

パワーモジュール用アルミ一体型基板の開発

小山内英世¹⁾ 結城 整哉²⁾ 井手口 悟³⁾ 菅原 章^{**}

1. はじめに

近年、電気エネルギーを高効率で変換するインバータやコンバータの使用量が省エネルギー目的で増えている。

インバータやコンバータには民生用途から産業、電鉄、自動車用途に幅広く使われており、産業、電鉄、自動車用途にはパワーモジュールと呼ばれるケース型の半導体パッケージが使われている。

パワーモジュールは図1に示すように半導体素子の他に金属-セラミックス基板、ベース板等から構成され、これらは半田で接合され、さらにアルミワイヤーや銅のバスバー電極で結線され、シリコンゲル、ケースで封止される。

パワーモジュール運転時は、半導体素子のスイッチング時に損失する電気エネルギーが、熱エネルギーとして放出されるため、素子の保護を目的とし、熱を逃がす必要がある。そのため、各部材は熱伝導率の高い材料が好ましく、回路基板としては金属-セラミックス基板が使われている。また従来のパワーモジュールは素子、金属-セラミックス基板、ベース板と多種の材料が半田で接合された構造となっており、半田材料は熱伝導率が高くないことや、組み立てが複雑でかつ接合界面が多いことから、構造のシンプル化や半田を使わない構造のニーズが高い。さらに素子製造技術やゲート電極構造の進化による高集積化が多数報告されており、この面でもパ

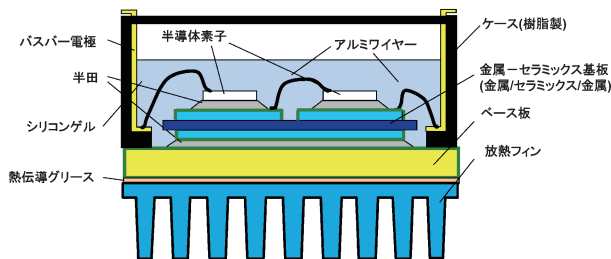


図1 パワーモジュール断面構造模式図。

* DOWA パワーデバイス株式会社：1)取締役開発部長 2)開発部新規開発課リーダー 3)開発部プロセス開発課長

** DOWA メタルテック株式会社代表取締役社長
Development of Aluminum Integrated Substrates for Power Modules; Hideyo Osanai*, Seiya Yuki*, Satoru Ideguchi* and Akira Sugawara** (*DOWA POWERDEVICE Co., Ltd. **DOWA METALTECH Co., Ltd.)

2016年9月12日受理[doi:10.2320/materia.56.24]

ッケージの放熱性向上のニーズは大きい⁽¹⁾⁽²⁾。

筆者らは、これらを鑑み、金属-セラミック基板とベース板の一体構造化について、基板の材料、接合方法および接合体の構造を検討し、アルミ一体型基板を開発した。

2. 材料、接合方法の選定

絶縁材には一般的に樹脂やゴム、セラミックスといった材料があるが、熱伝導率の観点からセラミックスが好ましく、アルミナ、窒化アルミニウム、窒化珪素などが一般的に使用されている。表1にその代表的な特性を示す。

一方で、電気回路はコスト面や電気伝導率の面から銅やアルミニウムを使うのが一般的であるが、前述のセラミックスとこれら金属を接合させた場合、線膨張係数のミスマッチが課題となる。表2に金属およびセラミックスの代表特性を示す。

接合した材料間に線膨張係数差があると、パワーモジュールを運転して素子が発熱した場合、接合体には線膨張係数差起因による応力が発生し、剥離や反り変形が起こる可能性がある。接合させないという選択肢もあるが、セラミックスと金属材料を接触させた場合、微小な空隙が生じると放電の発生や熱伝達のロスの問題があり、基本的には接合させた方が好ましい。

表1 各セラミックスの代表特性。

	熱伝導率 (W/m·K)	曲げ強度 (MPa)	絶縁耐圧 (kV/mm)	価格
アルミナ	24	400	23	安価
窒化アルミニウム	170	550	23	やや高価
窒化珪素	90	650	20	やや高価

表2 金属およびセラミックスの代表特性。

	熱伝導率(W/m·K)	線膨張係数(10 ⁻⁶ /K)
銅(99.9%)	397	17
アルミニウム(99.9%)	238	24
アルミナ	24	6~8
窒化アルミニウム	170	4~5
窒化珪素	90	2~3

表3 金属およびセラミックスの代表的接合方法.

	接合対象	接合温度	接合強度
DBC法	銅とアルミナ	1,000~1,100°C	△
AMB法	銅と窒化物セラミックス	750~850°C	○
アルミ溶湯接合法	アルミニウムと各セラミックス	700~800°C	◎

表4 各接合体のピール強度.

接合体	接合方法	ピール強度(N/cm)
銅とアルミナ	DBC法	100~150
銅と窒化アルミニウム	AMB法	150~200
アルミニウムと窒化アルミニウム	アルミ溶湯接合法	300~350

次に前述のセラミックスと金属の接合方法であるが、一般的にDBC(Direct Bonding of Copper)法, AMB(Active Metal Brazing)法, アルミ溶湯接合法などがある. その特徴を表3に示す.

DBC法は銅とアルミナの直接接合法であり, 最も古くから使用されてきた接合方法である. 簡便であるが相対的に接合強度が弱く, また接合温度が高いため, 接合体への残留応力が残りやすい.

AMB法は銅と窒化物セラミックスを活性金属を含むろう材で接合する方法である. ろう材を使うことで接合強度が比較的高いが, ろう材の主成分に銀が使われること, ろう材をハンドリングする工程が必要など, DBC法に比べコストが高い.

アルミ溶湯法は著者らが独自に量産技術を開発してきた方法⁽³⁾で, 雰囲気中で加熱した鋳型にアルミニウムの溶湯を流し込み, 接合と鋳造を同時に行う方法であり, コストが低い. また本方法は接合強度が非常に高く, 接合ポイドができてにくい特徴がある. ここで著者らが各方法で接合した接合体についてピール強度試験を実施した結果を表4に示す.

アルミ溶湯法で接合したアルミニウムと窒化アルミニウム接合体のピール強度が最も大きい値であった. これはアルミ溶湯法の接合プロセスがセラミックス表面をアルミ溶湯で徐々に濡らしていく形をとっており, 他方法に比べ接合ポイドが生じにくいからである.

前述した各材料, 接合方法を比較検討し, 一体型基板に最適なものとしてアルミ溶湯接合法を選択した. 理由は, (1)もっとも接合強度が高い(接合欠陥ができてにくい), (2)鋳造法の一つであり, 複雑な形状をつくることのできることにある.

3. 構造の検討

金属-セラミック基板とベース板を一体構造化した接合体の構造について検討した. 材料としてはアルミ溶湯法を用いることから, 金属としてはアルミニウム(純度99.9%), セラミックとしては表1に示した熱伝導率と強度のバランスから窒化アルミニウムを選択した. これらの一体構造化を検討するために, アルミベースの片面にセラミック一枚を接

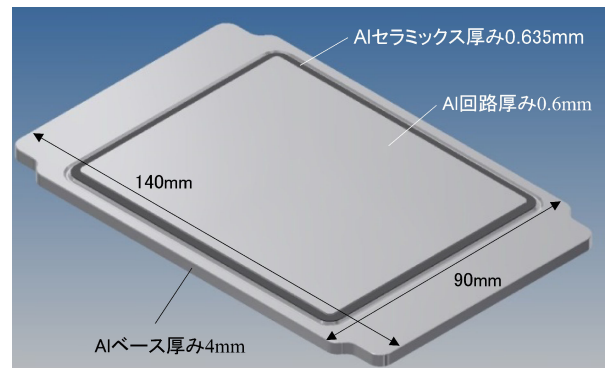


図2 アルミ一体型基板(セラミック一枚)解析モデル.

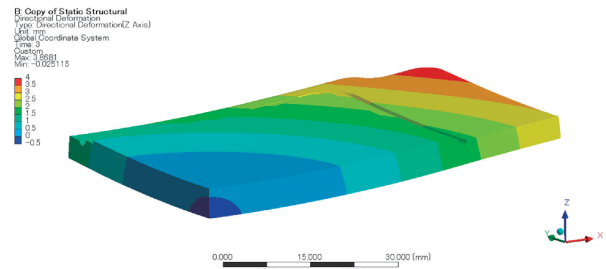


図3(a) 270°C加熱時のZ方向変位コンター図(1/4モデル).

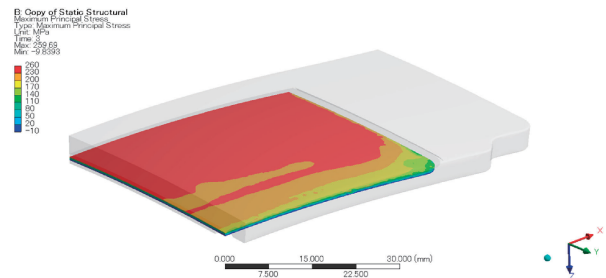


図3(b) 270°C加熱時のセラミック裏面への応力コンター図(1/4モデル).

合した構造の接合体とアルミベースの両面にセラミック二枚を接合した構造体を考案し, 以下の方法で比較検討した. パワーモジュール組立時にかかる最大温度を270°Cと想定し, 有限要素法を用いて270°Cで発生する反り変形量およびセラミックにかかる最大主応力を弾塑性解析した. 解析領域は1/4とし, アンシス社メカニカルを使用した. 前者の解析モデルを図2に示す.

図3に解析結果を示す. セラミックに発生する最大主応力は約260MPaで比較的小さいが, 反り変形量は約4mmと大きな値を示した.

前述の計算結果を実証するために接合体を作成して加熱評価を行った. 加熱中の反り量はほぼ計算結果と同等であった. 以上からこの構造では加熱時に反り変形が大きく発生し, 組み立てが困難なため, 製品として成り立たないことがわかった.

後者は加熱時の反りを抑えることを目的とし, 厚み方向に材料構成が対称になるようセラミックを二枚使った新構造を考案した. この構造の解析モデルを図4に示す. このモデルについても270°Cで発生する反りおよびセラミックにか

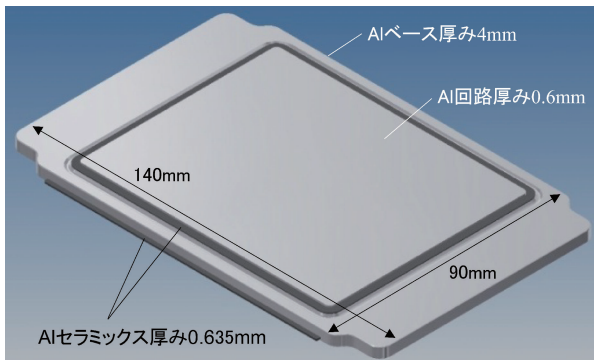


図4 アルミー一体型基板(セラミックス二枚)解析モデル.

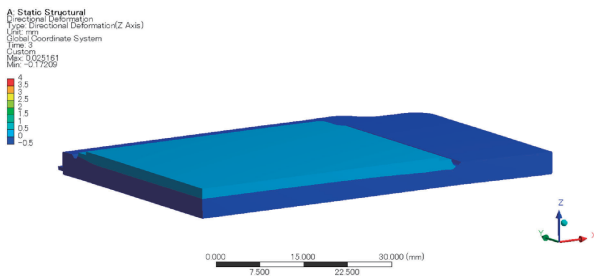


図5(a) 270°C加熱時のZ方向変位コンター図(1/4モデル).

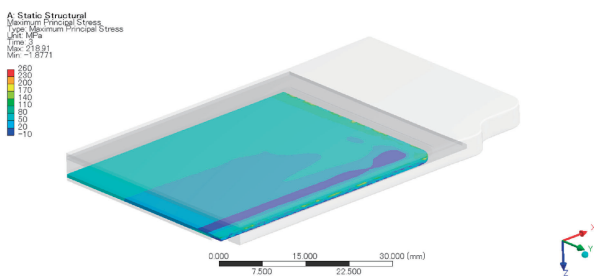


図5(b) 270°C加熱時のセラミックス裏面への応力コンター図(1/4モデル).

かる最大主応力を弾塑性解析した結果を図5に示す。

セラミックスを二枚使用した構造では、反りはセラミックス一枚の構造と比べ大幅に小さく、ほぼフラットを維持し、かつセラミックスに発生する最大主応力も1/3以下の約80MPaになることがわかった。

この結果を実証するため、図6に示す接合体を作成し加熱評価を行った(n=6)。加熱中の反り量は計算結果とほぼ同等で、十分に実用に耐えるものであることがわかった。

4. 信頼性評価

前章で検討したセラミックスを二枚使用した構造の接合体の信頼性の評価を実施した(n=6)。加熱評価したサンプルを低温側-40°C、高温側150°Cの液槽ヒートショック1,000サイクルの試験に供した。試験後に、セラミックスのクラックや接合界面の剥離の有無を観察した。図7に結果の一例を示す。

ヒートショック試験1,000サイクル経過後でも6サンプルともにセラミックスのクラック発生はなく、接合界面での剥離も見られなかった。セラミックスを二枚使用した接合体は

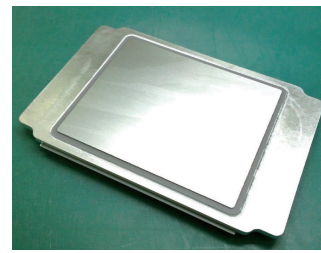


図6 実際の接合体写真.

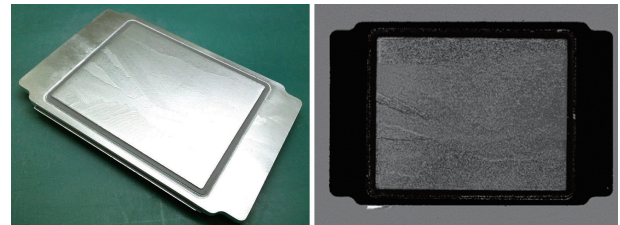


図7 (左)試験後の外観、(右)同、接合界面の超音波探傷像.

十分な信頼性を有すると結論づけられる結果であった。

従来技術では一体構造化も達成されておらず、本報告で示したような大面積のセラミック基板もセラミックスのクラックや半田接合部のクラックの問題で使用できなかった。本技術で開発した接合体は、一体構造化だけでなく、大型のセラミックスを使用できる画期的製品であることが確認された。

5. 結 言

著者らはこれまで成し遂げられていなかった金属-セラミックス基板とベース板の一体構造化に成功した。接合には接合強度が高く、接合欠陥が起きにくいアルミ溶湯接合法を適用し、厚み方向に材料構成が対称になるようセラミックスを二枚使った構造を考案、採用することで、一体構造化を困難としていた材料の線膨張係数差起因による反り変形を抑制しつつ、長期ヒートサイクル経過後も接合界面に剥離が起らないアルミー一体型基板を実現した。

この技術の確立により、大面積の半田接合をなくし、信頼性の大幅な向上とともに、銅を使用しないことで約60%の軽量化、大型基板使用での回路集積化による低コスト化を達成した。本製品はこれまで新エネルギー用途を中心に約10万台の出荷実績があり、関連する特許も国内49件、海外16件権利化されている⁽⁴⁾。またさらに本基板、本技術に改良を加え、EV、HEV等の自動車用途への展開を検討中で、パワーデバイス産業の発展にさらに貢献できるものと考えている。

文 献

- (1) K. Takahashi, S. Yoshiwatari and Y. Sekino: FUJI ELECTRIC REVIEW, **56**(2010), 56-59.
- (2) M. Sawada, S. Yoshiwatari, H. Ichikawa, Y. Onozawa, O. Ikawa and T. Heinzl: PCIM Europe Proceedings, (2016), 824-830.
- (3) 高橋貴幸, 中村潤二, 沢辺明朗, 小山内英世, 菅原 章: Journal of MMIJ, **124**(2008), 333-336.
- (4) 例えば: 小山内英世, 風呂正博: 金属セラミックス回路基板, 特許第4756200号, (2011).