

産業用トランスファームールド封止型 パワーモジュール技術

岡 誠次* 大開美子**
後藤晶子*
井高志織**

The Transfer-Molded Packaging Technology for Industrial Power Modules

Seiji Oka, Akiko Goto, Siori Idaka, Yoshiko Obiraki

要 旨

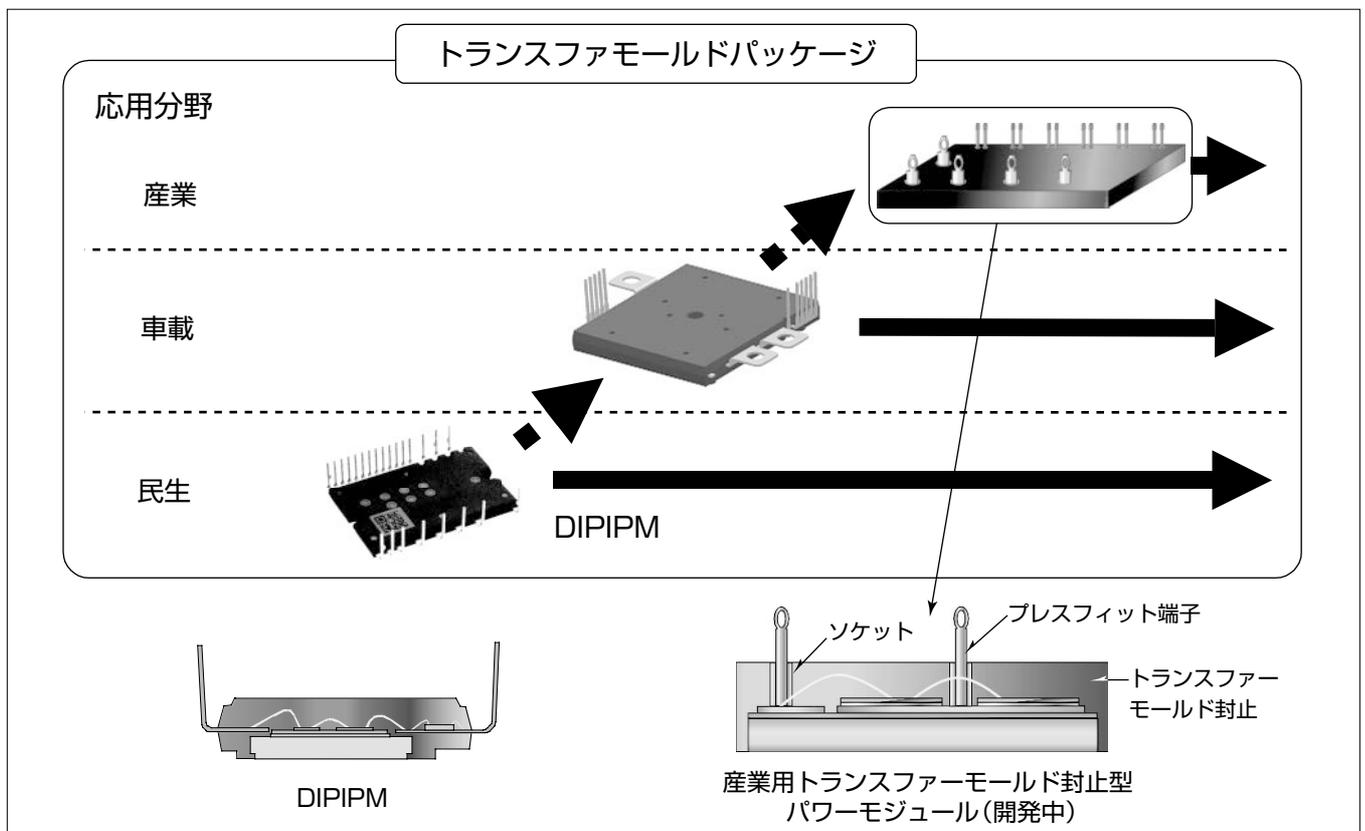
三菱電機はパワーデバイス分野に高信頼性・低コスト化に優れたトランスファームールド封止構造を適用して、1990年代民生機器分野向けにDIPIPM (Dual-In-line Package Intelligent Power Module)を開発し、2000年代前半には車載用途に展開してきた。現在、産業機器分野への展開を目指し新たなモジュールを開発中である。

産業機器分野におけるパワーモジュールへの市場要求は、他分野と同様に①高信頼性、②端子配置の設計自由度性、③小型化・低コスト化、④環境負荷物質の低減等に加え近年は⑤動作温度の高温化が挙げられるが、他分野に比べ産業機器分野は品種が多いため②項の要求が強い。これに対し、現行のトランスファームールド封止構造は、端子がモジュール

外周に配置されるため、端子位置の設計や端子間、さらには端子とヒートシンク間の絶縁を確保するため沿面距離に制約が大きく、産業機器分野への展開が困難であった。

開発中のパワーモジュールの特長はトランスファームールド封止構造でありながら、トランスファームールド上面の任意の位置に電極端子が配置できるため、先に述べた②端子配置自由度性や③小型化・低コスト化が可能となる。さらに、プリント配線板(Printed Circuit Board : PCB)との接合にプレスフィット接合を用いることで、はんだレス実装(④環境負荷物質の低減)が達成できる。

本稿では開発中のパワーモジュールの構造の特長及びプレスフィット接合技術を中心に述べる。



トランスファームールド封止構造の応用と構造

トランスファームールド封止構造を応用した当社パワーモジュール製品の推移及び民生機器向けIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュール・DIPIPMと産業用トランスファームールド封止型パワーモジュールの構造を示す。

1. ま え が き

産業機器分野におけるパワーモジュールは、モータ制御用途を始め、無停電電源装置(Uninterruptible Power Supply：UPS)や自然エネルギー発電等の発電・送電・給電用途等、広範囲に使用されており、省エネルギー要求の高まりを受けてその用途は拡大の一途をたどっている。それに伴い産業用パワーモジュールには、高信頼性、端子配置の設計自由度向上、小型化・低コスト化、環境負荷物質の低減、動作温度の高温化等の要求が大きくなっている。

今回、これらの要求にこたえるため、高信頼性で低コストのトランスファモード封止構造の産業用途への展開を検討した。この産業用トランスファモード封止型パワーモジュール(以下“新構造パワーモジュール”という。)について、モジュール構造の特長及びプリント配線板(PCB)とのはんだレス実装方式であるプレスフィット接合技術を中心に述べる。

2. 新構造パワーモジュールの構造

市場要求に対して、新構造パワーモジュールはトランスファモード封止構造を適用することで、高信頼化を達成した。例えばパワーサイクル特性は、チップ上にボンディングされているアルミワイヤの根元に発生する熱応力(アルミとシリコンの熱膨張差に起因)をトランスファモード樹脂が緩和するため、長寿命化が可能となる⁽¹⁾。

新構造パワーモジュールを図1に示す。モジュールの内部配線にプレスフィット端子と接合する金属ソケットを実装し、トランスファモード上面に金属ソケットの開口部が露出するようにトランスファモード成型し、それらの露出した開口部にプレスフィット端子(モジュール側)を挿

入する(この構造を電極端子上出し構造と呼ぶ)。トランスファモード成型品のヒートシンクへの取付けにはケースを用いる。

2.1 電極端子上出し構造の採用

今回開発した電極端子上出し構造は、トランスファモード上面から電極を取り出せるため、電極端子配置自由度が大きいことが特長である。金属ソケットは内部配線に任意の数を実装できるため、プレスフィット端子配置の設計自由度が向上すると同時に、小型化が期待でき、結果として低コスト化が達成できる。また、チップ近傍への電力端子の設置や、P側母線とN側母線の平行配線等が可能となり、パワーモジュールの内部配線インダクタンスの低減やサージ電圧の抑制も可能となる。

2.2 プレスフィット接合の採用

プレスフィット接合とは、弾性構造を持たせた金属端子をプリント配線板のスルーホールに常温で挿入し、プリント配線板と端子の接触をばね力によって維持する金属接合である。プリント配線板スルーホール部と端子の摩擦で互いの表面酸化膜を破り、相対した金属新生面を“凝着”させることで、高強度・低抵抗の金属間接合部を形成する⁽²⁾方式である。

新構造パワーモジュールは、先に述べたとおりトランスファモード上面に形成された金属ソケット開口部にプレスフィット端子を挿入し電極を形成する構造である。Needle-eye形状と称するプレスフィット形状を両端に持った端子を用いることで、プリント配線板への実装でもプレスフィット接合が可能となる。

3. プレスフィット接合技術

3.1 プレスフィット接合の特長

プレスフィット接合は、従来のはんだ接合と比べ、実装プロセスの簡素化や環境負荷物質の低減、周辺部品の高密度実装性の向上が期待できる。プレスフィット接合に用いられる金属には、ヒートサイクル性や衝撃・環境試験に対する耐性を向上させるための高いばね力と、大電流を流すための低い電気抵抗という、相反する特性が必要となる。

この観点からプレスフィット端子は、高いばね力(弾性率)・電気伝導率・応力緩和率でバランスのとれた材料を選定すると同時に、低接触抵抗・高抜去力を持つ構造を設計する必要がある。次に材料選定・形状選定を評価した結果を示す。

3.2 端子材料選定

新構造パワーモジュールに用いるプレスフィット端子の材料選定には、ばね力・電気伝導率・応力緩和率から4種類の銅合金に絞り、プレスフィット端子形状で特性比較を実施した。サーマルサイクル(条件：-40/150℃, 1,000cyc)試験における接触抵抗の変化及び抜去力の変化

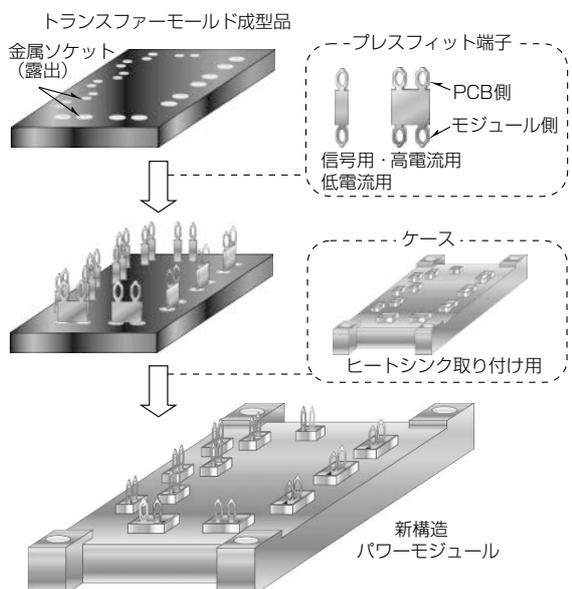


図1. 新構造パワーモジュール

を図2に示す。低接触抵抗・高抜去力であり、接触抵抗が安定している銅合金を新構造パワーモジュールのプレスフィット端子の材料として採用した。

3.3 端子形状選定

3.2節で選定した銅合金を用いてプレスフィット挿入部の形状評価を行った。プリント配線板のスルーホール穴径に対するプレスフィット端子の挿入・抜去力評価結果を図3に示す。保持力(=抜去力÷挿入力)はスルーホール穴径1.91~2.01mmの範囲で平均80%以上と良好な値を示した。プリント配線板のスルーホール穴径公差は一般的に±0.05mm以内であることから、目標とする端子材料・形状がほぼ得られた結果となった。

プレスフィット接合部(モジュール側)の走査型電子顕微鏡写真を図4に示す。プレスフィット端子表面のSnめっきが金属ソケットとプレスフィット端子との接合部に拡散し、境界が見られないプレスフィット接合特有の低温金属結合が形成されていることが分かる。この界面や隙間のない合金層形成によって、接合部への腐食性ガスの侵食を防止することができる。耐腐食性試験の実施結果については3.7節で述べる。

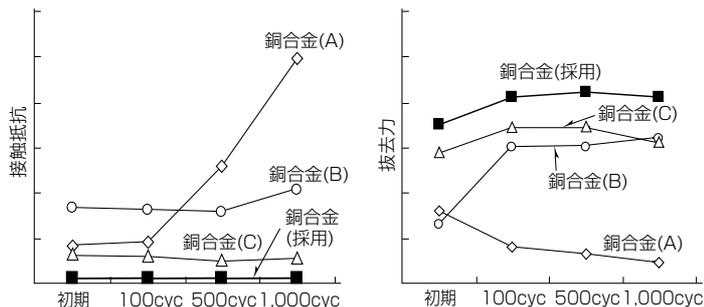


図2. サーマルサイクル試験における接触抵抗の変化(左)と抜去力の変化(右)

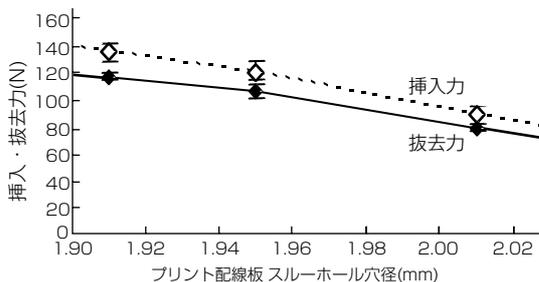


図3. スルーホール穴径に対する挿入・抜去力評価

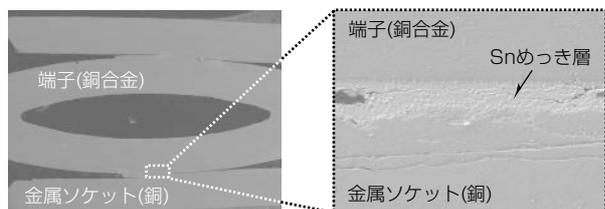


図4. プレスフィット挿入部と金属ソケットとの接合部の走査型電子顕微鏡写真

3.4 許容電流の見極め

プレスフィット端子と接合するプリント配線板の銅パターンにおける通電時の発熱から、プレスフィット端子の許容電流を定義した。プリント配線板(FR-4:許容温度105℃)の銅パターンにプレスフィット端子を介して通電した場合の印加電流値と上昇温度の関係を図5に示す。使用したプリント配線板の銅パターン部の厚みは、銅箔(どうはく)105μm上に25μmの銅めっきを施した130μmで、スルーホール部の銅めっき厚みは25μmである。さらに、導体全体にSnめっきの表面処理を施した。

モジュールの周囲温度(Ta)を65℃と仮定して、1連プレスフィット端子・2連プレスフィット端子で許容電流値をそれぞれ75A/本、150A/本と決定した。2連プレスフィット端子は1連プレスフィット端子2本分より小さい実装面積で同じ電流を流せるため、端子を電流容量に応じて使い分けることでパワーモジュールの更なる小型化が可能となる。

3.5 高温保存試験

パワーモジュールの実動作における温度上昇によるプレスフィット接合部の接合強度の変化を評価するために、プリント配線板接合部の高温保存(条件:125℃,1,000h)試験での接触抵抗・抜去力の変化を評価した。評価結果を図6に示す。抜去力には変動がなく問題ない。また、接触抵抗は0.02mΩ程度の上昇が見られたが、プレスフィット端子の導体抵抗と比べて1桁小さく、使用上問題ないレベルである。

3.6 サーマルサイクル試験

パワーモジュールの実動作における繰り返し温度ストレスによるプレスフィット接合部の接合強度の変化を評価するために、プリント配線板接合部のサーマルサイクル(条

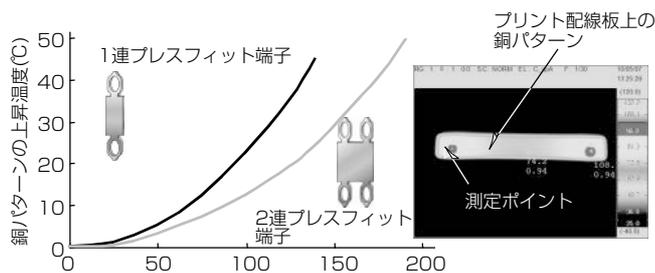


図5. 印加電流と上昇温度の関係(25秒電流印加後)

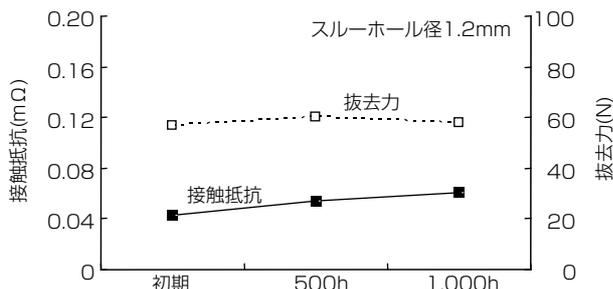


図6. 高温保存試験における接触抵抗・抜去力の変化

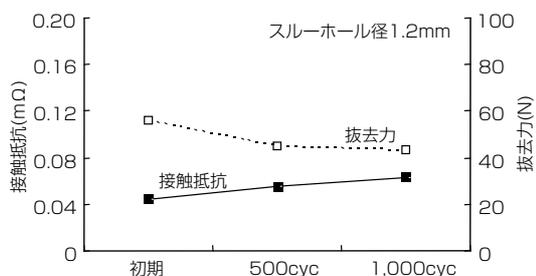


図7. サーマルサイクル試験における接触抵抗・抜去力の変化

件： $-40^{\circ}\text{C}/125^{\circ}\text{C}$ ，1,000cyc) 試験での接触抵抗・抜去力の変化を評価した。評価結果を図7に示す。抜去力は初期に比べ15N程度の低下が見られたが、IEC規格(IEC60352-5)で規定されるプレスフィットの抜去力値を十分に満足している。接触抵抗は高温保存試験と同様に $0.02\text{m}\Omega$ 程度の上昇が見られたが、プレスフィット端子の導体抵抗と比べて1桁小さく、使用上問題ないレベルである。

3.7 耐腐食性試験

プレスフィット接合部(基板側・モジュール側)の耐腐食性評価を実施した。暴露条件はIEC60068-2-42(SO_2 ガス： $25 \pm 5 \text{ ppm}$ ，温度： $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，湿度： $75 \pm 5 \% \text{ RH}$ (Relative Humidity)，240h)に準じて実施した。基板側とモジュール側の接触抵抗・抜去力の変化を測定した結果、初期と比較してほとんど変化は見られなかった。これはプレスフィット接合面に形成された金属間接合部が腐食性ガスの侵食を防止したからであると推測される。

3.8 摺動試験

プレスフィット接合部に繰り返しの機械的ストレスや振動が発生した場合の信頼性を評価するために、摺動(しゅうどう)試験($\pm 10\mu\text{m}$ ， 25°C ，70kcyc)を実施した。図8にはモジュール側のプレスフィット端子接合部の摺動試験結果を示す。反力(プレスフィット挿入部のばね性)，抵抗値ともほとんど変化が見られないことから、振動などの微小な変位に関してプレスフィット接合は高い信頼性を保持していることが分かる。

4. 新構造パワーモジュール構造の信頼性

4.1 パワーサイクル

パワーモジュールのパワーサイクル寿命(故障までのパワーサイクル動作回数)は動作温度によって変動するため、加速寿命試験の結果から推定した故障曲線によって、パワーサイクル寿命を評価する。故障曲線は、ある動作温度(動作温度の最大値 $T_{j\text{max}}$)における市場故障の確率を、動作温度とヒートシンク温度との温度差 ΔT ごとに表す。なお、ある動作温度における市場故障の確率は故障点という。

現行の産業用ゲル封止型パワーモジュール(以下“ゲル封止品”という。)の1%故障曲線(動作温度 $T_{j\text{max}} = 125^{\circ}\text{C}$)と、新構造パワーモジュールの1%故障点(動作温度 $T_{j\text{max}} =$

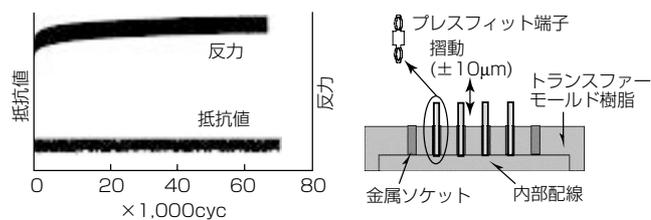


図8. 摺動試験による抵抗・反力の変化

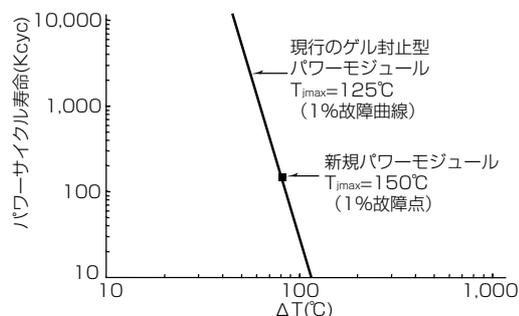


図9. パワーサイクル寿命

150°C)を図9に示す。双方には同一構造のチップを搭載している。新構造パワーモジュールの動作温度はゲル封止品の動作温度に対し 25°C 上昇しているが、新構造パワーモジュールの1%故障点は、ゲル封止品の1%故障曲線と同等であった。一般に高い動作温度ではパワーサイクル寿命は短くなるため、トランスファーマールド封止構造の採用によって、新構造パワーモジュールはゲル封止品以上のパワーサイクル寿命を持つことが確認できた。

4.2 静・動特性

新構造パワーモジュールの静特性及びスイッチング評価やアーム短絡動作の評価を実施した。モジュール構造及び製造プロセス(熱・加工時の衝撃等)による特性の劣化はなく、正常な動作と良好な特性を確認した。

5. むすび

高信頼性のトランスファーマールド封止構造を踏襲した構造による新構造パワーモジュールは、電極端子をトランスファーマールド上面の任意の位置に設計できるモジュール構造を開発したことで、端子設計の自由度向上及び小型化・低コスト化を実現するとともに、プリント配線板との接合にプレスフィット端子を採用することで、はんだレス接合が達成可能となり、環境負荷物質の低減に寄与できる。

参考文献

- (1) Ueda, T., et al.: Simple, Compact, Robust and High-performance Power module T-PM(Transfer-molded Power Module), 22nd ISPSD, 47~50 (2010)
- (2) Stolze, T.: Self acting PressFIT module, Proc. of PCIM 2010, Paper 164 (2010)