

熱特性測定における接触抵抗誤差への対処

How to Reduce Contact Resistance Errors in Thermal Properties Measurements

KD2Pro はシングル加熱ニードルを使用して、サンプルの熱伝導率、熱抵抗率及び熱拡散率を測定する。ニードルはヒーターと温度センサーを内蔵しており、熱が加えられるとニードルの温度がモニターされる。サンプルの熱特性は線熱源の熱的振る舞いを考慮したモデルから得られる。この方法は、ASTM D5334-08 に詳細に記述されている(熱抵抗率/熱伝導率用)。

このモデルは、プローブとサンプルの間の適度な熱的接触を仮定している。液体サンプルはプローブとの熱的接触に優れ、高い水分含量の粒状材料と同様に、熱特性測定は正確である。乾いた粒状材料、特に粒の大きな材料では、プローブとサンプルの間の接点が微かなものとなるため、プローブからの熱の流れを妨害する接触抵抗は大きくなる。接触抵抗は線熱源モデルに含まれておらず、したがって、これらの材料の熱特性の測定における誤差となる。ASTM D5334-08 でこの誤差の縮小が推奨されているように、ここでの目的は、乾燥した粒状材料の接触抵抗に起因する熱伝導抵抗の誤差の大きさを評価し、熱伝導グリースの使用を検証することにある。

テスト材料の特徴は表1で与えられる。これらの材料の正確な熱抵抗値は、放射式定常法熱流セル(radial, steady state heat flow cell)中の熱流量と温度差を測定することで決定された。装置は25cm長のヒーター(直径1cm)と直径3cmの銅管で構成される。ヒーターは、グラファイト管に14.6mの被覆銅線(#30)を取付け作製されたものである。クロメル-コンスタンタン熱電対(#40)が、ヒーターの中心及び同じ高さの銅管の外部に設置されている。ヒーターと銅管の間にテスト材料が詰められている。テスト材料のバルク密度(かさ密度)は、材料全体の質量をヒーターと銅管の間の体積で割ることによって決定されている。定常状態が得られた後、流入熱量と温度差が測定される。熱伝導率は次から計算さ

れる:

$$\rho = \frac{2\pi l \Delta T}{Q \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (1)$$

ここで、Q(W)はヒーターへの流入する熱で、lはヒーターの長さ(m)、 r_1 はヒーターの半径、 r_2 は内部管の半径、そして ΔT はヒーターと銅管の間の温度差である。試験は、少なくとも3時間、システムが定常状態にあったことを確認するためにモニターされた結果について行われた。これらの測定結果を表1に与える。

ASTM D-5334-08 は、接触抵抗誤差を最小化するために4W/mK以上の熱伝導率を備えた熱伝導グリースの使用を提示する。私たちは2つのタイプのグリースを試験した。一つは、熱伝導率0.4W/mKの白色の熱伝導グリースであるサーマルコーテ(Thermalloy Inc製、ダラス、テキサス、www.thermalloy.com)、もう一つは熱伝導率8W/mKの銀含有の熱伝導グリースであるアークティックシルバープレミアム、シルバーポリシテティックコンパウンド(Arctic Silver 株式会社製、ヴァイセーリア、カリフォルニア www.arcticsilver.com)である。

測定はグリースを使用した及び使用しないKD2で行われた。グリースが使用された場合、それらの測定については、ニードル全体にグリースを薄くコートした。熱伝導率テストは2つの方法で行なわれた。1つは、テスト材料を層状に容器に押し詰め、その上加熱ニードルを置き、その上からさらにテスト材料を層状に押し詰めた。もう1つの測定法は、グリースをコートしたニードルを既にぎっしり詰められたテスト材料に挿入した。テスト

材料は 30 メッシュのケイ砂及び 4 種類の大きさからなるガラス玉である。測定値を表 1 に示す。

測定結果

KD2Pro を用いて得られた熱抵抗値は、定常法装置を使用して得られた値と比較したとき、水分含量の増加及び粒径の減少で改善する。グリースを使用しない測定では、大きな誤差が観察された。土壌とプローブ間の接触を改善するため熱伝導グリースを使用することで、熱伝導率は定常法装置で得られた値と比較し得るものとはなるが、まだわずかに低いものであった。試験の結果を表 1 に示す。ニードルと定常法の測定的一致は、実験誤差の範囲内にあるようにも思える。なぜならば、同じバルク密度を再現する測定は不可能であったし、定常法分析は一方向への放射状の流れを仮定していた。また、測定用のセルは末端から熱を失ったためである。銀色のグリースを使用した熱伝導率は全般的に少々高いものではあったが（抵抗値は少々低い）、銀色のグリースと白色のグリースの間に統計的に有意義な差はなかった。グリー

スを使用しない場合、粒径を増大させることで、ガラス玉サンプル中の測定誤差は増加した。しかし、6mm 直径のガラス玉でさえ熱伝導率は、熱伝導グリースの使用でかなり正確なものとなった。サンプル間の変動(図示せず)は、ガラス玉のサイズが大きくなるにつれて増加した。

結論

特に粒径が大きい場合、接触抵抗は粒状材料の熱抵抗の KD2 測定に大きな誤差を生じさせる。これらの誤差は、プローブをコートする高い伝導のグリースの使用によって大方は取り除かれるように見える。プローブより実質的に大きな粒子からなる材料は、接触抵抗による誤差は 50%以上にもなる。熱伝導グリースの使用は、このような材料でも誤差を数%の程度に減少させる。銀含有グリースと熱接合混合物グリースを比較すると、銀含有グリースは 20 倍も低い熱抵抗を有しているに関わらず、測定抵抗値はわずかに低いに留まる。

物質	バルク密度 (g/cc)	定常法 熱抵抗	KD2 グリースなし	KD2 サーマアロイ	KD2 アークティック シルバー
ケイ砂	1.398	442	667	559	541
50um ガラス	1.493	556	730	562	538
2 mm ガラス	1.583	500	1000	569	535
4 mm ガラス	1.489	571	1370	565	585
6 mm ガラス	1.430	571	1667	625	N/A

表 1 熱伝導グリースでコーティングしたプローブ、あるいはコーティングしないプローブの KD2 と定常法で測定した、数種類の乾燥した粒状材料の熱抵抗率(°C-cm/W)。表示されている KD2 の値は 3-4 回の測定の平均による。