



島 顕洋\*



佐藤克己\*\*

# パワーモジュールの最新動向と展望

Latest Trend and Prospect of Power Module Technology

Akihiro Shima, Katsumi Sato

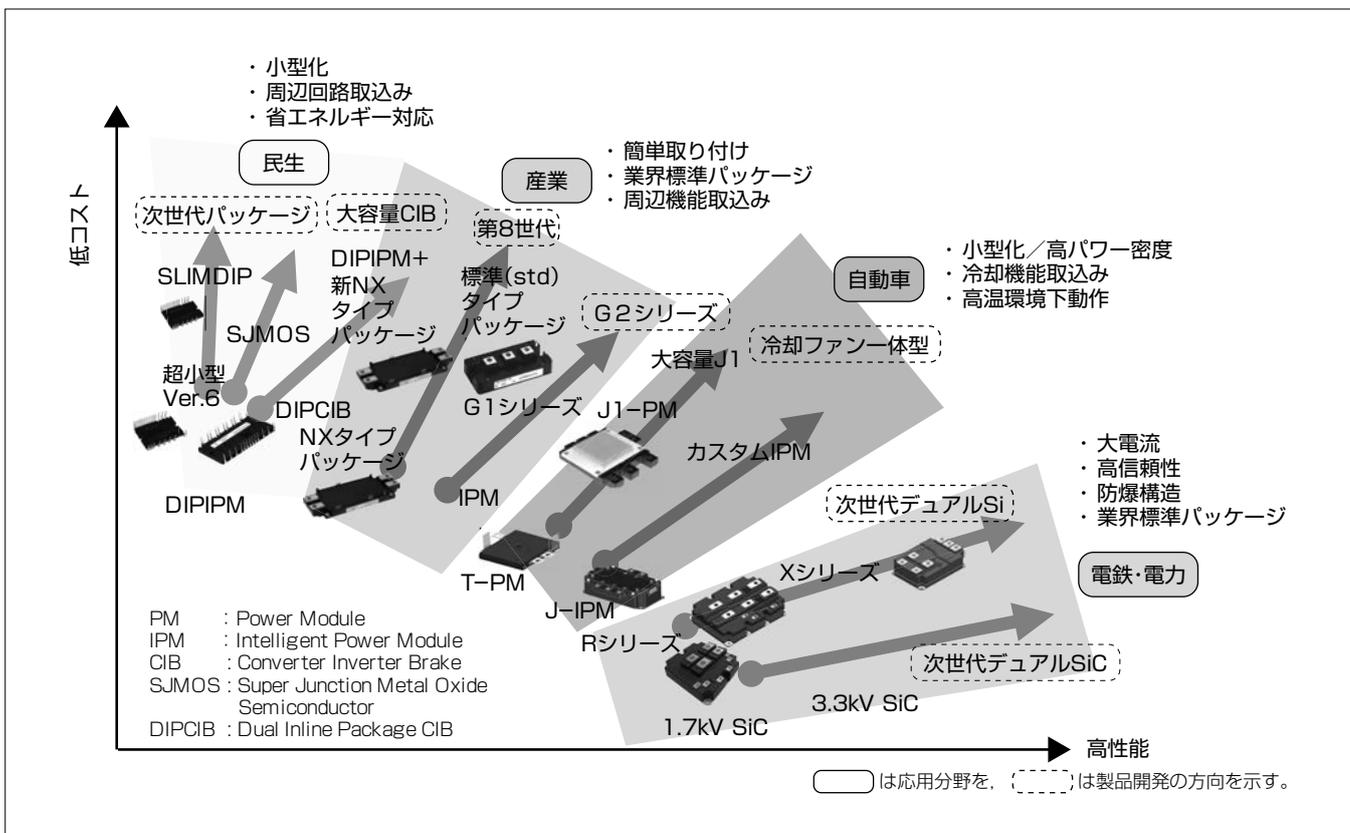
## 要 旨

電気エネルギーの有効利用が急務である。パワーエレクトロニクス(PE)技術は、省エネルギーに貢献するのはもちろんのこと、創エネルギー(太陽光発電や風力発電、地熱発電などのCO<sub>2</sub>を排出しない電気エネルギーの創造)技術の効率化を可能にする、電気エネルギー有効利用の中核的な技術である。応用分野は拡大しており、PE機器市場は高い成長率を保ち続けている。

PE機器の心臓部に当たる重要部品がパワーデバイスであり、パワーデバイスの性能がPE機器の性能を左右すると言っても過言ではない。三菱電機は、バイポーラデバイスの優れた通電性能を持ち制御が容易なSi(Silicon)-IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)チップとモジュールパッケージ技術とを組み合わせることで、百W

級から数MW級までのパワーモジュールをラインアップして、民生から産業、自動車、電鉄・電力までの応用分野のPE応用機器に対応してきた。

PE機器の応用分野拡大に伴って、ユーザーのパワーモジュールへの主たる要求は多様化し始めている。最新のSiチップ改良技術(第7世代技術)やSiC(Silicon Carbide)デバイス技術の確立・導入を進めて低損失化や高密度実装による小型・軽量化を推進し、さらに、EMI(Electro Magnetic Interference)の改善技術やユーザー側の設計・組立てを簡素化するための高機能化、生産性向上にも取組み、それらの技術を選択的に組み合わせたバランス設計でコスト低減を実現しながら、それぞれの応用からの多様な要求に応じていく。



## パワーモジュール製品の普及・拡大に向けた製品開発トレンド(多様な製品群)

定格耐電圧が数百Vから数千V、定格電流が数Aから数千Aの大きな容量領域をカバーするパワーモジュールは、民生、産業、自動車及び電鉄・電力などの応用機器に使用されている。応用分野の拡大に伴って、パワーモジュールへの要求が多様化しているが、高性能化技術と低コスト化技術を基盤技術として継続的に改良するとともに、用途に応じた技術の取捨選択を行って製品化を進めていく。

### 1. ま え が き

PE機器の中核部品であるパワーデバイス(主にSi-IGBT)の絶え間ない性能向上で、数Aから数千Aまでの電流量を、また数百Vから数千Vまでの定格電圧を持つパワーモジュールを実現しており、PE機器の発展に大きく貢献してきた。今後も、SiチップやSiCチップ、それらのパッケージ技術がPE機器の性能改善に貢献するであろう。

性能改善という大きな潮流に加えて、PE機器の普及拡大に伴って要求の多様化という新たな潮流が始まっている。これからのパワーデバイスには、応用分野ごとの性能改善と多様化のバランス設計が重要な技術となるであろう。

当社は、機器の低損失化、小型・軽量化要求に応えるために、Si-IGBTやSiCチップなどの主たる半導体チップ技術と高密度パッケージ実装技術を基盤技術として要素技術を確立していく。さらに、多様化に応える技術として、ユーザー側の設計や組立ての負荷軽減のための高機能化技術やEMIの改善に取り組んでいく。基盤技術と多様化技術を応用分野ごとに取捨選択したバランス設計でコスト低減を図りながら、高性能化、小型・軽量化、高機能化を進めていく。

本稿では、バランス設計を推進している当社のパワーモジュールの最新動向と展望について述べる。

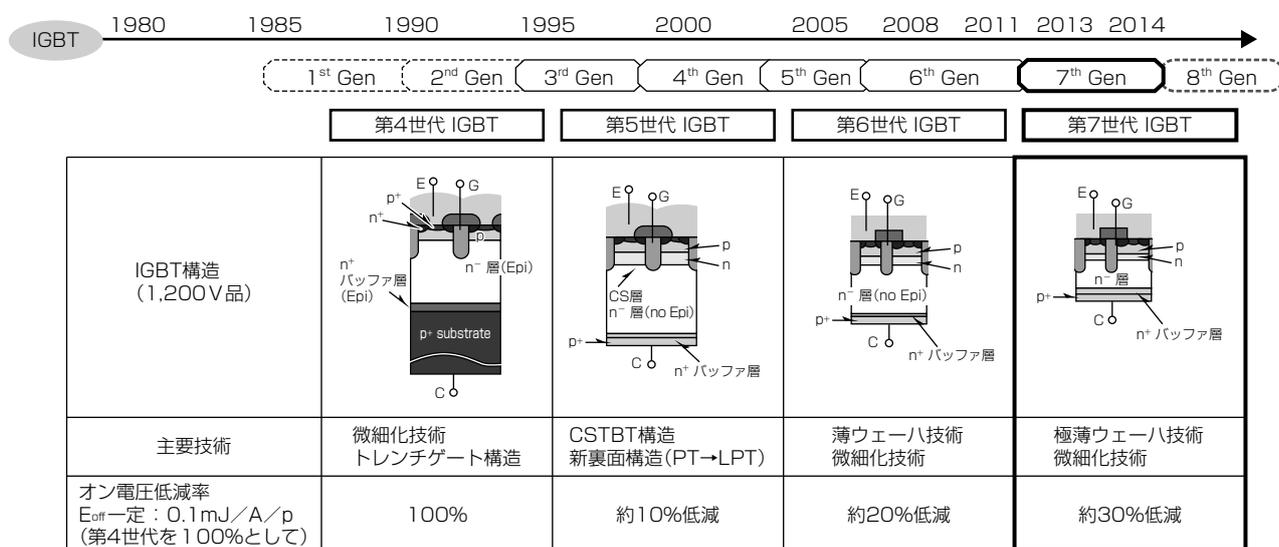
### 2. パワーモジュール技術の最新動向

#### 2.1 パワーチップ技術

現在のパワーモジュールの主力チップはSi-IGBTとSiダイオードである。Si-IGBTは、1980年代半ばの実用化以降、数年ごとに世代交代を繰り返して、低損失化が図られてきた。現在、当社のIGBTは第7世代まで進化している。第7世代技術(本号23ページ)では、MOS(Metal

Oxide Semiconductor)ゲート構造を持つ表面の超微細加工技術、極薄デバイスの高精度な加工・設計の技術を総称した極薄ウェーハ技術、表面だけでなく裏面にも回路を形成する裏面パターンニング技術を中核技術としている。これらの新技术を用いた第7世代IGBTは、2014年に民生用の“DIPIPM”に最初に搭載された。それ以降、産業用及び自動車用、電鉄・電力用として1,200V品から6,500V品までシリーズ化開発している<sup>(1)(2)</sup>。図1に1,200V IGBTの第4世代から第7世代までの進化(断面構造と電力損失低減効果)を示す。世代が進むにつれて、Si-IGBTチップの厚さは薄くなり、第7世代IGBTはpn接合の耐压保持に必要な厚さの理論限界にまで近づいている。この厚さの低減と極薄チップの最適設計によって、諸性能悪化を招くことなく、オン電圧(コレクター-エミッタ間飽和電圧( $V_{CEsat}$ ))の低減を実現している。 $V_{CEsat}$ はターンオフスイッチング損失( $E_{off}$ )とトレードオフ関係があるため、同一の $E_{off}$ 値(0.1mJ/A/p)で比較した。その結果、第7世代IGBTの $V_{CEsat}$ は第4世代IGBTの $V_{CEsat}$ の70%にまで低減改善している。

パワーモジュール内でIGBTチップと逆並列に接続される還流用FWD(Free Wheeling Diode)でも、順電圧( $V_F$ )と逆回復損失( $E_{rec}$ )のトレードオフ関係の改善を図っている。改善に用いた主要技術は、極薄ウェーハ技術と裏面パターンニング技術である。図2に、従来のFWDと第7世代FWD(RFC(Relaxed Field of Cathode)-Diode)の断面構造及び $V_F$ と $E_{rec}$ のトレードオフ関係を示す。カソード側(裏面)にpn接合で回路を形成したことで、逆回復動作時のn-層中の電荷量を制御でき、その結果として $E_{rec}$ を40%低減した。カソード側への回路形成は、低電流時の逆回復動作でしばしば発生する電圧振動(リングング)を抑制する効果も併せ持ち、モジュールのEMI改善にも役立っている。



CSTBT: 電荷蓄積型IGBT, CPT: Punch Through, LPT: Light Punch Through, Epi: Epitaxial

図1. IGBTの進化(断面構造と電力損失低減効果)

Siチップに比べて能動層の厚みを10分の1ほどにすることが可能なSiCチップは、オン電圧とスイッチング損失のトレードオフ関係を劇的に改善できる。既に、600Vから3,300VまでのSBD(Schottky Barrier Diode)チップ及びMOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor(本号11ページ及び15ページ))チップを製品化して、モジュールの更なる低損失化を進めている。

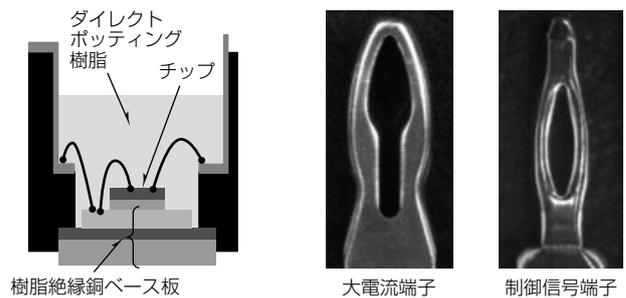
2.2 パッケージ技術

トランスファーモールドパッケージでは、更なる高密度実装技術の開発に注力した。従来のDIPIPMでは14~16個のチップを一括でモールドアセンブリしていたが、高絶縁・高放熱性能と高流動性を両立させるモールド材料の開発・導入によって、20数個までのチップを一括モールドアセンブリできるようにした。この技術開発で、DIPIPMにコンバータ回路とブレーキ回路を付加することが可能になり、モーター駆動用のインバータシステムとして必要なパワー部主回路全てを内蔵した高実装密度のパワーモジュール“DIPIPM+シリーズ”(本号39ページ)を製品化した<sup>(3)</sup>。

ケースタイプパッケージでは、ユーザーの利便性、小型・軽量化を追求したパッケージを開発している。産業用では、樹脂絶縁銅ベース板構造を新たに開発・導入したことでコスト低減と高放熱性能を両立させている。さらに、はんだを使用せずにプリント基板へ高信頼度の圧着

接続が可能な独自の新型プレスフィット接続端子付きパッケージ(図3)や、ユーザー組立て時にモジュールへのグリス塗布を不要にしたPC(Phase Change)-TIM(Thermal Interface Material)付きパッケージ(図4)などを製品化(本号27ページ)している。

自動車用では、接合-フィン間の熱抵抗を20%低減し、更にフィンの材質を最適化して製品質量を半減させた冷却フィン一体型の大容量パッケージ“大容量J1シリーズ”(本号47ページ)(図5)を、電鉄・電力用では、直並列接続が容易な電極端子を持つ次世代デュアルパッケージ(図6)を開発して、順次製品化を図っている。



(a) 樹脂絶縁銅ベース板構造導入パッケージの断面構造 (b) プレスフィット接続端子の形状

図3. ケースタイプパッケージの新技术

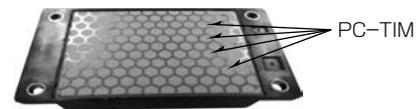
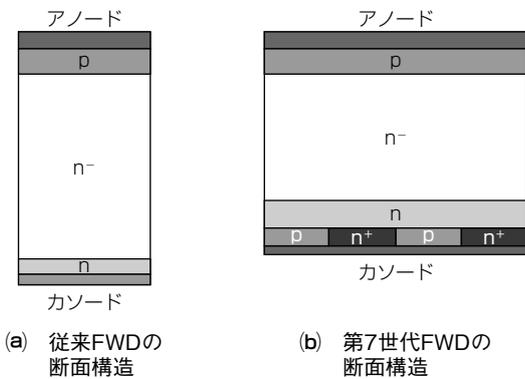
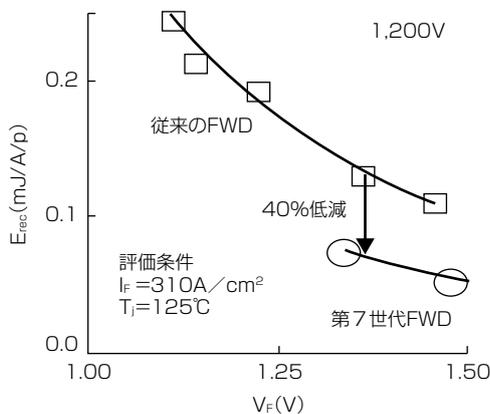


図4. 銅ベース板に塗布されたPC-TIM

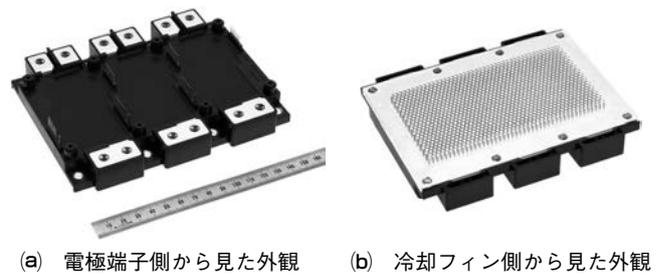


(a) 従来FWDの断面構造 (b) 第7世代FWDの断面構造



(c) FWDの順電圧(V<sub>F</sub>)と逆回復損失(E<sub>rec</sub>)のトレードオフ関係

図2. FWDの断面構造とV<sub>F</sub>-E<sub>rec</sub>のトレードオフ関係



(a) 電極端子側から見た外観 (b) 冷却フィン側から見た外観

図5. 大容量J1シリーズの冷却フィン一体型パッケージ

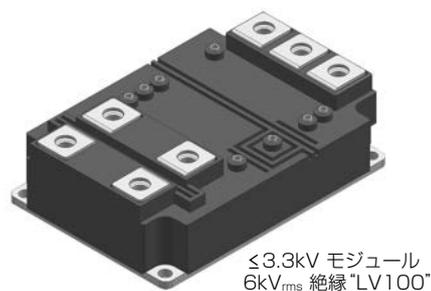


図6. 次世代デュアルパッケージ

### 3. 市場別の製品技術と展望

#### 3.1 民生応用製品

民生用パワーモジュールの最大市場であるエアコンへの応用では、省エネルギー性能を示すAPF(Annual Performance Factor)国内基準が適用されていることから、DIPIPMには低損失化が要求されている。そこで、IGBTに比べて低電流動作時の損失を小さくできるSJ(Super Junction)-MOSFETと、急冷などの過負荷動作にも対応できるようにIGBTと並列接続したSJ-MOSFET内蔵DIPIPMを開発・製品化した。SJ-MOSFET内蔵DIPIPMの損失は国内最高レベルのAPF性能をもたらすが、更なる高性能化に対応する技術として、SiC-MOSFETを内蔵したフルSiC DIPIPMの製品化も進めている。定格電圧600V、電流容量15Aの従来のDIPIPMとSJ-MOSFET内蔵DIPIPM、フルSiC DIPIPMの損失比較を図7に示す。損失評価条件は、電源電圧( $V_{cc}$ ) = 250V、出力電流( $I_o$ ) = 1.5Arms、接合部温度( $T_j$ ) = 25°C、キャリア周波数( $f_c$ ) = 5 kHz、力率(P.F) = 0.95、変調率(M) = 0.8(暖房中間)である。SiC-MOSFETを内蔵したフルSiC DIPIPMは、高性能SJ-MOSFET内蔵DIPIPMと比べても50%以上の大幅な損失低減が可能である。

欧米の低容量民生市場では、価格面メリット等の観点からディスクリットデバイスが用いられている。“SLIMDIPシリーズ”(本号43ページ)は、第7世代IGBT技術を活用してIGBTとFWDを一体化(Reverse-Conducting IGBT: RC-IGBT)することで、従来の性能・機能を損なうことなくパッケージ体積を30%小型化した<sup>(4)</sup>。この小型化は、金属フレームの単位面積当たりの製品取れ数を高めて、生産性を向上させる。図8に、従来の超小型DIPIPMとSLIMDIPの外観を示す。

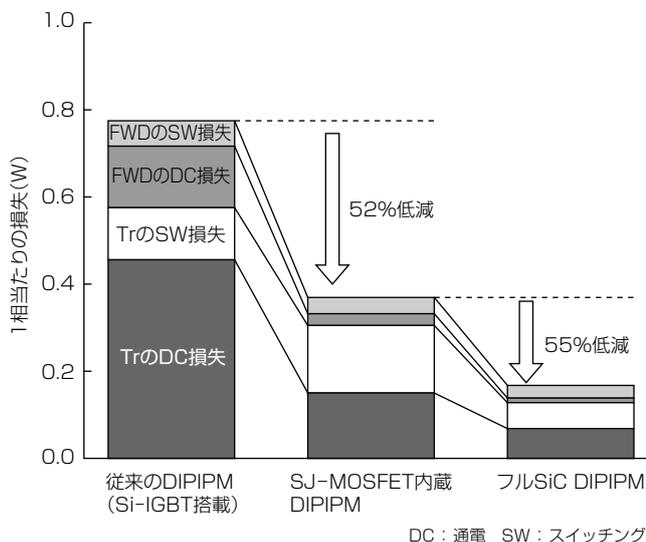


図7. DIPIPMの損失比較

#### 3.2 産業応用製品

産業用モジュールは、“NXタイプパッケージ”をベースに製品展開を行ってきたが、応用分野の広がりや分野別のモジュールへの要求が多様化し始めていることから、NXタイプパッケージに加えて当社標準(従来の“NFシリーズ”互換IGBTモジュール仕様)(std)タイプパッケージでも製品化を進めた。両パッケージでの製品化に当たり、第7世代チップ技術と樹脂絶縁銅ベース板構造、PC-TIM、プレスフィット接続端子を選択・組合せして、低損失化と利便性向上を実現している。IPMにも同様の技術を導入して“G1シリーズ”(本号35ページ)として製品化している。

図9にG1シリーズIPMと従来のIPMのEMIノイズ評価結果を示す。周波数50MHzから100MHzの領域にわたってEMIノイズが5dB $\mu$ V/m程度低く、改善しているのが分かる。スイッチング時の電流の時間変化率(di/dt)制御性改善及びFWDのリングングの抑制がEMIノイズ低減に寄与している。

さらに、今後機能の拡充やSiCデバイスの採用などでモジュールの性能向上を実現していく。SiCデバイスを用いた性能向上に当たっては、SiC材料が高価であるため、FWDだけをSiC化したハイブリッドモジュールとトランジスタまでSiC化したフルSiCモジュールを用途・要求性能ごとに使い分けすることを提案していく。フルSiCモジュールはハイブリッドモジュールと比べて損失を半分以

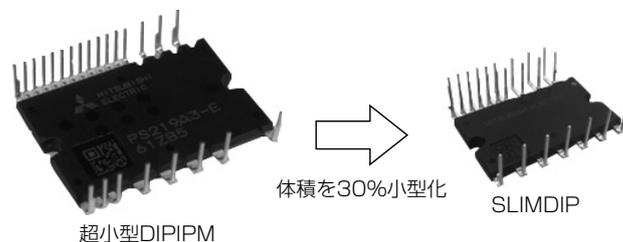


図8. 超小型DIPIPMとSLIMDIP

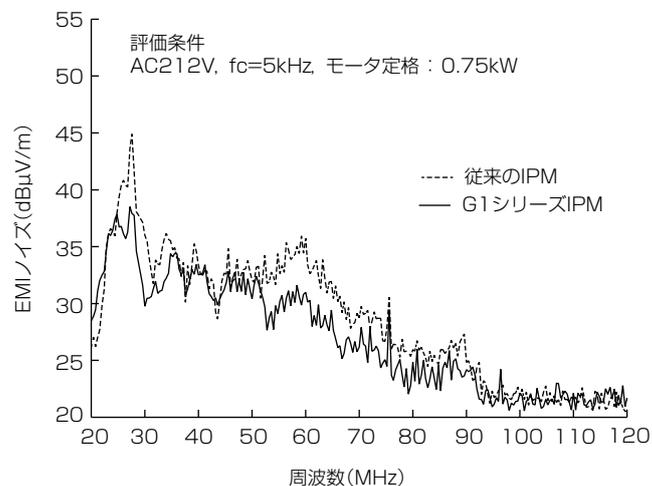


図9. 650V/100A IPMのノイズ評価結果

表1. 大容量J1シリーズの製品ラインアップ

形名	定格電圧	定格電流	結線方式
CT600CJ1B120	1,200V	600A	6in1
CT1000CJ1B060	650V	1,000A	6in1

下にでき、高周波動作も可能であるため、数十kHzの動作が必要な高周波電源機器応用などに展開してSi-IGBTやハイブリッドモジュールとすみ分けしていく。

3.3 自動車応用製品

自動車市場では、トランスファーモールド技術を適用することで長寿命化と小型化を両立させたトランスファーモールド形パワーモジュール(T-PM)を主力製品と位置付けてきたが、より一層の小型・軽量化を目的に冷却性能を高めた冷却フィン一体型パワーモジュール“J1シリーズ”をT-PMの後継として製品化してきた。さらに、自動車の電動化を見据えて、ラインアップ強化のための大容量の冷却フィン一体型パワーモジュール“大容量J1シリーズ”を新たに開発中である。大容量J1シリーズは、J1シリーズに用いたT-PM 6台とCu冷却フィンを一体化した6in1製品であり、実装面積を約60%縮小改善している。表1に大容量J1シリーズの製品ラインアップを示す。併せて、今後個別ユーザー対応のカスタムIPM開発にも必要に応じて対応していく。

3.4 電鉄・電力応用製品

電車への応用では、耐電圧3.3kV電流定格1,500Aや耐電圧6.5kV電流定格750AのHV(High Voltage)-IGBTを“Rシリーズ”として拡充してきたが、洋上風力発電市場や電力国際連携のためのHVDC(High Voltage DC Transmission)市場等の電力応用市場には更なる大容量化が必要とされる。第7世代IGBTチップ技術を適用することで、Rシリーズと同一パッケージでありながらRシリーズ比で電流量を20%から30%ほど増加改善させた“Xシリーズ”(耐電圧6.5kV電流定格1,000AのHV-IGBT)を製品化した<sup>(5)</sup>(本号51ページ)。間もなく耐電圧3.3kV電流定格1,800AのHV-IGBTも製品化を完了する予定である。Xシリーズは、損失の大幅低減も実現している。図10に、耐電圧6.5kV電流量1,000Aモジュール(Xシリーズの“CM1000HG-130XA”)の $V_{CEsat}$ と $E_{off}$ のトレードオフ曲線を示す。併せて、従来製品(Rシリーズの“CM750HG-130R”)の実力値も示す。同一の $E_{off}$ 値(=6J)で比較すると、従来のCM750HG-130Rに比べて、CM1000HG-130XAの $V_{CEsat}$ は35%も小さく、通電損失の大幅な低減を実現している。シリーズ化製品を順次市場へ投入して、順応性の高い電力基盤網の構築に寄与していく。

一方、デバイスのスイッチング性能の向上によるリアク

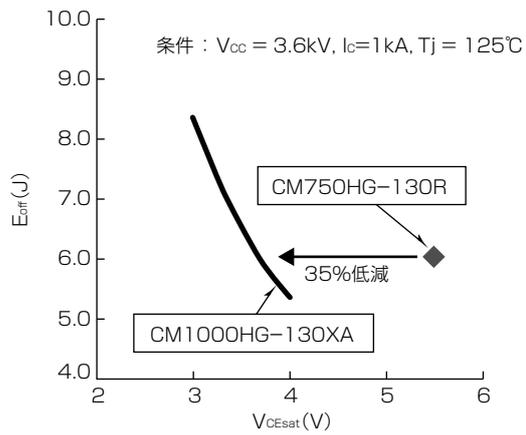


図10. 6.5kV HV-IGBTの $V_{CEsat}$ と $E_{off}$ のトレードオフ関係

トルの小型化など、高付加価値をシステム機器にもたらし応用では、SiCを用いた製品の継続的な拡充を進めていく。

4. むすび

第7世代チップ技術、SiCチップ技術や高密度実装パッケージ技術を基盤技術として、低損失化、小型・軽量化、低ノイズ化のニーズに応えている。さらに、それぞれの応用分野の動向をつかみ、ラインアップの充実化、プレスフィット端子設計技術及びPC-TIM技術などの機能充実化技術を選択的に基盤技術に組み合わせるバランス設計を進めている。これによって、低コスト化を図りながらユーザーの多様なニーズにもタイムリーに応じて、事業を進展させ、低炭素社会の実現に貢献していく。

参考文献

- (1) Miyazawa, M., et al.: 7<sup>th</sup> Generation IGBT Module for Industrial Applications, PCIM Europe 2014, 34~38 (2014)
- (2) Ohara, K., et al.: A New IGBT Module with insulated Metal Baseplate(IMB) and 7<sup>th</sup> Generation Chips, PCIM Europe 2015, 1145~1148 (2015)
- (3) Yamaguchi, K., et al.: A New Version Transfer Mold-Type DIIPM<sup>TM</sup>s with built-in Converter and Brake function, PCIM Asia 2015, 272~276 (2015)
- (4) Shibata, S., et al.: New Transfer-Molded SLIMDIP for white goods using thin RC-IGBT with a CSTBT<sup>TM</sup> structure, PCIM Europe 2015, 1149~1154 (2015)
- (5) Ota, K., et al.: The Next Generation 6.5kV IGBT Module with High Robustness, PCIM Europe 2014, 28~33 (2014)