

# パワーモジュールの性能向上を支えるパッケージ技術

平松健司\*  
Kenji Hiramatsu  
中島 泰\*  
Dai Nakajima

Packaging Technologies to Improve Power Module Performance

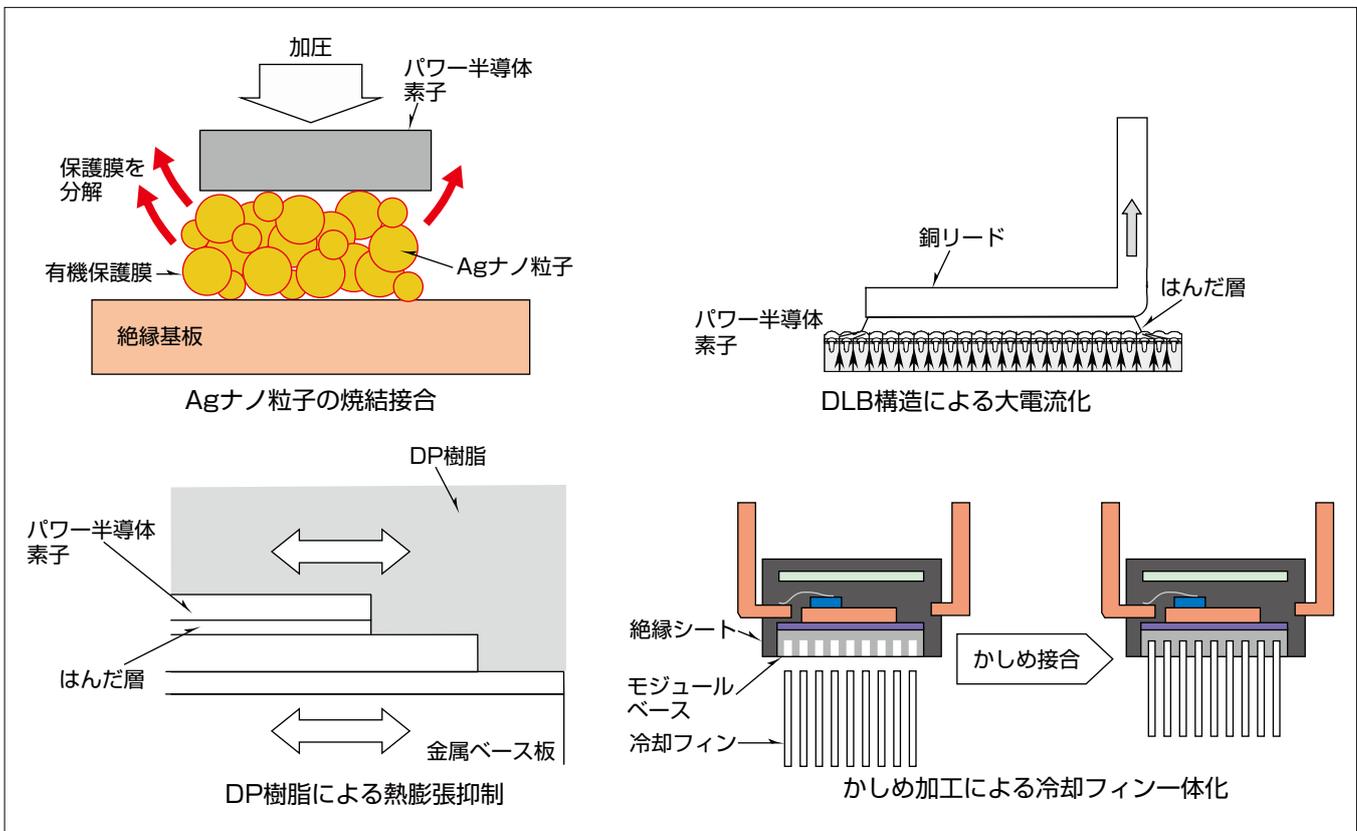
## 要 旨

持続可能な社会の実現に向けて温室効果ガスの発生を削減するために、化石燃料使用の抑制や再生可能エネルギー利用の拡大が求められている。これらを実現するためには、電力を効率よく変換する高度なパワーエレクトロニクス技術が不可欠である。三菱電機は家電、自動車用、電鉄、発電・変電、産業向け機器などの各分野で、パワーエレクトロニクス技術を応用した省エネルギー化に資する事業を推進している。

パワーエレクトロニクス機器に搭載されるパワーモジュールは電力変換を行うパワー半導体素子をパッケージ化した電子部品であり、数十～数千Aの電流を通電する機能がある。パワーモジュールには、高電流密度化、高電圧・大電

流化及び高温動作化に加えて高信頼化などの性能向上が求められている。

当社はこれまでにシリコン(Si)基板を用いたパワー半導体素子を継続的に進化させてきたが、更なる低損失化のためにシリコンカーバイド(SiC)基板を用いた製品を実用化した。これらのパワー半導体素子の進化に対応して、銀(Ag)ナノ粒子の焼結接合による高耐熱化、ダイレクトリードボンディング(DLB)による大電流化、硬質樹脂封止による高信頼化、ヒートシンク一体構造による高放熱化などのパッケージ技術の開発によって、パワーモジュールを小型・軽量化、高信頼化など高性能化させて、社会の要請に応え続けている。



## パワーモジュールの性能と信頼性の向上を支える当社のパッケージ技術の開発事例

パワーモジュールに求められる高電流密度化、高電圧・大電流化、高温動作化、高信頼化などの性能向上に対して、ナノAg焼結接合によるチップ接合の高耐熱化、DLB構造による内部配線の大電流化、DP(Direct Potting)樹脂封止による高信頼化、冷却フィン一体化による高放熱化などを実現してきた。持続可能な社会の実現に貢献するためにパワーモジュールのパッケージ技術を進化させ続ける。

## 1. ま え が き

気候変動及びその影響の軽減を目的としてCO<sub>2</sub>排出量の削減が求められている。太陽光や風力などの再生可能エネルギーによる発電や、自動車の電動化など、CO<sub>2</sub>排出量削減に有効な技術がパワーエレクトロニクスである。身近なところではエアコンや冷蔵庫などのヒートポンプをインバータ制御して省エネルギーを実現している。これらに用いるキーパーツが、電力を効率よく変換するパワーモジュールである。パワーモジュールは複数のパワー半導体素子を組み合わせた電力変換回路を一つのパッケージに収めた電子部品である。

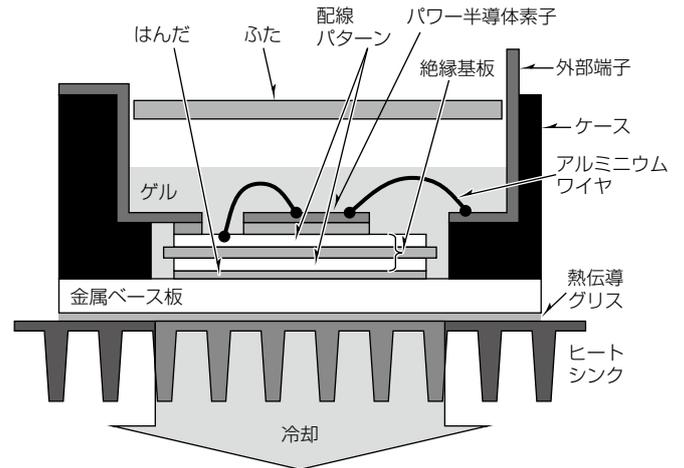
当社では、Si素材に加えて、SiC素材のパワー半導体素子を搭載した製品をラインアップしてきた<sup>(1)</sup>。低損失化や小型・軽量化、長寿命化などの要求に応えるため、パワー半導体素子の更なる損失改善や高耐電圧チップの開発を進めると同時に、パワー半導体素子の性能を最大限に引き出すパッケージ技術の開発に継続的に取り組んでいる。

本稿では、パワーモジュールの性能と信頼性の向上を支える当社のパッケージ技術の開発事例を述べる。

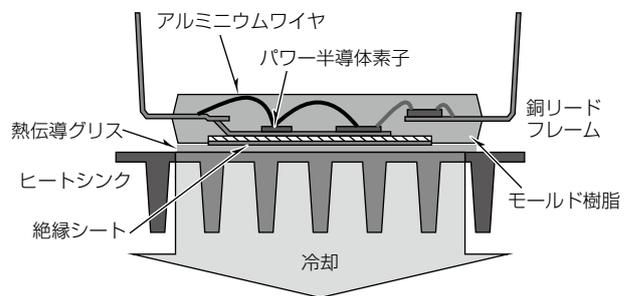
## 2. パワーモジュールのパッケージ構造

パワー半導体素子を直接装置に組み込んで使用できないため、パッケージ化する必要がある。図1に当社の代表的なパワーモジュールのパッケージ構造を示す。ケース型パッケージは主に大電流や高電圧の産業機器に用いられる。金属ベース板の上にパワー半導体素子と絶縁基板をはんだで接合した積層構造になっている。パワー半導体素子と絶縁基板の回路電極やケースに内蔵された外部端子とはアルミワイヤで接続されている。ケースの内側はシリコンゲルで封止して外部環境からの保護と回路間の絶縁の役割を果たしている。熱伝導グリスを介してヒートシンクに固定され、パワー半導体素子で発生した熱は、はんだから、絶縁基板、金属ベース板、熱伝導グリスを経てヒートシンクから外部へ放出される。一方のモールド型パッケージは、銅リードフレームにはんだ接合したパワー半導体素子にアルミワイヤで配線し、絶縁シートと一体に重ねてモールド樹脂で絶縁封止した構造になっている。ケース型パッケージと同様に、パワー半導体素子で発生した熱は、はんだから、銅リードフレーム、絶縁シート、熱伝導グリスを経てヒートシンクから外部へ放出される。こちらはトランスファー成形を用いて量産され、主として比較的小電流の家電機器に用いられる。

差異はあるものの、パワー半導体素子を絶縁基板又は銅



(a) ケース型パッケージ



(b) モールド型パッケージ

図1. パワーモジュールのパッケージ構造

リードフレームに接合し、回路電極や外部端子と配線し、それを絶縁材料で封止すること、パワー半導体素子で発生した熱を外部へと放出する経路を形成する点が共通する。すなわち、チップ接合技術、内部配線技術、封止技術、放熱構造の形成技術、これら四つの技術がパワーモジュールに欠かすことのできないパッケージ技術である。

## 3. パワーモジュールのパッケージ技術

パワーモジュールのパッケージ技術は、高電流密度化(低熱抵抗)、高電圧・大電流化(高耐電圧)及び高温動作化(高耐熱)に加えて高信頼化(長寿命)の開発が中心になる。

### 3.1 チップ接合技術

パワー半導体素子と絶縁基板やリードフレームの接合部には高い熱伝導性と耐熱性が求められる。鉛(Pb)の使用を制限する環境規制にのっとり、当社では主に錫(すず)(Sn)合金系はんだ材料を使用している。接合部の疲労破壊寿命の向上のため、高耐熱のはんだ材<sup>(2)</sup>や、後述する封止技術による熱応力の抑制技術<sup>(3)</sup>を適用し、高耐熱や長寿命を実現している。

更なる高耐熱化のためにAgナノ粒子の低温焼結性を用いたチップ接合技術を開発している<sup>(4)</sup>。図2にAgナノ粒

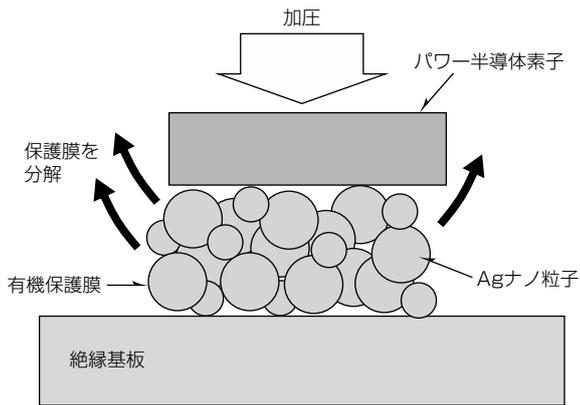


図2. Agナノ粒子の焼結接合の概念図

子の焼結接合の概念を示す。有機保護膜に覆われたAgナノ粒子と溶剤で構成されたペーストを絶縁基板に塗布し、その上にパワー半導体素子を搭載し、加熱・加圧して接合する。加熱によって溶剤を揮発させ、有機保護膜を熱分解させると、Agナノ粒子が互いに接触し、微細粒子の表面エネルギーを駆動力としてAg粒子同士が焼結し、接合層が得られる。ナノサイズのAg粒子を適用するため、従来のSn合金系はんだと同程度の加熱温度で接合可能であり、900℃以上の融点を持つチップ接合部を得られた。また、従来のSn合金系はんだに比べて約5倍の通電サイクル寿命を示し、はんだ接合部で生じた網目状の亀裂もナノAg焼結接合部では認められなかった。このナノAg焼結接合部をパワー半導体素子の動作温度が175℃になる高温動作パワーモジュール<sup>(2)</sup>のほか、自動車用パワーユニット4GL-IPU (Intelligent Power Unit)のパワーモジュール<sup>(5)</sup>に適用し、チップ接合部の熱抵抗の低減を実現した。

### 3.2 内部配線技術

内部配線には大電流化と長寿命化が求められる。当社ではアルミワイヤを用いたワイヤボンド(W/B)を多くの製品に適用している。高電流密度化や長寿命化のため、より高強度なアルミ合金ワイヤや銅ワイヤの適用に取り組んでいる<sup>(6)</sup>。

従来のワイヤ配線に加えて、銅リードをパワー半導体素子の表面にはんだで接合するDLB技術を開発した<sup>(7)</sup>。図3に従来のW/B構造とDLB構造を示す。W/B構造ではパ

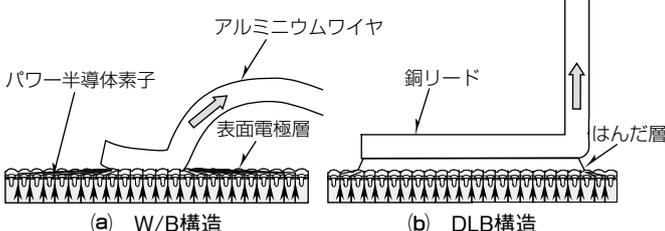


図3. W/B構造とDLB構造

ワー半導体素子の表面の薄い電極層の面内方向が電流経路になる。一方、DLB構造では電流経路が電極層の厚さ方向に短縮され、かつ、接合面積を大きくできることで電流分布が均一化される。これによって、電気抵抗が低減し、大電流化が容易になった。また、電流分布の均一化によって通電発熱による温度分布もW/B構造に比べてDLB構造では広がり、平坦になる。従来のW/B構造では熱応力の繰り返しによるアルミワイヤの疲労破壊が主な故障モードであり、寿命設計の支配因子になるが、DLB構造のはんだ接合部は比較的低温に抑制されるので疲労破壊の起点になる亀裂が進展しにくく、通電サイクル寿命を向上させることができる。DLB構造を採用したトランスファーモールド型パワーモジュールT-PM(Transfer molded-Power Module)を業界で初めて<sup>(註1)</sup>HEV(Hybrid Electric Vehicle)に供給して以降、自動車用パワーモジュール“J1シリーズ”へ適用を拡大した<sup>(8)</sup>。

(注1) 2011年4月7日現在、当社調べ

### 3.3 封止技術

封止材料は発熱源のパワー半導体素子と直接接するため、耐熱性と回路間の絶縁を確保する密着性が求められる。

SiC素子による高温動作化を見据えて最大接合部温度(Tj) > 200℃達成のために、当社ではモールド型パッケージ技術で培った硬質の熱硬化性樹脂による封止技術をケース型パッケージに応用したDP封止技術を開発した<sup>(9)</sup>。すなわち、固体状から一旦加熱軟化させた熱硬化性樹脂を金型へ圧入するトランスファー成形に対して、液状の熱硬化性樹脂をケースの内側へ注入して封止するものである。エポキシ系樹脂を適用することで200℃を超える耐熱性を得ることが可能になった。また、セラミックスフィラーや添加剤を調整することによって、密着性を高め、パワー半導体素子や絶縁基板と熱膨張率を合わせてチップ接合部に生じる熱応力を低減することで疲労破壊の起点になる亀裂進展を抑制し、温度サイクル寿命を向上させた。図4にDP樹脂による熱膨張抑制の概念を示す。さらに、構成材料の熱膨張率差によって生じるパワーモジュールの反りを抑制

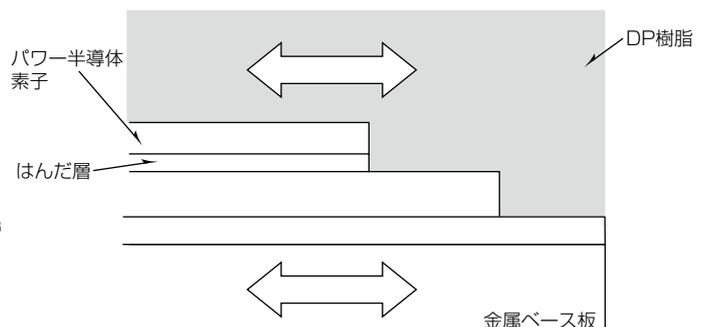


図4. DP樹脂による熱膨張抑制の概念図

し、ヒートシンクとの間の熱伝導グリスが押し出される現象(ポンプアウト)の防止にも効果をもたらす。産業機器用IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)モジュール“Tシリーズ”に適用し、自動車用パワーモジュールJ1シリーズへと展開している<sup>(5)</sup>。

### 3.4 放熱構造の形成技術

一般にパワーモジュールの発熱は熱伝導グリスを経由してヒートシンクへと伝えられる。パワーモジュールには銅やアルミニウムなどの熱伝導率が高い金属や窒化アルミニウムなどの高熱伝導セラミックス材料が用いられる。ヒートシンクにはアルミニウムが主に用いられる。しかしながら、熱伝導グリスの熱伝導率は1~5 W/mK程度であり、他の構成材料に比べて非常に小さいため、放熱を阻害する一因になる。損失改善によってパワー半導体素子の小型化が進むと、面積縮小の背反として発熱密度が高くなるため、より高い放熱性能が必要になる。これに対応するため、熱伝導グリスを必要としない直接冷却構造が使われ始めている<sup>(10)</sup>。

当社では、産業機器用のパワーモジュールの放熱性向上を目的に、底面に薄板の冷却フィンをかしめ加工によって一体化した放熱構造を開発した<sup>(11)</sup>。図5にかしめ加工による冷却フィン一体型パワーモジュールの構造を示す。パワー半導体素子などの回路部品を実装し、封止の完了後に、モジュールベースの凹部に冷却フィンを挿入し、凸部を加圧・変形して複数の冷却フィンを固定するモールド型パッケージ構造を適用した。硬質の熱硬化性樹脂でモジュール内部を充填することで剛性が向上し、かしめ加工の荷重を受ける構造として適している。熱伝導グリスを介さずにヒートシンクの一体化によって低熱抵抗化したことで、出力密度を従来の約2倍に向上させた。

また、自動車向けにアルミニウム回路(パターン)とアルミニウム製冷却フィンをセラミックス製絶縁基板と一体化した放熱構造を開発し、熱伝導グリス層を削減することによる低熱抵抗化と小型化、DP樹脂で封止して接合部の熱応力を低減することによる温度サイクル寿命の向上を果たしている<sup>(8)</sup>。図6に当社の自動車用パワーモジュールJ1シリーズの構造を示す。先に述べたDLB構造や冷却フィン

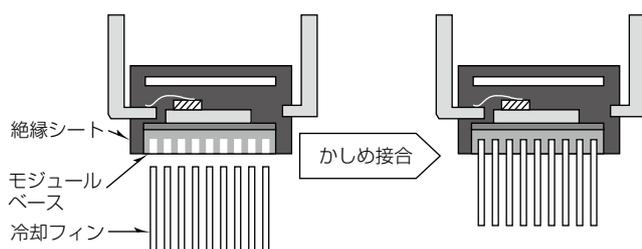


図5. かしめ加工による冷却フィン一体型パワーモジュール

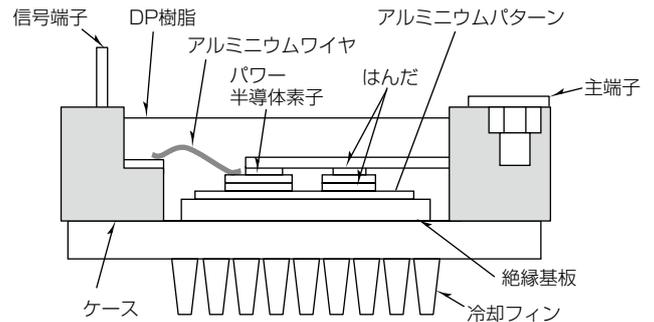


図6. 自動車用パワーモジュールJ1シリーズの構造

一体構造の採用で、従来に比べて搭載面積を約40%、熱抵抗を約30%低減した。

さらに、自動車用の2モータを駆動するパワーモジュールと昇圧回路、降圧回路を統合した4 GL-IPUでは、パワーモジュールと冷却器の間に熱伝導グリスを介する構造から、パワーモジュールを冷却器に直接はんだ接合する構造に変更して、熱抵抗の低減と小型化・軽量化を実現した<sup>(5)</sup>。

## 4. む す び

パワー半導体素子の性能を最大限に引き出し、かつ、安定的に、長期にわたって使用できるパワーモジュールを実現するには、パワー半導体素子に発生する熱を効率よく拡散させる技術が必要になる。また、パワー半導体素子に低損失で電流を運ぶ配線技術や高温・高湿のほかに腐食性雰囲気などの厳しい環境下でも安定した絶縁封止技術など、パッケージ技術も同時に進化させる必要がある。当社では、持続可能な社会の実現に貢献するためにパワーモジュールの性能向上をパッケージ技術の進化で支え続ける。

### 参考文献

- (1) 西原秀典, ほか: パワーモジュールの最新動向と展望, 三菱電機技報, 94, No.3, 148~152 (2020)
- (2) 中原賢太, ほか: 高温動作パッケージ構造, 三菱電機技報, 92, No.3, 167~170 (2018)
- (3) 中島 泰, ほか: 高放熱樹脂封止型パワーモジュール, 三菱電機技報, 78, No.10, 645~648 (2004)
- (4) 日野泰成, ほか: 高耐熱パワーモジュールパッケージ要素技術, 三菱電機技報, 88, No.5, 313~316 (2014)
- (5) 石橋誠司, ほか: 4 GL-IPU: 2モータシステム用パワーユニット, 三菱電機技報, 93, No.5, 312~315 (2019)
- (6) 内田祥久, ほか: パワーモジュールの性能向上を実現する配線技術開発の取り組み, 三菱電機技報, 94, No.3, 169~172 (2020)
- (7) 菊池正雄, ほか: ダイレクトリード接合型大容量パワーモジュール, 三菱電機技報, 84, No.4, 232~235 (2010)
- (8) 吉松直樹, ほか: 自動車用パワー半導体モジュール“J1シリーズ”のパッケージ技術, 三菱電機技報, 88, No.5, 317~320 (2014)
- (9) 浅田晋助, ほか: 産業用高信頼性パッケージ技術, 三菱電機技報, 90, No.5, 291~294 (2016)
- (10) Stockmeier, T.: From Packaging to “Un”-Packaging-Trend in Power Semiconductor Modules, Proc. of 20th ISPSD, 12~19 (2008)
- (11) 中島 泰, ほか: かしめ工法によるヒートシンク一体型高放熱パワーモジュール, 三菱電機技報, 93, No.12, 717~720 (2019)