

xEV 向け第 4 世代アルミニウム直接水冷パッケージ技術

4th-Generation Aluminum Direct Liquid Cooling Package Technology for xEV

井上 大輔 INOUE, Daisuke

玉井 雄大 TAMAI, Yuta

小山 貴裕 KOYAMA, Takahiro

近年、自動車業界では、ハイブリッド車（HEV）や電気自動車（EV）の開発と普及が加速しており、燃費向上につながる小型・軽量化、低損失化かつ高出力化したパワーモジュールが求められている。富士電機は、高放熱冷却器設計技術および半導体素子上の主回路配線を従来のアルミニウムワイヤからリードフレームに置き換える技術を開発した。車載用第 4 世代直接水冷モジュールに、この高放熱冷却器設計技術の向上に加え、リードフレーム配線技術を適用したことで、第 3 世代直接水冷モジュールに対して、フットプリント削減と低背化により、体積当たりの電力密度を 36% 向上した。

In recent years, the automotive industry has accelerated the development and spread of hybrid electric vehicles (HEVs) and electric vehicles (EVs). As a result, power modules need to be more compact and lightweight while achieving lower loss and higher output in order to improve fuel efficiency. Fuji Electric has developed a design technology for heat-dissipating cooling units, as well as a technology for replacing the aluminum wires in the main circuits of semiconductor devices with lead frames. 4th-generation direct liquid cooling modules for automotive applications use the lead frame wiring technology, as well as the enhanced design technology for heat-dissipating cooling units. They also reduce the footprint and height, thus improving power density per volume by 36% compared with 3rd-generation direct liquid cooling modules.

1 まえがき

国際連合の持続可能な開発目標（SDGs：Sustainable Development Goals）に向けた取組みの中で、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化が世界各国で重要性を増している。ハイブリッド自動車(HEV)や電気自動車（EV）のように、電力を動力源としてモータで走行する電動車（xEV）の普及が加速している。このモータの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、小型かつ搭載方法の自由度の高さ、低燃費や低電費を意識した軽量化や高効率化などが求められる。パワーモジュールにおいても、これらのニーズに対応するため小型・高出力の製品開発を進めている。

2 富士電機における車載用直接水冷モジュールの開発経緯

図 1 に各世代の車載用アルミニウム直接水冷モジュールを、図 2 に車載用直接水冷モジュールの電力密度トレンドを示す。富士電機は、軽量で耐食性に優れたアルミニウム製冷却器を搭載した車載用アルミニウム直接水冷モジュールを開発した。第 1 世代（2012 年）、第 2 世代（2015 年）、第 3 世代（2017 年）と世代ごとに約 20% 以上の電力密度を向上してきた⁽¹⁾。そのために高放熱冷却器設計技術^{(1)~(3)}、高信頼性はんだ技術⁽¹⁾、超音波接合技術^{(2),(3)}、175℃連続動作保証技術^{(2),(3)}、ならびに半導体素子（チップ）である IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）と FWD（Free Wheeling Diode）を統合した RC-IGBT（Reverse-Conducting IGBT）の採用⁽⁴⁾などの技術やチップを開発してきた。

第 4 世代ではさらに高電力密度化・高出力化を狙い、

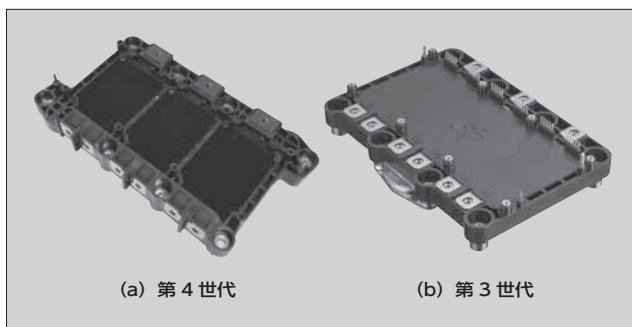


図 1 車載用アルミニウム直接水冷モジュール

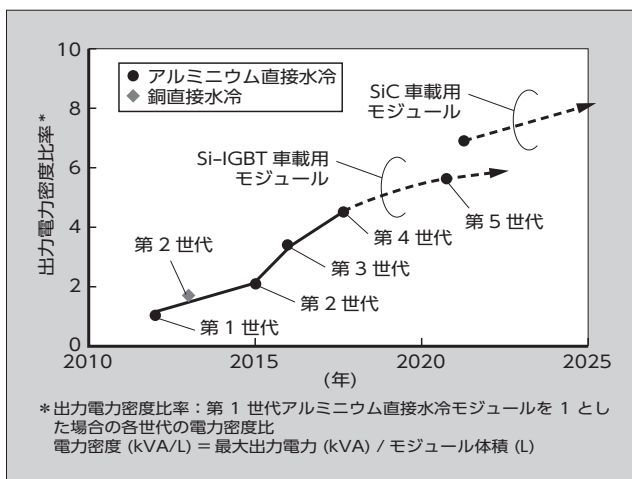


図 2 車載用直接水冷モジュールの電力密度トレンド

高放熱冷却器設計技術の向上に加え、チップ上の主回路配線を従来のアルミニウムワイヤからリードフレームに置き換えた。この効果により、第 4 世代のモジュールは第 3 世代よりも、電力密度を 36% 向上している。

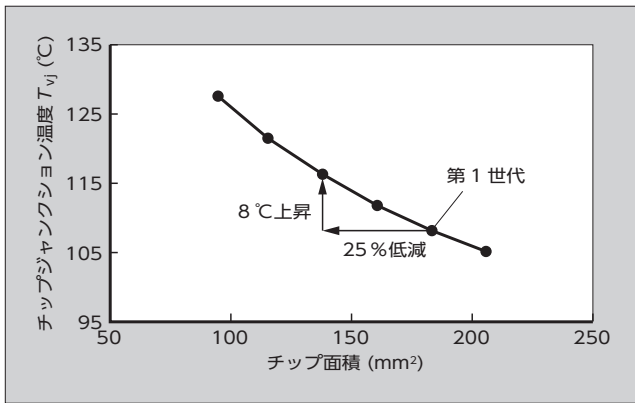


図3 チップサイズがジャンクション温度に及ぼす影響

3 直接水冷パッケージ技術の課題

高電力密度化には高出力化と小型化の両立が必要である。両立するためには、チップサイズをはじめとする構成部材の小型化や高密度実装が必要である。図3に、電流値一定の条件下で直接水冷モジュールを用い、チップサイズがチップジャンクション温度 T_{vj} に及ぼす影響の解析結果を示す。チップ面積が小型化するに従いチップ温度は上昇し、チップ面積を 25% 縮小すると、 T_{vj} は 8°C 上昇する。チップの小型化を図るためには、次の 2 点のいずれかが必要となる。

- (a) 放熱性能を向上してチップ温度を下げる。
- (b) 高耐熱化により動作保証温度を上げる（信頼性の向上）。

そこで放熱性能を向上するための冷却技術として、アルミニウム直接水冷パッケージを開発した。

4 アルミニウム直接水冷パッケージの開発

パワーモジュールの放熱性能は、チップで発生した熱が冷却フィンに伝わる性能を示す熱伝導性（熱伝導率/伝熱距離）と、冷却フィンと冷媒間の熱交換性能を示す熱伝達性（熱伝達率×表面積/モジュール伝熱面積）により決まる。つまり、冷却性能の改善には冷却器自身の熱伝導性と冷媒との熱伝達性に着目した高放熱化が重要である。

4.1 低熱抵抗化

冷却器の構成材料を銅からアルミニウムに替えることで、質量を約 1/3 に軽量化した。一方で、冷却器の熱伝導性において、アルミニウムの熱伝導率（170～210 W/mK）は銅（393 W/mK）と比較して低い。そのため、デバイスを冷却器に接合するベースを薄くすることは、アルミニウム冷却器の性能向上に必須である。この影響度について、熱流体解析を行った。解析に用いた絶縁基板と簡易冷却器をはんだで接合した直接水冷モデルを図4に示す。冷却器フィンは、厚さ 1 mm、間隔 1 mm、高さ 10 mm とし、冷媒は冷媒導入口に均等に流れるように設定して、冷

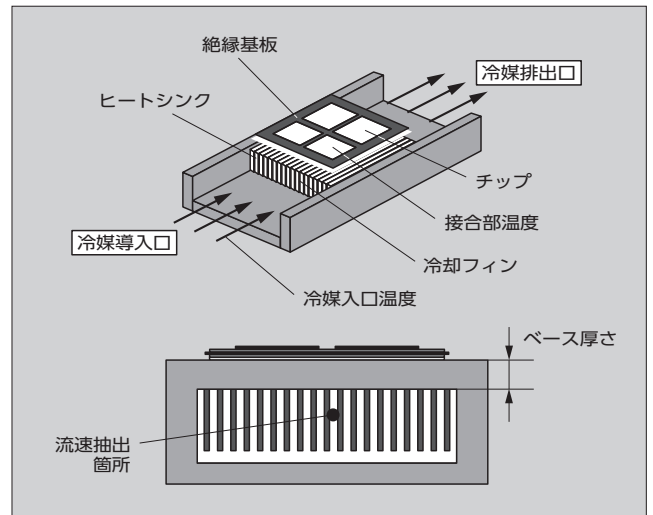


図4 熱流体解析モデル

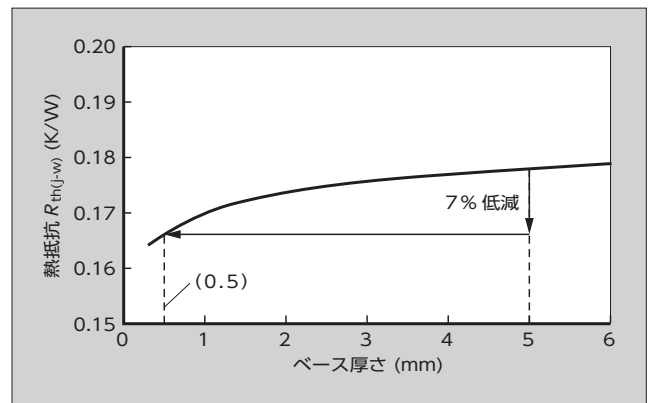


図5 熱抵抗のベース厚さ依存性

却フィン断面の中央部の流速を代表流速とした。

解析した結果を図5に示す。パワーモジュールの放熱性能を表す指標となる熱抵抗 R_{th} は、 T_{vj} と比較対象とする箇所との温度間で発生する温度差を発生損失で除した値である。ベースが薄くなるに従い、 T_{vj} と代表流速抽出点の冷媒温度 T_w 間の熱抵抗 $R_{th(j-w)}$ は低減し、放熱性能が向上することが分かる。5 mm から 0.5 mm まで薄くした場合、 $R_{th(j-w)}$ は 7% の改善を見込むことができる。

4.2 熱伝達率の向上

冷却器の性能を左右するパラメータの二つ目として、冷却フィンと冷媒間の熱交換性能を示す熱伝達率について考察する。冷却器内を冷媒が循環し、冷媒がパワーモジュールで発生した熱は冷媒を介してラジエータから外気に放熱される。その際、冷却器と冷媒間の熱交換性能が放熱能力を左右する。

特に、冷媒の流量と冷却フィン形状により放熱能力（熱伝達）が決まる。

冷媒流量が熱伝達率に与える影響は、式(1)と式(2)から求めることができる。熱伝達率 h は、冷媒が接する面の表面積 A と熱抵抗値 R_{th} を用いて式(1)で表される。

$$h = \frac{1}{R_{th} A} \dots\dots\dots(1)$$

h : 熱伝達率
 R_{th} : 熱抵抗
 A : 冷媒が接する面の表面積

また、熱伝達率は、冷媒の特性と冷媒が接する面の長さ L 、ヌセルト数 N_u と構成部材の熱伝導率 λ を用いて式(2)に置き換えて表すことができる。

$$h = \frac{N_u \lambda}{L} \dots\dots\dots(2)$$

L : 冷媒が接する面の長さ
 N_u : ヌセルト数
 λ : 熱伝導率

ヌセルト数は形状パラメータを用いてレイノルズ数 R_e とプラントル数 P_r より式(3)で計算することができる。この時、レイノルズ数は冷媒の密度 ρ 、速度 v と粘度 η で式(4)のように表される。プラントル数は比熱 C_p と冷媒の熱伝導率 λ で式(5)のように表される。

$$N_u = 0.664 R_e^{1/2} P_r^{1/3} \dots\dots\dots(3)$$

R_e : レイノルズ数
 P_r : プラントル数

$$R_e = \frac{\rho v L}{\eta} \dots\dots\dots(4)$$

ρ : 冷媒の密度
 v : 速度
 η : 粘度

$$P_r = \frac{\eta C_p}{\lambda} \dots\dots\dots(5)$$

C_p : 比熱

これらの式を組み合わせることで、式(6)のように熱伝達率 h と流速 v の関係が求まり、熱伝達率は流速の 1/2 乗に比例することが分かる。

$$h = 0.664 \left(\frac{\rho^3 \lambda^4 C_p^2}{\eta L^3} \right)^{1/6} v^{1/2} \dots\dots\dots(6)$$

この式から、流速に対する熱伝達率を試算した結果を図 6 に示す。このグラフから冷媒流速が速い程、熱伝達率が大きくなり、冷却フィンから冷媒への熱交換においては、冷却フィン表面の冷媒流速を速くすることが放熱性能の向上に効果的である。

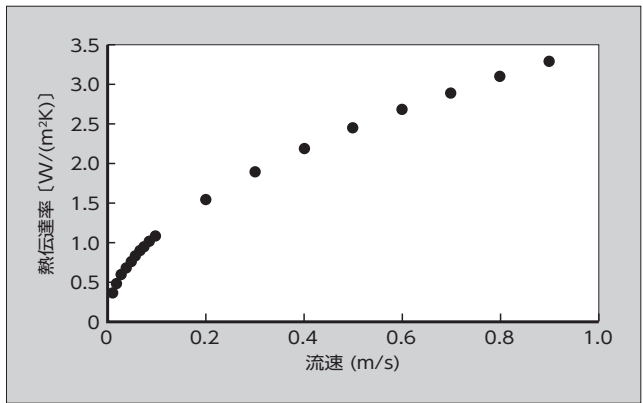


図 6 熱伝達率と冷媒流速の関係

4.3 冷却フィン間の冷媒の流れ

冷却器内部を流れる冷媒は、冷媒が流れる際の摩擦や表面形状、冷媒の粘性などによって、冷媒の流れ方が変化する。限られた空間内で冷却性能を向上させる場合、冷却フィンが複雑化する。この閉空間内を流れる冷媒の様子を図 7 に示す。冷却フィン間のような平行平板内部での冷媒流速を上流では均一と仮定した場合、下流に進むほど中央部で速く平板表面部で遅くなる流速分布が生じる。これは平板表面の摩擦と冷媒の粘性による影響であり、速度境界層が発達するためである。

冷却フィン表面と流路中央部の流速を比較した場合、上流から下流へ流れるにつれて冷却フィン表面の流速は大きく低下し、中央部との流速の差は大きくなる。放熱性能は冷媒の冷却フィン表面の流速に依存するため、流速分布の差が増大する下流側では放熱性能が低下する可能性がある。

熱交換性能を考慮した場合、冷却フィンの表面の流速をいかに保つことができるかが重要であり、この境界層の発達を抑制することが冷却性能を向上させる。

富士電機では、これらを考慮した最適な冷却フィン形状になるように、これまで図 8 に示すようにストレートフィンや波フィン形状を開発し、世代ごとに約 10% 放熱性能が向上した。

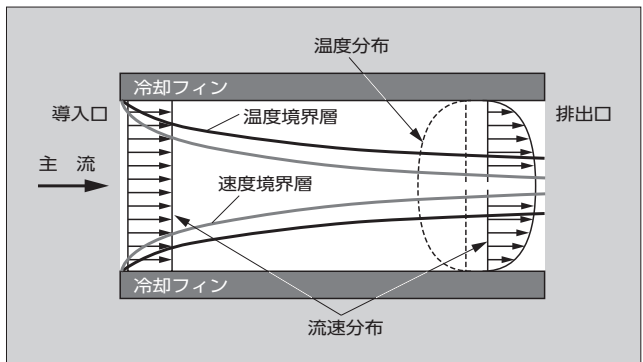


図 7 流路長さと速度境界層の関係

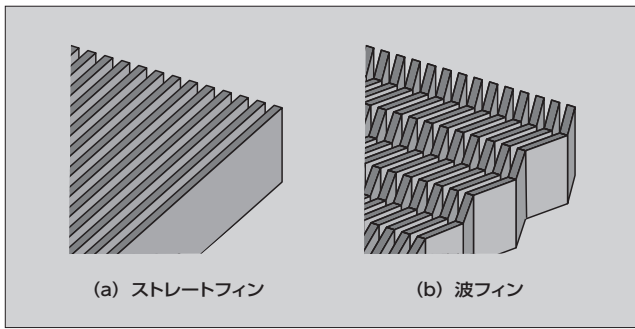


図 8 アルミニウム直接水冷構造の冷却フィン形状

4.4 第 4 世代直接水冷パッケージ

4.1 節から 4.3 節により得られた結果を基に、第 4 世代のアルミニウム直接水冷パッケージを設計した。第 2 世代から採用しているヒートシンクとウォータージャケットを一体化した冷却構造を基に、ベース厚さを最適化した。さらに、第 3 世代では二次元冷却フィン形状であったが、第 4 世代では三次元冷却フィン形状とした。これにより冷媒流れを三次元で強制的に屈折させて冷却フィン表面に向かう流れを発生させることで、冷却フィン表面の冷媒流速を向上させて、境界層を薄くする。

図 9 に構造別の熱抵抗を示す。新構造では、ベースの熱伝導性向上と冷却フィンの熱伝達性を向上したことにより、従来構造と比較して熱抵抗を 15% 低減した。

また、直接水冷パッケージの冷却器は、放熱性能だけでなくインバータ実装時の気密性能を同時に担保する必要がある。冷却器は構成する部品の中でも熱膨張係数が大きく (23 ppm)、変形を抑制する工夫が必要である。これまで第 2, 第 3 世代に適用した直接水冷構造は、流路を形成するウォータージャケットを一体化させることで、気密性能を確保するエリアを限定・縮小化することができ、気密設計を容易にしている⁽³⁾。

この一体化構造は、冷却フィンを応力緩和層として扱うことで、ベースプレートを薄くした場合も熱変形を抑えることができ、放熱性能と気密性能の確保を可能にしている (図 10)。

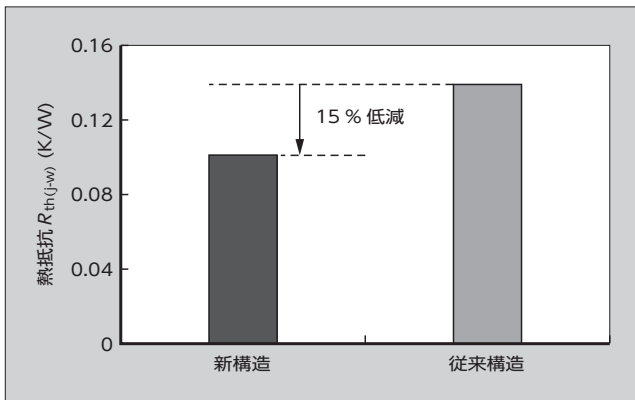


図 9 熱抵抗比較結果

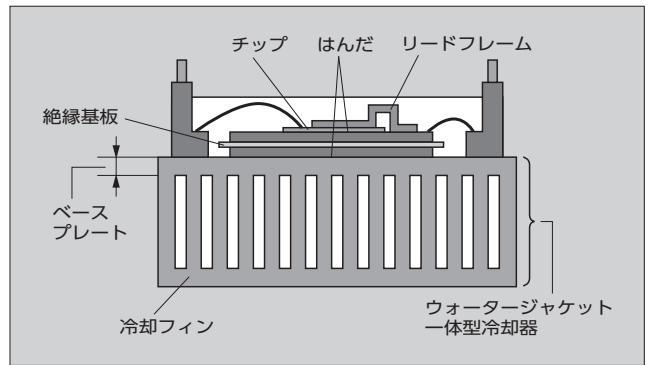


図 10 第 4 世代アルミニウム直接水冷構造

5 リードフレーム配線構造

第 3 世代までのアルミニウム直接水冷パッケージでは、内部のチップ上の主回路配線にアルミニウムワイヤを採用している。アルミニウムワイヤを用いる場合、電流容量に応じた最適な本数のワイヤを配線するために必要なボンディングエリアを確保する必要がある。高密度化 (小型・軽量化) するために、第 4 世代のモジュールでは内部の主回路配線にリードフレーム配線を採用した。

5.1 熱拡散効果

リードフレーム配線はチップとの接合面積が広く、導電率が高い銅材を用いることで、リードフレーム接合面からの熱拡散効果によるチップ温度の低減が図 11 に示すようにリードフレーム配線構造によりチップ温度が均一化する。これにより、アルミニウムワイヤ配線構造 (図 12) と比較して、チップ最大温度は約 16°C 低減した⁽⁸⁾。

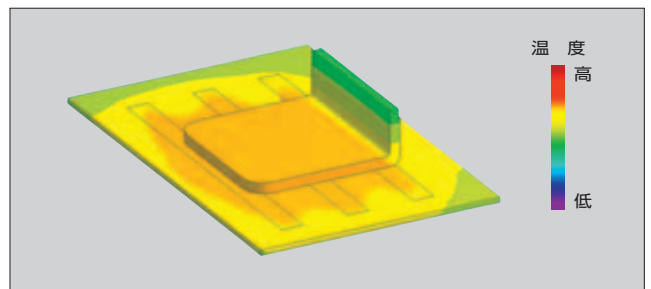


図 11 リードフレーム配線構造のチップ温度分布

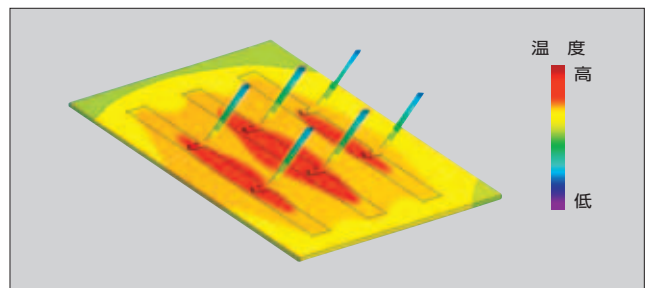


図 12 アルミニウムワイヤ配線構造のチップ温度分布

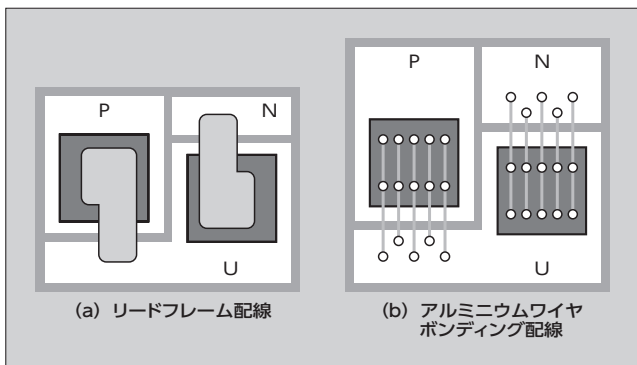


図 13 内部レイアウト

5.2 リードフレーム配線による高密度実装化

図 13 に、アルミニウムワイヤ配線とリードフレーム配線の内部レイアウトを示す。リードフレーム配線では銅端子と絶縁基板銅回路が、チップと銅回路間の接合と同様にはんだで接合されるため、製造性が容易かつ強固な接合部が得られる。

また、導電率の高い銅端子をはんだ接合したことで、リードフレーム配線構造はアルミニウムワイヤボンディング配線構造と比較して実装面積が 15% 縮小した。これにより、モジュールの小型・高電流密度化に対する効果が期待できる。

直接水冷パッケージの放熱性能の向上に加え、リードフレーム配線技術を適用したことで、第 4 世代のアルミニウム直接水冷モジュールは、第 3 世代のモジュールに対してフットプリント削減と低背化を実現した。これにより、体積当たりの電力密度を 36% 向上した。

6 あとがき

xEV 向け第 4 世代アルミニウム直接水冷パッケージ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、顧客満足度の高い製品を提供するとともに、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化の取組み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) 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, May 20-22, Nuremberg, p.1187-1194.
- (6) 石塚勝. 熱設計技術解析ハンドブック. 三松株式会社出版, 2008, p.52-58.
- (7) Kays, W.M. And London, A. L., "Compact Heat Exchangers, 3rd edition". Reprint (1998), McGraw-Hill, p.108-114.
- (8) Osawa, A. et al. "High I 2 t capability power modules for xEV power train with leadframe and RC-IGBT combination". Proceedings of PCIM Asia 2018, June 26-28, Shanghai, p.176-180.



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。



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。





*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。