

材料物性を適材適所化したパワーモジュール用基板の開発

大開 智哉

Development of Substrates for Power Modules with Suitable Material Properties

Tomoya OHIRAKI

Abstract

For automotive power modules, integrated DBA substrates are attracting attention for their advantages such as compactness, light weight, high heat resistance, and high reliability. The challenges of integrated DBA substrates include bonding technology, warpage, and reliability. In order to establish a product structure for integrated DBA substrates, we studied the application of the flux-free bonding method and the reduction of warpage by adopting a symmetrical structure focusing on material properties.

キーワード：絶縁基板，ヒートシンク，一体型，ろう付け，反り低減

1. はじめに

当社はパワーモジュール用絶縁基板として回路材に高純度アルミニウムを用いた DBA 基板の開発，量産を長年にわたって行っている。当社における開発要素技術は異種材料の接合技術および複合化にあり，それらによって客先より高い信頼を得てきた。

本稿にて述べる一体型 DBA 基板は，高い放熱性能を有することや小型，軽量化を図れることなどから車載向け省エネ製品として注目が高い。図 1 に従来モジュール構

造および一体型モジュール構造を示す。従来は銅を回路層とした DBC 基板をヒートシンクに対し，グリースやはんだを介して密着させていたが，直冷モジュール構造では絶縁回路基板とヒートシンクとをろう付けにより一体化させており，高い放熱性能が得られることが最大の特徴となっている¹⁾。また，使用部材の減少やモジュールの小型化，軽量化が図られるとともに，信頼性の点においても一体型構造は更なる高耐熱化に対応可能とされている。このような背景のもと，DBA 基板とヒートシンクとを一体化した製品について，接合方法や，材料物性に着目した構造検討内容を本稿で紹介する。

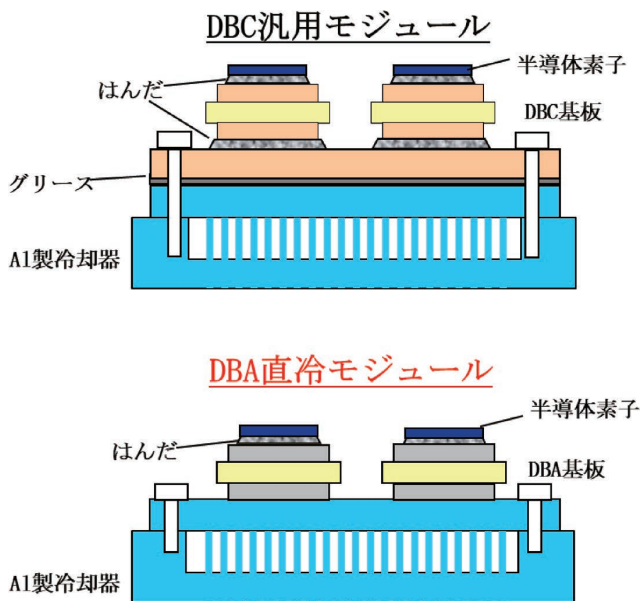


図 1 パワーモジュールの放熱構造
Heat dissipation structure of power module

2. 一体型基板構造とその課題

DBA 基板と Al 合金製ヒートシンクとを一体化した構造において，懸念となる項目が下記となる。

2.1 接合技術

Al 回路材とセラミックスとを接合する 1 次接合工程と，1 次接合工程で製造された DBA 基板と Al 合金系ヒートシンクとを接合する 2 次接合工程と，2 回の接合工程を必要とし，また，ヒートシンクとの接合であるがゆえに，大面積にも適用可能な接合方法が必要とされる。

2.2 反り低減

一体型 DBA 基板の反り発生の要因を図 2 で示す。DBA 基板とヒートシンクとを一体化した構造において，反り発現の主要因は，構成部材の線膨張係数 (Coefficient of Thermal Expansion: 以下, CTE) 差である。DBA 基板の回路層材質である高純度アルミニウムは歪みやすく，セ

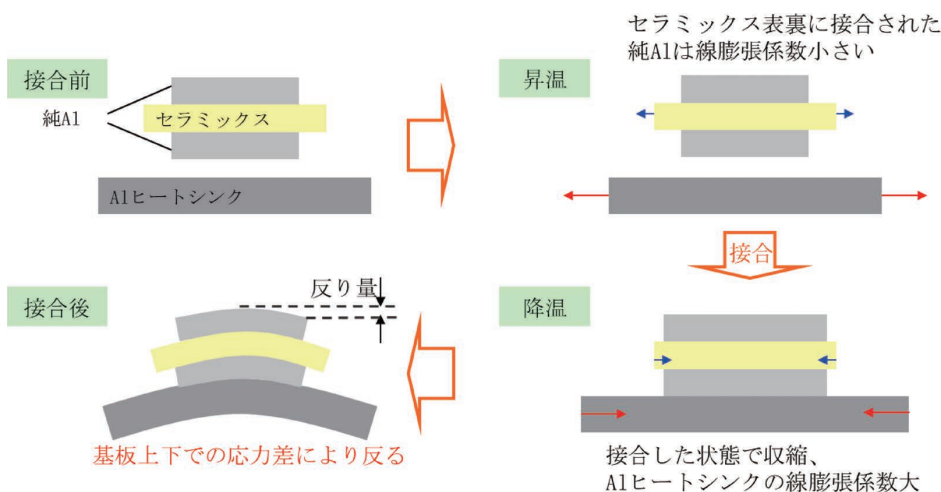


図2 反り発現の模式図
Schematic diagram of warpage development

ラミックスと接合され拘束された状態では、セラミックス単体のCTEにはほぼ近くなる。そのため、接合界面の凝固後冷却が開始し各部材が収縮していく際には、DBA基板とAl合金製ヒートシンクのCTEには大きな差異があり、CTEの大きいヒートシンク側の収縮力が大きくなり、上側凸形状の反りが発生することとなる。このような反りの発生は、実装工程を始めとしたはんだ付け等の実装工程での組立性や、熱抵抗や信頼性などの長期的な製品性能に大きく影響を与えることが知られており、この反りに対する設計が大きな課題となっている。

2.3 高信頼性化

図3に回路層の材料を変えた絶縁基板のCTE実測結果を示す。青線で示す高純度アルミニウムと窒化アルミ基板を貼り合わせた際のCTEは、緑線で示す窒化アルミ基板単体とほぼ同程度であり、窒化アルミ基板に対して高純度アルミニウムが歪みやすいことが示唆される。この回路層材質によるセラミックスに対する拘束の差が、高純度アルミニウムを用いるDBA基板の高信頼性に繋がっていると考えられている。一方で、高純度アルミニウムを回路層に用いるため、温度変化を与えた際の表面変形が進みやすく、素子のはんだ付け部との信頼性低下に繋がることが課題となっている。また、絶縁基板のCTEという観点からは、素子や、封止材、冷却器といった種々顧客設計に関わる部材も含めての最適化の考え方も必要となっている。

3. 新規接合技術の適用

Al材の接合についてはさまざまなろう付け法によるろう付け製品が製造されているが、従来技術の適用には課題がある。高真空雰囲気下での真空ろう付け法では、設備や生産性、また加熱効率からも量産性には難点がある。窒素雰囲気下でのノコロックろう付け法では、フラックス

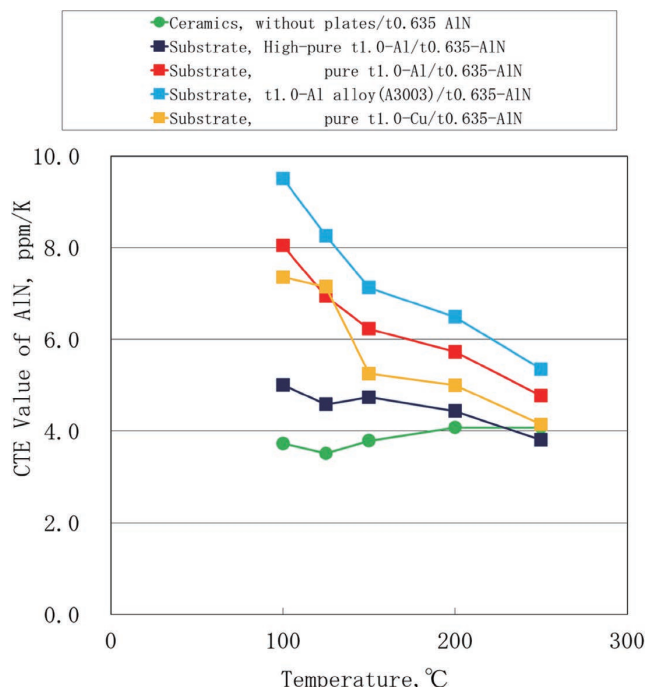


図3 絶縁基板の線膨張係数測定結果
Measurement results of thermal expansion coefficient of substrate

スを用いてAl酸化被膜の除去がなされることでろう付けされるが、一部Al合金系には使用できない難点や、フラックス成分がセラミックス界面を侵食し良好な信頼性が得られないという課題もある。

そこで、量産適用可能な技術として、フラックスフリーろう付け技術の一体型基板への適用を検討した。フラックスフリーろう付けは低酸化性雰囲気下において、酸素との親和性がAlより高いX元素が接合界面に存在することで、Al酸化被膜とスピネル相が形成される。この反応によりAl表面が還元状態となり、フラックスを用いることなく接合が可能となっている^{2,3)}。一方で、従

来の接合技術と比べて、溶融ろうの濡れ性および隙間充填性が低いことが課題となる。比較的難易度の高い接合技術ではあるが、ろう付け面の形状に対しては平面同士の接合を前提とし、熱処理雰囲気酸素濃度を極めて低くすることでX元素の酸化物生成を抑制するといった条件適正化によりフラックスフリーろう付けの適用を可能とした。

4. 反り適正化

異種材料積層体の反りの曲率半径Rは、セラミックス層aと金属層bにおけるそれぞれのヤング率を E_a 、 E_b 、断面二次モーメントを I_a 、 I_b 、曲げモーメントを M_a 、 M_b とした際に、(1)式で与えられる⁴⁾。

$$R = \frac{E_a I_a + E_b I_b}{M_a - M_b} \quad (1)$$

反りを低減、すなわちこの曲率半径Rを無限に大きくするためには、二つのアプローチがあることが分かる。

- ① (1)式の分子を大きくすること＝硬い部材や厚い部材を用いることで剛性を高めること
- ② (1)式の分母を小さくすること＝中立軸を調整し対称的な構造をとること

この二つのアプローチに対して、考えられる構造案とその評価結果を示したのが図5となる。①のアプローチを基に検討したヒートシンクの剛性を高める構造Aではヒートシンクからの応力による反りの低減には全体的な

厚さを考慮すると限界があり⁵⁾、全体を高強度化した構造Bも信頼性の点で問題があった。②のアプローチを基に検討した構造Cでは、低CTE材を使用することで全体のCTE差を調整することが有意ではあったが、特殊材が必要となりその形状制約から汎用構造化が困難であった。回路層の純Alを極限まで厚くした構造Dにおいては、歪やすい純Alをどれ程厚くしても十分な反り低減効果が得られなかった。唯一、構造Eが、信頼性を確保しながら、反り低減可能性があることが実験的に確かめられた。本構造は、セラミックスを中立軸として、高強度材が用いられるヒートシンク側との対称的な構造となるように、回路層純Al上面の上面にも高強度Al合金材を使用し、複層化した構造である。

この複層化の考えをもとに、反り低減可能な構造について検討を進めた。曲げモーメント差を調整するという考えから、セラミックスの上方側材料からの曲げモーメント M_1 と下方側材料からの曲げモーメント M_2 を近づける構造を狙うこととした。曲げモーメントMの定義、熱応力、熱歪みの関係式から、セラミックスを中立軸とした上下それぞれからの曲げモーメントは、(2)式で与えられる。

$$M_1 = \alpha_1 \times E_1 \times A_1 \times t_1 \times \Delta T, \quad M_2 = \alpha_2 \times E_2 \times A_2 \times t_2 \times \Delta T \quad (2)$$

ここで上下それぞれの材料における、 α はCTE、Eはヤング率、Aは接合面積、tは板厚となる。すなわち、先に

ろう付け方法	Al酸化膜除去方法	課題
高真空ろう付け法	熱膨張と、Mgの蒸発による	生産性、耐食性
ノコロックろう付け法	フラックスの溶融、拡散による	フラックス残渣
フラックスフリーろう付け法	X添加元素による還元反応利用	ろう流動性

図4 アルミヒートシンクとの接合法
Bonding method with aluminum heat sinks

対策	対策方針	初期反り	加熱時反り	信頼性	汎用材化	検討結果
A 当社従来構造	絶縁基板 (SiAlN) ヒートシンク (Al合金)	①	△	×	○	加熱時反り大
B Al高強度化	絶縁基板 (Al合金/SiN) ヒートシンク (Al合金)	①	○	○	×	セラミックス割れ
C 低線膨張材使用	絶縁基板 (SiAlN) ヒートシンク (低線膨張材)	②	○	○	○	特殊材必要
D 回路層板厚増	絶縁基板 (SiAlN) ヒートシンク (Al合金)	②	×	×	△	反り抑制効果無
E 回路層複層化	回路層 (Al合金) 絶縁基板 (SiAlN/SiN) ヒートシンク (Al合金)	②	○	△~○	△~○	適正化により解あり

図5 反り低減構造案
Evaluation structure for warpage reduction

述べた、 M_1 と M_2 を近づけることは、 $M_1/M_2=1$ に近づけた構造であり、極論、セラミックスを対称として、表裏に同じ物性、同じ体積の材料を接合することで、反り低減可能な構造といえる。上記考え方で、純 Al とセラミックスからなる DBA 基板上下に同種材料の板厚を調整して接合することで反りを抑制可能とした。

さらに、顧客素子はんだ付け工程を想定した加熱時に、構造の非対称性によりヒートシンク側応力起因で生じる加熱時の反りについては、この M_1/M_2 の値を調整し実験的に最適化を図った。図 6 に代表例で示すように、ろう付け相当熱履歴を加えた各 Al 合金の高温引張試験を実施、その物性値変化を確認した。その結果から、温度変化を与えた際の加熱時反り変形を抑制するために、ヒートシンク側合金 A より温度上昇による物性変化の小さい合金 B を回路層側に適用することが有効であることが確かめられた。図 7 は M_1/M_2 の値による加熱時反り変化量をプロットしたグラフであり、このように材料の加熱時の物性変化に着目することで、反り低減可能な適正構造を確立することができた。

5. ニーズにあわせた一体型構造

先述したとおり、DBA 基板とヒートシンクとの一体型構造において、顧客実装性を考慮した製品設計を進めてきた。図 8 に各構造の特性を比較した表を示す。信頼性については、低温槽 -40°C と高温槽 150°C の繰り返し冷熱サイクル後の界面剥離やセラミックス破壊の有無を、熱抵抗については発熱量を固定した際の伝熱計算から得られた最大ジャンクション温度を、回路層表面粗さについてはヒートショック試験後の Ra 実測値を、回路層 CTE については室温から 150°C までの CTE 実測値を、それぞれ記している。

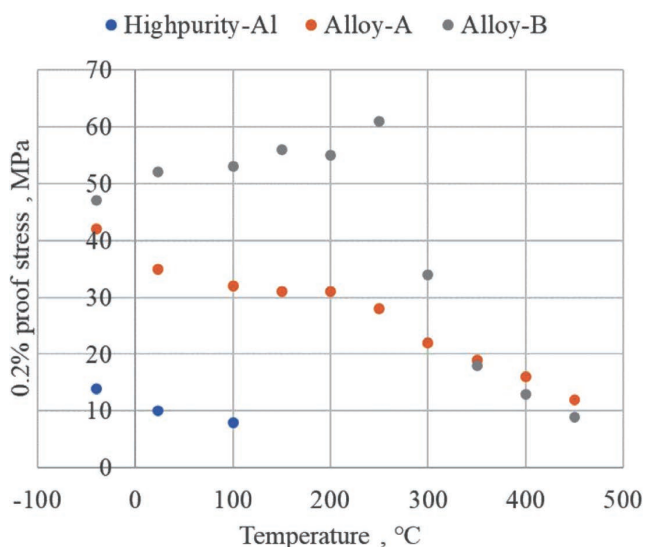


図 6 Al 合金の各温度における引張試験結果
Tensile test results of Al alloys at various temperatures

Type.1 の当社の従来一体型構造においては、ヒートシンクからの応力による反り変化が大きく顧客実装工程に適合しなかった。Type.2 の反り低減構造においては、対称的な構造を採用することで反りを抑制しつつ、熱抵抗を低減し、回路層変形による実装された半導体素子への応力負荷抑制が可能である。また、この構造では、回路層 CTE が大きくなる結果が得られた。近年、パワーモジュールの更なる信頼性向上ニーズより、従来のシリコンゲル封止に代わって、エポキシ樹脂による封止が採用されてきている。回路材 CTE に近いエポキシ樹脂を採用して、封止することにより、半導体素子を含めた信頼性向上が可能となった。また、締結する冷却器筐体については、一般的には CTE の大きい Al 合金系が使用され、回路材 CTE が大きくなることで冷却器との CTE 差が抑制され、応力低減が図られた。これらの点で、従来構造と比較して、Type.2 の構造では、封止材および冷却機双方との CTE 差による破壊を回避可能な構造となっている。これらの特性により Type.2 の構造において、反りを顧客要求範囲に抑制しつつ、信頼性を含めた要求性能を満足可能な構造となり、量産採用に結び付いた。

さらに、Cu と Al の固相拡散技術により、Type.3 のような Cu を回路層およびヒートシンクに採用した一体型構造も実現可能となっており、対称構造に近づけることで反りの課題を解決しながら、より放熱性能を向上させた一体型構造が提供可能となっている。

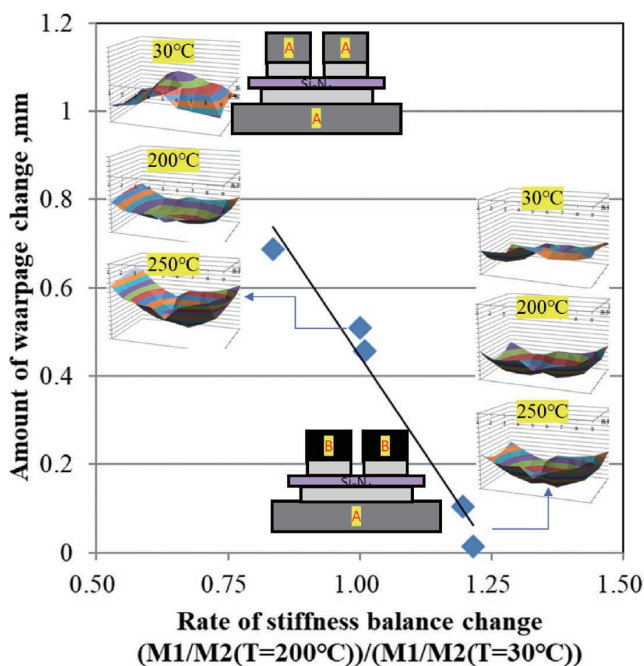


図 7 対称構造の加熱時反り変化量比較結果
Comparison of warpage change during heating of symmetrical structures

	Type.0 DBC汎用構造	Type.1 当社従来構造	Type.2 反り低減構造	Type.3 Cu回路反り低減構造
信頼性 TST -40/150°C	×	○	○	○
熱抵抗 Sim.	× Tjmax=208°C	○ Tjmax=171°C	○ Tjmax=170°C	○ Tjmax=162°C
回路層表面粗さ After TST	○ Ra <0.8	× Ra >25	○ Ra <0.8	○ Ra <0.8
回路層CTE @150°C	6~8ppm/K	4~6ppm/K	10~15ppm/K	10~15ppm/K

図 8 一体型基板構造比較
Comparison of integrated substrate structure

6. おわりに

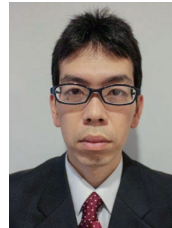
多種多様な異種材料の組合せに対し、材料物性を適材適所化させた構造を採用することで、各要求特性を満足する一体型構造を確立、量産化実現に結び付けた。今後ますます需要の高まる車載用途での展開に向けて、応用並びに改良可能な構造であり、更なる高付加価値な技術と位置付けている。

文 献

- 1) 日達貴久, 郷原広道, 長畦文男, 富士時報, **84**, 208-312 (2011).
- 2) 野村祐司, 池田明夏里, 大陽日酸技報, No. 30,

43-44 (2011).

- 3) 三宅秀幸, 江戸正和, 軽金属, **65**, 396-402 (2015).
- 4) 森 寛爾, 館 和幸, 色材, No. 70, 227-234 (1997).
- 5) 石塚博弥, 三菱マテリアル中央研究所 R & D レビュー, No. 3, 23-27 (2014).



大開 智哉 Tomoya OHIRAKI
界面接合領域