

IGBT モジュールのサーマルマネジメント技術

Thermal Management Technology for IGBT Modules

西村 芳孝 Yoshitaka Nishimura

大野田 光金 Mitsukane Oonota

百瀬 文彦 Fumihiko Momose

IGBT モジュールを適用した電力変換装置の熱設計においては、熱伝導率が最も低いサーマルコンパウンドが大きな設計因子である。そのため、サーマルコンパウンドの厚みは IGBT チップ温度に影響を与える。本報告では、そのサーマルコンパウンドの厚さの最適化を図って FEM 解析を行った内容、およびその結果に従った量産工程において、品質を安定させるために適用した技術について記載する。応力分布を考慮したメタルマスクパターンを使用することにより、従来の塗布方法と比較しサーマルコンパウンドの厚みを約 1/3 まで薄く均一に塗布することができるようになった。

In power conversion systems that use IGBT modules, the thermal conductivity of the thermal compound utilized is as low as possible. As a result, the compound thickness affects the IGBT chip temperature. This paper describes the effects of the hardness of components and the ingredients of the compound on the spreading ability of the compound and the distribution of stress when tightening with screws. Additionally, in consideration of the stress distribution, we have proposed a metal mask pattern for applying the compound as thinly as possible. As a result, the compound can be applied at approximately 1/3rd the thickness of the conventional application technique.

① まえがき

近年、地球温暖化への対応のため、化石燃料の使用による二酸化炭素の排出を抑えることを目的とし、風力や太陽光などの新エネルギー利用、ハイブリッドカーの普及促進が図られている。加えて従来の電気電子機器においてもさらなる省エネルギー化が求められており、これら電力変換、モータ制御に必要な IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュール製品の役割は従来に増して大きくなっている。また、高度情報化社会に伴い電子データ化が進んだことから、データセンター向けの無停電電源装置 (UPS) などのニーズが新たに増えている。

市場ごとに IGBT モジュールに要求される特性は異なっているが、高効率化とダウンサイジングは共通の要求である。風力発電においては、発電した電力の変換器に IGBT モジュールが使用されている。電力用変換器はタワー内など限られたスペースに設置することが多く、IGBT モジュールを水冷することにより実装密度を上げ、小型化を図っている⁽¹⁾。

これらの高密度実装要求に対し、富士電機では IGBT チップの高性能化とともに、サーマルマネジメントにより IGBT モジュール製品の小型化・大容量化を同時に追求した製品を開発している^{(2), (3), (4)}。また、お客さまが要求する装置の設計を行う際に必要な、運転状況における IGBT モジュールの損失・温度シミュレータの提供を行っている⁽⁵⁾。

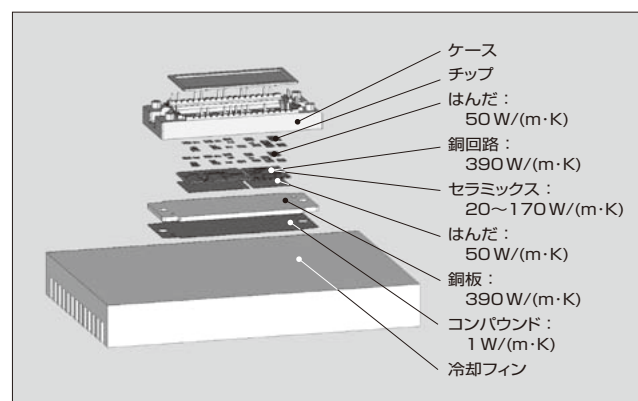
本稿では、IGBT モジュールと冷却フィンを熱的に接合するサーマルコンパウンドの使用法の最適化により低熱抵抗化を達成する技術について紹介する。

② 背景

IGBT モジュールを用いた製品システムの構造および構成部品の熱伝導率を図 1 に示す。IGBT モジュールはチップから発生する熱を逃がすために放熱用フィンに取り付けて使用する。インバータに使用する一般的な放熱フィンは最大 100 μm 程度の表面粗さを持つ場合がある。IGBT モジュールを放熱フィンに搭載するとすきまが生じ、接触熱抵抗を悪化させる要因となる。一般的にこれらの接触熱抵抗を低下させるためにサーマルコンパウンドを放熱フィンと IGBT モジュールの間に塗布する。

一般的なサーマルコンパウンドの熱伝導率は約 1 W/($\text{m}\cdot\text{K}$) であり、図 1 から分かるように IGBT チップからの放熱経路において最も熱伝導率が低い。IGBT モジュールを用いた製品システム全体での高効率化を行うためサーマルコンパウンドの厚みを薄くすることが求められている。しかしながらサーマルコンパウンドの厚さを薄くすると、サーマルコンパウンドを IGBT モジュール全面に広げるこ

図 1 IGBT モジュールの構造と主要な熱伝導率



とは難しくなる。

次章以降では、①サーマルコンパウンドの広がり性に及ぼす要因、②サーマルコンパウンドの塗布方法について報告し、IGBT モジュールを用いた製品システムにおける接触熱抵抗の低減を提案する。

③ サーマルコンパウンドの広がり性に及ぼす要因

サーマルコンパウンドは IGBT モジュール側、もしくは放熱フィン側に塗布し、IGBT モジュールと放熱フィンをねじ止めする力により、IGBT モジュールと放熱フィンのすきまを埋めるように広げて用いる。このとき、IGBT モジュールと放熱フィンはサーマルコンパウンドを介して熱的に接続される。サーマルコンパウンドの広がり方を観察するため、ガラスブロック（表面粗さ $5\mu\text{m}$ 以下）とフィン（表面粗さ $5\mu\text{m}$ 以下）間に面積 81mm^2 、厚み $30\mu\text{m}$ でコンパウンドを塗布し $3.5\text{N}\cdot\text{m}$ にてねじ締めを行った。結果を図 2 に示す。ねじ位置周辺ではサーマルコンパウンドが広がっているが、フラットなフィンを用いても中央部分はサーマルコンパウンドの広がりが悪いことが分かる。この原因を調査するため、IGBT モジュールをフィンにねじ止めした際に IGBT モジュールとフィン間に発生している応力分布について光弾性装置にて測定した。同時に FEM（Finite Element Method）解析も実施した。

図 3 に光弾性装置を用いた IGBT モジュールとフィン間に発生している応力分布を測定した結果を示す。ねじ周辺部に大きな応力が発生しており、図 2 に示したコンパウンド

図 2 サーマルコンパウンドの広がり方

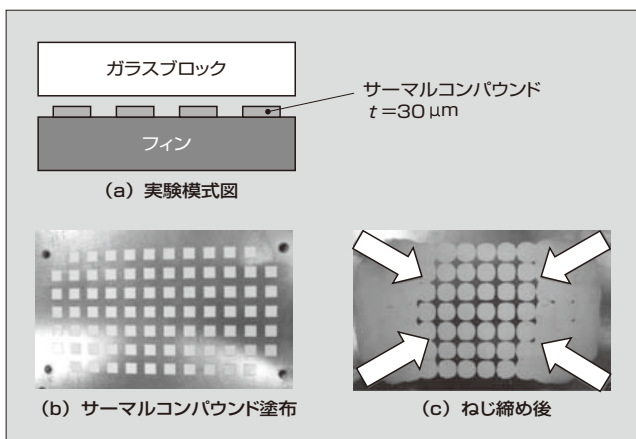


図 3 光弾性装置を用いた応力分布測定結果



広がり実験結果と同様の傾向にあることが分かる。

図 4 に FEM 解析モデルと解析結果を示す。IGBT モジュールサイズを $119\text{mm}\times 59\text{mm}$ とし、 $3.5\text{N}\cdot\text{m}$ でねじ締めをした条件にて解析を実施した。FEM 解析結果から IGBT モジュール-フィン間に発生する応力は、ねじ周辺において高く中央部にいくに従って低下することが分かった。以上の結果から IGBT モジュールとフィンの間に発生する応力は、ねじ位置からの距離によって変化することが明らかになった。

次に応力とサーマルコンパウンドの厚みの関係について数社のコンパウンドを用い調査を行った。使用したサーマルコンパウンドは Electrolube 社製：HTC、Dawcoating 社製：SH340、American oil & Supply 社製：AOS340、信越シリコン社製：G747 である。各種サーマルコンパウンドを一定量平板に塗布後、ガラスブロックを載せ加圧した。このときのサーマルコンパウンドの広がり面積から、各加圧時のサーマルコンパウンド厚みについて換算した。

図 5 に加圧とサーマルコンパウンド厚みの関係を示す。

図 4 FEM 解析モデルと解析結果

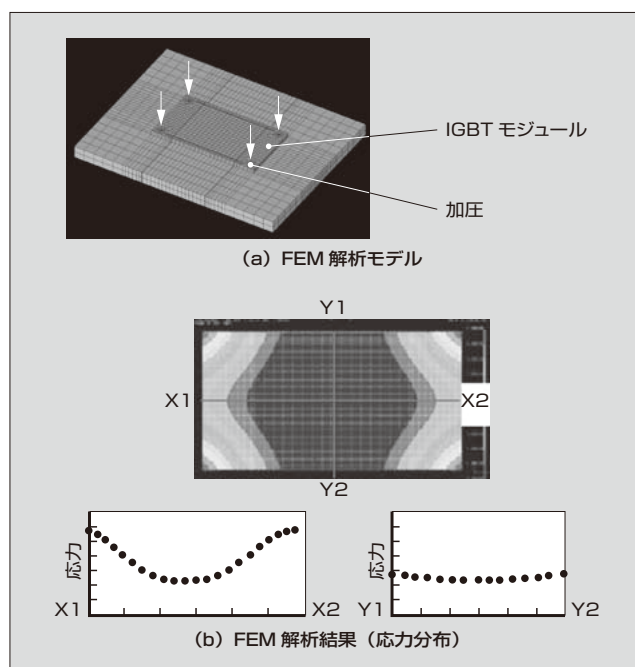


図 5 加圧力とコンパウンド厚みの関係

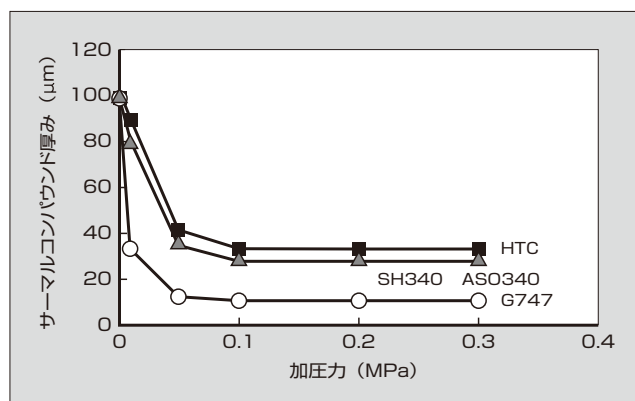


図6 サーマルコンパウンドに使用されているセラミックス

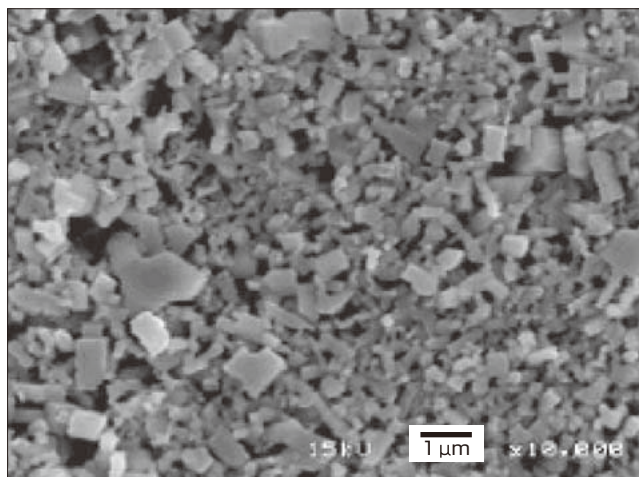
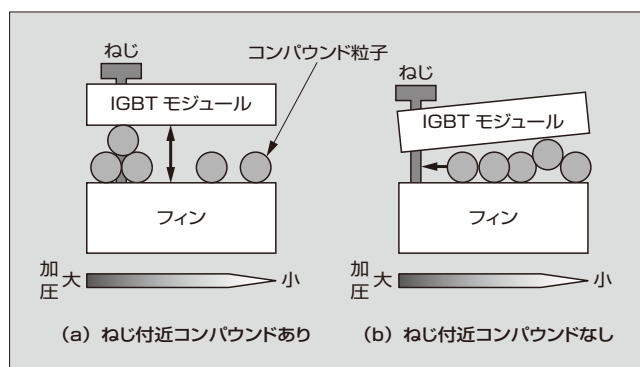


図7 コンパウンド位置と広がり関係（模式図）

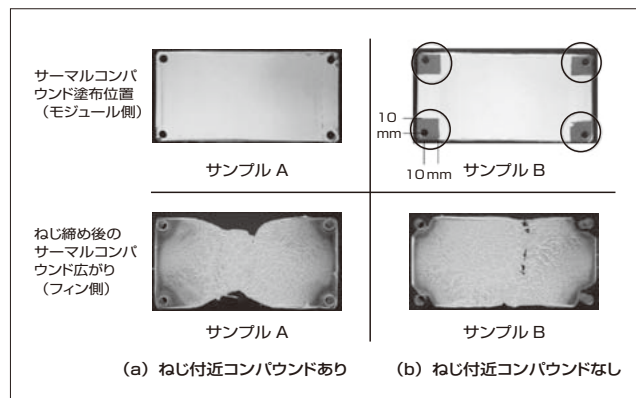


0.1 MPa までは、加圧力が大きくなるにつれサーマルコンパウンドの厚みが薄くなることが分かる。しかし 0.1 MPa 以上では加圧力を増しても、一定の厚み以下に薄くなることはなかった。この理由として、サーマルコンパウンドの材料構成が影響していると考えられる。通常のサーマルコンパウンドの主成分はセラミックス粉末とオイルである。⁽⁶⁾

図6にサーマルコンパウンドに使用されているセラミックス粒子のSEM (Scanning Electron Microscope) 写真を示す。セラミックス粒子のサイズは数 μm であることが分かる。セラミックスの凝集粒子がサーマルコンパウンドを加圧してもある一定厚み以下にならない原因と推察される。

そこで、サーマルコンパウンドの広がり及ぼす影響について考察を行った。図7(a)のようにねじ付近の高い応力位置にサーマルコンパウンドが存在した場合、モジュールとフィンの間のギャップは大きくなり、中央部に力が伝わらない可能性が危惧（きぐ）される。つまり、サーマルコンパウンドの塗布位置が広がり性に与えることが予想される。そこでサーマルコンパウンドの初期位置と広がり関係について調査した。図8にねじ周辺部のコンパウンドの有無によるサーマルコンパウンド広がり性を示す。ねじ位置にサーマルコンパウンドを塗布したサンプルAは中央部分がフィンに接触していない。ねじの周辺にコンパ

図8 サーマルコンパウンド塗布位置と広がり関係（実験結果）



ウンドを塗布しないサンプルBは全体にサーマルコンパウンドが広がった。

サーマルコンパウンドが広がらない箇所があると、空気層ができるため、熱抵抗が大幅に上昇する。そのためこれまでは、塗布するサーマルコンパウンド量を増やすことで広がり性が悪い場合の対策としてきた。

以上の結果から、サーマルコンパウンドを適切な位置に塗布することにより使用するサーマルコンパウンド量を少なくし、その結果としてサーマルコンパウンドの厚みを薄くすることが可能であると推定される。

④ サーマルコンパウンド推奨塗布方法の開発

4.1 メタルマスクデザイン

サーマルコンパウンド広がり性の要因調査結果を基に、富士電機推奨のサーマルコンパウンド塗布方法について検討した。サーマルコンパウンドの塗布方法としては、一般に①ディスペンサによる塗布、②ローラ、へらによる塗布、③メタルマスクによる塗布、がある。ディスペンサによる塗布はサーマルコンパウンドを広げる距離が大きくなり、サーマルコンパウンドの粘度の影響を受けやすい。またローラ、へらによる塗布方法は、塗布量のばらつきが大きく品質が安定しない。以上の理由によりサーマルコンパウンドの厚みをコントロールする方法を次のとおりにした。

- ① メタルマスクを用いて塗布を行う。
- ② サーマルコンパウンドを適切な位置に塗布する（ねじの周辺に塗布しない）。
- ③ IGBT モジュールとフィンの間に発生する応力値によりコンパウンド塗布量を変化させる。

図9にメタルマスクを用いたサーマルコンパウンドの塗布方法を、図10に富士電機推奨のメタルマスクデザインを示す。富士電機推奨メタルマスクにおいては、ねじ周辺にサーマルコンパウンドが塗布されないこと、FEM 解析により算出した応力値から各位置に必要なサーマルコンパウンド量を塗布するように設計してある。

次に塗布方法とコンパウンド広がり性に必要な最低コンパウンド厚み（塗布量）の関係について調査した。実験は同

図9 メタルマスクを用いたサーマルコンパウンド塗布方法

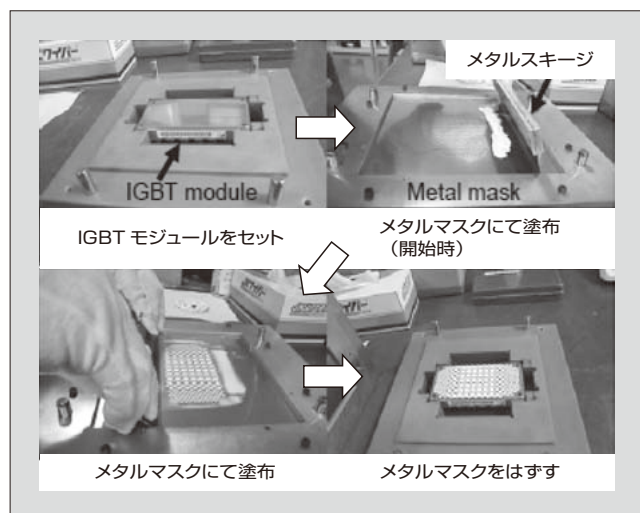


図10 推奨メタルマスクデザイン

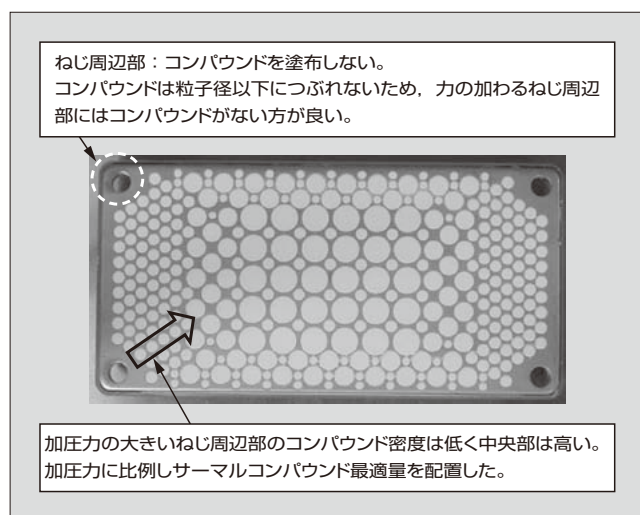


図11 サーマルコンパウンド塗布方法と広がり率の関係

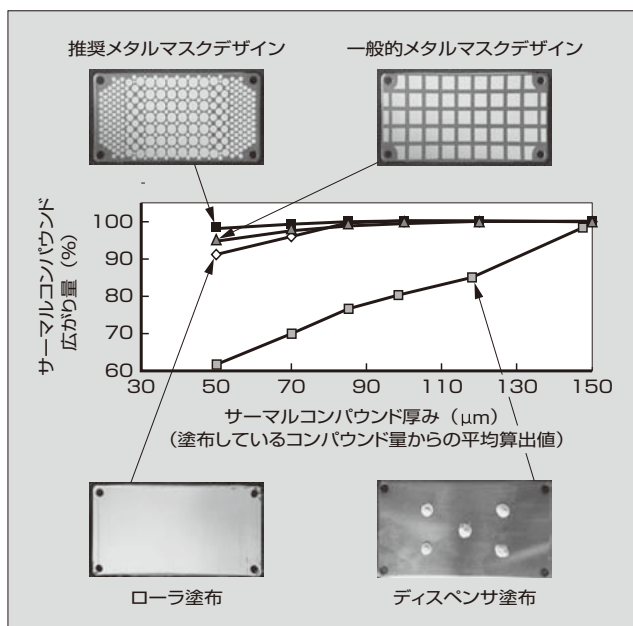
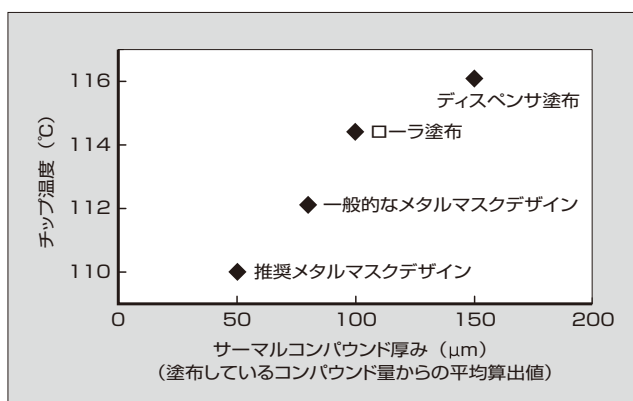


図12 サーマルコンパウンド塗布方法と IGBT チップ温度の関係



一の IGBT モジュール (サイズ 119 mm×59 mm)、フィンを用い、サーマルコンパウンドは HTC-01K を使用した。図11 にサーマルコンパウンドの塗布方法とサーマルコンパウンドの必要最低厚み (塗布量) の関係を示す。ローラを用いた場合には、約 100 μm のサーマルコンパウンド厚み分の質量を塗布することにより IGBT モジュールとフィン間全面にサーマルコンパウンドが広がる。一方、富士電機推奨のメタルマスクを用いることにより、約 50 μm までサーマルコンパウンドの厚みを薄くしても IGBT モジュールとフィン間全面にサーマルコンパウンドが広がる事が分かる。

以上の結果から、最適なメタルマスクパターンを用いて塗布することが有効であり、富士電機推奨のメタルマスクデザインを用いることにより、サーマルコンパウンドの塗布量の最適化に大きな効果があることが分かった。

4.2 チップ温度へ及ぼす影響

塗布方法が IGBT モジュールのチップ温度に及ぼす影響について調査した。

実験には同一 IGBT モジュール、フィンを用い IGBT チップに 80 A 印加し、5 分経過後のチップ温度を IR カメラにて測定した。図12 におおのの塗布方法におけるサーマルコンパウンド必要最低厚みと、それぞれの厚みによる IGBT チップ温度測定結果を示す。サーマルコンパウンド塗布方法によって IGBT チップ温度が異なることが分かる。

富士電機推奨のメタルマスクを用いたところ、従来の塗布方法と比較し最大で 6℃ IGBT チップ温度が下がることを確認した。IGBT チップ温度は、IGBT モジュールを用いた製品において寿命、効率に影響を与える最も大きな因子である。富士電機推奨メタルマスクを用いることにより、適切な量のサーマルコンパウンドを塗布することが可能となる。IGBT モジュールを用いた製品における接触熱抵抗の低減が実現できる。

5 あとがき

IGBT モジュールを用いた製品システムにおけるサーマルマネジメント方法の一つとして、サーマルコンパウンド

の塗布方法について検討した結果、次のことが明らかになった。

- (a) IGBT モジュールとフィンの間に発生している応力はコンパウンドの塗布位置が影響している。
- (b) サーマルコンパウンドの塗布には最適な位置と量がある。

以上の結果から、サーマルコンパウンド塗布に最適なメタルマスクデザインの提案を行った。サーマルコンパウンドの塗布方法をお客さまに開示して、富士電機の IGBT モジュールを使っただき、装置の高効率化や省エネルギーに貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 安保達明ほか. 大容量風力発電とパワーエレクトロニクス. 電気学会誌. 2009, vol.129, no.5, p.291-294.
- (2) Onozawa, Y. et al. Development of the next generation 1,200 V trench-gate FS-IGBT featuring lower EMI noise and lower switching loss. ISPSD 2007. p.13-16.
- (3) 小林靖幸ほか. 最新技術を用いた新コンセプトIGBT-PIM. 富士時報. 2006, vol.79, no.5, p.358-361.
- (4) Nishimura Y. et al. Development of a New-Generation RoHS IGBT Module Structure for Power Management. Transaction of the Japan Institute of Electronics Packaging. 2008, vol.1, no.1.
- (5) 高久拓ほか. IGBTモジュールの損失・温度シミュレータ. 富士時報. 2008, vol.81, no.6, p.438-442.
- (6) 美田邦彦. IT関連の熱管理対策材料の開発 シリコン系熱伝導性材料. 日本ゴム協会誌. 2005, vol.78, no.4, p.153-157.



西村 芳孝

パワー半導体のパッケージングおよびアセンブリ設計技術開発に従事。現在、富士電機システムズ株式会社半導体事業本部半導体統括部パッケージ・実装技術部。日本材料学会会員，エレクトロニクス実装学会会員。



大野田 光金

パワー半導体のパッケージングおよびアセンブリ設計技術開発に従事。現在、富士電機システムズ株式会社半導体事業本部半導体統括部パッケージ・実装技術部。



百瀬 文彦

MIC, IGBT モジュールのパッケージ開発に従事。現在、富士電機システムズ株式会社半導体事業本部半導体統括部パッケージ・実装技術部。





＊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。