

放熱性能を向上させ低損失と高信頼性を実現した HEVインバータ用IGBTモジュール

IGBT Module for HEV Inverters Achieving Low Loss and High Reliability by Improvement of Heat Dissipation

大部 利春 田多 伸光 萩原 敬三
 ■OHBU Toshiharu ■TADA Nobumitsu ■HAGIWARA Keizo

ハイブリッド自動車 (HEV) 用のインバータは、バッテリーの直流電力を変換して交流モータを駆動する機能を持ち、エンジンルームに搭載されることが多いことから、高効率や、小型、高温環境耐性などが要求される。インバータの主要部品である IGBT (絶縁ゲートバイポーラトランジスタ) モジュールも同様に、低損失や、小型、高放熱、高信頼性などの特性が要求される。

そこで東芝は、モジュール内部の IGBT チップ (以下、チップと略記) を両面から冷却する実装技術を採用し、熱抵抗を従来比で約 60% 低減し、インバータへの搭載面積を従来比で約 1/2 に縮小した IGBT モジュールを開発した。同時に電気的特性も改善し、十分な車載信頼性を持つことを実証した。

An inverter for hybrid electric vehicles (HEVs) converts the DC power generated by the batteries into AC power to drive the motor. Since such inverters are generally installed in the vehicle's engine compartment, they must be compact while offering both high efficiency and tolerance of high temperatures. The insulated gate bipolar transistor (IGBT) modules that serve as one of the main parts of the HEV inverter are also required to be compact with low loss, low thermal resistance, and high reliability.

To meet these requirements, Toshiba has developed an IGBT module for HEVs featuring a newly developed mounting structure that allows double-sided cooling of the chip inside the module. This IGBT module achieves a 60% reduction in thermal resistance and is about half the overall size of a conventional IGBT module. We have also confirmed through simulations and tests that the new module has improved electrical properties and sufficient reliability.

1 まえがき

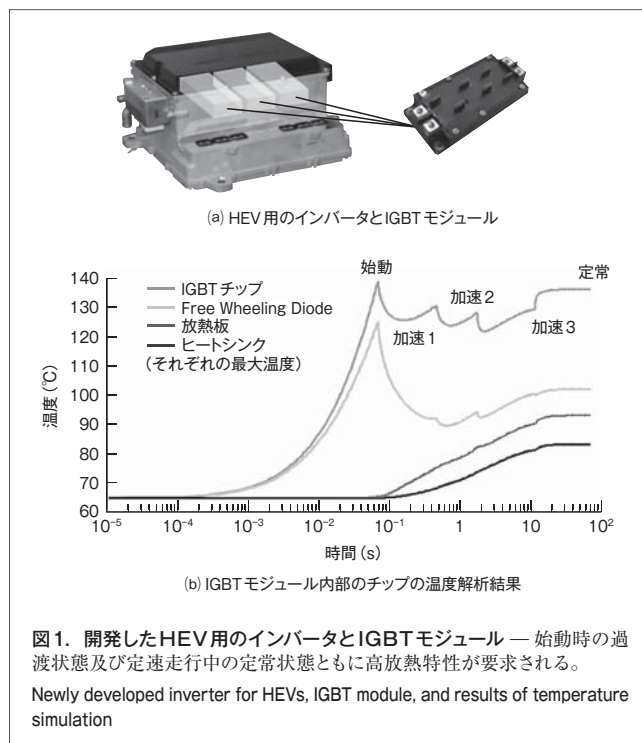
HEV用のインバータは、バッテリーの直流電力を変換して交流モータを駆動する機能を持ち、エンジンルームに搭載されることが多い。このため、HEV用のインバータには、高効率や、小型、高温環境耐性などが要求される。同様にインバータの主要部品であり、直流電力を交流電力に変換するスイッチの役割を持つ IGBT モジュールも、低損失や、小型、高放熱、高信頼性などの特性が要求される。

東芝は、エレベーターや鉄道などの一般産業機器で培ったパワーモジュールの実装技術^{(1), (2)}を適用し、当社製チップの性能を最大限に引き出す、低損失で、小型かつ高放熱特性の IGBT モジュールを開発した。

ここでは、開発した IGBT モジュールで実現した諸特性の改善の詳細と、信頼性の検証結果について述べる。

2 高放熱 IGBT モジュール

開発した HEV 用のインバータと、そのインバータに搭載した IGBT モジュールを図 1(a) に示す。また、IGBT モジュール内部のチップにおける、インバータ動作中の温度の解析結果例を図 1(b) に示す。HEV が始動するときには、例えば急な坂道で車両が動き出すまでに時間が掛かり、モータに短時間大電流



が流れてチップの温度が高くなる場合がある。また HEV の加減速に従ってチップの温度も変化し、HEV の速度が一定になりモータに連続的に一定電流が流れる定常状態になると、チップ

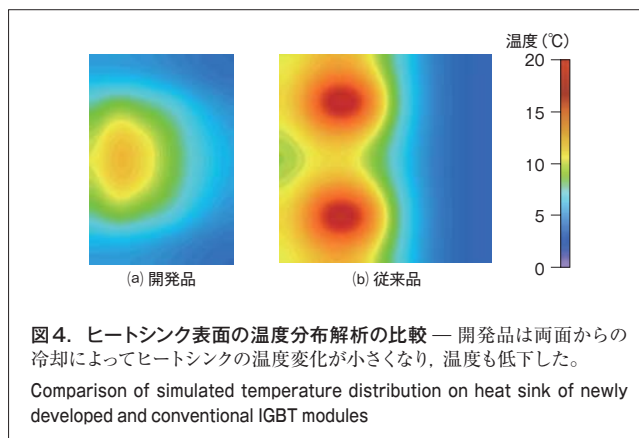
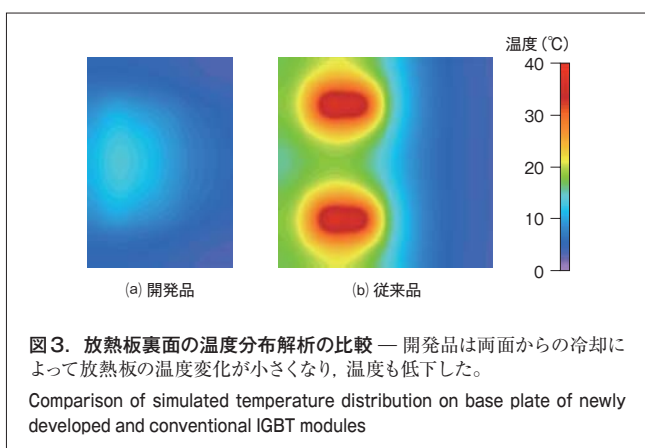
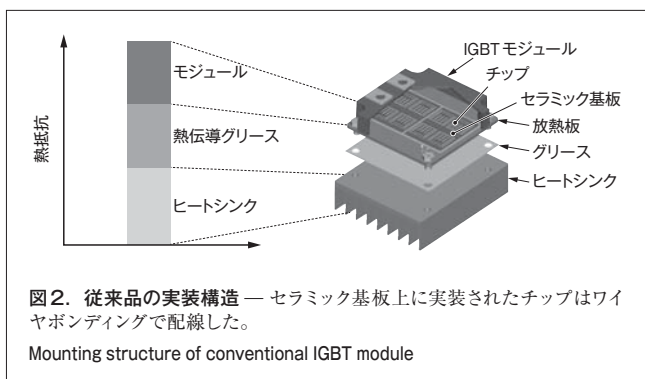
の温度は定常値となる。

一方、チップの動作温度は、電氣的・構造的信頼性を確保するために、使用温度には、例えば150℃のように上限値がある。このため、HEV用のIGBTモジュール（以下、開発品と呼ぶ）では、始動時の過渡状態及び定速走行中の定常状態ともに、高放熱特性が要求される。

2.1 定常時の放熱特性の改善

従来のIGBTモジュール（以下、従来品と呼ぶ）の内部構造と熱抵抗を図2に示す。チップは、絶縁性を持つセラミック基板上に実装され、そのセラミック基板は銅製の放熱板に実装される。また、チップ間はアルミニウム製のワイヤボンディングという細線で配線される。IGBTモジュールは、放熱板の裏面にグリースが塗布され、チップで発生する熱を放出するためのヒートシンクに実装される。

従来品と開発品について、放熱板裏面の温度分布を同一発熱条件で解析した結果の比較を、図3に示す。従来品では、セラミック基板や放熱板の厚さが薄くモジュール内部の熱が拡散されないため、図3(b)に示すようにチップ直下に熱が集中し、局所的に温度が高くなる。一方、開発品は、モジュール内部でチップの両面に熱拡散部材を接合し、チップの熱を両面から放出して拡散させるようにした。この結果、放熱板全体に熱が拡散するようになり、図3(a)に示すように放熱板裏面の温度変化が小さくなり温度も低くなっている。



また開発品は、放熱板裏面の熱流束が減少するので、熱伝導グリース部の熱抵抗も低減され、長期運転に伴うグリースのポンピングアウト（流出）現象なども改善される。

従来品と開発品について、ヒートシンク表面の温度分布を同一発熱条件で解析した結果の比較を図4に示す。前述した理由により、従来品ではチップ直下の温度が高くなっているが、開発品ではヒートシンク表面の温度変化が小さくなっており、熱がヒートシンク全体に拡散されるのでフィン効率も向上し、ヒートシンクを小型化できる。

2.2 過渡時の放熱特性の改善とモジュールの小型化

急な坂道でHEVが始動するようときには、車両が動き出すまでに時間が掛かり、図1に示したように、モータに短時間大電流が流れチップの温度が高くなる場合がある。チップの温度が使用上限値に到達した場合、チップを破損から保護するために、モータ出力を低下させて電流を抑制し、チップ温度を下げるなどの制御を行う。しかし、ここで想定している急な坂道のような場合にモータ出力が減ると、ドライバーの意図に反して車両が後退してしまうといった事態が起こるおそれがある。

このような事態を回避するために、過渡的な大電流をより長く通電可能な特性、すなわち過渡熱抵抗が低いIGBTモジュールが要求される。当社は、開発品において、チップの両面に接合した熱拡散部材に短時間の大電流に耐えうる熱容量特性を持たせるとともに、過渡時の熱抵抗を大幅に低減した。

開発品と従来品の熱抵抗特性の比較を、図5に示す。図5に示したように、IGBTモジュール内部でチップを両面から冷却することにより、100sの定常状態だけでなく、2～3sの過渡状態でも、従来品に対し約60%と大幅に熱抵抗を低減した。また熱抵抗が低くなると、従来品と同じ電流をチップに通電しても温度が低くなるので、より多くの電流を同一チップに通電できる。開発品は、図5に示す低い熱抵抗特性を活用し、チップの電流密度を従来品の2倍の約350 A/cm²まで向上させてチップ面積を半減し、これによってモジュールのインバータへの搭載面積を従来比で約1/2まで小型化している。

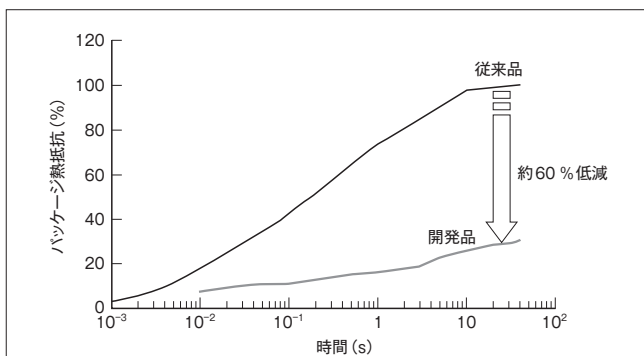


図5. 過渡熱抵抗特性の比較 — 過渡状態及び定常状態とも、熱抵抗が約60%低減した。

Comparison of transient thermal resistance of newly developed and conventional IGBT modules

2.3 電気的特性の改善

従来品は、2.1節で述べたようにチップ間を細径のワイヤボンディングで配線しているため、内部の配線抵抗が大きい。これに対して開発品は、チップ間を熱拡散部材で接合し、その部材は電気的配線の機能も同時に持っているため、内部の配線抵抗を低減できる。従来品と開発品のオン電圧の比較を図6に示す。モジュールのオン電圧は、チップ自身のオン電圧とモジュール内部の電気的配線による電圧降下の和となる。開発品は、ワイヤボンディングを用いないので電圧降下が低減し、その影響が顕著になる大電流領域でオン電圧が約10%低減した。これにより、低損失なIGBTモジュールを実現している。

2.4 スイッチング特性の改善

IGBTモジュールは、直流を交流に変換するスイッチとして機能するが、スイッチング動作時にチップで熱損失とサージ電圧が発生する。このサージ電圧の大きさは、モジュール内部の電気的配線構造に起因する配線インダクタンスに比例する。一方チップは、動作可能な最大電圧が規定されており、サージ電圧で破損させないためには、配線インダクタンスを低減して

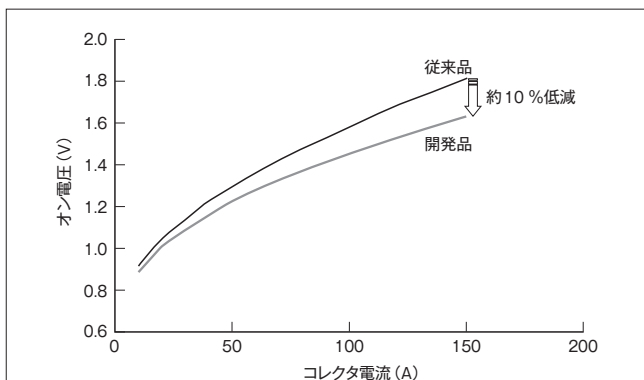


図6. 電気的特性の比較 — 開発品は大電流領域でのオン電圧が約10%低い。

Improvement of electrical performance of newly developed IGBT module

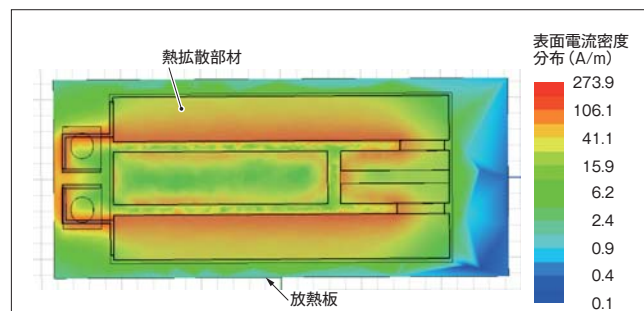


図7. 開発品の放熱板に発生する相互誘導電流の解析結果 — 熱拡散部材を流れる電流により、放熱板に誘導電流が発生する。

Result of simulation of mutual induction current on base plate

サージ電圧を低減することが重要になる。

配線インダクタンスは、自己インダクタンスと相互インダクタンスから成り、自己インダクタンスは主にモジュール内部の配線構造に比例する。相互インダクタンスは、相互誘導効果に起因して発生するので、例えば配線導体などを近接配置して電流の流れを対向させることにより、互いの磁界を相殺して相互インダクタンスを低減することができる。

開発品の放熱板に発生する相互誘導電流の解析結果例を図7に示す。2.3節で述べたように、モジュール内部には電気的配線の機能を持つ熱拡散部材があり、放熱板とは絶縁部材により絶縁されている。その熱拡散部材には、スイッチング動作時に電流が流れるが、その電流に起因して、絶縁された放熱板には相互誘導効果による誘導電流が発生する。開発品ではこの放熱板に発生する相互誘導電流を有効に活用し、モジュール内部の相互インダクタンスを大幅に低減した。開発品では内部インダクタンスが約20 nHとなり、当社従来比で約1/3と、大幅に低減された。

2.5 絶縁特性の改善

開発品では、モジュール内部でチップを両面から冷却する熱拡散部材の実装技術を開発するために、従来品で用いられているセラミック基板ではなく、絶縁部材として新たに開発したエポキシ樹脂シートを採用した。一般に、エポキシ樹脂シートは、セラミック基板に比べて熱伝導率が低い。そこで、モジュール内部の熱拡散部材を用いて熱流束を減少させ、エポキシ樹脂シートへの熱抵抗を低減した⁽³⁾。

また図8に示すように、一般的なエポキシ樹脂シートでは、熱伝導率を上げると絶縁破壊強度が低下する。開発したエポキシ樹脂シートは、エポキシの組成と構造を工夫することにより、高い熱伝導率と高い絶縁耐圧を両立させた。

3 高放熱IGBTモジュールの信頼性

例えば北海道などの寒冷地でHEVが使用される場合、エンジンルーム内の部品は冬季に-20℃から100℃以上の大き

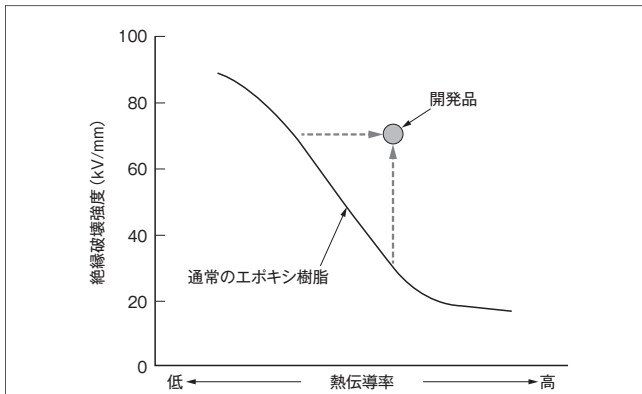


図8. エポキシ樹脂シートの熱伝導率と絶縁破壊強度の関係 — 高い熱伝導率と高い絶縁耐圧を両立させた。
Relationship between thermal conductivity and breakdown voltage of epoxy resin sheet

な温度変化にさらされる。開発品では、チップと熱拡散部材を鉛 (Pb) フリーはんだで接合している。IGBTモジュールが大きな温度変化にさらされた場合、チップと熱拡散部材の熱膨張係数が異なるので、その間を接合するPbフリーはんだに塑性ひずみが発生する。そのひずみが大きいと、はんだに亀裂が発生して進展し、熱抵抗が上昇してIGBTモジュールの信頼性が低下する。このような信頼性の低下を防ぐため、開発品では、モジュール内部の絶縁封止材としてエポキシ樹脂を適用し、熱応力解析を用いて構造を最適化し、Pbフリーはんだの塑性ひずみを大幅に低減した。

IGBTモジュールでは、車載信頼性を満足する目安として、 $-40 \sim 125 \text{ }^{\circ}\text{C}$ の温度サイクル試験を1,000サイクル以上実施し、規定値内の特性を維持する必要がある。

開発品で温度サイクル試験 ($\Delta T = 165 \text{ }^{\circ}\text{C}$) を実施し、モジュールの熱抵抗上昇率を評価した結果を図9に示す。目標の1,000サイクル経過後も、熱抵抗はほぼ初期値を維持している。更に2,500サイクル経過後でも、熱抵抗は初期値とほぼ同等の値を示しており、十分な車載信頼性を持つことがわかる。2,500サイクル後のチップを接合するPbフリーはんだの超音波探傷画像を図10に示す。はんだにクラックなどの亀裂

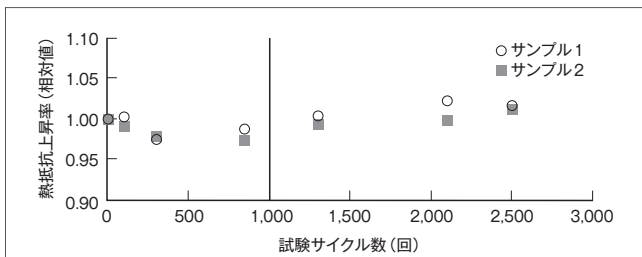
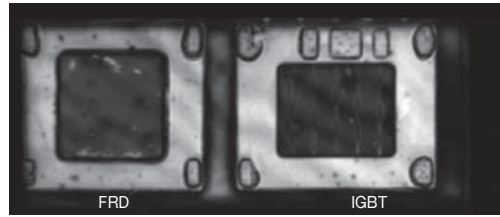


図9. 温度サイクル試験 ($\Delta T = 165 \text{ K}$) 時のIGBTモジュールの熱抵抗変化 — 2,500サイクル経過後でもほぼ初期値を維持している。
Rate of increase in thermal resistance under thermal cycle test



FRD : Fast Recovery Diode

図10. 2,500サイクル後のはんだの超音波探傷画像 — 2,500サイクル経過後でも、クラックなどの亀裂進展は認められなかった。
Image of solders after 2,500 temperature cycles obtained by ultrasonic testing

進展が発生していないことが確認できた。これにより、熱抵抗値にはほぼ変動がないことが裏づけられた。

4 あとがき

今後も、省エネや地球温暖化対策などにより、HEVや電気自動車 (EV) などの環境対応車の普及が拡大し、インバータの高効率・小型化のニーズが高まると考えられる。当社は、今回開発した実装技術を更に進化させ、環境対応車の普及に貢献していく。

文献

- (1) Ohbu, T. et al. "Study of power module package structures". International Workshop on Integrated Power Packaging, 2000 (IWIPP 2000). Waltham, MA, USA, 2000-07, IEEE. 2000, p.46-50.
- (2) Ohbu, T. et al. "Thermal Characteristic of Module Type Power Devices Mounted in the Inverter". International Power Electronics Conference 2000 (IPEC-Tokyo 2000). Tokyo, Japan, 2000-04, The Institute of Electrical Engineers of Japan. 2000, P-1-12.
- (3) Ohbu, T. et al. "The module type power device united with a heat sink". The 5th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2003 (PEDS 2003). Singapore, 2003-11, PEDS. 2003, p.43-48.
- (4) 荒木邦行 他. HEV・EVドライブシステムを支える最新技術と次世代システムへ向けての取組み. 東芝レビュー. 66, 2, 2011, p.8-12.



大 部 利 春 OHBU Toshiharu

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 電機電池応用・パワエレシステム開発部グループ長。パワーエレクトロニクス機器の研究・開発に従事。電気学会会員。
Power and Industrial Systems Research and Development Center



田 多 伸 光 TADA Nobumitsu

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 電機電池応用・パワエレシステム開発部主査。パワーエレクトロニクス機器の研究・開発に従事。電気学会会員。
Power and Industrial Systems Research and Development Center



萩 原 敬 三 HAGIWARA Keizo

社会インフラシステム社 自動車システム統括部 eドライブシステム技術部長。車載用システム事業推進に従事。日本機械学会会員。
Automotive Systems Div.