



電鉄車両用パワーモジュール向け新規放熱板

New Heat Sink for Railroad Vehicle Power Modules

岩山 功*

Isao Iwayama

池田 利哉

Toshiya Ikeda

桑原 鉄也

Tetsuya Kuwabara

小山 茂樹

Shigeki Koyama

中井 由弘

Yoshihiro Nakai

岡本 匡史

Masashi Okamoto

地球温暖化や化石燃料枯渇問題への対策の一貫として、エネルギー効率に優れた輸送手段である電気鉄道が注目されており、世界各国で鉄道網の整備が進められている。

当社のグループ企業であるアライドマテリアルと住友電工は、電鉄車両に搭載するパワーモジュール向けに、マグネシウムと炭化ケイ素の複合材料 (MgSiC) から成る新規放熱板を開発した。

本放熱板は、従来材であるアルミニウムと炭化ケイ素の複合材料 (AlSiC) よりも、特性で優れ、製法も簡便であり、パワーモジュールの高性能化への貢献が期待される。本レビューでは、その優れた特性や組織、製法について紹介する。

As countermeasures against global warming and fossil fuel depletion, electric railways have been increasingly installed for their excellent energy efficiency. Sumitomo Electric Industries, Ltd. and its group company A.L.M.T. Corp. have jointly developed a new heat sink that is made of a magnesium silicon carbide composite (MgSiC) to be used for the power modules of railroad vehicles. The MgSiC heat sink is superior in thermal conductivity and easy to process as compared with the conventional heat sink made of aluminum silicon carbide composite (AlSiC). The new heat sink is expected to contribute to the development of advanced power modules.

キーワード：ヒートスプレッダー、パワーモジュール、MgSiC、複合材料、放熱材料

1. 緒言

地球温暖化や化石燃料枯渇問題への対策として、エネルギー効率に優れた陸上輸送手段である電気鉄道が注目されており、世界各国で鉄道網の整備が進められている。

電鉄車両では、エネルギーの効率的な利用のためパワーデバイス^{*1}を用いている。なかでも、主動力モーターを駆動するデバイスは発熱が大きく、その破損を防ぐ目的で制御された線膨張係数と高い熱伝導率を有する炭化ケイ素 (SiC) とアルミニウム (Al) 合金の複合材料 (以下、AlSiC) が放熱板として用いられている。

今回、当社は(株)アライドマテリアル (以下、アライドマテリアル) と共同で、電鉄車両に搭載するパワーモジュール^{*2}向けに、マグネシウム (Mg) と炭化ケイ素の複合材料 (以下、MgSiC) から成る新規放熱板を開発した。本材料はAlSiCと同等の線膨張係数と、より高い熱伝導を有し、簡便な工程で製造することが可能である。

2. アライドマテリアルの放熱材料

マイクロプロセッサやパワーデバイスなどの半導体素子は発熱を伴い、その熱を除去するために放熱材料が用いられる。放熱材料の材質としては、安価で熱伝導率に優れた銅やAl合金が用いられることが多い。しかし、発熱量が特に大きく、また高い信頼性が求められる用途のデバイスに対しては、高負荷時の熱応力による破損を防ぐために、

素子や周辺部材と線膨張係数をマッチングさせた高機能な材料が使用されている。

アライドマテリアルは、このような高機能放熱材料の総合メーカーである。同社は、ユーザーからの幅広い線膨張係数と高い熱伝導率への要求に対し、同社のコア技術である複合化技術により応えている。図1は、各種デバイスを

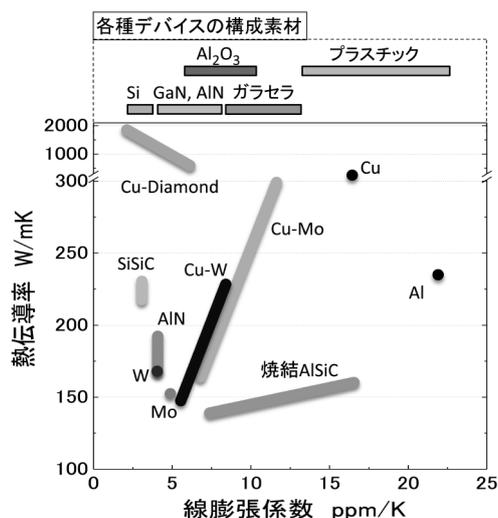


図1 アライドマテリアルの放熱材料の特性

構成する代表的な素材の線膨張係数と、アライドマテリアルの高機能放熱材料の線膨張係数と熱伝導率を示したものである。放熱材の熱特性（熱伝導率、線膨張係数）は、デバイス全体の構成を考慮し、最適なものを選択される。

3. 電鉄車両用パワーモジュールの特長と放熱板

電鉄車両の主動力制御用パワーモジュールの模式図を図2に示す。パワーデバイスはAlSiC放熱板上に接合され、制御に必要な電気・電子回路は筐体内に納められて一体化されている。このパワーモジュールは、ほぼ世界共通の大きさで、一般にメーカー間で取付けの互換性がある。

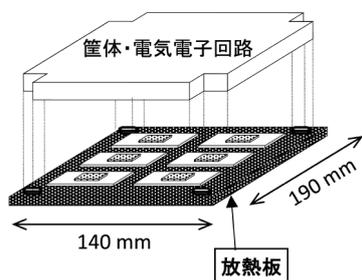


図2 パワーモジュールの模式図

図3に冷却器に取り付けた電鉄車両用パワーモジュールの断面を示す。パワーデバイスと放熱板は、両面に金属層を有するセラミックスの絶縁基板を挟み、はんだで接合されている。パワーモジュールは、熱伝導性のグリスを介して冷却器にボルト付けされる。

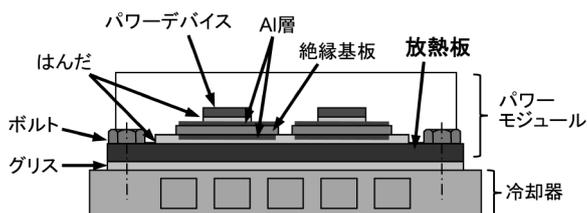


図3 パワーモジュール断面の模式図

本分野で使用される放熱板の仕様の一例を表1に示す。放熱板には、冷却器と放熱板のボルト締結時の密着を確実にするために、冷却器側が凸となるように反りが設けられ、絶縁基板の種類などに合わせて、適切な値が選択される。

表1 電鉄車両向けパワーモジュール用放熱板の仕様

| | | |
|-----|-------|--|
| 特性 | 熱伝導率 | 180 W/mK以上 |
| | 線膨張係数 | 7.5 ppm/K |
| 形状等 | サイズ | 140×70×5mm 140×130×5mm 140×190×5mm |
| | 反り | 絶縁基板材質により設定 |
| | 表面仕上げ | Niめっき |

4. 新規放熱板 (MgSiC) の開発

4-1 MgSiCの製法

MgSiCの製法を、AlSiCの代表的な製法である高圧 casting^{※3}と比較して図4に示す。両者は共にSiC粒子と金属の複合材料で、SiC粒子の隙間に金属を溶浸させて作製される。

| | AlSiC(現行材) | MgSiC(開発材) |
|-------|--|------------------------|
| 原材料 | SiC粉末, Al | SiC粉末, Mg |
| 構造体作製 | 構造化 → 加工 | ↓ |
| 作製工程 | 溶融Al 高圧 casting機 加圧 浸透 SiC構造体 | 溶融Mg 浸透 SiC粉末 |
| 仕上げ | AlSiC 機械加工 Niめっき | MgSiC 機械加工 Niめっき |

図4 放熱板の製法

AlSiCでは、溶融金属をSiC粒子間に導入する前に、SiC粒子を自立した構造体とする必要がある。構造体は、必要に応じ加工等施された後、鑄型に配置され、高圧の溶融Al合金を溶浸させる。その後、加工やめっきが施され製品となる。

MgSiCは、自立した構造体を用意する必要がなく、鑄型にSiC粒子を充填すれば良い。また、溶融Mgの溶浸に外部圧力は不要である。凝固後は、加工やめっきが施され製品となる。

以上のように、MgSiCの溶浸工程はAlSiCの溶浸工程より簡便であり、低コスト化を図れる可能性がある。また、SiC粉末を充填できる形状であれば複雑形状品や、圧力を必

要としないことから大型品への対応の可能性もある。さらにSiCの割合により、線膨張係数を変更することもできる。

MgSiC放熱板外観を写真1に、断面写真を写真2に示す。SiC粉末間に、Mgが隙間無く充填されていることが分かる。



写真1 MgSiCの外観

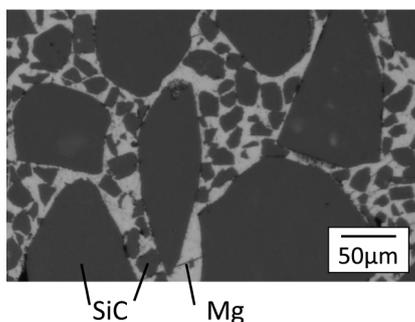


写真2 MgSiCの断面

4-2 MgSiCの特性

鉄道車輛用の放熱板として使用されるAlSiCの線膨張係数7.5ppm/Kに合わせたMgSiCの特性を、AlSiCと比較して表2に示す。

表2 MgSiCの代表的な特性

| | 熱伝導率 W/mK | 線膨張係数 ppm/K | 比重 g/cm ³ | 曲げ弾性率 GPa | 曲げ強さ MPa |
|-------|--------------|----------------|-------------------------|--------------|-------------|
| MgSiC | 210~230 | 7.5 | 2.7 | 140 | 400 |
| AlSiC | 185 | 7.5 | 3 | 145 | 380 |

MgSiCの熱伝導率は210~230W/mKという高い値を示し、AlSiCよりも10~20%優れていることが確認された。また比重はMgSiCの方がやや軽く、機械的特性は同等であった。

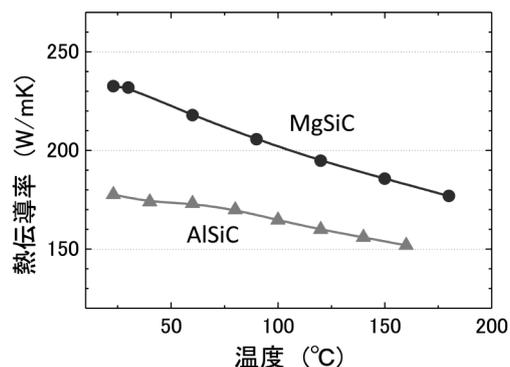


図5 MgSiCの熱伝導率の温度依存性

図5に、MgSiCの熱伝導率の温度依存性を示す。MgSiCは室温から200°Cまでの温度域で、AlSiCよりも高い熱伝導率を示した。

4-3 MgSiCの熱伝導に関する考察

MgSiCの高い熱伝導率の理由を調査するため、MgとSiC粒子の界面を透過電子顕微鏡で観察した。

AlSiCの場合、写真3に示すように、AlとSiC粒子の界面には、Al₄C₃といった化合物が生じやすい⁽¹⁾ことが知られている。

一方でMgSiCの場合には、写真4に示すMgとSiC粒子界面の透過電子像から分かるように、MgとSiCの界面に

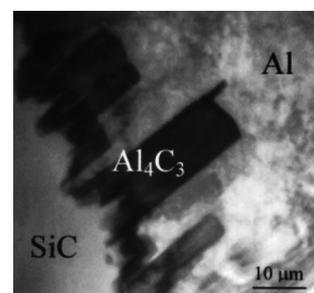


写真3 AlとSiCの界面に生じた炭化物の透過電子像⁽¹⁾

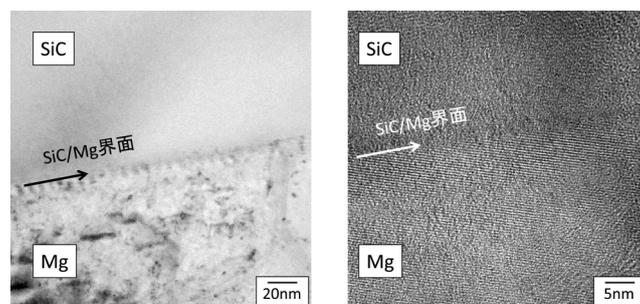


写真4 MgSiCにおけるSiCとMgの界面の透過電子像

中間層が無く、直接結合している。この構造のため熱の伝達が良く、高い熱伝導率を示したと推定している。

4-5 MgSiCの信頼性の確認

MgSiCと絶縁基板（両面に金属層を有す）をはんだで接合した試料を作製し、その耐久性を評価した。絶縁基板として、両面Al層付きの窒化アルミニウム（AlN）基板を用いた。

実験条件を表3に示す。また接合試料の模式図を図6に示す。評価としては、はんだ接合前後、規定回数の冷熱サイクルを与えた後に、反りの測定とはんだ接合部の超音波検査を行った。

表3 接合条件および耐久性評価条件

| | |
|--------|---|
| 絶縁基板 | 両面Al層付きAlN絶縁基板 寸法: 70×40mm AlN部厚さ: 0.635mm アルミ層厚さ: 0.4mm |
| はんだ種類 | Sn-3%Ag-0.5%Cu ペーストはんだ M705 (千住金属製) |
| 接合条件 | ホットプレート 加熱温度: 280°C |
| 冷熱サイクル | 液槽冷熱試験 -40°C × 7min ↔ 125°C × 7min Max: 4000サイクル |
| 反り測定方法 | 形状測定器 スパン: 50mm |
| 超音波測定 | 周波数: 25MHz |

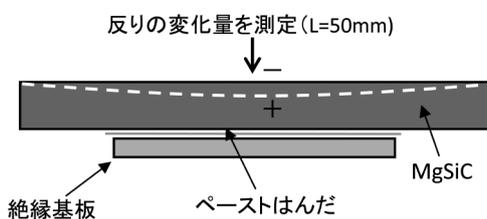


図6 MgSiC-絶縁基板接合試料の模式図

図7に、はんだ接合前後、冷熱サイクル試験経過後のMgSiCの反りの変化を示した。MgSiCは、その線膨張係数や機械的特性がAlSiCと同等であるため、反りの変化の挙動も、両材料でほぼ同一となった。両材質共に、はんだ接合直後に反りの変化量が大きくなったのは、はんだ付け温度と室温間の温度差と、絶縁基板と放熱板の線膨張係数差によって生じた熱応力のためだと考えられる。その後、冷熱サイクルで反りが安定するのは、残留応力が解放されていくためと考えられる。

なお、今回の試験範囲で、両材質ともに超音波によるはんだ接合部の評価で剥離等が生じていないことを観察している。

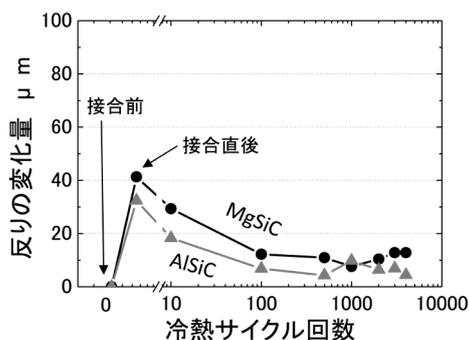


図7 冷熱サイクル回数と反りの変化量

4-6 MgSiCの反り付け

4-5で示したように、放熱板と絶縁基板を接合すると、両材質の線膨張係数の差から生じる熱応力により、反りの変化が生じる。

電鉄車輛向けパワーモジュールでは一般に、放熱板の線膨張係数 (7.5ppm/k) が絶縁基板の線膨張係数 (4.5ppm/K) よりも大きい。このため、はんだ付け後には絶縁基板側に凸形状となりやすく、図3のパワーモジュールの図において冷却器と放熱板が接触し難くなる。これを避けるため、放熱板には、あらかじめ反りが与えられている。

MgSiCも、このような反りに対応可能であり、図8は、4-5で使用したAlN絶縁基板用に調整した反りの例である。

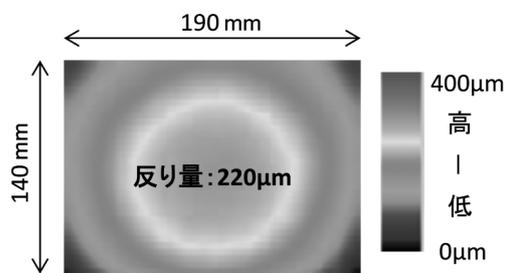


図8 反りを付与したMgSiCの表面形状

4-7 MgSiCの加熱時の安全性

MgSiCの加熱時の安全性を評価するため、ASTM E659に準拠した試験で発火点を測定した。測定は、規定温度 (500、550、600°C) に保持したフラスコ内に、それぞれニクロム線で保持した試料 (10×10×5mm) を投入し、10分以内に赤熱や発火が生じるかを、目視確認することで行った。

その結果、MgSiCは600°Cにおいても発火や赤熱を確認出来なかった。MgSiC単体では、600°C程度までの加熱に対して特段の配慮は不要と考えられる。

5. 結 言

住友電気工業はアライドマテリアルと共同で、電鉄車輛に搭載するパワーモジュール向けに、MgとSiCの複合材料(MgSiC)から成る新規放熱板を開発した。

アライドマテリアルでは、量産技術の開発を進めるとともに、市場へのMgSiCの紹介を開始している。

エネルギーの効率運用の観点から、パワーエレクトロニクス技術の発展は重要であり、当社グループは、本分野における新規材料の開発によって貢献していきたい。

なお、開発材については、特許登録済みである。

用語集

※1 パワーデバイス

電圧・交直・周波数などの変換や、電力のオンオフに用いるIGBT、サイリスタなどの半導体素子。

※2 パワーモジュール

1～数個のパワーデバイスと、その駆動回路や自己保護回路、入出力端子、放熱板(放熱基板)を、ひとまとめにしてパッケージングしたもの。

※3 高圧鋳造法

セラミックスなどの多孔質体の隙間に、高圧で溶融金属を浸透させて複合材料の作製する方法。

参 考 文 献

(1) J. A. Vreeling et al., Scripta mater. 42 (2000) 589–595

(2) ASTM E659

執 筆 者

岩山 功*: エレクトロニクス・材料研究所



桑原 鉄也 : エレクトロニクス・材料研究所
グループ長 博士(工学)



中井 由弘 : エレクトロニクス・材料研究所 部長



池田 利哉 : (株)アライドテック
ヒートシンク開発部 部長



小山 茂樹 : (株)アライドテック
ヒートシンク開発部 主席



岡本 匡史 : (株)アライドテック
ヒートシンク開発部



*主執筆者