

## 自動車用三菱パワーモジュールの開発動向

猪ノ口誠一郎\*

Development Trend of Mitsubishi Power Module for Automobile

Seiichiro Inokuchi

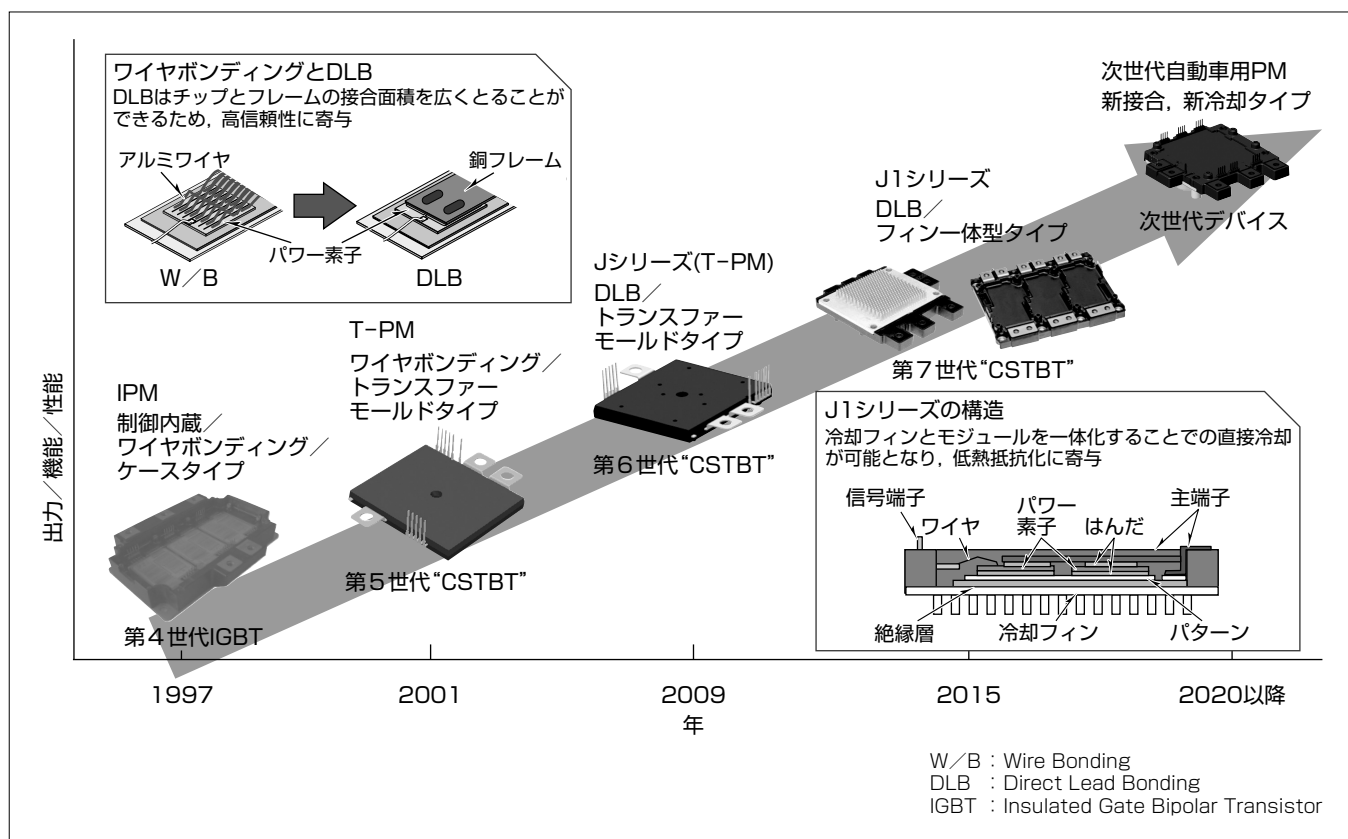
### 要旨

近年、自動車排ガス規制強化やエコカー優遇措置導入などによって電動化車両(xEV)が市場に浸透してきた。環境保護を担うxEVは今やスマートグリッドや自国産業活性化策など各国それぞれの視点で広がりを見せており、日本でもCO<sub>2</sub>削減及び災害時の給電といった新たな価値として“2030年までに新車販売に占める次世代自動車の割合を5から7割とすることを目指す”と2015年6月に閣議決定されている。このように、将来的なxEVの本格化に伴い自動車のモータ駆動用インバータに用いられるパワーモジュールの広がりもこの先加速していくことが期待される。

三菱電機は1997年から制御回路を搭載した自動車用IPM(Intelligent Power Module)を製品化したことを皮切

りに、2001年に高信頼性を特長とするT-PM(Transfer-molded Power Module)を市場投入し、xEV発展に貢献してきた。また、2015年には最新世代の自動車用パワーモジュールとして“J1シリーズ”を量産化しており生産規模を順次拡大させる計画である。このJ1シリーズは小型・軽量・高性能パッケージとして自動車用途に最適なことから様々な容量帯に向けラインアップ拡充を進めている。

また、xEV本格化に備え、更なる小型・高性能モジュールの実現のため、SiC(シリコンカーバイド)デバイス技術開発や自動車向けに特化した高信頼性・低熱抵抗パッケージ開発を推進している。



### 自動車用三菱パワーモジュールの変遷

ケースタイプから開発が始まった自動車用パワーモジュールは、信頼性の高いトランスファーモールドタイプを経てDLB技術を確立した。さらに低熱抵抗を実現するフィン一体型構造を開発してJ1シリーズは世界最小クラスのパッケージサイズとした。さらに次世代に向けた開発を進めており、将来的にはSiCなど次世代デバイスを搭載した自動車用パワーモジュールを提供していく。

\*パワーデバイス製作所

## 1. ま え が き

近年、自動車排ガス規制強化やエコカー優遇措置導入などによってxEVが市場に浸透してきた。環境保護を担うxEVは今やスマートグリッドや自国産業活性化策など各国それぞれの視点で広がりを見せており、日本でもCO<sub>2</sub>削減及び災害時の給電といった新たな価値として“2030年までに新車販売に占める次世代自動車の割合を5から7割とすることを目指す”と2015年6月に閣議決定されている。このように将来的なxEVの本格化に伴い自動車のモータ駆動用インバータに用いられるパワーモジュールの広がりもこの先加速していくことが期待される。

当社は1997年に自動車用パワーモジュールを量産化して以来、様々な製品を世に送り出してきたが、本稿ではそれら開発の変遷と今後の開発動向について述べる。

## 2. 自動車用パワーモジュールの変遷

### 2.1 ケースタイプ<sup>(1)</sup>

ガソリンエンジンとモータで駆動するハイブリッド自動車が1997年に量産化されて以来、当社はモータ駆動用インバータに用いられる様々なパワーモジュールを開発・製品化してきた。この自動車用パワーモジュールには小型・軽量や実装のしやすさまで様々な要求性能があるが、最たるものは温度サイクル性やパワーサイクル性など高信頼性の実現である。初期の自動車用パワーモジュールは産業用や電鉄用パワーモジュールで広く使用されているケースタイプであったが、高信頼性を単純に実現しようとするとサイズの大型化を招く。このため、放熱用ベース板に低線膨張係数の金属複合材料を使用することで熱ストレス時の応力緩和を促して高信頼性を確保する技術を採用した。また、IGBTを駆動・保護する制御回路を搭載したIPMとして開発しており、これまで自動車用パワーモジュールのドライブに関するノウハウを蓄積してきた。図1に最新ケースタイプIPMであるJシリーズIPM“TYPE+B”の構成を示す。

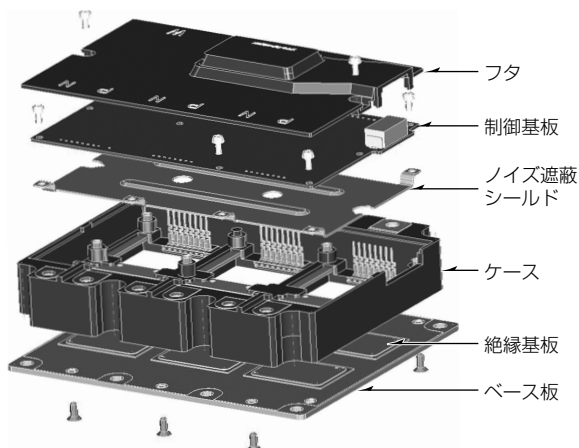


図1. JシリーズIPM TYPE+Bの構成

### 2.2 トランスファーモールドタイプ<sup>(1)</sup>

xEVのれい明期を経てユーザーが拡大していくと自動車用パワーモジュールの更なる高信頼性化の声が大きくなる。T-PMはトランスファーモールド構造を採用してチップと樹脂の線膨張係数のマッチングを図ることで温度サイクル性を飛躍的に向上させている。また、モールド樹脂で封止する構造によって機械的構造と強度、絶縁性、環境耐久性を一度に確保している。さらにパワーサイクル性の向上のため、チップとの電気的接続をワイヤボンディングからDLBにすることでパワーサイクルの長寿命化のほか、配線抵抗の低減、自己インダクタンスの低減を達成した。また、T-PMにはチップ下にヒートスプレッドを配置しており、その下面にはモールド封止樹脂よりも熱伝導率の高い絶縁樹脂層を配置している。チップで発生した熱を厚いヒートスプレッドで広げた後に絶縁層を通過させる構造にすることで、低熱抵抗に加えて自動車アプリケーションで重要な過渡熱抵抗を低減できる構造にしている。また、T-PMは2 in 1構成にしているため、ディスクリットデバイスのようにアプリケーションに応じて出力を増やすことなどフレキシブルに回路を構成できる特長を持つ(図2、図3)。

### 2.3 フィン一体型タイプ<sup>(2)(3)</sup>

エコカー開発がハイブリッド自動車だけでなく、xEVとして一般になされてくると、パワーモジュールに対して

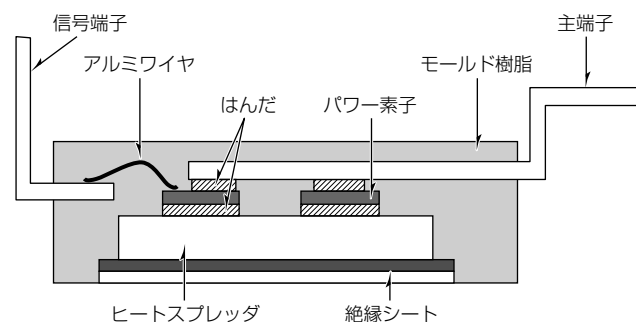


図2. JシリーズT-PMの内部構造

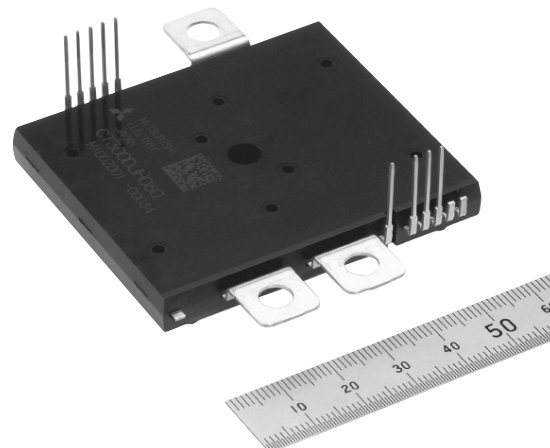


図3. JシリーズT-PM(CT300DJH060)

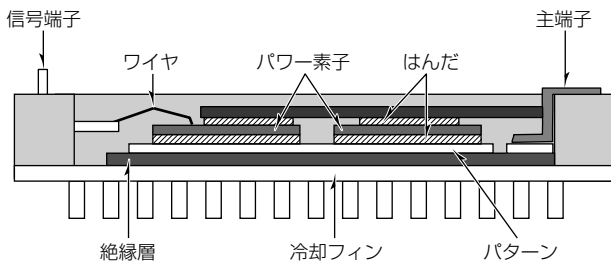


図4. J1シリーズの構造

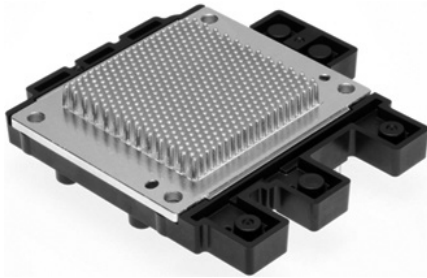


図5. J1シリーズ(CT600CJ1A060, 裏面)



図6. 大容量J1シリーズ(CT600CJ1B120, 表面)

6 in 1 化や更なる小型化といったニーズが高くなってきた。また、さらに使用環境が厳しくなるとモジュールと冷却器間の放熱用グリースの信頼性での課題が浮き彫りになってきた。そのようなニーズや課題を独自の第7世代IGBTとダイオードを適用し、T-PMで培ったDLB構造を採用することで小型・高信頼性を実現するフィン一体型6 in 1 パワーモジュール(J1シリーズ)を開発することで解決した。アルミフィンとケースタイプモジュールを一体化することによって放熱グリース層の削減に加えて絶縁基板下はんだ層を削減することで、低熱抵抗化と小型化を達成した。この絶縁基板下はんだ層の削減によって、温度サイクル性の向上も果たしている(図4, 図5)。さらにDLB等の内部配線の最適化を進めることでJ1シリーズより出力容量をおよそ2倍としながらサイズを約1.5倍に抑えた“大容量J1シリーズ”を開発しており(図6)、これらのパッケージをベースとしたラインアップ拡充を進めている。

### 3. 自動車用パワーモジュールの将来技術

近い将来、Si(シリコン)パワーデバイスに取って代わるキーデバイスとしてワイドバンドギャップ半導体であるSiC(シリコンカーバイド)パワーデバイスが注目されてい

表1. SiC\_J1シリーズラインアップ

形名	定格	サイズ
	( $I_n/V_{DSX}$ )	(mm)
CTF300CJ1A120	300A/1,200V	120.0×115.2

表2. SiCとSiの物性値比較

材質	バンドギャップ	熱伝導率	絶縁破壊強度
	(eV)	(W/cm·K)	(MV/cm)
SiC	3.3	4.9	3.0
Si	1.1	1.5	0.3

る。SiCパワーデバイスは低損失で高出力化でき、かつ高速動作や高温動作が可能なデバイスであり、自動車用途でもインバータの小型・軽量化や高周波化、冷却の簡素化など様々な効果が期待されている。現在、当社ではJ1シリーズパッケージをベースとした自動車用SiCパワーモジュールを開発している。また、SiCパワーデバイスはその製造コストが高いことが知られているが、当社はそのコストを最小限にするための低熱抵抗パッケージ技術を開発しており、自動車用パワーモジュールの将来技術としてそれぞれこの章で述べる。

#### 3.1 SiCパワーモジュール<sup>(4)</sup>

SiCデバイスの特長を次に示す。SiCはSiと比較して絶縁破壊強度が10倍ほど高いためチップの厚みを薄くすることができる(表1, 表2)。抵抗値を大幅に低減することができることからDC損失の低減に寄与する。また、スイッチング素子をSiC-MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)とし、SiC-SBD(Schottky Barrier Diode)と組み合わせることでユニポーラデバイスの特長である高速スイッチングを可能にし、AC損失を低減することができる。また、ワイドバンドギャップ半導体であるため、リーク電流を抑えることができ、高温での動作を可能にする。熱伝導率が高いことも特長で、Siに比べて放熱性が良く、熱抵抗を低減することができる。

J1シリーズをベースに開発した自動車用フルSiCパワーモジュールはJ1シリーズと比較してスイッチング素子サイズをMOSFETとSBDでそれぞれ50%程度に抑えたにもかかわらず、スイッチング損失はターンオン損失を40%低減、ターンオフ損失を60%低減、DC損失は20%低減させた。その結果、同定格のSiパワーモジュールに比べ、トータル損失を70%低減できた(図7)。

#### 3.2 冷却器一体型タイプ<sup>(5)</sup>

パワーモジュールの性能指標の一つに熱抵抗がある。損失の低いSiCは設計最適化のためにチップサイズを縮小すると放熱面積も縮小され、熱抵抗を悪化させてしまう。この対策としてパッケージによる熱抵抗改善が求められる。当社はこの課題の一つのアプローチとして小型軽量で高信頼性パッケージであるJ1シリーズを踏襲した冷却器一体

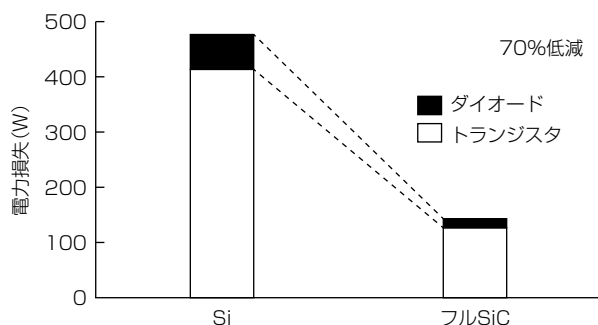
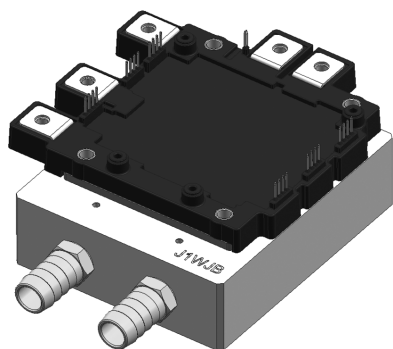
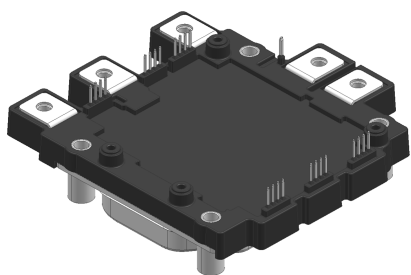


図7. SiとSiCデバイスの損失比較  
(代表例,  $V_{cc}=650V$ ,  $I=200A_{rms}$ ,  $f_c=10kHz$ ,  $PF=0.8$ ,  $T_j=150^{\circ}C$ )



(a) J1 シリーズ+評価用ジャケット



(b) 冷却器一体型パワーモジュール

図8. 冷却器一体型タイプ

型パワーモジュールを開発している(図8)。

冷却器一体型パワーモジュールは、CAEでの解析結果を基に冷却器の最適設計を施しており、従来発生していたピン先端からジャケット底面までのギャップやフィン外

周部を流れる冷却水の流路を遮断して効果的にパワーモジュールを冷却できるものとした。この改善によって従来のパワーモジュールと評価用ジャケットの組合せに比べ、約15%の熱抵抗改善効果を得た。さらに体積50%低減、質量60%低減を達成しており、xEVインバータの高性能化に寄与できるパッケージ技術を開発した。

#### 4. む す び

当社は、20年来のxEVの発展とともに様々な自動車用パワーモジュールを開発・製品化してきた。この間、IGBTチップやパッケージの進化は目覚ましいものがあり、その性能改善は頭打ちのようにも見える。しかし、当社は更なる損失低減、小型軽量化、信頼性向上等パワーデバイスの進化のための要素技術開発を継続して行っており、特にSiCパワーデバイス技術はその最たるものであると自負している。次世代自動車用パワーモジュールのSiCデバイス適用は容易な道のりではないが、“Changes for the Better”の精神の下、より良い製品を開発して市場に提供することで持続可能な社会の実現に貢献していく。

#### 参 考 文 献

- (1) 猪ノ口誠一郎, ほか: 自動車用IPM/T-PM“Jシリーズ”, 三菱電機技報, **86**, No.5, 283~286 (2012)
- (2) Inokuchi, S., et al.: A New High Capacity Compact Power Modules for high power EV/HEV inverters, APEC, 468~471 (2016)
- (3) 石原三紀夫, ほか: 次世代自動車用パワー半導体モジュール“J1シリーズ”, 三菱電機技報, **88**, No.5, 321~324 (2014)
- (4) Wada, F., et al.: 6-in-1 Silicon Carbide(SiC) MOSFET Power Module for EV/HEV inverters, PCIM Asia 2017 (2017)
- (5) Kawase, T., et al.: J1-Series modules with integrated cooler for electric and hybrid vehicles, PCIM Europe 2017 (2017)