

# 高熱伝導性有機材料を用いた 電子部品・パワー素子の放熱部材の開発

上條 弘貴\* 福田 典子\*\* 小笠 正道\*\*

## Study of Heat Radiation Materials Using High Thermal Conductivity Organic Fiber for Electronic Components and Power Devices

Hiroki KAMIJO Tenko FUKUDA Masamichi OGASA

Radiation of heat generating from electronic parts has now become a significant issue along with achievement of downsizing, densification and high efficiency of the electronic equipment. To cope with this issue, high thermal conductivity greases and electronic boards making use of high heat conduction ceramic and carbon have been developed. We have paid attention to an organic fiber which has high thermal conductivity in a fiber direction. We have fabricated and tested heat radiation sheets and boards using a high thermal conductivity organic fiber for electronic components and power devices. Further we have tested the heat radiating property of this heat radiation sheet which is inserted between IGBT modules and a heat sink in a chopper device.

キーワード：PBO 繊維，有機繊維，熱伝導率，放熱材料，放熱シート，基板，IGBT

### 1. はじめに

近年，電子機器では小型化，高密度化，高性能化が進み，電子部品から発生する熱の処理が重要な課題とされ，高熱伝導のセラミックやカーボンなどを用いたグリースや基板の開発が進められている。一方，絶縁性を有する有機系材料の中にも繊維方向に高い熱伝導特性を有する材料があり，放熱材料としての応用が期待される<sup>1)</sup>。

本報告では，高熱伝導性を有する有機繊維の放熱シートや基板への応用に向けた検討として，有機繊維クロスによる放熱シートおよび基板を試作し，その基礎特性を把握する<sup>2)</sup> とともに，電流可変チョップ制御装置のパワー半導体モジュールの取り付け部に適用し，放熱特性を測定した<sup>3)</sup> ので紹介する。

### 2. 高放熱材料

電子部品や電子機器では，高速化と高集積化による発熱量の増大から，熱による電子素子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。

電子機器に使用される放熱シートや基板では，目的，用途などにより，熱伝導性の高い金属，セラミック，有機材料など多くの材料が使用されている。また，熱伝導

率を向上させるため，金属，セラミック，カーボンなどの粒子，フィラーを樹脂に混合したり，樹脂そのものの分子構造の改良などが行われている。

一般に，これまで有機材料の内，非晶性高分子については金属や半導体に比べて熱伝導率は小さいとされ，主に断熱材としての応用が考えられてきた。しかし結晶性高分子は高い熱伝導性を持つという報告があり，図1のようにPBO繊維（Zylon<sup>®</sup>，東洋紡）や超高分子量ポリエチレン繊維（Dayneema<sup>®</sup>，東洋紡）は，繊維方向にスチール以上の高い熱伝導率を持つことが報告されている<sup>1)</sup>。特に，PBO繊維は，絶縁性はもとより，高耐熱，難燃，低熱膨張などの特性を有し，各種の機能を付加できる高放熱材料としての応用が期待できる。

PBO繊維は，ポリパラフェニレンベンゾビスオキサゾールを液晶紡糸したもので，一般には商品名である「ザイロン」として知られている。この繊維は，パラアラミド繊維と比べて約2倍の強度と弾性率を有し，有機系繊維では最高レベルである。さらに，分解温度がパラアラミド繊維より約100℃高い650℃，限界酸素指数（LOI）も有機系繊維中最高の68を有する「スーパー繊維」で，防弾チョッキ，コンクリート補強材，電気工用保護手袋，消防服などに使用されている<sup>4)</sup>。繊維方向の熱伝導率は，図1のようにスチール以上の高い値を示し，温度の上昇とともに増大する。この特性は，室温においても維持され，繊維方向に30W/(m・K)以上の高い熱伝導率を有する。このような高い熱伝導性は，PBO繊維の伸び切り鎖構造により，分子鎖方向へのフォノンによる熱伝

\* 車両制御技術研究部

\*\* 車両制御技術研究部 駆動制御研究室

特集：車両技術

導が容易となるためと考えられている<sup>1), 4)</sup>。なお, PBO 繊維は, 繊維方向の線膨張係数が負で, 高熱伝導性, 耐熱性, 絶縁性と合わせて, 各種の機能的な特性も持ち合わせており, 用途に合わせた熱伝導材料を構成できる可能性がある。

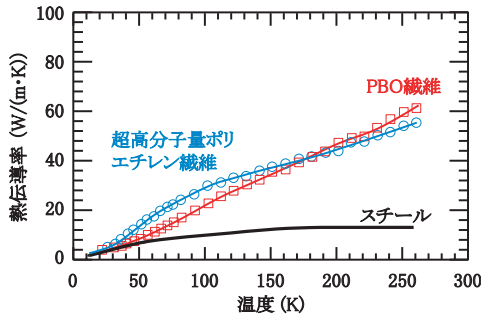


図1 熱伝導率の比較

3. 放熱シート・基板の試作

高い熱伝導率で耐熱性も高いPBO繊維を用いて, 半導体素子と冷却フィン間などの熱伝達を向上するためのグリース, コンパウンドなどの代替を考えた放熱シートおよび半導体素子内や回路基板への適用を考えて積層した基板の2種類の材料を試作した。試作した放熱シートおよび基板を, 図2に示す。

3.1 放熱シート

放熱シートは, 545dtex (dtex: ISOで規定された繊維の太さを表す単位で, 10,000mあたりの質量をグラムで表したもの) のPBO繊維を縦横23束/inch (=約0.9束/mm) で平織したクロスを1枚および2枚重ねとして, 作業性, 密着性などを考慮してエポキシ樹脂を塗布し, 半硬化状態の1層および2層重ねのプリプレグシートとした。エポキシ樹脂には, ビスフェノールA型jER-828 (ジャパンエポキシレジン製) を使用した。

3.2 基板

基板は, 545dtex のPBO繊維を縦横23束/inchで平織したクロスを6枚重ね, エポキシ樹脂を塗布して, 真空中で加圧しながら熱硬化させて板状とした。エポキシ樹脂には, 放熱シート同様にビスフェノールA型jER-828を使用した。

3.3 熱伝導率

試作した放熱シートおよび基板について, 放熱特性を把握するため, 熱伝導率の測定を行った。

熱伝導率:  $\lambda$  は, (1)式により定義できるので, 比熱, 密度, 熱拡散率を個別に測定し, 算出した。

$$\lambda = C_p \times \rho \times \alpha \quad (1)$$

ここで,  $C_p$ ,  $\rho$ ,  $\alpha$  は比熱, 密度, 熱拡散率である。

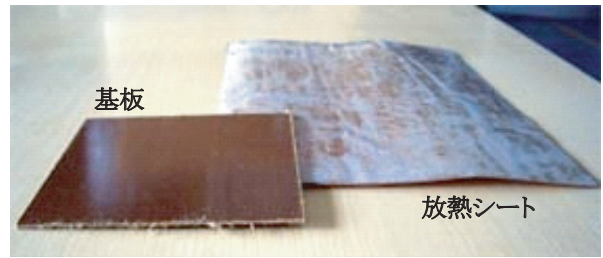


図2 放熱シートと基板

比熱は, JIS K 7123に準拠した示差走査熱量計法により, 密度は, JIS K 7112 A法に準拠した電子天秤を用いた水中置換法により測定した。熱拡散率は, キセノンフラッシュアナライザーにより, 極短いパルス幅の加熱光により試料の一方の面を均一に加熱し, 照射面とは逆の面の温度変化を計測して, その温度履歴曲線を JIS R 1611に準拠して最小二乗法で理論式にフィッティングさせて求めた。熱拡散率は, 放熱シート, 基板の面方向および厚さ方向の2方向に分けて測定した。なお, プリプレグシートである放熱シートは, 基板と同様に真空中で加圧しながら熱硬化させてから測定した。

熱伝導率の測定結果を, 図3に示す。測定結果より, PBO繊維の向きである面方向では数から10W/(m·K)の高い熱伝導率を有するが, PBO繊維と直交する厚さ方向では繊維の寄与がほとんど見られずエポキシ樹脂と同程度の0.3W/(m·K)と熱伝導率が小さく, 大きな異方性がある。層数が増えた場合, 積層によるクロス間の接触や樹脂率増加の影響で, 面方向の熱伝導率は低下が見られるが, 厚さ方向はPBO繊維の熱伝導率への寄与が少ないため影響が小さく, 熱伝導率に大きな変化は見られない。

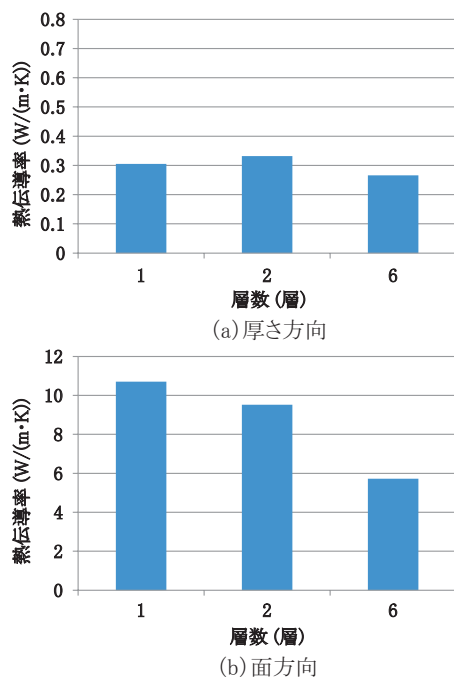


図3 熱伝導率の測定結果

### 3.4 電気的特性

試作した放熱シートおよび基板について、電気的特性として、絶縁抵抗、絶縁破壊電圧、誘電率の測定を行った。なお、プリプレグシートである放熱シートの測定は、熱伝導率の測定と同様に硬化させてから行った。

#### 3.4.1 絶縁抵抗

絶縁抵抗は、JIS K6911に準拠し、試験片に、中心間距離20mm、直径φ5mmの2個の穴を開け、テーパピンを押し込んで電極とし、絶縁抵抗計を用いて直流電圧500Vを1分間印加したときの電流値を読み取り、絶縁抵抗を算出した。

放熱シート（2層）および基板（6層）の測定結果を、表1に示す。測定の結果、絶縁抵抗は $10^{14}$ Ωオーダーで、高い絶縁抵抗値を有していることが確認できた。

#### 3.4.2 絶縁破壊電圧

絶縁破壊電圧は、JIS K6911に準拠し、シリコンオイル中において、試験片の中央部を電極間（上部電極：φ20mm球状、下部電極：φ25mm×5mm/エッジ2.5mmR）に挟み、絶縁耐力試験装置を用いて短時間昇圧法および段階法により電圧を上昇させて破壊電圧を測定した。

放熱シート（2層）および基板（6層）の測定結果を、表1に示す。測定の結果、絶縁破壊電圧は10kV/mm以上で、高い絶縁破壊電圧を有していることが確認できた。

#### 3.4.3 誘電率

誘電率は、JIS K6911に準拠し、測定用電極（主電極：φ38mm、対電極：φ50mm、材質：錫箔）を用いて、LCRメーターにより、測定周波数1MHzにおける並列容量とコンダクタンスを測定し、比誘電率、誘電正接を算出した。

放熱シート（2層）および基板（6層）の測定結果を、表1に示す。測定の結果、比誘電率は、3.0以下で小さく、低誘電率の絶縁材料であることが確認できた。

表1 電気的特性

	放熱シート (2層)	基板 (6層)
絶縁抵抗× $10^{14}$ (Ω)	6.7	2.9
絶縁破壊電圧 (kV/mm)	短時間昇圧法	32.9
	段階法	17.3
	35.2	12.5
比誘電率	2.69	2.84
誘電正接	0.0161	0.0165

## 4. 放熱特性の向上

3章で述べたようにPBO繊維を平織りしたクロス（以下、PBO繊維クロスという）を用いて試作した放熱シートおよび基板では、PBO繊維の向きである面方向では高い熱伝導率を有するが、厚さ方向ではPBO繊維の高熱伝導特性の寄与がほとんど見られず熱伝導率は小さく、大きな異方性が見られた。そこで、厚さ方向の熱伝導率を向上させ、異方性を小さくするため、PBO繊維クロスに

起毛処理を行い、繊維を毛羽立たせることで、厚さ方向の繊維を増やし、接触状態を向上させ、熱伝導率の向上を試みた。

起毛処理は、先にトゲのついたフェルト針を11mm間隔で横に並べ、互い違いに11mm間隔で6列並べた剣山を、上下させながら2mmずつ移動してPBO繊維クロスに繰り返し突き刺すことで、針が繊維に引っ掛かり、からみ合うことで、PBO繊維クロスを毛羽立たせた。起毛処理を行う前と後のPBO繊維クロスの状態を、図4に示す。起毛処理により、PBO繊維クロスの一部が毛羽立ち、厚さ方向に貫通している。

起毛処理の効果を確認するため、1層のPBO繊維クロスで構成した放熱シートについて、起毛処理の回数を16回、32回、50回と変えた場合のプリプレグシートの厚さおよび硬化後の熱伝導率の測定結果を、図5、6に示す。16回、32回の起毛処理を行うと、厚さ方向の熱伝導率が処理前より増加して2倍以上の値に向上しており、PBO繊維の高熱伝導特性の効果がみられる。一方、面方向の熱伝導率は、起毛処理による影響が小さく、高い値を維持している。ただし、起毛処理の回数を50回まで増やすと、厚さ方向の熱伝導率の向上は抑えられ、面方向の熱伝導率が低下する傾向が見られる。起毛処理による厚さへの影響を見ると、起毛処理回数の増加により厚くなっているが、16、32回までは増加割合が小さいが、50回まで増やすと厚さの増加が大きく熱抵抗が増加する可能性がある。熱伝導率の向上効果と合わせて、繊維の種類、仕様などにより、熱伝導特性の向上には最適な起毛処理の回数があると考えられる。

また、PBO繊維クロスを6枚積層した基板においても、放熱シートと同様に厚さ方向の熱伝導率は起毛処理前の

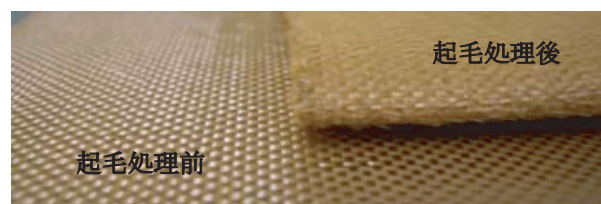


図4 PBO繊維クロスの状態

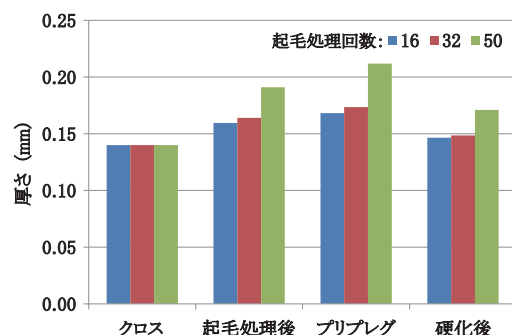


図5 起毛によるPBO繊維クロスの厚さの変化（1層放熱シート）

特集：車両技術

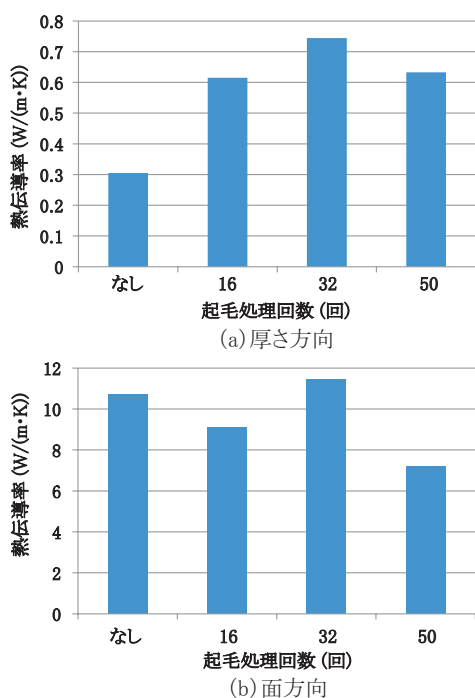


図6 起毛処理回数と熱伝導率の関係（1層放熱シート）

0.27W/(m・K) から、16回の起毛処理で0.53 W/(m・K) と約2倍に向上し、面方向は5.5 W/(m・K)程度で大きな変化がなかった。起毛回数をもう少し増加させることで、さらに熱伝導率を向上できると考える。

また、起毛処理したPBO繊維クロスを用いた放熱シートおよび基板の電気的な特性を、表2に示す。起毛処理を行わない場合の表1と比較して、絶縁破壊電圧の低下は見られるが、高い絶縁特性は維持されている。

表2 電気的特性（起毛処理：有）

	放熱シート (2層)	基板 (6層)
絶縁抵抗×10 <sup>14</sup> (Ω)	6.2	12.0
絶縁破壊電圧 (kV/mm)	短時間昇圧法	14.8
	段階法	8.5
比誘電率	2.97	2.87
誘電正接	0.0189	0.0186

5. IGBT スタックへの適用検討

鉄道車両の電力変換装置において、パワー半導体のIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールなどをスタックに組む場合、図7のようにオイルコンパウンドを塗布して、アルミなどでできたヒートシンクに取り付けている。IGBT モジュール内も含め、モジュールからヒートシンクの放熱特性向上は、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。

本章では、IGBT スタック構成の中で、放熱性能が低いIGBTモジュールとヒートシンクの接触面に対し、

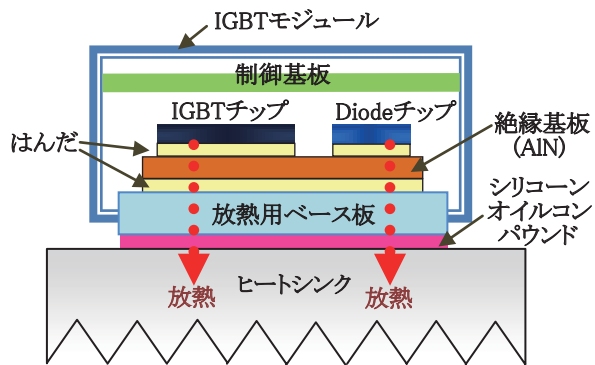


図7 IGBTモジュールの取り付け構成図

現在使用されているシリコンオイルコンパウンドに代え、4章で述べたPBO繊維クロスを用いた放熱シートの適用について検討した。

5.1 試作放熱シート

試験に使用したPBO繊維クロスを用いた放熱シートを、図8に示す。この試作放熱シートは、起毛処理（32回）したPBO繊維クロスにエポキシ樹脂を塗布したプリプレグシートから、IGBTモジュールの寸法より4辺が10mm程度大きめの横210mm×縦160mmに裁断し、取り付け用ネジ部をカットした。取り付け作業は、試作放熱シートをヒートシンク上にシワのないようにねじ位置を合わせてセットし、IGBTモジュールを載せてねじ止めするだけで済み、コンパウンドのような均一な塗布作業は不要となる。

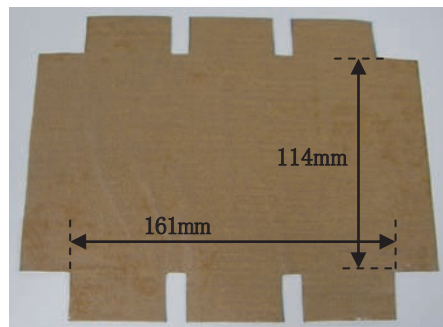


図8 試作した放熱シート

5.2 試験回路と試験方法

試験回路を、図9に示す。試験には、鉄道総研所有のLH02型架線・バッテリーハイブリッドLRV<sup>5)</sup>（以下、LH02型LRV）に搭載されている、3,300V-1,200AのIGBTスタックを用いた電流可逆チョップ装置<sup>6)</sup>（電圧形2レベルIGBT3相ブリッジ回路）の2相相当の回路を用いた。

チョップ入力電圧1,500V、搬送波周波数700Hz、負荷電流 ( $i_{out}$ ) が250A、125A、62Aの時、現状シリコンオイルコンパウンド（熱伝導率3.5W/(m・K)、カタログ値）と試作放熱シートの場合について、図10に示す各部の温度特性を取得した。

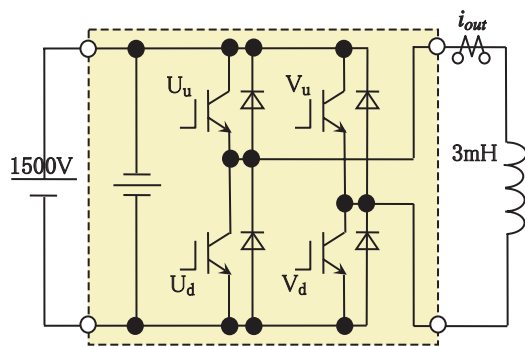
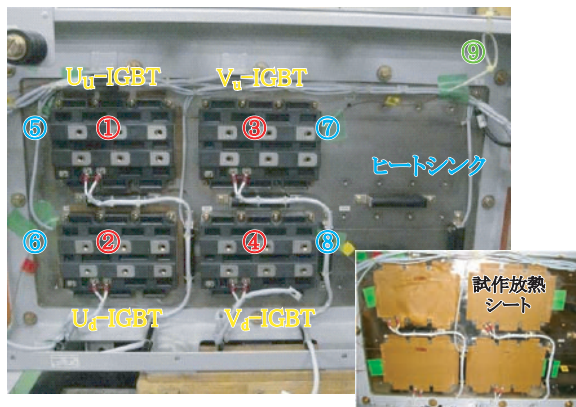


図9 試験回路



①:U<sub>u</sub>-IGBTケース温度 ②:U<sub>d</sub>-IGBTケース温度  
③:V<sub>u</sub>-IGBTケース温度 ④:V<sub>d</sub>-IGBTケース温度  
⑤, ⑥, ⑦, ⑧:ヒートシンク温度 ⑨:周囲温度

図10 温度測定箇所

5.3 試験結果

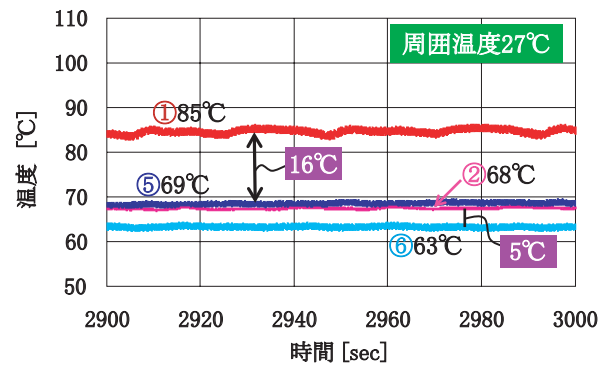
図11 (a) に、放熱材として現状のシリコンオイルコンパウンドを使用し、負荷電流 ( $i_{out}$ ) 250A, 周囲温度 27°Cの時の、U<sub>u</sub>-IGBT と U<sub>d</sub>-IGBT のケース温度とヒートシンク温度の測定結果を示す。温度がほぼ一定となった2,900s後のU<sub>u</sub>-IGBT ケース温度①は85°C、ヒートシンク温度⑤は69°Cで、温度差(①-⑤)は16°Cであった。また、U<sub>d</sub>-IGBT ケース温度②は68°C、ヒートシンク温度⑥は63°Cで、温度差(②-⑥)は5°Cであった。なお、IGBTモジュール取り付け後の塗布の厚さを測定したところ、0.03mm以下であった。

図11 (b) に、放熱材として試作放熱シート使用し、負荷電流 ( $i_{out}$ ) 250A, 周囲温度 17°C (コンパウンド使用試験と異なる)の時の、U<sub>u</sub>-IGBT と U<sub>d</sub>-IGBT のケース温度とヒートシンク温度の測定結果を示す。コンパウンド試験と同様に、温度がほぼ一定となった2,900s後を見ると、U<sub>u</sub>-IGBT ケース温度①は96°C、ヒートシンク温度⑤は61°Cで、温度差(①-⑤)は35°Cであった。また、U<sub>d</sub>-IGBT ケース温度②は66°C、ヒートシンク温度⑥は54°Cで、温度差(②-⑥)は12°Cであった。なお、IGBTモジュール取り付け後の放熱シートの厚さを測定したところ、約0.17mmであった。

よって、試作放熱シートを使用した場合、現状のコンパウンドに比べて、IGBTモジュールのケース温度とヒートシンク温度の差は約2倍となり、放熱特性向上には至らないことがわかった。なお、負荷電流  $i_{out}=125A, 62A$  の場合も同様の結果であった。

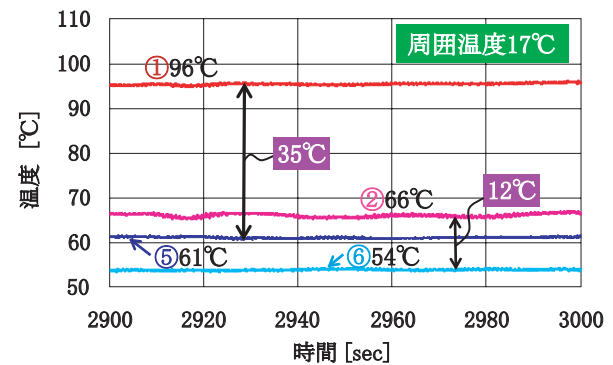
一方、IGBTとヒートシンクとの取付部の接触面積について、試験結果をもとに表3のような仮定で算出すると、試作放熱シートを使用した場合は、コンパウンドの約10倍の接触面積を得られていると推定される。

以上のことから、試作放熱シートをIGBT取付部に適用した場合、現状コンパウンドと比べて、放熱特性向上には至らなかったが、IGBTとヒートシンクとの接触面積の拡大には大きな効果があると推定される。



①U<sub>u</sub>-IGBTケース温度 ⑤ヒートシンク温度  
②U<sub>d</sub>-IGBTケース温度 ⑥ヒートシンク温度

(a)シリコンオイルコンパウンド使用  
(IGBT取付後の塗布厚さ(実測):0.03mm以下)



①U<sub>u</sub>-IGBTケース温度 ⑤ヒートシンク温度  
②U<sub>d</sub>-IGBTケース温度 ⑥ヒートシンク温度

(b)試作放熱シート使用  
(IGBT取付後のシート厚さ(実測):約0.17mm)

図11 IGBTモジュールの温度特性試験結果

表3 接触面積の算出条件

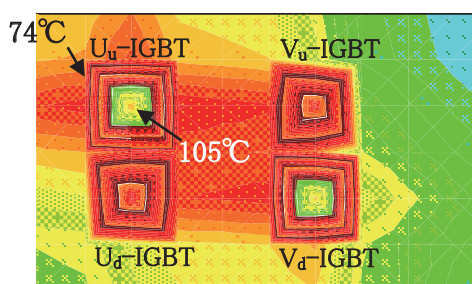
	試作放熱シート	コンパウンド
熱伝導率 (W/(m・K))	0.75 (厚さ方向)	3.5 (カタログ値)
厚さ (mm)	0.17	0.03
温度差 (°C)	35	16

特集：車両技術

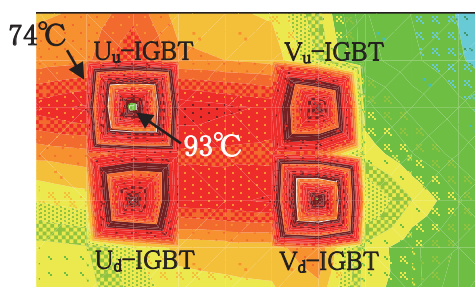
IGBT 放熱特性と試作放熱シートの厚み、熱伝導率の異方性の関係について、基礎的な試験を実施し、接触熱抵抗を含め、今後の検討課題とする。今回は、次項で、シミュレーションによる試作放熱シートの厚みを変更した場合の、放熱特性について検討を行う。

6. シミュレーション

熱伝導率を固定し、試作放熱シートの厚さのみを変え、IGBT モジュールの放熱シミュレーションを行った。図 12 (a) に、シート厚さ 0.2mm (試験品想定)、図 12 (b) に、シート厚さ 0.07mm (試験品の厚さ 1/3 想定) のシミュレーション結果を示す。図 12 (b) より、 $U_v$ -IGBT とヒートシンク温度の差は 19°C となり、試験結果と比べて、IGBT モジュール温度を 10°C 以上低減できる結果となった。今後、シートを薄くする、熱伝導率の異方性 (厚さ方向と面方向) をなくす工夫ができれば、従来のコンパウンドと同程度の放熱特性を得られることが明らかになった。なお、シミュレーション条件は、試験と同様に負荷電流 ( $i_{out}$ ) 250A、搬送波周波数 700Hz、周囲温度 27°C、IGBT モジュール損失 1,460W/ 相とした。



(a) 放熱シート厚さ: 0.2mm (試験品想定)



(b) 放熱シート厚さ: 0.07mm (試験品の厚さ 1/3 想定)

図 12 放熱シート厚さを変えた場合の IGBT モジュール温度のシミュレーション結果

7. まとめ

高熱伝導性を有する有機繊維を用いた放熱材料の検討として、PBO 繊維クロスを用いた放熱シートおよび基板

を試作し、その基礎特性を把握するとともに、電流可変チョップ制御装置の IGBT モジュール-ヒートシンク間を放熱シートにより取り付けした場合の温度特性を測定した結果、以下のような知見が得られた。

- (1) PBO 繊維クロスを用いて、放熱シートおよび基板が構成できることを確認した。同材料は、面方向には 10W/(m・K) 程度の高熱伝導特性を有すること、低い誘電特性で、高い絶縁特性を有することを確認した。
- (2) PBO 繊維に起毛処理を行うことで、厚さ方向の熱伝導率を向上でき、面方向との異方性を改善できることを確認した。
- (3) 定置試験を行った結果、試作放熱シートを使用した場合、IGBT モジュールケース温度とヒートシンク温度の差は、現状のコンパウンド取り付け時の約 2 倍となり、放熱特性向上には至らなかった。
- (4) 熱伝導率の測定値と定置試験結果のデータを用いて、IGBT とヒートシンクの接触面積を算出すると、試作放熱シートを使用した場合は、コンパウンドの約 10 倍となり、放熱特性に影響する接触面積の増加には、大きな効果があると推定される。
- (5) 熱伝導率は固定、シート厚さのみ試験品想定 1/3 とし、放熱シミュレーションを行った結果、試験結果と比べて、IGBT モジュール温度を 10°C 以上低減できることを確認した。今後、シートを薄くする、熱伝導率の異方性 (厚さ方向と面方向) をなくす工夫ができれば、現状と同程度の放熱特性を得ることができると考えられる。

なお、本研究は、NEDO の委託を受けて実施した。

文献

- 1) 山中淳彦, 鹿島俊弘: 熱伝導性の高い有機繊維の応用, 繊維と工業, Vol.56, No.4, pp.19-23, 2000
- 2) 上條弘貴, 小笠正道, 立花敏行: 高熱伝導有機繊維を用いた放熱材料の検討, 平成 23 年電気学会全国大会講演論文集 (第 2 分冊), pp.119, 2011
- 3) 福田典子, 上條弘貴, 小笠正道, 上園恵一, 宮田賢司: 有機繊維シートによる IGBT 取付時の放熱特性, 平成 23 年電気学会全国大会講演論文集 (第 2 分冊), pp.124-125, 2011
- 4) 黒木忠雄, 矢吹和之: PBO 繊維 “ザイロン®” の基礎物性と用途展開, 繊維と工業, Vol.54, No.1, pp.16-20, 1998
- 5) 小笠正道, 田口義晃, 前橋栄一, 門脇悟志, 末包洋士: 「架線ハイブリッド (架線レス) LRV の新車概要と車両性能」 鉄道技術連合シンポジウム J-Rail' 2007, S4-4, pp.119-122, 2007
- 6) 小笠正道, 田口義晃: 「複電圧架線ハイブリッド型の電力変換回路と制御方法の開発」 鉄道総研報告 Vol.22, No.9, pp.29-34, 2008