

# 熱流センサを用いた定常法による熱伝導率測定

## Thermal Conductivity Measurement by Steady State Method using Heat Flow Sensor

伝正 \*梶田 欣 (名市工研)  
服部 真和 (富士高分子工業)  
立松 昌 (名市工研)  
松原 和音 (名市工研)

Yasushi KAJITA<sup>1</sup>, Masakazu HATTORI<sup>2</sup>, Masashi TATEMATSU<sup>1</sup>, Kazune MATSUBARA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Nagoya Municipal Industrial Research Institute, 3-4-41, Rokuban-cho, Atsuta-ku, Nagoya, Aichi 456-0058, Japan

<sup>2</sup> Fuji Polymer Industries Co.,LTD, 3-4-41, 1-3-18, Nishiki, Naka-ku, Nagoya, Aichi 460-0003,Japan

Recently, there are electronic parts that need to be cooled with a thermal conductive sheet. For accurate thermal design it is necessary to measure thermal conductivity and thermal contact resistance of the thermal conductive sheet.

In this study, we developed a new compact apparatus consisting of thin semiconductor heat flow sensors and copper cartridges to measure thermal conductivity and thermal contact resistance. Measurement results of thermal conductivity by the new apparatus are in good agreement with the conventional steady state method. Because the new apparatus has low thermal capacity and fast response of the sensors, it can shorten the measurement time and can measure in 10 minutes with a difference of 2% from the steady state. In addition, we are developing two applications: simultaneous measurement of the thermal characteristics and electromotive force of the Peltier element, and measurement of the thermal resistance of a combination of a coil and a thermal conductive sheet.

*Key Words:* Thermal conductivity, Heat flow sensor, Heat dissipation sheet, Steady state

### 1. 緒言

発熱密度が増加し熱対策が必要になった電子機器の冷却には放熱シートが積極的に利用されている。様々な種類の放熱シートが製造・販売されているが、熱設計には適切なシートを選択し、最適な方法で利用することが重要である。放熱シートを選択する指標の中で、熱伝導率と接触熱抵抗がある。熱伝導率はメーカーからカタログ値が公表されているが、メーカーごとに評価方法が異なることがあり、比較することが難しい。熱伝導率の測定値は測定方法によらず一致すべきものであるが、実際には測定方法によって異なる値がでることが多く、設計時に問題となる。レーザーフラッシュ法などの非定常法による測定は単一材料を仮定して測定していることが多いため、放熱シートがその仮定からはずれているために正確な値が得られない可能性がある。そのため、昨今は定常法を利用した熱伝導率測定が増えてきた。しかし、定常法は熱流の測定方法、接触熱抵抗の影響、測定時間などに課題がある<sup>(1)(2)</sup>。そこで、本研究では半導体式熱流センサを利用して短時間で精度向上を目指した熱伝導率および接触熱抵抗の測定方法の開発を試みた。熱伝導性接着剤など幅広い材料に対応するため、カートリッジ方式を採用した<sup>(3)</sup>。半導体式熱流センサは薄型(0.3mm以下)のため熱容量が小さく応答性が速いため、これらの特性を利用して測定時間の短縮を検討した。また、カートリッジの変更や、発熱体の組み換えなどを行って他の実用的なアプリケーションへの展開を試みた。

### 2. 測定装置の構成と原理

#### 2.1 測定装置の構成

本研究で製作した装置を図1に示す(製作:エスエムティ工業)。4本の支柱で上下の板を固定し、中央の板が

上下にスライドする。スライドする板で測定系を押さえて固定する構成になっている。この板の上に錘を載せることによって、試料にかかる圧力を変えることができる。圧力が足りない場合は上板からハンドルと支柱を取り付け、支柱を伸ばして圧力を加えることができる。測定試料を2つの銅製のカートリッジ（図2）で上下から挟み込む。2つのカートリッジは□40mm、厚さ10mmとし、厚さ5mmの位置にケガキ線を入れた。測定試料を挟み込む前に2つのカートリッジを組み合わせたときのケガキ線間の距離をスコープで測定しておく。そして、測定試料を挟み込んだときの距離を計測し、ケガキ線間の距離を引けば測定試料の厚さが求められる。また、カートリッジの厚さ5mmの位置で中央と両端に直径1mmのシース型熱電対（本研究ではK型クラス1を使用）を差し込む。これは測定試料とカートリッジの界面温度を求めるとカートリッジの温度が面方向に均一であることを確認するために利用している。そして、熱流センサを測定試料が挟まれた状態のカートリッジの上下に取り付ける。これらを組み合わせた構成を図3に示す。2つのセンサを利用した熱流修正法<sup>3)</sup>によって試料とカートリッジからの放熱量を算出し、より精度の高い熱流の評価が可能になる。熱流センサはDENSO製半導体式センサ（Energy Eye）を利用する。図4にこれらのセンサを示す。今回は□40mm（図4の右側）を利用しているが、測定試料によっては小型のセンサに変更することが可能である。そのときはカートリッジを利用するセンサと同じ大きさにすることが必要である。測定系の下側を冷却部とし、アルミ製のブロックの中に冷却水を流す。冷却水は水冷チラーを通り、一定温度（今回は10℃とした）を保つようにする。一方で上側を加熱部とし、カートリッジと同じ□40mmのブロックをSUS304で製作し、棒状のカートリッジヒータを2本挿入する。ブロックの中央に熱電対を入れ、この温度を測定しながら指定温度になるようにサイリスタを使ってヒータの出力を制御する。

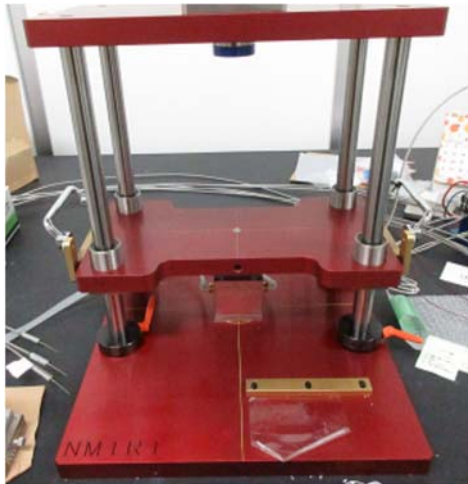


Fig.1 Measurement apparatus

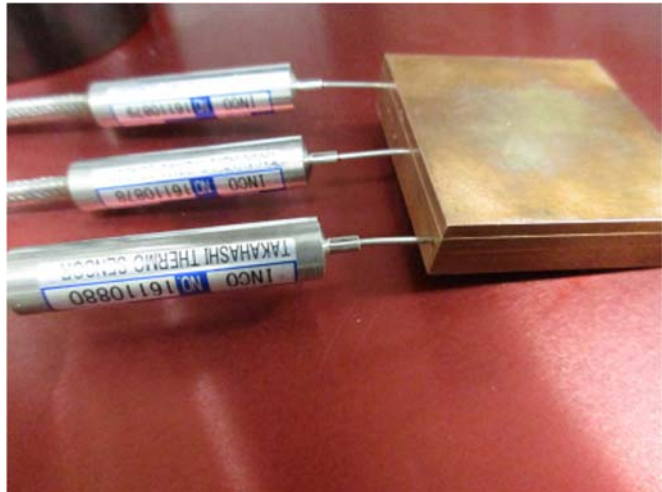


Fig.2 Copper cartridge with scribe line

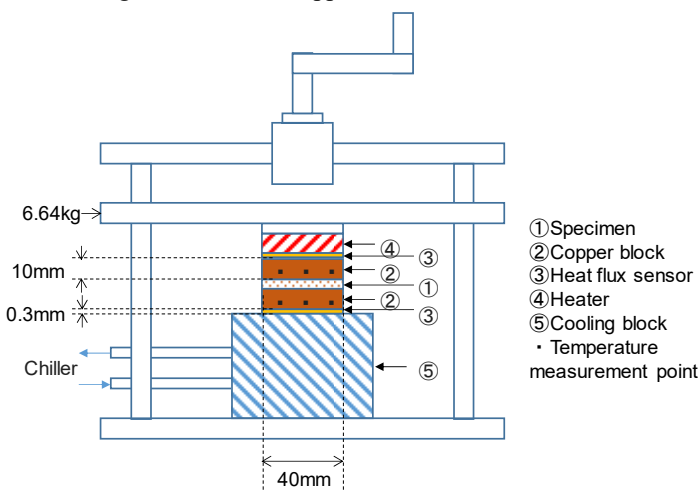


Fig.3 System component

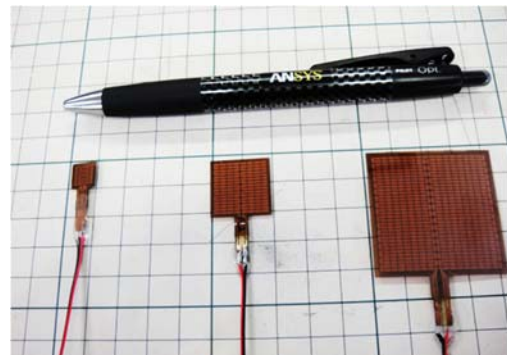


Fig.4 Semiconductor Heat flow sensors

## 2.2 測定原理

測定試料の熱抵抗  $R$  は通過熱量  $Q$  と高温側の温度  $T_h$  と低温側の温度  $T_l$  を使って次の式で求められる。通過熱量  $Q$  は上下2つの熱流センサから得る値に対し、熱流修正法<sup>3)</sup>を使って求める。

$$R = \frac{T_h - T_l}{Q} \quad (1)$$

ただし、この熱抵抗  $R$  には界面の接触熱抵抗が含まれている。接触熱抵抗を含んだ形で熱抵抗を評価する場合はこのままでもよいが、測定試料の熱伝導率のみを求めたい場合は界面の接触熱抵抗を分離する必要がある。同じ材料で厚みの異なる測定試料を用意して複数測定することによってこれが可能になり、熱伝導率  $\lambda$  は次式で求められる。測定試料の厚さを  $\Delta d$  だけ変化させたときの熱抵抗の変化を  $\Delta R$ 、測定試料の断面積を  $S$  とする。

$$\lambda = \frac{1}{(\Delta R / \Delta d) S} \quad (2)$$

理論上は厚みが異なる試料が 2 つあれば求められるが、測定誤差等の要因があるため 3 種類以上厚みを変えて測定することが望ましい。測定した熱抵抗と厚さをプロットしたときに直線性が高いほどより正確な測定であると考えられる。

### 3. 数値解析を用いた測定誤差に関する考察

本測定は加熱部から冷却部まで熱の流れは 1 次元であることを仮定して行っている。しかしながら、ヒータが完全に均一になっているとは限らない。また、カートリッジと測定試料の側面からの放熱があるため、熱流センサで測定する上下の熱量は異なる。これらの影響が大きいと前節で述べた結果が悪くなることが予測されるので、3 次元熱解析によって検討した。解析は図 5 に示すように、製作した装置と同じサイズの棒状ヒータ 2 本を一定温度 (90 °C) とした。また、冷却部は冷却ブロック下面を一定温度 (10 °C) とした。熱流センサと銅カートリッジの間には接触熱抵抗を入れ、値は  $5 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-3} \text{ Km}^2/\text{W}$  の範囲で変化させた。

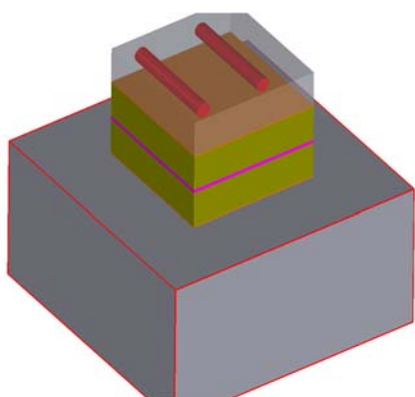


Fig.5 Analysis Model

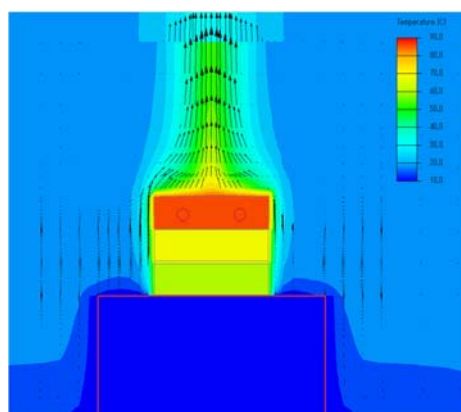


Fig.6 Distribution of temperature

解析結果から得た温度分布の例を図 6 に示す。接触熱抵抗を  $5 \times 10^{-3} \text{ Km}^2/\text{W}$  としたときに、上側カートリッジ上部界面 (ヒータ側との界面) の温度が 73.06~78.42 °C (平均 77.66 °C) であったのに対し、カートリッジの下部界面 (測定試料との界面) は 72.84~72.90 °C (平均 72.88 °C) となり、銅カートリッジによって温度が均一化されることが確認できた。これらの最低温度と最高温度はカートリッジ端の非常に小さな領域であり、実用上問題は無いと判断した。

上下間の熱流の差は接触熱抵抗の値で異なっており、 $5 \times 10^{-4} \text{ Km}^2/\text{W}$  のとき熱流は 4% 減、 $1 \times 10^{-3} \text{ Km}^2/\text{W}$  に 5% 減、 $5 \times 10^{-3} \text{ Km}^2/\text{W}$  のときに 12% 減となった。これらのとき、前節の方法で測定試料の熱伝導率を計算すると、1.000 W/(mK) と設定したのに対して、それぞれ 1.001 W/(mK)、1.002 W/(mK)、0.995 W/(mK) となった。尚、実際の装置接触熱抵抗を検証すると  $1 \times 10^{-3} \text{ Km}^2/\text{W}$  より十分に小さいと考えられる。

## 4. 放熱シートの熱伝導率測定

### 4.1 定常法による測定

本研究では放熱シートの熱伝導率の測定を主な目的としており、富士高分子工業製放熱シートサーコン (GR14A, GR25A, GR45A, GR80A) を測定した。それぞれ厚さの異なる測定試料を用意して測定した。測定結果を図 7 に示す。いずれも良い線形性を示している。図中の式の切片は上下合わせた接触熱抵抗である。そして、

傾きから (2) 式を用いて熱伝導率を求めた。それぞれ 1.7 W/(mK), 3.1 W/(mK), 5.6 W/(mK), 9.9 W/(mK)であった。放熱シートの名称の数字はカタログ上の熱伝導率を示しており、たとえば GR14A は熱伝導率が 1.4 W/(mK)を意味している。いずれも本測定のほうが 20~25%程度高い値となっているが、カタログ値はホットディスク法による測定値を記載しており、測定方法の違いによるものと考えられる。そこで、市販されている定常法による測定器を用いて測定したところ、本研究による測定結果と 10%以内の差異であった。

また、5.2 節の述べる実際の使用における温度測定とシミュレーションを比較したときは本測定で得られた測定結果を使用した計算結果が実測の温度に近かった。

再現性を確認するために、4 種類の測定試料をそれぞれ 3 回測定した。このとき、一度測定した後、測定試料をカートリッジから取り外し、再度取り付けて測定を行った。測定熱抵抗 (K/W) は小数点以下 2 桁までの値は常に一致した。再現性は十分に良いと考える。

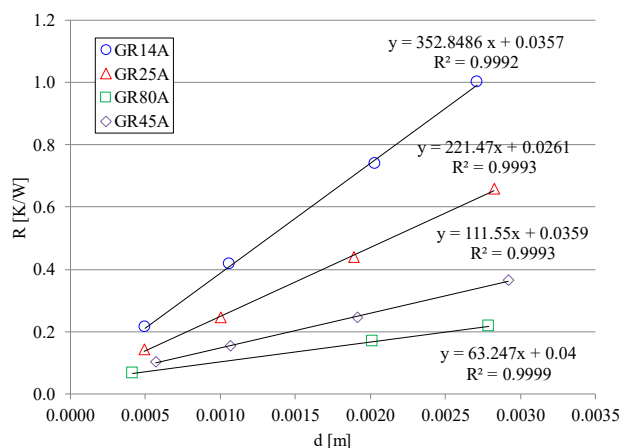


Fig.7 Thermal resistance

## 4.2 準定常状態における熱伝導率測定

4.1 節では定常状態を待って熱抵抗を算出したが、実際の測定は常時行っている。定常状態になるまで 30 分程度かかることがあるが (もっと短時間の場合も多い)、測定時間の短縮を考えて、途中経過の値を検討した。

放熱シートは富士高分子工業製サーコン GR-ac (カタログ値は熱伝導率 1.5 W/(mK)) を 4.1 節と同様に測定器に載せて 1 秒ごとに温度と熱流を測定し記録した。温度の時間変化を図 8 に、熱流の時間変化を図 9 に示す。

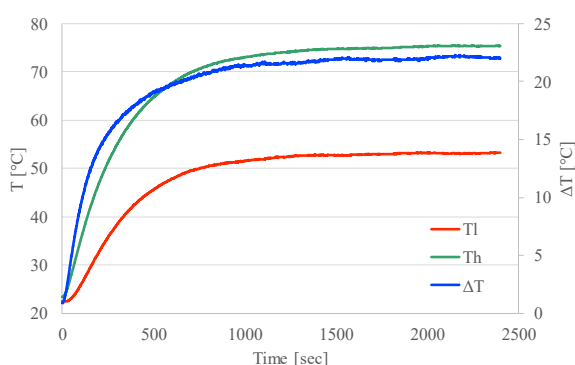


Fig.8 Temperature increase curves

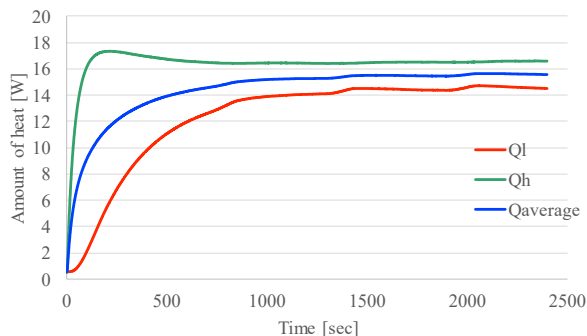


Fig.9 Heat flow increase curves

温度は上下とも一様に上昇するのに対して、熱流は上側 (ヒータ側) が一度急激に上昇した後に徐々に下降してやがて安定した。それに対して下側 (冷却側) の熱量は一様に上昇している。ときおり波打つような変化があるが、これは冷却水を冷やすチラーの制御が入ったためであり、安定したチラーを利用することによって改善できると考える。

次に温度上昇と平均熱量の変化を図 10 に、これらの結果から算出した熱伝導率の値を図 11 に示す。ただし、図 11 に示す値は計算上の値であって、実際に熱伝導率が変化しているわけではない。また、カートリッジとの接触熱抵抗が含まれた状態で計算しているため、厳密には(2)式のように厚さの異なる測定試料を用意して求める必要がある。本節では測定時間の短縮に注目しているため、接触熱抵抗分は無視した計算になっている。

図 10 より熱流が先に上昇し、遅れて温度が上昇していることがわかる。また、両者を比較すると熱流は温度よりもノイズが少なく安定して測定できることがわかる。熱伝導率は最終的に 1.51 W/(mK)となるが、最初に 1.51 W/(mK)の値がでてきたのが 936 秒、5%増の 1.58 W/(mK)となったのが 417 秒のときであった。そして、この結果から最初の急激な上昇を除けばアレニウス型に近い形をしており、途中までの計算で最終結果が予測できる可能性がある。一般的に定常法では測定時間として 30 分以上必要となるが、これは大きな短縮といえる。特に、接触



熱抵抗をキャンセルするときは複数回の測定が必要であり、この考え方はより大きな利点となる。

しかし、本測定では次のような課題が残っている。1 つはカートリッジの熱容量が測定試料に対して大きく、本来の測定したい部分が初期の変化では特に埋もれやすいことである。次に、加熱と冷却が安定しないことである。ヒータは温度一定になるように PID 制御をしているが、測定開始と同時に設定温度になるわけではない。発熱量（電力）も一定ではなく温度変化に応じて随時変化する。また、冷却部はチラーの ON/OFF がある閾値を境に繰り返されるため、図 9 の低温側の熱量の変動のような問題が発生する。そこで、測定時間短縮のためにはこれらの影響を少なくする測定系にするか、あるいはそれらを含めた定常時の予測計算をする必要がある。

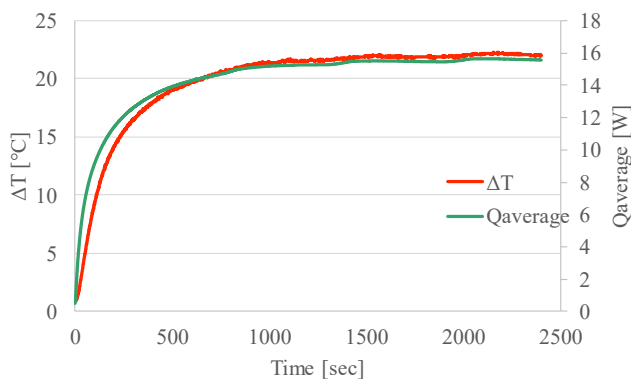


Fig. 10 Increase curves of temperature and Heat flow

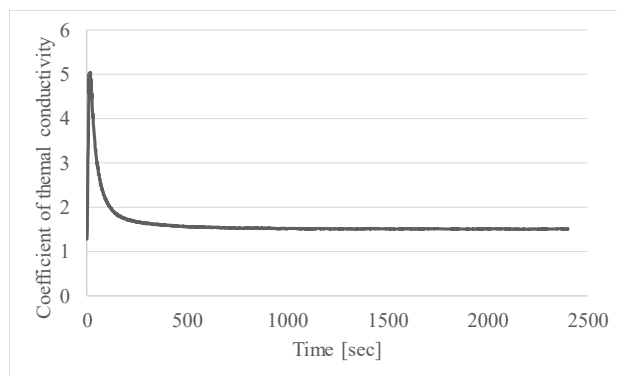


Fig.11 Variation of calculated thermal conductivity

## 5. 熱対策部品への応用

本研究で製作した測定系は前節で述べた方法以外にも実用的なアプリケーションが考えられる。ここではペルチェ素子の熱抵抗と起電力の同時測定、コイルと放熱シートを組み合わせた熱抵抗の測定について述べる。

### 5.1 ペルチェ素子の熱抵抗と起電力の同時測定

放熱を目的としてペルチェ素子が広く使われており、この部品の熱抵抗は熱設計で必要になる。また、この素子は両面に温度差があると逆過程のゼーベック効果により起電力を発生する。この起電力は通過熱量に比例することが知られているが、熱量と起電力の関係を測定する方法は一般化されていない。そこで、前節でカートリッジ間に挟んだ放熱シートとペルチェ素子を取り換えてこれらの関係を測定することを行った。前節と同様に熱抵抗測定を行いながら、ペルチェ素子の側面から電気的な配線を取り出して電圧を測定することによって熱量と起電力が測定できる。また、ペルチェ素子の熱抵抗が同時に測定できる。今回は Panasonic 製のペルチェ素子を用いてこの測定を行った。□20mm で厚さが 1.6 mm の素子についての起電力の測定結果を図 12 に示す。良い線形性を得ることができた。そして、感度が比較的高いため、この結果を利用して、このペルチェ素子を熱流センサとして利用する方法が考えられる。ただし、本研究のように大きな圧力をかけて熱抵抗を測定する場合には耐圧性の確認が必要である（本研究で使用した Energy Eye の最大耐圧は 4 MPa）。そして、同時計測した熱抵抗は 3.29 K/W であった。建築物の評価等で利用されている一般的な熱流センサに比べると熱抵抗が小さいといえる。この熱抵抗は厚みに依存すると考えられ、別途 1.06 mm のペルチェ素子 (Panasonic 製) を測定したところ、熱抵抗は 1.06 K/W と小さくなっていた。ただし、起電力は小さくなるため、一概に薄いものが最適であるとはいえない。

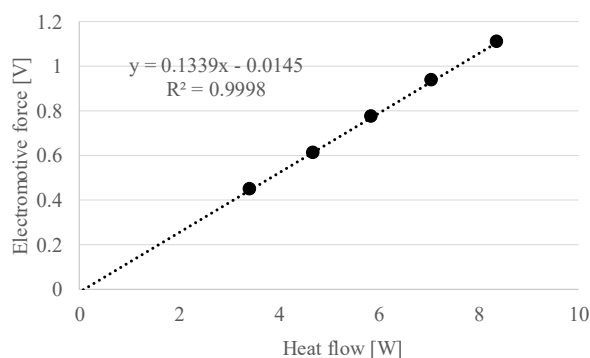


Fig.12 Electromotive force of Peltier device

### 5.2 コイルと放熱シートの熱抵抗

放熱シートはコイルのような異形部品を冷却部品に取り付けるときにも重要な役割を果たす。コイルと放熱シ

ートの接触状態は複雑な形状になり、この間の熱の流れをシミュレーションで評価することは難しい。筆者らは中部エレクトロニクス振興会技術委員会第3分科会において、シミュレーションでこれらの現象を予測することを目標にして合わせて実測を行っている。ここでは実測方法について述べる。4節で述べた測定装置の冷却側だけを使用し（上側カートリッジおよびヒータを用いない）、下側カートリッジ、放熱シート、コイルの順に置いていく。コイルを固定する治具を3Dプリンタで製作して、スライドする平板に取り付けた（図13）。この平板を上下させることによってコイルの沈み込み深さを変えることができる。そして、コイルに直流電流を流して発熱させ、コイル温度とカートリッジの温度、熱流を測定することによって、コイルから銅製カートリッジ界面までの熱抵抗を求めることができる。NEC Tokin 製コイル OH-034Z, OH-074Z, OH-104Z, 放熱シートは富士高分子工業製 GR-ac の厚さ 5mm と 3mm のものを使用して、それぞれ沈み込み深さを変えて熱抵抗を測定した。結果を図14に示す。

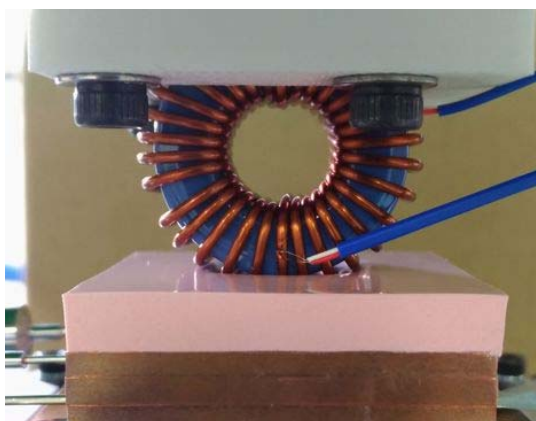


Fig.13 Coil and Heat dissipation sheet

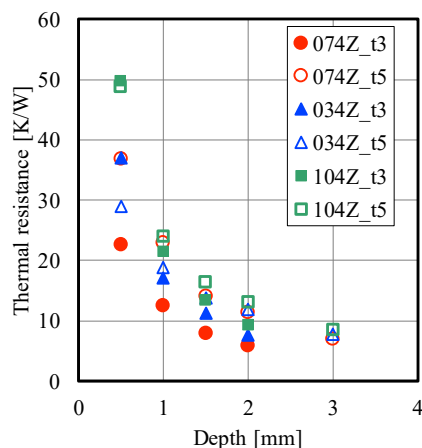


Fig.14 Change of thermal resistance

いずれの場合も沈み込み深さが小さいときは大きな熱抵抗であるが、深くなるとやがて熱抵抗が飽和することがわかる。このことからある一定の深さまで沈ませなければ熱抵抗が大きくなり温度が上昇してしまうが、その深さを超えればほぼ飽和して温度が大きく変わらなくなることが予測でき、製品製造時の指針を作成することに活用できる。

## 6. 結言

本研究では半導体式熱流センサと銅製カートリッジを組み合わせ放熱シートの熱伝導率測定を行った。数値解析によって本手法での熱漏れによって発生する測定誤差は 2%以内と予測した。実際の測定では熱抵抗で 0.01 K/W の範囲まで一致する再現性を確認し、他の定常法による測定器との差は 10%以内であった。そして、準定常状態では 10 分以内で定常値の 5%増の熱伝導率を得て、15 分でほぼ定常値と同じ結果を得ることができた。この測定系で冷却と加熱を安定させることによって、今後測定時間の短縮が期待できる。

また、本測定装置の改良によってペルチェ素子の熱起電力と熱量の関係と熱抵抗の同時測定、コイルと放熱シートを組合わせた熱抵抗の測定のように実用的なアプリケーションを提案した。

## 参考文献

- (1) 大串・他 3 名, 熱物性, Vol.28, No.1.(2014),pp22-28.
- (2) ASTM D547-01;(2001) ASTM International.
- (3) 大串・他 2 名, 第 54 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 C211, 2017-5(2015)