

車載用直接水冷 IGBT モジュール

Direct Liquid Cooling IGBT Module for Automotive Applications

日達 貴久 Takahisa Hitachi

郷原 広道 Hiromichi Gohara

長睦 文男 Fumio Nagaune

“ユーザシステムの小型化に貢献する IGBT モジュール” をコンセプトに、小型で熱抵抗の小さい直接水冷 IGBT モジュールを開発している。水冷のためのフィン形状を最適化するために、熱流体シミュレーションを活用し、放熱性能や冷却液の流速・圧力損失において総合的に優れている角ピンフィンを選択した。さらに、最適化した流路でチップ温度を実測し、シミュレーションとの誤差は 2% 程度であることから、シミュレーションの妥当性を確認した。これらの検討から、直接水冷 IGBT モジュールは従来構造に比べ、熱抵抗は 30% 低減し、サイズは 40% の小型化を実現できる。

This is a compact IGBT (insulated gate bipolar transistor) module with low thermal resistance for direct liquid cooling, developed to contribute to reducing the size of user systems. Thermal liquid simulations were used to optimize the liquid cooling fin shape. Square pin fins were selected because of their overall outstanding performance, including heat dissipation performance, cooling liquid flow velocity, and pressure loss. Under optimized liquid flow conditions, measurements of chip temperatures were within 2% of simulation values, confirming the reliability of the simulations. From these results, this IGBT module for direct liquid cooling delivers a 30% reduction in thermal resistance and allows a 40% reduction in size compared to the conventional configuration.

① まえがき

エコカーとして現在最も普及しているハイブリッド自動車 (HEV) は、ガソリンエンジンと電気モータの二つの動力源を持っている。加速時にモータがエンジンをアシストしたり、減速時の回生ブレーキによりバッテリーに充電を行ったりすることで燃費効率を向上させている。ガソリンエンジンを使用しているため、急速充電設備などのインフラに頼らずに使用可能であり、今後も普及が進むと考えられる。

本稿では、ハイブリッド自動車・電気自動車 (EV) の駆動系インバータに適合した車載 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールについて紹介する。多種多様なニーズに応えられるように、出力電力クラスを明確化した製品をシリーズ化し、モータ出力が 100 kW 程度までをカバーして、多くの自動車メーカーや電装品メーカーなどのユーザの省燃費システム開発に貢献していく計画である。

② 背景

ハイブリッドシステムには、走行用モータと発電用モータを搭載した 2 モータタイプと、一つのモータでエンジンのアシストとブレーキ回生を行う 1 モータタイプとがある。2 モータタイプは主に中型以上の乗用車に搭載され、燃費改善率が比較的大きい。1 モータタイプは主に小型車に搭載され、大幅な燃費改善は見込めないが小型軽量で比較的安価なシステムである。2 モータタイプでは 50 kW 以上という比較的大きな出力のモータを搭載し、1 モータタイプでは 20 kW 以下の場合が多い。

電気自動車は、バッテリーとモータを動力源とし、走行時

に化石燃料を使用しないため有害な排ガスが発生しない。また、Well-to-Wheel (一次エネルギーが採掘されてから車両走行まで) の効率が高いため省エネルギー (省エネ) 効果が高く、究極のエコカーと考えられている。電気自動車に搭載されるモータは、車格により 50 kW から 100 kW の範囲である。電気自動車が本格的に普及するためには、バッテリー価格が大幅に低下することが必要である。それまでの間、より高い燃費性能を実現するために考案されたプラグインハイブリッド自動車 (PHEV) が実用化されつつある。家庭用コンセントなどからのバッテリー充電が可能であり、短距離の場合は電気自動車、長距離の場合はエンジン出力を併用したハイブリッド自動車として使用でき、大幅な CO₂ 排出量の削減と航続距離の拡大が見込める。

このように、モータを搭載して省エネ化を図るシステムは種類が多く、出力容量も大小さまざまである。そのため、インバータに使用する IGBT モジュールにはさまざまな電流容量・電圧クラスのもの採用されている。

ハイブリッドシステムは、電力変換機能を受け持つ PCU (Power Control Unit) とモータ、バッテリーなどにより構成されている。IGBT は PCU の中で、三相交流電力を出力するインバータの主スイッチとして主要な役割を担っている。

IGBT モジュールは、産業・民生向けを中心に数多くの機種が開発され、電流容量のラインアップも豊富である。しかし、耐久性に関する仕様の一部が車載用途に適合していないためそのままでは適用できず、これまではカスタム製品を開発して搭載する例がほとんどであった。今後、電気駆動技術が省燃費化の必須アイテムとなり、IGBT モジュールに対しても多くのユーザからさまざまな要望が寄せられ、さらに増加することが予想されている。

3 製品コンセプト・仕様

3.1 製品コンセプト

ユーザからのさまざまな要望に応えながら、デバイスメーカー独自のアイデアを盛り込んだ製品を検討した。“ユーザシステムの小型化に貢献する”ことをコンセプトに掲げ、IGBT モジュールに求められる基本的な性能はそのままに、放熱性能を大幅に向上することで電力密度を上げた。

モジュールの小型化のため、直接水冷構造の採用を決め、熱流体シミュレーションを用いてフィン形状と水流の最適化を行った。従来構造のモジュールと比較して30%の熱抵抗低減が可能であることを確認した。さらに、パワーチップの面積縮小（チップシュリンク）について検討した。その結果、従来構造のモジュールと比較して40%の小型化を実現可能と判断して製品開発を開始した。パワーチップには、産業用途で既に量産が開始されている最新世代の「V シリーズ」チップを採用することで、より大きな効果を得ることができた^{(1),(2)}。

次に、実際にユーザから要求があった使用条件（バッテリー電圧：300V，最大電流（実効値）：200A，キャリア周波数：10kHz）に適合するモジュールについて設計検討を行い、試作品を実証試験した結果を中心に述べる。

3.2 製品仕様

モジュールの外観を図1に、内部等価回路を図2に示す。

本製品は直接水冷構造による低熱抵抗性能を特徴としており、高電流密度化によるパッケージサイズの大幅な小型

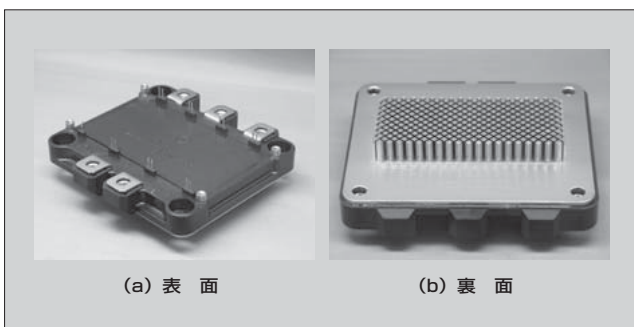


図1 M651 (650V/400A) モジュールの外観

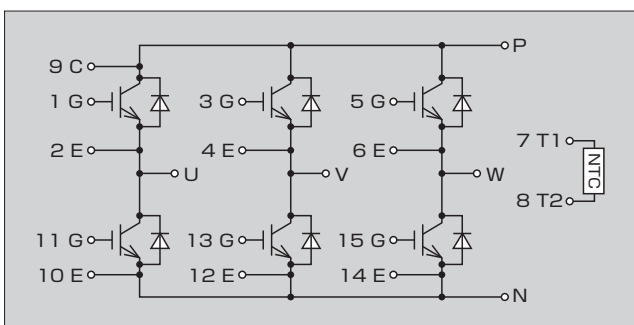


図2 モジュール内部等価回路図

化が可能となった。モジュールの外観は105 × 108 (mm) という、富士電機の従来同等品に比べて約40%の小型化を実現した。従来構造と直接水冷構造の断面構造比較を図3に、熱抵抗比較を図4に示す。

従来構造では、銅ベースと冷却フィン表面の間の接触熱抵抗を低減するためにサーマルグリスを使用していた。サーマルグリスは、数10μm程度の厚さでも熱抵抗が大きく、モジュールからの廃熱を冷却フィンに効率良く伝導できなかった。また、冷却フィンの流路が実装されるデバイスの発熱分布に合っていないために、冷却効果が十分に得られていなかった。開発した直接水冷構造では銅ベースと冷却フィンを一体化することで、サーマルグリス層をなくし冷却効率を高めている。さらに、フィンを発熱体であるパワーチップの直下に高密度に配置することで、フィンと冷却液間の放熱能力を向上させている。この結果、パワーチップと冷却水間の熱抵抗は従来構造に比べて約30%低減させることができた。冷却効率を向上させることで、デバイスの高電流密度化が可能となり、一つのチップにより多くの電流を流すことができるようになった。

4 直接水冷技術

4.1 放熱性能の検討

直接水冷構造では、フィンの形状や冷却液を流す方向などによって放熱性能が変化する。ここではフィン形状、流路について流体シミュレーションを行い、冷却システムの

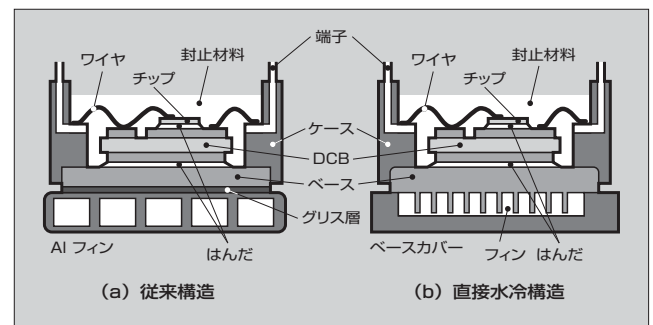


図3 従来構造と直接水冷構造の断面構造

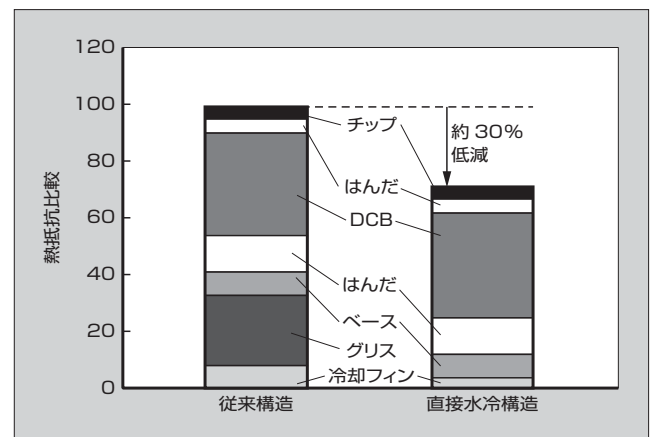


図4 従来構造と直接水冷構造の熱抵抗比較

最適化を行った内容を⁽³⁾紹介する。

インバータシステムの中で、IGBT モジュールは平滑コンデンサや制御基板、ハーネス、電流センサなどが接続されて機能を発揮する。多くのユーザの異なったシステム設計に対応できるように、フィン形状は長手方向・短手方向のどちらからでも冷却液を流すことが可能なピンタイプのフィンを選定した。ピンフィンの断面形状は、放熱性能や冷却液の流速および圧力損失について、総合的に検討して選定する必要がある。ピンフィンの中で一般的な円形断面と矩形（くけい）断面について検討した。

4.2 流路の最適化

流路の検討は熱流体解析ソフト（Icepak）^(注)を用いて、チップ温度、冷却液の流速、圧力損失を求め、比較した。冷却液には2種不凍液（LLC）50%を使用し、解析モデルは図6に示すIGBT モジュールのモデルを用いた。発熱源のチップが配置されたDCB（Direct Copper Bonding）基板の裏面にフィンを形成した。それぞれのアームはIGBT チップとFWD チップが一つずつ搭載されている。一つの出力相（ハーフブリッジ）は、それぞれ一つのDCB基板に搭載されている。流路方向は、一般的に使用されるインバータシステムを考慮するとともに、フィンエリアへ冷却液が均一に流れるよう図6に示す短手方向を選択した。図7に、冷却液の流速を比較したウォータージャケットの構造を示す。

図6に示した流路方向では、フィンエリアにおける冷却

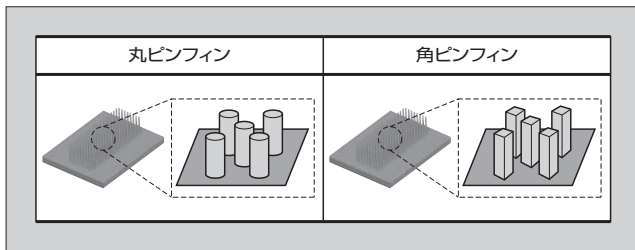


図5 冷却フィンの形状

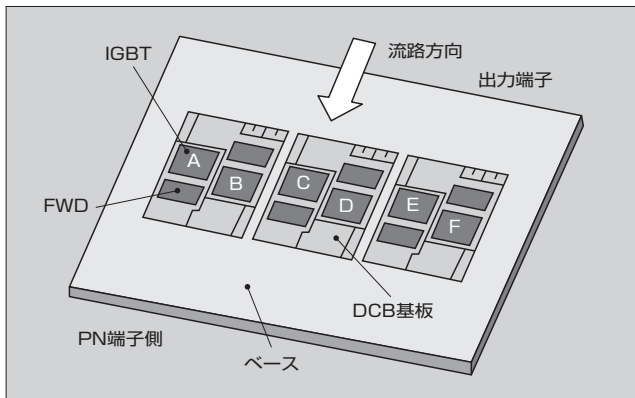


図6 熱流体解析モデル

〈注〉 Icepak：米国 ANSYS Ins. またはその子会社の商標または登録商標

液の流れは、ほぼ一定で均一となった。流路入口から各相のDCB基板下へ均一に流速分布が得られており、各相での冷却性能は同等になると予想される。また、圧力損失を低減するためには、冷却液がフィンエリアを通る距離が短く、冷却液の流速がフィンエリアで一定であることが必要なことから、図7の流路は効率良く冷却が可能であることが分かる。

4.3 フィン形状の選択

図7のウォータージャケットを使用し、熱流体シミュレーションを用いてフィン形状が及ぼすチップ温度と圧力損失からフィン形状を選定した。解析の条件は、インバータ動作時の損失を想定して、発熱量はIGBTを258W、FWDを31Wとし、冷却液はLLC50%、冷却液の流量は10L/min、冷却液の温度は65℃とした。

図8に、チップ温度上昇のシミュレーション結果を示す。それぞれのフィン形状について、チップ温度を確認し

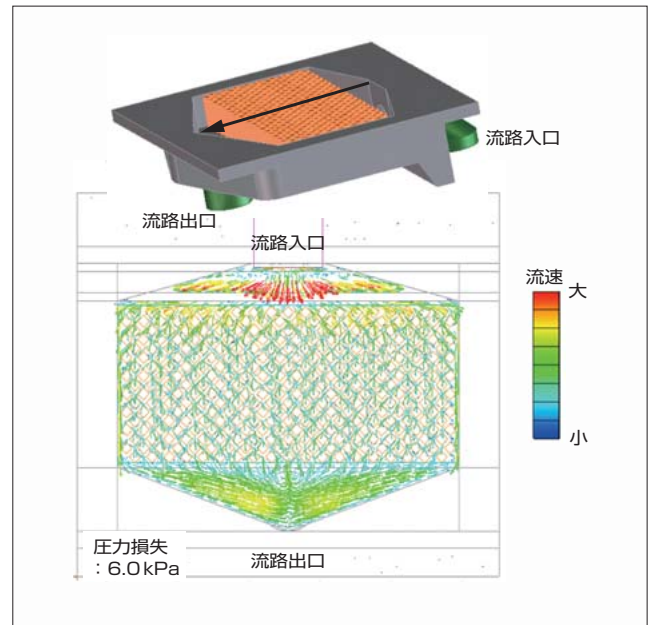


図7 ウォータージャケットにおける冷却液の流速分布

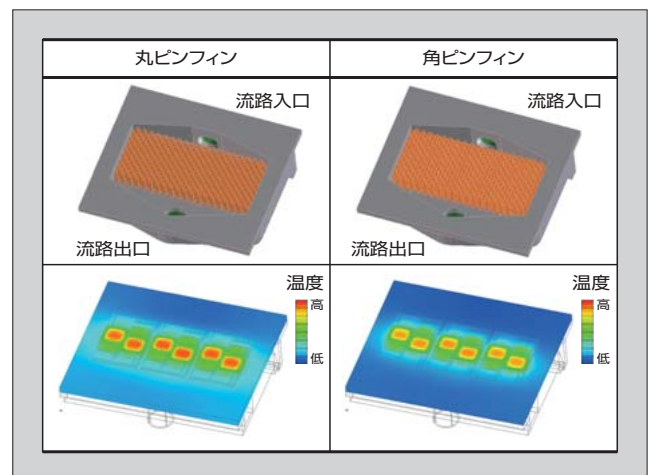


図8 チップ温度上昇のシミュレーション結果

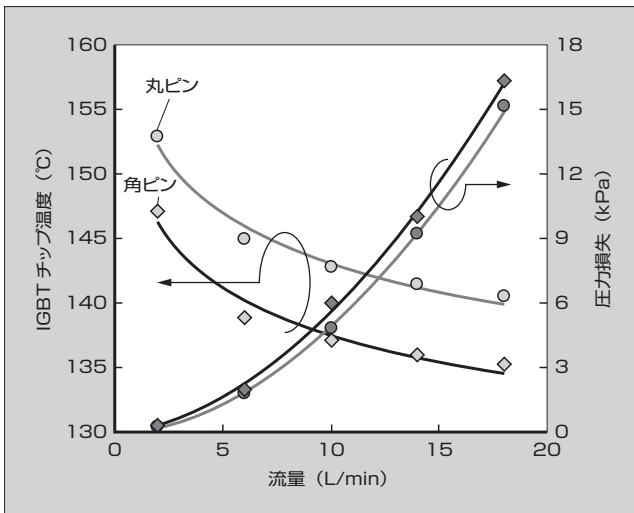


図9 丸ピンフィンと角ピンフィンのIGBTチップ温度と圧力損失の流量依存 (シミュレーション)

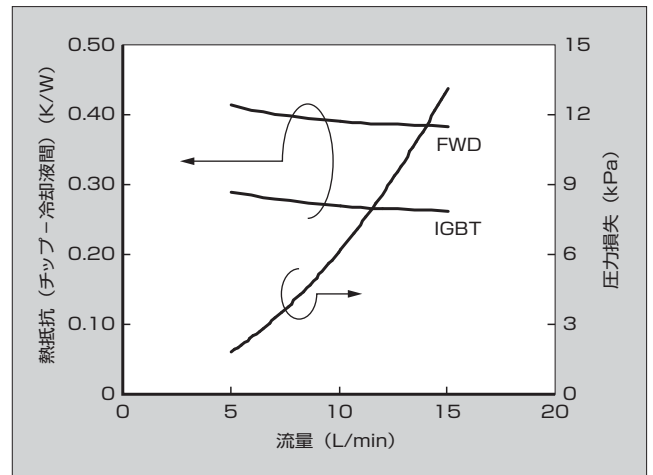


図11 熱抵抗と圧力損失の流量依存 (実測値)

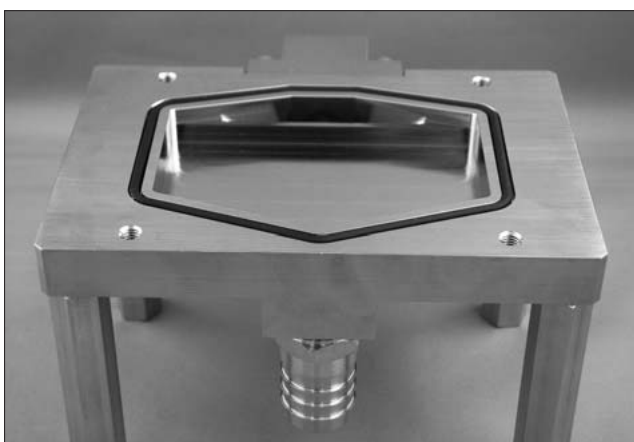


図10 ウォータージャケット外観

表1 シミュレーションと実測のチップ発熱比較 (IGBT) (単位°C)

	A	B	C	D	E	F
実測	133.6	137.6	138.4	139.1	136.6	137.7
シミュレーション	136.7	137.4	137.1	137.6	136.9	136.9
差異	2.3%	0.1%	0.9%	1.1%	0.2%	0.6%

比較した。最大チップ温度は丸ピンフィンが141.6°C、角ピンフィンが136.0°Cとなり、圧力損失は丸ピンフィンが4.8kPa、角ピンフィンが6.0kPaとなった。図9に、丸ピンフィンと角ピンフィンにおけるIGBTチップ温度と圧力損失の比較を示す。丸ピンフィンはフィンの体積密度が小さいので圧力損失は低くなる。逆に、角ピンフィンは表面積が大きくなることでチップ温度は低くなるが、フィンの体積密度が上がると圧力損失が大きくなる。圧力損失の差は1kPa程度で大きな差ではないと判断し、直接水冷の冷却性能を生かせる角ピンフィンを採用した。

4.4 チップ発熱の実測結果

冷却性能に関するシミュレーションの妥当性を確認するため、実際のサンプルによりチップ温度の上昇を確認した。測定条件はシミュレーションの条件と合わせるため次のとおりとした。

- 発生損失：IGBT 258 W, FWD 31 W
- 冷却液：LLC50%
- 流量：5～15 L/min
- 冷却液温度：65°C

実測に使用したウォータージャケットは、前述の検討結果から、図7のモデルを基に製作した(図10)。

流量10L/minにおける角ピンフィンのシミュレーションと実測の比較を表1に示す。表のA～Fは図6における各チップを示している。各相の差異は最大2%程度であり、シミュレーションと実測が同等であることを確認した。実測の結果から、熱抵抗を計算すると0.27 K/W (IGBT 平均値)となった。実測では流量を変えて測定を行い、熱抵抗の流量依存性を確認した。流量5～15 L/minに対する熱抵抗と圧力損失の流量依存(実測値)を図11に示す。

5L/minと15L/minを比較すると、IGBT, FWDどちらも15L/minの方が10%程度であるが熱抵抗が低下し、流量を増やすことで放熱性能が向上することが分かる。しかし、流量を増やすことで圧力損失が大きくなるため、使用時のポンプ性能や流路の設計で最適化が必要である。

5 あとがき

車載用直接水冷 IGBT モジュールについて紹介した。本稿で紹介した電流定格400A品を足掛かりに、今後は600A, 900Aの大電流定格域の展開を予定しており、モータ出力が100kW程度までのインバータシステムに幅広く適用できるよう、系列化を進める。

今後も、より多くのユーザがシステムを設計しやすく、高信頼性・高性能なモジュールを開発して、自動車の環境

負荷低減に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 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.
- (2) Nakano, H. et al. 600 V trench-gate IGBT with Micro-P structure (Proceedings of the 21th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs. 2009, p.132-135.
- (3) Nagaune, F. et al. Small Size and High Thermal Conductivity IGBT Module for Automotive Applications. PCIM Europe 2011, p.785-790.



日達 貴久

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松本工場技術統括部モジュール技術部。



郷原 広道

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、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所 Si デバイス開発センターパッケージ開発部。日本機械学会会員。



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松本工場技術統括部モジュール技術部。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。