

# 「熱伝導率試験」

## その1 保護熱板法 (GHP法)

藤本 哲夫\*

### 1. はじめに

熱伝導率は、材料の物性値としては非常に重要なもののひとつで、工業分野では必要不可欠である。建築分野においても例外ではなく、特に最近の住宅の高断熱高气密化に伴い、住宅等の建物に用いられる材料の熱伝導率を正確に知ることが必要となっている。現在、建築における省エネルギーを図るために「エネルギーの使用の合理化に関する法律の中で、通称「次世代省エネルギー基準」と呼ばれている基準が制定されているが、それに伴い材料、特に断熱材の高性能化の必要に迫られている。建築においては、設計上、壁の厚さ等に制限があり熱伝導率の値如何では、ある材料を使うことができなくなるといったことも起こりうる。このため、正確な熱伝導率の測定を行うことが必要かつ重要となっている。

熱伝導率の測定法には様々なものがあり、測定対象によってそれぞれ向き不向きがある。気体や液体などの流体を測定する方法や、金属等の熱伝導率の大きな材料を測定する方法など種々の測定方法があるが、ここでは、今月号、来月号の2回に亘り建築材料、特に断熱材、保温材等の熱絶縁材（熱伝導率が非常に小さい材料）の熱伝導率測定のための試験方法について紹介する。

現在、断熱材、保温材の熱伝導率測定方法は **JIS A 1412**（熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測

定方法）として規定されているが、**JIS A 1412**は第1部、第2部、第3部の3部からなり、第1部が保護熱板法、第2部が熱流計法、第3部が円筒法となっている。今月号は、まず、断熱材等の熱伝導率測定方法の基本ともいえる第1部：保護熱板法による熱伝導率測定方法について紹介する。

### 2. 熱伝導率測定について

熱伝導率は、均質な材料に適用される物性値であり、建材のような複合材では、厳密な意味での熱伝導率ではないという意見もあるが、現実的には熱伝導率といっても差し支えない。

熱伝導率は、材料の熱の伝えやすさあるいは伝えにくさを表すための物性値であり、材料に特有の値である。熱伝導率が大きければ熱を伝えやすく、小さければ熱を伝えにくい。熱伝導率は、厚さ1mのものの材料の両面に温度差が1℃ついた時の熱移動量で定義される。従ってその値が小さいほど熱を伝えにくい、換言すれば断熱性能に優れるといえる。

ここでわかりただけだと思うが、結局熱伝導率の測定は、温度の測定と熱量の測定が全てといっても良い。温度の測定は、比較的簡単といえるが、熱量の測定は非常に難しい。結局、熱伝導率測定は、如何に精度良く熱量を測定できるかにつingるのである。このため、熱量の測定の仕方

\* (財) 建材試験センター中央試験所 環境グループ 統括リーダー代理

よって様々な測定方法が考えられてきた。

本稿では保護熱板式（Guarded Hot Plate：GHP法）熱伝導率測定装置について述べるが、この測定方法は、19世紀から行われており、断熱材の熱伝導率測定においては基本となる測定方法である。また、種々ある測定方法の基礎となるものである。

### 3. 試験装置

保護熱板式熱伝導率試験装置（以下GHPと呼ぶ）は、1968年に平板直接法としてJIS規格が制定され、その後内容的にはほとんど変わらずに使われていたが、1999年にJIS規格の国際整合化の

一環として大幅な改正が行われた。この改正では、ISOとの整合化が図られ、ISOをそのまま翻訳した内容となっており、一部日本の現状に合わせて規定の追加、修正が行われた。GHPのISO規格を作成したNPL（National Physical Laboratory）のR.P.Tye氏によると、この規格の基本的な姿勢は、この規格を読んだだけで誰でも同じ精度を持つ測定装置を製作、測定ができることとのことで、従って非常に細かな部分までの規定がある。これらの規定は、規格の最後に解説表として一覧が附されているので興味のある方はご覧いただきたいが、現実これら全ての規定を満足する装置を完璧に作ることは、かなり大変である。

試験装置は、図1に示す加熱板、冷却板が主と

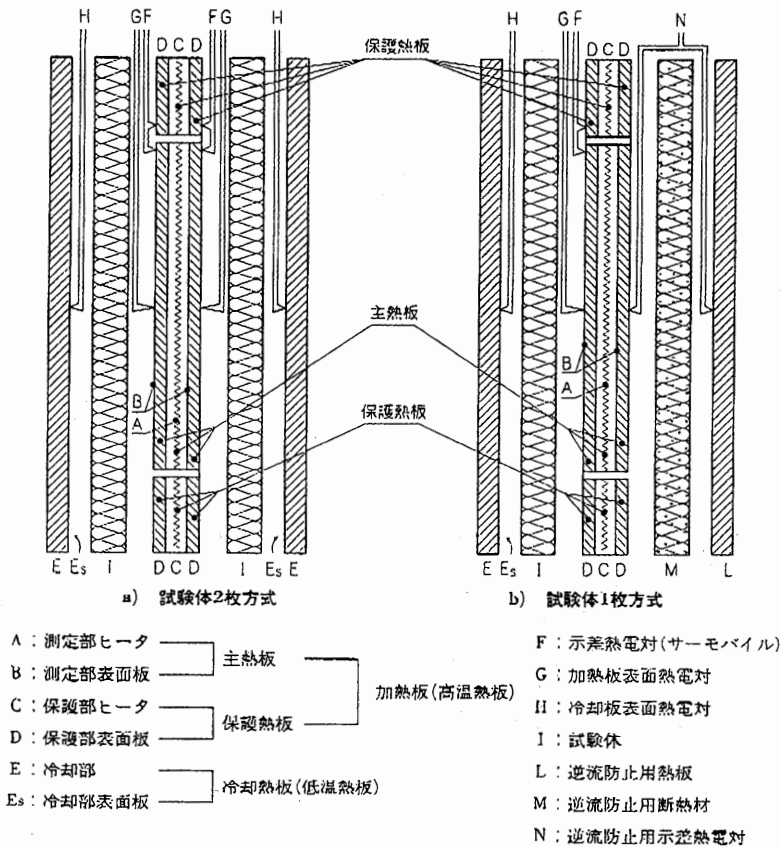


図1 保護熱板法の一般的な構成（JIS A 1412-1より）

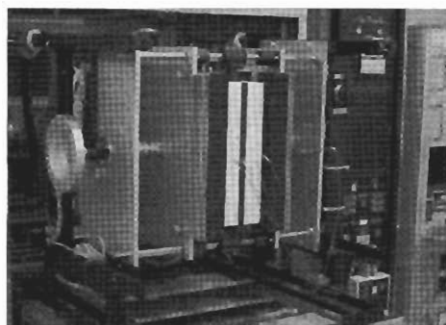


写真1 試験装置・試験体2枚方式

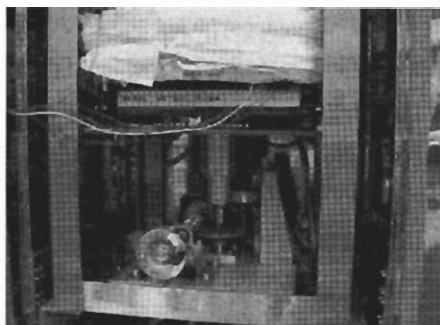


写真2 試験装置・試験体1枚方式

なる。測定の方法は試験体1枚方式と試験体2枚方式の2つの方法がある。通常の装置では同一の装置で両方の測定が行えるようにしたものが多い。中央試験所環境グループで所有する装置は、試験体2枚方式（1枚方式も測定可）のもの（写真1）と試験体1枚方式のもの（写真2）各1台であり、試験体の寸法はいずれも300mm×300mmで測定可能な最大厚さは50mmである。

測定部は、雰囲気を一定の温度に保つことのできる恒温槽に納められる。測定原理上、試験体の端部温度を加熱側温度と冷却側温度との平均温度に保つことで、測定誤差を最小にできるためである。また、恒温槽内は湿度の低い状態に保たれ（通常相対湿度50%以下）冷却板での結露が発生しないよう配慮されている。

断熱材の熱伝導率は、特にグラスウールなどの繊維質断熱材の場合、熱流の方向によって材料内部での対流熱移動量が変わるため、熱伝導率も変化するといわれているが、その差はさほど大きなものではない。通常試験体2枚方式の場合は、熱流方向は水平が一般的である。試験体1枚方式では、原理的に熱流方向は水平、下向き、上向きと自由に選べるが、当所の試験体1枚方式のGHPは熱流方向を下向きとしている。

GHPは、熱量測定のための主熱板の周囲に保護熱板を持つことで、試験体通過熱量を供給電力として測定する方法で、熱伝導率既知の標準板を

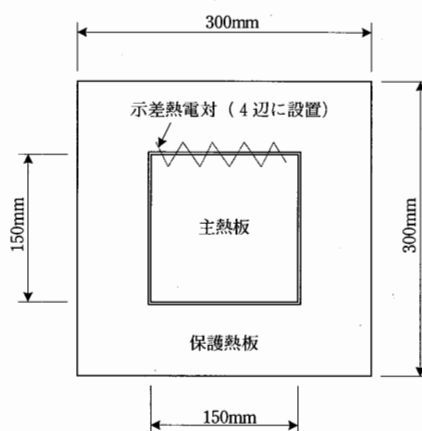


図2 加熱板

必要としないため、以前は直接法と呼ばれていた。加熱板は、図2に示したものが典型的なものであるが、中央部の主熱板にはヒータが入っており、ここに一定の電力を供給する。ただ単に電力を供給するだけでは周囲へも熱が逃げてしまうため、主熱板の周囲に保護熱板を設置し、保護熱板の温度が主熱板の温度と等しくなるように保護熱板を調節することで主熱板からの周囲への熱の逃げを防いでいる。主熱板と保護熱板は300mmの装置の場合、2mm以下のギャップによって縁が切られており、このギャップをはさんで主熱板と保護熱板との間に示差熱電対が取り付けられる。この示差熱電対の出力が0、つまり主熱板と保護熱板との間で温度差がないように保護熱板を調節する。こ

の部分GHPの心臓部ともいえるもので、この保護熱板の制御がうまくいけば測定も精度良く行うことができる。

試験体2枚方式では、加熱板を試験体で挟み込む形となるので、主熱板に供給した熱量が保護熱板側に逃げなければ、供給熱量は全て試験体を通過することになる。これに対して試験体1枚方式は、図1でわかるように加熱板の裏面側（試験体と反対側）への熱の逃げを防ぐために、加熱板裏面側に逆流防止用熱板を設け、そこと加熱板との間に示差熱電対を取り付けて、保護熱板と同じようにこの間での熱のやりとりがないようにする。

冷却板は、ウォータージャケットになっており、恒温水槽で冷却した水（凍結防止のためエタノールを混合している）を循環させて冷却する。冷却板にもヒータを取り付けて、電氣的に温度調節を行う場合もある。

温度測定には熱電対を用いることが一般的であるが、試験体表面温度をより正確に測定するために、細めの熱電対が用いられる。ただし、あまりにも細すぎるものはその扱いが容易ではなく、また、劣化もしやすいため、通常は線径0.2mm程度のものや箔状のものが用いられることが多い。

測定項目は、この温度と主熱板への供給電力であるが、通常、電力供給には直流電源を用いる。直流電流の測定は標準抵抗を用いて直流電圧に変換して行い、直流電圧、各部温度とともに多点電圧記録計（温度データロガーと呼ばれることが多い）で連続的に測定を行う。

#### 4. 試験体

試験体は、基本的には300mm×300mmで厚さが50mm以下で平板状のものであれば測定可能であるが、JIS規格では試験体の平滑度を試験体厚さの2%以下（厚さ25mmで0.5mm以下）と規定している。

規格では、測定可能な熱伝導率は、厚さ50mmとして0.5W/m・K以下と規定されているが、精度を落としても良ければ2.5W/m・K程度までの測定も可能としている。従って、金属の測定は無理であるが、コンクリートや岩石などの測定は可能である。しかし、この測定方法は断熱材、保温材の測定のためのものであり、そういった意味でも0.1W/m・K以下のものの測定に適しているといえる。逆に、測定可能な最小の熱伝導率は、電圧計の精度によるが、0.01W/m・K程度である。

試験体の養生についての規定はないが、通常は気乾状態での測定が多い。ここで気乾状態というのは、室内（通常温度15～30℃、相対湿度40～60%程度）である程度養生した状態をいう。しかし、熱伝導率は試験体の含水状態によって変わることもあるため、注意が必要である。ガラスウールなどのほとんど含水しないものであれば問題はないが、コンクリートなどでは、その含水率によって熱伝導率は大きく変化するため、測定時の含水率をきちんと把握しておくことが重要である。

また、試験体の平滑度については前述のとおりであるが、加熱板、冷却板ともに金属製であるため、コンクリートなどの固い材料では、薄いゴムシート（例えば厚さ0.5mm）等を試験体と加熱板及び冷却板との間に挟み込んで、隙間ができないようにして測定を行うこともあるが、測定精度が落ちることは否めない。

温度及び熱量の測定結果から熱伝導率を算出する際、試験体厚さが非常に重要となる。試験体の厚さが正確に測定できなければ、いくら温度や熱量を精度良く測定できても熱伝導率の測定誤差は大きくなる。このため、試験体の厚さは正確に測定する必要がある。通常は、試験体の4隅をノギスやマイクロメータを使って測定し、その平均値を試験体厚さとすることが多い。試験体は、温度変化を与えれば熱膨張によりその厚さも変化する

ことになるが、そのため、20℃前後の一定の温度下で測定した厚さを、試験体厚さとして計算に用いる。

## 5. 測定

測定は、試験体を装置にセットした後、各部が温度的にも熱量的にも定常状態となるまで行い、定常状態になった後の測定データを用いて熱伝導率を求める。

定常状態の判定は、規格に定める式から算出した時間以上の間隔で測定を行い、それぞれの熱抵抗を算出した結果が1%以上の差が無く、かつ一方向に変化しない4組の有効な測定値が得られることで行う。通常、1回の測定に半日から1日要することも多い。式は次に示すもので、加熱板及び試験体の熱容量を計算しそれに熱抵抗を掛けることで時間に行っている。時間の単位は秒となる。

$$\Delta t = (\rho_p c_p d_p + \rho_s c_s d_s) R$$

ここに  $\Delta t$ : 測定時間間隔 (秒)

$\rho_p$ : 加熱板の密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$c_p$ : 加熱板の比熱 ( $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ )

$d_p$ : 加熱板の厚さ (m)

$\rho_s$ : 試験体の密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$c_s$ : 試験体の比熱 ( $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ )

$d_s$ : 試験体の厚さ (m)

$R$ : 試験体の熱抵抗 ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )

測定の迅速化のために、主熱板への供給熱量を調節することも行われているが、調節計の制御係数 (PID値) の設定をきちんと行えば精度良くかつ迅速な測定も可能である。

加熱板と冷却板との温度差 (試験体両面温度差) は、規格では10K以上となっているが、当所では20Kとしている。試験体の温度差は、小さければ温度測定に伴う誤差、熱量測定に伴う誤差が増加する傾向にある。逆に温度差を付けすぎると温度測定、熱量測定に伴う誤差は減少するが、試験体端部と雰囲気との間での熱のやりとりも大きくなり、その部分での誤差を含みやすくなる。このため、通常は温度差を10K~30Kで測定することが一般的である。

## 6. おわりに

以上、GHP測定方法について述べたが、この測定方法は細心の注意が必要な測定方法であり、物理実験に近いといっても良いかもしれない。装置も非常に複雑で、制御系も多く、そのため、測定にはある程度の経験が必要ともいえる。本稿がこれから測定をしてみよう、あるいは測定を依頼してみようという方々の参考になれば幸いである。

来月号では、GHP法よりも測定がはるかに簡便な熱流計法による熱伝導率測定を中心に、それ以外の測定方法についても紹介する予定である。