

xEV 向けパワー半導体モジュールの直接水冷技術

Direct Water Cooling Technology for Power Semiconductor Modules for xEVs

玉井 雄大 TAMAI, Yuta

小山 貴裕 KOYAMA, Takahiro

井上 大輔 INOUE, Daisuke

自動車産業では、電力を動力源とする電気自動車（EV）やハイブリッド車（HEV）への切替えが加速しており、これらの自動車では小型・薄型、かつ、高い信頼性を持つパワーモジュールが求められている。これに応えるため、富士電機は、ヒートシンクとウォータージャケットを一体化した直接水冷構造を開発し、世代ごとに冷却性能を改善してきた。この構造によって、従来のオープンフィン構造に対して冷却器の変形を抑制でき、ヒートシンクのベース厚さを20%まで薄型化して放熱性能の向上と、2倍以上の温度サイクル耐量を実現し、信頼性を向上させた。

In the automobile industry, the switchover to electricity-powered electric vehicles (EVs) and hybrid electric vehicles (HEVs) has been accelerating. This has increased the demand for smaller, thinner, and more reliable power modules for xEVs. To meet this demand, Fuji Electric has been developing direct water cooling structures that integrate a heat sink and water jacket. The cooling performance of the structures has improved with each successive generation. Compared with conventional open fin structures, the direct water cooling structure can suppress cooling unit deformation. This characteristics allows the heat sink base to be thinned up to 20% to achieve better heat dissipation performance and increase the temperature cycling capability more than twice, improving overall reliability.

1 まえがき

国連サミットで採択された持続可能な開発目標（SDGs：Sustainable Development Goals）の達成に向け、地球温暖化対策のためのCO₂排出量の削減や省エネルギーが世界各国で求められている。自動車産業ではCASE〔Connected（コネクテッド）、Autonomous（自動化）、Shared（シェアリング）、Electric（電動化）〕をキーワードとした大きな変革期を迎えている。電動化では電力を動力源としてモータで走行する電気自動車（EV）やハイブリッド自動車（HEV）への切替えが加速している。このモータ制御に用いるインバータユニットは限られたスペースに搭載されるため、小型・薄型化、低燃費（電費）を意識した軽量化、効率向上などが求められる。これらの要求に応えるため、モータとインバータに加えてギアボックスを統合する新しい機電一体化システムの開発が活発化している。パワーモジュールにおいても、この新システムに最適な小型・薄型化、高信頼性を達成する製品の開発を進めている。

本稿では、xEV向けパワー半導体モジュールのヒートシンクとウォータージャケットを一体化したウォータージャケット一体型フィン構造（Integrated fin）のパワーモジュールの高放熱化、小型・薄型化、および高信頼性技術と、熱流体シミュレーションを行う上で重要な流れの可視化技術について述べる。

2 富士電機の車載用直接水冷パワーモジュールのトレンドと特徴

図1に富士電機の車載用直接水冷パワーモジュールの電力密度のトレンドを示す。これまで富士電機は、軽量かつ

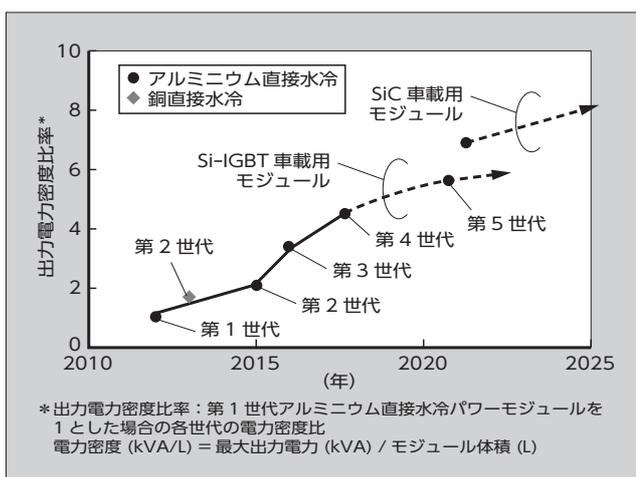


図1 車載用直接水冷パワーモジュールの電力密度トレンド

加工性に優れたアルミニウム製冷却器を備えた直接水冷パワーモジュールを開発してきた。第1世代（2012年）、第2世代（2015年）、第3世代（2017年）、第4世代（2019年）と世代ごとに電力密度が約20%向上している⁽¹⁾。主な適用技術を次に示す。

- 高放熱冷却器設計技術⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾
- 高信頼性はんだ技術⁽¹⁾
- 超音波接合技術⁽²⁾⁽³⁾
- 175°C連続動作保証技術⁽²⁾⁽³⁾
- 半導体素子（チップ）であるIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）とFWD（Free Wheeling Diode）をワンチップ化したRC-IGBT（Reverse-Conducting IGBT）⁽⁴⁾
- リードフレーム配線技術⁽⁵⁾

前述の(a)高放熱冷却器設計技術では、図2に示すウォータージャケット一体型フィン構造を開発し、第2世代か

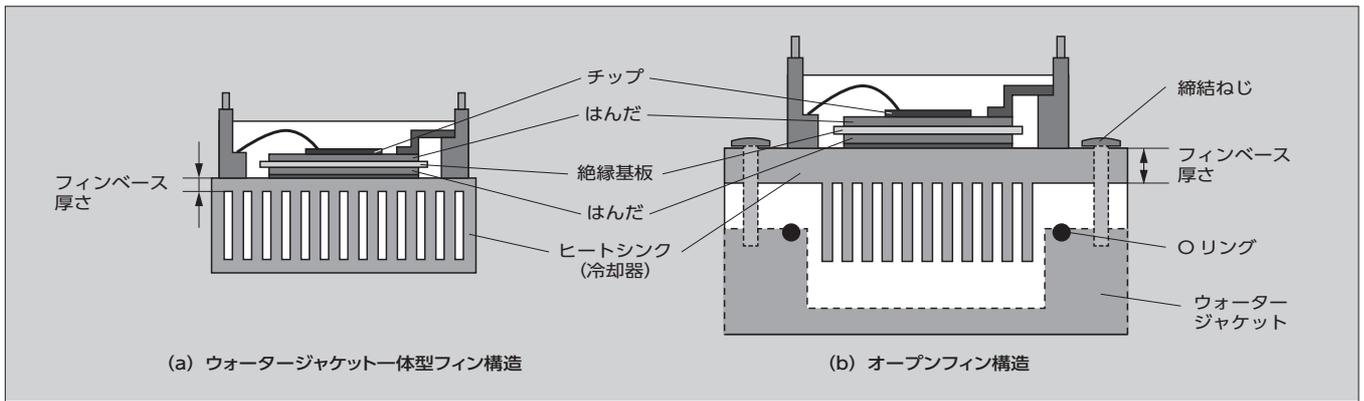


図2 ウォータージャケット一体型フィン構造およびオープンフィン構造の断面図

ら採用し冷却器の冷却性能（放熱性）を向上させてきた。この構造は、一体化していないオープンフィン構造（Open fin）に比べ冷却器の変形を抑制でき、ヒートシンクのベース厚さ（フィンベース厚さ）を20%まで薄型化して冷却性能が向上しているだけでなく、2倍以上の温度サイクル耐量も持っている。

③ ウォータージャケット一体型構造フィンによる高放熱化

3.1 高放熱化の課題

パワーモジュールの放熱性の向上には、冷却器のフィン表面に流れる冷媒の流速を増やすとよい。しかし、図3に示すように放熱性を示す特性である熱抵抗と、冷却器の圧力損失はトレードオフの関係にあり、流速を増やすと圧力損失が大きくなり循環ポンプの負荷が増える。そこで、世代ごとにフィン形状を見直し、このトレードオフを改善⁽⁶⁾して放熱性を向上させてきた。圧力損失が大きくなるように、フィン高さを調整する方法がある。しかし、図4の冷却器の断面図から明らかなように、フィンが高くすると冷却器の体積が増えてしまう。そこで、高パワー密度化するには、顧客が許容できる圧力損失や体積の範囲内で高放熱化と高信頼化を両立する必要がある。

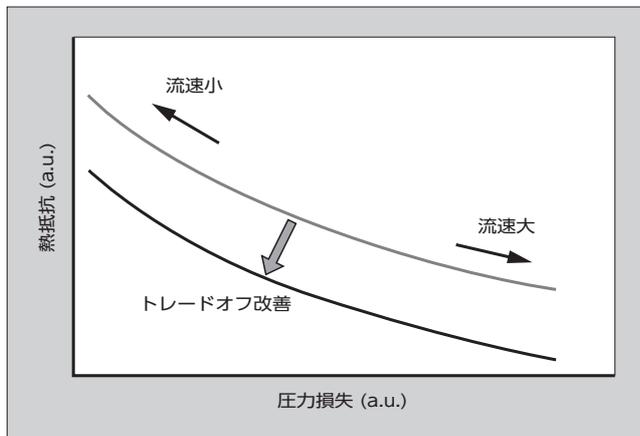


図3 熱抵抗と圧力損失の関係

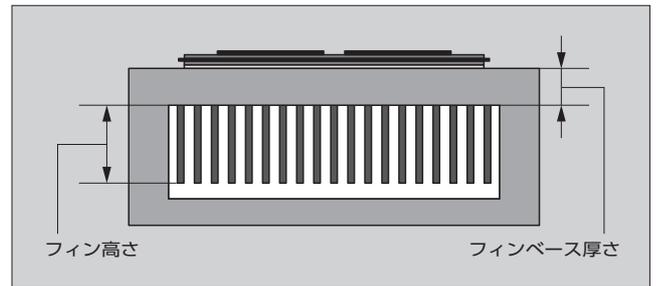


図4 冷却器の断面図

3.2 放熱性の向上

第1世代直接水冷パワーモジュールの熱抵抗を成分ごとに分解して調べた結果を図5に示す。冷却器のフィンベースの熱抵抗が全体の36%を占めており、放熱性能を阻害していた。フィンベースの厚さを20%まで薄くした構造にすればモジュールの熱抵抗を改善できる。しかし、モジュールの熱変形を抑制するには、冷却器の剛性を確保することも必要であった。これまでは、フィンベースに厚さを持たせて剛性を確保していた。

そこで、熱抵抗の改善と熱変形の抑制を両立するため、ヒートシンクとウォータージャケットを一体化したウォータージャケット一体型フィン構造を開発した。図6にオープンフィン構造の第1世代直接水冷（DWC：Direct Water Cooling）パワーモジュールと、ウォータージャ

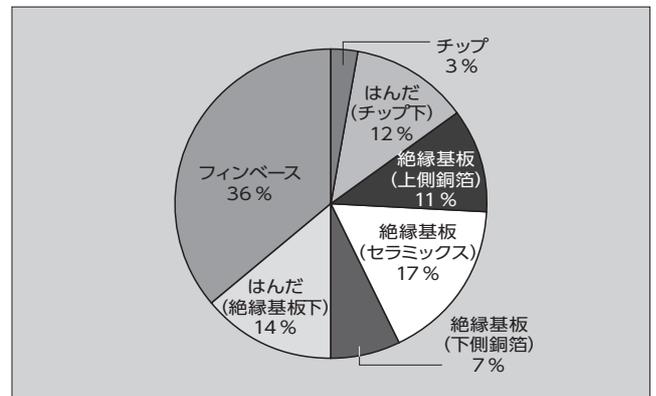


図5 第1世代直接水冷構造の熱抵抗比

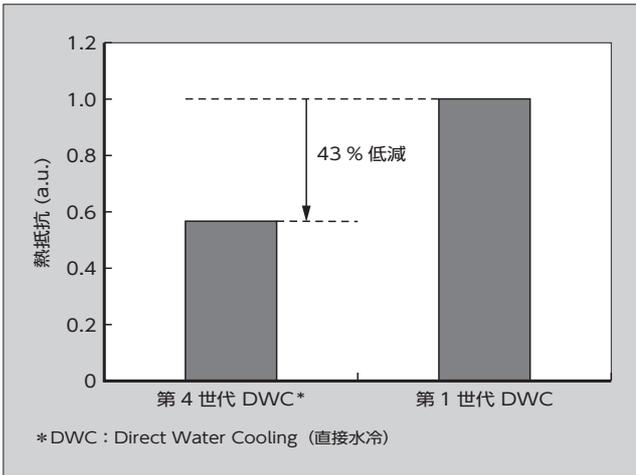


図6 第1世代および第4世代直接水冷パワーモジュールの熱抵抗比較

ケットー一体型フィン構造の第4世代直接水冷パワーモジュールの熱抵抗の比較を示す。第4世代直接水冷パワーモジュールは、ウォータージャケットを一体化することによって冷却器全体の剛性を高め、オープンフィンに比べてフィンベースの厚さを薄型化した。さらに、フィン形状の最適化やはんだを薄くするなど、熱抵抗を低減する施策により、第1世代に比べ熱抵抗を43%低減した。

④ ウォータージャケットー一体型フィン構造による高信頼性化

4.1 冷却器の熱応力による反りの低減

パワーモジュールには、高い放熱性能に加えて高い信頼性が必要である。オープンフィン構造およびウォータージャケットー一体型フィン構造の要素モデルを用いて、熱応力シミュレーション(図7)によって求めた冷却器の反りのフィンベース厚さ依存性を図8に示す。

冷却器のシール性やインバータへの搭載しやすさから冷却器の反りは小さいほど良く、約150 μm 以下になるように設計している。図8に示すように、ウォータージャケットー一体型フィン構造は、剛性を高めた構造としたことで、反りを150 μm 以下に抑えることができる。

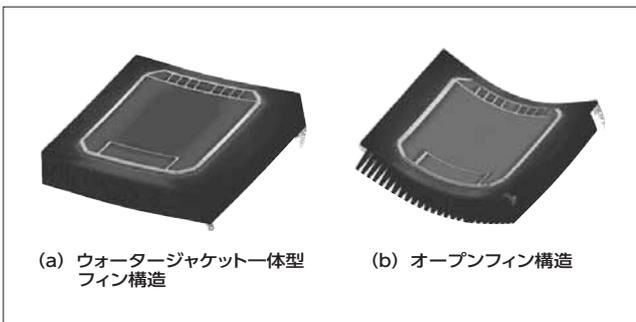


図7 ウォータージャケットー一体型フィンおよびオープンフィン構造の要素モデルの熱応力シミュレーション

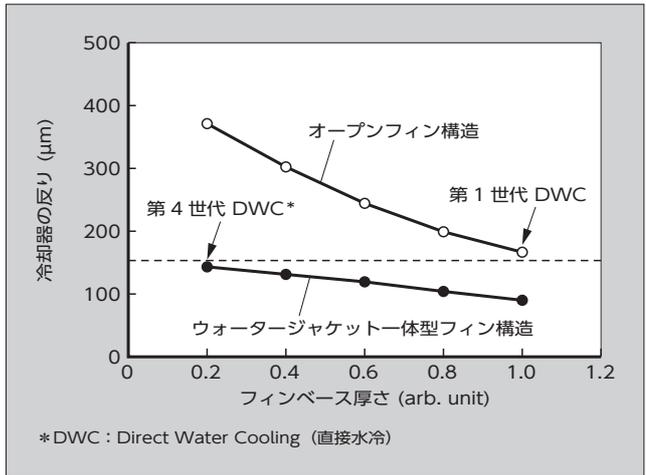


図8 要素モデルを使った冷却器反りのフィンベース厚さ依存性

4.2 温度サイクル耐量の向上

温度サイクルでは、冷却器と絶縁基板の熱膨張係数の差によってはんだ接合部にひずみが繰り返して発生し、はんだにき裂が進展することで熱抵抗が悪化してパワーモジュールの故障に至る。故障が生じるまでの温度サイクルを温度サイクル耐量として図9に示す。ウォータージャケットー一体型フィン構造の温度サイクル耐量は、フィンベースの厚さの影響が小さい。それに対し、オープンフィン構造は、フィンベースの厚さに大きく依存する。オープンフィン構造でフィンベースが薄い場合(0.2 arb. unit)は、絶縁基板の熱変形に冷却器が追従することで、はんだに発生するひずみが小さくなり温度サイクル耐量が高くなっているが、前述したように、反りが大きく実用に適さない。図9において、冷却器の反りが約150 μm だった第1世代と第4世代の要素モデルの温度サイクル耐量を比較すると、ウォータージャケットー一体型フィン構造(フィンベース厚さ0.2 a.u.)はオープンフィン構造(フィンベース厚さ1.0 a.u.)に比べて2倍以上の温度サイクル耐量を持つ。

以上の結果から、フィンベースの薄型化と信頼性の向上

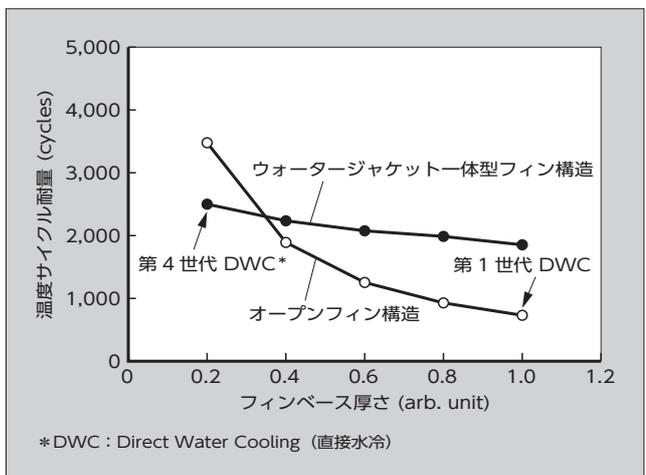


図9 要素モデルを使った温度サイクル耐量のフィンベース厚さ依存性

を両立するには、ウォータージャケット一体型フィン構造が適していることが分かる。第4世代直接水冷モジュールは第1世代に比べて、フィンベースの厚さを20%にし、冷却器全体の高さも1/2（50%減）に削減することができる。

4.3 パワーモジュールの信頼性向上

第1世代および第4世代の直接水冷パワーモジュールの温度サイクル耐量の評価結果を図10に示す。第4世代直接水冷モジュールは、ウォータージャケット一体型フィン構造を採用したことで、1.4倍の温度サイクル耐量を得た。さらに、パワーモジュールの温度サイクル耐量を向上する施策の一つに、はんだ材料の高強度化がある。富士電機は、Sb含有量を最適化して高強度Sn-Sbはんだを開発してきた⁽⁸⁾⁽⁹⁾。第4世代の直接水冷パワーモジュールに高強度はんだを適用することで、今後、信頼性をさらに高めていくことも可能である。

温度サイクル評価後のパワーモジュールのはんだ接合部破壊形態を図11に示す。この破壊形態は1世代と同様に基板とはんだ界面にき裂が進展している。このき裂進展による熱抵抗の悪化が製品の温度サイクル耐量を決めるため、はんだ材料の疲労寿命曲線に基づいた信頼性設計を行う。

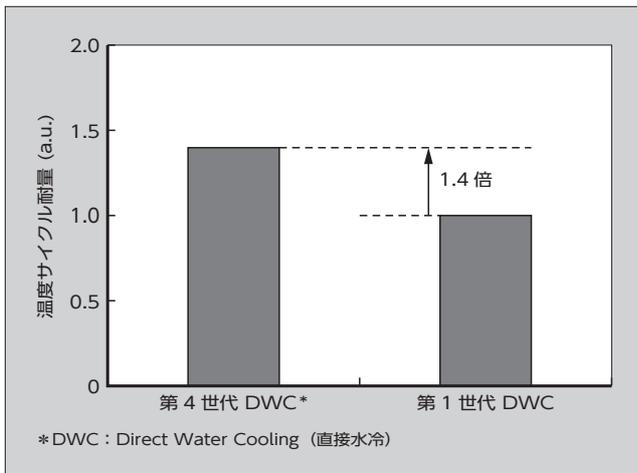


図10 パワーモジュールの温度サイクル耐量

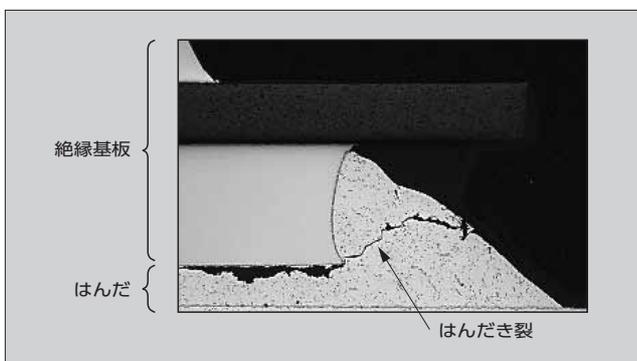


図11 温度サイクル試験後の絶縁基板下はんだ接合部破壊形態

5 冷却器設計の可視化技術

冷却器を設計する上で、熱流体シミュレーションの解析精度と実際の流れを可視化することは重要である。図12に、熱流体シミュレーションによる冷却器流路内の流速分布の計算結果を示す。熱流体シミュレーションで求めた冷却器流路内の流速分布が意図したとおりに再現できているかを検証するために、冷媒に粒子を分散させて透明な冷却器に流し、粒子画像流速測定法（PIV：Particle Image Velocimetry）により冷媒の流速分布を可視化した。図13に、冷却器流路内の粒子の動きを測定した結果を示す。この測定結果を基に、図14に示すように冷却器流路内の流

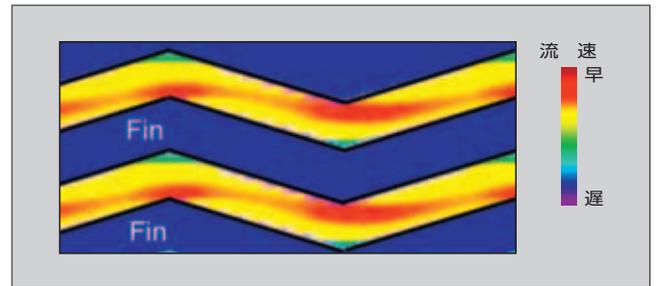


図12 熱流体シミュレーションによる冷却器流路内の流速分布の計算結果

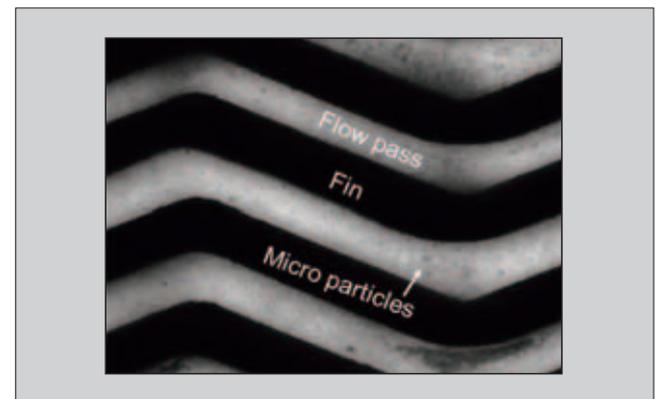


図13 PIVによる冷却器流路内の粒子の動き測定

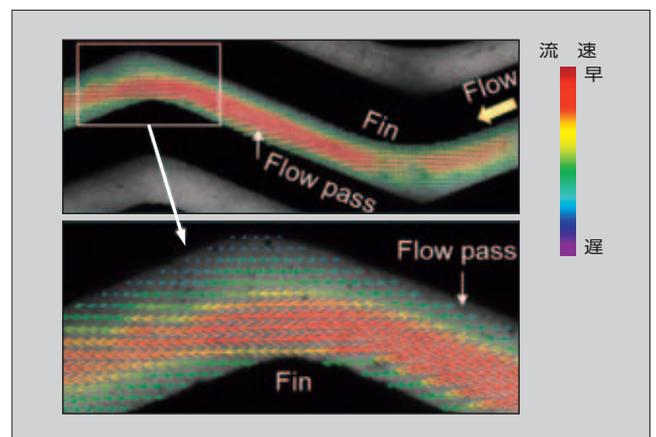


図14 冷却器流路内の流速分布の評価結果

速分布を求めた。その結果、波フィンの屈折部で速くなっていて意図したとおりの流れを再現しており、図 12 の熱流体シミュレーションと整合することを確認した。熱流体シミュレーションと可視化技術を組み合わせ、実際の流れを再現するためシミュレーションモデルのメッシュサイズなどを最適化した。これにより、熱抵抗の誤差が 5% 未満となる解析精度が得られるようになり、冷却性能の向上と限界設計が可能になった。

6 あとがき

本稿では、xEV 向けパワー半導体モジュールの直接水冷技術について述べた。

今後も、これらの技術を基に継続的な技術開発を推進し、お客さまの要求を満足する製品をタイムリーに提供することで、地球温暖化対策のための CO₂ 排出量の削減や持続可能な省エネルギー化社会の実現に貢献する所存である。

参考文献

- (1) 郷原広道ほか. ハイブリッド自動車用 IPM のパッケージ技術. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.4, p.258-262.
- (2) 郷原広道ほか. ハイブリッド車用第 2 世代アルミニウム直接水冷パッケージ技術. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.4, p.258-262.
- (3) 郷原広道ほか. 車載用第 3 世代パワーモジュールのパッケージ技術. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.274-278.
- (4) 佐藤憲一郎ほか. RC-IGBT を搭載した車載用第 3 世代直接水冷型パワーモジュールの高機能化. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.4, p.270-274.
- (5) 井上大輔ほか. xEV 向け第 4 世代アルミニウム直接水冷パッケージ技術. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.4, p.238-242.
- (6) Gohara, H. et al. "Next-gen IGBT module structure for hybrid vehicle with high cooling performance and high temperature operation". Proceedings of PCIM Europe 2014, 1187-1194.

- (7) Saito, T. et al. "Investigation of New Joint Technology for High Temperature Operation and High Reliability of Power Module". Proceedings of the 20th Symposium on Microjoining and Assembly Technology in Electronics. Yokohama, 2014.
- (8) Nishiura, A. et al. "Improved life of IGBT module suitable for electric propulsion system". Proceedings of the 24th EVS, Stavanger, 2009.
- (9) Saito, T. et al. "New assembly technologies for Tjmax=175°C continuous operation guaranty of IGBT module". Proceedings of PCIM Europe 2013, 455-461.
- (10) McKenna, S.P.; McGillis, W.R. "Performance of digital image velocimetry processing techniques". Exp. Fluids, 32 (2002), 106-115.
- (11) The Visualization Society of Japan. "PIV Handbook". print 2002.



玉井 雄大

車載用 IGBT モジュールのパッケージ技術開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部パッケージ開発部。エレクトロニクス実装学会会員。



小山 貴裕

車載用 IGBT モジュールのパッケージ技術開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部パッケージ開発部。



井上 大輔

車載用 IGBT モジュールのパッケージ構造開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部パッケージ開発部。





*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。