

車両用パワーデバイス取付部の材料特性と放熱効果

福田 典子* 上條 弘貴**

Material Properties and Heat Radiation Effect of Thermal Conducting Sheets Used for the Power Devices of Trains

Tenko FUKUDA Hiroki KAMIJO

The radiation of heat generated from electronic parts has now become a significant issue along with the achievement of the downsizing, densification and high efficiency of the electronic equipment. To cope with this issue, high thermal conductivity grease and sheets have been developed. We have paid attention to three kinds of thermal conducting sheets as heat radiation material attached between the power devices and the heat sinks of railway vehicles. We measured the thermal resistance when the sheets were attached between the power device and the heat sink and the thermal conductivity of the sheets themselves. In this paper, we report on the relations between the thermal resistance and the thermal conductivity.

キーワード：放熱効果，放熱シート，熱伝導，熱抵抗

1. はじめに

近年、電子部品や電子機器では、処理速度の高速化と高集積化による発熱量の増大から、熱によるデバイスの不具合が大きな課題とされ、熱工学的手法を駆使した熱設計や高熱伝導材料の研究、開発が活発に行われている。パワーデバイスとヒートシンクの取付材料の放熱特性向上は、半導体チップ温度の抑制やヒートシンクの小型化につながる。

鉄道車両に搭載されているVVVFインバータ装置のパワーデバイスは、オイルコンパウンドを用いて、アルミなどでできたヒートシンクに取り付けられ、放熱を確保している。しかし、オイルコンパウンドは、流れ出し、枯れといった経年劣化による放熱特性低下や、交換時の作業性等、信頼性を確保する上で課題がある。一方、作業性が良く、熱伝導率が高い放熱シートの研究、開発が進められており、オイルコンパウンドの代わりとしての適用が考えられる。

本報告では、パワーデバイスとヒートシンク間の取付材料として3種類のシートに注目し、材料単体における熱伝導特性とパワーデバイス-ヒートシンク間に実際に取り付けられた場合の熱伝導特性を測定して、放熱効果の関係を考察したので紹介する。

2. 放熱シート

評価試験は、一般に市販されている高熱伝導タイプの

* 車両制御技術研究部 駆動制御研究室

** 車両制御技術研究部

放熱シートでメーカーが異なる2種類(シートA, B)と、電気絶縁シート1種類(シートC)の合計3種類のシートについて実施した。

2.1 基本特性

評価した3種類のシートについて、カタログなどに記されている値、メーカーの情報などから特性をまとめると、表1の通りである。なお、いずれのシートとも、電気絶縁性があり、接着性はない。

表1 シート特性

シート	A	B	C
樹脂	シリコーン	シリコーン	シリコーン
基材	ガラスクロス	ガラスクロス	ガラスクロス
厚さ (mm)	0.2	0.25	0.18
熱伝導率 (W/(m・K))	①: 3.1 ^{*1} ②: 4.5 ^{*2}	①: 0.8 ^{*2}	①: <0.3
絶縁破壊電圧 (kV)	4	6.6	7~9

*1: ISO 22007-2, *2: ASTM E 1530

2.2 熱伝導率

熱伝導率は、熱の伝わりやすさを表し、材料の熱伝導特性を表す物性値として、一般的に使われている。

熱伝導率の測定には、測定対象の材質、形状、特性や、加熱方法、温度検出方法などの測定条件により各種の規格、測定、評価方法がある。測定方法、装置特性などで、測定値が異なることがあり、シートAのようにカタログ値において異なる測定法による値が併記されている場

特集：車両技術

合もある。

そこで、評価対象のシートについて、定常法と非定常法の2種類の測定方法により、実際に熱伝導率を測定した¹⁾。

2.2.1 定常法

試料に、定常的な熱流 Q を与え、その温度差 ΔT を測定することで、式 (1) より熱伝導率 λ を求める方法で、温度傾斜法、熱流計法、常熱流法などがある。

$$\lambda = (Q \cdot L) / (\Delta T \cdot A) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、試料の厚さ L 、断面積 A とする。

本報告では、温度傾斜法の原理に基づいた図1のような構成の自作測定装置により測定を行った。熱伝導率が既知の高温および低温側標準試料に埋め込まれた熱電対により標準試料内の温度勾配を測定することで、試料を通る定常熱流 Q と、試料両端の温度差 ΔT を推定し、式 (1) より、試料の厚さ方向の熱伝導率を算出した。なお、シート-標準試料界面の接触抵抗については、考慮していない。

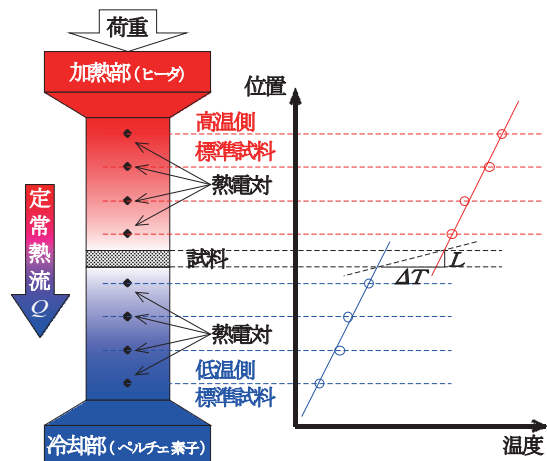


図1 温度傾斜法の原理

2.2.2 非定常法

試料に、過渡的な熱流エネルギーを与え、試料の温度応答を測定して熱拡散率 α を求め、別に試料の密度 ρ と比熱 C_p を測定し、式 (2) より熱伝導率 λ を求める方法で、レーザーフラッシュ法、周期加熱法などがある。

$$\lambda = \alpha \cdot \rho \cdot C_p \quad \dots\dots\dots (2)$$

本報告では、図2のような ASTM E 1461 などに準拠したキセノンフラッシュアナライザーにより測定を行った。

熱源となるレーザーパルス光を試料表面に照射して加熱し、反対面において赤外線検出器により温度上昇曲線

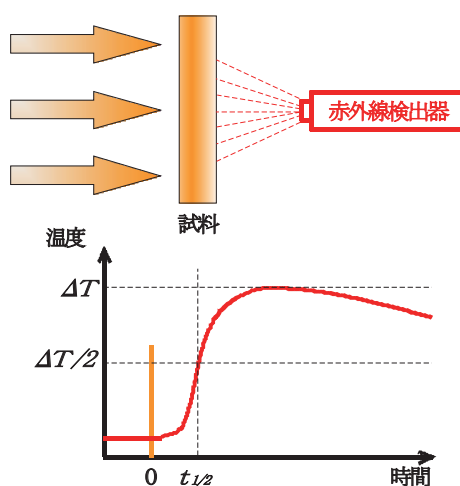


図2 レーザーフラッシュ法の原理

を測定する。測定された曲線を、最小二乗法により理論曲線へフィッティングすることで熱拡散率を推定し、式 (2) により厚さ方向の熱伝導率を算出する。

2.2.3 測定結果

シート単体における定常法、非定常法による厚さ方向の測定結果を、図3に示す。

厚さ方向の熱伝導率は、同一のシートでも、測定方法により測定値が異なり、すべてのシートにおいて、定常法の測定結果に比べて、非定常法の測定結果の方が大きな値となっている。この原因は、非定常法では、試料に直接エネルギーを与え、温度も非接触式で検出しており、試料自体の熱伝導率を測定しているのに対して、定常法では標準試料を介して、熱量を供給しているため、試料と標準試料界面の接触抵抗を含んだ評価となるためと考えられる。

また、カタログ値と比較すると、シートにより大小関係は異なるが、接触抵抗を含んだ評価と考えられる定常法の測定値と比べると、熱伝導率は大きく表記されている。

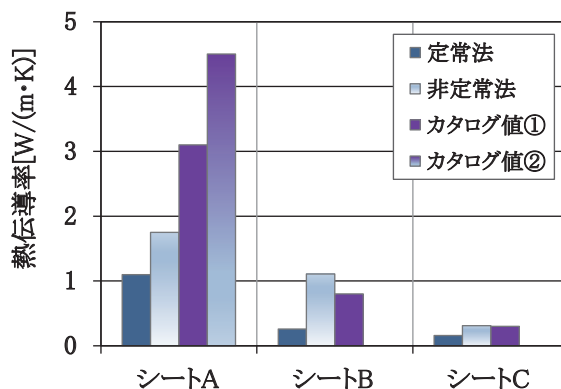


図3 シート単体の熱伝導率測定結果 (厚さ方向)

3. パワーデバイス取付時のシート放熱特性評価

パワーデバイスのヒートシンク取付用シート（図4参照）の放熱特性を、熱抵抗 R_{jt} [K/W]（半導体チップ-ヒートシンク間熱抵抗）によって評価し、シート単体の熱伝導特性との比較及び考察を行った。なお、熱抵抗 R [K/W] とは、式(3)に示すように、ある物体から 1[W] の熱流 Q を放出するために必要な温度差 ΔT [K] である。

$$\Delta T = R \cdot Q \dots\dots\dots(3)$$

評価対象シートは、2章のシート A, B, C の3種類とした。寸法は、シート A が 115mm × 201mm, シート B, C が 114mm × 161mm である。

3.1 シートの熱抵抗測定法

測定に用いた試料パワーデバイスは、駆動用インバータ装置に使用されている IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールである（図5(a)参照）。試料 IGBT モジュールとヒートシンクの間にはシートをセットし（図5(b)参照）、決められたトルクで取り付けた。

熱抵抗の測定方法は、JEDEC 規格 (Joint Electron Device Engineering Council Standard) の JESD51-14 に準拠した冷却法で行った²⁾。図6に、測定手順を示す。モジュール内の IGBT 及びダイオードチップを、発熱源として使用し、チップ温度は、関連のある IGBT 及びダイオードチップ両端の順電圧を測定して求める。シートの熱抵抗 R_{sheet} は（図4参照）、シート A, B, C を取り付けた場合の熱抵抗 R_{jt} を算出し³⁾、シートなしの場合

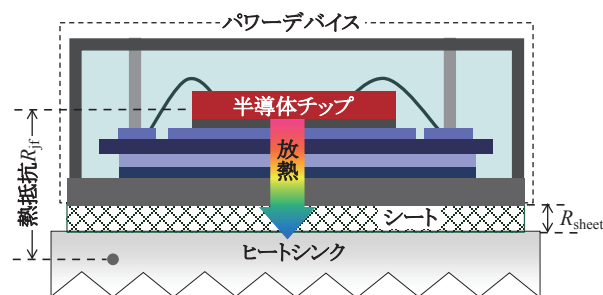
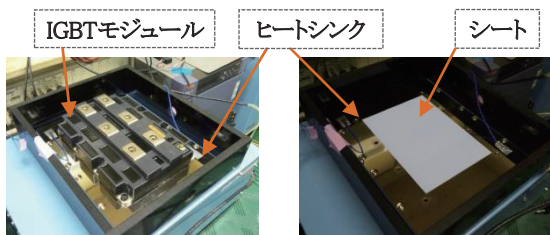


図4 パワーデバイスの取付状態例



(a) 試料を取り付けた状態 (b) シートセット状態

図5 測定状況

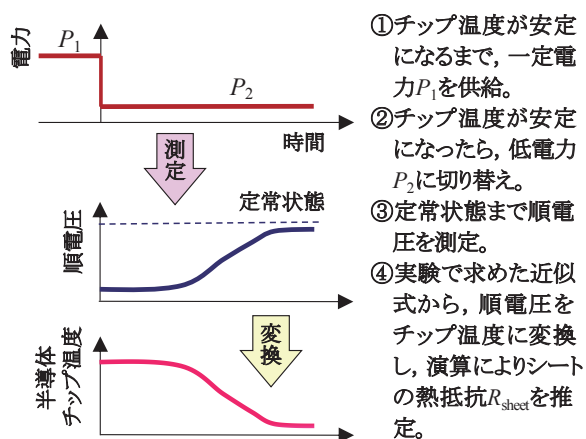


図6 測定手順

- ①チップ温度が安定になるまで、一定電力 P_1 を供給。
- ②チップ温度が安定になったら、低電力 P_2 に切り替え。
- ③定常状態まで順電圧を測定。
- ④実験で求めた近似式から、順電圧をチップ温度に変換し、演算によりシートの熱抵抗 R_{sheet} を推定。

の熱抵抗 R_{jt} との差から推定する。ここでは、接触抵抗を含んだ評価となる。

3.2 測定結果

図7に、シート A, B, C の熱抵抗 R_{sheet} [K/W] の測定結果を示す。図7から、発熱源によらず、シート A は、シート B, C に比べて、熱抵抗 R_{sheet} が小さく、最も放熱効果が見込めると考えられる。高放熱タイプのシート B と一般的なシート C の熱抵抗の差が表1の熱伝導率ほど見られないのは、シート C の厚さ (0.18mm) が、シート B の厚さ (0.25mm) より薄いことが要因の一つとして考えられる。また、発熱源が IGBT チップかダイオードチップかで、測定されたシートの熱抵抗 R_{sheet} に違いが見られる。この違いについては、主に IGBT モジュール内のチップ配置（図8参照）、放熱経路、接触抵抗等が考えられ、今後、シミュレーション⁴⁾ を用いて検証する。

次に、2章のシート単体の熱伝導率の測定結果及び、表1のカタログ値を、式(1)と式(3)から、熱抵抗に換算し、図7のシート熱抵抗 R_{sheet} の測定結果と比較を行った。図9に、発熱源が IGBT の場合のシート毎の比較結果を示す。

図9から、シート A については、実際にパワーデバイスとヒートシンクの間に取り付け測定された熱抵抗 R_{sheetA} が最も大きい結果となった。熱抵抗 R_{sheetA} は、今回の測定条件の場合、定常法、非定常法によりシート単体で測定された熱伝導率をもとに計算した値の約2倍、カタログ値からは約5倍の違いを確認した。

シート B について、測定された熱抵抗 R_{sheetB} は、非定常法の熱伝導率をもとに計算した熱抵抗の約2倍、カタログ値の約1.5倍の違いを確認した。また、シート A の傾向と異なり、定常法の熱伝導率をもとに計算した熱抵抗が最も大きく、測定された熱抵抗 R_{sheetB} の約2倍であった。この傾向の違いは、シートの表面状態（粘性、凹

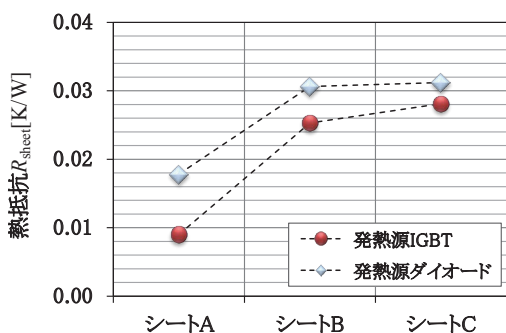


図7 シートの熱抵抗測定結果

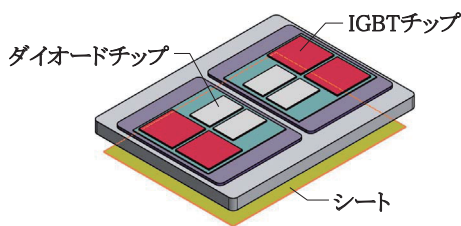


図8 モジュール内の半導体チップ配置イメージ

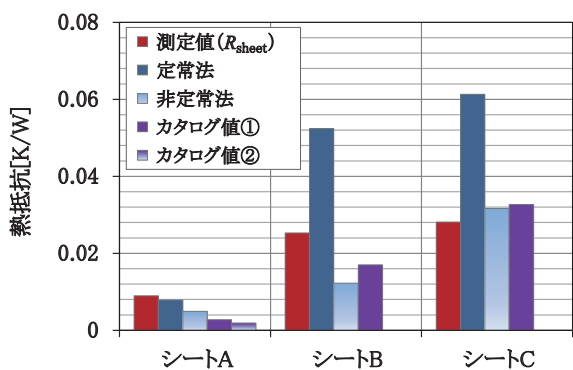


図9 比較結果（発熱源 IGBT）

凸等)が要因の1つとして考えられる。シートBの表面状態は、シートAよりも粘着性が弱く、凹凸への追従性が悪い。

シートCについて、測定された熱抵抗 R_{sheetC} は、非定常法の熱伝導率をもとに計算した値及びカタログ値と、ほぼ同じ結果となった。また、シートCの表面状態は粘着性が弱く、シートBと同様に、定常法の熱伝導率をもとに計算した熱抵抗が最も大きい結果となった。

なお、発熱源がダイオードの場合についても、図9の測定結果と同じ傾向であることを確認した。

以上のことから、今回の測定条件において、実際にパワーデバイスとヒートシンク間に取付けられた場合の

シートの熱抵抗 R_{sheet} は、非定常法によりシート単体で測定された熱伝導率をもとに計算した値に比べて、同程度又は2倍程度大きく、定常法の熱伝導率をもとに計算した値に比べて、同程度又は2倍程度小さくなる傾向にあることがわかった。また、比較結果の大小関係の違いの要因の1つとして、シートの表面状態が関係していると推定される。

4. おわりに

パワーデバイスとヒートシンク間の取付材料として3種類のシートに注目し、材料単体における熱伝導特性とパワーデバイス-ヒートシンク間に実際に取り付けられた場合の熱伝導特性との比較を行った。その結果を以下にまとめる。

- (1) シート単体の熱伝導率は、測定方法により値が異なり、接触抵抗が含まれた評価となる定常法による測定値は非定常法より小さくなること、また、カタログに記載された値は、測定方法、シートにより測定値と差異が見られることを明らかにした。
- (2) 実際にIGBTモジュールに取付け測定された熱抵抗とシート単体の熱伝導率から計算した熱抵抗とを比較すると、シートによっては、2倍程度、また、カタログ値とは5倍程度の違いを確認し、期待した放熱効果を得るためには、熱設計時に用いる値の取り扱いに注意が必要であることを明らかにした。

今後、装置の最適設計に向けて、熱伝導特性の測定、評価方法の整理を行う。更に、放熱特性向上に向け、新たな材料や構成開発を進める。

文献

- 1) 上條他：鉄道車両用パワーデバイス取付部の材料特性と放熱効果，電機学会産業応用部門大会，2015
- 2) JEDEC STANDARD, JESD51-14: “Transient Dual Interface Test Method for the Measurement of the Thermal Resistance Junction to Case of Semiconductor Devices with Heat Flow Trough a Single Path” .
- 3) T.Fukuda: “Degradation of Power Semiconductor Modules for Trains” EPE’ 13 ISBN:978-90-75815-17-7 and 978-1-4799-0114-2,2013/9.
- 4) 福田他：有機繊維シートによるIGBT取付時の放熱特性，電気学会全国大会，2-108, pp.124-125, 2011