

〈一般研究課題〉 自動車の電動化に向けた次世代パワー半導体
実装に関する研究

助成研究者 大同大学 山田 靖



自動車の電動化に向けた次世代パワー半導体 実装に関する研究

山田 靖
(大同大学)

A study of next-generation power semiconductor packaging for automobile electrification

Yasushi Yamada
(Daido University)

Abstract :

Next-generation power semiconductor devices such as wide band-gap SiC or GaN devices are being actively developed to achieve more efficient and smaller electrical invertors. Important advantages of such devices are their reduced size and their ability to operate at temperatures in excess of 200°C; however, such features can lead to high heat flux or significant thermal stress.

Power device packaging of those devices requires higher reliability such as high temperature operation, durability of thermal stress, etc. The packaging technology included new materials and processes. In this study, several component technologies of the packaging have been carried out.

A joint of Sn-Cu alloy has been fabricated using a thin Sn film and a Cu substrate, high melting temperature of SnCu alloys were found in the joint. However, it was found that the joint was consisted of two composition of Sn-Cu alloy. Two types of thermal sheets were examined for thermal resistance measurement with various fastening torques. Higher torques showed lower thermal resistances, this results seems to reduce interface thermal resistances between the thermal sheet and the substrate or heatsink. Anisotropic graphite material was examined for a substrate of the packaging. The graphite shows higher thermal conductivity and lower thermal expansion for two directions, on the contrary, lower thermal property and higher thermal expansion for one direction. A symmetrical laminated graphite substrate showed lower thermal resistance than the Cu

substrate, in addition better reliability of power and thermal cycling tests.

1. はじめに

地球全体でのCO₂削減や、都市部の有害排ガスの低減に向け、充電式電気自動車、ハイブリッド車、燃料電池自動車等、自動車の電動化が急速に進んでおり、今後は主流になることが予想されている。

それらの自動車には、電力変換するために、トランジスタやダイオード等のパワー半導体デバイスを多数実装したインバータやDC-DCコンバータ等の機器が用いられるが、大電流による自己発熱が大きい、搭載スペースが狭い、エンジン等からの排熱があるため周囲の熱環境が厳しいなど、従来のSi半導体の温度上限である150℃までの範囲で動作させることは、制約が多い状況であった。

近年、次世代の半導体材料であるSiCやGaNを用いたパワー半導体デバイスの研究が進み、現時点ではデモ的であるが、一部の自動車や電車に搭載されている。これらの半導体は、その物性上250℃以上の高温動作が可能であるため、特に自動車の用途ではメリットがある。その際、その半導体デバイスを基板等を実装するための材料やプロセス技術も必要となるが、従来の実装材料やプロセスでは、コスト、有害性、熱応力に対する信頼性など、適用できる技術が少なく、新規な実装技術が必要となっている[1-6]。

2. 試料および実験方法

パワー半導体デバイスの実装構造は、スイッチング素子を含む電気回路を構成しつつ、そのデバイスで発生した熱を冷却器まで効率良く伝えるため、デバイス、基板、放熱板、冷却器等を積層化し、その間を接合技術により貼り合わせた構造が用いられる。本研究では、それらの要素となる技術として、金属系接合技術、伝熱シート接合技術、基板技術に関して検討を行った。

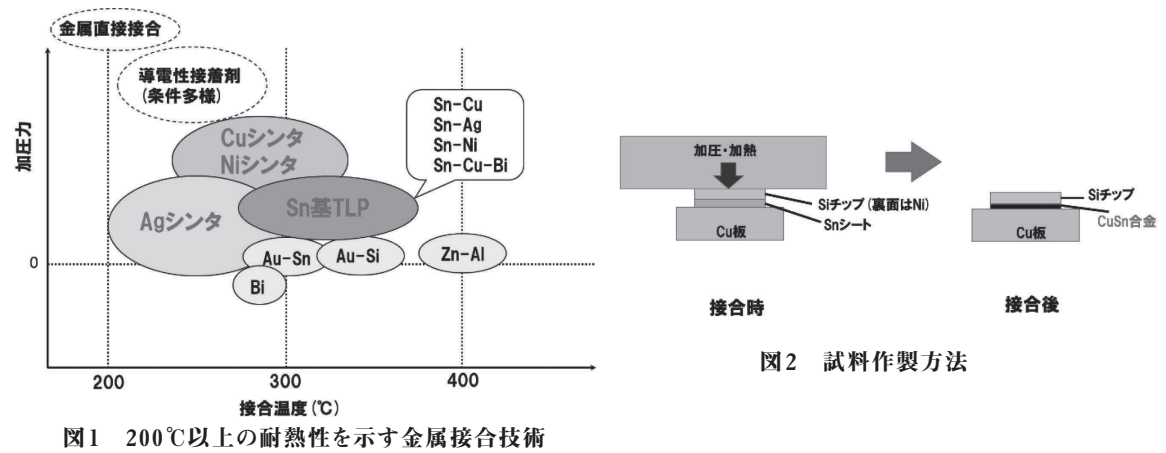
2.1 金属系接合技術

パワー半導体デバイスの近傍には、金属系の接合技術が用いられる。これは、高い熱伝導率や導電率が求められるためである。この接合では、熱伝導性や電気伝導性に加えて、動作温度以上の耐熱性が必要であるが、接合時にデバイスを変質・破壊させないために、400℃程度以下のプロセス温度であることも求められる。

現時点で知られている200℃以上の耐熱性を持つ金属系の接合技術の概要を図1に示す[7]。従来は、主にはんだ接合が用いられてきたが、200℃以上の耐熱性を示すはんだは、有害なPbを含むものか、高価なAuを含むものしかなく、その他のはんだ材料は研究段階にある。近年では、はんだに代わり、AgやCuなど高熱伝導材料のナノ粒子を焼結させて接合する技術が広く検討されている。一方、Snのみを熔融させて固体のCu等と反応させ、高融点の合金を生成しながら接合する方法もあり、安全性やコストの点でメリットがあるが、完全に反応層できるか否かなど不明な点が多い。そこで本研究では、薄いSnシートを用いて、デバイス側のNi電極と基板側のCuとを反応させてSnCuの合金接合ができるか否かを検討した(図2)。

デバイスとして、裏面にNi電極を形成したSiチップと、基板としてメッキのないCu板を準備し

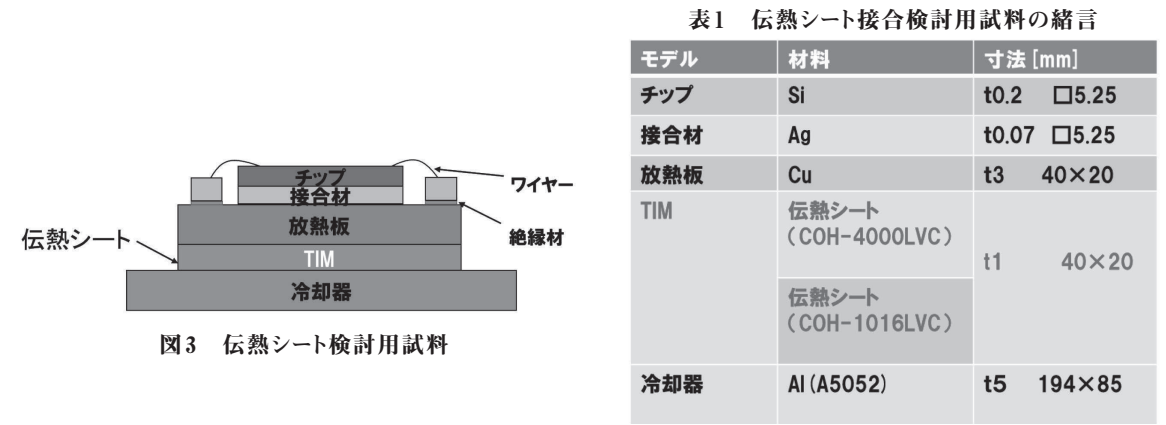
た。その間に、薄いSnシートを挟み、空气中で加熱を行った。作製した試料は接合断面を機械研磨し、SEMによる観察とEDXによる元素分析を行った。



2.2 伝熱シート接合技術

次に、伝熱シート接合技術に関して検討した。伝熱シートは一般に有機物であり熱伝導率が低いために、熱流束の高いデバイス近傍でなく、放熱板と冷却器との間等に用いられることが多い。その伝熱シートには種々の市販品があるが、シート単体の熱特性と、放熱板等と積層化した際の熱特性は大きく乖離することが多い。その原因は、シートと放熱板等との界面熱抵抗によるものであることが推測された。

そこで、放熱板と冷却器との間に伝熱シートを挟み、締付トルクに対して熱抵抗がどのように変化するかを調べた。図3および表1に示すように、2種類の伝熱シートに対して熱抵抗を測定し、比較を行った。



2.3 基板技術

最後に、基板材料に関して検討した。基板には熱特性やコストの面でCu板が用いられることが多い。しかし、デバイスである半導体材料との熱膨張係数差が大きいため、温度サイクル等の信頼性を考慮すると、低熱膨張係数で高熱伝導率のものが望ましいが、一般に金属材料では、両者は背反する。

そこで、本研究では、3方向中の2方向に低熱膨張係数と極めて高い熱伝導率を示すグラファイ

ト材料に着目した[8-10]。このグラファイト単板では、強度が低くメリットがないが、図4に示すように、方向を90°変えた板を上下対称に3層に積層化(以下HT3層)することで、機械的強度が高まり、低熱膨張で高熱伝導になる見込みが得られた。そこで、ヒータチップを積層した試料を作製し、熱抵抗測定(図5)と、パワーサイクルや冷熱サイクル試験を行ない、信頼性を検討した。また、有限要素法を用いて熱解析と構造解析を行い、実験結果との比較を行った。

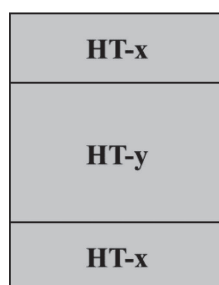


図4 積層グラファイトの構造

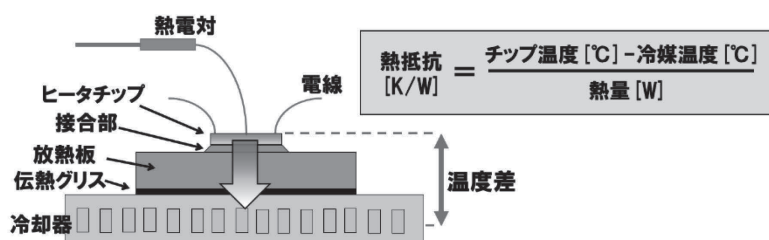


図5 試料の構造と測定系

3. 実験結果

3.1 金属系接合技術

作製した試料の断面をSEMにより観察した結果、図6に示すように、接合層が2層に分かれている様子が見られた。そこで、それぞれの箇所に対して元素分析した結果(図7)、基板に近い側(分析箇所3)は、CuとSnの強度比でCuが高いことから、 $(\text{Cu}, \text{Ni})_3\text{Sn}$ であることが考察された。一方、デバイスに近い側(分析箇所4)はCuとSnの強度比でSnが高く、 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ であることが考察された。デバイス側の電極はNiであるため、反応時に、基板側のCu元素の供給が不足していることが考察された。なお、2層に分かれているもののいずれも合金層であり、Sn単相は見られていない。 Cu_3Sn の融点は640℃、また、 Cu_6Sn_5 の融点は415℃であることから、いずれも400℃以上の融点であり、250℃程度のパワー半導体の高温動作に対して、適用できる可能性のあることがわかった。

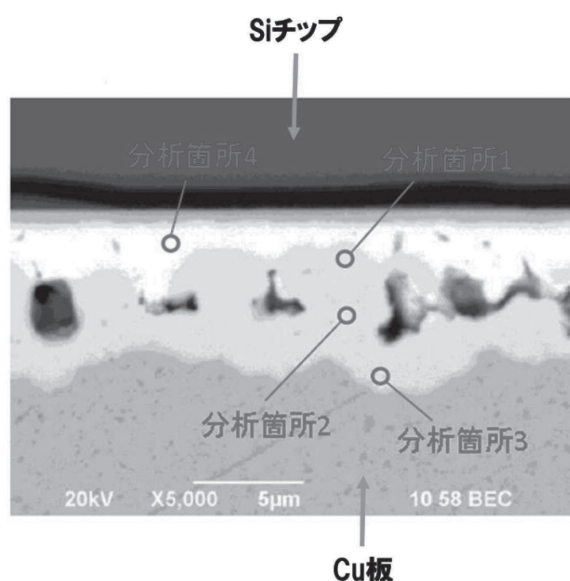


図6 CuSn合金接合の断面

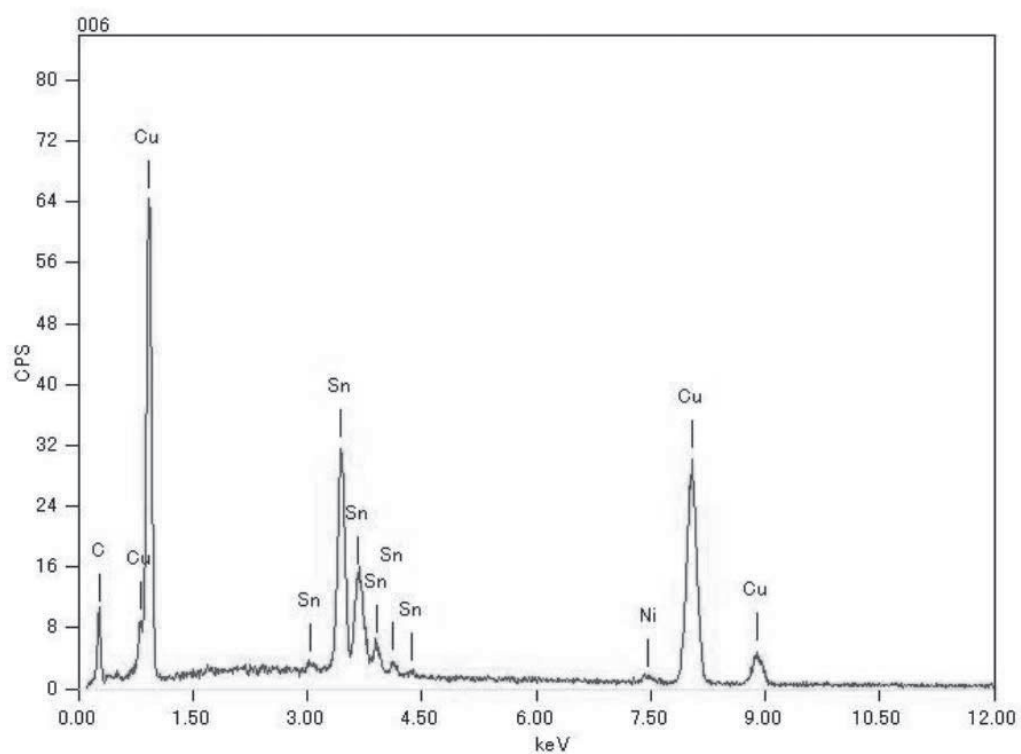


図7(a) 分析箇所3

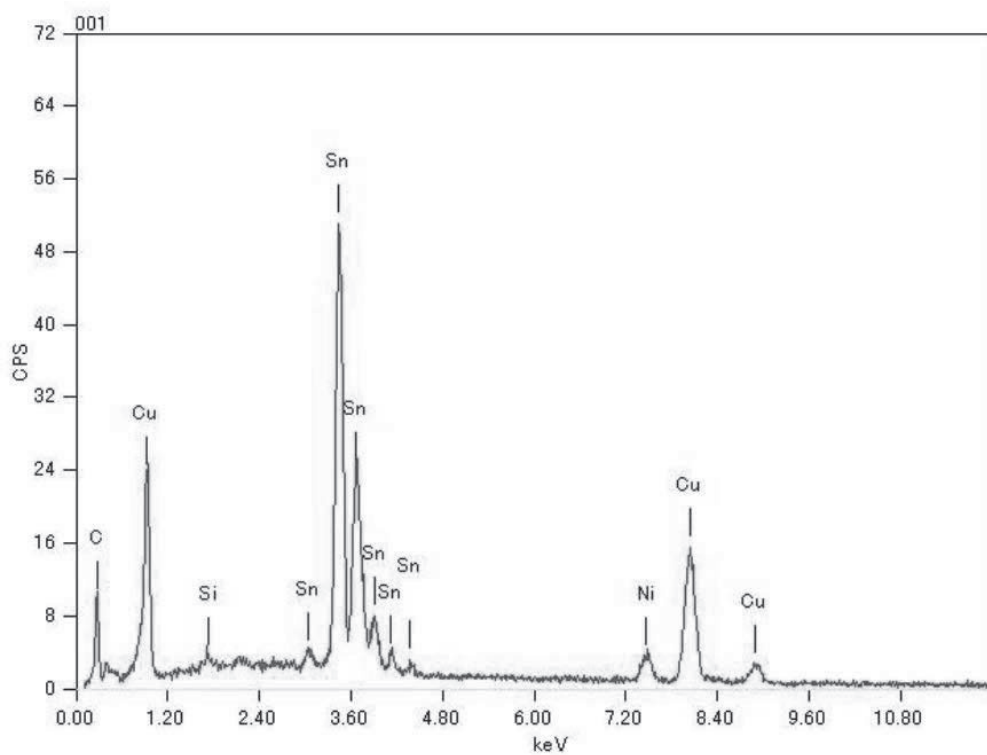


図7(b) 分析箇所4

2.2 伝熱シート接合技術

2種類の伝熱シートに対して、締付トルクを変えて熱抵抗を測定した結果を図8に示す。いずれも締付トルクに対して、トルクが増加すると、熱抵抗が大幅に減少する様子が見られた。図8(a)は硬いシートであり、トルクが低い条件では熱抵抗が変わらず、0.1Nmの大きなトルクで半分程度に減少した。一方、図8(b)は柔らかいシートであり、トルクの増加と共に熱抵抗が減少した。

このようなトルクに対して熱抵抗が減少する挙動は、接合界面における空気層の存在であることが推定された。そこで、有限要素法を用いた熱解析により、シート上下に薄い空気層のモデルを入れて、実験値と比較した。その結果、定性的ではあるが、数 μm の空気層の存在と整合する様子が見られた。

これらの結果から、伝熱シートをパワー半導体の実装に用いる場合は、シート材料の熱物性値のみでなく、被接合材料との界面の状態を十分に考慮する必要があることがわかった。

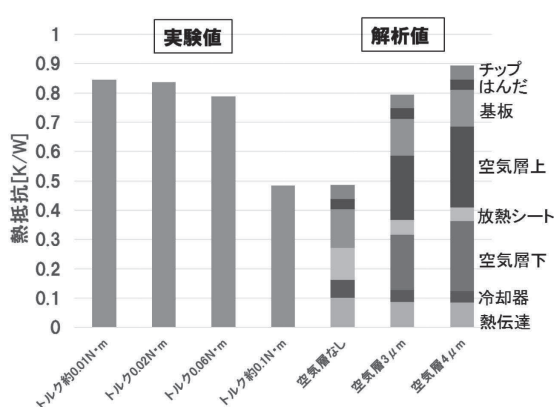


図8(a) COH-4000LVCの場合

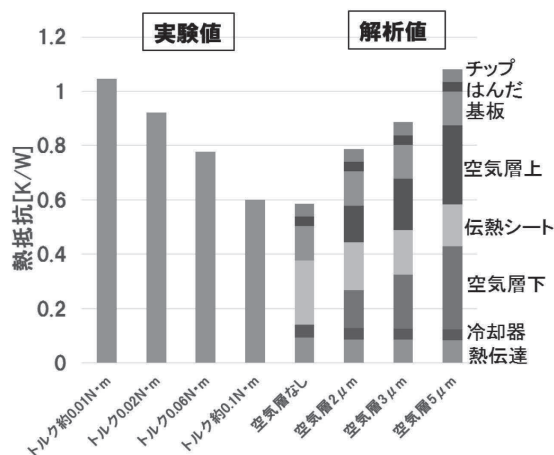


図8(b) COH-1016LVCの場合

3.3 基板技術

作製した3層構造の基板を用いた試料(HT3層)の熱抵抗を測定した。比較のために、同じサイズのCu板およびCu-65Mo板を用いたものも測定した。それらの結果を図9に示す。HT3層を用いたものは、Cuよりも低熱抵抗であり、これはグラファイトの高熱伝導性の効果であると思われる。また、熱解析の結果を図10に示す。これらの結果から、測定値と解析値は良く一致していることがわかる。

また、同じ構造の試料を用いて、パワーサイクル試験(65/150℃および65/200℃)を行った結果、図11に示すように、Cu板を用いたものに比べ、信頼性の高い結果が得られた。さらに、冷熱サイクル試験(-40/150℃)でも同様の結果(図12)が得られた。以上のことから、グラファイト3層構造の基板は、高熱伝導率と低熱膨張係数の背反をブレークスルーできる可能性のあることが考察された。

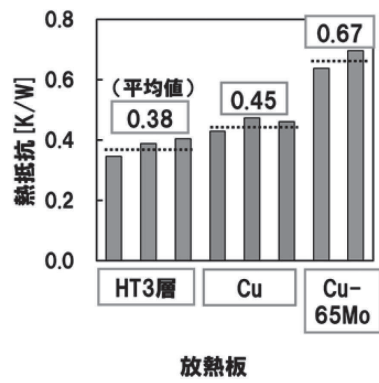


図9 熱抵抗の測定結果

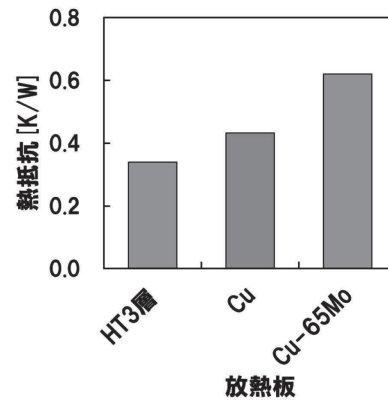
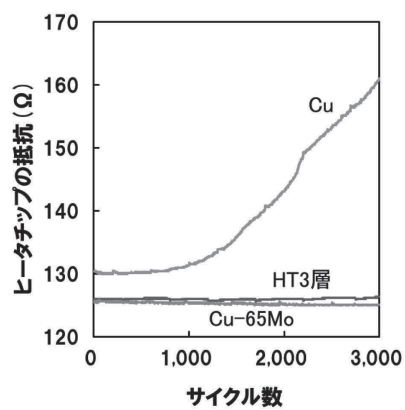
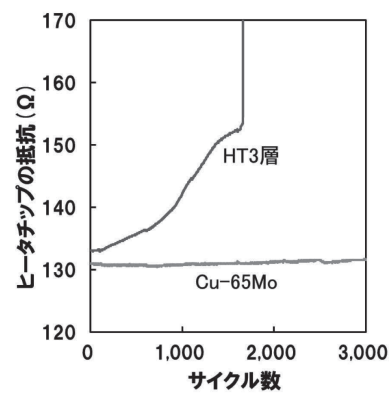


図10 熱抵抗の解析結果



(a) 65/150°Cの場合



(b) 65/175°Cの場合

図11 パワーサイクル試験結果

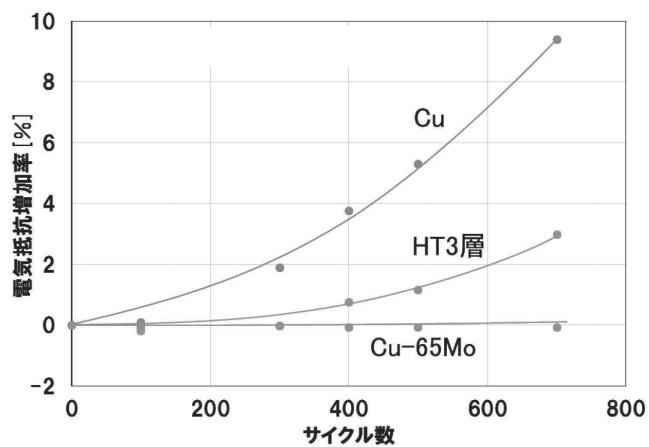


図12 冷熱サイクル試験結果

4. まとめ

自動車の電動化に対して、次世代パワー半導体の実装技術に関して検討した。今後は、上記で得られた要素技術を結集し、より性能の高いパワー半導体実装構造を検討する予定である。

謝辞

本研究にご協力頂きました、株式会社アルテクス様、丸文株式会社様、株式会社サーモグラフィティクス様、研究室の学生各位に感謝します。

参考文献

- [1] Neudeck PG, Okojie RS, Cchen L-Y. High-temperature electronics-a role for wide bandgap. Proc IEEE 2002, 90(6):1065-76.
- [2] P. Dietrich, Trends in automobile power semiconductor packaging, Microelectron. Reliab. 53, (2013) 1681-1686.
- [3] P. Dietrich, Joining and package technology for 175°C Tj increasing reliability in automotive applications, Microelectron. Reliab. 54, (2014) 1901-1905.
- [4] T. Ishizaki, M. Yanase, A. Kuno, T. Satoh, M. Usui, F. Osawa, Y. Yamada, Thermal simulations of joint with high thermal conductivities for power electronic device, Microelectron. Reliab. 55 (2015) 1060-1066.
- [5] T. Ishizaki, A. Kuno, A. Tane, M. Yanase, F. Osawa, T. Satoh, Y. Yamada, Reliability of Cu nanoparticle joint for high temperature power electronics, Microelectron. Reliab. 54 (2014) 1867-1871.
- [6] T. Ishizaki, M. Usui, Y. Yamada, Thermal cycle reliability of Cu-nanoparticle joint, Microelectron. Reliab. 55 (2015) 1861-1866.
- [7] 山田靖, 自動車用パワー半導体実装技術に向けた接合材料, 電材ジャーナル, Vol.630, (2016) 12-16.
- [8] 竹馬克洋, 高熱伝導性カーボン「PYROID HT」, 月刊コンバーテック, 加工技術研究会, 通巻427 (2008) 123-127.
- [9] 久野敦輝, 澤木聖斗, 成田恭典, 山田靖, 竹馬克洋, 炭素系異方伝熱材料のパワー半導体放熱板への可能性, MES2014 (第24回マイクロエレクトロニクスシンポジウム) (2014) 57-60.
- [10] 柳瀬匡史, 久野敦輝, 伊藤晃平, 高橋直也, 中山雄成, 山田靖, 竹馬克洋, 炭素系異方伝熱材料の積層化による放熱板の適用可能性, 第29回エレクトロニクス実装学会春季講演大会 (2015) 243-246.