

車載用 IGBT モジュールの直接水冷技術

Application Technology for Direct Water Cooling IGBT Modules in Automotive

安達 新一郎 ADACHI Shinichiro

小高 章弘 ODAKA Akihiro

長睦 文男 NAGAUNE Fumio

自動車メーカーは、ハイブリッド自動車や電気自動車などの開発を積極的に進めている。富士電機では、車載用のインバータユニットの小型化に貢献するため、直接水冷方式を用いた IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールの開発を行っている。また、顧客のインバータユニットの開発を支援するため、高い放熱性能と低い圧力損失を両立するための車載用 IGBT モジュールの水冷ジャケットの構造を検討するとともに、車両運転パターンに基づいた信頼性設計などの応用技術の開発を行った。

Car manufacturers are proactively engaged in the development of hybrid vehicles and electric vehicles. To contribute to the miniaturization of in-car inverter units, Fuji Electric is developing insulated gate bipolar transistor (IGBT) modules that use direct water cooling. In addition, to support customers' inverter developments, we have studied water cooling jacket structure for IGBT modules for use in automotive for realizing both high radiation performance and low pressure loss. Moreover, we have developed application technologies such as reliability design based on driving patterns of vehicles.

1 まえがき

CO₂ 排出量の削減や資源の節約に向けて、世界各国が取り組みを加速している。自動車メーカーは、電力も動力源としたハイブリッド自動車 (HEV) や電気自動車 (EV) などの開発を積極的に進めている。HEV や EV ではモータを動作させるために、インバータなどのパワーエレクトロニクス (パワエレ) 技術が用いられている。その中で重要なキーコンポーネントの一つが、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールである。インバータシステムにおいて IGBT モジュールは、バッテリー電力を効率良く利用するために低損失化が求められるだけでなく、低コスト化と小型化も求められる。

富士電機では、これらの要求に応えるために、直接水冷方式を用いた IGBT モジュールを開発した。HEV や EV 化は、小型車、スポーツタイプ多目的車、高級車といったさまざまな車種に広がっている。それぞれのモータ容量・仕様に対応するため、IGBT モジュールも幅広い容量帯のラインアップが必要となり、製品系列の拡大を行っている。

本稿では、車載用直接水冷 IGBT モジュールについて説明し、これを適用する際の冷却体設計技術や信頼性設計技術について述べる。

2 車載用直接水冷 IGBT モジュール

2.1 概要

車載用直接水冷 IGBT モジュールの定格・寸法などの概要を表 1 に示す。定格電圧は 650 V、定格ピーク

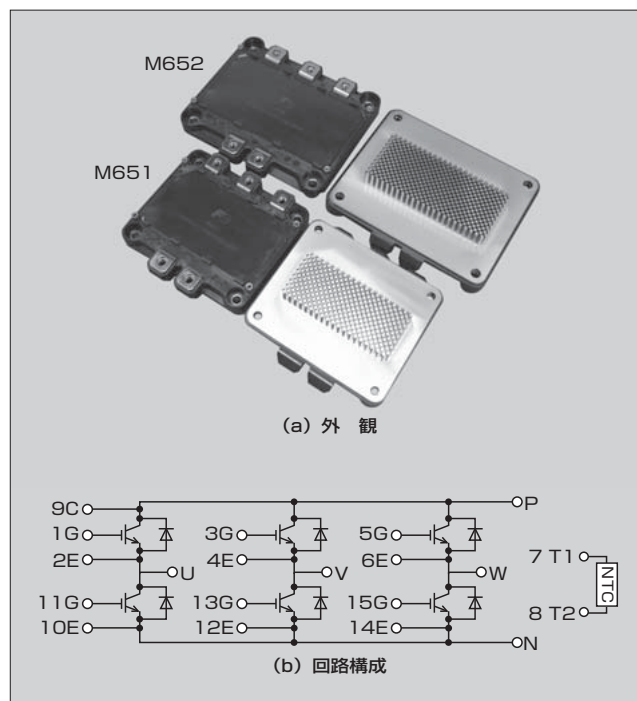


図 1 車載用直接水冷 IGBT モジュール

表 1 車載用直接水冷 IGBT モジュールの概要

パッケージ構成	製品型式	パッケージ型式	パッケージ寸法 (フィン部含む)	適用モータ容量
6 in 1	6MBI400VW-065 V	M651	L108×W105×H34 (mm)	20 ~ 30 kW
	6MBI600VW-065 V	M652	L131×W113×H34 (mm)	40 ~ 50 kW

電流は400 Aと600 Aの二つである。適用されるモータ容量は、6MBI400VW-065 Vで20～30 kW、6MBI600VW-065 Vで40～50 kWクラスを想定している。図1に、外観および回路構成を示す。本製品は三相インバータ回路への適用を想定している。インバータ回路三相分のIGBTとFWD (Free Wheeling Diode), ならびに温度検出用サーミスタで構成している。

2.2 適用素子

パワーチップは、650 V定格の「Vシリーズ」IGBTおよびFWDを採用している。Vシリーズは、フィールドストップ (FS) 構造とトレンチゲート構造を最適化して、オン電圧とスイッチング損失を低減している。また、ゲート抵抗によるターンオン di/dt の制御性の向上を図っている^{(2),(3)}。

2.3 パッケージ

小型化を実現するためには、放熱性能を向上させることが必須である。そのため、直接水冷方式のフィン構成する個々のピン形状は、一般的に広く用いられている丸型のピンではなく、角型を用いている。図2に、丸ピンと角ピンでの流速分布と、1ピン当たりの表面積比較結果を示す。ピンは3 mm、45°のピッチで高密度に配置している。角ピンは丸ピンに比べ、ピン周辺の流速を早くできただけでなく、1ピン当たりの表面積を大きくできることから、冷媒を介した熱交換を効率良く行うことができる。

また、絶縁基板には従来のアルミナ (Al_2O_3) 基板ではなく、熱伝導率が高い窒化けい素 (Si_3N_4) 基板を用いることで、放熱性の向上を図っている。窒化けい素は、ベース材に用いている銅との線膨張係数の差がアルミナに比べて大きい。そのため、信頼性試験の一つである温度サイクル試験時には、窒化けい素基板と銅ベースの接合材であるはんだに大きなひずみが発生し、アルミナ基板に比べてはんだの劣化が速い。高い温度サイクル耐量を持つはんだ材

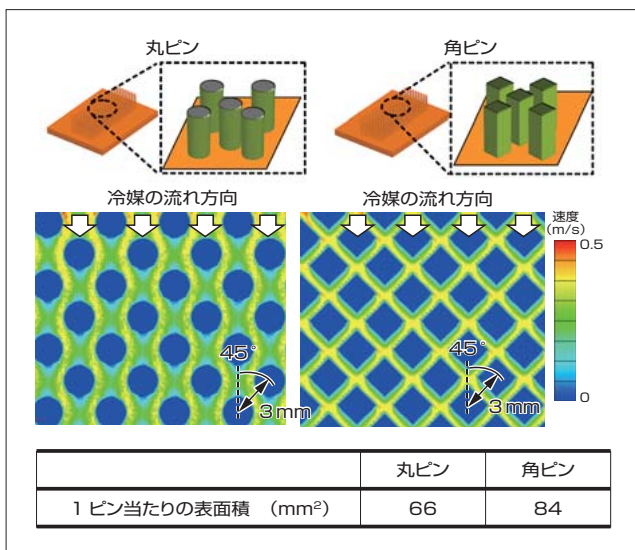


図2 丸ピンと角ピン

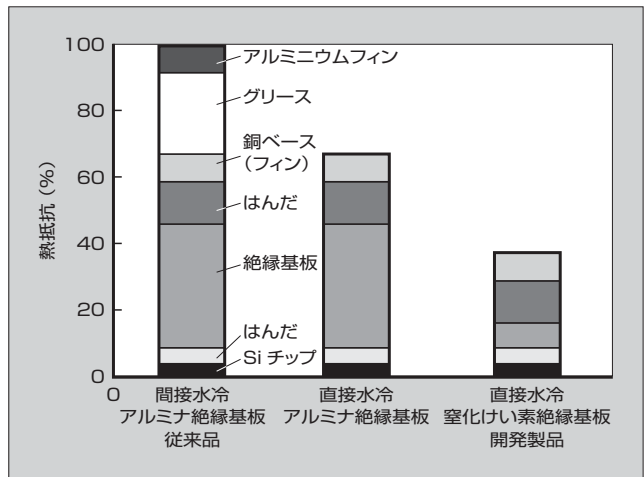


図3 従来構造と直接水冷構造の熱抵抗比較

を開発して適用することで、高い放熱性能を実現できる窒化けい素基板を採用できるようにした。

図3に、従来品の間接水冷IGBTモジュールとアルミナ基板および窒化けい素基板を用いた場合の、直接水冷IGBTモジュールの熱抵抗を比較した結果を示す。直接水冷にすることでサーマルグリスが不要になり、その熱抵抗を排除した。さらに、角ピンと高熱伝導率の窒化けい素基板を採用することで、従来品の間接水冷アルミナ絶縁基板^{(4),(5)}に比べて熱抵抗を60%低減している。

3 冷却体設計技術

直接水冷方式において、高い放熱性能と低圧力損失を両立できるように、IGBTモジュールを取り付ける水冷ジャケット構造を最適化する必要がある。また、IGBTモジュールはシール材を介して水冷ジャケットに取り付けるため、温度や水圧が変化した場合でも水漏れを防止するシール技術が必要である。これらは、間接水冷方式を採用していたユーザにとって新たな検討課題である。

富士電機では、ユーザが冷却体を設計するための技術支援として、高放熱性能と低圧力損失化を実現するための水冷ジャケットの構造と、その気密性能について検討した。

3.1 水冷ジャケット構造

水冷ジャケットには、通常、アルミニウム材が用いられる。銅フィンには腐食を防ぐためのニッケルめっきを施している。しかし、フィンと水冷ジャケットを接触させた場合、熱変形によってニッケルめっきと水冷ジャケットがこすれることでめっきが剥がれ、異種金属接触によるアルミニウムの腐食などが懸念される。そこで、フィン先端と水冷ジャケット底面には隙間を設ける必要がある。しかし、フィンとジャケットの接触を避けるため、過剰に隙間を設けた場合、圧力損失は下げることができものの、放熱性能が大きく低下してしまう。また、冷媒をフィン全体に均一に流すためには、導入口に拡散壁を設けることが重要であるが圧力損失が上昇してしまう。そこで、圧力損失と熱

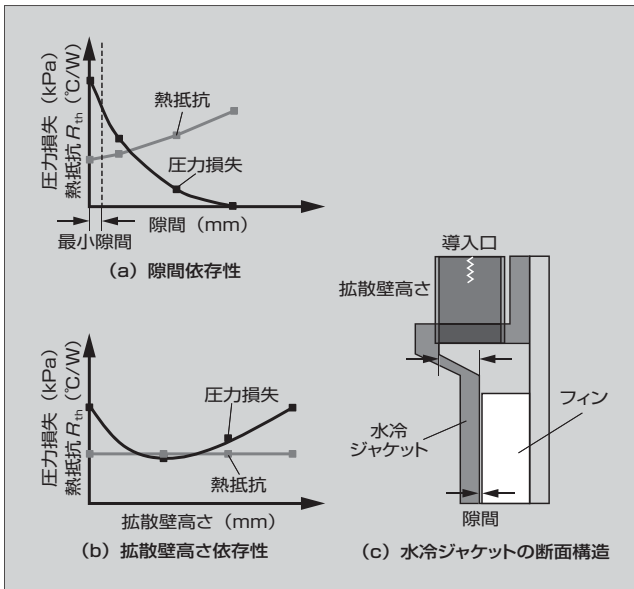


図 4 熱抵抗と圧力損失の関係

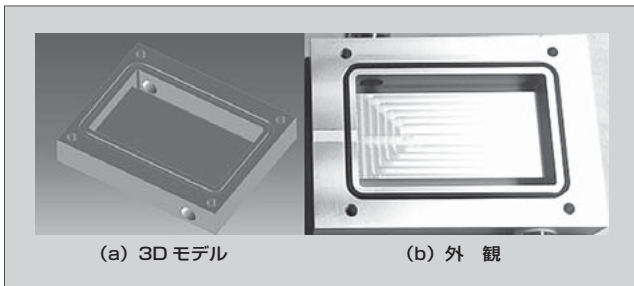


図 5 推奨水冷ジャケット構造

抵抗の関係を調査するに当たり、フィン先端と水冷ジャケット底面部の隙間、冷媒の導入口の拡散壁高さをパラメータとし、熱流体解析を用いて検討した。検討結果を図 4 に示す。

隙間を変えた場合、熱変形時にもフィンと水冷ジャケットが接触しない最小隙間（図 4 (a)破線）を超えた領域においてもトレードオフの関係がある。また、拡散壁高さには、最も圧力損失が小さくなる高さが存在することが分かる（図 4 (b)）。この解析結果を反映した推奨水冷ジャケット構造（図 5）により、圧力損失が小さく、かつ高い放熱性能を得ることができる。

3.2 水冷ジャケットの気密性能

最適化した水冷ジャケット構造において気密性能を検討するため、図 5 に示す水冷ジャケットとシール材である Oリングを用いた気密試験を実施した（図 6）。水冷ジャケットの出口を封止し、加圧装置でジャケット内の空気圧を高め、水没させることで、空気漏れの有無を確認した。自動車のインバータの気密性能は、最大 200 kPa まで要求されることが多い。試験結果から、250 kPa においても空気漏れは発生しておらず、市場要求を満足する仕様となっていることを確認した。

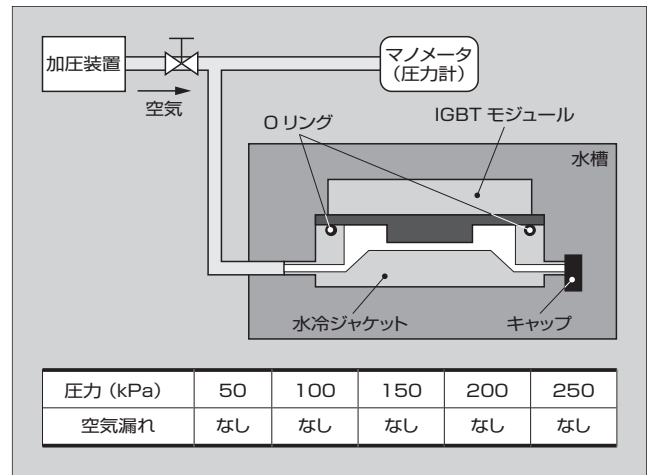


図 6 気密試験

4 信頼性設計技術

車載用 IGBT モジュールの使用環境は、産業用 IGBT モジュールと比べて、外気温度の変化や振動などが大きく、過酷な環境下で使用される。特に、外気温度の変化は、IGBT モジュールのパワーサイクル寿命に大きく影響する⁽⁶⁾。パワーサイクル寿命とは、電流の断続が繰り返されることで生じる温度変化 ΔT によって、チップ下はんだの劣化が進むことで熱抵抗が上昇するまでの時間、または内部配線のワイヤ破断が発生するまでの時間であり、製品寿命に相当する。インバータは HEV や EV においては動力源であり、その心臓部である IGBT の製品寿命の設計は重要である。しかしながら、実際の走行実験により製品寿命を評価するためには、年単位の時間と多大な労力を要する。

富士電機では、パワエレ回路シミュレータ PSIM を用いて、実車運転を想定したパワーサイクル寿命の推定を行った。

4.1 シミュレーション条件

シミュレーションを実施するためには、デバイス特性、インバータ動作条件および車両条件を設定する必要がある。

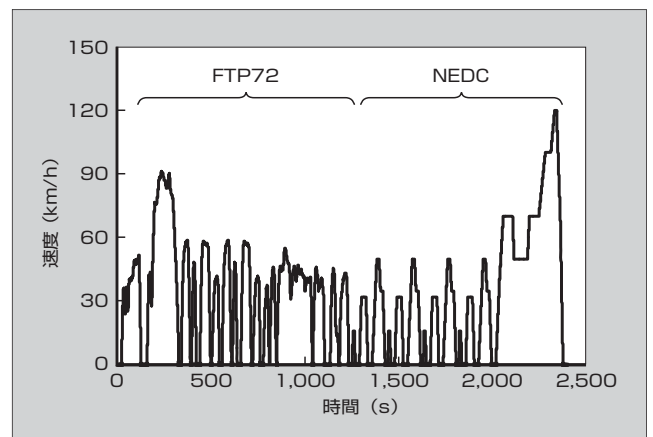


図 7 シミュレーションに用いた車両運転パターン

本シミュレーションは、6MBI600VW-065Vのデバイス特性を用い、最大出力40kWのモータを搭載し、質量1,200kg、最高速度145km/hの小型EVを想定した。また、インバータ動作条件は加速動作（力行動作）だけでなく、減速時のブレーキ動作（回生動作）も全てインバータのみで動作させており、温度サイクルとしては厳しい条件で実施した。

EVの車両運転パターンを図7に示す。運転パターンには、アメリカの都市（ロサンゼルス）走行の実運転パターンであるFTP（Federal Test Procedure）72と、欧州の市街・郊外走行パターンであるNEDC（New European Drive cycle）を組み合わせ設定した。一般的に車載用IGBTには、使用年数10～15年間、走行距離200,000～300,000km、稼働時間8,000～10,000時間という製品寿命が求められる。そのため、寿命推定を実施するための温度変化 ΔT の発生頻度の算出は、図7に示すドライブサイクルが1日3サイクル、15年間継続するものと仮定した。この場合、15年での走行距離は370,000km、稼働時間は12,000時間となる。図8に、余寿命推定までのシミュレーションのフローチャートを示す。

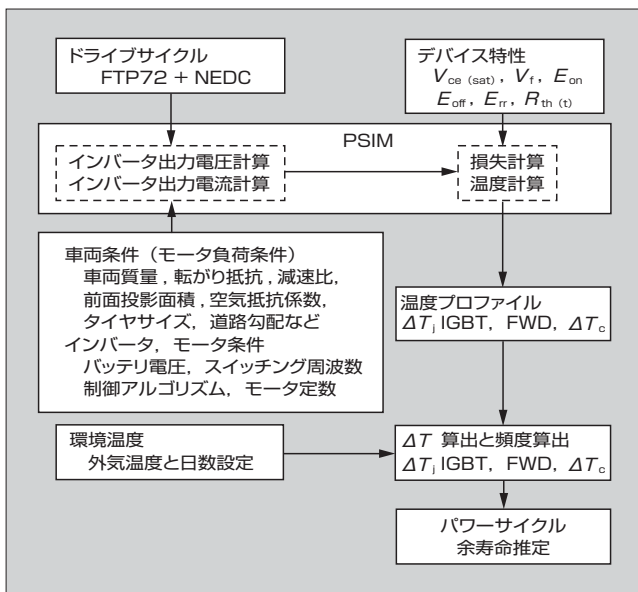


図8 シミュレーションのフローチャート

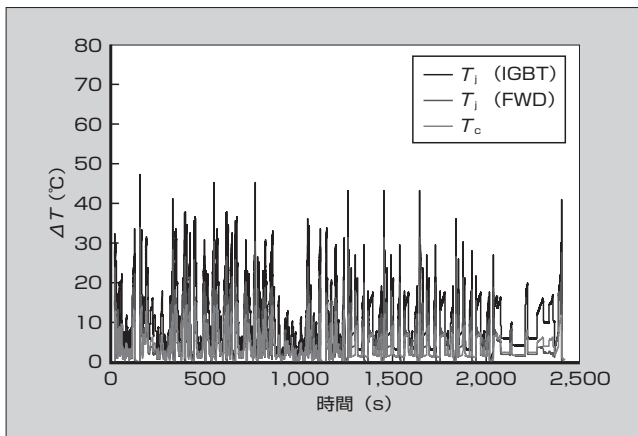


図9 1サイクルにおける素子およびケース温度変化

4.2 実車運転パターンを基にした余寿命推定の結果

図9に、1サイクルにおける素子温度 T_j およびケース温度 T_c の変化を示す。これは自己発熱によって発生する温度の変化である。前述したように、自動車においては外気温度変化によっても ΔT が発生する。外気温度変化による ΔT を算出するため、まず図10に示すように、1年の外気温度と日数を設定した。また、外気温度にかかわらず冷媒温度は、1サイクルごとに運転開始時に65℃まで上昇し、運転終了時には外気温度 T_a まで下降するものとし、外気温度変化による ΔT_j および ΔT_c は、ケース平均温度 $T_{c,avg}$

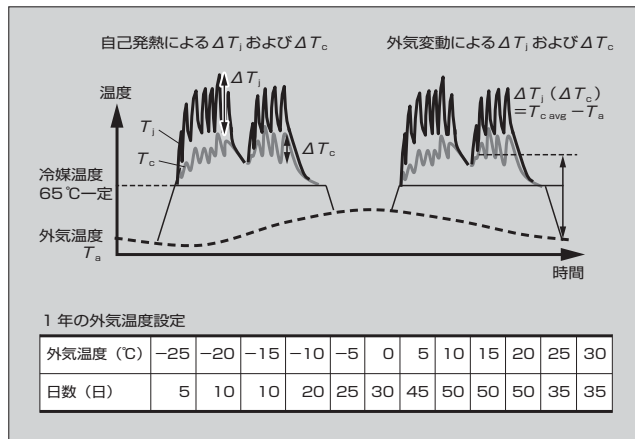


図10 自己発熱による ΔT と外気温度変化による ΔT

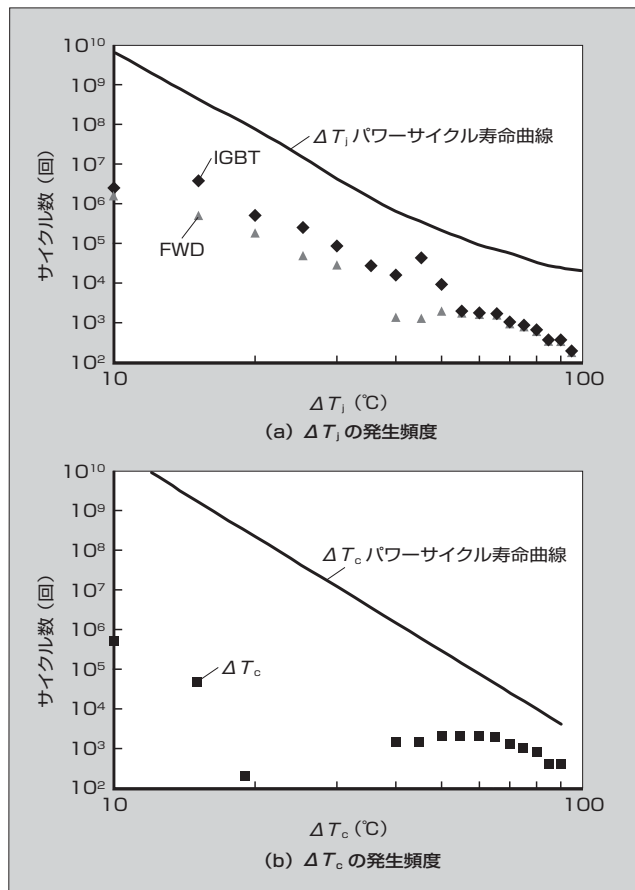


図11 15年走行時の ΔT_j および ΔT_c とサイクル数

特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体

と外気温度 T_a との差として算出した (図10)。

15年走行時の ΔT_j および ΔT_c は、自己発熱によって発生するものと外気温度変化によるものを加算して求めた。

図11に、15年間で自己発熱と外気温度変化による ΔT_j および ΔT_c と発生回数を、パワーサイクル寿命曲線と併せて示す。IGBTのパワーサイクル寿命の推定方法はLESIT⁽⁷⁾、CIPS 2008モデル⁽⁸⁾などが提案されているが、このシミュレーションではマイナー則⁽⁹⁾を用いて、余寿命推定を行った。

マイナー則は、ある ΔT における実際の発生回数を N_{cycle} 、パワーサイクル寿命を $N_{PC cycle}$ とした場合、 $N_{cycle}/N_{PC cycle}$ だけ寿命が消費され、それぞれの負荷すなわち ΔT に対する損傷の累積値が1になったときに破壊するという考え方である。この方法により余寿命推定を行った結果、IGBT、FWDの ΔT_j および ΔT_c パワーサイクルは50%程度の余寿命があることを確認した。したがって、本シミュレーションで仮定した運転パターンと環境温度においては、製品寿命15年を満足できると考える。また、本手法を用いることで、これら以外の運転パターンにおいてもシミュレーションを用いて余寿命を推定することができる。

5 あとがき

本稿では、車載用標準IGBTモジュールの製品系列と車載用直接水冷IGBTモジュールの適用技術について述べた。今後は、大電流容量品および高耐圧品のラインアップを充実していく。

冷却体設計技術や信頼性設計技術は、ユーザのインバータ開発設計を支援するものであり、今後も製品とともに周辺技術を充実させ、より使いやすい製品を提供していく所存である。

参考文献

- (1) 日達貴久ほか. 車載用直接水冷IGBTモジュール. 富士時報. 2011, vol.84, no.5, p.308-312.
- (2) 清水直樹ほか. インテリジェントパワーモジュール「Vシ

リーズIPM」. 富士時報. 2009, vol.82, no.6, p.384-388.

- (3) Nakano, H. et al. "600 V trench-gate IGBT with Micro-P structure", Proc. of ISPSD 2009, p.132-135.
- (4) Nagaune, F. et al. "High thermal conductivity and reliability, downsized IGBT module for automotive application", Proc. of EVS 26.
- (5) Adachi, S. et al. "High thermal conductivity technology to realize high power density IGBT modules for electric and hybrid vehicles", Proc. of PCIM Euro 2012, p.1378-1384.
- (6) A. Christmann et al. "Facing high thermal loads on Power modules in Hybrid Electrical vehicles", Proc. of PCIM 2010, p.432-438.
- (7) Held M, et al "Fast power cycling test for IGBT modules in traction application", Proc. of PEDS 1997, p.425-430.
- (8) Ciappa M. : "Lifetime Modeling and Prediction of Power Devices", Proc. of CIPS 2008, p.27-36.
- (9) Miner M A : "Cumulative Damage in Fatigue", Journal of Applied Mechanics, v01.12 (1945), p.159-164.



安達 新一郎

ハイブリッド自動車用IGBTモジュール・IPMの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部パワー半導体事業統括部EVモジュール技術部。



小高 章弘

パワーエレクトロニクス装置の研究・開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所EVプロジェクト部主査。電気学会会員。



長畦 文男

ハイブリッド自動車用IGBTモジュール・IPMの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部パワー半導体事業統括部EVモジュール技術部課長。工学博士。電気学会会員。



*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。