

# xEV 向けモジュールのパワーサイクル寿命向上

## Improved Power Cycle Reliability for xEV Modules

中村 瑤子 NAKAMURA, Yoko

渡壁 翼 WATAKABE, Tsubasa

浅井 電彦 ASAI, Tatsuhiko

電動車において、インバータとモータなどの駆動システムを統合した機電一体型システムの開発が進んでおり、このシステムに搭載されるパワーモジュールも高電力密度化・高信頼化が必要である。富士電機が開発した第4世代車載用パワーモジュールでは、リードフレーム配線と樹脂封止構造により高電力密度化と熱変形抑制による高信頼化を実現している。今回、さらなる高信頼性確保のため、樹脂密着性を向上するリードフレームの粗化技術を開発した。この技術により粗化未処理と比較して、密着力が2倍以上に向上し、モジュールの $\Delta T_{vj}$ パワーサイクル耐量は1.3倍に向上した。

Integrated mechanical and electrical systems for electrified vehicles are being widely developed. They include drive systems, such as inverters and motors, and power modules for the components are also in need of high power density and reliability. Fuji Electric's 4th-generation automotive power module achieves high power density and high reliability by suppressing thermal deformation through the use of lead frame wiring and a resin molding structure. In order to ensure higher reliability, we have developed a lead frame roughening technology that improves resin adhesion. Compared to untreated roughening, this technology improves adhesion twofold or more and improves the module's  $\Delta T_{vj}$  power cycle reliability by a factor of 1.3.

### 1 まえがき

カーボンニュートラルの実現に向けて、CO<sub>2</sub>排出量削減が世界各国で重要性を増している。自動車産業では、CO<sub>2</sub>の排出量を削減するため、ハイブリット自動車（HEV：Hybrid Electric Vehicle）やプラグインハイブリット自動車（PHEV：Plug-in Hybrid Electric Vehicle）、電気自動車（BEV：Battery Electric Vehicle）のように、電気を動力源としてモータで走行する電動車（xEV）の普及を加速している。電動化においては、インバータとモータなどの駆動システムを統合した機電一体型システム“eAxle”の開発が活発化している。eAxleは、自動車の中の限られたスペースに搭載されるため、小型かつ薄型で取付け位置の自由度が高いことや、低燃費（電費）を実現するために軽量かつ高効率であることが求められている。昨今、大型車の電動化が進んでおり、パワーモジュールもより一層の高電力密度化や大容量化が求められ、発熱密度の増大に対応する信頼性向上が重要となっている。

### 2 高電力密度・高信頼性を実現するパッケージ技術

#### 2.1 高電力密度化、高信頼性に向けた取り組み

図1に、富士電機の子載用パワーモジュール電力密度の年次推移を示す。これまで高放熱冷却器や高信頼性はんだ技術<sup>(1)</sup>、超音波接合技術<sup>(2)(3)</sup>、175℃連続動作保証対応技術<sup>(2)(3)</sup>、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）を一体化したRC-IGBT（逆導通IGBT：Reverse Conducting IGBT）<sup>(5)</sup>を開発し、パワーモジュールの高電力密度化を実現してきた。

図2に車載用IGBTモジュールの構造の比較を示す。第

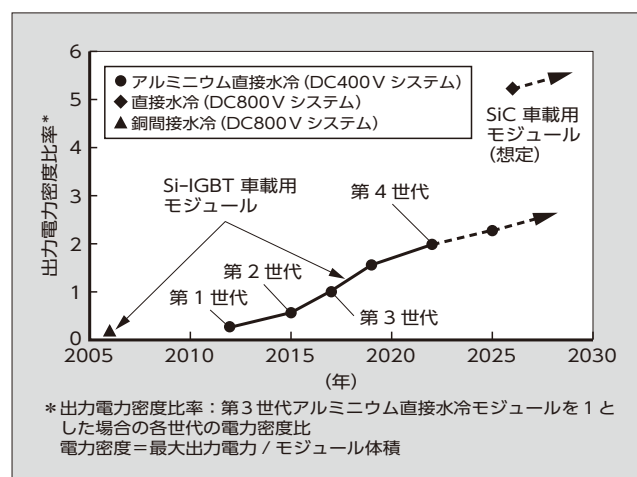


図1 富士電機の子載用パワーモジュール電力密度の年次推移

4世代では、高電力密度と高信頼性を達成するため、リードフレーム配線技術と樹脂封止を適用している。封止材料を従来のゲルに替えてエポキシなどの固形樹脂とすることにより、温度変化に伴うモジュール内部部材の熱変形を抑制し、モジュール部材間の線膨張係数差に起因するひずみを低減した。これにより、高い $\Delta T_{vj}$ パワーサイクル耐量（パワーサイクル寿命）を確保した。また、図3に内部レイアウトの比較を示す。アルミニウムワイヤを用いる場合、電流量に応じた本数のワイヤを配線しボンディングエリアを確保する必要があった。一方で、リードフレーム配線は、銅製のリードフレームと絶縁基板銅回路および半導体チップをはんだで接合している。導電率の高い銅材を用いることにより、アルミニウムワイヤ配線と比較して実装面積を15%縮小した<sup>(4)(6)</sup>。これにより、モジュール面積を削減しモジュール体積当たりの電力密度を36%向上した<sup>(4)(6)</sup>。

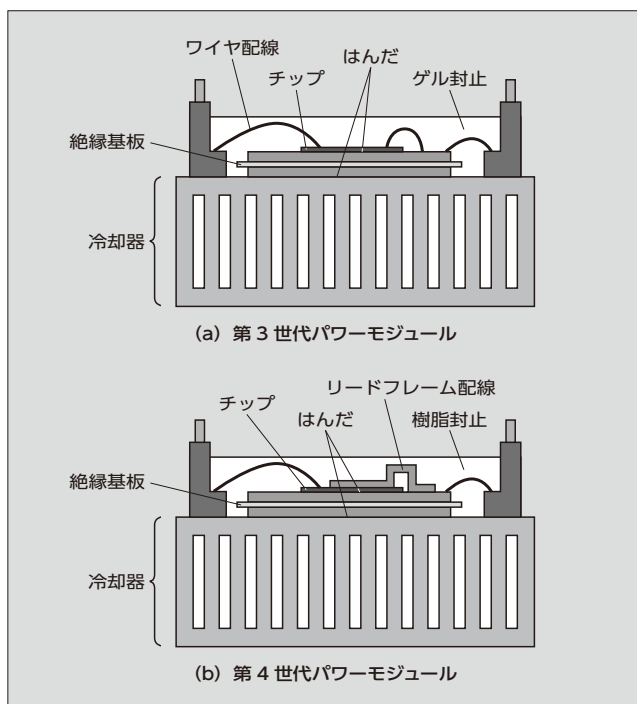


図2 車載用 IGBT モジュールの構造の比較

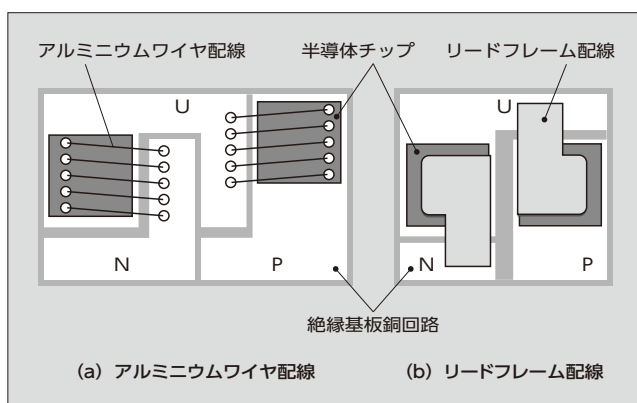


図3 内部レイアウトの比較

## 2.2 高電力密度化・高信頼化の課題

2.1 節で述べたように、第4世代モジュールは、樹脂封止およびリードフレーム配線の適用により高い $\Delta T_{vj}$  パワーサイクル耐量を確保している。通電によるモジュール内部部材の熱変形を樹脂封止で抑制しているが、高出力化が進みチップの発熱が増えると部材の熱変形が大きくなり、接合部における熱応力が樹脂の密着力を上回って樹脂剥離が発生する懸念がある。リードフレームとの間で樹脂剥離が進むと、チップ周辺の接合部の熱変形抑制効果が弱まり、チップ周辺の熱変形が増大することに伴い故障が発生する。特に、チップの発熱と冷却を繰り返すパワーサイクル下では、樹脂剥離とそれに伴う亀裂が進展しやすい。そのため、さらなる高出力と高信頼性の両立には樹脂とリードフレームの密着性を向上する必要がある。

樹脂密着性を向上させる手法としては、密着助剤の添加や熱処理、プライマー材などによるコーティング処理と

いった化学的に密着性を向上する手法と、表面凹凸形状によるアンカー効果を利用して物理的に密着性を向上する手法が挙げられる。後者は、必要な部分に選択的に加工ができることから、樹脂密着性向上手法としてリードフレームの表面粗化を選定した。

## ③ リードフレーム粗化による密着性向上技術

### 3.1 リードフレーム面粗さと密着強度の関係

図4に面粗さと密着強度の関係を示す。ここで、面粗さを適切に表すパラメータとして、表面積の増加分に着目した $Sdr$ （展開面積比）を選定した。 $Sdr$ は、表面積の増加割合を表し、表面積 $A_1$ とその表面をXY平面に投影した時の面積 $A_0$ から増加割合を求め、式(1)のように表される。

$$Sdr = \{ (A_1/A_0) - 1 \} \times 100 (\%) \quad \cdots \cdots (1)$$

$Sdr$ の増加とともに密着強度が増加し、 $Sdr$ が0.2よりも大きいと密着強度が飽和した。また、 $Sdr$ が0.2付近を境に破壊モードが異なることが分かった。 $Sdr$ が0.2よりも小さい領域では界面破壊が主となるのに対し、 $Sdr$ が0.2よりも大きい領域では凝集破壊が主となり、密着強度が樹脂のバルク強度を上回った。

この結果から、 $Sdr$ を増すことにより、樹脂が微細構造に入り込むアンカー効果（投錨効果）が生まれており、粗化処理により、従来の粗化未処理の試料に比べて2倍以上の密着強度が得られることが確認できた。

### 3.2 粗化手法の選定

表1に粗化未処理状態と各種手法による粗化後の表面状態を示す。各手法の利点と欠点は次のとおりである。

#### (1) 粗化未処理

リードフレーム表面の銅素地は平滑であり、 $Sdr$ は0.04～0.1と小さく、密着強度も低い。

#### (2) 薬液エッチング

薬液によるエッチングで微小凹凸を形成する手法である。一度に複数のリードフレームを処理することが可能である。

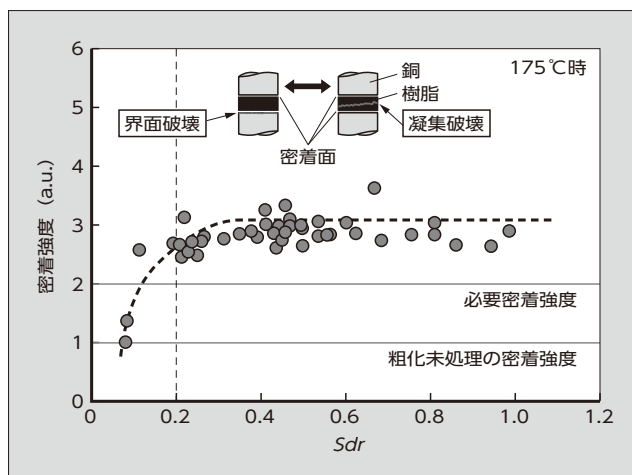
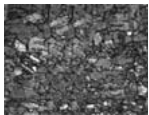
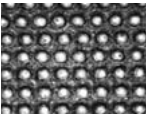
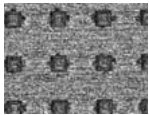


図4 面粗さと密着強度の関係

表 1 粗化未処理状態と各種手法による粗化後の表面状態

| 粗化手法       | (a) 粗化未処理                                                                         | (b) 薬液エッチング                                                                       |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 外観         |  |  |
| <i>Sdr</i> | 0.04 ~ 0.1                                                                        | 0.2 ~ 0.5                                                                         |
| 粗化手法       | (c) レーザ照射                                                                         | (d) 金型プレス                                                                         |
| 外観         |  |  |
| <i>Sdr</i> | 0.2 ~ 1.0                                                                         | 0.1 ~ 0.3                                                                         |

しかし、エッチング液の管理が必要であり、粗さのコントロールが難しい。

### (3) レーザ照射

レーザを照射することで、表面に微小なクレーター状の穴を形成する粗化手法である。粗化形状の自由度が高く、粗さのコントロールが比較的容易である。しかし、加工時に発生する微粒子（パーティクル）の管理が必要となる。

### (4) 金型プレス

複数の微小突起を設けた金型でリードフレーム表面にプレス加工を行い、微小な凹みを形成する粗化手法である。リードフレーム製造段階で粗化加工できるため、粗化のための製造工程を削減できる利点がある。しかし、金型の微細加工の制約から粗さの制御範囲が小さい。

これらの比較検討の結果から、粗化形状の自由度が高く、安定的に粗化処理ができるレーザ照射を選定した。

## 3.3 粗化形状の最適化

図 5 にレーザ照射による粗化加工の模式図を示す。レーザをリードフレーム表面に照射すると、クレーター状の窪み（スポット）が形成される。ガルバノスキャナを用い、リードフレーム表面をなぞるように走査することにより、面内に等間隔でスポットを形成することができる。

レーザ粗化において表面状態に影響を及ぼす主要なパラ

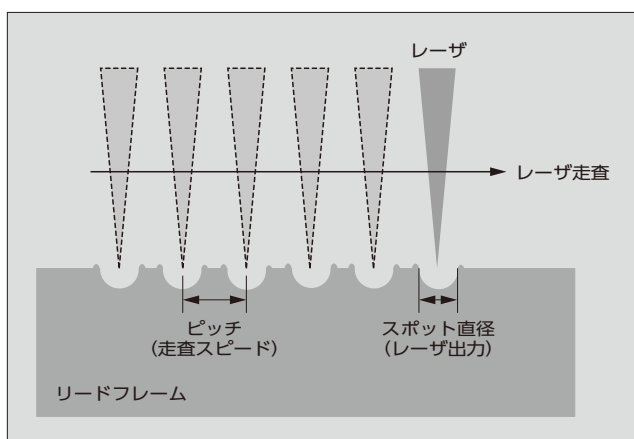


図 5 レーザ照射による粗化加工の模式図

メータには、(1)波長、(2)出力、(3)走査スピードがあり、各パラメータによるスポット形状の制御性を確認した。

### (1) 波長

汎用のレーザ装置の出力波長として、約 1,000 nm（赤外レーザ）か約 500 nm（緑レーザ）が用いられている。緑レーザはリードフレームの素材である銅への吸収率が優れるが、出力の制御範囲が小さく、粗さのコントロール範囲が狭いことが分かった。一方で、赤外レーザは銅への吸収率は低いものの、出力の制御範囲が広く、粗さのコントロール性に優れていることを確認した。このことから、リードフレームの粗化には赤外レーザを選定した。

### (2) 出力

赤外レーザの出力を変えて粗化加工を行い、形成されたスポットの直径を測定したところ、スポットの直径は出力に比例することが分かった。一方、スポット深さはレーザ出力に依存しなかった。これは、銅に対する赤外レーザの吸収が小さく、熱エネルギーの影響が表層近くのみに残ったためであると考えられる。このことから、レーザ出力を調整することにより、一定の深さで任意の直径のスポットを形成できることが分かった。

### (3) 走査スピード

等時間間隔で出力されるレーザの走査スピードを変えることにより、スポットが並ぶ間隔（ピッチ）をコントロールできることを確認した。

図 6 に、レーザ出力と走査スピードの二つのパラメータを変更して粗化加工した際の粗化加工条件と粗化形状を示す。レーザ出力を大きくするにつれてスポットの直径が大きくなることが分かる。一方、走査スピードを上げるにつれて、スポット間の間隔は大きくなっている。図 6 (A) では、レーザ出力が小さく走査スピードが速いため、比較的小さなスポットが離隔して並んでいる。図 6 (I) ではレーザ出力が大きく、走査スピードが遅いためスポット同士が重なり合い、境界線が見えなくなっている。*Sdr*

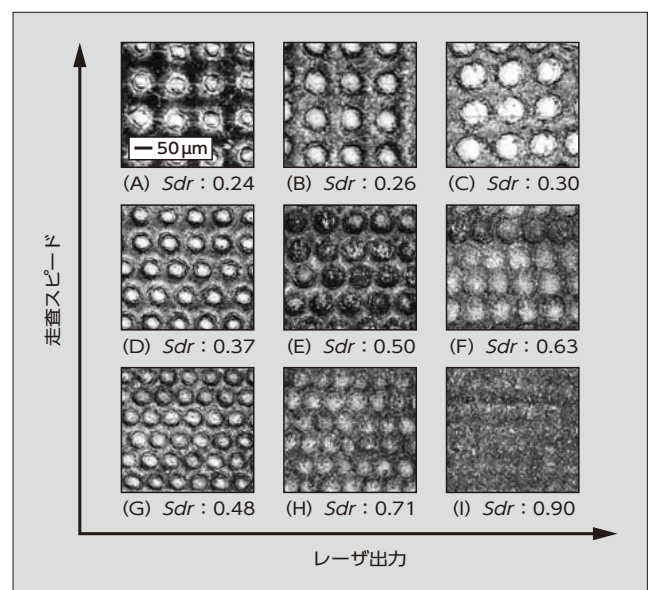


図 6 粗化加工条件と粗化形状

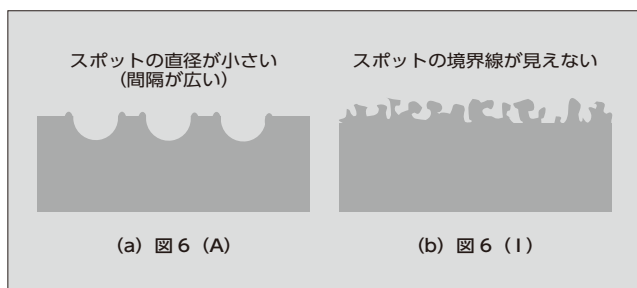


図7 断面形状の模式図

で比較すると、図6(A)が最小で0.24、図6(I)が最大で0.90となった。密着性の観点では、ピッチを小さくし、粗さを大きくすることが望ましく、図6(E)～図6(I)が適している。しかし、図6(F)、図6(H)、図6(I)のようにスポットの密度を上げすぎると、加工に伴い発生するパーティクルが多くなってしまう。図7に図6(A)と図6(I)の断面形状の模式図を示す。図7(b)の図6(I)のようにスポットが重なっている場合、表面に溶融スパッタが堆積した層が形成されており、破壊の起点となる恐れがある。

このように、密着性を確保するために十分な $Sdr$ が得られパーティクル発生が少ない加工条件として、図6(E)が最適であることが確認できた。

#### ④ 粗化加工適用によるモジュールの信頼性向上

レーザ粗化による信頼性向上効果を確認するため、レーザ粗化したリードフレームを用いてモジュールを作製し、 $\Delta T_{vj}$  パワーサイクル試験を実施した。

図8にレーザ粗化を施した粗化エリアを示す。事前の信頼性試験の結果から、リードフレームと樹脂の剥離が発生しやすいのは、発熱源であるチップと接する部分であることを確認しており、当該箇所のみレーザ粗化を施した。

図9にレーザ粗化処理の有無による $\Delta T_{vj}$  パワーサイクル耐量とパワーサイクル試験後の超音波映像装置(SAT: Scanning Acoustic Tomography)の観察結果の比較を示す。粗化未処理のモジュールに対して、レーザ粗化したモジュールでは1.3倍に耐量が向上した。SAT観察により、粗化未処理ではリードフレーム上面に剥離があるのに対し、

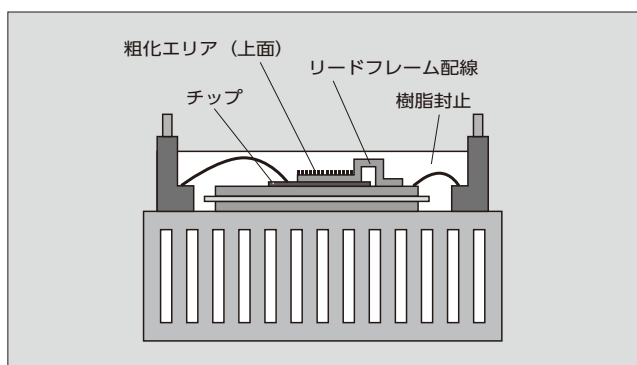
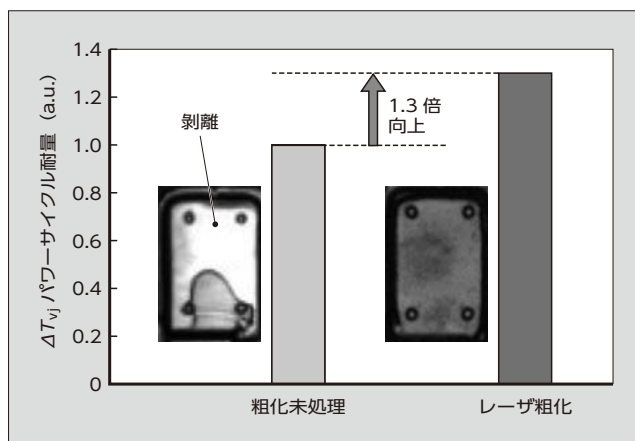


図8 レーザ粗化を施した粗化エリア

図9  $\Delta T_{vj}$  パワーサイクル耐量と SAT 観察結果の比較

レーザ粗化したものは剥離が生じていないことを確認した。粗化未処理ではリードフレームと樹脂が剥離して封止樹脂の変形抑制効果が弱まるためチップ周辺の熱変形が増大し、早期に寿命に達した。今回、レーザ粗化により剥離が防止されたことで、樹脂封止の熱変形抑制効果が維持され、長寿命となった。

#### ⑤ あとがき

本稿では、車載パワーモジュールの高電力密度化と高信頼化を達成するために開発したリードフレーム-樹脂封止構造について述べた。また、さらなる出力向上、信頼性向上に向けリードフレーム粗化技術に着目し、封止樹脂とリードフレームの密着力向上によってパワーモジュールの $\Delta T_{vj}$  パワーサイクル耐量を向上できることを報告した。

今後もパワーモジュールの性能向上を実現する技術開発を推進し、お客さまの要求に応える製品をタイムリーに提供することで持続可能な社会の実現に貢献していく所存である。

#### 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) 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.
- (5) 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.
- (6) Osawa, A. et al. "The highest density IGBT module in the world for xEV power train". Proceedings of PCIM Europe 2017, p.1761-1766.



### 中村 瑤子

車載用 IGBT モジュールのパッケージ技術開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部開発統括部パッケージ開発部。



### 浅井 竜彦

IGBT モジュールの開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部開発統括部パッケージ開発部課長。エレクトロニクス実装学会会員。



### 渡壁 翼

車載用 IGBT モジュールのパッケージ技術開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体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。