

# ハイブリッド車モータ駆動用 IGBT モジュール

特集

市川 裕章 (いちかわ ひろあき)

市村 武 (いちむら たけし)

征矢野 伸 (そやの しん)

## ① まえがき

世界規模での地球温暖化抑制の流れを受け、自動車メーカー各社も環境問題、CO<sub>2</sub>削減に取り組んでいる。現在量産されているハイブリッド車はCO<sub>2</sub>排出量の少ないエコカーとして社会的認知度が高く、ここ数年で急速に普及しつつある。

ガソリンハイブリッドシステムは、エンジン効率の低い始動から低速時にモータでエンジンをアシストしたり、減速時に回生ブレーキで発電し効率よくバッテリーに充電することで燃費を改善するシステムである。

ハイブリッドシステムの主要コンポーネントは、モータとバッテリー、インバータで構成されている。この中でインバータはバッテリーからモータへの電力供給と、モータで発電したエネルギーをバッテリーに蓄える電力変換システムとして使われている。この電力変換システムの主スイッチングデバイスとして、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールを用いることが一般的になっている。

20年ほど前から産業設備を中心に利用されているIGBTモジュールは、エアコンなどの家電から鉄道に至る幅広い分野のモータを制御する電力変換装置に使われている。近年、自動車に適用範囲が拡大され、さらなる高性能化を目指して開発を進めている。

ハイブリッドシステムは、走行用モータと発電用モータの二つのモータを搭載する走行性能を重視したシステムと、一つのモータで走行と発電を併用する小型化を重視したシステムとに大別される。シングルモータのハイブリッドシステムはパラレルハイブリッドシステム（以下、パラレルハイブリッドという）と呼ばれ、小型化、軽量化のメリットが生かせる小型車への適用で今後普及が期待されている。

本稿では、パラレルハイブリッド用インバータに最適な自動車用IGBTモジュールを紹介する。

## ② ハイブリッド車用パワーデバイス

自動車の限られたスペースにインバータ、モータおよびバッテリーを搭載しハイブリッド化を実現するためには、システムの軽量化が必要である。パラレルハイブリッドを普及させるためには高価なインバータ、モータおよびバッテリーの容量を必要最小限とする必要があり、20kW以下のモータを用いるのが一般的である。パワーデバイスの性能を生かすためには、加速時にモータに流れる過渡的な最大電流によるデバイスの温度上昇を許容範囲内に抑えることが重要である。万一許容温度を超えた場合でもチップ温度を常時監視しモータ出力を制限する制御を組み込み、過電流によるデバイスの熱破壊を未然に防止できる安全設計を併わせ持つ必要がある。

また減速時に電力回生ブレーキ（389ページの「解説」参照）を用いることで、従来は油圧ブレーキから熱として放出されていたエネルギーを電気エネルギーとして回収し、再利用することも燃費改善につながる。減速から停止までの短い制動時間でいかに大きな電力を回収できるかが重要であり、そのためにも短時間で大電流が通電可能なデバイスが必要である。

## ③ 自動車用IGBTモジュールの特徴

### 3.1 製品仕様

製品外形写真を図1に、内部ブロック図を図2に、主要特性表を表1に示す。製品の特徴を以下に示す。

- (a) 20kW以下の三相モータ駆動インバータに必要な600V/300Aチップを専用の6in1パッケージに搭載
- (b) 第6世代チップである600V耐圧VシリーズIGBTを採用し損失低減と高電流密度化の実現（電流密度を従来比25%向上）
- (c) 電流検出、オンチップ温度センシングダイオードを内蔵したIGBTを採用
- (d) 小型で薄いモジュールパッケージによる搭載容積の縮小化



市川 裕章

ハイブリッド車用IGBTモジュール・IPMの開発に従事。現在、富士電機デバイステクノロジー株式会社半導体開発営業本部モジュール開発部。



市村 武

ハイブリッド車用IGBTモジュール・IPMの開発に従事。現在、富士電機デバイステクノロジー株式会社半導体開発営業本部モジュール開発部。



征矢野 伸

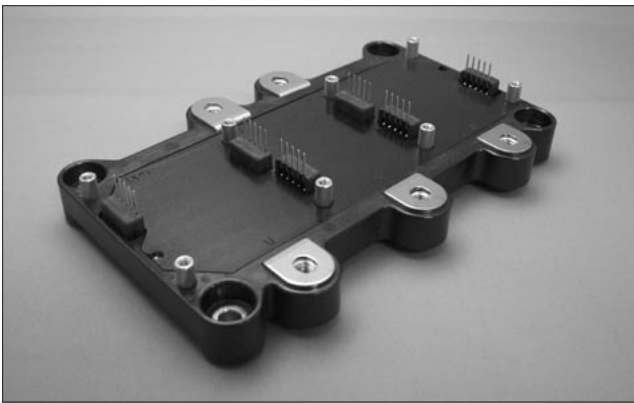
ハイブリッド自動車用IGBTモジュール・IPMの開発・設計に従事。現在、富士電機デバイステクノロジー株式会社半導体開発統括部パッケージ実装技術部。

- (e) 富士電機製ゲートドライブ IC「Fi009」と組み合わせることによって IGBT チップ温度保護回路、短絡保護回路、過電流保護回路が容易に構成可能
- (f) 顧客の回路開発を容易にする IGBT モジュールドライブ回路評価用基板の提供により設計をサポート
- (g) 鉛フリーと車載信頼性の両立

3.2 「V シリーズ」 IGBT チップ

IGBT チップは、富士電機の第 6 世代である 600 V 耐圧の V シリーズ IGBT を採用した。このチップの特徴は、富士電機 1,200 V の耐圧 IGBT で実績のあるフィールドストップ (FS) 構造とトレンチゲートを採用することで、オン電圧の低減を実現した。既存品との出力特性の比較を図 3 に示す。同一チップサイズでオン電圧が約 25% 低減し、インバータ効率向上への貢献が期待できる。

図 1 外形写真



また、自動車用デバイスは外気温変化の影響を直接受けるので、温度変化による耐久性（以下、温度サイクルという）に対する要求が強い。IGBT モジュールが温度サイクル環境下にさらされると、絶縁基板と IGBT チップの接合に用いるはんだ層に発生する熱応力で、クラックが増大する。「V シリーズ」 IGBT は、チップ厚さが既存品よりも薄く、熱応力によるストレスに対して柔軟に変形するため、温度サイクルが加えられた場合でもはんだクラックが生じにくくなる。

3.3 電力回生時の内部温度

ハイブリッドシステムは加速時に大きな電力が必要であるため、バッテリーには常に電力を蓄えておく必要がある。また、減速時には電力回生ブレーキで減速エネルギーを効

図 2 内部ブロック図

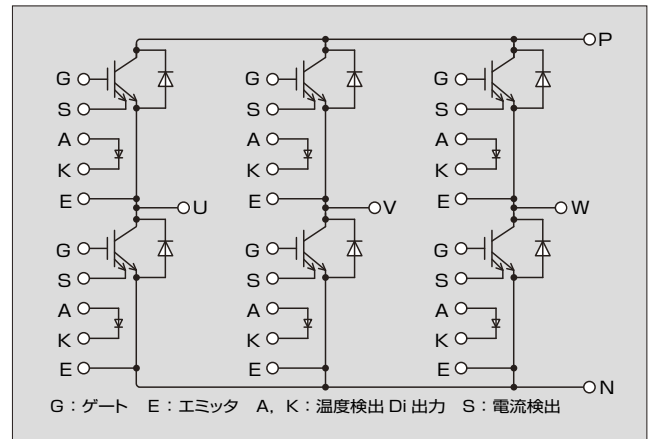


表 1 主要特性表

(a) 絶対最大定格 (指定なき場合は、 $T_j = T_c = 25^\circ\text{C}$ )

項目	記号	条件	定格	単位
コレクタ-エミッタ間電圧	$V_{CES}$	$V_{GE} = 0V$	600	V
ゲート-エミッタ間電圧	$V_{GES}$	—	$\pm 20$	V
コレクタ電流	$I_C$	連続	300	A
最大許容損失	$P_C$	1素子	595	W
最大接合温度	$T_{j(max)}$		150	°C
動作温度	$T_{op}$		-30~+125	
保存温度	$T_{stg}$		-40~+125	

(b) 電気的特性 (指定なき場合は、 $T_j = T_c = 25^\circ\text{C}$ )

項目	記号	試験条件	最小	標準	最大	単位
コレクタ遮断電流	$I_{CES}$	$V_{GE} = 0V, V_{CE} = 600V$	—	—	1.0	mA
ゲート-エミッタ間漏れ電流	$I_{GES}$	$V_{CE} = 0V, V_{GE} = \pm 20V$	—	—	200	nA
ゲート-エミッタ間しきい値電圧	$V_{GE(th)}$	$V_{CE} = 20V, I_C = 300mA$	—	6.2	—	V
コレクタ-エミッタ間飽和電圧	$V_{CE(sat)}$	$V_{GE} = 15V, I_C = 300A$	—	2.10	2.63	V
順電圧降下	$V_F$	$I_F = 300A$	—	1.96	2.40	V

(c) 熱的特性 ( $T_c = 25^\circ\text{C}$ )

項目	記号	試験条件	最小	標準	最大	単位
熱抵抗	$R_{th(j-c)}$	IGBT	—	—	0.21	K/W
		FWD	—	—	0.25	

図3 IGBT 出力特性比較 (チップ特性で比較)

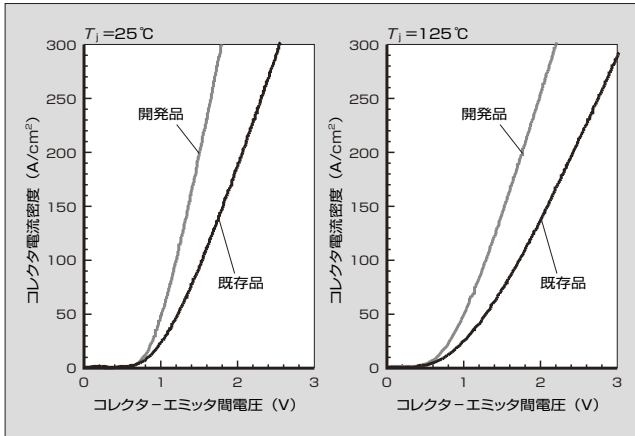
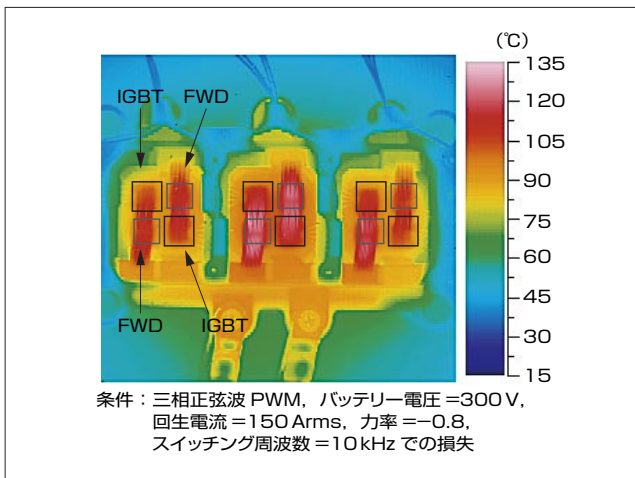


図4 回生ブレーキを想定した内部温度分布



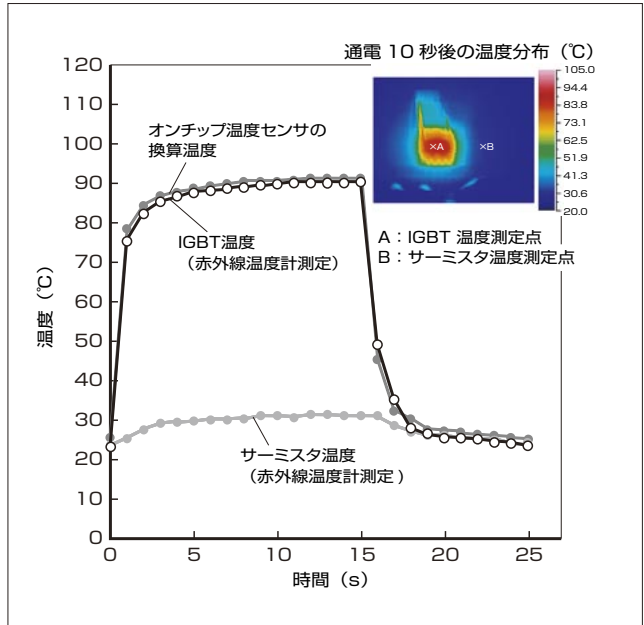
率よく電力に変換することも必要である。電力回生ブレーキは、運動エネルギーを電力に変換しバッテリーに充電するものであり、発生するエネルギー量は車両質量に比例する。小さなモータを選定した場合にはより大きな電力を回生することで効率が改善されるが、回生できる電力の上限は導通率の高い FWD チップの許容温度で制約される。図4に電力回生時の最大連続負荷を想定したときの、内部温度分布を示す。

電力回生時の効率を最もよくするために、チップサイズの最適化とチップ配置を互い違いにすることにより、IGBT, FWD チップの温度を同等に抑え、モジュールの高効率と小型化の両立を図った。

### 3.4 オンチップ温度センシング機能

IGBT が異常な温度環境下にさらされたり、異常動作によって温度が急上昇した場合、システムの故障を防ぐため IGBT の異常発熱を検知して動作を停止させる必要がある。特にハイブリッド車は、モータの加速と減速の動作頻度が高いので瞬間的な電力通電による急激な温度変化が想定される。本製品は IGBT チップ内にダイオードをオンチップ温度センサとして搭載した。オンチップ温度センサの応答性を図5に示す。

図5 オンチップ温度センサの応答性

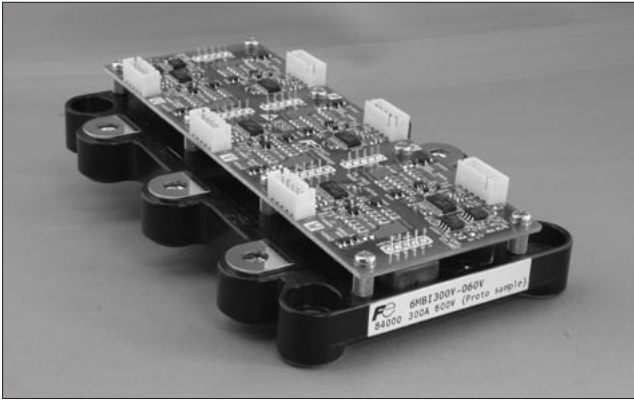


赤外線放射温度計で IGBT チップ表面温度を測定した結果と、オンチップ温度センサ出力を温度換算した結果を比較すると、1秒程度の過渡期間でも温度変化に対する追従性がよいことが分かる。また計算上、1ms程度でも温度検知が可能であり、瞬時負荷変動による急激な温度変化が発生した場合でも IGBT チップを破壊から保護することができる。一方で、NTC (Negative Temperature Coefficient)サーミスタをチップ近傍に搭載し温度を測定した結果も、図5中に示すとおり、オンチップ温度センサとの温度に約60°Cの乖離(かいり)がある。これは数十秒以下の短時間でチップ温度が急上昇した場合には、熱は主に熱伝導のよい製品裏面の銅ベースから放熱され、横方向は熱時定数が大きく熱が伝わりにくいためである。横方向への熱伝導はモータに流れる電流値によって温度上昇こう配が変わるので、NTCサーミスタで IGBT チップの過渡的な温度変化をとらえ保護するには限界がある。これらを解決する手段として、チップ温度をダイレクトに検出できるオンチップ温度センサは、ハイブリッド車用 IGBT には有用といえる。

## 4 評価用ドライブ基板

パワーデバイスの性能を最大限に引き出すためには、使用環境に対して IGBT ドライブ回路と保護回路の協調をとる必要がある。特に、回路図からは見えにくい容量結合や相互誘導に起因する誤動作には、注意が必要である。また、オンチップ温度センサや電流検出を内蔵した IGBT 用ドライブ回路は、ディスクリット部品で回路を構成すると肥大化し、インバータやコンバータユニットの小型化を阻害する。従来は、これら課題の解決策として IGBT IPM (Intelligent Power Module) が有用とされてきた。しかしブラックボックス化されていることによる変更のしにくさ、

図6 ドライブ回路基板外観



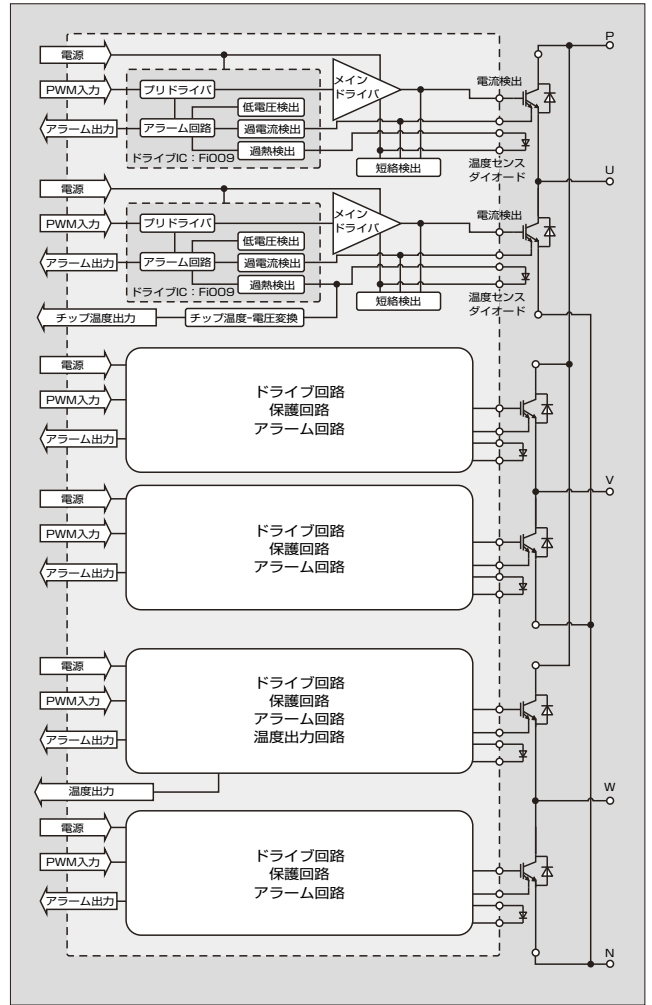
適用車種の拡大による仕様変更，周辺回路部品とのプリント基板一体化によるスペースの有効活用などの対応が困難であった。

これらの課題を解決するため，本 IGBT モジュール用に専用設計した評価用ドライブ回路基板の例を紹介する。組合せ時の外観を図6に，内部ブロック回路を図7に示す。このドライブ基板には，主要機能がワンチップ化されている富士電機製 IGBT 用ドライブ IC 「Fi009」を採用することで，部品点数が削減できる。IGBT モジュール仕様や顧客の使用環境が変わった場合に定数変更が想定される箇所については，ディスクリート部品で構成し汎用性を高めている。また，IGBT を保護するために必要な短絡保護，過電流保護および IGBT オンチップ温度センサを使った過熱保護機能を搭載し，万一の場合においても IGBT を安全に停止できるように設計している。オンチップ温度センサがモニタリングしている温度を外部出力できる回路を，上下アーム各1か所に搭載している。これにより評価時に必要な IGBT チップ温度も観測可能となった。

5 あとがき

本稿では，パラレルハイブリッド車向け自動車用 IGBT モジュールを紹介した。第6世代 IGBT を自動車用に専用設計されたパッケージに組み合わせることによりインバータユニットのさらなる小型化・高性能化に貢献できるものとする。

図7 ドライブ回路ブロック図



今後も，さらなる素子の高性能化・高信頼性化に取り組む，ハイブリッド自動車の CO<sub>2</sub> 低減，低燃費化をとおして地球環境の保護に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 仲野逸人ほか，第6世代 IGBT モジュール「V シリーズ PIM」，富士時報，vol.80, no.6, 2007, p.388-392.
- (2) 西浦彰ほか，ハイブリッド車用 IGBT モジュール，富士時報，vol.79, no.5, 2006, p.350-353.
- (3) 西尾実ほか，ハイブリッド車用 IGBT 駆動 IC 「Fi007」，富士時報，vol.80, no.6, 2007, p.406-409.

解説 電力回生ブレーキ

電力回生ブレーキとは，モータを発電機として利用し，減速時に油圧ブレーキで熱として放出される運動エネルギーを電気エネルギーに換えてバッテリーに充

電するブレーキである。機械摩擦を伴わない非接触ブレーキであるため，熱を発生させず電力を再利用できる省エネルギー効果の高いブレーキシステムである。

特集



\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。