

## 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

吉松直樹\* 石山祐介\*  
碓井 修\*  
井本裕児\*

*Packaging Technologies of Power Module "J1 Series" for EVs and HEVs*

*Naoki Yoshimatsu, Osamu Usui, Yuji Imoto, Yusuke Ishiyama*

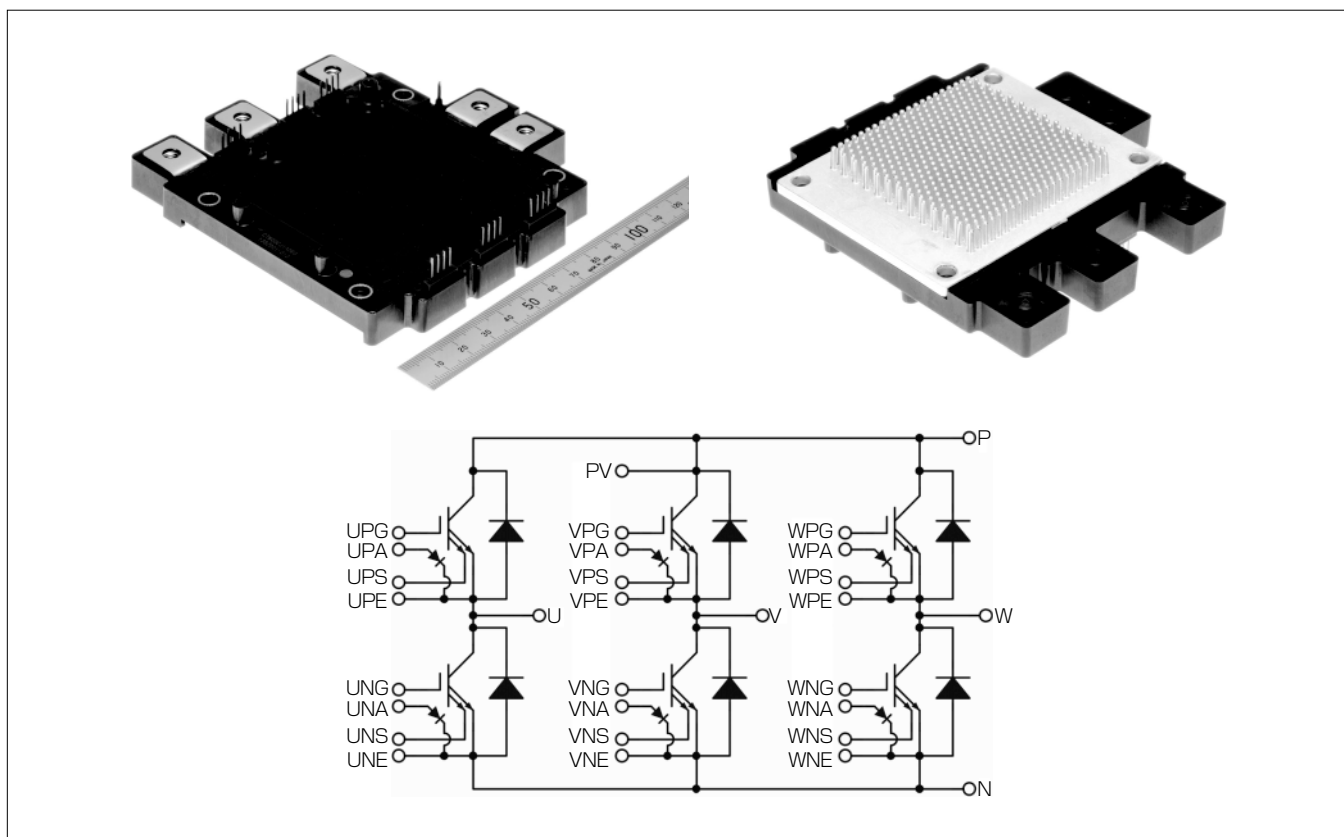
### 要 旨

自動車メーカーによる電気自動車(EV)・ハイブリッド車(HEV)の市販化に伴い、三菱電機ではケースタイプの大容量パワーモジュールを車載用途として1997年に上市した。そして、300Aクラス以下の中低電流容量では、高信頼性の“トランスファモールド型パワーモジュール(Transfer-molded Power Module：T-PM)”を2004年に上市、さらにその改良版として、内部配線構造を従来のアルミワイヤから、銅フレームをパワー素子に直接はんだ接合させる“ダイレクトリード接合型パワーモジュール(Direct Lead Bonding：DLB T-PM)”へと進化させてきた。

今回、“高性能”“小型・軽量化”をコンセプトとして開発した自動車用パワー半導体モジュール“J1シリーズ”のパッ

ケージには、T-PMで培った高信頼性技術を活用して、ケースタイプにデバイスや内部配線を硬質樹脂で封止するダイレクトポッティング構造を採用した。さらに、主回路配線のDLB化による大電流容量への対応と、アルミピンフィンをモジュールと一体化して冷却性能を向上させることによるモジュールの大幅な小型化・軽量化を実現した。そして、このピンフィン一体モジュールと並行開発した水冷ジャケットを組み合わせることで、冷却水均流化のためのヘッダ部分の配置による面積ロスをなくしつつ、その冷却性能を最大限に発揮できるものとした。

本稿では、J1シリーズのパッケージの構造、性能、信頼性について述べる。



自動車用パワー半導体モジュール“J1シリーズ”の上側外観と下側外観及び回路

外形寸法：120×115.2×13 (mm) (フィンベース下面～主端子上面), 全高32.5mm  
定格電流/定格電圧：(1) 600A/650V, (2) 400A/900V

## 1. ま え が き

自動車メーカーのEV・HEV市販化に伴い、当社では車載用パワーモジュールを1997年に上市し、その後、EV・HEVの進化に対応するために、パワーモジュールも高性能化、小型・軽量化、高信頼性・高品質化、低コスト化を進めてきた。

今回、自動車用パワー半導体モジュール“J1シリーズ”では、“高性能”“小型・軽量化”をコンセプトに開発を行った。本稿ではJ1シリーズの構造、性能、信頼性について述べる。

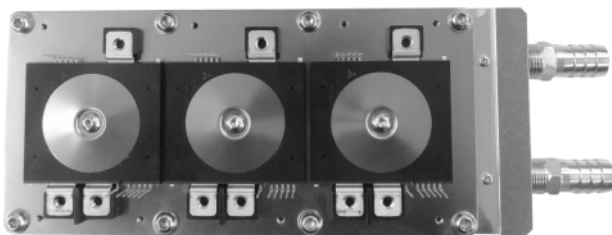
## 2. 構造の特徴

### 2.1 パッケージ外形

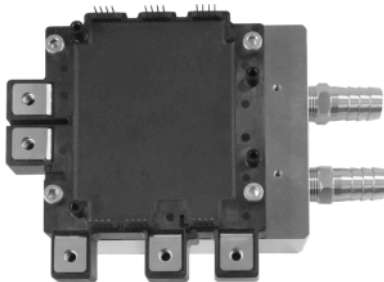
従来型の当社製DLB T-PMの銅ピンフィン冷却器への実装状態と比較したJ1シリーズを図1に示す。

従来型DLB T-PMはハーフブリッジ回路の2 in 1構造のパッケージを、冷却器上に3個並べてそれぞれ固定することで三相インバータの回路構成を成す。一方、J1シリーズでは、アルミピンフィン一体化による冷却性能の向上と、バスバー配線をインサート成形したケースを使用することによって回路の集積化を容易にし、三相インバータ回路を1パッケージ化した6 in 1構造とすることができた。これによって、水冷ジャケットを含めた実装面積を従来品に比べ40%縮小し、76%の軽量化を実現した。

J1シリーズに使用している水冷ジャケットは小型化、高効率化を目的に、モジュールと並行開発したものであり、水路内を均流化させるためのヘッダ部分によって発生する冷却器設置面積のロスをなくしている。



(a) 従来製品



(b) J1シリーズ

図1. パッケージ外形の比較

さらに、DLB T-PM 3個のそれぞれに設置されたP、N電極はバスバーでの接続が必要であるが、J1シリーズでは、1対のP、N電極をモジュールの1辺に近接配置しているため、平行平板型バスバーを接続し、配線のインダクタンスの上昇を抑制できる。また、バスバー接続用のナットボックスと制御基板固定用の支柱を、ケースと一体化することで周辺部品の組み付けを容易にし、機能の向上を図っている。

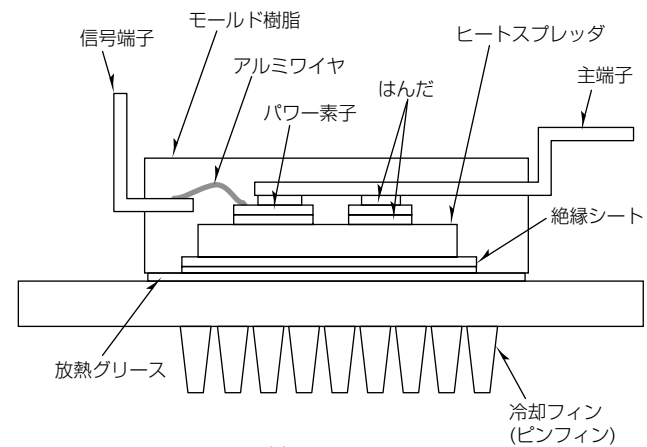
### 2.2 DLB+ダイレクトポッティング構造

当社では、パワーモジュールとして主流であったシリコーンゲル封止構造の数倍の寿命を持つトランスファモールド構造を開発し、さらに主回路配線である太線アルミワイヤを、通電能力向上、配線抵抗低減、インダクタンス低減等を目的としたDLB構造へと進化させた。J1シリーズには、これらの利点を活用するために、DLB構造をケースタイプへ応用し、モールド樹脂と同様の硬質樹脂で封止するダイレクトポッティング(DP)構造を採用した。

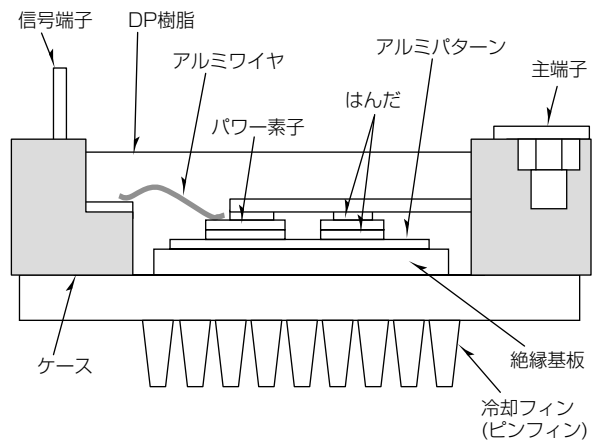
### 2.3 ピンフィン一体化

J1シリーズでは、冷却性能を向上させるために、放熱グリースを廃止し、ピンフィンをモジュールと一体化した。

図2に従来構造との断面の比較を示す。



(a) 従来構造



(b) J1シリーズ構造

図2. 断面構造の比較

従来構造では、モジュールの放熱面と冷却フィンの実装面の間に放熱グリースを塗布して組み立てられる。この放熱グリースによって、2面間の隙間を埋め、パワー素子動作時に発生する熱を冷却水へと伝導させている。放熱グリースの熱伝導率はアルミや銅等の金属に比べ2桁低く、その厚みは熱抵抗に大きく影響する。そこで、モジュールの放熱面、冷却フィンの実装面は、通常その隙間をできるだけ小さくするためにフラット形状、又は凸形状となるような加工や工夫が施される。しかし、その面形状のばらつき、放熱グリース塗布状態のばらつき、実装作業のばらつき等によって安定した冷却性能を得ることが困難であった。

J1シリーズでは、このような熱抵抗の増大とばらつききの主要因となる放熱グリースを廃止し、セラミックス絶縁基板をピンフィンに一体化した“セラミックス絶縁アルミフィン”を採用した。これによって、冷却性能を改善することができた。その冷却性能については、3.1節で述べる。

## 2.4 製造プロセス

J1シリーズでは、部品のサブアセンブリ化を進め、この組立て工程をシンプルにすることで、車載用途として特に重要な品質安定化を図る。

J1シリーズの製造フローは、次のような必要最小限の4工程を軸に構成されている(図3)。

- (1) ダイボンド：パワー素子の裏面接合
- (2) リード接合：パワー素子の表面主回路配線
- (3) ワイヤボンド：パワー素子の信号配線
- (4) 樹脂ポッティング：パワー素子と周囲の配線等を封止

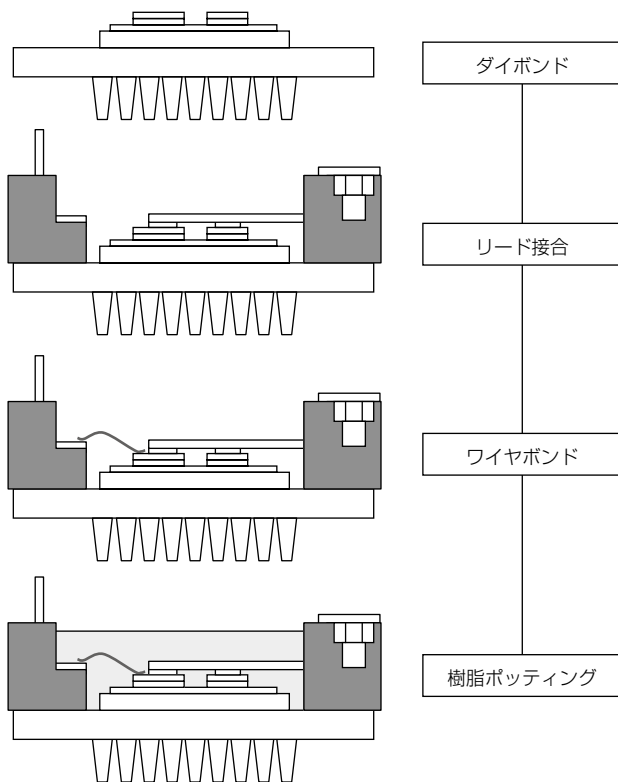


図3. J1シリーズの製造フロー

## 3. 性能・信頼性

### 3.1 冷却性能

従来モジュール用の冷却フィンには、冷却性能を重視して材料に銅材を使用し、耐腐食性能向上のため表面にニッケルめっきを施している。しかし、J1シリーズでは、セラミックス絶縁基板との一体化、及び軽量化を目的にアルミ材を採用した。

アルミの熱伝導率は銅に比べて約60%と低いため、従来構造のフィン単に銅からアルミに材料変更した場合、その熱伝達率は88%程度に低下する。

そこでJ1シリーズでは従来の銅フィンと同等の冷却性能とすることを目標として、ピン形状・配置、流路設計の最適化を実施し、その結果、フィン部分で従来の銅と同等の熱抵抗を達成、さらにモジュール全体の熱抵抗を約30%改善した。

図4に縦構造における各層の熱抵抗の構成を従来品と比較したものを示す。このように、セラミックス絶縁基板をピンフィンに一体化させて放熱グリースを廃止した効果は非常に大きい。

熱抵抗を低減した具体的な方策は次のとおりである。

- (1) 絶縁材に熱伝導率の高いセラミックスを採用した。これに伴い、パワー素子から発する熱を絶縁材通過前に拡散させる必要がなくなったため、ヒートスプレッドを廃止した。
- (2) セラミックス絶縁基板をピンフィンに一体化した“セラミックス絶縁アルミフィン”の採用によって、放熱グリースを廃止した。
- (3) ピンの形状・配置を最適化することでピンフィンの冷却性能を向上させた。
- (4) 専用の水冷ジャケットとの組合せによって、冷却水の流速を均一化し、冷却効率を向上させた。

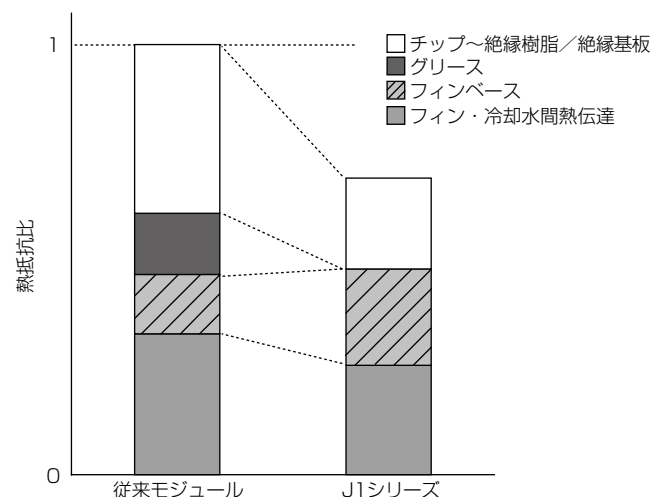


図4. 熱抵抗の構成比較

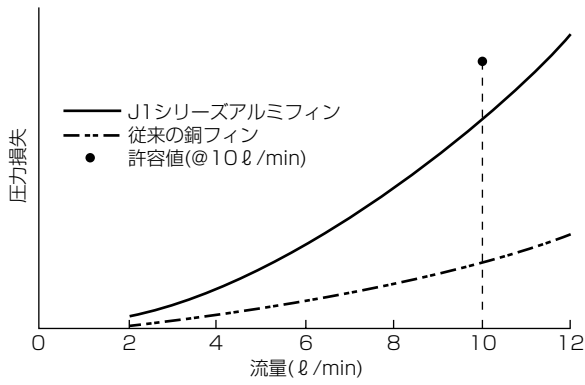


図 5. 圧力損失の比較

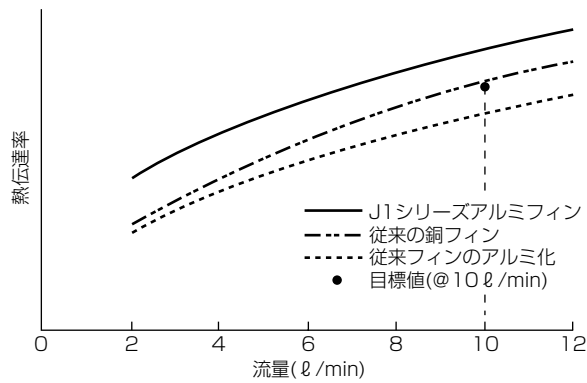


図 6. 熱伝達率の比較

(5) 冷却水流路の断面積を小さくすることで圧力損失の許容される範囲内で冷却水の流速を高め、冷却能力を向上させた。

図 5 に従来品と J1 シリーズの圧力損失の比較、図 6 に熱伝達率の比較を示す。

### 3.2 パワーサイクル寿命

T-PMではパワー素子とアルミワイヤをモールド樹脂で封止することで、シリコンパワー素子とアルミワイヤの線膨張係数差によって接合界面近傍に発生する熱ひずみを抑制し、シリコンゲル封止構造に対してパワーサイクル寿命を温度変化量 $\Delta T_j = 80^\circ\text{C}$ の条件で約3倍まで延ばした。そして、配線構造をDLB化することによって、ワイヤボンドタイプのシリコンゲル封止構造に対して約10倍まで延ばした。

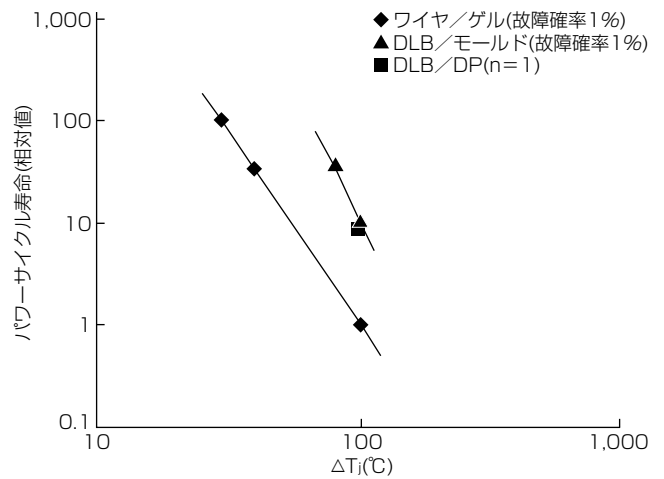


図 7. パワーサイクル寿命<sup>(1)(2)</sup>

J1シリーズの構造は、2.2節で述べたようにDLB+ダイレクトポッティング構造を当社製品で初めて採用し、DLB T-PMと同様にパワー素子周辺に発生する熱ひずみの抑制効果を狙っている。

図 7 に従来構造のパワーサイクル試験の寿命カーブと、J1シリーズの $\Delta T_j = 100^\circ\text{C}$ におけるパワーサイクル試験の結果( $n=1$ )のプロットを示す。

## 4. む す び

J1シリーズでは従来品に対し、大幅な小型化・軽量化と放熱性能の向上を達成することができたが、まだ開発の途中段階であり、構造及び製造プロセスには課題がある。

今後、これらを解決し、製品を完成させることで、車載用途としてのニーズに適合した製品を提供していく所存である。

## 参 考 文 献

- (1) 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)
- (2) 篠原利彰, ほか: トランスファモールド形大容量パワーモジュール, 三菱電機技報, **81**, No.5, 325~328 (2007)