特集論文

次世代自動車用パワー半導体モジュール“J1シリーズ”

石原三紀夫* 山田一樹**
日山一明* 中野俊哉*
川瀬達也*

Next Generation Power Module for EVs and HEVs "J1 Series"

Mikio Ishihara, Kazuaki Hiyama, Tatsuya Kawase, Kazuki Yamada, Toshiya Nakano

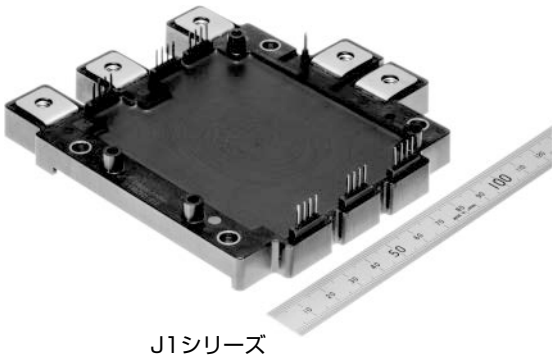
要　旨

地球環境保護意識の高まりを受け，市場が拡大している電気自動車(EV)・ハイブリッド車(HEV)で，それらのモータを駆動するパワー半導体モジュールが車両性能をつかさどる重要部品となっている。三菱電機は業界に先駆け，1997年から自動車用パワー半導体モジュールの量産を開始しており，その後，三菱電機製品は様々なEV・HEVに搭載されている。

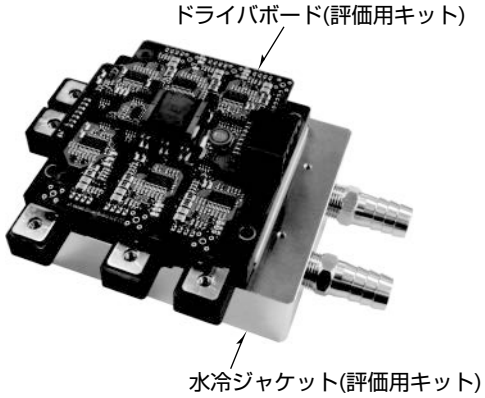
近年のEV・HEVの進化は目覚ましく，キーパーツであるパワー半導体モジュールについても，高性能・小型・軽量化が求められている。

こうした中，三菱電機は“高性能”“小型・軽量化”をコンセプトとした次世代自動車用パワー半導体モジュール“J1シリーズ”を開発している。コンセプト実現のために冷却フィン一体型の直接水冷構造パッケージを開発し，従来製品(“JシリーズT-PM(Transfer-molded Power Module)CT600DJH060[1]”3台をCu冷却フィンに放熱グリスを介して取り付けたもの)に比べて熱抵抗30%削減，実装面積40%縮小，製品質量76%軽量化を実現した。

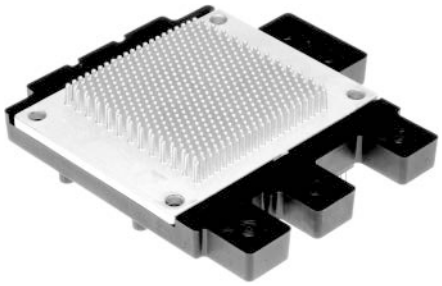
また，この製品をユーザーで評価してもらうための評価用キットとして“ドライバボード”“DC-Linkキャパシタ”“水冷ジャケット”を製品と併せて新規に設計・開発した。ドライバボードは，新たに開発したSC(過電流保護)トリップレベル温度補正回路などを追加しながら，J1シリーズの外形サイズ以下に収めている。



J1シリーズ



J1シリーズ用評価キットの実装例



J1シリーズ(裏面側)

J1シリーズ製品ラインアップ

製品名	形名	定格電圧	定格電流	結線方式
J1シリーズ	CT600CJ1A060	650V	600A	6 in 1
	CT400CJ1A090	900V	400A	6 in 1

“J1シリーズ”製品の外観とラインアップ及びJ1シリーズ用評価キットの実装例

“高性能”，“小型・軽量化”をコンセプトとしたEV・HEV向けのパワー半導体モジュール“J1シリーズ”を開発している。
製品ラインアップは650V／600A及び900V／400Aの2品種でJ1シリーズ評価キットを併せて開発し，ユーザーでの製品評価をサポートしている。

*パワーデバイス製作所　**メルコセミコンダクタエンジニアリング㈱

1. まえがき

電気自動車(EV)やハイブリッド車(HEV)等の環境適合車には省エネルギーの観点から低損失で小型・軽量なパワー半導体モジュールが求められている。

三菱電機はこうした市場要求に応える新たな自動車用パワー半導体モジュールとして“J1シリーズ”の開発を行っている。また，様々なユーザーにこの製品を評価するための評価キットも併せて開発している。

本稿では，“J1シリーズ CT600CJ1A060(定格電圧／定格電流：650V／600A)”及びJ1シリーズ用評価キットの特長について述べる。

2. J1シリーズの特長

2.1 J1シリーズ開発コンセプト

J1シリーズはIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)とダイオードを各6素子搭載し(6in1)，冷却フィンと一体化した直接冷却構造を持った自動車用パワー半導体モジュールである(**図1**)。この製品の開発に当たっては，多数のユーザーから三菱電機製車載用パワーモジュールに対する要望を集め，分析することで次の(1)～(3)の開発コンセプトを策定した。これらのコンセプトの達成によって，シェア拡大を実現することを目的として開発を行っている。

(1) 高性能

冷却フィン一体型の直接冷却構造によって，従来製品“JシリーズT-PM”で必要であった放熱グリスが不要となり，放熱性能を改善した。さらに，フィン形状・配列の最適化やパッケージ内部構造の見直し等によって，チップ－冷却水間の熱抵抗Rth(j-w)を30%以上改善した。これによって，通電能力向上などの高性能化を実現することができた。

(2) 小型・軽量化

搭載スペース小容量化や燃費性能向上のために，パワーモジュールには小型で軽量な製品が求められている。J1シリーズでは，従来製品(JシリーズT-PMCT600DJH060 3台をCu冷却フィンに放熱グリスを介して取り付けたもの)に対して，①6in1結線構造採用によるチップ配置の高集積化，②アルミ放熱フィンの採用によって，実装面積の40%縮小(注1)と製品質量の76%軽量化(注2)を実現した。

(3) 市場ニーズにマッチした製品ラインアップの整備

市場ニーズを分析した結果，“650V／600A 6in1”“900V／400A 6in1”の2品種を先行機種として開発を開始した。今後は，更なるニーズに応じた定格の製品をラインアップすることを予定している。

(注1) J1シリーズ120×115(mm)，従来製品220×105(mm)
(注2) J1シリーズ335g，従来製品1,380g

2.2 回路構成

図2にJ1シリーズの回路構成を示す。J1シリーズは製品外形サイズの小型化及びユーザーでの効率的な取付けを実現するために，6in1結線方式を選択した。また，各IGBTすべてに，短絡保護を行うための電流センスと過熱保護のためにチップ温度を直接モニタ可能なオンチップ温度センスダイオードを配置した。

2.3 熱抵抗

図3に冷却水流量に対する，CT600CJ1A060のチップ－冷却水間の熱抵抗Rth(j-w)の測定結果を示す。評価に用いた水冷ジャケットはJ1シリーズ用評価キットを用いた。冷却水はLLC(Long Life Coolant)50%，冷却水の流量が10(ℓ/min)の条件で，Rth(j-w)＝0.163(K/W)を達成し，従来製品に対して30%以上の熱抵抗改善を実現した。

2.4 通電能力検証結果

電気的特性と熱抵抗の評価結果からJ1シリーズの通電能力を検証した。キャリア周波数fc＝5(kHz)，冷却水温度Tw＝65(℃)，冷却水流量＝10(ℓ/min)の条件で，電気的

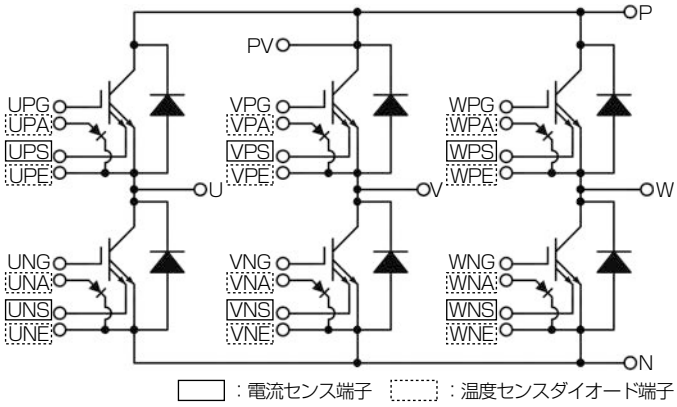


図2．J1シリーズ等価回路

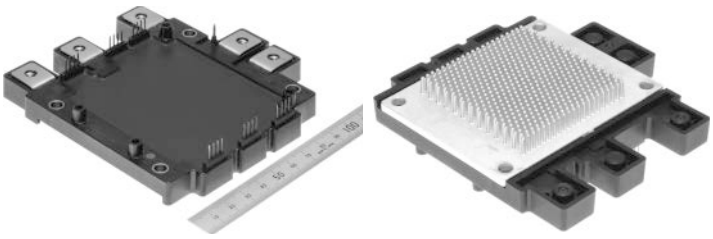


図1．J1シリーズ

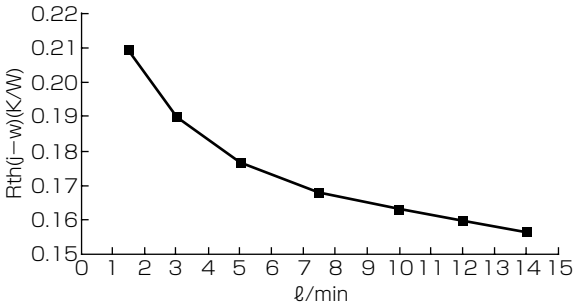
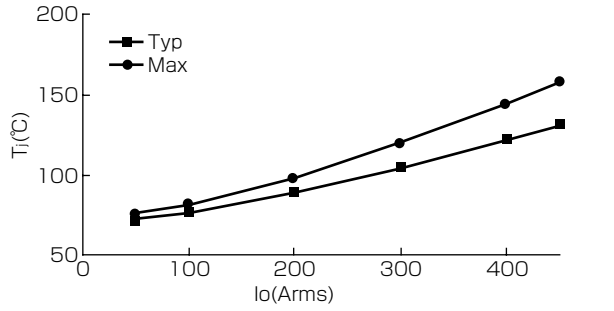


図3．CT600CJ1A060の熱抵抗測定結果(IGBT側)



fc=5(kHz)，Vcc=400V，力率=0.8，Tw=65℃，流量=10ℓ/min

図4．CT600CJ1A060の通電能力検証結果

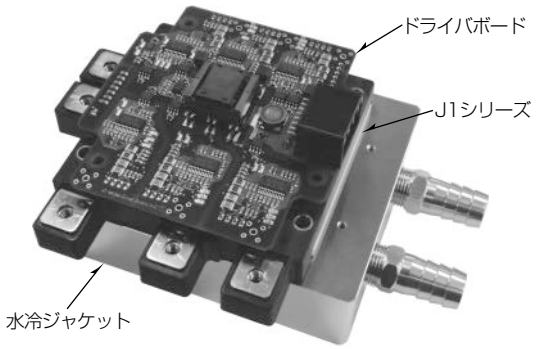


図5．評価キットの実装例

特性と熱抵抗をともに最大値とした場合でも，Tj＝150℃以下に収まり，出力電流600A（実効値で424（Arms））以上の通電が可能である（**図4**）。

3. J1シリーズ用評価キットの特長

評価キットはドライバボード，DC-Linkキャパシタ，水冷ジャケットで構成しており，J1シリーズの“高性能”“小型・軽量化”という特長を更に高めるために最適化している。評価キットはテストベンチでのJ1シリーズ評価用として開発している。**図5**にドライバボードと水冷ジャケットをJ1シリーズに組み合わせた写真を示す。ここではドライバボードと水冷ジャケットについて述べる。

3.1 評価用ドライバボード

評価用ドライバボードは，三菱電機製ゲートドライバIC“M81741JFP”によるIPM（Intelligent Power Module）相当のIGBTゲート駆動・保護機能（過熱保護（OT），過電流保護（SC），制御電源電圧低下保護（UV））と，ゲート駆動用のDC／DC電源，短絡保護回路，インターロック回路，PN間過電圧保護回路等を搭載する。OTとSCは，IGBTオンチップ電流センスとオンチップ温度センスダイオード出力を用いて実現している。

M81741JFPは，JシリーズT-PM及びJ1シリーズのゲート駆動・保護用として販売している。ドライバボードは，このM81741JFPの機能評価用としても活用できるよう，M81741JFPの主要出力信号モニタ用のテストポイントを設けている。

このドライバボードに採用したSCトリップレベル温度補正とゲートドライブバッファによるゲート駆動周辺回路を**図6**に示す。

従来IPMではIGBTオンチップ温度センスダイオードのバイアス電流を定電流回路から供給していたが，このドライバボードでは定電圧源（VREG：M81741JFPから供給）と抵抗だけ（抵抗プルアップ）で供給している。CT600CJ1A060のオンチップ温度センスダイオードの順方向電圧V_F値を，このドライバボードの抵抗プルアップと従来の定電流で測定した結果を**図7**に示す。抵抗プルアップは定電流方式に対し温度勾配が小さいが，Tj対V_F特性の直線性は同等となっており，OTなどの過熱保護への適用が可能である。

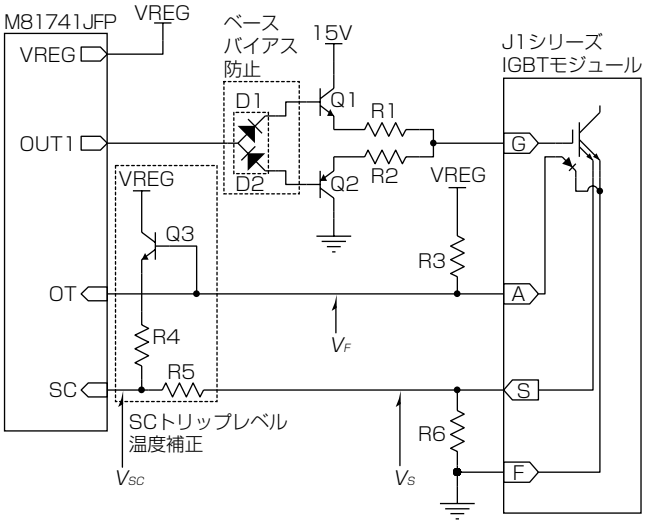


図6．ゲート駆動周辺回路

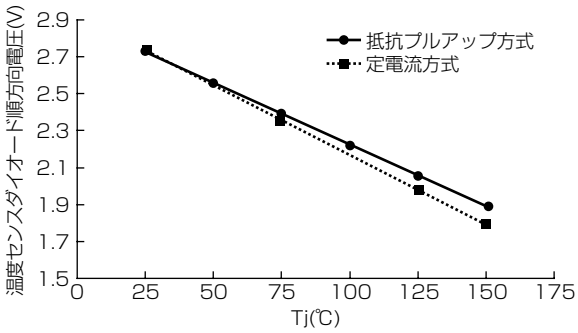


図7．オンチップ温度センスダイオードV_F値

SCトリップレベル温度補正は**図6**中のQ3，R4，R5で実現している。M81741JFPはSC端子の入力電圧が0.5Vを超えるとIGBTをソフト遮断させる。M81741JFPのSC端子入力電圧V_{SC}は，電流センス端子電圧をV_S，Q3のベース・エミッタ間電圧をV_{BE}とすると，

$$V_{SC} = V_S + \frac{R5}{R4+R5} \times \left(V_F - V_{BE} - V_S\right) \quad \cdots\cdots(1)$$

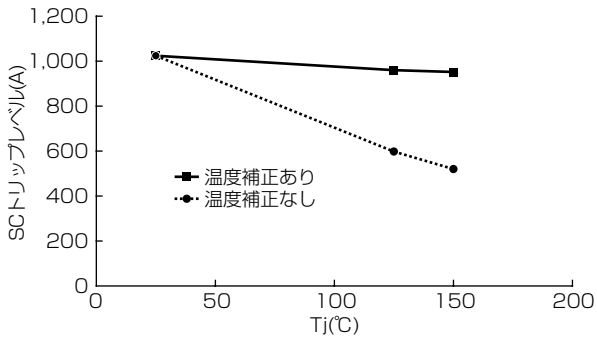
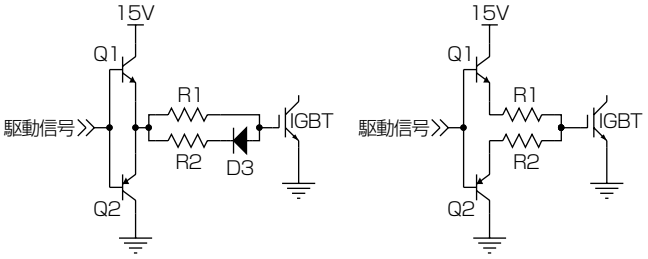


図 8．CT600CJ1A060 SCトリップレベルの温度特性



(a) ダイオード切替え　　(b) エミッタ分離

図 9．ゲート抵抗切替え方法

となり，オンチップ温度センスダイオード順方向電圧V_Fで増減でき，SCトリップレベルの温度特性の補正が可能となる。このドライバボードを用いCT600CJ1A060のSCトリップレベルを実測した結果を**図 8** に示す。SCトリップレベルの温度特性がキャンセルされ，温度特性が大幅に改善される。

従来の温度補正なしの場合，低温側でSCトリップレベルが増加する。一般にIGBTターンオフ時の電流が増加すると，サージ電圧も増加する傾向にある。よって，低温でSCトリップレベル近傍の電流からターンオフする際のサージ電圧を抑制するために，ターンオフ時のスイッチング速度を低減させる必要があり，その背反としてターンオフスイッチング損失が増加する問題があった。

SCトリップレベル温度補正回路の採用によって，最適なターンオフスイッチング速度の設定が可能となった。

ターンオンとターンオフのスイッチング速度を個別に設定するために，**図 9** に示すようにゲート抵抗をターンオン用とターンオフ用に分ける構成が取られる。**図 9**(a)のダイオード切替え方式は，IGBTターンオフ時のゲート電流に対応したダイオード D3を必要とする。**図 9**(b)のエミッタ分離方式はダイオードを必要としないが，**図10** に示すようにトランジスタQ1，Q2のベースに逆バイアスが印加されるため，ベース逆バイアス耐圧が高い素子を選定する必要がある。

このドライバボードでは，**図 6** に示すようにトランジスタQ1，Q2のベースと直列にダイオードD1，D2を配置し，ベースへの逆バイアス電圧印加を防止している。このダイオードD1，D2にはQ1，Q2のベース電流を流せる電流容量があればよく，**図 9**(a)のダイオード切替え方式のダイオードD3より小型の素子を適用できる。

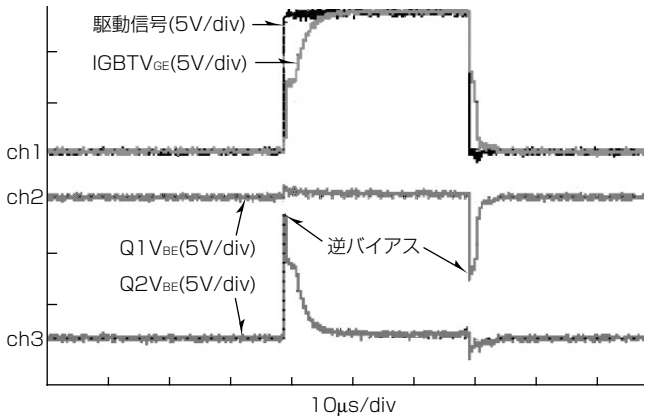


図10．ベース逆バイアス電圧

図11．J1シリーズ 評価用水冷ジャケット

3. 2　水冷ジャケット

水冷ジャケット(**図11**)は，ジャケット本体，Oリング，ホースニップルで構成し，水冷フィンを一体化したJ1シリーズの冷却能力を最大限に引き出せるよう最適化した。J1シリーズの特長である“小型”を損なわないよう，J1シリーズの外形サイズ以下に収めている。

4. む　す　び

EV･HEV市場の要求に応える新しい自動車用パワー半導体モジュールであるJ1シリーズ及びJ1シリーズ用評価キットについて述べた。このJ1シリーズは従来製品に対して“高性能”“小型・軽量化”を実現した製品であり，自動車用インバータの更なる発展に寄与できると考える。

また，この製品に最適化した駆動・保護回路を持ったドライバボードや水冷ジャケット等の評価キットを併せて開発し，評価のサポートを行っている。

今後は製品量産化に向けた開発を進めるとともに，ラインアップの拡充を行い，ユーザーに提供していく。

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）