性が成立する場合(各成分を直列につないだことに相当)とを図 19 に 2 本の実線として示してある。複合材料のような実際の二成分系材料では, この二つの場合の中間となる。このような系については, 占くか

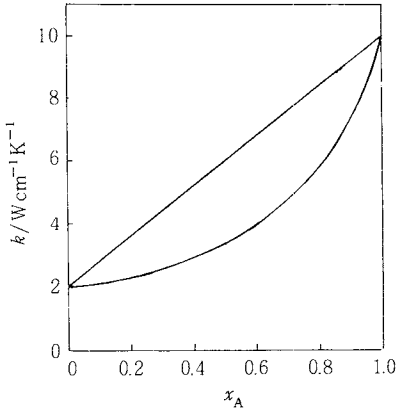


図19 A, B 2成分よりなる複合材料の熱伝導率の組成依存性の模式図
 x_A は A の容積分率

ら²³⁾種々の理論式が提案, 検討されている。

空隙内に気体を含む断熱材の場合には, このような固体や気体を通しての熱伝導の他に, 空隙内の気体の対流による伝熱, 素材や壁面からの放射による伝熱なども熱移動に寄与し, また断熱材の中に含まれる水分の移動による熱移動も無視できないため, さらに複雑となる。

図20に種々の断熱材のかさ密度と熱伝導率との関係²³⁾を示した。断熱材のかさ密度が小さくなると, 一般に熱伝導率は小さくなるが, さらにかさ密度が小さくなると逆に熱伝導率が大きくなるようになる。これは, 断熱材中の熱移動に対して, 対流などの, 伝導以外の伝熱機構がきいてくるためである。

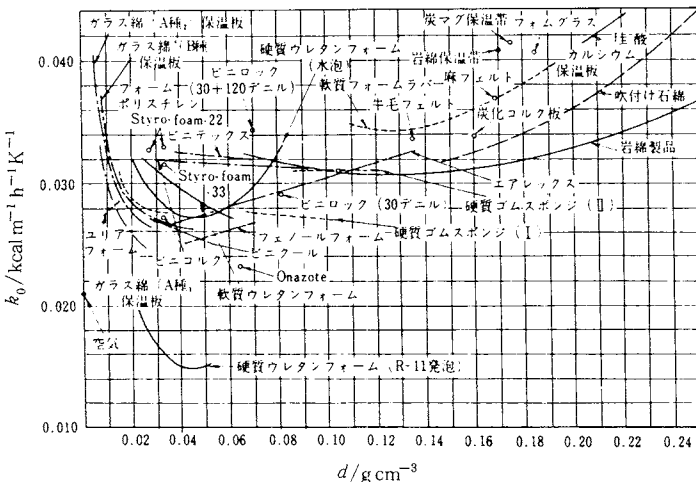


図20 断熱材の熱伝導率²³⁾
 平均温度0℃の熱伝導率 k_0 をかさ比重 d に対してプロットしてある。

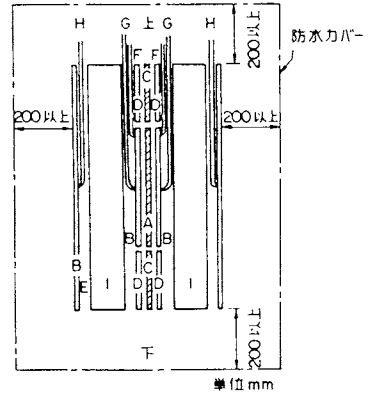


図21 Guarded Hot Plate 法の装置
 (JIS A1413の規定による)

- A: 主ヒーター, B: 主表面板, C: 保護ヒーター,
- D: 保護表面板, E: 冷却板, F: 示差熱電対列,
- G: 熱面用熱電対, H: 冷面用熱電対, I: 試料

このような伝熱機構の複雑さのため, 断熱材の熱伝導率は測定条件によって変る, いわば“見かけの熱伝導率”であり, k 値あるいは λ 値と呼ばれることがある。従って, 断熱材の測定にあたっては, なるべく使用状態に近い条件で測定する必要があり, JIS や ASTM にいくつかの測定法が規格化されている。ここでは, これらの測定法のうちの三つを紹介するが, これらはいずれも比較的大きな試料を用いる。この理由は, 使用状態に近い条件で測定すべきである, というもののほか, 非均質な材料である断熱材の, 場所によるちがいが生ずる測定値のばらつきを小さくする必要があるためである。

6.2 Guarded Hot Plate (GHP) 法による測定

断熱材の熱伝導率の代表的測定法が, ここに紹介する GHP 法で, JIS²⁴⁾ や ASTM²⁵⁾ に規格化されており高分子材料の測定にも利用できる。JIS に規定されている装置を図21に示す。主ヒーターで一定の発熱をさせ, 定常状態に達したあとの試料平板両面間の温度差から熱伝導率を求める, という原理は, 3.2節(前号 p.117)で紹介した通常の定常縦熱流法(図2)と同じである。

装置上異なる主な点は二つあり, 第一は棒状の試料ではなく平板状試料を用いることである。これは, 金属の熱伝導率(室温で $1 \sim 0.1 \text{ cal s}^{-1} \text{ cm}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

に比較して、断熱材や高分子材料の熱伝導率が3~5桁小さいためである。第二の特徴は、主ヒーターで発生させた熱が全部試料中を縦方向に通るように保護ヒーターを用いることである。主ヒーターと保護ヒーターとの温度が等しくなるように制御することにより、側方への熱損失を低下させることができる。図21の装置の例では、同じ厚さの2枚の試料板を用いて、熱が両側に均等に流れるようにしている。

この方法の利点は、断熱材や高分子材料の熱伝導率の絶対値を高精度(±1%以内も可能)に測定できることである。しかし、大きな平板試料(20~30 cm角程度)を必要とするため、全体が定常状態に達するのに長時間を要し、1日1点から2点の測定しか行なえないという欠点がある。

6.3 平板比較法および熱流量計法による測定

高精度での測定はできるが、測定に手数のかかるGHP法に対して、より簡便な測定法の必要性から、JISに平板比較法²⁶⁾が、ASTMに熱流量計法²⁷⁾が規格化されている。いずれも熱伝導率を相対的に求める方法であり、標準試料として熱履歴に対して安定で、熱伝導率の変化しないものを選ぶ必要がある。

図22にJISに規定された平板比較法の装置の構成を示す。ヒーターで発生させた熱は、試料平板、標準(試料)板の順(逆でもよい)に流れるようにして、全体が定常状態に達した時の試料平板の両面間の温度差 ΔT と、標準板の両面間の温度差 ΔT_0 から、次式により試料の熱伝導率を求める。

$$k = k_0 \cdot \frac{d}{d_0} \cdot \frac{\Delta T_0}{\Delta T} \quad (19)$$

ここに、 d は平板の厚み、添字0は標準板を表わす。標準板としてよく用いられるのは、ポリカーボネート樹脂、ポリテトラフルオロエチレン、グラスウールなどである。

熱流量計法では、図23のように薄い熱流量計を2枚の同形の平板試料に挟み、それを熱板と冷板の間に挿入

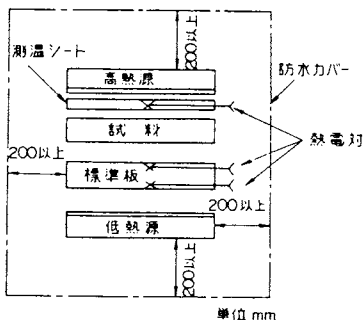


図22 平板比較法の装置(JIS A 1412の規定による)

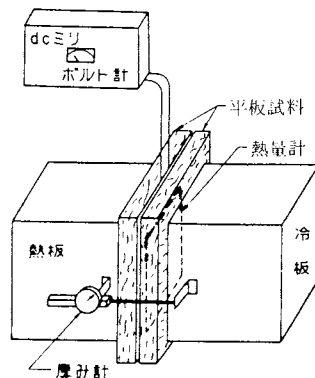


図23 熱流量計法の装置

熱板と冷板はそれぞれ一定温度に制御される。

するという構成をとる。熱板と冷板を一定温度に制御して試料に温度勾配を生じさせ、そのとき試料を通して流れる熱流束を熱流量計により測定して、熱伝導率を求める。熱流量計は両面に多数の接点をもつサーモパイルを埋め込んだ標準板であり、別途校正される。

このように、平板比較法の場合は標準板の既知の熱伝導率と温度勾配から、また熱流量計法では校正された熱流量計の出力から、試料を通る熱流束(前号p.117の(6)式の q)を求めることができるが、 q の絶対値を直接測定しないことがこれらの測定法の簡便さとなっている。測定の信頼性を高めるには、標準板や熱流量計の校正をときどき行なう必要がある。

7. 高分子材料についての測定

7.1 高分子材料の熱伝導の特徴²⁸⁾

高分子材料においても、絶縁性のセラミックスやガラスと同様に、熱を運ぶおもなキャリアはフォノンである。各種高分子材料の熱伝導率の温度依存性²⁹⁾を図24に示す。図に示されていないものを含めて、液体窒素温度から実用温度までの間での高分子材料の熱伝導率は $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ cal s}^{-1} \text{ cm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ の程度である。これは断熱材の値よりは大きい、金属やセラミックスよりは数桁小さい。

高分子材料には、ポリエチレンやポリテトラフルオロエチレンなどのように部分的に結晶化した結晶性高分子と、エポキシ樹脂やシリコンゴムなどのように高分子鎖の配置に規則性のない無定形高分子とがあり、これらの熱伝導率の温度依存性は、それぞれすでに述べた絶縁性のセラミックスとガラスの場合に類似している。

高分子材料の熱伝導率の測定には、6章のような平板試料を用いる定常法も利用できるが、必ずしも断熱材の場合のように大きな試料を用いる必要はなく、また、定常

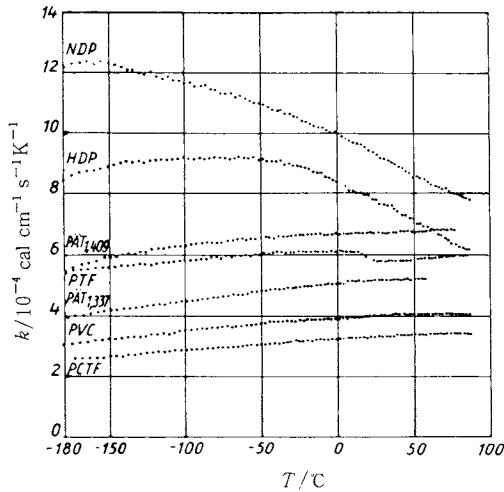


図24 高分子材料の熱伝導率²⁹⁾

- NDP : 低圧ポリエチレン
- HDP : 高圧ポリエチレン
- PAT_{1,409} : ポリエチレンテレフタレート
- PTF : ポリテトラフルオロエチレン
- PAT_{1,387} : ポリエチレンテレフタレート
- PVC : ポリ塩化ビニル
- PCTF : ポリクロロトリフルオロエチレン

径熱流法(前号p.117, 3.2節)もよく利用されている³⁰⁾。また熱線法(5.2節)やレーザーフラッシュ法(前号p.119, 4.2節)なども使用された例がある。これらの測定法はすでに述べたので、ここでは高分子の測定に用いられるそれら以外の方法として、準定常法と非定常法の代表例を一つずつ紹介する。

7.2 準定常縦熱流法による測定

ここで紹介する準定常縦熱流法²⁹⁾は、全体の温度を等速昇温させて測定を行なう方法であり、定常法に比べてより迅速に熱伝導率と温度との関係を求めることができる。

図25にこの方法の装置の構成を示す。熱容量既知の銅ブロックを2枚の同じ厚さの試料平板で挟み、さらにその両側を2枚の金属板で挟む構造となっている。試料平板の熱容量が銅ブロックの熱容量に比べて無視できる場合、この系全体が等速昇温するように制御することによって、熱伝導率は定常法の場合と同様に、試料形状と試料両面間の温度差(2枚の金属板間の温度差)から、(6)式(前号p.117)により求めることができる。このとき熱流束 q は銅ブロックの熱容量と昇温速度から定める。

この装置では、銅ブロックのまわりに2重の保護リングを配置して側方への熱損失を防いでいる。Eiermannら²⁹⁾は装置内の雰囲気を真空、1気圧の空気、ならびにヘリウムと変えて両面間の温度差を測定することにより、

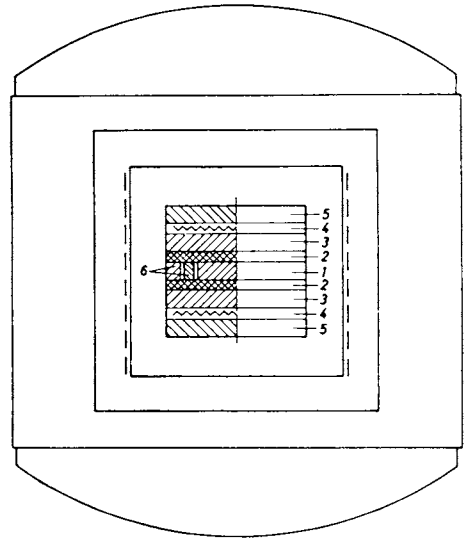


図25 準定常縦熱流法の装置²⁹⁾

- 1: 銅ブロック, 2: 試料, 3: 測温用金属板,
- 4: 熱板, 5: おさえ板, 6: 保護リング

試料と銅ブロックおよび熱板との間の接触抵抗の大きさを求め、その影響を除去している。

図24には、この装置を用いて高分子材料の $8 \times 8 \text{ cm}^2$ の試料平板(厚さ $1 \sim 2 \text{ mm}$)について測定された結果を示してある²⁹⁾。90℃から-180℃の温度範囲で、 $\pm 4\%$ 以内の誤差で測定がなされている。

7.3 時間積分法による測定

小沢の提案した時間積分法³¹⁾は、定量示差熱分析法の原理を逆に適用したもので、等速昇温の状態でも一定温度の状態でも測定が可能である。

図26に測定の原理を示す。ヒーター板を2枚の試料平板で挟み、さらに、同様な構成のダミーと共に金属ブロックで挟み、金属ブロックの温度を等速昇温状態になるよう温度制御する。このとき系全体もほぼ等速で昇温し、試料両面間温度差は一定となる。そのような状態下

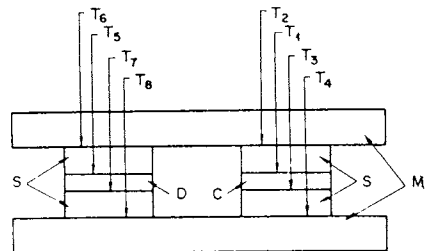


図26 非定常時間積分法の原理

- S: 試料, C: ヒーター板, D: ダミー
- M: 金属ブロック, $T_{1 \sim 8}$ はそれぞれの温度

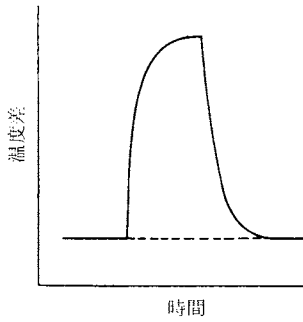


図 27 時間積分法における試料両面間温度差の時間変化の模式図

で中心のヒーターから一定かつ既知量の発熱をさせると、試料両面間温度差は、図 27 に示すようにピーク状に変化する。系全体の温度が一樣なときも同様である。

このとき、ピーク面積 $S (= \int_0^{\infty} \Delta T dt)$ とヒーターの発熱量 Q から、

$$k = \frac{d}{2A} \cdot \frac{Q}{S} \quad (20)$$

により熱伝導率を得ることができる。測定には 5 cm 角の平板を用い、その厚さは 1~5 mm である。ヒーター板や試料平板の側面からの熱損失を防ぐため、全体を 10^{-2} Pa 以下の真空中に入れ、また試料平板と金属板との間の接触熱抵抗を小さくするため、接触面にはシリコン・グリースを塗って測定を行なう。

この測定法の利点は、等速昇温下で測定ができるので、準定常縦熱流法と同様に、熱伝導率の温度変化が容易に測定できること、定常法と同様な単純な式により熱伝導率が求められることである。この方法を用いて、高分子やガラスの室温~200℃における熱伝導率が±3%の精度で測定されている³¹⁾。

8. 気体と液体についての測定

8.1 気体・液体の熱伝導

気体の熱伝導は分子の持つ並進運動および振動・回転のエネルギーの分子間の受け渡しにより伝わり、古典的な気体運動論によれば、もっとも単純な希薄な単原子分子気体の熱伝導率は $T^{1/2}$ に比例する。しかし、分子間力をもつ実際の系や多原子分子気体では、この関係は厳密には成り立たない。

液体においても、伝導電子の寄与の大きい液体金属を除いて、熱伝導は主として分子運動によるが、分子間相互作用が気体より強く、しかも固体のような長周期の規則性がないので、気体や固体にくらべて熱伝導率の推定は困難である。図 28 に種々の液体の熱伝導率がまとめ

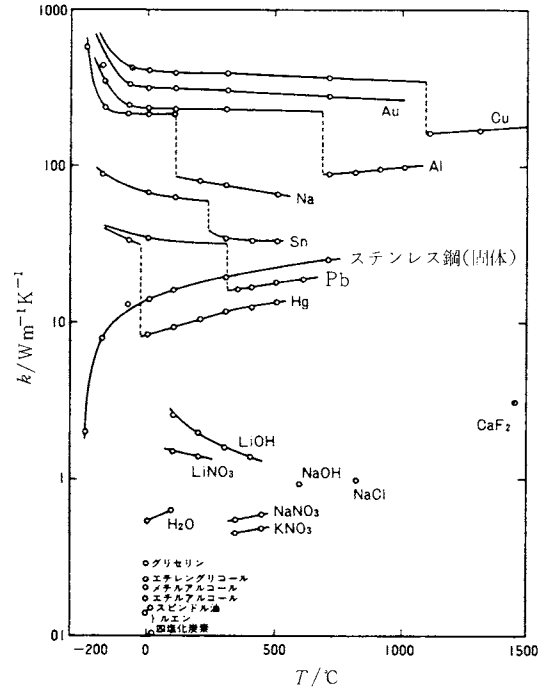


図 28 種々の液体の熱伝導率³²⁾

られたもの³²⁾を示してあるが、電子の寄与の大きい液体金属の値がきわめて大きく、その他の液体では物質による差はあまり大きくないことがわかる。

気体・液体では、熱伝達の機構として熱伝導のほか放射と対流があることはよく知られている通りであり、熱伝導率を測定しようとする場合には、これらの効果が無視できるような方法をとらなければならない。このような考慮・工夫がなされれば、これまでに紹介した固体に対しての測定法のほとんどが気体・液体についても適用可能である。しかし、実際には、気体については測定の多くが細線法(固体についての非定常熱線法と同等のもの)により行なわれている。一方、液体、特に熔融塩については多くの測定法が試みられている。ここでは特に液体の熱伝導率測定用に考案された二つの方法を紹介する。このほかステップ加熱法やレーザーフラッシュ法も試みられているが、液体の測定の場合は試料容器や不透明の受光板を使用する必要があり、結果の解析が複雑になってしまう。

8.2 可変間隔法による測定

この方法は平行平板法(定常縦熱流法)の一種であり、試料液体内の放射熱伝達の影響をとりのぞくために考案された³³⁾。測定原理は、熱伝導以外の放射などの伝熱が存在した場合、壁間の熱抵抗が壁間距離(試料厚さ)に比例しないことを利用する。図 29 は 526℃における HTS

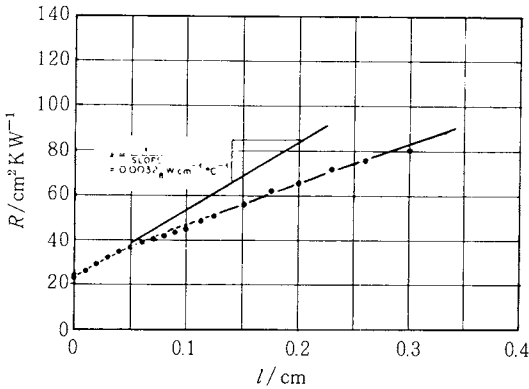


図 29 可変間隔法による溶融塩 (HTS) の測定例
全熱抵抗 R を試料厚さ l に対してプロットしてある³³⁾。

(40 wt% $\text{NaNO}_2 - 7\% \text{NaNO}_3 - 53\% \text{KNO}_3$) の測定例³³⁾で、試料厚さが大きくなると直線からのずれが現われている。この場合、熱伝導率は試料厚さが 0 に近い部分の直線の傾きから決定される。

8.3 波面分割干渉法による測定

この測定法では、透明な試料液体中に、光の進行方向に平行に張った金属箔を置き、これを通電加熱して試料中に温度分布を生じさせる。液体の屈折率は温度の関数であるから通電する光の光路長に差ができるので、この光をサバル板に通して二つに分割して干渉させれば、連続した二つの干渉縞の位置 x_1, x_2, x_3 を時間の関数として読みとることにより、次式から熱拡散率 α を求めることができる³⁴⁾。

$$\begin{aligned} \operatorname{erf}(x_1/2\sqrt{\alpha t}) - \operatorname{erf}(x_2/2\sqrt{\alpha t}) \\ = \operatorname{erf}(x_2/2\sqrt{\alpha t}) - \operatorname{erf}(x_3/2\sqrt{\alpha t}) \end{aligned} \quad (21)$$

波面分割干渉法の利点は、光学的な方法のため感度がよく、温度上昇による影響を小さくすることができる点である。また、対流の影響を除くこともできるが詳細は省略する。さらに、この方法では箔の発熱量と屈折率の温度係数がわかれば C_p や ρ の値を知らなくとも直接熱伝導率を求めることができることも大きな特徴である。実測例としては 420°C までの温度範囲で HTS の熱拡散率が測定されている³⁵⁾。

9. おわりに

以上、2 回にわたっていろいろな材料についての熱伝導率・熱拡散率の測定法を概観した。はじめにも述べたように、それぞれの測定法は特定の材料のみを対象にしたものではなく、測定条件を十分考慮してそれなりの工夫をすれば、広い範囲の材料についての測定が可能である。1500°C 以上のような高温や、高圧下などの極端条件

下での測定については触れる余裕がなかったが、これらについては文献^{1~6)}を参照していただきたい。

ここで、これまでに述べ残した点のいくつかについてまとめて触れておくこととする。

(1) 熱伝導率・熱拡散率の測定は、目に見えない熱エネルギーの移動を測定するものであるから、油断をすと思われ大きな誤差を生ずる恐れがある。常識的に考えられない温度依存性や組成依存性が得られたときには、測定条件を十分再検討して、測定をし直してみる必要がある。

(2) 試料の作成については、できるだけ均質な部分をえらび、測定前には試料の水分除去に十分注意するなど、試料自身に由来する誤差をできるだけ取り除くようにつとめなければならない。

(3) いくつかの測定法では熱伝導率と熱拡散率、あるいは熱拡散率と熱容量を同時に測定することが原理的に可能である。たとえばレーザーフラッシュ法では熱拡散率と熱容量の同時測定が可能なので、その両者のデータから熱伝導率も求められる、というのがこの測定法のメリットの一つにあげられている。この同時測定のメリットはたしかに大きいですが、たとえばかなり広い温度範囲について行なうとなると、測定上にいろいろ困難な問題が生ずる場合が少なくない。熱測定が決してやさしい測定ではないことを考慮すれば、基本的には同時測定は補助的なものと考えるべきであろう。

文 献

- 21) 林 国郎, セラミックス **11**, 994 (1976); 真空理工ジャーナル **8**, 24 (1979).
- 22) W. D. Kingery, *J. Am. Ceramic Soc.* **42**, 617 (1959).
- 23) 椎名直禮, 上原申次, 杉田 正, プラスチックス **27**, 26 (1976).
- 24) JIS A 1413.
- 25) ASTM C 177.
- 26) JIS A 1412.
- 27) ASTM C 518.
- 28) 和田八三久, 応用物理 **35**, 908 (1966).
- 29) K. Eiermann, K. H. Hellwege, W. Knappe, *Kolloid. Zeit.* **174**, 134 (1960).
- 30) 小沢丈夫, 金成克彦, 応用物理 **40**, 824 (1971).
- 31) 小沢丈夫, *Japan. J. Appl. Phys.* **6**, 1455 (1967).
- 32) 前園明一, 真空理工ジャーナル **10**, 27 (1981).
- 33) J. W. Cooke, *USAE Report*, No. ORNL-4831 (1973).
- 34) S. E. Gustafsson, *Z. Naturforsch.* **22a**, 1005 (1967).
- 35) O. Odawara, I. Okada, K. Kawamura, *J. Chem. Eng. Data* **22**, 222 (1977).