

車両主回路用高熱伝導・低熱膨張プリント基板

上條 弘貴*

Printed Circuit Board with High Thermal Conductivity and Low Thermal Expansion
for the Traction Circuit of Trains

Hiroki KAMIJO

Recently the technological advance of the electronic equipment including its downsizing and densification has been made, which causes the decrease in the reliability of the printed circuit board due to its temperature rise and difference of the thermal contraction between the board and the parts. We study printed circuit boards with high thermal conductivity and low thermal expansion made of organic fibers with high thermal conductivity and low thermal expansion in the fiber direction. In this study, we have fabricated a printed circuit board using PBO fiber clothes. Resistors are mounted on the surface. We tested its general properties, heat dissipation and thermal expansion. The temperature rise of the resistors is suppressed in comparison with the conventional printed circuit board made of glass fiber clothes under the same conditions. In a heat cycle test, it has been shown that the difference in the thermal contraction between the board and the resistors is smaller than that in the case of the conventional board.

キーワード：プリント基板，熱伝導率，線膨張係数，銅張積層板，有機繊維

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放熱や，熱による収縮などが故障につながる要因として認識され，その対策が重要な課題とされている。鉄道でも，車両や電力分野などにおいて多くの電子機器が使用されており，基板や放熱材料は重要な開発要素である。

そこで，車両用電子機器の放熱や熱収縮特性の向上による小型・軽量化や，信頼性向上を目指して，繊維方向に高い熱伝導特性と負の線膨張係数を有する有機繊維を応用した基板や放熱材料の開発を進めている^{1) 2) 3)}。

本報告では，車両主回路用プリント基板の基材として，一般に使用されているガラス繊維のクロスに代え，熱伝導率が高く，負の線膨張係数を有する PBO 繊維のクロスを用いた高熱伝導・低熱膨張プリント基板を試作し，その放熱や熱収縮特性を確認したので紹介する。

2. 高熱伝導・低熱膨張有機繊維

有機繊維は，一般に熱伝導率が小さく，主に断熱材としての応用が考えられてきた。しかし，高強度，高弾性な有機系スーパー繊維の中には，絶縁性が有りながら繊

維方向の熱伝導率が高く⁴⁾，さらに線膨張係数が負の特性を有する¹⁾ 繊維がある。特に，ポリパラフェニレンベンゾビスオキサゾール (PBO) 繊維は，有機系スーパー繊維の中で，最高の強度，弾性率を有し，絶縁性はもとより，高耐熱，難燃であり，高熱伝導および負の線膨張特性を有しており⁵⁾，高放熱材料としての応用が期待できる。

2.1 熱伝導

有機繊維でも，PBO 繊維や高分子量ポリエチレン繊維など一部のスーパー繊維では，図 1 のように繊維方向の熱伝導率が室温領域において $50\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以上あり，銅などには及ばないもののスチールより高い熱伝導率を持つ繊維がある^{1) 4)}。

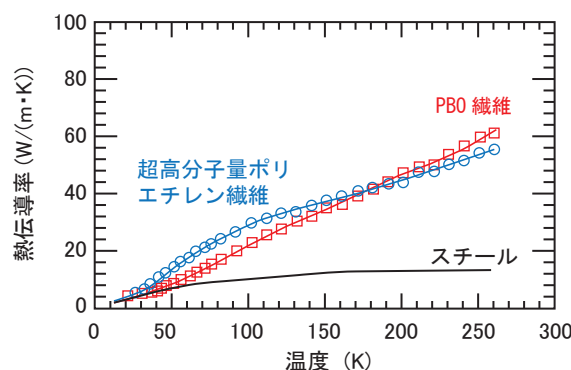


図 1 熱伝導率

* 車両制御技術研究部

特集：車両技術

2.2 線膨張係数

スーパー繊維は、一般に高強度、高弾性で、また繊維方向の熱収縮率が小さく、さらに図2のようにPBO繊維や高分子量ポリエチレン繊維では大きな負の線膨張係数を持つ繊維がある¹⁾。

繊維と樹脂を複合する繊維強化プラスチックでは、複合割合により線膨張係数を調整することができ、繊維が負の値を有することでその範囲が広がり、部品などの線膨張係数により近づけることも可能となる。

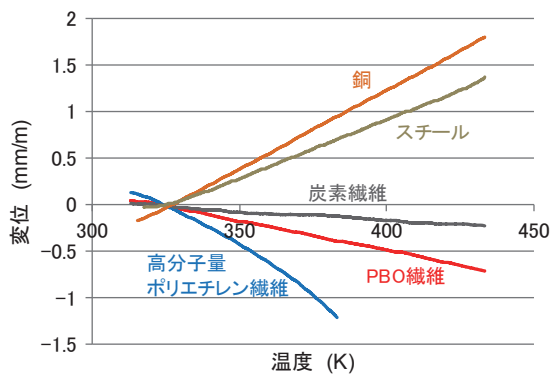


図2 線膨張係数

3. 高熱伝導・低熱膨張プリント基板

車両主回路では、制御や電源回路基板として、銅張積層板に回路パターンを形成し、半導体など電子素子、部品を実装した多種のプリント基板が使用されている。現在、プリント基板の基となる銅張積層板は、主にエポキシ樹脂を含浸させたガラス繊維クロスを積層し、その片面もしくは両面、さらに中間層に銅箔を配置して、加圧しながら、加熱して硬化させている。

3.1 PBO 繊維クロスエポキシ樹脂銅張積層板

銅張積層板の基材として、一般に使われているガラス繊維に代えて、ガラス繊維より熱伝導率が高く、線膨張係数の小さいPBO繊維を用いたPBO繊維クロスエポキシ樹脂銅張積層板（以下、PBO繊維積層板）を試作した。

PBO繊維積層板は、PBO繊維（Zylon[®]、東洋紡製、High Modulusタイプ）の545dtex（tex:国際規格（ISO）で規定された繊維の単位、繊維やひも、撚り糸などの1,000mあたりのグラム表示した質量に相当）を、縦横23束/in.（=約0.9束/mm）で平織りしたクロスに、FR-4相当グレードのエポキシ樹脂を塗布して半硬化させたプリプレグシートを4枚または8枚重ね、その両面に厚さ35μmの銅箔を重ねて加圧しながら、加熱して硬化させたものである。銅箔を含めた仕上がり厚さは、4枚重ねで平均0.91mm、8枚重ねで平均1.78mmである。

3.2 電氣的、機械的基本特性

試作したPBO繊維積層板の熱伝導率、線膨張係数特性以外の電氣的、機械的な基本特性について、PBO繊維積層板において測定した結果を、表1に示す。また、プリント基板として一般的に使用されるFR-4.0グレードのガラス繊維クロスエポキシ銅張積層板（以下、ガラス繊維積層板）の代表的なカタログ値を、表1に参考として示す。

はんだ耐熱、銅箔の引き剥がし強度、絶縁特性は、基材をガラス繊維クロスからPBO繊維クロスに変えた影響はほとんど見られず、従来と同程度の特性が確保できている。また、比誘電率は、PBO繊維の誘電特性により3程度と低く、ガラス繊維クロスより抑えられている。

なお、曲げ強度は、試験装置の制約で破断までの評価ができなかったため、スーパー繊維を基材とした効果は、振動特性などと合わせて、今後さらなる評価が必要である。

表1 電氣的、機械的基本特性

	PBO繊維積層板	ガラス繊維積層板
はんだ耐熱性（フロート260℃）(s)	300 <	300 <
銅箔引き剥がし強さ (kN/m)	2.09	1.6*
絶縁抵抗 (MΩ)	5.5 × 10 ⁹	2 × 10 ⁸
体積抵抗率 (MΩ・m)	8.5 × 10 ⁶	5 × 10 ⁷
表面抵抗 (MΩ)	3.7 × 10 ⁸	6 × 10 ⁷
比誘電率	3.06	4.4
誘電正接	0.028	0.02
曲げ強さ (Warp) (MPa)	300 < (No break)	600
曲げ強さ (Fill) (MPa)	300 < (No break)	500
吸水率 (%)	0.322	0.07

*：銅箔厚さ：18μm

3.3 熱伝導率

試作したPBO繊維積層板の熱伝導特性を把握するため、銅箔を除去したPBO繊維クロスとエポキシ樹脂の複合状態における熱伝導率の評価を行った。

熱伝導率は、JIS H 7801に準拠したキセノンフラッシュアナライザー LFA447（Nanoflash, NETZSH製）により厚さおよび面内方向の熱拡散率を測定し、JIS K 7112 Aに準拠した電子天秤を用いた水中置換法による密度の測定結果と、JIS K 7123に準拠した示差走査熱量計（DSC）法による比熱の測定結果から、式(1)により算出した。

$$\lambda = C_p \times \rho \times \alpha \tag{1}$$

ただし、λ：熱伝導率、C_p：比熱、ρ：密度、α：熱拡

散率とする。

密度、比熱および熱拡散率の測定結果およびそれらの結果をもとに算出した熱伝導率を、表2に示す。また、プリント基板として一般的に使用されるガラス繊維積層板についても、あわせて表2に示す。

PBO 繊維積層板では、繊維方向となる面内方向の熱伝導率が、PBO 繊維の高熱伝導特性の効果により、7 W/(m・K) 程度で、ガラス繊維積層板に比べて一桁大きく、高熱伝導性が得られている。一方、厚さ方向については、PBO 繊維クロスが積層された方向となるため、その効果が見られず、熱伝導率は0.25 W/(m・K) 程度で、ガラス繊維積層板と同程度の熱伝導性である。

表2 熱伝導特性

		PBO 繊維積層板	ガラス繊維積層板
密度 (g/cm ³)		1.42	1.85
比熱 (J/(g・K))		1.05	0.88
熱拡散率 (mm ² /s)	面内	4.88	0.299
	厚さ	0.168	0.190
熱伝導率 (W/(m・K))	面内	7.3	0.49
	厚さ	0.25	0.31

3.4 線膨張係数

試作した PBO 繊維積層板の熱収縮特性を把握するため、両面の銅箔を除去した PBO 繊維クロスとエポキシ樹脂の複合状態における面内方向の線膨張係数の測定を行った。

線膨張係数は、積層板の表面に汎用箔ひずみゲージ (KFG, ゲージ長:5mm, ゲージ幅:1.4mm, 共和電業製) を瞬間接着剤により張り付け、恒温槽に入れて温度を-20℃から 80℃まで変化させた時のひずみを測定し、測定されたひずみの値から使用したひずみゲージの温度変化による見かけひずみ分を差し引いて求めた。ひずみの測定では、リード線を3線式結線法によりデータロガーに結線し、温度影響を補償した。なお、比較のため、熱伝導率と同様にガラス繊維を基材とした一般的な積層板についても、同様の測定を行った。

-20℃から 80℃までの線膨張係数の測定結果を、表3に示す。PBO 繊維積層板では、PBO 繊維の負の線膨張特性の効果により、繊維方向となる面内の線膨張係数は3ppm/℃程度で、ガラス繊維積層板に比べて小さく、低熱膨張特性が得られている。

表3 線膨張係数

		PBO 繊維積層板	ガラス繊維積層板
線膨張係数 (ppm/℃)	X 方向	3.1	15.4
	Y 方向	3.5	12.8

3.5 抵抗器表面実装プリント基板

高熱伝導・低熱膨張プリント基板における放熱および熱収縮特性を評価するため、図3のように、回路パターンを形成し、発熱体として抵抗器を表面実装したプリント基板を試作した。

試作した8枚重ねの PBO 繊維積層板から、120mm 角、80mm 角、60mm 角の積層板を切り出し、その中心部分に図4のような回路パターンを形成し、15個の角形チップ固定抵抗器 (L:6.40 × W:3.20 × t:0.60, 定格電力:1W) をはんだ付けで直列回路に構成した表面実装のプリント基板 (以下、PBO 繊維プリント基板) を製作した。なお、裏面の銅箔はすべて除去した。また、比較のため、ガラス繊維積層板についても同様のプリント基板 (以下、ガラス繊維プリント基板) を試作した。

回路パターンの形成や、抵抗器のはんだによる実装作業は、従来のガラス繊維プリント基板と同じ要領で行ったが、実装作業などに問題はなかった。

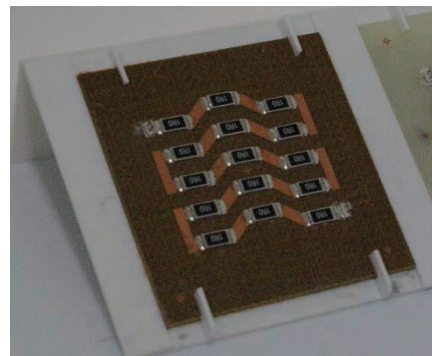


図3 PBO 繊維クロスエポキシ樹脂銅張積層板

4. 放熱特性

試作したプリント基板の放熱特性を把握するため、実装された抵抗器に通電した際の温度上昇特性を測定した。

4.1 測定方法

図4のように、プリント基板に実装された抵抗器の表面 (③, ⑤, ⑥) および基板の抵抗器を実装した面 (②, ⑧) と裏面 (①, ④, ⑦) に、高熱伝導性グリースを用いて熱電対を取り付けて温度を測定した。また、サーモグラフにより、通電中の抵抗器を実装した表面の温度分布を撮影した。

試験は、回路両端の端子に電源を接続し、定電流モードで0.38Aの電流を温度上昇が収まり定常状態になるまで約20分間流し、その後、通電を止めて温度が室温に下がるまで温度変化を測定した。

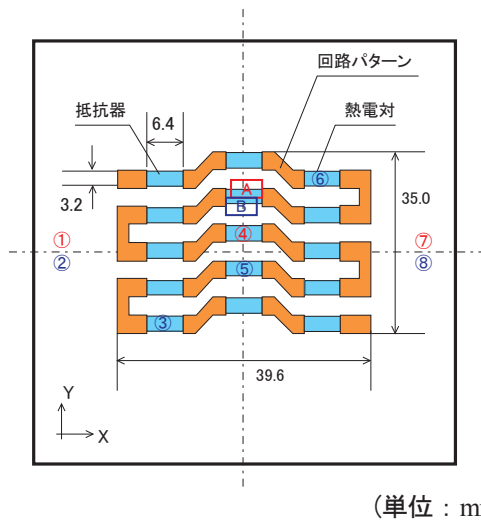


図4 パターン，抵抗器配置および熱電対取付位置

- 熱電対 ①④⑦ : 基板裏面
- ②⑧ : 抵抗器実装面
- ③⑤⑥ : 抵抗器表面
- ひずみゲージ A : 基板裏面
- B : 抵抗器表面

4.2 測定結果

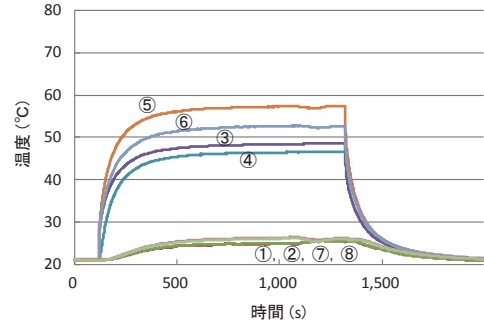
120mm 角の PBO 繊維プリント基板およびガラス繊維プリント基板における各熱電対の温度変化の様子を図5に，通电してほぼ定常状態となった時のサーモグラフによる表面温度分布を図6に示す。また，各熱電対の最高温度を，図7に示す。

測定の結果，PBO 繊維プリント基板では，熱伝導率が高く，抵抗器における発熱がプリント基板全体に良く伝導し，基板全体から放熱されるため，ガラス繊維プリント基板に比べて抵抗器の温度上昇が小さく，中心部分の抵抗器の熱電対⑤および抵抗器の熱電対⑥において約18℃，他の抵抗器の影響が少ない端の抵抗器の熱電対④においても約13℃の温度上昇低減効果がある。厚さ方向の熱伝導率は変わらないが，抵抗器部分のプリント基板裏面にあたる熱電対④においても温度上昇は小さく抑えられている。一方，プリント基板の温度①，②，⑦，⑧を比較すると，抵抗器の温度とは逆に，ガラス繊維プリント基板ではほとんど温度上昇が見られないが，PBO 繊維プリント基板では数℃程度の温度上昇があり，プリント基板および実装された抵抗器の温度差は小さく抑えられ，熱応力の低減に寄与できると考えられる。ただし，熱伝導率の向上により部品同士の熱的な影響は強くなるため，特性の異なる複数の部品が実装される実際のプリント基板では，耐熱特性が低い部品はもとより発熱量が小さい部品でも，温度上昇に注意して，配置などを検討する必要がある。

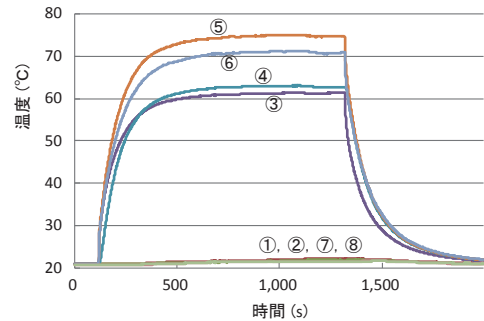
また，プリント基板の大きさの影響を評価するため，

120mm 角に加え，寸法が 80mm 角，60mm 角の場合の各熱電対の最高温度を，図7に合わせて示す。

PBO 繊維プリント基板の場合，寸法が大きくなるほ

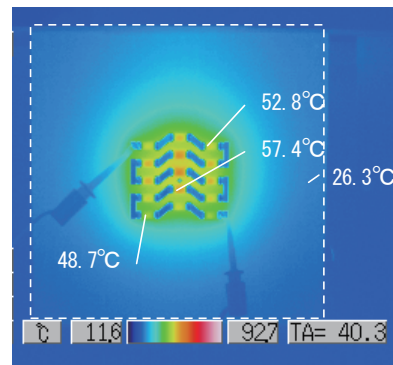


(a) PBO繊維プリント基板

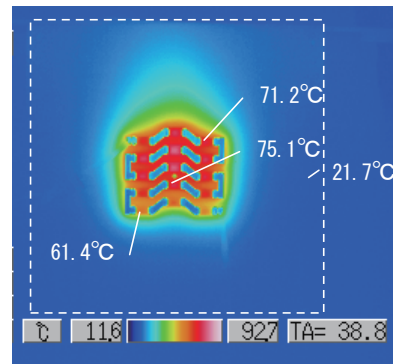


(b) ガラス繊維プリント基板

図5 温度変化（120mm 角積層板）

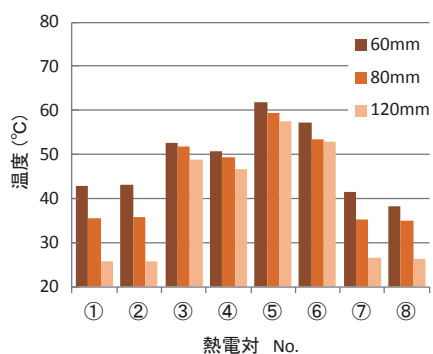


(a) PBO繊維プリント基板

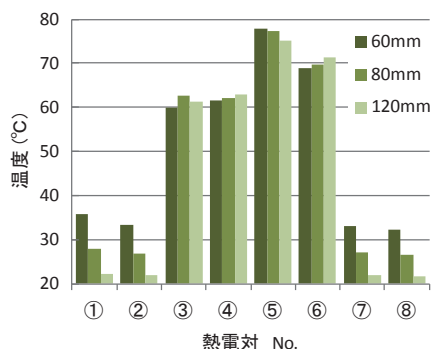


(b) ガラス繊維プリント基板

図6 表面温度分布（120mm 角積層板）



(a) PBO繊維プリント基板



(b) ガラス繊維プリント基板

図7 表面温度分布 (120mm角積層板)

ど抵抗器の温度上昇が抑えられるが、ガラス繊維プリント基板の場合は、寸法と温度上昇には明確な相関は見られない。PBO 繊維プリント基板では、高い熱伝導によりプリント基板全体が放熱に寄与するため、その大きさが放熱特性に大きく影響する。また、PBO 繊維プリント基板の場合、寸法を 60mm 角と小さくしても、抵抗器の温度上昇は 120mm 角のガラス繊維プリント基板より小さく抑えられており、プリント基板の小型化に寄与できる可能性もあると考えられる。

5. 熱収縮特性

プリント基板の熱収縮特性を把握するため、周囲温度を変化させた場合のプリント基板および実装された抵抗器の表面における熱収縮を測定した。

5.1 測定方法

図4のように、抵抗器表面 (A) と抵抗器直下の基板裏面 (B) に、積層板の熱伝導率測定と同様に瞬間接着剤で同仕様の汎用箔ひずみゲージを張り付けた。

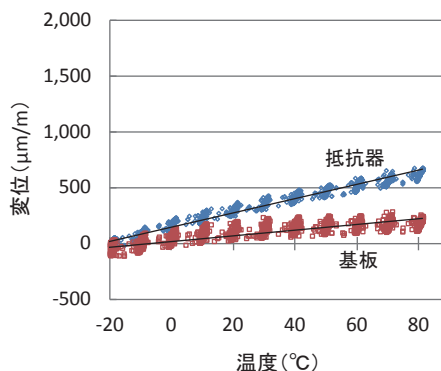
プリント基板を恒温槽に入れ、-20℃から 80℃まで 10℃毎に温度変化させた時のひずみを測定した。また、表面実装した抵抗器についても、単体において、その表

面に同じ仕様の汎用箔ひずみを張り付けて、線膨張係数の測定を行った。

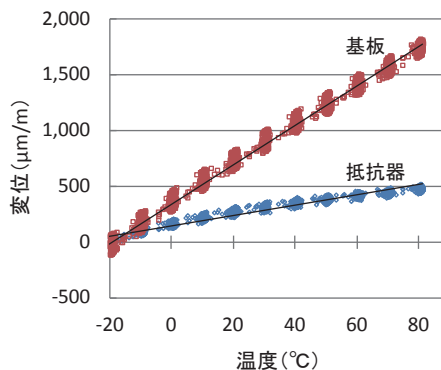
5.2 測定結果

ひずみの測定値から、使用したひずみゲージの見かけひずみを補正し、-20℃を基準にした場合の変位量に換算した結果を、図8に示す。

測定した -20℃から 80℃の温度領域において、変位量は、温度にほぼ比例しており、この傾きが線膨張係数に相当する。線膨張係数が、一定の値であることから、プリント基板のガラス転移温度（線膨張係数、弾性率などの物性が大きく変わる温度）は、80℃以上であることが分かる。抵抗器表面と抵抗器裏面の基板の線膨張係数を比較すると、PBO 繊維プリント基板では、基板が 2.5ppm/℃で抵抗器の 6.3ppm/℃より熱収縮が小さく、一方、ガラス繊維プリント基板では、基板が 17.7ppm/℃で抵抗器の 4.7ppm/℃より大きくなっている。基板と抵抗器の熱収縮量の差を比較すると、ガラス繊維プリント基板では 13.0ppm/℃と大きな値に対して、PBO 繊維プリント基板では 3.8ppm/℃で 1/3 ~ 1/4 程度に抑えられており、はんだ接合部で発生する応力は小さく抑えられている。また、抵抗器単体における同様の測定では、表面の線膨張係数は 6.1ppm/℃で、PBO 繊維プ



(a) PBO繊維プリント基板



(b) ガラス繊維プリント基板

図8 熱収縮特性 (120mm角積層板)

特集：車両技術

プリント基板ではほぼ同程度の値となっている。一方、ガラス繊維プリント基板では1.4ppm/°C程度小さく、基板の大きな熱収縮の影響を受け、曲げが発生している可能性のあることが分かる。

今回の試作したPBO繊維プリント基板は、熱伝導率を高くすることを優先したため、PBO繊維の割合をできるだけ高く設定している。このため、基板の線膨張係数が抵抗器より低熱膨張となっているが、PBO繊維と樹脂との割合で線膨張係数は調整することができ、抵抗器により近づけることも可能である。

PBO繊維プリント基板では、熱収縮が小さく、また面内方向の熱伝導率も高く、温度上昇や基板内の温度差を小さくできることから、熱応力の影響を抑え、信頼性の向上に寄与できる可能性があると考えられる。

6. おわりに

高熱伝導有機繊維のPBO繊維クロスを用いた高熱伝導・低熱膨張プリント基板を試作し、その基本特性や放熱および熱収縮特性を評価した。

その結果、繊維方向である面内では、高い熱伝導率が得られるとともに、線膨張係数が小さく抑えられことを確認した。また、はんだ耐熱、銅箔の引き剥がし強度、絶縁などの基本特性は、ガラス繊維クロスを用いた従来のプリント基板と同程度の特性が確保できることや、誘電率が低く抑えられることが確認できた。

さらに、抵抗器を表面実装したプリント基板における放熱および熱収縮特性では、ガラス繊維プリント基板に

比べて、実装された抵抗器の温度上昇を低く抑えられ、基板上の温度差や、抵抗器と基板の熱収縮差を小さくでき、はんだ部分での熱応力を抑えられることを確認し、信頼性の向上につながる可能性のあること示した。

こうした高熱伝導・低熱膨張プリント基板を、車両用電子機器に適用することで、信頼性向上や小型化につながる可能性が期待できる。引き続き、加工性や長期信頼性などの課題を抽出し、実用を目指した開発を行う予定である。

文献

- 1) 上條弘貴：スーパー繊維を鉄道に応用する，RRR，Vol.68，No.11，pp.6-9，2011
- 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概要集（第2分冊），No.2-103，pp.109，2011
- 3) 上條弘貴，福田典子：高熱伝導有機繊維を用いたパワー半導体用放熱材料の研究，電気学会研究会資料，半導体電力変換，自動車，家電・民生合同研究会，SPC-13-153/VT-13-036/HCA-13-058，pp.1-6，2013
- 4) H. Fujishiro, M. Ikebe, T. Kashima, A. Yamanaka, "Thermal Conductivity and Diffusivity of High-Strength Polymer Fibers," Japanese Journal of Applied Physics, Vol.36, pp.5633-5637, 1997.
- 5) 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