

車載用パワーモジュール
“J3シリーズ”

河面英夫*

Hideo Komo

所附武志*

Takeshi Tokorozuki

東 幸幹*

Yukimasa Higashi

米山 玲*

Rei Yoneyama

Automotive Power Module "J3 Series"

*パワーデバイス製作所

要 旨

近年、脱炭素の各国の政策として自動車の電動化が全世界で加速しており、2030年には世界の新車市場でのEV(Electric Vehicle)車のシェアがガソリン車のシェアを上回ることが予想されている。電動車の普及ではエネルギー効率の改善が必要条件であるため低損失のパワーモジュールが求められている。近年では小型、高効率による長航続距離化、バッテリー搭載量削減が期待できるSiC(シリコンカーバイド)デバイスを搭載したパワーモジュールが各自動車メーカーで採用され、順次市場投入されている。

三菱電機は、高効率なSiCデバイスを搭載した高効率なパワーモジュールファミリーである“J3シリーズ”を開発中であり、世界の電動化に貢献していく。

1. ま え が き

地球温暖化、酸性雨等の環境問題への対応を目的として、世界各国で自動車の電動化政策の取組みが活発化している。

電動化での重要なファクターの一つはインバーターの電力損失低減である。当社はパワーモジュールのエネルギー効率化によって電力損失低減に貢献してきた(図1)。これまで当社は車載用パワーモジュールとして、小型・高信頼性を特長とするT-PM(Transfer molded Power Module)、冷却フィンを一体化し小型・高出力密度の特長を持つJ1シリーズを市場投入してきた。今後さらにxEVの普及によって電力損失の低減に一層寄与するためには、更なる性能改善が必要であり、その達成手段の一つとしてSiCパワーデバイスを用いたパワーモジュールであるJ3シリーズの開発を進めている。

本稿では、J3シリーズの製品の概要、及び製品機能の特長について述べる。

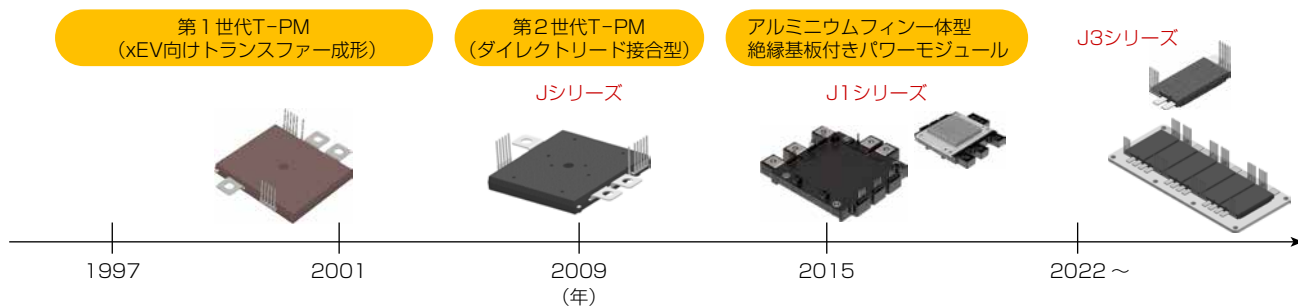


図1-当社パワーモジュール

2. J3シリーズ

近年の車載用パワーモジュールについては、車両の居住空間、荷物スペースの確保及び衝突安全性を確保するためのパワーモジュールの小型化、軽量化、低背化が求められている。また、急速な電動化に対応するためのインバーターの開発工数短縮化に寄与するスケラビリティが必要になっている。これらの課題を解決し、電動化に貢献するパワーモジュールとして、SiC-MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)を搭載可能なJ3シリーズを開発中である。

2.1 SiCパワーデバイス

当社は1990年代からSiCデバイスの開発を開始し、2010年に第1世代プレーナ型SiC MOSFETをリリースし、その後セル寸法や注入条件を最適化した第2世代プレーナ型SiC MOSFETを2013年に量産化した。さらに世界トップクラスの性能を誇るトレンチ型SiC MOSFETを開発中であり、トレンチ型で特に課題になる信頼性や $R_{on}-V_{th}$ トレードカーブの改善を実現している⁽¹⁾。プレーナ型、トレンチ型それぞれのSiCデバイス構造を図2に示す。

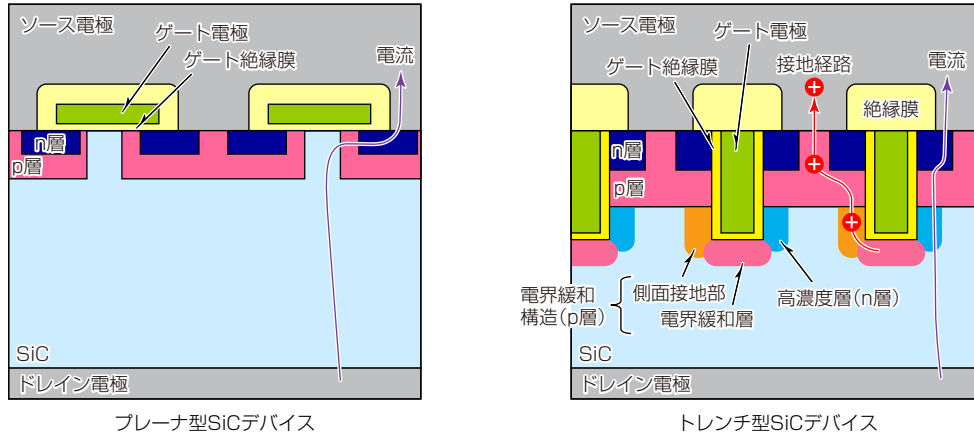


図2-当社SiCデバイス構造(プレーナ型, トレンチ型)

2.2 J3シリーズ製品概要

J3シリーズは、26.5×73.9×6.92mm(主端子含む)の小型、低背、軽量の2in1モジュールであるJ3-T-PMをコアとして、搭載チップの種類(Si(シリコン)/SiC)、チップ搭載数、及びモジュール並列数等を変更することでJ3-HEXAを構成する(図3)。これによってモーター最大定格50kW以下から300kW以上まで、幅広い出力に対応可能になる(図4)。

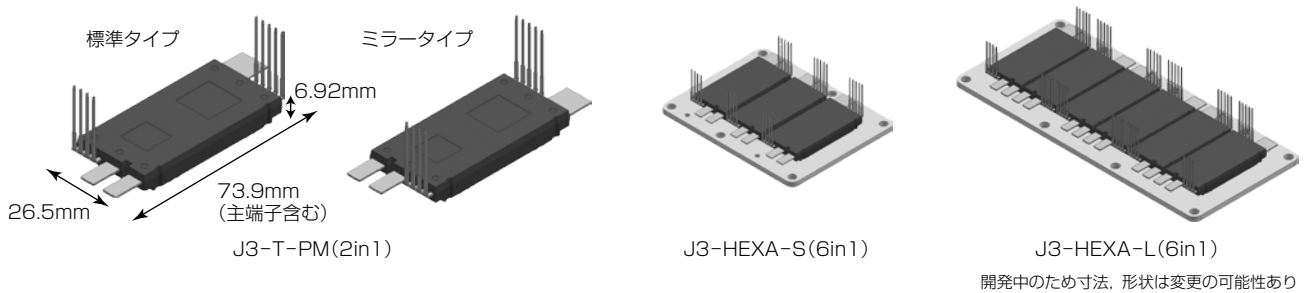


図3-J3シリーズ

出力	~ 50kW	~ 100kW	~ 150kW	~ 200kW	~ 250kW	~ 300kW<
RC-IGBT (750V)	[Chip icons]		[Chip icons]			
SiC-MOSFET (1,300V)	[Chip icons]			[Chip icons]		

図4-J3-HEXAのモーター出力カバーレンジ

表1にJ3-T-PMのスペック、及び等価回路図を示す。

パワーチップについては、第3世代Si-RC-IGBT(Reverse Conducting Insulated Gate Bipolar Transistor)⁽²⁾、及びトレンチゲート型SiC-MOSFETを採用している。Siについては400Vバッテリーを想定し750V耐圧で設計し、SiCについては800V以上のバッテリー電圧を想定し1,300V耐圧で設計した。J3-T-PM(Si)の主な機能としては、オンチップの温度センサー、電流センサーを搭載し、J3-T-PM(SiC)については、多機能チップを内蔵することで、DESAT(Desaturation) Diode、温度センサー、バランス抵抗を内蔵しており、また、SC(Short Circuit)保護用の制御端子であるSCM (Short Circuit Monitor)を持っている。

表1 - J3-T-PMスペック

	J3-T-PM(Si)	J3-T-PM(SiC)
デバイス	Si RC-IGBT	SiC MOSFET
定格電流	400A	350A
定格電圧	750V	1,300V
等価回路図 搭載機能	<ul style="list-style-type: none"> ・オンチップ温度センサー ・オンチップ電流センサー 	<ul style="list-style-type: none"> ・DESAT Diode ・温度センサー(チップ外部) ・SCM端子(SC保護用)

2.3 J3シリーズでの新規要素技術

モジュールの高出力密度化、スケーラビリティを達成するために、J3シリーズでは前世代T-PMに対して複数の新規要素技術を適用して、性能改善を図っている。各要素技術について詳細を述べる。

- (1) モジュール縦構造改善による熱抵抗低減
- (2) 多機能チップ搭載による高機能化、及び高出力密度化
- (3) SCMによる高速短絡保護

2.3.1 モジュールの縦構造改善による熱抵抗低減

第2世代T-PM⁽³⁾であるJシリーズでは、パワー素子の冷却構造として素子直下にはんだを介して厚みのある銅(ヒートスプレッド)を配置し、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シートを配置した構造にしていた。しかしながら、モジュールと冷却フィンとの接続にグリースを用いる必要があり、放熱性能が低い、ばね機構など複雑な押さえ機構が必要などの課題があった。

今回のJ3シリーズでは、構造変更による放熱性能改善を図っており、冷却フィンに実装した形態で、Jシリーズと比較して熱抵抗($R_{th(j-w)}$)が37%低減している(図5)。

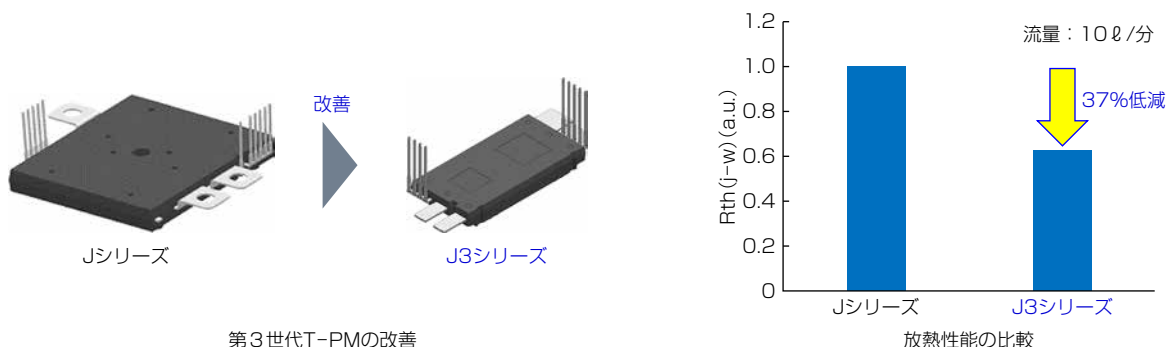


図5 - J3シリーズの構造改善と熱抵抗低減効果

2.3.2 多機能チップ搭載による高機能化, 及び高出力密度化

SiCモジュールでは他並列チップで構成されることが多く、各パワーチップの電流バランスを保つためにバランス抵抗がモジュール内部に配置されている。また、温度モニターを目的とするサーミスタも配置されていることから、それぞれに応じた制御パターンが必要になって、小型化、高出力密度化を阻害する要因になっている。

今回のJ3シリーズでは複数の機能(DESAT Diode, 温度センサーDiode, ゲートバランス抵抗, ソース配線)を集約した多機能チップを搭載することで、小型化、高出力密度化を図っている(表2)。

表2-多機能チップ搭載による利点

No.	搭載機能	利点
1	DESAT Diode	制御基板へのDESAT Diodeの搭載が不要になり、制御基板の設計を簡素化可能
2	温度センサーDiode	サーミスタ搭載構造に対して熱時定数が小さく、温度の応答速度が速い
3	バランス抵抗	複数のバランス抵抗が1チップに集積されており、バランス抵抗を搭載する内部配線, SiCチップ内へのバランス抵抗搭載が不要
4	ソース配線パターン	ソース配線を持つことで、複数チップのソースショートが可能 ソース信号のための内部配線が不要

2.3.3 SCMによる高速短絡保護

SiC-MOSFETは低オン抵抗が特徴の素子であり、その背反として飽和電流が大きくなるため、短絡電流保護設計が肝要になる。SiCモジュールではDESAT保護が採用されているが、ブランキング時間等の考慮が必要になるため、短絡電流の検出時間に限界があった。この課題を解決するために、SCM端子を用いた高速短絡保護技術を開発した。SCM端子はS端子に対して寄生インダクタンス成分を持っており、短絡電流が発生した際のdi/dtとこの寄生インダクタンスによって発生した逆起電力を用いて、制御基板上に構成された検出回路を介してゲート電圧を早期に抑制し、その後従来のDESAT保護方式で遮断する。この方式は従来のDESAT保護方式と比較して、短絡エネルギーを70%程度低減可能になることを確認している(図6)。

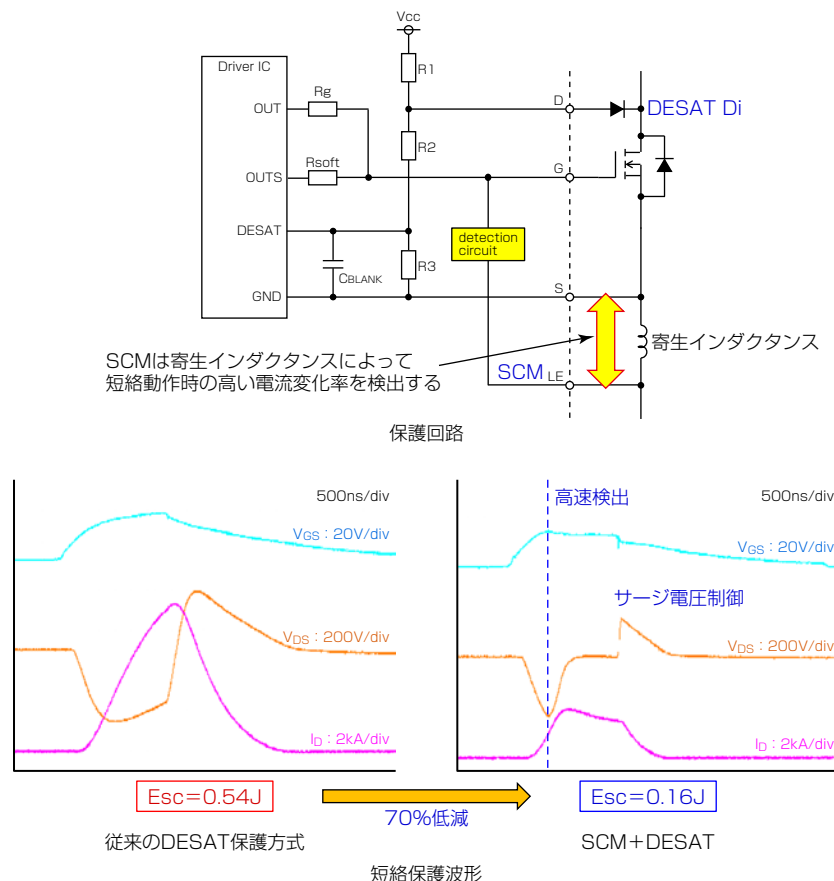


図6-SCM端子を用いた高速短絡保護

3. む す び

当社は、車載用パワーモジュールを開発、製品化することで、20年以上にわたって自動車の電動化の発展に貢献してきました。これまで培ってきたトランスファーモールド技術や放熱フィンの一体化技術に加えて、最新世代のRC-IGBT、トレンチ型SiC-MOSFETによる低損失化、多機能チップの適用等による小型、高出力密度化、2in1回路構成単位の組合せによってスケラビリティを実現するJ3シリーズを開発中である。これからより一層加速する電動化に貢献するためにも、当社はSi、SiCデバイス技術、パッケージング技術に対して更なる要素技術開発、及び製品化を継続して進めていき、環境保全や持続可能社会の実現へ貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 菅原勝俊, ほか: 低損失化を実現する新構造SiCトレンチMOSFET, 三菱電機技報, **96**, No.3, 160~163 (2022)
- (2) 曾根田真也: xEVに向けたSi-IGBT技術, 車載テクノロジー, **8**, No.12, 30~35 (2021)
- (3) 河面英夫, ほか: 自動車用SiCパワーモジュール, 三菱電機技報, **96**, No.3, 144~147 (2022)

